

**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ÖTEKTİK ALTI AL-Sİ DÖKÜM ALAŞIMLARINDA BİLEŞİMİN  
OPTİMİZASYONU İLE DÖKÜM KABİLİYETİ VE MEKANİK  
ÖZELLİKLERİN İYİLEŞTİRİLMESİ**

**DOKTORA TEZİ  
Murat Güçlü BÜYÜKUNCU**

**Anabilim Dalı : Metalurji ve Malzeme Mühendisliği**

**Programı : Üretim Metalurjisi**

**NİSAN 2010**

**ÖTEKTİK ALTI AL-Sİ DÖKÜM ALAŞIMLARINDA BİLEŞİMİN  
OPTİMİZASYONU İLE DÖKÜM KABİLİYETİ VE MEKANİK  
ÖZELLİKLERİN İYİLEŞTİRİLMESİ**

**DOKTORA TEZİ**  
**Murat Güçlü BÜYÜKUNCU**  
**(506002202)**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 15 Ocak 2010**

**Tezin Savunulduğu Tarih : 22 Nisan 2010**

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. Onuralp YÜCEL (İTÜ)**  
**Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Ercan AÇMA (İTÜ)**  
**Prof. Dr. Arif GÜLLÜOĞLU (Marmara Ü.)**  
**Doç. Dr. Filiz ÇINAR ŞAHİN (İTÜ)**  
**Yrd. Doç. Dr. Bora DERİN (İTÜ)**

**NİSAN 2010**



## ÖNSÖZ

Özel sektörde çalışmanın getirdiği zorlukları aşmada ve doktora çalışmalarında bana çok büyük destek veren değerli hocam Prof. Dr. Onuralp YÜCEL'e teşekkürlerimi borç bilirim.

Proje süresince desteğini esirgemeyen CMS Arge Müdürü Met. Müh. Sn. Şükrü İRMAK'a teşekkürlerimi borç bilirim.

Tez önerileri aşamalarında bana yol gösteren değerli hocalarım Prof. Dr. Ercan AÇMA ve Doç. Dr. Filiz ÇINAR'a teşekkürlerimi sunarım.

Kimyasal analiz ve karakterizasyon çalışmalarında bana yardımlarını esirgemeyen Met. Yük. Müh. Murat ALKAN, Kim. Bihter ZEYTUNCU, Tekniker Hasan DİNÇER ve Tekniker Hüseyin SEZER'e, diğer bir taraftan literatür çalışmalarında bana destek veren sevgili arkadaşım Yrd. Doç. Dr. C. Bora DERİN'e teşekkür ederim.

Otomotiv sektörü yan sanayisinin ileri gelen kurumlarından biri olan CMS ailesi çalışanlarının projem süresince sağlamış oldukları destekler için ve ayrıca deney tasarımı analizi programı kullanımında bana çok büyük yardımı olan Met. Yük. Müh. Onur GÜVEN'e, Met. Yük. Müh. Doğan ALPDORUK'a ve Met. Müh. Özkan BEKİROĞLU'na teşekkür ederim.

Bugünlere gelmemde büyük pay sahibi olan, beni sürekli destekleyen ve yanımda olan aileme şükran ve minnetlerimi sunarım.

Ocak 2010

Murat Güçlü BÜYÜKUNCU

Metalurji ve Malzeme Yük.Müh.



## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

ÖNSÖZ.....	iii
İÇİNDEKİLER .....	v
KISALTMALAR .....	ix
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xi
ŞEKİL LİSTESİ.....	xiii
SEMBOL LİSTESİ.....	xix
ÖZET.....	xxi
SUMMARY .....	xxiii
<b>1. GİRİŞ VE AMAÇ.....</b>	<b>1</b>
<b>2. ALÜMİNYUM.....</b>	<b>3</b>
2.1 Alüminyumun Özellikleri .....	3
2.2 Alüminyumun Önemi .....	5
2.3 Alüminyum Üretimi.....	6
2.4 Alaşımlamanın Esasları ve Alüminyumun Alaşımları .....	7
2.5 Isıl İşlemlerle Alüminyum Alaşımları .....	8
2.6 Isıl İşlemsiz Alüminyum Alaşımları .....	8
2.7 Ürün Şekilleri.....	8
2.8 Ürün Sınıfları .....	9
2.9 Alüminyum Döküm Alaşımları .....	10
2.9.1 Alüminyum döküm alaşımları avantajları ve sınırları .....	11
2.9.2 Alüminyum döküm alaşımları genel tanımlar .....	12
2.9.3 Alüminyum döküm alaşımları karakteristikleri.....	13
2.9.4 Alüminyum döküm temper sistemi.....	13
2.9.5 Alüminyum silisyum alaşımları.....	14
2.9.6 Alaşım elementlerinin etkileri.....	15
2.9.7 Alüminyum alaşımlarında safsızlıklar .....	18
2.9.8 Alüminyum döküm prosesi seçimi .....	21
2.9.9 Alüminyum döküm yöntemleri.....	22
2.9.9.1 Basınçlı döküm yöntemi .....	22
2.9.9.2 Düşük basınçlı döküm yöntemi.....	23
2.9.9.3 Kum döküm yöntemi .....	23
2.9.9.4 Cosworth döküm yöntemi (Roll-Over yöntemi).....	23
2.9.9.5 VAW- maça paketleme yöntemi.....	24
2.9.9.6 Hvs- yöntemi.....	24
2.9.9.7 Metal kalıba gravite döküm .....	24
2.9.9.8 Karşı basınçlı döküm yöntemi (Counter-Pressure casting).....	25
2.9.9.9 Düşey sürekli döküm .....	25
2.9.9.10 Hassas döküm yöntemi .....	25
2.9.9.11 Dolu kalıp döküm yöntemi (Lost-Foam) .....	25
2.9.9.12 Sıvı presleme yöntemi (Squeeze Casting) .....	26

2.9.9.13 Tikso şekillendirme yöntemi (Thixhoforming).....	26
2.10 Mikro Yapının Özelliklere Etkisi.....	27
2.10.1 İntermetalik fazlar .....	28
2.10.2 Dendrit kol uzaması .....	28
2.10.3 Tane inceltme .....	29
2.10.4 Alüminyum silisyum ötektik modifikasyonu.....	30
2.10.5 Alüminyum dökümünde porozite ve inklüzyonların etkileri.....	37
2.10.5.1 Hidrojen porozitesi.....	38
2.10.5.2 Çekinti porozitesi .....	38
2.10.5.3 Inklüzyonlar .....	39
2.10.5.4 Hidrojen, çekinti ve inklüzyonların birleşik etkileri .....	40
2.10.6 Metalografi.....	41
2.11 Alüminyum Döküm Alaşımlarının Sıvı Metal İşlemi.....	42
2.11.1 Döküm parçaların katılaşması.....	43
2.11.2 Sıvı kimyasının etkisi.....	44
2.11.3 Gaz giderme .....	45
2.11.4 Inklüzyon giderme .....	48
2.11.5 Tane inceltme .....	52
2.11.6 Modifikasyon .....	55
2.12 Alüminyum Döküm Isıl İşlemi .....	60
2.12.1 Çözelti ısıl işlemi .....	62
2.12.2 Su verme .....	62
2.12.3 Çökelti ısıl işlemi / yaşlandırma.....	63
2.12.4 % 4-% 7 Si arası ısıl işlemlili ticari alaşımların özellikleri.....	63
2.12.4.1 308.0 (5,5 Si-4,5 Cu).....	63
2.12.4.2 319.0 (6,5 Si-3,5 Cu).....	63
2.12.4.3 355.0, C355.0 (5 Si-1,3 Cu-0,5 Mg) .....	64
2.12.4.4 356.0, A356.0 (7 Si-0,3 Mg) .....	65
2.12.4.5 357.0, A357.0 (7 Si-0,5 Mg) .....	65
2.12.4.6 443.0, A443.0, B443.0, C443.0 (5,2 Si).....	66
2.13 Katılaşma mekanizmaları.....	66
2.13.1 Eşsiz büyüme .....	66
2.13.2 Kısmen eşli büyüme.....	67
2.13.3 Eşli büyüme.....	67
2.14 Alaşım Faz Diyagramları .....	67
2.15 Çeşitli Literatür Çalışmaları.....	68
2.15.1 AA3003 alaşımlarının Zn ve Si ilavesi ile yönlendirilmiş katılaşması	68
2.15.2 Ötektik Al-Si döküm alaşımlarına Na ve Sr'un birlikte ilavelerinin etkileri .....	69
2.15.3 %1-4 arası Cu ilavelerinin yarı-katı şekilli 357 Al alaşımına etkileri..	69
2.15.4 Alüminyum jant sektörü.....	69
2.15.5 Zamak alaşımları.....	70
2.15.6 Kobe Steel şirketi buluşu .....	71
2.15.7 SPX şirketi çalışması .....	71
2.15.8 Nippon Light metal çalışması .....	72
2.15.9 Worcester metal işlem enstitüsü çalışması.....	73
2.15.10 G.D. Searle & Co çalışması .....	74
2.15.11 Fang, Que-Tsang çalışması .....	76
2.15.12 Alabi, Muftau Masud çalışması .....	76
2.15.13 Ulmann, John E. Granger çalışması.....	77

2.15.14	Lasalle, Jerry, C çalışması .....	77
2.15.15	Philip R. Sperry çalışması.....	77
2.15.16	Richard S. Lindberg çalışması .....	77
2.15.17	Myron G. Urdea çalışması .....	77
2.15.18	Tadao Ito ve Nippon firması çalışması .....	78
2.15.19	Roger Huet çalışması .....	78
2.15.20	Masahiro Ogawa çalışması .....	78
2.15.21	Leggett ve Platt Şirketi çalışması.....	78
2.15.22	Atashi Ota çalışması .....	78
2.15.23	Philippe Meyer çalışması .....	79
2.15.24	Hubert Koch çalışması .....	79
<b>3.</b>	<b>DENEYSEL ÇALIŞMALAR .....</b>	<b>81</b>
3.1	Deney Tasarımı ve Minitab Programı .....	81
3.2	Deneyde Kullanılan Malzemeler .....	82
3.3	İndüksiyon Ocağı.....	84
3.4	Ergitme İşleminde Kullanılan Yardımcı Ekipmanlar .....	85
3.5	Metal Health Döküm Sistemi .....	86
3.6	DAS Kalıbı .....	87
3.7	Spektrometre .....	88
3.8	Torna .....	89
3.9	Elektrikli Testere.....	89
3.10	Endüstriyel Isıl İşlem Fırını .....	89
3.11	Isıl İşlem Numune Kafesi .....	90
3.12	Çekme Cihazı.....	91
3.13	Sertlik Cihazı .....	91
3.14	Aydınlatma Cihazı .....	91
3.15	Yüzey Hazırlama ve Parlatma Cihazı .....	92
3.16	Mikroskop, DAS ve Porozite Yazılımları.....	92
3.17	Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM).....	92
3.18	X-Işını Difraktometre Cihazı (XRD).....	93
<b>4.</b>	<b>DENEYSEL SONUÇLAR .....</b>	<b>95</b>
4.1	Deney Tasarımı ve Minitab Programı Çıktıları .....	97
4.2	Ergitme ve Döküm Numunelerinin Kimyasal Analiz Sonuçları .....	100
4.3	Metal Health Kalıplarına ve DAS Kalıbına Döküm ve Çıktıların Eldesi... ..	103
4.4	K-Testi, Akışkanlık ve Sıcak Yırtılma Numunelerinin Analizi.....	105
4.5	Metal Health Çekme ve DAS Çekme Numunelerinin Analizi .....	113
4.6	Yüzey Hazırlama İşlemleri .....	116
4.7	Sertlik Numunelerinin Analizi.....	118
4.8	DAS Numunelerinin DAS Analizi ve % Porozite Analizi .....	119
4.9	Makro Numunelerinin Analizi .....	121
4.10	Mikro Numunelerinin Analizi .....	138
4.11	SEM Analizi .....	171
4.12	XRD Analizi .....	182
<b>5.</b>	<b>DENEYSEL SONUÇLARIN İRDELENMESİ .....</b>	<b>189</b>
5.1	Mekanik Test Sonuçlarının Ticari Referans Ürünlerle Kıyaslanması .....	189
5.2	Tüm Analiz Sonuçlarının Minitab Programında Yorumu ve İrdelenmesi ..	195
<b>6.</b>	<b>SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....</b>	<b>217</b>
6.1	Genel Sonuçlar ve Değerlendirmeler.....	217
6.2	Öneriler .....	222
	<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>225</b>

<b>EKLER.....</b>	<b>229</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>263</b>

## KISALTMALAR

<b>HB</b>	: Brinell Sertliği
<b>F</b>	: Temper sistemi, döküm hali
<b>O</b>	: Temper sistemi, tavlannmış
<b>T4</b>	: Temper sistemi, çözeltiye alınmış ve yaşlandırılmış
<b>T5</b>	: Temper sistemi, çökelti sertleştirilmiş
<b>T6</b>	: Temper sistemi, çözelti sertleştirilmiş, su verilmiş ve çökelti sertleştirilmiş
<b>T7</b>	: Temper sistemi, çözelti ısı işlenmiş, su verilmiş ve aşırı yaşlandırılmış
<b>yy</b>	: Yüzyıl
<b>DAS</b>	: Dendrit kol uzaması
<b>SEM</b>	: Taramalı Elektron Mikroskopu
<b>XRD</b>	: X-Işını Difraktometre
<b>REF</b>	: Referans
<b>R</b>	: 7 Si içeren referans alaşım



## ÇİZELGE LİSTESİ

### Sayfa

Çizelge 2.1 : Saf alüminyumun özellikleri. ....	4
Çizelge 2.2 : Dünya birincil alüminyum üretimi. ....	7
Çizelge 2.3 : Alüminyum döküm alaşımlarının özellikleri. ....	11
Çizelge 2.4 : Alüminyum döküm alaşımları % bileşim miktarları ile alt ve üst limit sınırları. ....	14
Çizelge 2.5 : Modifiyeli ve modifiyesiz alüminyum döküm alaşımlarının tipik mekanik özellikleri. ....	35
Çizelge 2.6 : Bazı ısıtılmış alaşımların özellikleri. ....	36
Çizelge 2.7 : Bazı ısıtılmamış alaşımların özellikleri. ....	37
Çizelge 2.8 : Hafif döküm alaşımlarında metalografik değerlendirmelerin ana uygulamaları. ....	41
Çizelge 2.9 : Bilinen üç alüminyum alaşımının nominal bileşimleri. ....	42
Çizelge 2.10 : AlSi7Mg ve AlSi11Mg alaşımlarının kimyasal bileşimi. ....	70
Çizelge 2.11 : AlSi7Mg ve AlSi11Mg alaşımlarının istenen mekanik özellikleri. ...	70
Çizelge 2.12 : Zamak alaşımları kimyasal özellikleri. ....	70
Çizelge 2.13 : Zamak alaşımları mekanik özellikleri. ....	71
Çizelge 2.14 : Das Gupta çalışması, A356 ve 357 alaşımı kimyasal özellikleri. ....	71
Çizelge 2.15 : Miki çalışması A360 ve A380 alaşımı genel kimyasal özellikleri. ....	72
Çizelge 2.16 : Isao Miki çalışması, A360 & A380 alaşımı kimyasal özellikleri. ....	72
Çizelge 2.17 : Isao Miki çalışması, A360 & A380 alaşımı mekanik özellikleri. ....	73
Çizelge 2.18 : Dash Manas, Makhlof çalışması, alaşım elementleri yüksek ve düşük seviyeler. ....	73
Çizelge 2.19 : ADC10 ve ADC12 kimyasal bileşimler. ....	74
Çizelge 2.20 : Oshiro çalışması kimyasal bileşimler. ....	75
Çizelge 2.21 : Oshiro çalışması döküm hali mekanik özellikler. ....	75
Çizelge 2.22 : Oshiro çalışması T6 ısıtılmış mekanik özellikler. ....	76
Çizelge 3.1 : AlSi7Mg külçe kimyasal bileşimi. ....	82
Çizelge 3.2 : Master alaşım külçelerin kimyasal bileşimi. ....	83
Çizelge 4.1 : Deneysel tasarımı çıktıları (d:düşük, y:yüksek). ....	98
Çizelge 4.2 : Deneysel tasarımı final çıktıları. ....	99
Çizelge 4.3 : 32 adet deneyin kimyasal analiz sonuçları. ....	102
Çizelge 5.1 : En iyi değerlerin elde edilmesi için deneysel tasarım programı ile hesaplanmış bileşimler (Ref: referans alaşım, % Fe = maks 0,15). ...	189
Çizelge 5.2 : En iyi mekanik değerlerin elde edildiği numunelerin ölçülmüş kimyasal bileşimleri. ....	190
Çizelge A.1 : Al-Bi faz diyagramı faz dağılımı. ....	229
Çizelge A.2 : Al-Ca faz diyagramı faz dağılımı. ....	230
Çizelge A.3 : Al-Ce faz diyagramı faz dağılımı. ....	231
Çizelge A.4 : Al-Co faz diyagramı faz dağılımı. ....	232
Çizelge A.5 : Al-Cu faz diyagramı faz dağılımı. ....	233

<b>Çizelge A.6</b> : Al-Fe faz diyagramı faz dağılımı.....	234
<b>Çizelge A.7</b> : Al-Mg faz diyagramı faz dağılımı.....	235
<b>Çizelge A.8</b> : Al-Mn faz diyagramı dağılımı.....	236
<b>Çizelge A.9</b> : Al-Si faz diyagramı faz dağılımı.....	237
<b>Çizelge A.10</b> : Al-Sr faz diyagramı faz dağılımı.....	238
<b>Çizelge A.11</b> : Al-Ti faz diyagramı faz dağılımı.....	239
<b>Çizelge A.12</b> : Al-Zn faz diyagramı faz dağılımı.....	240
<b>Çizelge A.13</b> : Spektromax-M spektrometre element analiz limitleri.....	241
<b>Çizelge A.14</b> : K-testi analiz sonuçları.....	242
<b>Çizelge A.15</b> : Akışkanlık kalıbı toplam parmak boyları.....	243
<b>Çizelge A.16</b> : Sıcak yırtılma kalıbı çatlak oluşumu.....	244
<b>Çizelge A.17</b> : Metal Health çekme kalıbı çekme test sonuçları.....	245
<b>Çizelge A.18</b> : Metal Health çekme kalıbı detaylı çekme test sonuçları.....	246
<b>Çizelge A.19</b> : DAS kalıbı detaylı DAS çekme test sonuçları.....	251
<b>Çizelge A.20</b> : Sertlik değerleri sonuçları (döküm hali-ısıt işleme).....	255
<b>Çizelge A.21</b> : DAS analizi sonuçları.....	256
<b>Çizelge A.22</b> : % Porozite sonuçları.....	257
<b>Çizelge A.23</b> : En iyi mekanik özelliklerin elde edildiği deneylerin ticari referans ürünle karşılaştırılması.....	258
<b>Çizelge A.24</b> : En iyi mekanik özelliklerin elde edildiği DAS deneylerinin ticari referans ürünle karşılaştırılması.....	259
<b>Çizelge A.25</b> : En iyi mekanik özelliklerin elde edildiği deneylerde SEM analizi sonucu tespit edilen elementlerin % ağırlıkça miktarları.....	261

## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 2.1 : Alüminyum üretimi. ....	6
Şekil 2.2 : Alüminyum silisyum faz diyagramı. ....	15
Şekil 2.3 : Ticari alaşımlarda önemli sayılacak miktarda bulunan elementler. ....	19
Şekil 2.4 : Al-Si döküm alaşımının temel özellikleri. ....	27
Şekil 2.5 : Dendrit hücre boyu ve çekme özelliği ilişkisi (A356.0-T62 alaşımı). ....	29
Şekil 2.6 : Al-Si7 döküm hali tane inceltici etkileri a) Tane incelticisiz b) Tane incelticili. ....	30
Şekil 2.7 : Al-Si ötektik modifikasyon tipleri. ....	31
Şekil 2.8 : Sodyum ve stronsiyum modifikatörlerin etkinliği. ....	32
Şekil 2.9 : Al-Si ötektik modifikasyon seviyeleri (A'dan, F'ye artmaktadır). ....	33
Şekil 2.10 : Alaşımının mikroyapıları. ....	36
Şekil 2.11 : Alüminyum döküm alaşımlarındaki tipik poroziteler. ....	37
Şekil 2.12 : Al-Si12 kum döküm çekme çubuğunda inklüzyonun çekme dayanımına etkileri. ....	40
Şekil 2.13 : Alüminyum döküm alaşımlarında dendritler arası çeşitli fazları gösteren tipik mikroyapılar. ....	44
Şekil 2.14 : A356 alaşımlarında katı parçaların bir fonksiyonu olarak dendritler arası sıvıda hidrojen konsantrasyonunun ölçülen değişimi. ....	46
Şekil 2.15 : Alüminyum dökümlerde tipik inklüzyonlar. ....	49
Şekil 2.16 : Titanyum konsantrasyonunun bir fonksiyonu olarak 319 döküm alaşımlarında tane yapıları. ....	52
Şekil 2.17 : 319 Döküm alaşımlarında ortalama tane ölçüsünün titanyum konsantrasyonu ile değişimi. ....	53
Şekil 2.18 : Titanyum konsantrasyonunun bir fonksiyonu olarak 319 döküm alaşımlarında ortalama porozite. ....	54
Şekil 2.19 : 319 Döküm alaşımlarında ortalama gözenek ölçüsünün değişimi. ....	54
Şekil 2.20 : Silisyum parça şekillerini gösteren mikrograflar. ....	55
Şekil 2.21 : Stronsiyum konsantrasyonlu silisyum parça şekillerinin değişimini gösteren mikrograflar. ....	56
Şekil 2.22 : Stronsiyum konsantrasyonlu silisyum parça ortalama çapı ve görünme oranının değişimi. ....	57
Şekil 2.23 : Stronsiyum konsantrasyonunun bir fonksiyonu olarak % porozite. ....	58
Şekil 2.24 : Eriyik ısıtma süresinin bir fonksiyonu olarak modifiye edilmemiş ve stronsiyum modifiyeli A356 alaşımlarında silisyum parça şekillerini gösteren mikrograflar. ....	59
Şekil 2.25 : Eriyik ısıtma süresinin bir fonksiyonu olarak modifiye edilmemiş ve Sr modifiyeli A356 alaşımlarında kalite endeksi ve çentikli gerilme direnci ve akma dayanımının oranının değişimi. ....	60
Şekil 3.1 : Master alaşımlar. ....	84
Şekil 3.2 : 5M alüminyum indüksiyon ocağı. ....	84

Şekil 3.3 : 5M İndüksiyon ocağı yardımcı ekipmanlar.....	85
Şekil 3.4 : Akışkanlık kalıbı. ....	86
Şekil 3.5 : K-testi kalıbı. ....	86
Şekil 3.6 : Sıcak yırtılma kalıbı. ....	87
Şekil 3.7 : Çekme testi kalıbı. ....	87
Şekil 3.8 : DAS kalıbı. ....	88
Şekil 3.9 : Isıl işlem sıcaklık zaman eğrisi.....	90
Şekil 3.10 : Isıl işlem numune kafesi. ....	90
Şekil 3.11 : Çekme çubuğu ölçüleri.....	91
Şekil 3.12 : Gretag Macbeth aydınlatma cihazı. ....	92
Şekil 4.1 : Proje iş akış şeması.....	96
Şekil 4.2 : a) Deneyleerde kullanılan fırının ergitme esnasında üstten görünüşü b) Gaz giderme c) Azot tüpü. ....	100
Şekil 4.3 : Makro döküm numuneleri. ....	101
Şekil 4.4 : Spektrometre döküm numuneleri. ....	101
Şekil 4.5 : Metal Health sistemi ısıtılmasında kullanılan yalıtım battaniye görüntüsü. ....	103
Şekil 4.6 : Metal Health sistemine döküm. ....	103
Şekil 4.7 : Metal Health sistemi numuneleri.....	104
Şekil 4.8 : DAS kalıbına döküm. ....	104
Şekil 4.9 : DAS kalıbı numuneleri.....	105
Şekil 4.10 : Master alaşım kalıpları ve 32 adet deney çıktısı külçeler.....	105
Şekil 4.11 : K-testi analizi a) Tüm numuneler b) Numune üstten görünüm c) Kırılmış numune.....	106
Şekil 4.12 : K-testi analizi değerleri. ....	107
Şekil 4.13 : K-testi örnek inklüzyon görünümü.....	107
Şekil 4.14 : Akışkanlık kalıpları parmak boyları.....	108
Şekil 4.15 : Akışkanlık kalıpları parmak boyları analizi. ....	109
Şekil 4.16 : Sıcak yırtılma kalıbı % 7 Si içeren 1 nolu alaşım numunesinde oluşan çatlak. ....	110
Şekil 4.17 : Sıcak yırtılma kalıbı % 4 Si içeren 7 nolu alaşım numunesinde oluşan çatlak. ....	110
Şekil 4.18 : Sıcak yırtılma kalıbı % 7 Si içeren 9 nolu alaşım numunesinde oluşan çatlak. ....	111
Şekil 4.19 : Sıcak yırtılma kalıbı % 7 Si içeren 11 nolu alaşım numunesinde oluşan çatlak. ....	111
Şekil 4.20 : Sıcak yırtılma kalıbı % 7 Si içeren 22 nolu alaşım numunesinde oluşan çatlak. ....	112
Şekil 4.21 : Sıcak yırtılma kalıbı % 7 Si içeren 29 nolu alaşım numunesinde oluşan çatlak. ....	112
Şekil 4.22 : Metal Health işlenmemiş çekme çubukları (tornalama öncesi). ....	113
Şekil 4.23 : DAS çekme çubuğu kesit bölgeleri ve ham çekme çubukları.....	113
Şekil 4.24 : Metal Health kalıbı numuneleri akma dayanımları (döküm-ısıl işlem). ....	114
Şekil 4.25 : Metal Health kalıbı numuneleri çekme dayanımları (döküm-ısıl işlem). ....	114
Şekil 4.26 : Metal Health kalıbı numuneleri % uzamaları (döküm-ısıl işlem). ....	115
Şekil 4.27 : DAS kalıbı numuneleri akma dayanımı (döküm-ısıl İşlem). ....	115
Şekil 4.28 : DAS kalıbı numuneleri çekme dayanımı (döküm-ısıl işlem). ....	116
Şekil 4.29 : DAS kalıbı numuneleri % uzamaları (döküm-ısıl işlem). ....	116

Şekil 4.30 : Sertlik ölçümü yapılan 32 adet numune. ....	118
Şekil 4.31 : Sertlik değerleri (döküm hali-ısııl işlem). ....	118
Şekil 4.32 : DAS kalıbı numuneleri döküm hali (yüzey hazırlama öncesi). ....	119
Şekil 4.33 : DAS analizi ve % porozite analizi numunesi. ....	120
Şekil 4.34 : Soğuma kesiti boyunca DAS değerleri. ....	120
Şekil 4.35 : % Porozite miktarı. ....	121
Şekil 4.36 : % 7 Si içeren referans alaşımının makro yapısı. ....	121
Şekil 4.37 : % 7 Si içeren 1 nolu alaşımın makro yapısı. ....	122
Şekil 4.38 : % 4 Si içeren 2 nolu alaşımın makro yapısı. ....	122
Şekil 4.39 : % 7 Si içeren 3 nolu alaşımın makro yapısı. ....	123
Şekil 4.40 : % 4 Si içeren 4 nolu alaşımın makro yapısı. ....	123
Şekil 4.41 : % 7 Si içeren 5 nolu alaşımın makro yapısı. ....	124
Şekil 4.42 : % 4 Si içeren 6 nolu (eksik değerli) alaşımın makro yapısı. ....	124
Şekil 4.43 : % 4 Si içeren 6 nolu alaşımın makro yapısı. ....	125
Şekil 4.44 : % 4 Si içeren 7 nolu alaşımın makro yapısı. ....	125
Şekil 4.45 : % 4 Si içeren 8 nolu alaşımın makro yapısı. ....	126
Şekil 4.46 : % 7 Si içeren 9 nolu alaşımın makro yapısı. ....	126
Şekil 4.47 : % 4 Si içeren 10 nolu alaşımın makro yapısı. ....	127
Şekil 4.48 : % 7 Si içeren 11 nolu alaşımın makro yapısı. ....	127
Şekil 4.49 : % 7 Si içeren 12 nolu alaşımın makro yapısı. ....	128
Şekil 4.50 : % 7 Si içeren 13 nolu alaşımın makro yapısı. ....	128
Şekil 4.51 : % 4 Si içeren 14 nolu alaşımın makro yapısı. ....	129
Şekil 4.52 : % 7 Si içeren 15 nolu alaşımın makro yapısı. ....	129
Şekil 4.53 : % 4 Si içeren 16 nolu alaşımın makro yapısı. ....	130
Şekil 4.54 : % 4 Si içeren 17 nolu alaşımın makro yapısı. ....	130
Şekil 4.55 : % 4 Si içeren 18 nolu alaşımın makro yapısı. ....	131
Şekil 4.56 : % 4 Si içeren 19 nolu alaşımın makro yapısı. ....	131
Şekil 4.57 : % 4 Si içeren 20 nolu alaşımın makro yapısı. ....	132
Şekil 4.58 : % 7 Si içeren 21 nolu alaşımın makro yapısı. ....	132
Şekil 4.59 : % 7 Si içeren 22 nolu alaşımın makro yapısı. ....	133
Şekil 4.60 : % 7 Si içeren 23 nolu alaşımın makro yapısı. ....	133
Şekil 4.61 : % 4 Si içeren 24 nolu alaşımın makro yapısı. ....	134
Şekil 4.62 : % 4 Si içeren 25 nolu alaşımın makro yapısı. ....	134
Şekil 4.63 : % 7 Si içeren 26 nolu alaşımın makro yapısı. ....	135
Şekil 4.64 : % 7 Si içeren 27 nolu alaşımın makro yapısı. ....	135
Şekil 4.65 : % 4 Si içeren 28 nolu alaşımın makro yapısı. ....	136
Şekil 4.66 : % 7 Si içeren 29 nolu alaşımın makro yapısı. ....	136
Şekil 4.67 : % 7 Si içeren 30 nolu alaşımın makro yapısı. ....	137
Şekil 4.68 : % 7 Si içeren 31 nolu alaşımın makro yapısı. ....	137
Şekil 4.69 : % 4 Si içeren 32 nolu alaşımın makro yapısı. ....	138
Şekil 4.70 : % 7 Si içeren referans alaşım mikro yapısı (a) 5x ve (b) 20x büyütme	138
Şekil 4.71 : % 7 Si içeren 1 nolu alaşım mikro yapısı (a) 5x ve (b) 20x büyütme. .	139
Şekil 4.72 : % 4 Si içeren 2 nolu alaşım mikro yapısı (a) 5x ve (b) 20x büyütme. .	140
Şekil 4.73 : % 7 Si içeren 3 nolu alaşım mikro yapısı (a) 5x ve (b) 20x büyütme. .	141
Şekil 4.74 : % 4 Si içeren 4 nolu alaşım mikro yapısı (a) 5x ve (b) 20x büyütme. .	142
Şekil 4.75 : % 7 Si içeren 5 nolu alaşım mikro yapısı (a) 5x ve (b) 20x büyütme. .	143
Şekil 4.76 : % 4 Si içeren 6 nolu (eksik değerli) alaşım mikro yapısı (a) 5x ve (b) 20x büyütme. ....	144
Şekil 4.77 : % 4 Si içeren 6 nolu alaşım mikro yapısı (a) 5x ve (b) 20x büyütme. .	145
Şekil 4.78 : % 4 Si içeren 7 nolu alaşım mikro yapısı (a) 5x ve (b) 20x büyütme. .	146

Şekil 4.79 : % 4 Si içeren 8 nolu alaşım mikro yapısı (a) 5x ve (b) 20x büyütme. .	147
Şekil 4.80 : % 7 Si içeren 9 nolu alaşım mikro yapısı (a) 5x ve (b) 20x büyütme. .	148
Şekil 4.81 : % 4 Si içeren 10 nolu alaşım mikro yapısı (a) 5x ve (b) 20x büyütme.	149
Şekil 4.82 : % 7 Si içeren 11 nolu alaşım mikro yapısı (a) 5x ve (b) 20x büyütme.	150
Şekil 4.83 : % 7 Si içeren 12 nolu alaşım mikro yapısı (a) 5x ve (b) 20x büyütme.	151
Şekil 4.84 : % 7 Si içeren 13 nolu alaşım mikro yapısı (a) 5x ve (b) 20x büyütme.	152
Şekil 4.85 : % 4 Si içeren 14 nolu alaşım mikro yapısı (a) 5x ve (b) 20x büyütme.	153
Şekil 4.86 : % 7 Si içeren 15 nolu alaşım mikro yapısı (a) 5x ve (b) 20x büyütme.	154
Şekil 4.87 : % 4 Si içeren 16 nolu alaşım mikro yapısı (a) 5x ve (b) 20x büyütme.	155
Şekil 4.88 : % 4 Si içeren 17 nolu alaşım mikro yapısı (a) 5x ve (b) 20x büyütme.	156
Şekil 4.89 : % 4 Si içeren 18 nolu alaşım mikro yapısı (a) 5x ve (b) 20x büyütme.	157
Şekil 4.90 : % 4 Si içeren 19 nolu alaşım mikro yapısı (a) 5x ve (b) 20x büyütme.	158
Şekil 4.91 : % 4 Si içeren 20 nolu alaşım mikro yapısı (a) 5x ve (b) 20x büyütme.	159
Şekil 4.92 : % 7 Si içeren 21 nolu alaşım mikro yapısı (a) 5x ve (b) 20x büyütme.	160
Şekil 4.93 : % 7 Si içeren 22 nolu alaşım mikro yapısı (a) 5x ve (b) 20x büyütme.	161
Şekil 4.94 : % 7 Si içeren 23 nolu alaşım mikro yapısı (a) 5x ve (b) 20x büyütme.	162
Şekil 4.95 : % 4 Si içeren 24 nolu alaşım mikro yapısı (a) 5x ve (b) 20x büyütme.	163
Şekil 4.96 : % 4 Si içeren 25 nolu alaşım mikro yapısı (a) 5x ve (b) 20x büyütme.	164
Şekil 4.97 : % 7 Si içeren 26 nolu alaşım mikro yapısı (a) 5x ve (b) 20x büyütme.	165
Şekil 4.98 : % 7 Si içeren 27 nolu alaşım mikro yapısı (a) 5x ve (b) 20x büyütme.	166
Şekil 4.99 : % 4 Si içeren 28 nolu alaşım mikro yapısı (a) 5x ve (b) 20x büyütme.	167
Şekil 4.100 : % 7 Si içeren 29 nolu alaşım mikro yapısı (a) 5x (b) 20x büyütme. .	168
Şekil 4.101 : % 7 Si içeren 30 nolu alaşım mikro yapısı (a) 5x (b) 20x büyütme. .	169
Şekil 4.102 : % 7 Si içeren 31 nolu alaşım mikro yapısı (a) 5x (b) 20x büyütme. .	170
Şekil 4.103 : % 4 Si içeren 32 nolu alaşım mikro yapısı (a) 5x (b) 20x büyütme. .	171
Şekil 4.104 : % 7 Si içeren 1 nolu alaşımın SEM görüntüleri a) Genel yapı b) % Al dağılımı c) % Si dağılımı. ....	172
Şekil 4.105 : % 7 Si içeren 15 nolu alaşımın SEM görüntüleri a) Genel yapı b) % Al dağılımı c) % Si dağılımı. ....	173
Şekil 4.106 : % 7 Si içeren 3 nolu alaşımın SEM görüntüleri a) Genel yapı b) % Al dağılımı c) % Si dağılımı. ....	174
Şekil 4.107 : % 7 Si içeren 12 nolu alaşımın SEM görüntüleri a) Genel yapı b) % Al dağılımı c) % Si dağılımı. ....	175
Şekil 4.108 : % 7 Si içeren 27 nolu alaşımın SEM görüntüleri a) Genel yapı b) % Al dağılımı c) % Si dağılımı. ....	176
Şekil 4.109 : % 4 Si içeren 2 nolu alaşımın SEM görüntüleri a) Genel yapı b) % Al dağılımı c) % Si dağılımı. ....	177
Şekil 4.110 : % 4 Si içeren 4 nolu alaşımın SEM görüntüleri a) Genel yapı b) % Al dağılımı c) % Si dağılımı. ....	178
Şekil 4.111 : % 4 Si içeren 17 nolu alaşımın SEM görüntüleri a) Genel yapı b) % Al dağılımı c) % Si dağılımı. ....	179
Şekil 4.112 : % 4 Si içeren 24 nolu alaşımın SEM görüntüleri a) Genel yapı b) % Al dağılımı c) % Si dağılımı. ....	180
Şekil 4.113 : % 4 Si içeren 25 nolu alaşımın SEM görüntüleri a) Genel yapı b) % Al dağılımı c) % Si dağılımı. ....	181
Şekil 4.114 : % 7 Si içeren 1 nolu alaşımın XRD görüntüsü. ....	182
Şekil 4.115 : % 7 Si içeren 15 nolu alaşımın XRD görüntüsü. ....	183
Şekil 4.116 : % 7 Si içeren 3 nolu alaşımın XRD görüntüsü. ....	183
Şekil 4.117 : % 7 Si içeren 12 nolu alaşımın XRD görüntüsü. ....	184
Şekil 4.118 : % 7 Si içeren 27 nolu alaşımın XRD görüntüsü. ....	184

<b>Şekil 4.119</b> : % 4 Si içeren 2 nolu alaşımın XRD görüntüsü. ....	185
<b>Şekil 4.120</b> : % 4 Si içeren 4 nolu alaşımın XRD görüntüsü. ....	185
<b>Şekil 4.121</b> : % 4 Si içeren 17 nolu alaşımın XRD görüntüsü. ....	186
<b>Şekil 4.122</b> : % 4 Si içeren 24 nolu alaşımın XRD görüntüsü. ....	186
<b>Şekil 4.123</b> : % 4 Si içeren 25 nolu alaşımın XRD görüntüsü. ....	187
<b>Şekil 5.1</b> : En iyi mekanik değerlerin elde edildiği deneylerin % uzama sonuçlarının referans ticari ürün ile karşılaştırılması. ....	190
<b>Şekil 5.2</b> : En iyi mekanik değerlerin elde edildiği deneylerin akma dayanımı sonuçlarının referans ticari ürün ile karşılaştırılması. ....	191
<b>Şekil 5.3</b> : En iyi mekanik değerlerin elde edildiği deneylerin çekme dayanımı sonuçlarının referans ticari ürün ile karşılaştırılması. ....	191
<b>Şekil 5.4</b> : En iyi mekanik değerlerin elde edildiği deneylerin sertlik sonuçlarının referans ticari ürün ile karşılaştırılması. ....	192
<b>Şekil 5.5</b> : En iyi mekanik değerlerin elde edildiği DAS deneylerinin % uzama sonuçlarının referans ticari ürün ile karşılaştırılması. ....	193
<b>Şekil 5.6</b> : En iyi mekanik değerlerin elde edildiği DAS deneylerinin akma dayanımı sonuçlarının referans ticari ürün ile karşılaştırılması. ....	193
<b>Şekil 5.7</b> : En iyi mekanik değerlerin elde edildiği DAS deneylerinin çekme dayanımı sonuçlarının referans ticari ürün ile karşılaştırılması. ....	194
<b>Şekil 5.8</b> : % Uzamaya (döküm hali) ana etkisi olan elementler. ....	196
<b>Şekil 5.9</b> : % Uzamaya (döküm hali) ikili etkileşimde bulunan elementler. ....	197
<b>Şekil 5.10</b> : % Uzamaya (döküm hali) etki eden parametreler. ....	198
<b>Şekil 5.11</b> : Akma dayanımına (döküm hali) ana etkisi olan elementler. ....	198
<b>Şekil 5.12</b> : Akma dayanımına (döküm hali) ikili etkileşimde bulunan elementler. ....	199
<b>Şekil 5.13</b> : Akma dayanımına (döküm hali) etki eden parametreler. ....	200
<b>Şekil 5.14</b> : Çekme dayanımına (döküm hali) ana etkisi olan elementler. ....	201
<b>Şekil 5.15</b> : Çekme dayanımına (döküm hali) ikili etkileşimde bulunan elementler. ....	202
<b>Şekil 5.16</b> : Çekme dayanımına (döküm hali) etki eden parametreler. ....	202
<b>Şekil 5.17</b> : Sertliğe (döküm hali) ana etkisi olan elementler. ....	203
<b>Şekil 5.18</b> : Sertliğe (döküm hali) ikili etkileşimde bulunan elementler. ....	204
<b>Şekil 5.19</b> : Sertliğe (döküm hali) etki eden parametreler. ....	205
<b>Şekil 5.20</b> : Akışkanlığa ana etkisi olan elementler. ....	205
<b>Şekil 5.21</b> : Akışkanlığa ikili etkileşimde bulunan elementler. ....	206
<b>Şekil 5.22</b> : Akışkanlığa etki eden parametreler. ....	207
<b>Şekil 5.23</b> : % Uzamaya (ısıtıl işlemliler) ana etkisi olan elementler. ....	207
<b>Şekil 5.24</b> : % Uzamaya (ısıtıl işlemliler) etki eden parametreler. ....	208
<b>Şekil 5.25</b> : Akma dayanımına (ısıtıl işlemliler) ana etkisi olan elementler. ....	209
<b>Şekil 5.26</b> : Akma dayanımına (ısıtıl işlemliler) ikili etkileşimde bulunan elementler. ....	209
<b>Şekil 5.27</b> : Akma dayanımına (ısıtıl işlemliler) etki eden parametreler. ....	210
<b>Şekil 5.28</b> : Çekme dayanımına (ısıtıl işlemliler) ana etkisi olan elementler. ....	211
<b>Şekil 5.29</b> : Çekme dayanımına (ısıtıl işlemliler) ikili etkileşimde bulunan elementler. ....	212
<b>Şekil 5.30</b> : Çekme dayanımına (ısıtıl işlemliler) etki eden parametreler. ....	213
<b>Şekil 5.31</b> : Sertliğe (ısıtıl işlemliler) ana etkisi olan elementler. ....	213
<b>Şekil 5.32</b> : Sertliğe (ısıtıl işlemliler) ikili etkileşimde bulunan elementler. ....	214
<b>Şekil 5.33</b> : Sertliğe (ısıtıl işlemliler) etki eden parametreler. ....	215
<b>Şekil A.1</b> : Al-Bi ikili faz diyagramı. ....	229
<b>Şekil A.2</b> : Al-Ca ikili faz diyagramı. ....	230
<b>Şekil A.3</b> : Al-Ce ikili faz diyagramı. ....	231
<b>Şekil A.4</b> : Al-Co ikili faz diyagramı. ....	232

<b>Şekil A.5</b> : Al-Cu ikili faz diyagramı.....	233
<b>Şekil A.6</b> : Al-Fe ikili faz diyagramı. ....	234
<b>Şekil A.7</b> : Al-Mg ikili faz diyagramı.....	235
<b>Şekil A.8</b> : Al-Mn ikili faz diyagramı.....	236
<b>Şekil A.9</b> : Al-Si ikili faz diyagramı.....	237
<b>Şekil A.10</b> : Al-Sr ikili faz diyagramı.....	238
<b>Şekil A.11</b> : Al-Ti ikili faz diyagramı.....	239
<b>Şekil A.12</b> : Al-Zn ikili faz diyagramı.....	240

## SEMBOL LİSTESİ

$\mu\text{m}$	: Mikrometre
%	: Yüzde
$^{\circ}\text{C}$	: Santigrat
gr	: gram
cm	: Santimetre
mm	: Milimetre
cal	: Kalori
$\lambda$	: Isı iletkenliği
E	: Elastik modül
MPa	: Megapaskal
GPa	: Gigapaskal
>	: Büyüktür
kg	: Kilogram
ml	: Militre
ppm	: Milyonda bir parçacık
f	: Serbest değişken sayısı
c	: Bileşim sayısı
p	: Sistemdeki kararlı faz sayısı
$\alpha$	: Alfa
$\beta$	: Beta
$\gamma$	: Gama
$\delta$	: Delta
$\epsilon$	: Epsilon
$\eta$	: Eta
$\theta$	: Theta
$\zeta$	: Zeta
$\phi$	: Phi



# ÖTEKTİK ALTI AL-Sİ DÖKÜM ALAŞIMLARINDA BİLEŞİMİN OPTİMİZASYONU İLE DÖKÜM KABİLİYETİ VE MEKANİK ÖZELLİKLERİN İYİLEŞTİRİLMESİ

## ÖZET

Otomotiv sektöründe artan rekabet koşullarında ve sürekli yenilenen çevre korunmasıyla ilgili yönetmeliklere istinaden çevreyi daha az kirleten ve daha hafif araçların üretimi önem kazanmıştır. Dolayısıyla otomobil jantlarının ağırlığından elde edilecek kazanımlar mevcut jantların daha ince kesitlerde ve dolayısıyla daha hafif olarak üretilmesiyle mümkün olabilmektedir.

Bu çalışmada halen kullanılmakta olan ötektik altı Al-Si (% 7 Si ve % 11 Si) alaşımlı otomobil jantlarının mekanik dayanım ve dökülebilirlik özelliklerinden daha iyi değerlerin elde edildiği, ana alaşım elementi olarak içeriğinde % 4 Si ve % 7 Si bulunan, aynı zamanda farklı oranlarda Co, Ce, Bi, Cu, Zn, Mg, Mn, Ti, Sr, Na ve B içeren alaşımlar başarılı şekilde elde edilmiştir.

İstatiksel deney tasarımı programı sonucunda elde edilen alaşımlar DAS (dendritik kol uzaması) ve Metal health sistemi kalıplarına dökülerek çekme, akışkanlık, k-testi, sıcak yırtılma, sertlik, mikro ve makro numuneleri elde edilmiştir. Daha sonra DAS çekme, metal health çekme ve sertlik numuneleri döküm hali için numune hazırlama işlemlerine tabi tutulmuş, ardından aynı numunelerden ayrılan diğer parti numuneler ise T6 koşullarında ısıl işlem prosesine girdikten sonra çekme ve sertlik numuneleri hazırlanmıştır. Bu işlemlerin sonucunda akma mukavemeti, çekme mukavemeti, % uzama ve sertlik özellikleri incelenmiştir. Makro ve mikro numuneler yüzey hazırlama, zımparalama, dağlama ve parlatma işlemlerinden sonra mikro ve makro analize hazır hale getirilmiştir. Bu numuneler mikroskopta mikro analiz, makro analiz, DAS (dendritik kol uzaması) analizi, % porozite ve daha detaylı mikroyapı incelemeleri için XRD ve SEM analizleri işlemlerine girmişlerdir. Son olarak elde edilen tüm deney çıktı verilerinin Minitab programında girişlerinin yapılmasıyla tüm çıktıların ve elementlerin birbiriyle olan ilişkileri değerlendirilmiş ve yorumlanmıştır.

Otomotiv jant sektöründe kullanılan % 7 Si içeren ısıl işlem görmüş ticari alaşımda % 4,216 uzama, 223,9 MPa çekme dayanımı ve 67,2 HB sertlik değerlerine ulaşılırken; geliştirilmiş olan % 7 Si içeren alaşımlarda döküm (ısıl işlemsiz) hali için en iyi değerler; uzama % 5,286, çekme dayanımı 190,564 MPa ve sertlik 75,7 HB, ısıl işlemlenmiş en iyi değerler; uzama % 7,982, çekme dayanımı 271,268 MPa ve sertlik 94,9 HB olarak elde edilmiştir. % 4 Si içeren alaşımlarda döküm (ısıl işlemsiz) hali ile en iyi değerler; uzama % 5,854, çekme dayanımı 197,896 MPa ve sertlik 87,7 HB, ısıl işlemlenmiş en iyi değerler; uzama % 7,398, çekme dayanımı 303,27 MPa ve sertlik 106,3 HB olarak elde edilmiştir.



## **DEVELOPING OF CASTABILITY AND MECHANICAL FEATURES BY COMPOSITION OPTIMIZATION IN HYPOEUTECTIC AL-SI CAST ALLOYS**

### **SUMMARY**

Regarding to competitive conditions in automotive industry and continuously revised environmental procedures, less contaminating and light weight vehicles gained much more importance. The weight gains which can be achieved from automobile wheels could be possible by producing them with thin cross sections and therefore lighter vehicles are produced.

In this study better mechanical properties and castability have been successfully achieved by using 4 % Si and 7 % Si with varying additions of Co, Ce, Bi, Cu, Zn, Mg, Mn, Ti, Sr, Na and B than relevant hypoeutectic Al-Si ( 7 % Si and 11 % Si) alloy wheels.

Alloys which have been analysed from statistical design of experiment program were casted in DAS (dendritic arm spacing) moulds and Metal Health System moulds and as a result; tensile, fluidity, k-test, hot tearing, hardness, macro and micro samples were produced. After this, DAS tensile, metal health tensile and hardness samples were prepared for as-cast conditions while another party of tensile and hardness samples were be prepared after T-6 heat treatment process. As a result, yield strength, tensile strength, elongation % and hardness properties were studied. Macro and micro samples were be prepared by sand paper, etching and polishing. Following surface preparation step these samples were analysed in optical microscope for macro, micro, DAS and porosity % analysis, in addition, further detailed micro analysis were carried by XRD and SEM analysis. Finally, all relevant results, datas and micrographs were examined with the help of minitab program and as a conclusion final evaluations and remarks were made.

For 7 Si % heat treated commercial alloys used in automotive industry, 4,216 % elongation, 223,9 MPa tensile strength and 67,2 HB hardness values were achieved in this study; while in 7 % Si containing as cast alloys best achieved values were as follows; elongation 5,286 %, tensile strength 190,564 MPa and hardness value 75,7 HB, heat treated best achieved values were; elongation 7,982 %, tensile strength 271,268 MPa and hardness value 94,9 HB. In 4 % Si containing as cast alloys best achieved values were as follows; elongation 5,854 %, tensile strength 197,896 MPa and hardness 87,7 HB, heat treated best achieved values were; elongation 7,398 %, tensile strength 303,27 MPa and hardness value 106,3 HB.



## 1. GİRİŞ VE AMAÇ

Otomotiv sektöründe artan rekabet koşullarında, geleneksel olarak kullanılan Al-Si alaşımlarının döküm kabiliyetlerinin ve mekanik dayanımlarının artırılmasına ihtiyaç duyulmaktadır.

Döküm alaşımı içinde bulunan elementler son ürünün döküm kabiliyetini ve mekanik özelliklerini doğrudan veya dolaylı olarak etkilemektedir. Bu özelliklerin optimizasyonu için detaylı çalışmalara gereksinim vardır. Literatürde elementlerin ilave edildiği alaşımlarda yarattığı etkileri bulmak mümkündür ancak hiçbir literatürde hangi alaşım elementinin kullanım oranı seviyesiyle, hangi özelliklerin ne ölçüde etkilendiği sorularına cevap verilememektedir. Bu çalışma, yukarıdaki soru ve belirsizliklere ötekitaltı Al-Si alaşımları için cevap aramayı amaç edinmiştir. Uluslararası standartlarca belirlenmiş mekanik dayanım testlerini başarıyla geçebilecek, global piyasadaki benzerlerinden daha hafif bir jantın çok daha kısa sürede üretimi uluslararası pazarda büyük bir rekabet avantajı sağlayabilecektir. Dünyaca ünlü otomotiv üreticilerinin, araçlarının hafiflemesiyle yakıt ekonomisini artırma hedeflerine hizmet edeceğinden; tercih edilen alüminyum alaşımlı jantların üretimine imkan sağlayacaktır. Zira otomotiv üreticileri standartların zorlamasıyla, otomobil üzerindeki her sistem ve / veya parçada ağırlık azaltma çalışmalarına büyük önem vermektedirler. Bu amaçla yan sanayilerini teşvik edici programlar uygulamaktadırlar. Otomobil ana sanayi üreticileri her bir kg'lık hafifletme için yan sanayicilerine teşvik primi de ödemektedir. Maliyetlerde meydana gelecek azalma ile otomotiv ana sanayisi satın almakta oldukları ürünleri her yıl bir önceki yıla oranla daha ucuza satın almayı hedeflemekte; aynı zamanda yan sanayicisinin karlılığını sürdürebilmesini garantilemek istemektedir. Başka bir deyişle, ana sanayi daha ucuza ürün temin ederken yan sanayicisinin hayatta kalmasını da istemektedir.

Alüminyum alaşımlı jantların maliyetinde, alüminyum alaşımı yaklaşık % 60'lık bir paya sahiptir. Malzemedен sağlanacak tasarruf ile daha az alüminyum ergetmek gerekeceğinden enerjiden tasarruf, daha az alüminyumu katılaştırmak

gerekeceğinden çevrim sürelerinde kısalma, jant başında işçilikte azalma, verimlilikte artış, daha az deneme döküm ve tasarımda daha az modifikasyon ihtiyacı nedeniyle son ürünün müşteri eline ulaşma zamanında kısalma beklenmektedir.

Bu çalışmada otomotiv sektöründe halen kullanılmakta olan ötektik altı Al-Si (% 7 Si ve % 11 Si) alaşımlı jantların dayanım özellikleri ve döküm kabiliyetlerinin yeni elementlerin ilavesiyle arttırılması hedeflenmiştir. Bu amaçla detaylı bir literatür taraması sonrasında oluşturulacak deney tasarımında günümüz otomotiv jant alaşımlarında bulunmayan, ancak literatürde dayanım özellikleri üstünde olumlu etkisi olduğu bildirilen elementlerin (Co, Ce, Bi, Cu, Zn, Mg, Mn, Ti, vb.) farklı oranlarda Al-Si alaşımlarına ilavesi gerçekleştirilmiştir.

Deney tasarımı sonucunda elde edilen alaşımlar, DAS (dendritik kol uzaması) kalıbı ve Metal health (çekme kalıbı, akışkanlık kalıbı, sıcak yırtılma kalıbı, k-test kalıbı) sistemi kalıplarına dökülerek çekme numuneleri, akışkanlık numuneleri, k-testi numuneleri, sıcak yırtılma numuneleri, sertlik numuneleri, mikro ve makro numuneleri elde edilmiştir. Daha sonra DAS çekme, metal health çekme ve sertlik numuneleri döküm hali (ısıl işlemsiz) için numune hazırlama işlemlerine tabi tutulmuştur.

Ardından aynı numunelerden ayrılan diğer parti numuneler ise T6 ısıl işlem koşullarında ısıl işlem prosesine girdikten sonra çekme ve sertlik numuneleri hazırlanmıştır. Bu işlemlerin sonucunda akma mukavemeti, çekme mukavemeti, % uzama, sertlik özellikleri incelenmiştir. Makro ve mikro numuneler yüzey hazırlama, zımparalama, dağlama ve parlatma işlemlerinden sonra mikro ve makro analize hazır hale getirilmiştir. Bu numuneler mikroskopta mikro analiz, makro analiz, DAS (dendritik kol uzaması) analizi, % porozite, XRD ve SEM analizleri işlemleri ile daha ileri incelemelere tabi tutulmuştur.

Son olarak elde edilmiş tüm veriler Minitab programında tüm deney çıktı verilerinin girişlerinin yapılmasıyla, tüm çıktıların ve elementlerin birbiriyle olan ilişkileri değerlendirilmiş ve yorumlanmıştır.

## 2. ALÜMİNYUM

Alüminyum yer kabuğunun % 8'ini oluşturur. Üretimi 1965 yılı itibariyle bakırı geçmiş ve günümüzde demirle rekabet eder hale gelmiştir [1]. Alüminyum, yeryüzünde en çok bulunan metalik elementlerden biri olarak 19.yy sonlarından itibaren mühendislik uygulamalarında kullanılmaya başlanmıştır. Endüstriyel anlamda kullanımının üç ana nedeni malzeme karakteristikleri, alışım halindeki kullanımı ve üretiminin getirdiği ekonomik kazançlardır. Ohio'da Charles Hall ve Fransa'da 1886'da Paul Heroult'un geliştirdiği ergimiş kriyolit içinde alüminanın elektrolitik redüksiyon ile alüminyum üretilmesiyle birlikte, o yıllarda ilk defa içten yanmalı motor taşıtlarında alüminyum kullanımı başlamış ve bununla birlikte alüminyum gittikçe yükselen mühendislik değeri ile birlikte önemli bir otomotiv malzemesi olmaya başlamıştır. Ardından Wright kardeşlerin havacılık endüstrisine girişleriyle birlikte yeni bir endüstrinin doğuşu ve alüminyum ile birlikte gelişimi yapısal olarak dayanıklı, mukavemetli havacılık ekipmanları, motorlar, silah sistemleri, yakıt hücreleri ve uydu parçalarının gelişmesine olanak tanımıştır. Ancak alüminyum endüstrisinin büyümesi sadece bu gelişmelerle sınırlı kalmamıştır. Alüminyumun ilk ticari uygulamaları cam çerçeveleri, servis tepsileri ve pişirme gereçleri olmuştur. Zaman içinde çok farklı kullanım alanlarıyla modern hayatın vazgeçilmezi haline gelmiştir [2].

### 2.1 Alüminyumun Özellikleri

Alüminyumun en önemli özelliği çok farklı endüstriyel alanda kullanılabilirliğidir. Yüksek saflıktaki alüminyumdan en karmaşık alaşımlara kadar dağılan geniş bir aralıkta fiziksel ve mekanik özellikleri geliştirilebilmektedir. Üç yüzden fazla alaşımı bilinmekte ve ilave olarak birçok ilave değişkenlikler uluslar arası çalışmalarda ve üretici-tüketici ilişkileri kapsamında geliştirilmektedir.

Alüminyum metalini ve alaşımlarını en ekonomik ve çok geniş bir kullanım aralığında çekici kılan özellikler görünümü, hafifliği, işlenebilirliği, fiziksel özellikleri, mekanik özellikleri ve korozyon dayanımıdır.

**Çizelge 2.1 : Saf alüminyumun özellikleri [3].**

Kimyasal sembol	Al
Atom numarası	13
Atom Ağırlığı	26,98
Kafes Yapısı	KYM
Yoğunluğu (20°C)	2,6989 gr/cm <sup>3</sup>
(660°C’de sıvı)	2,37 gr/cm <sup>3</sup>
Elastik modül,E.	70607,88 MPa
Kayma modülü,g.	26477,955 MPa
Ergime sıcaklığı	660.24 °C
Ergime ısısı	94.6 cal/gr
	37.74
Elektrik iletkenliği	m/Ohm.mm <sup>2</sup>
Isı iletkenliği,λ.	0.55 cal/cm.s.°C

Alüminyum yoğunluğu 2,7 gr / cm<sup>3</sup>’dür yani çeliğin (7,83 gr / cm<sup>3</sup>), bakırın ( 8,93 gr / cm<sup>3</sup>), veya bronzun (8,53 gr / cm<sup>3</sup>) neredeyse üçte biri kadardır.

Çeliğin paslanmasına neden olan oksijene karşılık alüminyum dayanım göstermektedir. Korozyona maruz kalan yüzey oksijenle birleşerek bir inç’in sadece birkaç on milyonda biri kalınlığında ince bir alüminyum oksit tabakası oluşturarak oksitlenmeyi engeller. Demirden farklı olarak alüminyum oksit filmi yüzeyden parça şeklinde kopmaz.

Bu ince renksiz ve saydam oksit tabakası metale sıkı bir şekilde bağlanır ve çıplak gözle görülemez. Demir ve çelikte görülen renk değişimi ve kabuk şeklinde soyulma alüminyumda gerçekleşmez.

Uygun bir şekilde alaşımlandırıldığında alüminyum su, tuz ve diğer çevresel faktörlerin yol açtığı ayrıca diğer geniş dağılımdaki kimyasal ve fiziksel ajanlara karşı dayanım gösterir.

Alüminyum yüzeyler yüksek oranda yansıtıcı olabilir. Radyan enerji, görünür ışık, radyan ısı ve elektromanyetik dalgalar etkin bir şekilde yansıtılır, diğer bir yandan anodize ve koyu anodize edilmiş yüzeyler yansıtıcı veya emici olabilir.

Alüminyum tipik olarak mükemmel elektrik ve termal iletkenlik gösterir, örneğin, yüksek torklu elektrik motorları gibi özel alaşımlar elektrik direncine karşı geliştirilmişlerdir. Alüminyum aynı ağırlık temel alındığında bakırın iki katı kadar daha iyi bir elektrik iletkenliği gösterir ve bu bir seçim nedenidir. Yüksek iletkenlik ve mekanik dayanımın gereklilikleri uzun, yüksek voltajlı, alüminyum çelikle kuvvetlendirilmiş iletim kabloların kullanımı ile sağlanır. Bakırın % 50-60 termal iletkenliğine sahip olan alüminyum alaşımlarının ısı değiştiricilerinde, buharlaştırıcılarda, elektrikli ısıtıcı uygulamalarda, otomotiv silindir kafası ve radyatörlerde kullanımı avantajlıdır.

Alüminyum ferro manyetik değildir, bu özellik elektrik ve elektronik endüstrisinde önemli bir rol oynar. Isıya ve yanmaya karşı dirençlidir, yanmaz veya patlayıcı maddelerin tutulmasında veya maruz kalınmasında kullanılır. Toksik özelliği olmaması sebebiyle yiyecek ve içeceklerin saklandığı kaplarda kullanılır [2].

## **2.2 Alüminyumun Önemi**

Endüstride kullanılan malzemelerin üretimi esnasında çeşitli çevresel problemler oluşmaktadır bu problemler iklimi etkileyen gazların salınımı, zararlı gazlara maruz kalan canlıların bu etkilerden kurtarılması, geri dönüşüm ile atık miktarlarının azaltılarak su ve toprağın korunumu gibi ekolojik nedenlerdir. Geri dönüştürülebilir olması sebebiyle alüminyum kolaylıkla tekrar ergitilerek kullanılabilir. Ayrıca alüminyumun ana hammaddesi olan boksit madenlerinin tropik ormanlardan eldesinden sonra bozulan ekolojik yapı boksit madenlerinin eldesi sonrasında tekrar orman haline dönüştürölmektedir. Yeryüzünde bulunan toplam boksit cevheri rezervinin yaklaşık 140 milyar ton olduğu tahmin edilmektedir. Yıllık üretim değeri son beş yılda yaklaşık olarak 23 milyon tondur [4] ve geri dönüşebilen miktar ile 4 milyon ton alüminyum kazanılmaktadır. Alümina üretiminde ortaya çıkan kırmızı çamur yeniden değerlendirilerek portland çimentosu ve plastik sektöründe pigment olarak kullanılmaktadır. Alüminyum hafif konstrüksiyon metali olarak otomotiv sektöründe de hafif malzeme seçiminde yüksek potansiyele sahiptir. Sağladığı dayanım, esneklik ve hafiflik özelliklerine ilave olarak yakıt tüketimine olan katkısıyla alüminyum otomotiv sektöründe de gittikçe artan bir kullanım oranına sahiptir [3].

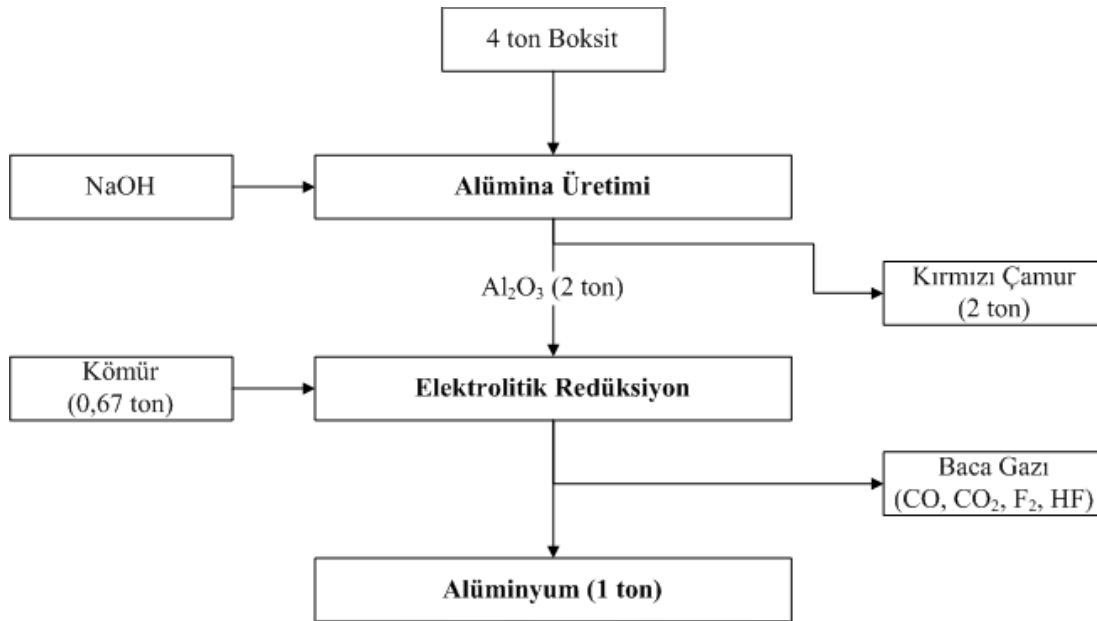
### 2.3 Alüminyum Üretimi

Günümüzde tüm alüminyum üretimi Hall Heroult prosesi temeline dayanır. Boksitten rafine edilmiş olan alümina kriyolit banyosunda çeşitli florür tuzlarıyla çözünür.

Hidrojenin bulunmadığı bir ortamda karbon esaslı hazne katod ve yine karbon esaslı anod arasında düşük voltaj ve yüksek akım şiddetinde bir elektrik arkı oluşturularak  $Al_2O_3$ 'dan Al metali elde edilmektedir.

Ayrılmış olan metalin sifon ve vakum yöntemiyle periyodik olarak toplanması sağlanır ve ardından döküm faaliyetleri için tekrar ergitilen veya işlenen ingotlar üretilir [2].

Yaklaşık 1 ton alüminyum üretimi için gerekli olan boksit cevheri Şekil 2.1'de gösterilmektedir.



Şekil 2.1 : Alüminyum üretimi [1].

2005 ve 2009 yılları arasında birincil kaynaklardan üretilen alüminyum değerleri Çizelge 2.2'de verilmiştir.

**Çizelge 2.2 : Dünya birincil alüminyum üretimi [4].**

Dönem	Raporlanmış Primer Alüminyum Üretimi (Bin ton)								
	Bölge 1: Afrika	Bölge 2: Kuzey Amerika	Bölge 3: Latin Amerika	Bölge 4/5: Asya	Bölge 6A: Batı Avrupa	Bölge 6B: Doğu/Orta Avrupa	Bölge 7: Okyanusya	Toplam	Günlük averaj
Yıl 2005	1,753	5,382	2,391	3,139	4,352	4,194	2,252	23,463	64.3
Yıl 2006	1,864	5,333	2,493	3,493	4,182	4,23	2,274	23,869	65.4
Yıl 2007	1,815	5,642	2,558	3,717	4,305	4,46	2,315	24,812	68.0
Yıl 2008	1,715	5,783	2,66	3,923	4,618	4,658	2,297	25,654	70.1
Ocak-Ağustos 2009	1,105	3,211	1,681	2,901	2,521	2,754	1,465	15,638	64.4
Bölge	Ülkeler								
Bölge 1	Afrika		Kamerun, Mısır, Gana, Mozambik, Nijerya, Güney Afrika						
Bölge 2	Kuzey Amerika		Kanada, ABD						
Bölge 3	Latin Amerika		Arjantin, Brezilya, Venezuela						
Bölge 4	Doğu Asya		Çin, Japonya, Kuzey Kore, Tacikistan						
Bölge 5	Güney Asya		Azerbaycan, Bahreyn, Hindistan, Endonezya, İran, Kazakistan, Türkiye, Birleşik Arap Emirliği						
Bölge 6A	Batı Avrupa		Fransa, Almanya, Yunanistan, İzlanda, İtalya, Hollanda, Norveç, İspanya, İsveç, İsviçre, İngiltere						
Bölge 6B	Doğu/Orta Avrupa		Bosna Hersek, Hırvatistan, Macaristan, Sırbistan, Polonya, Romanya, Rusya, Slovakya, Slovenya, Ukrayna						
Bölge 7	Okyanusya		Avustralya, Yeni Zelanda						

#### 2.4 Alaşımın Esasları ve Alüminyumun Alaşımları

Metaller saf halleriyle (alaşımsız) ticari uygulamalarda nadiren kullanılırlar. Bunun yerine, bir veya birden çok kimyasal element temel metalle alaşımlandırılarak karakteristiklerinin değiştirilerek üretilebilirliğinin iyileşmesini ve uygulamalarda daha iyi performans göstermesini sağlar. Alaşımlama ile etkilenen metal karakteristikleri sırasıyla şöyledir: a) mekanik özellikleri; oda sıcaklığı dayanımı, sertleştirilebilirlik, yorulma dayanımı, sürünme dayanımı, b) proses özellikleri; dökülebilirlik, kaynak edilebilme, işlenebilirlik, c) servis özellikleri; ısı dayanımı, tokluk ve soğuğa dayanım, korozyon ve oksidasyon dayanımı, sertlik ve aşınma dayanımı, d) fiziksel özellikler; elastik modülü, yoğunluk, manyetik özellikler, elektriksel özellikler, ısıl genişleme özellikleri ve renktir [5].

Alüminyum alaşımlarını iki temel kategoriye ayırmak uygundur: döküm bileşimleri ve dövme bileşimler. Her bir kategori için daha ileri düzeyde bir ayırma ise

özelliklerin gelişiminin temel esaslarına bağlıdır. İşlenmiş alüminyum için 4 basamaklı bir sistem kullanılmaktadır. 1xxx kodlu kontrollü alaşımsız (saf) bileşimler; genellikle elektrik ve kimya endüstrisinde, 2xxx kodlu alaşımlar bakırın temel alaşım elementi olduğu ve genellikle havacılık endüstrisinde, 3xxx kodlu alaşımlar genellikle manganın temel alaşım elementi olduğu ve mimari uygulamalarda, 4xxx kodlu alaşımlar silisyum temel alaşım elementi olduğu ve kaynak çubuklarda ve pirinç levhalarda, 5xxx kodlu alaşımlar magnezyumun temel alaşım elementi olduğu ve denizcilik endüstrisinde, 6xxx kodlu alaşımlar magnezyum ve silisyum temel alaşım elementleri olduğu ve mimari uygulamalarda, 7xxx kodlu alaşımlar çinkonun temel alaşım elementi olduğu fakat diğer bakır, magnezyum, krom ve zirkonyumun da kullanılabildiği havacılık endüstrisinde ve diğer yüksek dayanım gerektiren uygulamalarda, 8xxx kodlu alaşımlar kalay ve bazı lityum bileşimlerinde, çeşitli bileşimlerin karakterizasyonunda kullanılır [2, 6].

## **2.5 Isıl İşlemlili Alüminyum Alaşımlar**

Isıl işlemlili alaşımlar kontrollü olarak ısıtma ve soğutma ile sertleştirilebilen (dayanım kazanan) alaşımlardır. Bazı alaşımlar, genellikle 2xxx, 6xxx ve 7xxx serileri çözeltiye alınabilir, bunlar ısıtma ve ardından su verme veya ani soğutma ile dayanım kazandırılabilirler. Soğuk iş ile oda sıcaklığında kontrollü deformasyon ile dayanımları daha da arttırılabilir [2].

## **2.6 Isıl İşlemsiz Alüminyum Alaşımlar**

Soğuk iş ile ısıl işlemsiz sertleştirilebilen alaşımlar ısıl işlemsiz alüminyum alaşımlarıdır. Bu alaşımların dayanımları özellikle 1xxx, 3xxx, 4xxx ve 5xxx serilerinde içerdikleri alaşım elementlerinin sertleştirme etkileriyle sağlanır. İlave sertleştirme ise soğuk iş-deformasyonuyla oluşturulabilir. Soğuk iş ısıl işlemsiz alaşımlarda dayanımı düzenli bir şekilde arttırılabilir [2].

## **2.7 Ürün Şekilleri**

Alüminyum ve alaşımları döküm veya bilinen birçok üretim şeklinde olabilir. Alüminyum ve alüminyum alaşımlarının üretilmiş şekilleri iki gruba ayrılabilir. Standardize ürünler levha, plaka, folyo, çubuk, bar, tel, tüp, boru ve yapısal

formlardır. Mühendislik ürünleri ise özel uygulamalar için geliştirilmiş ve hadde şekilleri, dövme, sıkıştırılmış, döküm, basılmış, toz metalurjisi, işlenmiş ve metal-matris kompozitleri içeren parçalardır [2].

## 2.8 Ürün Sınıfları

Bina ve konstrüksiyon uygulamaları olarak her türlü köprü, kule ve bekletme tanklarında alüminyum kullanılmaktadır. Statik yapılarda düşük bakım masrafları sebebiyle tercih edilir. Binalarda levha ürünler çatılarda, havalandırma sistemlerinde depolama tanklarında, kapı ve pencere çerçevelerinde kullanılır. Konteyner ve paketleme uygulamalarında, yiyecek ve ilaç endüstrisinde kullanılır. Ulaşımında ise otomotiv endüstrisi en yoğun kullanılan alanlardan birisidir [2]. Kuzey Amerika'da otomotiv sektöründe alüminyum kullanım oranı 2009 yılı itibariyle araç başı ortalama % 8,6 oranına ulaşmıştır. 1970 yıllarında % 2 olan bu oran, 1990'da % 5,1, 2020 yılında ise % 11 oranında olacağı tahmin edilmektedir [7]. Otomotiv sektöründe kullanılan alaşımlar ile 430 MPa çekme dayanımına ulaşılmıştır. Bazı özel alaşımlar ısıtılma işlemi ile 700 MPa çekme dayanım değerine yaklaşmıştır, bu alaşımlar ise genellikle havacılık endüstrisinde kullanılmaktadır [8].

Otomotivde alüminyum döküm parçaları için motor bloğu, piston, silindir kafası, manifold, krank muhafazası, karbüratör, transmisyon koruyucu, fren kaliperleri ve jantlar olarak örnek verilebilir. Kamyonlarda döküm ve levha olarak kullanım ağır vasıtaların hafifliği için önemlidir. Kamyon ve tır çekicileri, karavanlar, tren yolu vagonları hafiflik, dayanım ve korozyon direnci açısından alüminyum yüksek oranda kullanılmaktadır. Deniz endüstrisi uygulamalarında her türlü deniz taşıtları, tankları, motor parçalarında deniz tuzunun korozif etkisine karşı yoğun olarak kullanılmaktadır. Havacılık endüstrisinde hava taşıtları, füzeler, uzay araçları yüksek dayanım, korozyon direnci, hafiflik gibi unsurlar sebebiyle alüminyum tercih edilmektedir. Elektrik uygulamalarında iletken alaşım olarak kablolama ve iletken malzemelerde yer alır. Motor ve jeneratörlerde, transformatörlerde, ışık sistemlerinde, kapasitörlerde alüminyum kullanılmaktadır. Tüketim malzemeleri olarak ev eşyalarında, mobilyalarda birçok formda yer alır. Makine ve ekipman olarak proses ekipmanlarında, tekstil ekipmanlarında, kağıt ve baskı işlemlerinde, kömür madeni makinelerinde boru ve takım aletlerinde, jig ve fikstürlerde kullanılır. Diğer bazı uygulama alanları ise reflektörler ve anot malzemeleridir [2, 9].

## 2.9 Alüminyum Döküm Alaşımları

Alüminyum dökümlerin fiziksel ve mekanik özellikleri aşağıda belirtilen maddelerdeki gibi sağlanır:

**Alaşım bileşimi:** Alaşımların bileşimleri ürünün kullanıldığı endüstriyel alana göre fiziksel ve mekanik özelliklerin elde edilmesinin sağlanmasında önemli bir rol oynar. Alaşımın içeriği dökülebilirlik ve aynı zamanda istenilen performans yeterliliğinin sağlanması için tasarlanır. Alaşım elementlerinin birbirleriyle etkileşimi istenilen mikro yapı fazlarının ve katı-sıvı fazları çözelti etkileri özelliklerinin iyileşmesi için sağlanır.

**Katılaşma esnasında ve sonrasında soğuma hızı:** Katılaşmanın oluştuğu koşullar bir alaşımın fiziksel ve mekanik özelliklerini etkileyen yapısal özellikleri belirler.

**Döküm prosesi:** Birçok farklı döküm prosesi bulunmaktadır ve bunların her biri farklı oranlarda ısı, katılaşma hızı ve katılaşma ilişkili mikro yapı ve makro yapı hassasiyetleri gösterir.

**Katılaşma:** Mühendislik dökümleri iç bölge ve yüzeysel hatalara karşı hassasiyet gösterir. Karmaşık geometriler, akışkanlar dinamiği ve katılaşma mekanizmalarının birlikte etkileri büyüktür. İç yapı poroziteleri çekinti ve hidrojen porozitesinden aynı zamanda gözle görülebilen süreksizlik, çatlak, rutubete dayalı reaksiyonlar ve yırtılmalardan oluşabilir. Metalik olmayan inklüzyonlar mekanik özellikleri etkiler ve hidrojen gözenek oluşumuna sebep olur. Gözenek hacmi ve geometrisi çekme özelliklerini, yorulma mukavemetini, dayanımı ve sünekliliği düşürür diğer bir taraftan yüzey hataları mekanik ve yorulma performansını kuvvetli bir şekilde etkiler.

**Isıl işlem:** Mekanik özellikler ön katılaşma ile tavlama, çözeltiye alma ve yaşlandırma işlemi ile sağlanır.

**Ön katılaşma yoğunlaşması:** Dökümlerin sıcak izostatik proses ile işlemleri daha yüksek çekme özellikleri, süneklilik ve yorulma performansı sağlar [10].

### 2.9.1 Alüminyum döküm alaşımları avantajları ve sınırları

Alüminyum dökümler elde edilebilecek çok çeşitli özelliklerde üretilirler. Alüminyum birliği tarafından 100'den fazla bileşim tescillenmiştir ve 300'den fazla alaşım ise uluslararası kullanımdadır. Metal matris kompozitler ve diğer kompozit yapıların genişletilmiş özellikleri haricinde alüminyum döküm alaşımlarının özellikleri Çizelge 2.3'deki gibidir [10].

**Çizelge 2.3 :** Alüminyum döküm alaşımlarının özellikleri [10].

Çekme Dayanımı, MPa	70-505
Akma Dayanımı, MPa	20-455
Uzama, %	<1-30
Sertlik, HB	30-150
Elektrik İletkenliği, %IACS	18-60
Termal iletkenlik, Btu · in./h · ft <sup>2</sup> · °F, 77°F'da (W/m · K 25°C'de)	660-1155 (85-175)
Yorulma limiti, MPa	55-145
Lineer termal genişleme katsayısı 68-212 °F (20-100 °C)	9,8-13,7 x 10 <sup>-6</sup> /°F (17,6-24,7) x 10 <sup>-6</sup> /°C
Kesme dayanımı, MPa	42-325
Elastik modülü, GPa	65-80
Özgül ağırlık	2,57-2,95

Hassas boyutsal parçaların, karmaşık geometrik şekillerin üretilebilirliği ve kontrol edilebilen yüzey işlemleri gibi birçok üretim avantajları gösterir; birçok durumda, kaynaklı veya birleşmiş parçalar yerine tek parça dökülmüş ürün kullanılabilir. Brüt döküm olarak elde edilebilen son ürün parça miktarının artmasından dolayı daha az işleme ihtiyacı bulunmaktadır. Döküm hali ve dövme halleri arasında kozmetik olarak değişiklik gösterirler. İşlenmiş ürünlere oranla daha düşük sermaye gerektirirler. Ürün gereklilikleri ve üretim hacimlerine göre farklı özelliklerde kalıplarda üretilebilirler. Alüminyum parçalar birçok farklı üretim prosesiyle geniş üretim hacmi, üretkenlik, kalite, işleme kabiliyeti ve özel yeterliliklerle dökülebilir. Kaliteli parçaların üretimi için gerekli katılma karakteristiklerini sergilerler. Birçok alüminyum döküm alaşımları ince ve detaylı kesitlerin dökümü için mükemmel akışkanlık özellikleri gösterir. Alüminyum döküm alaşımları göreceli olarak daha düşük sıcaklıklarda ergirler ve üretimleri yüksek oranda otomatikleştirilebilir.

Alüminyum döküm alaşımlarının sınırları ise şöyle sıralanabilir; çok ince kesitler dökülemeyebilir. Bazı özel döküm prosesleri için sınırlamalar mevcuttur ve bazı

alaşımın katılma davranışı dökümü engeller. Döküm prosesi dövme, ekstrüzyon ve yuvarlak ürünlerin üretim yöntemlerinden daha basit ve daha düşük maliyetlidir. Ancak karmaşık geometrik şekillerin katılması, yüzeyde oluşan süreksizlikler ve mikroyapı özellikleri farklı kalitelerde değişkenlik göstererek özellikleri ve performansı etkiler. Alüminyum döküm alaşımları birçok dövme, ekstrüzyon ve yuvarlak levhanın çekme özelliklerini gösterirler. Ancak dövme ürünlerin mikro yapı özellikleri ve doğrusal yöndeki süneklilikleri daha iri taneli yapı içeren döküm ürünlerine göre daha yüksektir [10].

### **2.9.2 Alüminyum döküm alaşımları genel tanımlar**

Alüminyum döküm alaşımları dövme alaşımı bileşimleriyle birçok yönde paralellik gösterir. Sertlik ve istenen özellikler alaşım elementlerinin ilavesi ve ısı işlemi ile sağlanır. Dövme ve döküm alaşımlarının farklılığı dökülebilirlikten gelmektedir. Dövme ürünleri basit yuvarlak ve dikdörtgen şekillerden meydana gelirken döküm parçalarının karmaşık şekillerden oluşması ve katılmanın farklı hızlarda oluşması alaşım katılma davranışlarında farklı talepler doğurmaktadır. Katılma esnasındaki ve sonrasındaki çatlaklar ve içyapısal çekintiler bu olumsuzlukları minimize etmek için çalışmaların yapılmasını doğurmaktadır.

Akışkanlık matematiksel olarak tanımlanabilen ve ölçülebilen karmaşık bir fonksiyondur. Akışkanlık en çok likidus eğrisi üzerindeki sıcaklıklarda veya süper ısıtma durumlarında etkilenir. Konvansiyonel boşaltma sıcaklıklarındaki daha fazla sıvı bileşenler ötektik veya yakın ötektik bileşenleridir.

Gelişmiş besleme karakteristikleri dar katı-sıvı aralıklarının ve ötektik sıcaklıktaki daha yüksek oranda sıvının birleşimi ile gerçekleşir.

Katılma ve katılma sonrası çatlaklara karşı eğilim element etkilerinin yükseltilmiş sıcaklıktaki dayanımı ve katılma hızı ile meydana gelir.

Kalıba yapışma en çok metal kimyasıyla etkilenir fakat kalıbın durumu ve diğer proses parametreleri de önemlidir.

Yüksek hacimlerde kullanılan döküm alaşımlarında silisyum kullanılır [10].

Belli bir uygulama için alaşım bileşiminin seçimi 3 temel parametre üzerine dayanır; dökülebilirlik, mekanik özellikler ve kullanım özellikleridir. Alüminyum alaşımlarının dökülebilirliği akışkanlığı, sıcak yırtılmayı ve çekintiyi değerlendirebilen özel kalıplar ile belirlenir [11].

Campbell sıcak yırtılmanın tamamen dayanım yorulması olduğunu belirtmiştir. Bu özellik sıcak yırtılmayı, porozite gibi diğer katılaşma hatalarından ayırmaktadır. Besleme zorlukları, biręok döküm hatalarının temeli gibi hidrostatik gerinimlerin sıvı içinde gelişmesine sebep verir. Eğer gerinim hatanın çekirdeklendiği bir seviyeye yükselirse sıvı ayrışacaktır ve üç yönlü olarak genişleyecek ve dendritler boyunca gözenek oluşturacaktır [12].

### **2.9.3 Alüminyum döküm alaşımları karakteristikleri**

Alüminyum alaşım kimyası için karakteristikler ana, azınlık ve safsızlık elementlerinin etkilerini içerir. Ana alaşım elementleri elementlerin dökülebilirlik ve özelliklerin gelişimi aralıklarını tanımlar. Azınlık alaşım elementleri katılaşma davranışını kontrolünü, ötektik yapı modifikasyonunu, birincil fazların iyileştirilmesini, tane yapısı ve formunun iyileştirilmesini, faz oluşumunun geręekleşmesini ve oluşumunu ve oksidasyonun düşmesini sağlar. Safsızlık elementleri istenilen özelliklerin gelişmesi ve sınırlamasında dökülebilirliği ve çözünmemiş fazların formlarını etkiler [10].

### **2.9.4 Alüminyum döküm temper sistemi**

Alüminyum döküm temper sistemi mühendislik dökümlerine uygulanan ısıl işlemler için harf ve rakamları içerir;

F: döküm halı, O: tavlınmış, T4: çözeltiye alınmış ve yaşlandırılmış, T5: çökelti sertleştirilmiş, T6: çözelti ısıl işlenmiş, su verilmiş ve çökelti sertleştirilmiş, T7: çözelti ısıl işlenmiş, su verilmiş ve aşırı yaşlandırılmış.

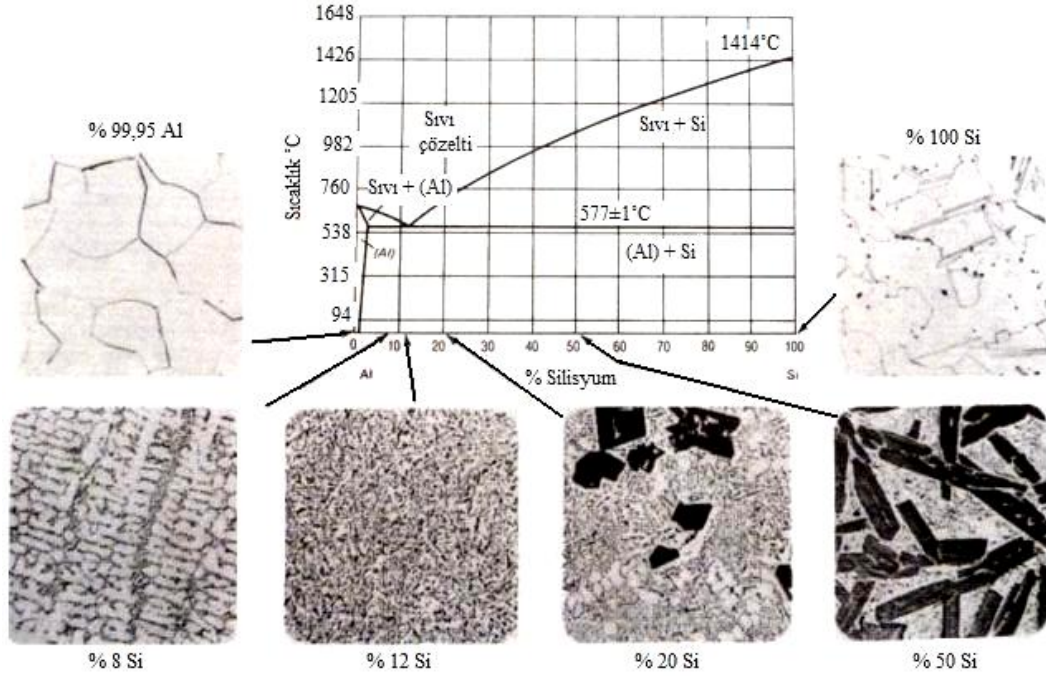
**Çizelge 2.4 :** Alüminyum döküm alaşımları % bileşim miktarları ile alt ve üst limit sınırları [10].

Alaşım	Tip	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Diğer
308	%	5,5	---	4,5	---	---	---	---	---	---	---
	Limitleri	5,0-6,0	1	4,0-5,0	0,5	0,1	---	---	1	0,25	0,5
319	%	6	---	3,5	---	---	---	---	---	---	---
	Limitleri	5,5-6,5	1	3,0-4,0	0,5	0,1	---	0,35	1	0,25	0,5
355	%	5	---	1,25	---	0,5	---	---	---	---	---
	Limitleri	4,5-5,5	0,6	1,0-1,5	0,5	0,4-0,6	0,25	---	0,35	0,25	0,15
C355	%	5	---	1,25	---	0,5	---	---	---	---	---
	Limitleri	4,5-5,5	0,2	1,0-1,5	0,1	0,4-0,6	---	---	0,1	0,2	0,15
356	%	7	---	---	---	0,32	---	---	---	---	---
	Limitleri	6,5-7,5	0,6	0,25	0,35	0,20-0,45	---	---	0,35	0,25	0,15
A356	%	7	---	---	---	0,35	---	---	---	---	---
	Limitleri	6,5-7,5	0,2	0,2	0,1	0,25-0,45	---	---	0,1	0,2	0,15
357	%	7	---	---	---	0,52	---	---	---	---	---
	Limitleri	6,5-7,5	0,15	0,05	0,03	0,45-0,6	---	---	0,05	0,2	0,15
A357	%	7	---	---	---	0,55	---	---	---	0,12	---
	Limitleri	6,5-7,5	0,2	0,2	0,1	0,40-0,7	---	---	0,1	0,04-0,2	0,15
D357	%	7	---	---	---	0,58	---	---	---	0,15	---
	Limitleri	6,5-7,5	0,2	---	0,1	0,55-0,6	---	---	---	0,1-0,2	0,15
443	%	5,2	---	---	---	---	---	---	---	---	---
	Limitleri	4,5-6,0	0,8	0,6	0,5	0,05	0,25	---	0,5	0,25	0,35
B443	%	5,2	---	---	---	---	---	---	---	---	---
	Limitleri	4,5-6,0	0,8	0,15	0,35	0,05	---	---	0,35	0,25	0,15
C443	%	5,2	---	---	---	---	---	---	---	---	---
	Limitleri	4,5-6,0	2	0,6	0,35	0,1	---	0,5	0,5	---	0,25
A444	%	7	---	---	---	---	---	---	---	---	---
	Limitleri	6,5-7,5	0,2	0,1	0,1	0,05	---	---	0,1	0,2	0,15

---: eser miktar

### 2.9.5 Alüminyum silisyum alaşımları

Alüminyum döküm alaşımları dövme alüminyum alaşımlarıyla aynı dayanım artırıcı mekanizmalarla güçlendirilirler ve ısı işlemleri ve ısı işlemleri olmadan sınıflandırılırlar. Aralarındaki en büyük fark ise yüksek üretim hacimlerinde kullanılan döküm alaşımlarında alaşım elementi olarak silisyumun kullanılmasıdır. Şekil 2.2’de ikili alüminyum-silisyum faz sistemi görülmektedir [5].



**Şekil 2.2 :** Alüminyum silisyum faz diyagramı [5].

% 12 Si'un altındaki alaşımlara ötektik altı, % 12 Si'a yakın alaşımlara ötektik ve % 12 Si üstü alaşımlara ise ötektiküstü alaşımlar denilir. Al-Si döküm alaşımları toplam üretilen döküm parçalarının % 85-90'ını oluşturur [11]. İkili Al-Si alaşımları mükemmel akışkanlık, dökülebilirlik ve korozyon dayanımı özellikleri sergilerler. Ötektik-altı Al-Si alaşımlarının dayanım, süneklilik ve dökülebilirliği Al-Si ötektiğinin modifikasyonu ile olur. Ön alaşımlandırma ile istenilen mikroyapının elde edilmesi işleme modifikasyon, ön alaşımlandırmada kullanılan elemente de modifikatör denir. Modifikasyon kum dökümlerde kısmen avantajlıdır ve Na ve / veya Sr'un kontrollü ilavesi ile başarıyla sağlanır. Ca zayıf bir ötektik modifiye elementidir ve daha lamelar ötektik Sb ilavesi ile elde edilir. Yüksek katılma hızları daha ince modifiye olmamış ötektik mikro yapı oluşumunu teşvik eder. Ötektik üstü alüminyum silisyum alaşımlarında silisyum fazının P ilavesi ile rafine edilmesi döküm ve ürün performansı için gereklidir [10].

### 2.9.6 Alaşım elementlerinin etkileri

Sb (Antimon): % 0,1 veya daha yüksek seviyelerdeki konsantrasyon miktarlarında antimon alüminyum-silisyum ötektiğinin tane boyutunu inceltir. Ötektik yapı daha çok Si'ların küresel olarak oluştuğu fibröz olarak tabir edilen şekilden ziyade daha lamelar bir ötektik yapıdır. Antimonun ötektik yapıyı değiştirmesi yönündeki etkinliği fosforun olmadığı durumlarda ve hızlı katılma oranına etkinliğine

bağlıdır. Antimon aynı zamanda sodyum veya stronsiyum ile reaksiyona girerek döküm ve metalurjik yapı üzerinde etki yapan büyük intermetalikler oluşturur. Antimon ağır metal olarak sınıflandırılır, toksik etkiler gösterir.

Be (Berilyum): Ppm oranında berilyum ilavesi oksijen kayıplarının ve magnezyum içeren bileşimlerin içindeki inklüzyonların azaltılmasında etkilidir. Yüksek konsantrasyonlarda ( $> \% 0,04$ ) demir içerikli intermetaliklerin şeklini ve bileşimlerini etkiler, dayanım ve sünekliliği iyileştirir. Berilyumun akciğer kanserinin oluşmasına etkisi vardır ve proses esnasında özel önlemler gerektirir.

Bi (Bizmut): Bizmut ilaveleri döküm alaşımlarının işlenebilirliğini  $\% 0,1$  oranının üzerindeki konsantrasyonlarda iyileştirir.

B (Bor): Bor diğer metallerle birleşerek  $TiB_2$  ve  $AlB_2$  gibi borürleri oluşturur. Titanyum borür yapı içerisinde tane inceltme için  $TiAl_3$  gibi tane inceltici fazlar oluşturarak durağan çekirdek bölgeleri oluşturur. Metalik borürler işleme operasyonlarında takım ömrünü azaltırlar, mekanik özellikler ve süneklilik üzerinde kalıcı etkileri olan büyük veya topaklaşmış inklüzyonlar oluştururlar.

Cd (Kadmiyum):  $\% 0,1$ 'i aşan konsantrasyonlarda, kadmiyum işlenebilirliği geliştirir.  $767\text{ }^\circ\text{C}$ 'de buharlaşmaya başlar.

Ca (Kalsiyum): Kalsiyum zayıf bir alüminyum-silisyum ötektik modifikasyon elementidir. Hidrojen çözünürlüğünü yükseltir ve düşük oranlarda döküm porozitesinden sorumludur.  $\% 0,005$  oranlarının üzerinde alüminyum-magnezyum alaşımlarında sünekliliği ters oranda etkilerler. Alüminyum silisyum alaşımlarında dayanımı yükseltir ve uzamayı azaltır. Fakat bu alaşımları ısıtılı işlemli yapmaz [2, 13].

Ce (Seryum): Seryum döküm alaşımlarına akışkanlığı yükseltmek ve kalıba yapışmayı azaltmak amacıyla kullanılır [2].

Cr (Krom): Krom ilaveleri genellikle düşük oranlarda oda sıcaklığındaki yaşlandırılmalarda ve tane büyümesinin oluşabildiği termal olarak dengesiz olan bileşimlerde yapılır.

Co (Kobalt): Alüminyum alaşımlarında sıkça kullanılan bir element değildir. Alüminyum-silisyum alaşımlarında alüminyum-demir-silisyum fazını daha yuvarlak alüminyum-kobalt-demir fazına çevirir, dayanımı ve uzamayı artırır [2].

Cu (Bakır): Bakır döküm haliyle ve ısıl işlemlilerle dayanımı ve sertliği artırır. Alaşımlarda % 4-5,5 aralığındaki bakır oranı ısıl işlemlilerle ve iyileşmiş döküm özellikleri sağlar. Bakır genellikle genel korozyona olan direnci azaltır ve özel bileşimlerde stres korozyon hassasiyetini artırır. Sıcak yırtılma dayanımını düşürür ve interdritik çekintiyi yükseltir.

Fe (Demir): Demir sıcak yırtılma dayanımını iyileştirir ve dökümlerde kalıba yapışma meyilini azaltır. Demir oranının yükselmesi sünekliliği azaltır. Demir aynı zamanda  $FeAl_3$ ,  $FeMnAl_6$  ve  $\alpha$   $AlFeSi$  gibi intermetalik fazlar oluşturur. Bu fazlar yüksek sıcaklıklarda dayanımı artırır ancak mikro yapının kırılma haline gelmesine de yol açar.

Hg (Kurşun): Kurşun % 0,1'den büyük konsantrasyonlarda işlenebilirliği iyileştirmek için kullanılır.

Mg (Magnezyum): Magnezyum genellikle ısıl işlemlilerle alaşımlarda, bakır ve nikel içeren alüminyum-silisyum alaşımlarında dayanım ve sertlik gelişimi için kullanılır.  $Mg_2Si$  sertleşme fazı % 0,7 Mg'a kadar yararlı bir çözünürlük limiti sergiler, daha yüksek oranlarda ise dayanımda değişiklik olmaz veya yumuşama meydana gelir. Bilinen yüksek dayanımlı alüminyum-silisyum alaşımları % 0,07 - % 0,4 oranında magnezyum içerir. % 1,25 oranına kadar magnezyum mekanik dayanımı ısıl işlem sonrası artırır [14]. İkili alüminyum magnezyum alaşımlarında parlak yüzey, korozyon dayanımı, mekanik dayanım ve süneklilik özellikleri için % 4- % 10 arası magnezyum kullanılır. % 7'den büyük magnezyum alaşımları ısıl işlemlilerle kullanılır.

Mn (Mangan): Döküm alaşımlarında safsızlık olarak gravite döküm bileşimlerinde kullanılır. Ayrıca alaşımlarda % 0,5'den yüksek oranda  $MnAl_6$  oranı iç yapıyı sağlamlaştırır.

Ni (Nikel): Nikel genellikle bakır ile birlikte yüksek sıcaklık özelliklerini artırır. Aynı zamanda termal genişleme katsayısını düşürür.

P (Fosfor): Fosfor  $AlP_3$  olarak ötektik üstü alüminyum silisyum alaşımlarında birincil silisyum faz oluşumunu iyileştirir ve çekirdeklendirir. Ötektik altı alüminyum silisyum alaşımlarında ppm oranlarında ötektik yapıyı genişletir, stronsiyum ve sodyum gibi genel modifikatörlerin etkinliğini azaltır.

Si (Silisyum): Silisyumun alüminyum alaşımlarındaki olağanüstü etkileri döküm karakteristiklerini iyileştirmesidir. Silisyum ilavesi akışkanlığı, sıcak yırtılma direncini ve besleme karakteristiklerini yükseltir. Ticari alaşımlarda ötektik altı ve ötektik üstü olarak % 30 silisyum oranlarına ulaşılır. Artan silisyum oranı akışkanlığı artırır. Alüminyum alaşımları katılaşma çatlaklarına daha dayanıklıdır. Çekinti porozitesini minimize etmek için gerekli olan besleme katılaşmış hacmin artmasıyla gelişir. Bu yüzden alüminyum silisyum alaşımlarındaki silisyum oranı katılaşma hızları ile orantılıdır.

Na (Sodyum): Sodyum alüminyum silisyum ötektiğini modifiye eder. Fosforun olmadığı durumlarda % 0,01 oranları etkilidir. Sodyum ergimiş alüminyumda süratle kaybolur. Periyodik ilaveler modifikasyon oranlarının sağlanması için gereklidir. Diğer modifikatörlerin aksine sodyum her katılaşma koşulunda etkili bir alüminyum silisyum ötektik modifikasyonu sağlar.

Sr (Stronsiyum): Stronsiyum alüminyum silisyum ötektiğini modifiye eder. Etkin modifikasyon çok düşük ilave seviyelerinde elde edilir. Genellikle % 0,008 ile % 0,04 oranları kullanılır. Düşük konsantrasyon oranları yüksek katılaşma hızları ile birlikte etkilidir. Yüksek ilave oranları döküm porozitesine yol açar.

Ti (Titanyum): Titanyum alüminyum döküm alaşımlarında tane yapısını iyileştirmek için düşük oranlarda bor ile birlikte kullanılır.

Zn (Çinko): Çinko alüminyum dökümlerde tek başına belirgin bir kazanç sağlamaz, ancak bakır ve/veya magnezyum ile birlikte kullanıldığı zaman ısıl işlemler veya doğal yaşlandırılmış bileşimlerde kullanılır [10].

### **2.9.7 Alüminyum alaşımlarında safsızlıklar**

Safsızlık alüminyum alaşımlarında karşılaşılan önemli bir problemdir ve farklı biçimlerde görülür. Tarih boyunca alüminyum alaşımlarının üretimleri, endüstriyel uygulamaları ve adlandırma sistemlerindeki gelişim hızı sürekli artmıştır.

Alüminyum alaşımı bileşimlerinin daha karmaşık hale gelmesiyle birlikte, alaşımların safsızlıklarla ilgili gereksinimleri de artmıştır. 1960'lı yıllarda, kontrol altına alınamayan safsızlıkların miktarı % 0,1 ile sınırlandırılmıştır. Bu oran genel olarak % 0,05, bazı alaşım gruplarında ise % 0,001'dir. Günümüzde gelişmiş ülkelerde metalurjik alaşım ve birincil alüminyum üretimi gelişim hızı azalmaktadır. Bununla birlikte, ikincil hammaddelerin çevriminin artmasına bağlı olarak, alüminyum alaşımı üretim miktarı sabit kalmıştır. Diğer bir yandan son yıllarda alaşımların metal olmayan kalıntılardan (inklüzyonlardan) temizlenmesi gereksinimi bir iki kat artmış durumdadır. Bunun sebebi hurda, atık, karışım alaşım ve bunların uygun olmayan sistem bileşenleri tarafından kirletilmesinde sürekli bir birikim söz konusu olmasıdır. Periyodik cetvelde, alüminyum alaşımlandırma veya safsızlık elementi olarak 50'ye yakın element bulunur. (Şekil 2.3)

H																	He			
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne			
Mg												Al	Si	P	S	Cl	Ar			
	Ca	Sc	Ti	Zr	Hf	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sb	Te	I	Xe				
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn			
Fr	Ra	Ac																		

1   
 2   
 3   
 4

1) < % 0,0001; 2) % 0,0001-0,001; 3) % 0,001-0,01; 4) > % 0,01

**Şekil 2.3 :** Ticari alaşımlarda önemli sayılacak miktarda bulunan elementler [15].

Bunlardan en çok 6 tanesi alaşımlandırma elementi olarak kullanılır ve katı alüminyum içerisinde % 1'den daha fazla çözünürlük oranına sahiptir. Bu elementler Cu, Mg, Zn, Li, Si ve Mn'dur. Bu elementler alüminyum ile aşağı yukarı 15 tane ikili, üçlü ve çoklu bileşim sistemi oluştururlar.

B. B. Gulyaev'e göre, alaşımlandırma elementlerinin dışında kalan diğer elementler ilave veya katkı elementleri olarak adlandırılırlar. Bu elementlerin alüminyum alaşımı içerisindeki miktarları çok azdır (yaklaşık % 0,1) ve genellikle mikro alaşımlandırma elementleri olarak adlandırılırlar. Bu grup elementlerin büyük bir kısmı dönüşüm elementleri olarak adlandırılırlar ve katı alüminyum içerisinde % 0,05'den fazla oranda çözünürlüğe sahiptirler. Bu elementler; Sc, Ti, Zr, W, Nb, V, Cr, Fe, Ni Be ve Cd'dir. B.B Gulyaev'e göre, alüminyum ve alaşımlarının içerdiği bütün elementler safsızlık olarak sınıflandırılırlar. Bu elementler kalıcı, düzensiz (rastgele),

zararlı ve nötr gibi gruplara ayrılırlar. Nötr safsızlıklar grubu elementlerinin alüminyum içerisindeki çözünürlükleri çok düşüktür (yaklaşık % 0,001 mol). Bu elementler; Te, Hg, Cb, N, O, H'dir. Zararlı safsızlıklar grubu elementlerinin ise alüminyum içerisinde çözünürlükleri yaklaşık % 0,1-0,01 mol olan elementlerdir (K, Ca, Na, Ba, Y, La, Ce, Co, Fe, Ni, Sn, In, Pb, Bi, As).

Na, Sr, Sb, P ve B gibi bazı mikro alaşımlandırma elementleri zararlı safsızlıklar grubuna girer, örneğin Na ve P elementleri hem yapıyı modifiye edici, hem de modifikasyonu bozan özelliklere sahiptir.

Pratikte, safsızlık miktarlarının sınırları külçelerin ve döküm parçalarının döküm ve soğutma koşullarına, daha sonraki işlemlere ve nihai ürünün kullanım koşullarına bağlıdır.

Safsızlık miktarları sınıflandırması problemi ve alaşımların etkili şekilde arılaştırılması için yapılan fiziksel ve kimyasal çalışmalar sırasıyla şu konuları kapsamaktadır; a) alüminyum alaşımlarında safsızlığın kaynakları ve birikimin dinamiği çalışması, b) safsızlıkların alüminyum ve alüminyum alaşımları ile olan kimyasal ve fiziksel etkileşimlerinin doğasının analizi, c) kontrol edilemeyen, üzerinde çalışılmamış veya benzersiz safsızlıkların ve alaşımların fiziksel, kimyasal, teknolojik ve servis özellikleri üzerine etkisinin araştırılması, d) temel endüstriyel alüminyum alaşımlarındaki safsızlıkların sınıflandırılması ve miktarlarının düzenlenmesi, e) alaşımların safsızlıklardan arındırılması veya zararlı etkilerinin nötr hale getirilmesi için fiziksel kimyasal ve teknolojik temel çalışması.

Mısır'daki "Tabbin Institute for Metallurgical Studies" ve Rusya'daki "Moscow Institute for Steel & Alloys" kuruluşları uzun bir süre deneysel çalışmalar sonucunda alüminyum ile alüminyum alaşımları içerisindeki safsızlıkların miktarları ile ilgili istatistiksel veriler toplamışlardır. Safsızlıkların alüminyum alaşımları üzerindeki etkileri ile ilgili farklı yayınlar yapılmıştır.

Çeşitli ülkelerdeki standartlara göre, genellikle sadece Fe, Si, Cu, Zn ve Ti miktarları kontrol altında tutulmaktadır. Safsızlık elementlerini, alüminyum içerisindeki miktarlarına göre 4 grup altında sınıflandırmak mümkündür; 1) % 0,01'den fazla miktardaki, kontrol altına alınabilen temel safsızlıklar (Fe, Si, Cu, Zn ve Ti); 2) % 0,001-0,01 aralığındaki miktarlardaki tipik safsızlıklar (Mg, Mn, Na, Ca, Ba, Ga, Li,

V, Ni, Cr, Zr); 3) ppm seviyelerinde (% 0,0001-0,001 aralığı) seyreden eser safsızlıklar (K, Cd, Sn, Pb, B, P, C, N, O, H), 4) % 0,0001'den düşük eser türevi safsızlıklar (Bi, As, Sb, S, Co, Hf, Sc, Y ve diğer elementler.)

Alüminyum alaşımları içerisindeki kontrol altında olan ve olmayan safsızlıklar birincil alüminyum içindeki safsızlıklardan daha fazladır. Ayrıca hem üretim prosesleri boyunca, fırın astarları ve flaksların etkisiyle kirlenmektedirler. Aşağıda sıralanan elementler miktarları alüminyum alaşımının değişik özelliklerini etkileyecek değerlere ulaşan, kontrol altına alınamayan veya düzensiz olarak kontrol altına alınabilen elementlerdir; 1) Alkali: Li, Na, K, 2) Alkali dünya: Ca, Sr, Ba, 3) Dönüşüm: Sc, Ti, Zr, V, Cr, Fe, Ni, 4) Gaz ve diğerleri: As, Sb, B, C, N, P, O, H.

Safsızlıkları, alüminyum alaşımları üstündeki zararlı etki mekanizmalarına göre sınıflandırmak mümkündür; a) hidrojen gibi porozite oluşturan çözünür gazlar, b) metalsiz kalıntılar oluşturan safsızlıklar, c) fazlararası etkileşmeye neden olan (ayırışma vb) yüzey aktif safsızlıklar, d) gazla ergiyiği doyuran ve oksidasyona neden olan kimyasal aktif safsızlıklar, e) kaba ve kırılğan metaller arası bileşik oluşturan, az çözünür safsızlıklar, f) mikro alaşımlandırma etkisini azaltan ve modifikasyonu bozan safsızlıklar.

Metaller arası kırılğan fazları oluşturan safsızlık miktarlarının sınıflandırılmasındaki en önemli neden safsızlıkların katı alüminyum içerisindeki düşük çözünürlükleridir. Bu safsızlıklar kristalleşme sıcaklık aralığı boyunca birikirler ve ötektikten farklı olarak metaller arası kaba kristal fazları oluştururlar. Bu elementler Fe, Co, Ni, Ba ve Ca gibi düşük yayılım katsayısına sahip ve pratik olarak homojenleştirmeye çözülme safsızlıklardır [15].

### **2.9.8 Alüminyum döküm prosesi seçimi**

Özel bir parçanın üretimi için döküm prosesinin seçimini birçok faktör etkiler. En önemli seçim kriterleri aşağıdaki gibidir:

- Döküm prosesinde dikkate alınması gerekenler: akışkanlık için olan gereklilikler, sıcak yırtılmaya karşı dayanım, çekinti zafiyetinin minimize edilmesi.

- Döküm dizaynında dikkate alınması gerekenler: Taslak ön çalışma, duvar kalınlığı, iç bölgelerin tasarımı.
- Mekanik özellik gereklilikleri: Dayanım ve süneklilik, sertlik, yorulma dayanımı, mukavemet, darbe dayanımı, özellik sınırları.
- Fiziksel özellik gereklilikleri: Elektrik ve termal iletkenlik, özgül ağırlık, genişleme özellikleri.
- Proses gereklilikleri: İşlenebilirlik, kaynak edilebilme ve kimyasal son işlem.
- Servis gereklilikleri: Basınç dayanımı, korozyon dayanımı, aşınma direnci, yüksek sıcaklık dayanımı, boyutsal ve termal denge.
- Ekonomi: Hacim, üretim adedi, üretkenlik, proses çıktıları, ürünler, malzeme maliyetleri, takım maliyetleri, işleme masrafları, kaynak ve ısıtma işlemi.

### **2.9.9 Alüminyum döküm yöntemleri**

Genel olarak alüminyum dökümler birden fazla proses ile üretilebilir. Kalite gereklilikleri, teknik sınırlamalar ve ekonomik etkenler döküm prosesinin seçiminde seçeneklerin oluşmasında önemli faktörlerdir.

Üç temel döküm prosesi sırasıyla:

- Kum döküm: Büyük döküm parçalar için (birkaç tona kadar), 1 adetten birkaç bin adete kadar olan üretim adetlerinde,
- Sürekli kalıba döküm (gravite ve alçak basınç): Orta boyutlu döküm parçalar için (100 kg'a kadar), büyük miktarlarda üretim adetlerinde (1000'den 100000 adede kadar),
- Yüksek basınçlı döküm: Küçük parçalar için (50 kg'a kadar), yüksek üretim adetlerinde (10000 adet ile 100000 adet arası) [11].

#### **2.9.9.1 Basınçlı döküm yöntemi**

1960'lı yıllarda basınçlı döküm, oksijenin metalle reaksiyonu sonucu oluşan alüminyum oksit, çinko oksit, magnezyum oksit gibi döküm kalitesini bozan

kirlilikler yüzünden çok güçlü olamamıştır. Ancak bu döküm yöntemiyle diğer yöntemlere göre çok ince kesitlerde döküm yapılabilmesi büyük bir avantajdır. Bu yöntemle 1,2-1,5 mm kesit kalınlığına kadar alüminyum ve magnezyum döküm yapılabilir. Ötektik veya ötektik altı alüminyum alaşımlarından üretilen vites parçaları bugün alüminyum basınçlı dökümle üretilmektedir. Basınçlı döküm ile diğer tüm yöntemlere göre çok dar toleranslarda ve çok ince kesitlerde iyi bir yüzey kalitesi ile karmaşık parçalar üretilir. Bu yöntemde yüksek sıcaklıklarda dahi döküm yapısında porozite oluşmaz [3].

#### **2.9.9.2 Düşük basınçlı döküm yöntemi**

Düşük basınçlı döküm yönteminde sıvı metalin kalıp boşluğunu kendi ağırlığı ile doldurması sırasında sıvı metale yaklaşık 0.3-0.5 bar basınç uygulanır. Sıvı metal banyosu ve kokil kalıp boşluğu bir düşey boru ile birbirine bağlanır. Sıvı metal yüzeyine yapılan bir basınçla metalin kalıbı doldurması sağlanır. Bu amaçla AlSiCuMg(Ni), AlMgSiMn, AlSiCuMg gibi alaşımlar geliştirilmiştir. Bu alaşımlarda birincil silisyum çok ince ve homojen dağılımlı olmaktadır [3].

#### **2.9.9.3 Kum döküm yöntemi**

Basınçlı döküm yöntemleri ve güvenli fakat pahalı vakum döküm yöntemlerindeki gelişmelerin yanında kum döküm de hızlı bir gelişme göstermiştir. Düşük sayıda veya prototip üretiminde ve büyük kompleks parçaların üretiminde harcanabilir kalıp kullanarak kısa sürede ekonomik parça üretmek bu yöntemle mümkündür. Kimyasal kum bağlayıcıların geliştirilmesi ile hızlı bir üretimin yanında düşük fiyat ve seri üretime uyulanabilme özellikleri bu yöntemin en önemli avantajlarıdır. Dezavantajları ise yüksek işleme masrafları, kötü yüzey ve ince kesit döküm için getirdiği sınırlamalardır [3].

#### **2.9.9.4 Cosworth döküm yöntemi (Roll-Over yöntemi)**

Klasik kum döküm yönteminin bir başka tipi olan bu yöntem İngiltere’de Cosworth firmasının adı ile anılmaktadır. Düşük basınçlı kum döküm yöntemi alüminyum döküm parçaların üretimi için normal kum döküm yöntemine göre bazı avantajlar sunar. Alüminyum alaşımı bu yöntemde koruyucu gaz atmosferi altında bir elektrikli direnç fırınında ergitilir ve koruyucu bir atmosfer altında tutma ocağında tutulur. Bir elektromanyetik pompa yardımı ile sıcak tutma ocağındaki sıvı metal kum kalıbın

kalıp boşluğuna boşaltılır. Bu yöntemde kalıp maçaları soğuk kutu (Cold-Box) yöntemi ile üretilir. Dökümden önce hazır kalıplar döküm istasyonuna elektromanyetik pompalarla iletilir. Döküm prosesinin otomatik olması daha az yer ve daha az personele ihtiyaç duyar. Düşük ısısız genleşmeli zirkon kullanımı kapalı bir proses çevrimini mümkün kılar. Kalıp ve maçalarda zirkon kumu kullanımı hem temiz hem de ekonomiktir [3].

#### **2.9.9.5 VAW- maça paketleme yöntemi**

VAW-Alucast GmbH büyük ölçekli parçalar için önemli imkanlar sunan maça paketleme yöntemini ortaya çıkarmıştır. Bir elektromanyetik pompa yardımıyla düşük basınçlı döküm tekniği prensibine dayalı özel bir modeldir. Artan ihtiyaçlar, bu yöntemin büyük seri imalatlar için geliştirilmesini zorunlu kılmıştır. Bu yöntemde karışımlar optimum ayarlanır ve gerekli kalite için optimum şartlar belirlenir. Kalıp doldurulmadan önce kalıp boşluğu soy gaz ile temizlenir. Gerektiğinde maça paketleme işlemi ile üretilen kalıp indüktif olarak istenilen sıcaklığa ısıtılır. Bu yöntem günümüzde yeni motor üretiminde önemli bir alternatif yöntemdir [3].

#### **2.9.9.6 Hvs- yöntemi**

Bu yöntem özellikle hava taşıtlarının motor bloklarının dökümü için 1980 yıllarının sonunda geliştirilmiştir. Bu yöntem düşük basınçlı dökümde ideal kalıp dolumu sağlayan bir yöntemdir. Katılaşmaya kadar geçen uzun katılaşma süresini kısaltmak için, döküm için uygun bir kapak geliştirilmiştir. Kalıbın dolmasından hemen sonra transfer edilmekte ve diğer kalıp doldurulmaktadır. Bir pnömötik veya hidrolik silindir kalıbın dolmasının hemen ardından kalıbı döküm ağzına sürmektedir [3].

#### **2.9.9.7 Metal kalıba gravite döküm**

Uzun ömürlü metal kalıplar demir tehlikesine karşı alüminyum dökümde önemli bir imkandır. Kokil döküm Almanya'da 20. yüzyılın başında başlamıştır. İyi dökülebilirlik, düşük döküm sıcaklığı, hızlı kabuk oluşumu ve alüminyumun kalıba minimum zararı bu yöntemin produktivitesini arttırmaktadır. Büyük parça üretimi, yüksek döküm verimi, uzun kokil ömrü ve döküm kalitesinin artırılması için yeni kalıp ve döküm yöntemleri geliştirilmektedir. 150 kg'lık döküm parçaları 1-3 mm kesit kalınlığında gerçekleştirilebilmektedir [3].

#### **2.9.9.8 Karşı basınçlı döküm yöntemi (Counter-Pressure casting)**

1980 yıllarının başında alüminyum döküm jantlar Bulgaristan'da karşı basınçlı döküm sistemi ile üretilmiştir. Bu sırada alüminyum jantlar Mahle ve Kolbenschmidt'te düşük basınçlı dökümle üretilmekteydi. Düşük basınçlı döküme göre bu yöntem çok daha uygun maliyetlidir. Karşı basınç döküm yönteminde hidrolik kama mekanizması ile döküm kalıbı dolduktan sonra, eritme fırını ve döküm kalıbı arasında minimum bir hacim farkı oluşuncaya kadar gazla doldurulur, böylece düşey metal iletimi engellenir. Burada geride kalan gazın etkisiyle kristalleşme gerçekleşir. Gazın kesilmesinden sonra döküm parçasının katılaşmasına kadar soğutma devam eder. Gaz kesildikten sonra kalıp açılır ve bir hidrolik sistem yardımıyla döküm parçası kalıptan çıkarılır [3].

#### **2.9.9.9 Düşey sürekli döküm**

Nihai ürüne ulaşmak için hidrolik veya mekanik preslerle üretim aşamasına gelene kadar, kokil döküm yöntemi ile bir ön şekillendirme yapmak gerekir. Bunun için 1957'de Mahle'de geliştirilen düşey sürekli döküm tekniği ile ekonomik olarak alüminyum alaşımlar üretilmiştir. Düşey sürekli döküm tekniği su döküm yöntemi olarak da adlandırılmaktadır. Bu yöntem ile ötektik ve ötektik üstü alüminyum alaşımları dökmek mümkündür. Düşey sürekli dökümle 80-200 mm çapında çubuklar bir kaç metre uzunluğunda seri olarak üretilebilir [3].

#### **2.9.9.10 Hassas döküm yöntemi**

Hassas döküm yöntemi, işleme masraflarını ortadan kaldırması nedeniyle önemli avantajlara sahip olmasına rağmen, otomobil endüstrisinde ancak belirli noktalar için uygundur. Gerçi ölçü hassasiyeti ve iyi yüzey kalitesi nedeniyle diğer yöntemlere göre hassas döküm daha avantajlı olabilir. Otomobil endüstrisinde binek dizel otomobiller için girdap odası, sıcak mukavemete ve aşınma dayanımına sahip alaşımlardan hassas döküm yöntemi ile üretilir. Buna benzer parçalar hassas döküm yöntemi ile alüminyum veya diğer alaşımlardan üretilebilirler [3].

#### **2.9.9.11 Dolu kalıp döküm yöntemi (Lost-Foam)**

Otomobil endüstrisinin motor bloklarında alüminyum alaşımlarına ilgisinin başlaması ile seksenlerin sonunda basınçlı döküm ve düşük basınçlı döküm yöntemlerinin yanında dolu kalıp döküm yöntemi geliştirilmiştir. Bu yöntem

Amerika’da küçük motorlarda seri olarak kullanılmaktadır. Bu yöntemde düşük tesis masrafları, düşük kalıp maliyeti ile değişik alternatiflerle üretim yapılabilir. Polisitirolen kabuk oluşturulur ve seramik çözeltiye daldırılmadan önce staytropol parçaları ile sertleştirilir. Kalıp malzemesi olarak kullanılan bağlayıcısız kuvars kumu ile birlikte kum sandığı içinde vibrasyonla kalıplanır. Sıvı metalin dökümü ile dolu kalıp buharlaşır. Kalıp kumu % 100 tekrar kullanılabilir. Ancak her bir döküm parçası için bir model gerektiğinden, model maliyeti yüksektir [3].

#### **2.9.9.12 Sıvı presleme yöntemi (Squeeze Casting)**

Mekanik ve termik zorlamaların arttığı durumlarda kullanılan alüminyum alaşımlarının sınırlarının mutlaka bilinmesi gerekmektedir. Otomobil üreticileri bu tür parçaların üretiminde liflerle güçlendirilmiş alüminyum alaşımlarının kullanımı için araştırmaları hızlandırmıştır. Öncelikle Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> gibi seramik liflerle hazırlanmış ön kalıp, sıvı alüminyum ile bir basınç altında bağlanır. Kalıp içine dolan sıvı metal basınç altında kristalleşir. Bu yöntemde porozitesiz bir yapı oluşur. Sıvı presleme, direkt ve endirekt olmak üzere iki tiptir. Direkt sıvı preslemede basınç, doğrudan kokil içindeki sıvı metale uygulanırken, endirekt sıvı preslemede basınç, döküm kalıbı içindeki sıvı metale bir besleme sistemi üzerinde ulaştırılır [3].

#### **2.9.9.13 Tikso şekillendirme yöntemi (Thixforming)**

Diğer yöntemlere üretilmeyen yüksek mukavemetli ve aşınma dayanımlı bileşimlerdeki malzemelerin bu yöntemle üretilmesi mümkündür. Bu parçaların alaşım yapılarının davranışı, kısmen sıvı haldeki metal-alaşımlarının özelliklerine dayalıdır. En temel fark mukavemet ve uzama davranışında ortaya çıkar. Çok düşük porozite ve çok ince taneli yapı tipik özelliğidir. Özel bir yapı olarak düşey sürekli dökümde elektromanyetik motorlarla çubuk ekseninde radyal bir karıştırma işlemi dendritik yapının kırılmasına sebep olur. Bu yarı ürünlerin işlenmesi için geleneksel basınçlı döküm makinaları kullanılır. Bunun için kesilen parçalar indüktif olarak kısa süre ısıtılırlar ve kısmen ergime sağlanır. Isıtılan parça çok yumuşak hale gelir ve basınçlı döküm makinasına verilir. Bu yöntem için ince kesitli ve kompakt parçalar üretilir. Çok mukavemetli ve yoğun parçalar ısıl işlemle sertleştirilebilir, kaynak edilebilir ve anodize edilebilir. Bu yöntemle, frenler, direksiyon kolu ve vitesler üretilir [3].

## 2.10 Mikro Yapının Özelliklere Etkisi

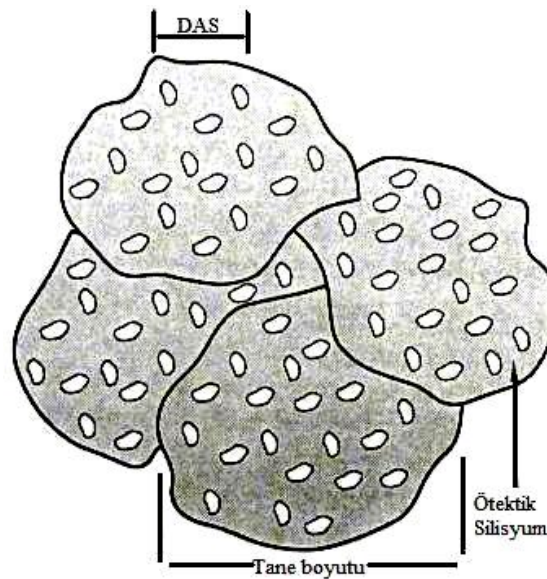
Mikro yapısal özellikler metal kimyasının ve katılaşma durumunun çıktılarıdır. Mekanik özellikleri hatalar dışında en kuvvetli şekilde etkileyen özellikler;

- intermetalik fazların büyüklüğü, şekli, dağılımı ve dendritik kol uzaması (DAS),
- tane büyüklüğü ve şekli,
- ötektik modifikasyon ve birincil faz inceliği'dir [10].

a) Ötektik silisyum boyutu ve şekline ilave olarak, katılaşma hızı ile belirlenen dendrit kol uzaması (DAS) birincil öneme sahiptir.

b) Tek fazlı metallerde tane büyüklüğü uzun zamandan beri çekme özelliklerinin belirlenmesinde önemli rol oynadığı bilinmektedir. Büyük oranlarda ötektik yapı içeren Al-Si gibi döküm alaşımlarında özellikler ise tane büyüklüğüne daha az bağlıdır.

c) Özellikleri belirleyen kırılmalı ötektik silisyum fazıdır. Bu yüzden ötektik modifikasyonu tane inceltme işleminden daha fazla önem kazanmıştır. Mikroyapının bu üç özelliği aşağı yukarı birbirine bağlıdır, örneğin büyük veya ince taneli dökümler modifiyeli veya modifiyesiz silisyum ile ve büyük ya da küçük dendrit kol uzamalarıyla oluşabilirler. Şekil 2.4 bu 3 özelliği göstermektedir [11].



Şekil 2.4 : Al-Si döküm alaşımının temel özellikleri [11].

### **2.10.1 İntermetalik fazlar**

İntermetalik faz oluşumunun gerekliliği için element konsantrasyonu kontrolü ve birleşme oranlarının gözlemlenmesi, özelliklerin gelişimi için hedeflenen mikro yapıların eldesiyle sonuçlanır.

Katılma hızı ve katılma sonrası soğutma, intermetaliklerin düzgün boyutlu olmasını, dağılımını sağlar ve yapılarını etkiler.

Daha düşük katılma hızları, büyük boyutlu intermetaliklerin oluşumunu ve tane sınırlarında ikincil faz oluşumlarına neden olur.

Faz oluşumu difüzyon kontrollüdür böylece daha hızlı katılma ve katılma sıcaklığından oda sıcaklığına daha hızlı soğuma daha büyük oranlarda katı çözültü elde edilmesine ve daha küçük parçacıkların daha ince dağılmasına sebebiyet verir [10].

### **2.10.2 Dendrit kol uzaması**

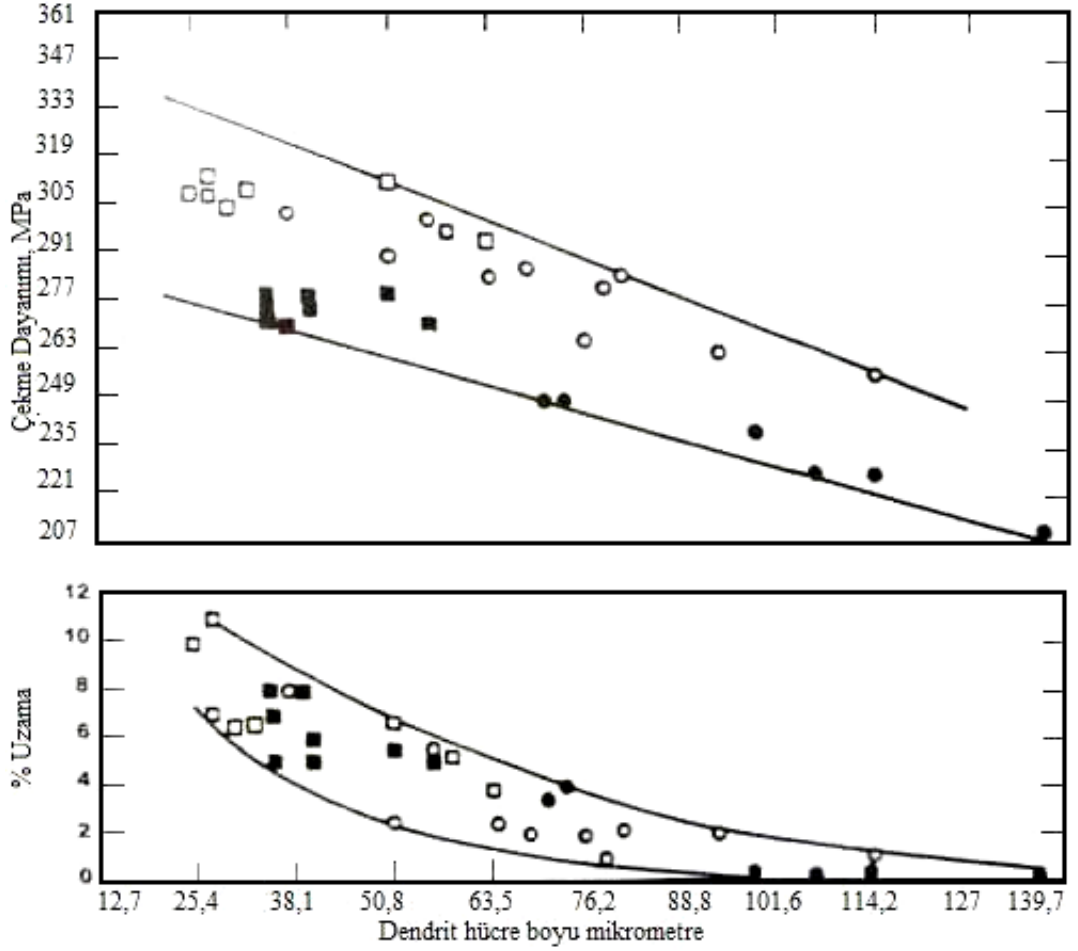
Bütün ticari proseslerde, yarı katı oluşumu haricinde, katılma işlemi dendritlerin sıvı çözültüden oluşumlarıyla başlar. Dendritik yapıda bulunan hücreler birincil ve ikincil dendritleri ayıran kollar arasındaki hücrelerdir ve belirli bir bileşimdeki katılma hızıyla kontrol edilir.

Dendrit tavsiyesi açıklaması için en az 3 ölçüm bulunmaktadır:

- a) Dendrit kol uzaması: İkincil dendrit kollar arası mesafe,
- b) Dendrit hücre aralığı: Bitişik dendrit hücrelerin merkezleri arası mesafe,
- c) Dendrit hücre boyu: Bireysel dendrit hücrelerin genişliğidir.

Daha büyük dendrit kol uzaması daha büyük mikro bileşimlere sebebiyet verir ve sonuç olarak özelliklere etkisi artar.

Daha ince dendrit kol uzaması daha gelişmiş mekanik özellik performansları için geçerlidir. (Şekil 2.5) [10].



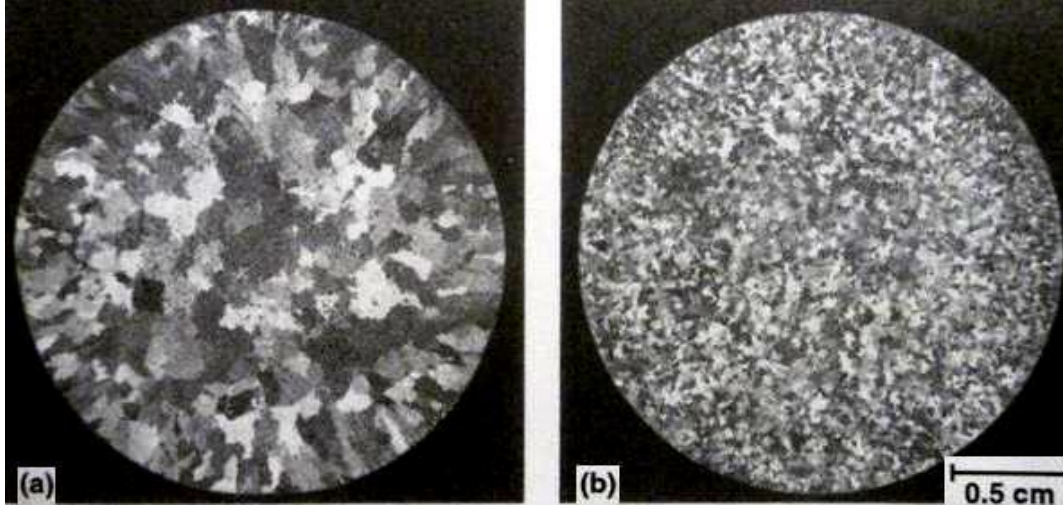
**Şekil 2.5 :** Dendrit hücre boyu ve çekme özelliği ilişkisi (A356.0-T62 alaşımı) [10].

Her bir tane hepsi aynı çekirdekten gelen alüminyum dendrit ailesi içerir. Dendrit kol uzaması süngerimsi bölgeden yapılan soğuma hızına bağlıdır, yavaş soğuma hızları büyük DAS değerleri verir. Dendrit kollar arası modifiye olmuş veya olmamış ötektik silisyum fazı bulunur. Mikroyapının bu üç özelliği boyut olarak farklıdır. Alüminyum döküm alaşımlarında tanelerin büyüklüğü 1-10 mm arası; DAS değerleri 10-150  $\mu\text{m}$  arası ve ötektik silisyum ise plaka olarak 2 mm boyunda veya küresel olarak 1  $\mu\text{m}$  çaptan daha küçük olarak bulunur.

### 2.10.3 Tane inceltme

İnce ve eşit dağılmış taneler en iyi kombinasyona sahip dayanım ve mukavemet için arzu edilir, bu da tane sınırları yüzey alanının maksimize edilmesi ve daha ince tane sınırı bileşimleriyle mümkündür. Yüksel termal gradyan ve düşük alaşım içerikli bileşimlerle oluşmuş iri taneli yapılar ve kolonsal ve tüy şeklinde ikiz kolonsal taneler mekaniksel özelliklere zararlıdır. Oluşmuş tanelerin tipi ve boyutları alaşım

bileşimlerinin, katılma hızının ve etkili tane çekirdeklenme bölgeleri konsantrasyonlarının fonksiyonudur. Yüksek katılma hızı tane boyutunu azaltır. Tane inceltici eklenmiş döküm haliyle Al-7Si alaşımına örnek olarak Şekil 2.6 verilebilir.



**Şekil 2.6 :** Al-Si7 döküm hali tane inceltici etkileri a) Tane incelticisiz b) Tane incelticili [10].

Tane inceltme işleminin faydası dayanımın artması değildir fakat iyileşmiş kalıba besleme özellikleri, daha ince dağılmış porozite ve ikincil fazlar, iyileşmiş yüzey kalitesi ve işlenebilirlik, yüksek yorulma dayanımı ve basınca dayanım özellikleridir [12].

#### **2.10.4 Alüminyum silisyum ötektik modifikasyonu**

Ötektik altı alüminyum silisyum alaşımlarında daha iyi mekanik özelliklerin elde edilmesi ötektik yapının modifikasyonu ile sağlanır. Daha ince ve fibröz bir ötektik yapı yükseltilmiş katılma hızı ve kimyasal modifikatörlerin eklenmesiyle sağlanır.

Kalsiyum, sodyum, stronsiyum ve antimonun ötektik modifikasyon derecelerini etkilediği bilinmektedir ve katılma esnasında sağlanır [10]. Esas olarak 3 temel yapı bulunmaktadır. Bunlar; a) granüler yapı, b) lamelar yapı ve c) modifiye olmuş fibröz yapıdır.

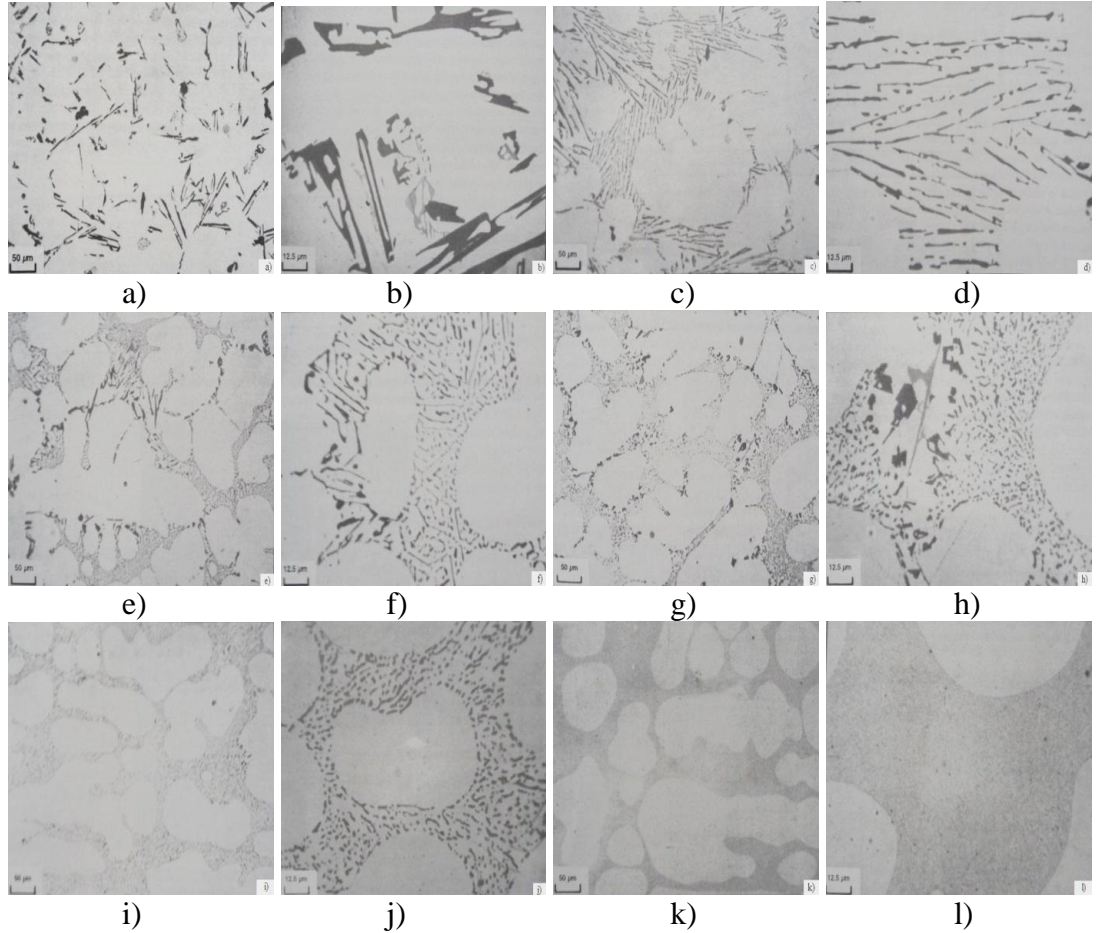
a) Granüler yapıda büyük eşeksizli (akikular) ötektik kısa, kalın silisyum lamellerinden oluşmuştur. İlk olarak katılan birincil (primer) kristaller olarak adlandırılan çok kenarlı ve büyük boyutlu partiküller içeren silisyumlar

bulunmaktadır. Ötektik alüminyumdan zorlukla ayrılabilen alüminyum dendritleri vardır.

b) Lamelar yapıda ise ötektik yapı ince, uzun silisyum yapıdadır. Birincil (primer) kristaller ise yoktur ya da çok az sayıda bulunur. Ötektikten ayrılan göreceli uzun dendritler bulunmaktadır. Lamelli yapılar fosfor oranı 5-10 ppm arasındaki alaşımlarda meydana gelir.

c) Modifiyeli veya fibröz yapılar ise çok ince ötektik yani yuvarlak şekildeki fibröz ötektikten oluşmuşlardır. Birincil silisyum kristalleri yoktur, uzun alüminyum dendritler ötektik yapıda gözükmüyor [16].

Şekil 2.7’de modifikatör ilaveleriyle yapıda oluşan değişimler görülmektedir: a) tam modifiyesiz yapı (200x), b) tam modifiyesiz yapı (800x), c) lamelar yapı (200x), d) lamelar yapı (800x), e) kısmi modifiyeli (200x), f) kısmi modifiyeli (800x), g) eksik lamelar yapı (200x), h) eksik lamelar yapı (800x), i) fibröz silisyum ötektik (200x), j) fibröz silisyum ötektik (800x), k) çok iyi bir yapı (200x), l) çok iyi yapı (800x).



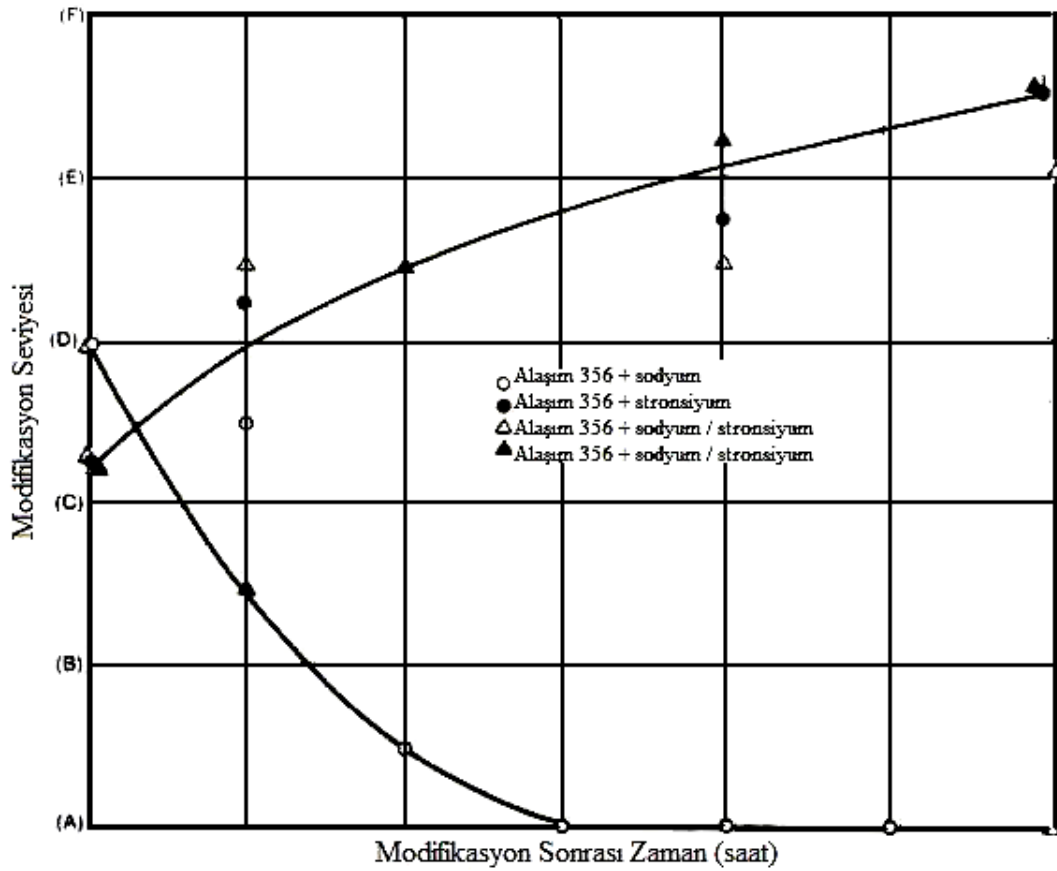
Şekil 2.7 : Al-Si ötektik modifikasyon tipleri [10].

Sodyum tartışmasız en kuvvetli modifikatördür ancak etkileri oksidasyon ve buhar basıncı kayıplarından dolayı geçicidir.

Stronsiyum daha az geçici etki gösterir ve yavaş katılma hızlarında modifikasyon için daha az etkili olabilir (Şekil 2.7). Sodyum ve stronsiyumun başlangıç etkilerinde avantaj sunarlar.

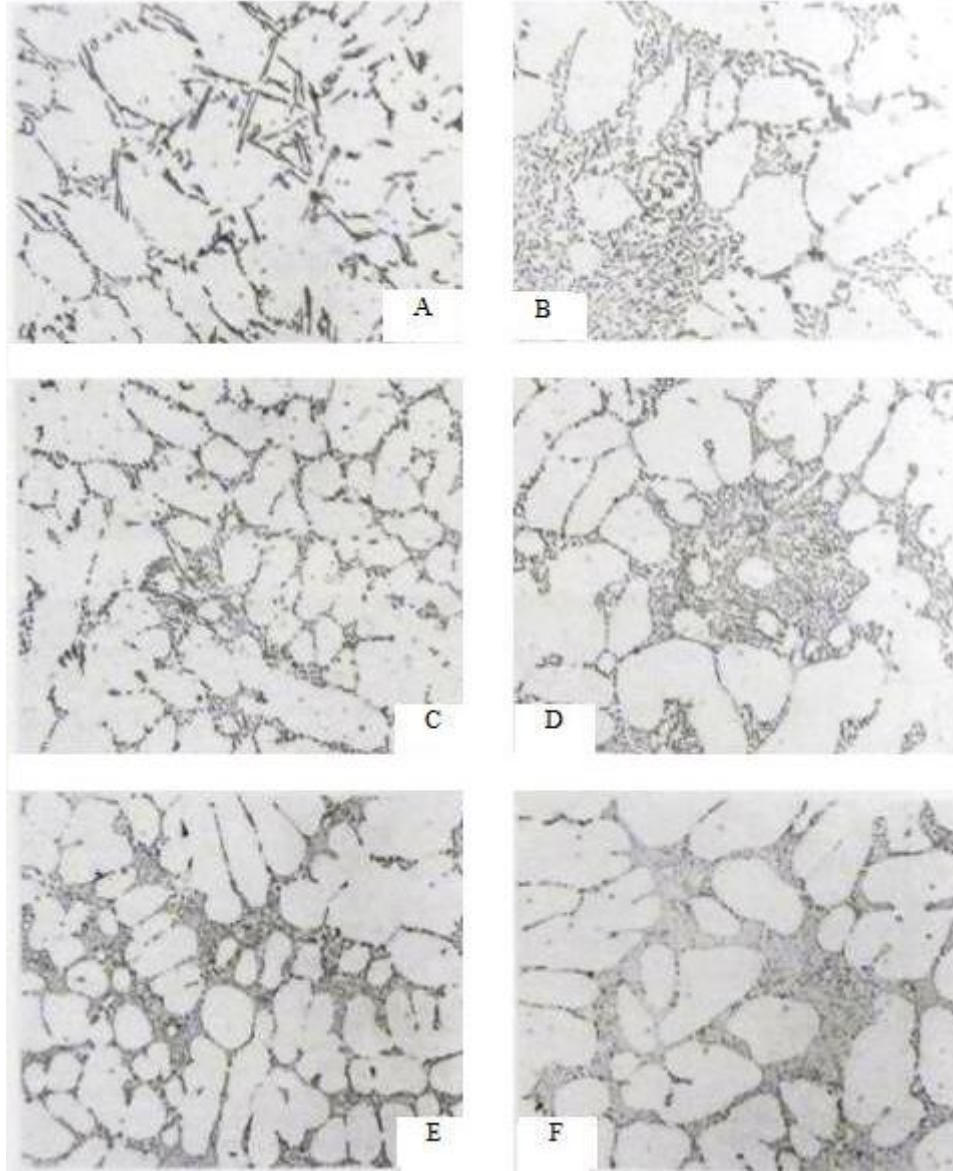
Kalsiyum düşük ticari değerle birlikte zayıf bir modifikatördür.

Antimon modifikasyon sonucu olarak fibröz ötektik yerine ince lamelar bir yapı verse de kuvvetli bir etki gösterir.



Şekil 2.8 : Sodyum ve stronsiyum modifikatörlerinin etkinliği [10].

Sodyum, stronsiyum ve sodyum + stronsiyumun modifikasyon üzerindeki etkileri Şekil 2.8 ve Şekil 2.9'da gösterilmektedir.



**Şekil 2.9 :** Al-Si ötektik modifikasyon seviyeleri (A'dan, F'ye artmaktadır) [10].

Metalik sodyumun ergimiş alüminyuma eklenmesi türbülans oluşturur ve bu da hidrojen seviyesinin yükselmesine ve oksit seviyesinin artmasına sebep verir. Fazla miktarlarda (> % ağırlıkça 0,01) sodyum kullanımı yüzey gerilimini arttırarak ve akışkanlığı düşürerek süreksizlik eğilimini arttırır.

Stronsiyum ilaveleri ise genellikle % 10 modifikatör içeren master alaşımlar ile yapılır. Stronsiyum hidrojen çözünürlüğünün artması ve yüzey geriliminin düşmesiyle hidrojen porozitesine yüksek hassasiyet gösterir.

Ötektik alüminyum silisyum modifikasyonunun en büyük kazançları % 5 silisyum'dan ötektik konsantrasyon sınırına kadar olan alaşımlarda kazanılır.

Modifikasyon elementlerinin bu alaşımlara eklenmesi daha ince lamelar veya fibröz ötektik yapının oluşmasına sebep verir. Modifikatör ilaveleri ötektik içindeki silisyum kristallerinin büyümesini yavaşlatır veya silisyum-matris büyüme hızlarını dengeler ve ince bir lamel yapı oluşturur.

Fosfor modifikasyon mekanizması ile karışır. Fosfor modifikasyon etkinliğini azaltır. Bu yüzden modifikasyon işlemlerinde düşük fosforlu metaller kullanılır [10].

Alüminyum döküm alaşımlarının çekme dayanımlarına bağlı olan bazı karmaşık durumlar birbiriyle ilişkili olan katılaşma hızı, süreksiz iyi bir döküm, ısıl işlem, ötektik modifikasyon ve magnezyum gibi değişken özelliklere bağlı olarak gerçekteşir.

Kimyasal modifikasyonun temel etkileri mikro yapı üzerinde görülür ve mekanik özellikleri direkt olarak etkileyen mikro yapı değişiklikleridir. Modifiyesiz eşekslenli (akikular) silisyum yapısındaki büyük silisyum plakalar mikro yapıda içyapı gerinim unsurları olarak rol alırlar ve kırılma için kolay bir altyapı oluştururlar. Modifikasyon ile birlikte yapı daha ince taneli ve silisyumlar yuvarlak hale gelir ve sonuç olarak daha yüksek çekme dayanımı ve artan süneklilik gözlemlenir.

Çekme dayanımlarında gözlemlenen iyileşmeler modifiyesiz alaşımla modifiyeli alaşım arasındaki yapısal farklılıklara bağlıdır. Örneğin, modifiyesiz kum döküm ötektikaltı alaşımı büyük eşekslenli silisyumlu yapı gösterirken, aynı alaşımın sürekli döküm ile üretiminde ince fibröz silisyum görülür. Yapısal özellikler büyüktür ve çekme özelliklerinde büyük farklılıklar beklenebilir [11].

Tipik olarak, modifiyeli yapılar daha yüksek çekme ve modifiyesiz yapılara göre gelişmiş süneklilik özellikleri gösterir (Çizelge 2.5).

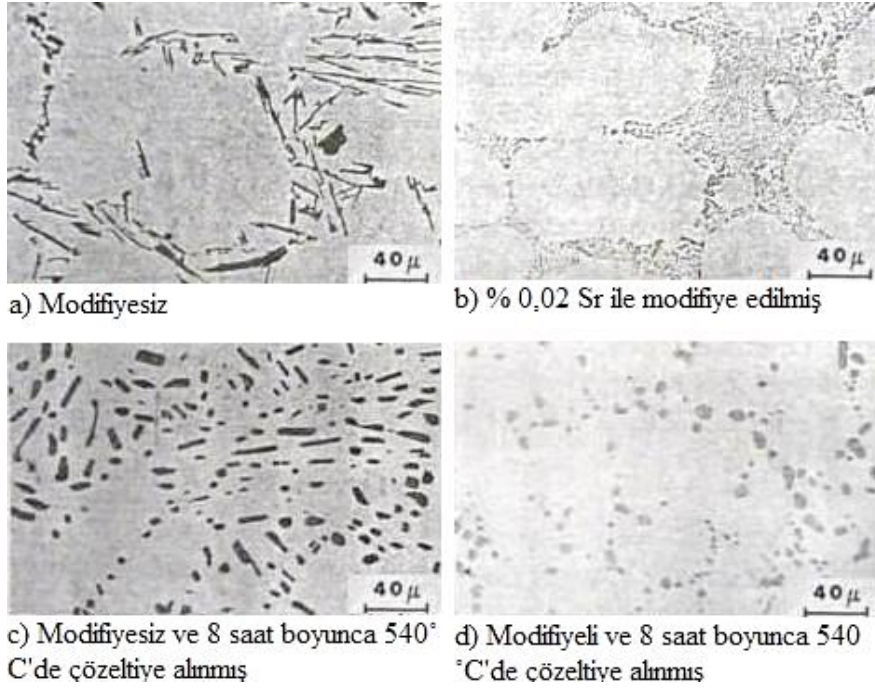
Özelliklerin iyileşmesi porozitenin etkilerinin ilave edilen modifikatörlerle giderilmesine bağlıdır. Geliştirilmiş döküm özellikleri gelişmiş besleme ve yüksek sıcaklık çatlamalarına karşı yüksek dayanımı içerir. Modifikasyon işleminin etkinliği katılaşma bölgesi altındaki soğuma süresi ve derecesidir [10].

**Çizelge 2.5** : Modifiyeli ve modifiyesiz alüminyum döküm alaşımlarının tipik mekanik özellikleri [10].

Alaşım ve Temper	Ürün	Modifikasyon tretmanı	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	% Uzama
% 13 Si	Kum döküm test çubuğu	Yok	---	124	2
		Sodyum Modifiyeli	---	193	13
	Sürekli kalıp test çubuğu	Yok	---	193	3,6
		Sodyum Modifiyeli	---	221	8
359.0	Kum döküm test çubuğu	Yok	---	180	5,5
		% 0,07 Stronsiyum	---	210	12
356.0-T6	Kum döküm test çubuğu	Yok	208	289	2
		% 0,07 Stronsiyum	238	293	3
	Soğuk kum dökümden test çubuğu	Yok	213	284	4,4
		% 0,07 Stronsiyum	218	291	7,2
A356.0-T6	Kum döküm test çubuğu	Yok	179	226	4,8
		% 0,01 Stronsiyum	207	297	8
A444.0-T4	Sürekli kalıp test çubuğu	Yok	---	151	24
		% 0,07 Stronsiyum	---	149	30
A413.2	Kum döküm test çubuğu	Yok	112	137	1,8
		% 0,005-0,05 Stronsiyum	108	159	8,4
	Sürekli kalıp test çubuğu	Yok	125	168	6
		% 0,005-0,08 Stronsiyum	125	191	12
	Otomobil jantından kesilmiş test çubuğu	% 0,05 Stronsiyum	121	193	10,6
		% 0,06 Stronsiyum	126	193	12,8
---: verilmemiştir					

Çoğu Al-Si döküm alaşımları standart yaşlandırma prosesiyle ısıl işlem olur. Çözeltiye alma işlemi esnasında modifiyesiz silisyum daha yuvarlak hale gelir ve modifiyeli silisyum parçacıkları büyürler. Bu değişimler Şekil 2.10'da mikro grafiklerde görülmektedir [11].

Modifiyeli ve modifiyesiz ötektik silisyum arasındaki mikro yapısal değişiklikler ısıtılma işleminin etkisiyle azalmaktadır ve belirgin bir farka rağmen çekme özellikleri arasındaki fark daha azdır.



**Şekil 2.10** : Alaşımın mikroyapıları [11].

Bu etkiler çekme özelliklerindeki tipik değerlerde Çizelge 2.6 ve Çizelge 2.7'de yansıtılmıştır.

**Çizelge 2.6** : Bazı ısıtılma işlemleri alaşımlarının özellikleri [11].

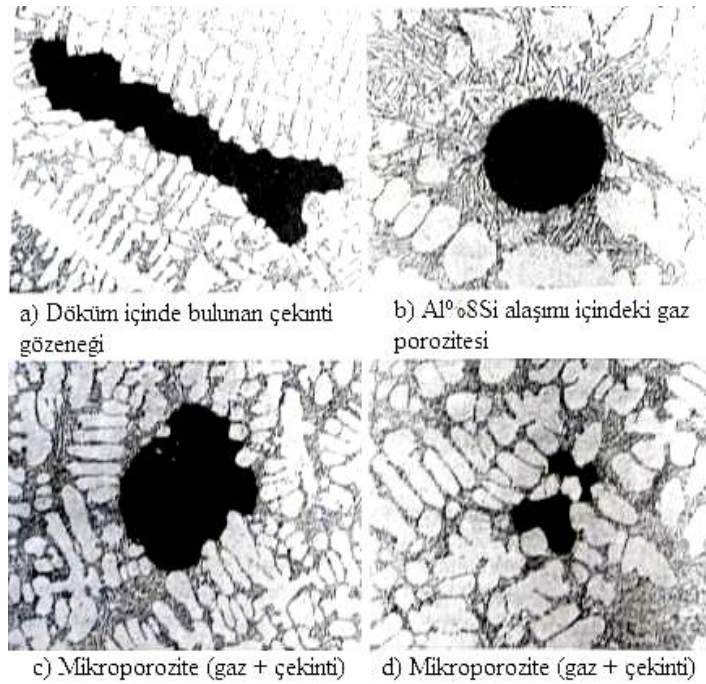
Alaşım Kimyası	Al, % 7Si, % 0,3 Mg (A356)			
	Sürekli döküm		Kum Döküm	
Silisyum Yapısı	Çekme Dayanımı (MPa)	% Uzama	Çekme Dayanımı (MPa)	% Uzama
Eşksenli	290	12	275	2,5
Lamelar	290	17	280	4
Fibröz	290	17	280	6
Alaşım Kimyası	Al, % 7Si, % 0,6 Mg (A357)			
	Sürekli döküm		Kum Döküm	
Silisyum Yapısı	Çekme Dayanımı (MPa)	% Uzama	Çekme Dayanımı (MPa)	% Uzama
Eşksenli	330	10	290	2
Lamelar	330	13	285	2
Fibröz	330	13	285	2,5

**Çizelge 2.7 :** Bazı ısı işlemsiz alaşımların özellikleri [11].

Silisyum Yapısı	Al, % 7Si, % 0,3 Mg		Al, % 11Si	
	Çekme Dayanımı (MPa)	% Uzama	Çekme Dayanımı (MPa)	% Uzama
Eşeksenli	180	7	150	6
Lamelar	200	12-16	170	14-18
Fibröz	200	16	170	18

### 2.10.5 Alüminyum dökümünde porozite ve inklüzyonların etkileri

Değişken kesit kalınlıklarına sahip karmaşık geometrik şekillerdeki katılaşma porozitenin oluşabileceği şartlara sebep verebilmektedir. İç yapıdaki porozitenin özelliklere etkisi gözeneklerin yapı içinde hacimsel olarak artışı ve gözeneklerde biriken gerilim konsantrasyonunun malzemenin yorulmasına sebebiyet vermesidir. Alüminyumda bulunan porozite hidrojenin sıvı çözelti halinden çıkması esnasında veya katılaşma esnasındaki çekintiden ve genellikle bu etkilerin birleşiminden meydana gelmektedir. Kalıp reaksiyonları, yüksek sıcaklık oksidasyonu, gaz boşlukları ve hatalarda hapsolmuş gazlar mekanik özellikleri ve fiziksel kabul edilebilirliği etkilerler. Katılaşma öncesi metalik olmayan inklüzyonların oluşumu porozite oluşumunu ve mekanik özellikleri etkiler [10].



**Şekil 2.11 :** Alüminyum döküm alaşımlarındaki tipik poroziteler [11].

### **2.10.5.1 Hidrojen porozitesi**

Hidrojen alüminyum ve alaşımlarında fark edilir bir şekilde çözünebilen tek gazdır [10]. Hidrojen çözünebilirliğinin 3 farklı karakteristiği vardır:

1) sıvı halde kuvvetli bir sıcaklığa bağımlılıktır, süper sıcaklıktaki artışlar hidrojendeki artışla sonuçlanır; 2) katı alüminyumda düşük çözünebilirlik; 3) ergime noktasında çözünebilirlikte büyük değişimdir [11].

Hidrojenin alüminyumdaki çözünebilirliği sıcaklıkla ve basıncın karesiyle direkt olarak değişir; çözünebilirlik likidus eğrisi üzerindeki yükselen sıcaklıkla birlikte artar. Hidrojen kirliliğine yol açan kaynaklar; atmosfer, tam olarak kurumamış refrakterler, tekrar eritilmiş ingotlar, master alaşımlar, metalurjik metaller, şarj elementleri, flukslar, takımlar, fluks boruları, kepçelerdir.

Hidrojen aynı zamanda atmosferdeki nem miktarının ve fırın atmosferindeki ürünlerin birleşerek atomik hidrojenin ergiyik içine girmesiyle oluşur. Ergiyik hazırlanma aşamasında veya ergiyiğin boşaltılması sırasında türbülans atmosferdeki nemden hidrojenin emilimini hızlandırır. Soy veya aktif gazların kullanımı ile gaz giderme işlemi hidrojen konsantrasyonunu düşürür [10].

### **2.10.5.2 Çekinti porozitesi**

Birçok metal için sıvı halden katı hale geçişte hacimsel olarak bir azalma meydana gelir. Alüminyum alaşımlarda, katılaşma esnasında oluşan hacimsel çekinti % 3,5 ile % 8,5 oranlarında gerçekleşir. Çekinti porozitesinin oluşma hassasiyeti final katılaşma esnasındaki sıvı / katı hacmine ve alaşımın katılaşma sıcaklık aralığına bağlıdır.

Çekinti birçok şekilde olabilir. Dağılmış gözenekler veya mikroçekintiler dendrit kollar arasında dendritler arası beslemenin son aşamalarında meydana gelir. Hücrelerin merkezlerinde veya uzantısal olarak meydana gelen çekintileri ise katılaşma esnasında döküm içerisinde izole olmuş sıvı bölgelerin kalmasıyla oluşur.

Alüminyum-silisyum alaşımlarındaki iyileştirilmiş modifikasyon, tane inceltme ve oksit içeriğinin azaltılması beslemeyi artırır ve böylece çekinti oluşumu azalır [10].

### 2.10.5.3 İnküzyonlar

Metalik olmayan inküzyonlar alüminyum dökümlerde önemli bir sorundur. Reaktivitesi sebebiyle alüminyum sıvı ve katı durumlarda oksitlenir. Oksidasyon hızı ergimiş metal sıcaklığında yüksektir ve sıcaklıkla ve maruz kalma süresiyle birlikte artar. Alüminyum alaşımlarındaki magnezyum oksitlenir, sıcaklık ve zamanla birlikte oksijenle ve alüminyum oksitle reaksiyona girer ve spinelleri oluşturur.

Ergimiş alüminyumun üzerindeki oluşmuş oksit tabakası yüksek miktarda koruyucudur ve herhangi bir türbülans veya ergiyiğin tutulması oksit hapsolması riskini ve ani ilave oksitlerin oluşumu riskini artırır. Oksit konsantrasyonu ilave alaşımlar ergiyiğe ilave edildiğinde, reaktif elementler ve bileşimler eklendiğinde, sıvı metal boşaltıldığında ve kalıba boşlatılırken artabilir.

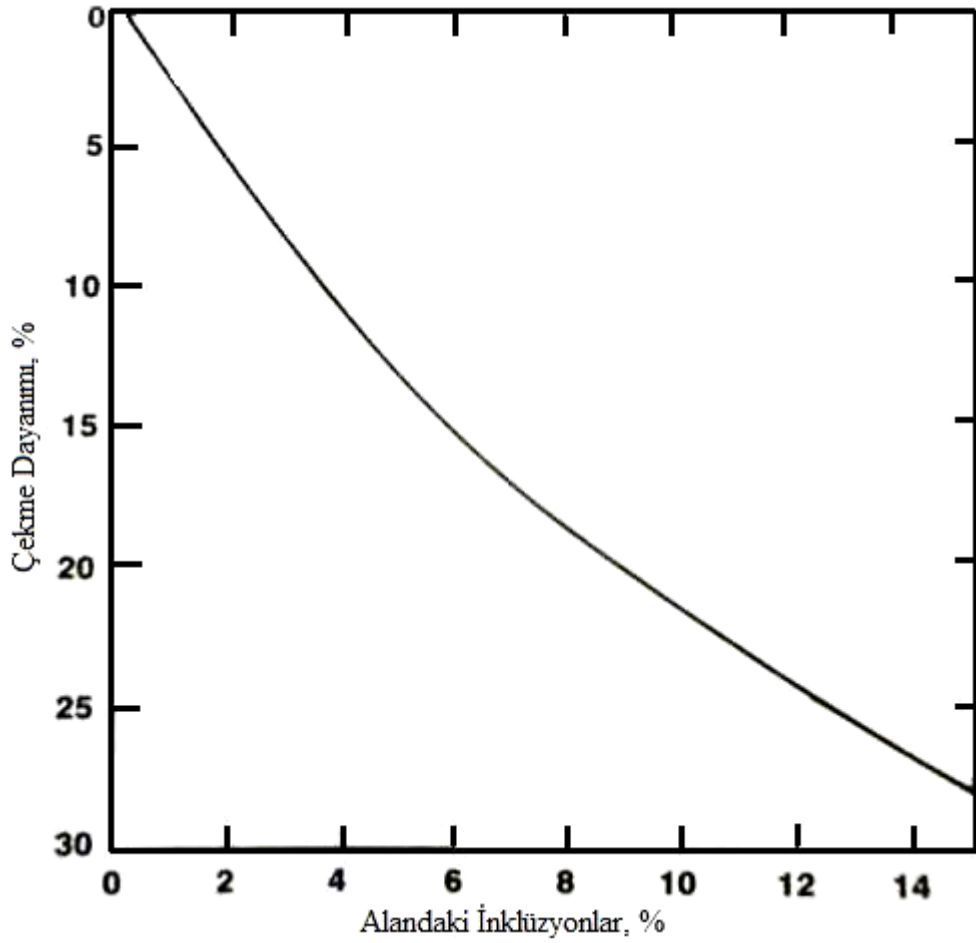
İnküzyonların engellenmesi ekipmanların ve oksidasyonu minimize eden eden etkenlerin sağlanmasıyla mümkündür, oksit hapsini engellemek cüruf gidericiler ve filtrasyonla partiküllerin giderilmesi önemlidir.

İnküzyonlar farklı tiplerde, değişken boyut ve şekillerde olur:

- a) Alüminyum oksitler farklı kristalografik veya film, pul ve topaklaşmış parçacık olarak amorf şekillerde olabilir.
- b) Magnezyum oksit ince partikül olarak oluşur.
- c) Spineller ise küçük sert nodüler veya büyük karmaşık şekillerde olabilir.
- d) Alüminyum karbür ve alüminyum nitrür ergimiş alüminyumda belirsiz şekillerde bulunabilir.

Refrakterler ve diğer inküzyonlar görünümleri ve bileşimleri ile tanımlanabilirler. İnküzyonlar çekinti ve hidrojen porozitesi olarak özelliklerin düşmesine sebebiyet verir.

Şekil 2.12'de % 0 inküzyon seviyesinde çekme dayanımı 186 MPa'dır [10].



**Şekil 2.12** : Al-Si12 kum döküm çekme çubuğunda inklüzyonun çekme dayanımına etkileri [10].

#### 2.10.5.4 Hidrojen, çekinti ve inklüzyonların birleşik etkileri

Hidrojen çökmesi ve çekinti porozitesi oluşumu genellikle birbirlerinden ayrı ve bağımsız oluşumlar olarak değerlendirilirler. Her ikisini de etkileyen mekanizmalar bulunmaktadır.

Düşük miktarlarda çözülmüş hidrojen çekinti gözenekleri oluştuğunda gözenek oluşumunu yükseltir. Buna bağlı olarak, gaz ve çekintinin gözenek hacmine etkileri katkı olarak düşünülebilir. Hidrojen gözenekleri genellikle yuvarlak, düz ve yüzeysel hatalardır, diğer bir yandan çekinti gözenekleri değişken olarak kristalin karakteristiğinde ve dendrit şekline yakın olur. Hidrojenin çekinti gözenegine dönüşümü yüzey morfolojisini etkiler. Çekintinin ve mikroporozite oluşumundaki çözülmüş gazların etkilerini tamamen birbirinden ayırmak imkansızdır [10].

## 2.10.6 Metalografi

Metalografi büyütme olan veya olmayan aparatlarla parlatılmış metalik numunelerin değerlendirilmesidir. Değerlendirilen numunenin genel yapısını ortaya çıkarır. Sadece bir gözlem metodu olarak değil aynı zamanda bir ölçüm metodudur, bazı durumlarda kantitatif işlemlerin yapılmasına olanak tanır. Alaşımın kimyasal bileşiminin değerlendirilmesinde, mekanik özelliklerini ve fiziksel özelliklerinin anlaşılmasında etkilidir. Çizelge 2.8’de hafif döküm alaşımların metalografik değerlendirmelerinin olası ana çıktıları görülmektedir [16].

**Çizelge 2.8** : Hafif döküm alaşımlarında metalografik değerlendirmelerin ana uygulamaları [16].

<b>Alaşım Tipi</b>	<b>Metalografik Değerlendirme Sonucu Ortaya Çıkan</b>	<b>Olası Sebepler</b>	<b>Çıkan Hatalar</b>
% 8-14 Si içeren alaşımlar	Büyük, iri silisyum kristaller, az modifiyeli ötektik bölgeler	Yanlış modifikasyon işlemi (çok az sodyum), yavaş soğutma hızı, yüksek döküm sıcaklığı	Yetersiz mekaniksel özellikler
	Fazla modifiye olmuş bölgeler	Yanlış modifikasyon işlemi (çok fazla sodyum)	Dağılmış çekinti boşlukları
% 15'ten fazla Si içeren alaşımlar	Büyük, iri silisyum kristaller	Yetersiz fosfor rafinasyon işlemi	Yetersiz mekaniksel özellikler, Yetersiz işlenebilirlik.
% 8'den az Si içeren alaşımlar	Büyük, iri alüminyum kristalleri (veya taneler), mikro ve makro olarak	Yetersiz rafinasyon işlemi (bor, titanyum), yüksek döküm sıcaklığı	Yetersiz mekaniksel özellikler, porozite.
Bütün ısıtılmış işlemler	Sertlik veren bileşenlerin çokluğu	Düşük çözelti sıcaklığı veya kısa zaman	Yetersiz dayanım ve sertlik
Bütün ısıtılmış işlemler	Yüzeye yakın mikro çatlaklar, ergimiş bölgeler, anormal ötektik yapı	Yüksek çözelti sıcaklığı, kimyasal bileşen	Yetersiz mekaniksel özellikler
Bütün alaşımlarda, bazı rafine edilmiş alaşımlarda	Büyük, zararlı intermetalik bileşenlerin çokluğu	Safsızlık etkisi	Yetersiz mekaniksel özellikler, Yetersiz işlenebilirlik.
Tüm alaşımlarda	Döküm boyunca düzgün dağılmış yuvarlak boşluklar (gaz delikleri)	Hazırlık (gaz)	Yetersiz mekaniksel özellikler, işleme sonrası zayıf görünüm.
	Dökümün sıcak bölgelerinde birikmiş düzensiz boşluklar (mikro çekintiler)	Besleme sistemi, döküm sıcaklığı	Yetersiz mekaniksel özellikler, işleme sonrası zayıf görünüm, poroziteler.
	Peliküler inklüzyonlar	Hazırlık, maden boşaltma, yolluk sistemi	Yetersiz mekaniksel özellikler, porozite, oksitler.
	Kompakt inklüzyonlar	Hazırlık, Al-refrakter reaksiyonu, ham maddeler	Yetersiz işlenebilirlik, takım kırılma riski.

## 2.11 Alüminyum Döküm Alaşımlarının Sıvı Metal İşlemi

Üstün kalitede alüminyum döküm alaşımlarının kullanımı ağırlığına oranla yüksek mukavemet gerektiren havacılık, otomotiv ve diğer yapısal araçlar gibi değişik uygulamalara yayılmıştır. Bu yapı hassasiyeti gerektiren alaşımların mekanik özellikleri, öncelikle ikincil dendrit kolları arasındaki mesafeye ve dendritler arası fazların şekli ile belirlenir. Buna ilave olarak döküm parçadaki porozite ve inklüzyon konsantrasyonu, kırılma, yorulma ve darbe özelliklerine kuvvetli etkinliği vardır. Döküm parçaların üretimi sırasında çeşitli sıvı metal işlem teknikleri mikro yapısal parametrelerin kontrolü için yerine getirilir. Bu sıvı metal işlemleri Ti-B ile tane inceltme, stronsiyum veya sodyum ile ötektik modifikasyon, temizleme gazları ile gaz giderme ve inklüzyonların filtre edilmesidir. Bu işlemlerin etkinliği döküm parçanın kalitesini belirler.

Alüminyum döküm alaşımları özellikle havacılık ve otomotiv endüstrisinde geniş uygulama alanına sahiptir. Bu döküm alaşımları mükemmel çekme mukavemeti, yorulma özellikleri ve iyi korozyon direnci özelliği gösterirler. Esas alaşım elementi silisyum, iyi dökülebilirlik ve sıcak yırtılmaya direnç özelliği gösterir. Aynı zamanda katılaşma anında silisyum hacimsel olarak arttığından, parçanın çekinti hatasına göstereceği hassasiyeti azalmış olur. Sonuç olarak silisyum içeren alaşımlar alüminyum dökümhanelerinde çok miktarda döküm için uygundur. Magnezyum ve bakır alüminyum döküm alaşımlarında diğer önemli alaşım elementleridir. Magnezyum, silisyum ile birleşerek MgSi bileşimini oluşturur, bu da 356 ve 357 alaşım ailesinin yüksek mukavemet seviyesi için ısı işlem kabiliyeti kazandırır.

319 gibi alüminyum alaşımındaki bakır, döküldüğü gibi yüksek sıcaklıktaki mukavemet özelliğini artırır. Çizelge 2.9'da bu üç alaşımın kimyasal bileşimi görülmektedir.

**Çizelge 2.9** : Bilinen üç alüminyum alaşımının nominal bileşimleri [17].

Alaşım	Bileşimler (Ağırlıkça %)							
	Si	Cu	Mn	Mg	Zn	Fe	Ti	Ni
319	5,50-7,00	3,50-4,50	0,50	0,10	1,00	1,00	0,25	0,35
356	6,50-7,50	0,25	0,35	0,20-0,40	0,35	0,60	0,25	---
357	6,50-7,50	0,05	0,45-0,60	0,03	0,05	0,15	0,20	---
---: Eser miktar								

Döküm alüminyum alaşımlarının işlemleri, sıvı metalin kalitesini geliştirmeyi amaçlayan bir dizi sıvı metal işlemlerini yapmayı gerektirir. Flakslama ve temizleme gibi işlemlerin yanı sıra sıvı alüminyum işlemi için bazı yeni teknolojik gelişmeler oluşmuştur. Bitmiş parçanın hatasızlığı bu sıvı metale yapılan işlemlerin etkinliği ile büyük çapta kontrol edilir [17].

### **2.11.1 Döküm parçaların katılaşması**

Alüminyum döküm alaşımlarının çoğunda, katılaşma birincil  $\alpha$ -alüminyum dendritlerinin oluşmasıyla başlar. İkincil dendrit kolları arasındaki mesafe (DAS) esas olarak alaşımın bileşimi, soğutma hızı, bölgesel katılaşma zamanı ve sıcaklık farklılığı ile belirlenir. Birincil alaşım elementleri arasında silisyumun dendritler arası mesafe üzerine etkisi olduğu ispatlanmıştır. Silisyum miktarının artması, ikincil dendritler arasındaki mesafede bir azalma eğilimi gösterir.

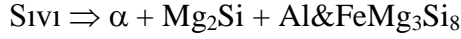
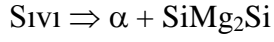
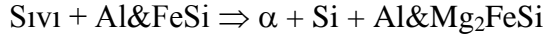
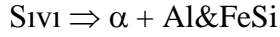
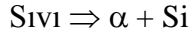
Döküm parçada, herhangi bir bölgesel katılaşma süresi, dendritler arası mesafeyi (DAS) ve mekanik özellikleri belirler. İkincil dendritler arası mesafe döküm parça içinde porozite ve metaller arası parçacıkların dağılımını kontrol eder. DAS küçüldükçe porozite ve ikincil faz safsızlıklarının daha küçük ve eşit şekilde dağılımını sağlar. Bu mikro yapının iyileştirilmesi, mekanik özelliklerde ilave bir iyileştirme getirir. Çekme özellikleri genellikle DAS'taki değişimlerden etkilenir ki bunlar maksimum çekme mukavemeti ve uzama yüzdesidir.

Al-Si alaşımlarında mukavemet ve kırılma özellikleri katılaşma hızıyla iyileşir. Bu davranış alüminyum-bakır döküm alaşımlarında ters özellik gösterir. Al-Cu döküm alaşımlarında kırılma tokluğu, mukavemet özellikleri ile ters değişim gösterir.

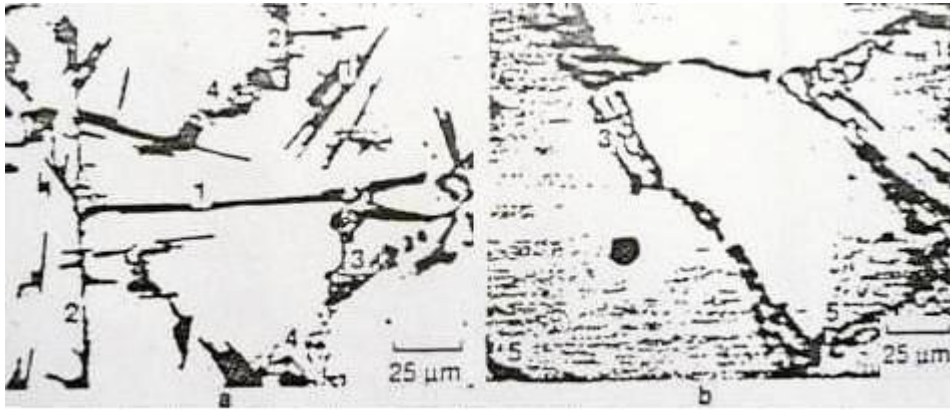
Al –Si alaşımlarında akma mukavemetinin artmasıyla, süneklilikte düşüş oldukça azdır. Bu silis parçacıklarının şekli ve dağılımı, matris mukavemetinden önemlidir.

Katılaşma devam ederken, dendritler arası sıvıda soğutma hızına bağlı, safsızlıkların miktarına bağlı (özellikle demir ve mangan) olarak çeşitli dengesiz reaksiyonlar meydana gelir.

A356 alaşımı için Backerud ve çalışanları tarafından aşağıdaki reaksiyonlar sunulmuştur.



Benzer reaksiyonlar aynı zamanda A357 ve 319 alaşım grupları içinde tanımlanabilir. Şekil 2.13'deki optik mikrograf dendritler arası fazların tipik şeklini göstermektedir.



(1) Si, (2) FeSiAl<sub>3</sub>, (3) (Fe,Mn)<sub>3</sub> Si<sub>2</sub>Al<sub>15</sub>, (4) CuAl<sub>2</sub>, (5) Mg<sub>2</sub>Si

**Şekil 2.13** : Alüminyum döküm alaşımlarında dendritler arası çeşitli fazları gösteren tipik mikroyapılar [17].

### 2.11.2 Sıvı kimyasının etkisi

Sıvı metalin kimyasal bileşimi, döküm parçanın mikro yapısı ve mekanik özellikleri üzerine önemli bir etkisi vardır.

Ticari önem taşıyan Al-Si alaşımlarında, doğal olarak oluşan birçok safsızlıklar bulunabilir ve üstün kalitede dökümler üretebilmek için bu katışıkların oranlarını en düşük tutmak büyük önlemler alınmasını gerektirir. Demir muhtemelen kontrol edilmesi gereken çok önemli bir elementtir, çünkü demir intermetalik bileşikler teşkil eder ki, bunlar alaşımın sünekliğini zayıflatır. Bazı demir bakımından zengin bileşikler döküm parçanın katılaşması esnasında oluşur. Şekil 2.13'de gösterildiği gibi FeSiAl<sub>3</sub> plakaları, çin yazısı (Fe,Mn)<sub>3</sub> Si<sub>2</sub>Al<sub>13</sub> parçacıkları ve (Al<sub>3</sub>FeMg<sub>3</sub>Si<sub>6</sub>)

fazları gibidir. Demir içeren alaşımların sünekliliğinde, kırılma tokluğunda ve yorulma özelliklerinde azalma, ince ve büyük iğne şeklindeki  $FeSiAl_5$ 'lerin çökmesine bağlıdır.

Demirin kötü etkisini azaltmak için düşük demir ihtiva eden alaşım ile yüklemeye başlamalı, ergitme ve bekletmede demir almayı en aza indirmeli, soğutma hızını arttırmalı ve sıvı metale uygun metalik ilaveler yapılmalıdır. Düşük soğutma hızlarında  $FeSiAl_5$  iğneselleri büyüktür ve tane sınırlarında konsantre edilirler, bunların ani kırılma özelliğini artırır. Yüksek soğutma hızlarında  $FeSiAl_5$  parçacıkları gayet küçük ve dağılımı dengelidir.

Demirin etkisini nötrleştirmek için genellikle ilave edilen mangandır; daha nadiren ilave edilen kobalt, berilyum ve kromdur. Bu elementlerin ilavesi demir fazının plaka şeklindeki kristalden, çin yazısı parçacıkları şekline dönüştürür.

Awano ve Shimizu'nun çalışmalarında, demir fazı morfolojisini nötrleştirici ilaveler olmaksızın, sıvının uygun bir şekilde aşırı ısıtmasıyla aynı etki sağlanmıştır. Örnek olarak; demir fazı kristalleri sıvı metal  $850-900^{\circ}C$ 'ye kısa zaman için aşırı ısıtılarak demir plakaları çin yazısı şekline dönüşmüştür. Demirin kötü etkisi aynı zamanda stronsiyum ile modifikasyonda azalmıştır. Demirin büyük kırılma intermetalik fazları iyi bir modifiye edilmiş alaşımda bastırılmış olur [17].

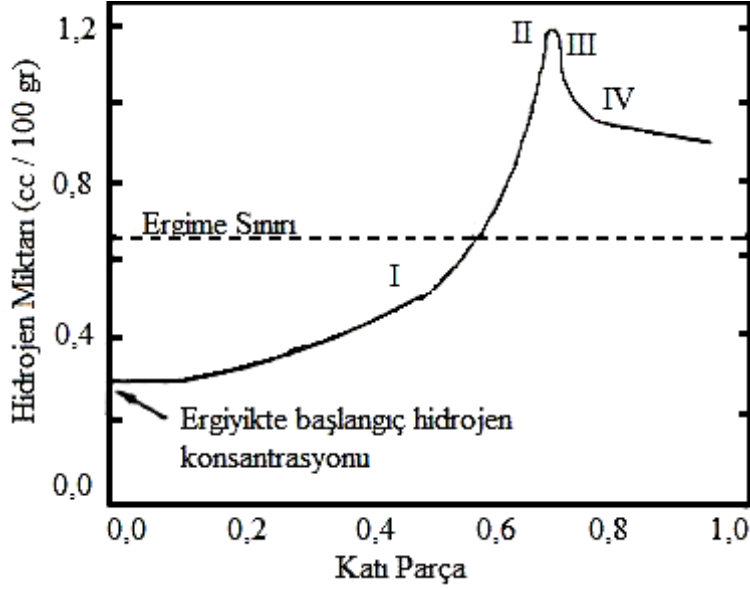
### **2.11.3 Gaz giderme**

Alüminyum alaşımları, ergitme ve bekletme süresince oldukça yüksek hidrojen emme eğilimi gösterir. Hidrojenin sıvı Al içindeki çözünürlüğü sıcaklığın bir fonksiyonudur ve katılaşma sıcaklığında hızla düşer. Katılaşma esnasında sıvı Al'dan ayrılan hidrojen döküm parçada porozite oluşturur. Al alaşımlarındaki büyük katılaşma çekintileri bu problemi açığa vurur. Uygulama şartlarına bağlı olarak, döküm parçalarda % 0,5-3 porozite seviyeleri görülebilir.

Yüksek oranlarda poroziteye sebebiyet vermeksizin tolere edebilecek hidrojen miktarı; alaşım bileşimi, bölgesel katılaşma süresi, ısıl gradyanlar, parça dizaynı ve inklüzyon yoğunluğu gibi birçok parametrelere bağlıdır.

Hidrojen kaynaklı porozite oluşum mekanizması, çözünmüş hidrojenin sıvı katı ara yüzeyindeki yerleşimi düşünülerek analiz edilebilir. Katılaşma sırasında hidrojenin

büyük çoğunluğu sıvı-katı ara yüzeyinde sıvıdan ayrıldığından; dendritler ara yüzeyinde ayrıldığından; dendritler arası sıvı, hidrojenle zenginleşir. Hidrojenin sıvı ve katı alüminyum içindeki çözünübilirliği sırasıyla 0,65 ve 0,035 ml / 100 gr'dır. Bir 356 alaşımının katılaştırılması sırasında dendritler arası sıvı içindeki hidrojen konsantrasyonundaki değişim, Şekil 2.14'te görülmektedir.



**Şekil 2.14 :** A356 alaşımlarında katı parçaların bir fonksiyonu olarak dendritler arası sıvıda hidrojen konsantrasyonunun ölçülen değişimi [17].

Katılaştırma ilerledikçe, sıvı içindeki hidrojen miktarı artar ve sonuçta çözünübilirlik sınırını aşar. İdeal olarak bu noktada bir gaz gözenegi oluşmalıdır. Ancak yeni bir gözenegin oluşumu, yeni bir yüzeyin oluşumunu gerektirir. Bu yüzey bariyeri nedeniyle, sıvı içindeki hidrojen miktarı (Şekil 2.14'te 1.aşama) çözünübilirlik limitinin üzerinde, gözenegin oluşabileceği maksimum bir değere kadar artmaya devam eder.

Bu noktada, çekirdeklenmeye başlar. (Şekil 2.14'te 2.aşama) Bu çekirdeklenme baskın olarak dendrit kollarının aralarında veya inklüzyonlar gibi diğer heterojen yerlerde olabilir. Gözenek oluşuktan sonra, ilk aşamalarda hızlı bir büyüme olur ve bu sırada sıvı içindeki hidrojen miktarı düşer. (Şekil 2.14'te Aşama 3) Bundan sonra, gözenek dendrit kollarından ayrılıp büyümek için daha geniş alanlar bulabileceği taneler arası bölgelere hareket eder. Bu periyotta büyüme oldukça düşük hızda olur. (Şekil 2.14'te Aşama 4)

Ergiyik içindeki inklüzyonlar gözenek oluşumu için heterojen yerler sağladıklarından gözenek oluşumunu desteklerler. Az miktarlarda inklüzyonların bulunması durumunda bile, gözenek oluşumu için gerekli kritik hidrojen konsantrasyonu oldukça fazla düşebilir. Brondyke ve Hess'in orijinal çalışmaları, aynı hidrojen miktarında, inklüzyon yoğunluğuna bağlı olarak değişken miktarlarda porozitenin oluşabileceğini göstermiştir. Inklüzyonların yokluğunda, gözeneği oluşturmak üzere ilk hidrojen molekülleri birleşeceği zaman, yüzey gerilimi güçlerini yenmek için oldukça yüksek gaz basınçlarına gerek duyulur. Bunun sonucunda, kritik hidrojen miktarı, inklüzyon miktarıyla ters orantılı olarak değişir ve düşük inklüzyon seviyelerinde  $0,3 \text{ cm}^3 / 100 \text{ gr}$ 'dan yüksek olması beklenir.

Uygulamaya bağlı olarak, alüminyum alaşımı ergiyiklerin de gaz gidermek için flaks ekleme, sıvı metal içinden gaz kaynatma, vakumlu gaz giderme ve eriyiğin ultrasonik titreşimi gibi birçok metod kullanılır.

Bu amaç için geliştirilmiş birçok ticari prosesler de mevcuttur. (Hat üzerinde ergiyik tretman sistemi (MINT), döner nözüllü soy gaz yüzdürme (SNIF), Alcoa 622 sistemi) Ancak genellikle gaz gidermek için bir soygaz sıvı alüminyum içinden uzunca bir süre için kaynatılır. Azot, klor,  $\text{SF}_6$  ve azot-freon karışımı gibi birçok gaz ve gaz karışımları kullanılır. Gaz kabarcıklarının büyüklüğü ve yüzey alanları, gaz akışının hızı, sıvı alüminyumun bulunduğu potanın derinliği ve sıcaklık gibi faktörler gaz giderme işlemini etkiler. Sıvı metal içine daldırıldığında klor gazı çıkaran ticari tabletlerde gaz giderme işlemi için kullanılmaktadır. Çeşitli gaz giderme tekniklerinin verimlilikleri, alüminyum ergiyiklerinin numunelendirilmesi ve çözünmüş hidrojen miktarının analizi konularındaki güçlükler nedeniyle tartışma konusudur.

Son zamanlarda geliştirilen bir matematiksel modelin gösterdiği gaz alma işleminin başlıca üç parametre tarafından kontrol edildiğidir.

Bu parametreler; metal sıcaklığı, kullanılan gazın kabarcık iriliği ve gazın bileşimidir. Hidrojenin alüminyum içindeki çözünebilirliği sıcaklıkla eksponansiyel olarak arttığından; belli bir seviyeye kadar gaz gidermek için gereken süre, metal sıcaklığındaki her  $70^\circ\text{C}$  artış için iki katına çıkmaktadır. Bunun sonucunda, metal sıcaklığının mümkün olan en düşük seviyede tutulması gerekliliği ortaya

çıkılmaktadır. Ayrıca, kaynatılan gazın kabarcık büyüklüğü 5 mm'den küçük tutulduğunda, gaz giderme işleminde % 100 verimlilik sağlanmaktadır. Verimlilik kabarcık büyüklüğünün artışıyla, hızla düşmektedir. Bu sonuçlar gaz giderme işleminde verimliliği arttırmak amacıyla alüminyum dökümhanelerinde giderek çok kullanılmaya başlanan rotorlu gaz giderme üniteleri için bir temel oluşturmaktadır [17].

#### **2.11.4 İnküzyon giderme**

İnküzyon, alaşımın likidus sıcaklığı üzerinde bulunan herhangi bir dış kaynaklı katı veya sıvı faz parçacığdır. Ergiyik içinde çok çeşitli inküzyonlar bulunabilir bunlar ocak cürufu, tuzlar, oksitler ve ergimemiş elementlerdir. Metal olmayan veya metaller arası parçacık süspansiyonları, ergiyik içine şarj malzemesinden veya çeşitli operasyonlar sırasında girebilir. Hiçbir işleme tabi tutulmamış alüminyum ergiyiklerinde inküzyon konsantrasyonu toplam hacmin % 0,005-0,02'si arasında değişir ve bunlar değişik morfolojilerde olabilir.

Çok düşük konsantrasyonlarda bile, ergiyik içinde çok sayıda inküzyon bulunabilir. Örneğin; eğer ortalama inküzyon büyüklüğü 40 µm ise, 1ppm'lik inküzyon konsantrasyonu 1 kg metal içinde yaklaşık 11000 parçacık olduğu anlamına gelir. Tolere edilebilen kritik inküzyon büyüklüğü son uygulamaya göre değişir. Birçok döküm parçada 10-20 µm olan büyük inküzyonlar parça kalitesi üzerinde oldukça kötü bir etki oluştururlar.

Ergiyik içindeki inküzyonlar, mekanik özelliklerin düşmesi, işlenebilirliğin kötüleşmesi, akışkanlık kaybı, döküm parçada artan porozite, kötü yüzey bitiş kalitesi ve sızdırma gibi problemlere sebep olurlar.

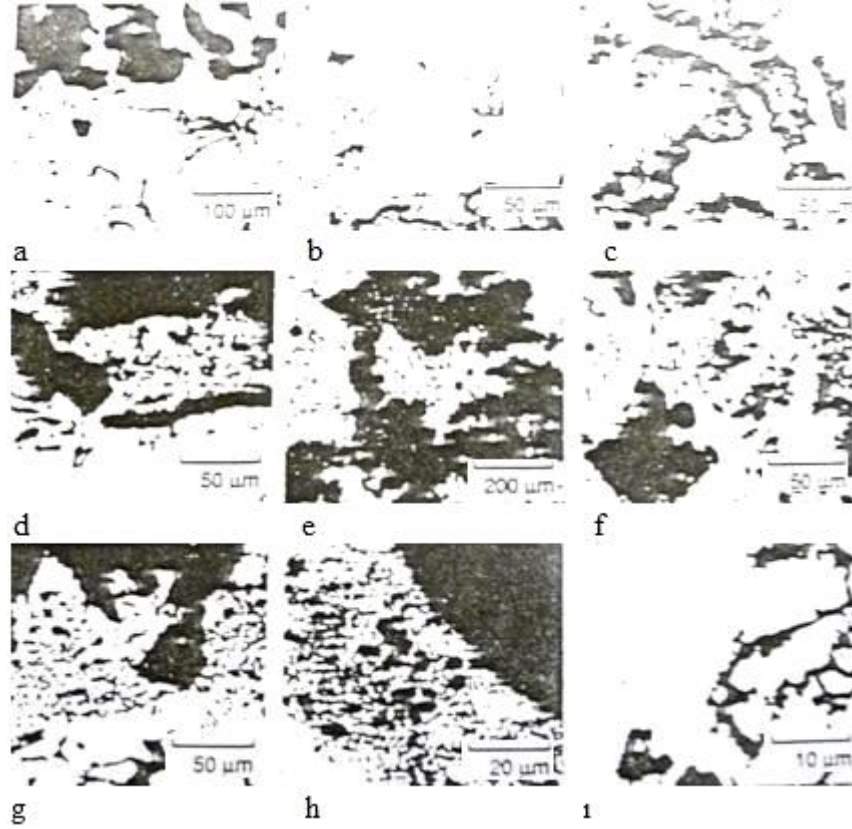
Döküm öncesinde sıvı Al içinde parçacıkların bulunması, üretimin önlenemez bir özelliğidir ve bu parçacıklar katı inküzyonlar, sıvı inküzyonlar, flakslar ve tuzlar olarak sınıflandırılabilir.

Katı inküzyonlar izole edilmiş, rijid parçacıklar veya dış kaynaklardan ergiyiğe gelen (refrakter tuğlalardan, tane incelticiden, vs.) ya da proses esnasında oluşan farklı faz ve morfolojilerin birikimi-birleşimi olabilir.

Sıvı inklüzyonlar genellikle deforme edilebilir ve küresel şekiller oluşturacak şekilde bir araya gelebilir parçacıklardır.

Flaks ve tuzlar ise genellikle önceki işlemler sonucunda ergiyikte asılı kalırlar.

Bir alüminyum döküm parçasındaki tipik inklüzyonlar Şekil 2.15'te görülmektedir.



**Şekil 2.15** : Alüminyum dökümlerde tipik inklüzyonlar [17].

Şekil 2.15'teki tipik inklüzyonlar sırasıyla şöyledir; a) Gama Alümina ( $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ ), b) Magnezya dağılımı (MgO), c) Magnezya film, d) Magnezyum alüminit spinel ( $\text{MgAl}_2\text{O}_4$ ), e) Spinel kümesi, f) Spinel kümesi, g) Magnezyum klorit ( $\text{MgCl}_2$ ), h) Alüminyum karbit ( $\text{Al}_4\text{C}_3$ ), i) Titanyum Alüminit ( $\text{TiAl}_3$ )

Katı inklüzyonlar metalik ve metal dışı olabilir. Katı inklüzyonların en yaygın tipleri oksitler, nitritler, karbitler ve bağlardır. Oksijene olan büyük afinitesi dolayısıyla alüminyum yoğunluğu 2,3'ten 4'e kadar değişen onbeş çeşit oksit oluşturabilir.

Ticari Al içindeki oksijen konsantrasyonu 0,1-100 ppm civarındadır. Alüminyum alaşımlarında, oksit filmleri ve oksit parçacıkları birikimleri genellikle döküm parçalarda görülür. İyi bir özellik olarak alüminyumda Pilling-Bedwarth oranı

1,27'dir ve bu da oksit filminin yoğun, devamlı ve koruyucu olduğu anlamına gelir. Ergitme işleminin değişik safhalarında oksitler meydana gelir. Bunlar elektrolitik hücrelerden, ergiyik ile atmosferin reaksiyonundan ve ergiyik ile ocak içindeki refrakter kaplamanın etkileşiminden kaynaklanabilir. Nitritler (AlN), karbitler ( $Al_2C_3$ ), bağlar ( $TiB_2$ ,  $VB_2$ ),  $CaSO_4$ ), CaS ve  $Al_3Zr$  gibi diğer katı inklüzyonlar da alüminyum ergiyiklerinde görülmektedir.

Sıvı inklüzyonlar baskın olarak kloridler ve floridlerdir. Klor gazı ve klorid flaksları genellikle alüminyum alaşımlarında gaz gidermek kullanılırlar. Böylece özellikle Mg içeren alaşımlarda klorid inklüzyonları ergiyikte oluşabilir.  $MgCl_2$  bu proses sırasında oluşabilir. Alüminyum alaşımları normal olarak 1 ppm'den az kriyolit içerirler, fakat bazı ticari alaşımlarda 10-30 ppm kriyolit bulunabilir. Kriyolit parçacıklarının kaynağı alümina elektrolitidir. Büyük inklüzyonlarda NaF bulunabilir.

Ergitme esnasında aşırı sıcaklıklar alüminyumun oksidasyonunu özellikle cüruf almak için flakslar kullanıldığında hızlandırır. Flaks malzemesi doğru sıcaklıkta ve güzelce toplanıp metal üzerinden alınmadıysa tuzlar ayrıştır ve tuzla ıslatılmış oksit inklüzyonları oluşturarak ergiyiği kirletir.

Döküm parça içindeki inklüzyonları azaltmak için çökeltme, yüzdürme, yolluk sistemi dizaynında ayarlamalar ve kalıp girişinde filtre malzemeleri kullanmak gibi birçok metodlar uygulanmaktadır. Stoke kanuna dayanan yerçekimsel çökeltme metodunun uygulama alanı, 90-100  $\mu m$  olan büyük inklüzyonlarla sınırlıdır. Yüzdürme araçları da 30-40  $\mu m$  büyüklükteki inklüzyonlara kadar verimlidir. 40  $\mu m$  olan küçük inklüzyonların giderilmesi ise filtrasyonla sağlanabilir. Ergiyik filtrasyonu iki basamaklı bir seri nakil işlemidir.

İnklüzyonlar, kütleli sıvı akışının bir sonucu olarak filtre yüzeyine nakledilirler ve yüzlerarası veya yüzey kuvvetleri nedeniyle filtre malzemesinde tutulurlar.

Cam elyafı dokuma, çelik tel kafes ve tel elyafı gibi malzemeler dökümhanelerde inklüzyon gidermek için kullanılır. Son yıllarda dökümhanelerde seramik köpük filtrenin 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.

Seramik köpük filtreler artık çok çeşitli ölçü ve şekillerde üretilmekte ve kepçe veya kalıp boşluğunda dökme metalin filtrasyonu için kullanılmaktadır. Bunlar kısım, basınçlı, hassas ve kalıp döküm işlemlerinde yaygın olarak kullanılır. Yaygın derecede endüstriyel uygulaması olan 2 teknik alüminyum döküm araştırma laboratuvarında araştırılmaktadır, bunlar kalın yataklı filtrasyon ve kalıp filtredir.

Kalın yataklı filtre, sıvı metalin akışı boyunca sıkı bir refrakter parçacıkları yatağından (genellikle düzlemsel alümina) meydana gelir. Inklüzyonlar, difüzyon direkt durdurma, yerçekimi ve / veya yüzey kuvvetleri sebebiyle filtre ortamının tanelerinde birikir. 30 µm'den büyük inklüzyonlar mekanik olarak tutulurken, 30 µm'den küçük olanların ise yüzey kuvvetleri sayesinde tutulduğuna inanılır. 30 µm'den küçük inklüzyonların filtre ortamındaki tane yüzeylerine transferindeki temel, akış dinamiğidir. Derin bir filtrede, inklüzyonların filtrenin bir kısmında veya tüm hacmi boyunca (derinliği boyunca) tutulur. Öyleyse, bu filtreler inklüzyonların tutulmasında büyük yüzey alanı avantajına sahiptir ve filtre yatağındaki deliklerden çok daha küçük olan parçacıklar tutulabilir. Kalıp filtrasyonunda, inklüzyonlar filtrenin üst yüzeyinde birikir. Bu inklüzyon birikimi, orijinal filtre ortamının üzerinde ikinci bir filtre vazifesi görerek akışa ek bir direnç oluşturur ve parçacıkların ergiyikten ayrılmasını sağlar.

Seramik konsantrasyonunu minimuma indirmek için kullanılır. Seramik köpük filtre yaklaşık 5 cm kalınlığında mesafeli gözenekleri olan seramik köpük tabaklardan oluşur. Tipik olarak böyle bir filtre, hacim yüzdesi olarak % 85 boşluk oranına her santimetrede yaklaşık 12 gözenek olmak üzere ortalama 1 mm gözenek ölçüsüne sahiptir. Bir seramik köpük filtre, işlem akışında en düşük kapital harcama ile döküm bölgesinin önüne monte edilebilir. Bununla beraber, akma dayanımını arttıran bir filtre kalıbı oluşturan inklüzyonlarla birlikte kullanıldığından sınırlı bir kullanım süresi vardır.

Böylece, bir seramik filtre ortamı ilk olarak kalın bir filtre olarak çalışır daha sonra yararlı kullanım süresi sonunda bir kalıp filtre gibi davranır.

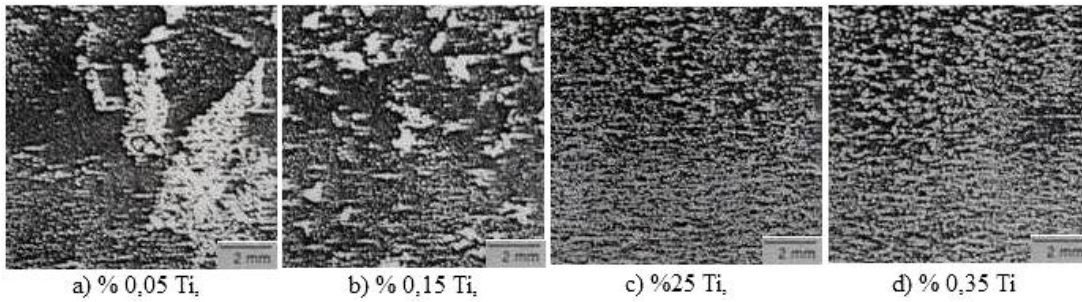
Diğer inklüzyon giderme teknikleri, flaks uygulamalarını ve reaktif gazlarla temizliğini kapsar. Bu teknikler sınırlı bir ölçüde yararlıdır ve filtrasyon sistemleri kadar yeterli ve uygun değildir. Son zamanlarda belirtildiğine göre, dönül pervaneli

gaz giderici ile birlikte kullanılan aşırı derecede ince temizleyici gaz kabarcıkları eriyikte bulunan oksitleri yüzdürürler. Ağır temizleme gazına az miktarda H<sub>2</sub> gazı ilavesi ile bu yüzdürme etkisi artırılır çünkü tuz veren bir maddenin bulunması okside film ve asılı duran gaz kabarcıkları arasındaki yüzey gerilimini değiştirir [17].

### 2.11.5 Tane inceltme

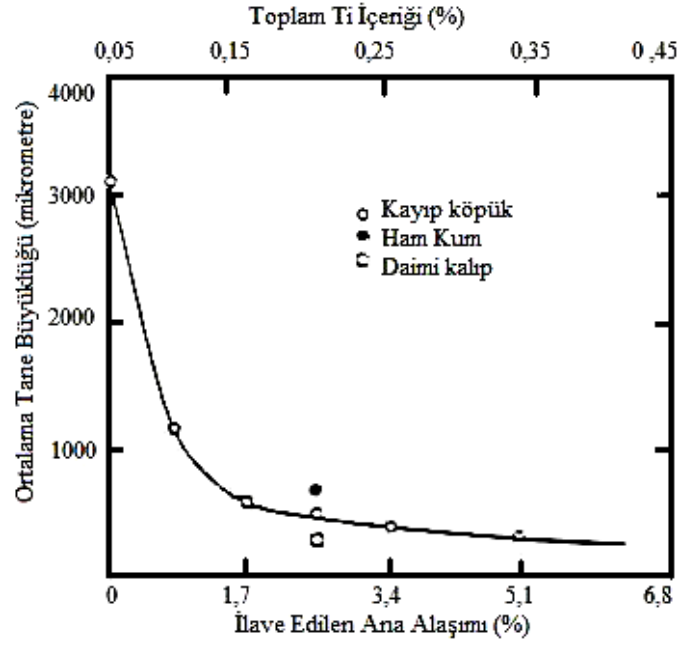
Alüminyum alaşım dökümlerine, dökümdeki tane yapısını kontrol etmek için, titanyum ve titanyum-boron ana alaşımları ile tane inceltme uygulanır. Tane inceltici, birincil alüminyum dendritleri oluşturmak için çekirdeklenme bölgeleri sağlar ve çok sayıda küçük, muntazam ve eşit eksenli taneye sahip dökümlerin üretimini kolaylaştırır. Apelian ve Cheng'in sonuçları, katılma sırasında soğuma hızı ne olursa olsun, eriyiğe tane inceltici ilavesinin yararlı bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Döküme tane inceltme uygulanması porozitenin yeniden dağıtımını ve azaltılmasını, sıcak yırtılmaya olan direncin ve besleyici özelliklerin artmasını içeren çeşitli avantajlara sahiptir.

Döküm alüminyum alaşım eriyiğine titanyum bor ana alaşım ilavesinin etkisi Şekil 2.16'da gösterilmiştir. Tane inceltici ilave edilmediği zaman yapı çok kalın ve ortalama tane boyu 3 mm'den büyüktür. Ana alaşım ilave edildiği takdirde tane boyutu hızla düşer ve % 0,2 civarında bir titanyum konsantrasyonunda 300 µm'den az olarak ölçülür.



**Şekil 2.16** : Titanyum konsantrasyonunun bir fonksiyonu olarak 319 döküm alaşımlarında tane yapıları [17].

319 dökümler için tipik tane boyutu istatistiği Şekil 2.17'de gösterilmiştir. Gerçek tane inceltmeyi elde etmek için minimum % 0,15-0,20 Ti içeriği gereklidir. 319 alaşımı katı çözeltide kayda değer miktarlarda Cu ve Zn içerir.

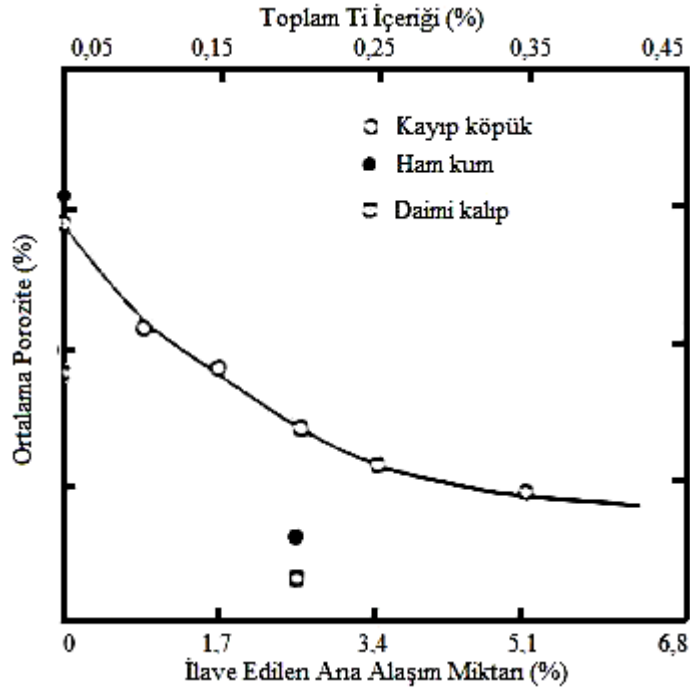


**Şekil 2.17** : 319 Döküm alaşımlarında ortalama tane ölçüsünün titanyum konsantrasyonu ile değişimi [17].

Görünüşte, katı çözeltideki bu elementlerin varlığı tane inceltinin performansı ile zıtlık gösterir. Sonuç olarak, 319 alaşımına en uygun miktarda tane inceltici ilavesi 356 alaşımındakinden fazladır. 356 alaşımı % 0,2'den az bakır içerir ve çinko içermez. Çeşitli alaşım elementlerinin yeterli tane inceltmeye etkisi Abdel-Hamid tarafından incelenmiştir.

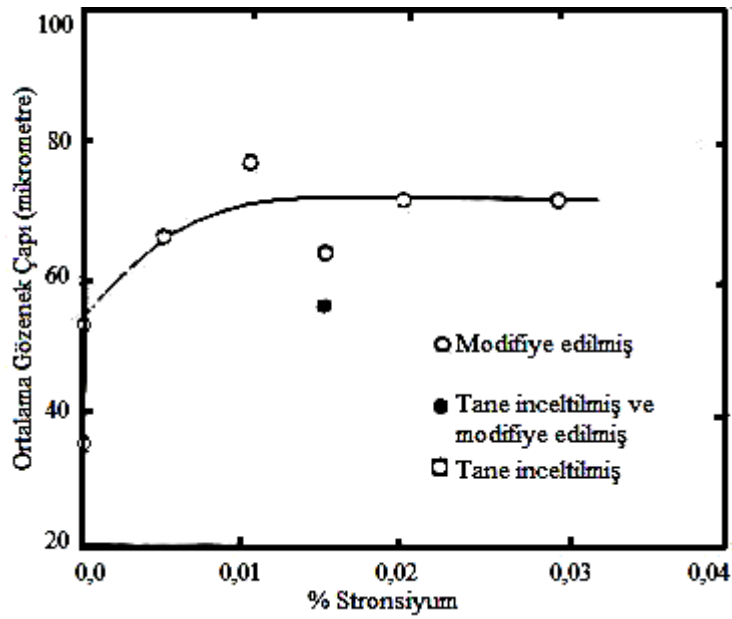
Tane inceltme işleminin uygulanması, parçadaki gözeneklerin miktarını ve şeklini değiştirebilir. Tane inceltici gözeneklerin yeniden dağılımını sağlar. Pek çok durumda, tane inceltme işlemi uygulandığında porozitenin miktarında komple bir azalma da vardır.

319 dökümlerindeki porozitenin ortalama miktarı Şekil 2.18'de titanyum konsantrasyonunun bir fonksiyonu olarak çizilmiştir.



Şekil 2.18 : Titanyum konsantrasyonunun bir fonksiyonu olarak 319 döküm alaşımlarında ortalama porozite [17].

Porozite miktarı, titanyum konsantrasyonu ile ters orantılı olarak değişir. % 0,2 titanyum ilavesi porozite miktarını % 1,5'dan % 0,5'e düşürür. Porozitedeki bu azalma, tane inceltmeden dolayı ortalama gözenek çapındaki düşüşle direkt olarak ilgilidir.

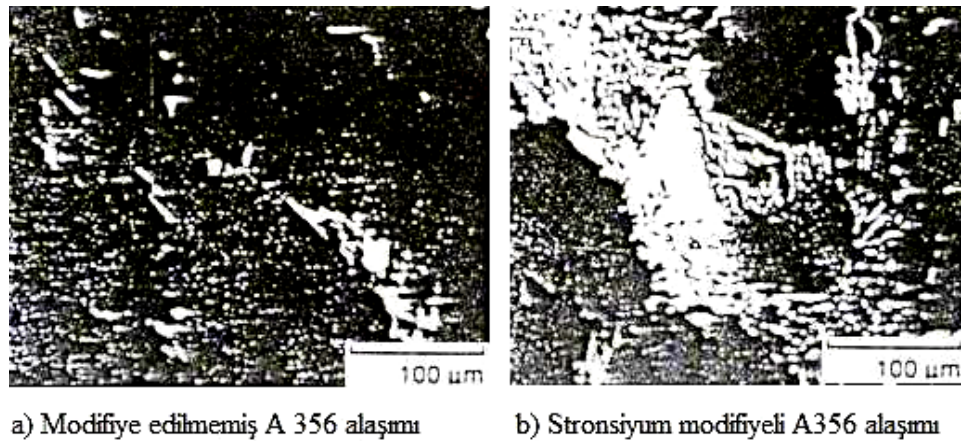


Şekil 2.19 : 319 Döküm alaşımlarında ortalama gözenek ölçüsünün değişimi [17].

Şekil 2.19'dan görüleceği gibi gözenek çapı işlemsiz alaşımlarda  $55 \mu\text{m}$ 'den % 0,2 titanyum içeren alaşımlarda  $35 \mu\text{m}$ 'ye düşmektedir. Dendritler arası sıvı havuzunun yarıçapı titanyumun ilavesi ile düştüğünden dolayı ortalama gözenek ölçüsü azalmaktadır. Bu koşullar altında, sıvıdaki gaz basıncı yüzeyler arası enerjilerin yardımını sağlayacak yeterlilikte değildir ve gözenek oluşumu zorlaşmaktadır. Ayrıca tane inceltme uygulandığında, dendritik örgü küçük, eş eksenli tanelere bölünür. Parçalara ayrılmış bu dendritler döküm içinde taşınırlar ve katılma sırasında oluşan toptan beslenmeye önemli ölçüde yardımcı olurlar [17].

### 2.11.6 Modifikasyon

Yönlendirilmiş silisyum kristalleriyle birlikte büyüyen yönlendirilmemiş alüminyumlu Al-Si alaşımlarında düzensiz bir ötektik yapı gözlenir. Düşük soğuma oranlarında silisyum kalın, iğnesel ve modifiye edilmemiş halde birbirine bağlı ince tabakalar şeklinde mevcuttur. Bu ince tabakalar çatlak başlatıcı olarak davranırlar ve sonuç olarak malzeme gevrek bir biçimde kırılır. İnce bir tabakadan lif hale geçiş yaklaşık  $1 \text{ mm/s}$ 'de meydana gelir. Silisyumun lifli şekli stresin yoğunlaşma etkilerini minimuma indirir ve böylece katılma sırasında hızlıca soğutulan örneklerdeki kolayca şekil alabilme özelliğini geliştirir. İnce tabakadan lif hale geçiş, sodyum veya stronsiyum gibi reaktif elementlerin küçük miktarlarda eriyiğe ilavesi ile kimyasal olarak da sağlanabilir. Çalışma literatüründe modifikasyon olarak anılan bu işlem, özellikle Al-Si döküm alaşımlarının mekanik özelliklerini geliştirir. Şekil 2.20'de görüldüğü gibi sodyum ve stronsiyum ile modifikasyon ince ve lifli ötektik yapı sağlar. Stronsiyum, Kuzey Amerika'da yaygın olarak çeşitli Al-Sr (bazen Al-Si-Sr) ana alaşımları şeklinde kullanılır.

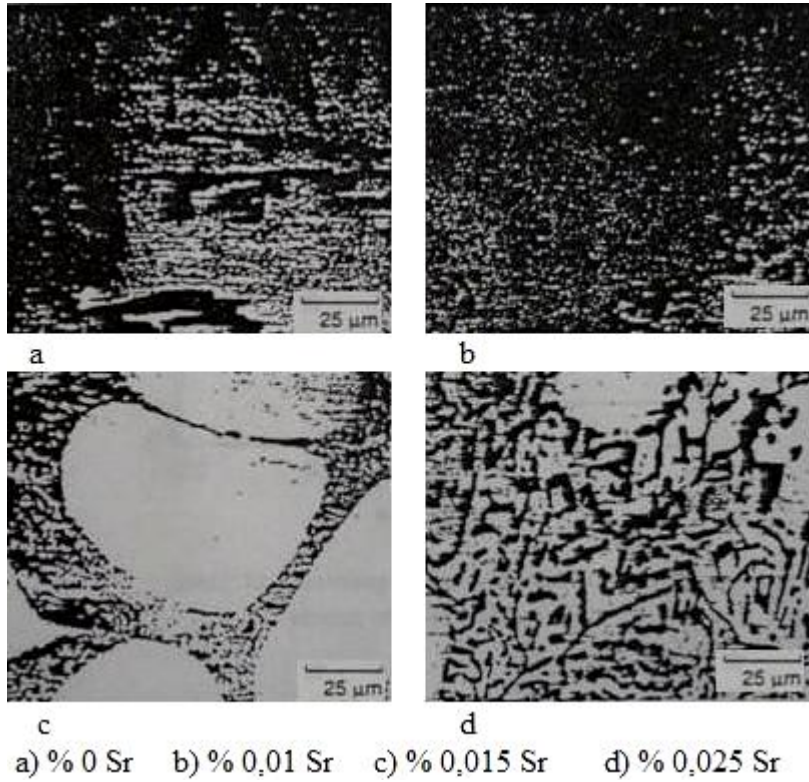


Şekil 2.20 : Silisyum parça şekillerini gösteren mikrograflar [17].

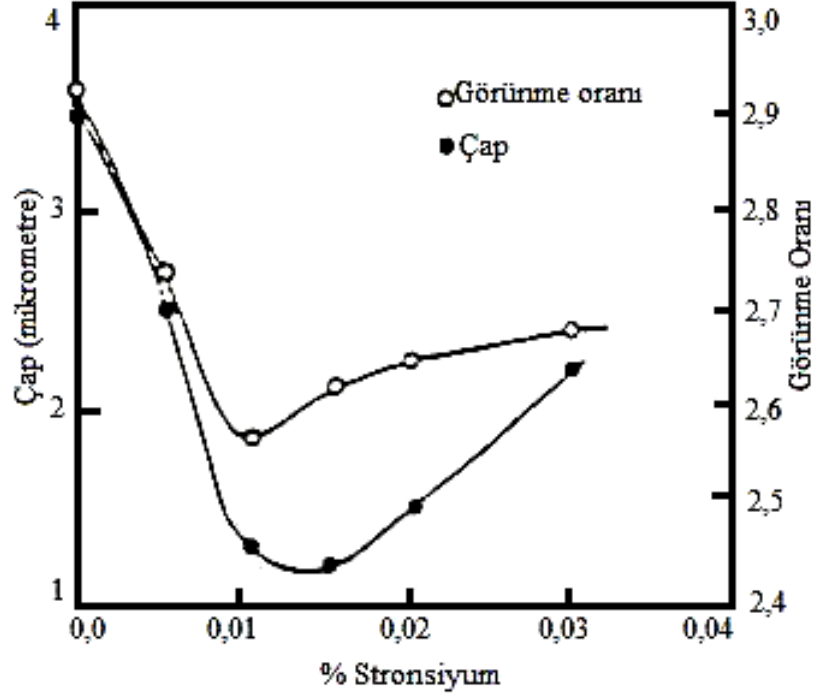
Tabakalı bir silisyum yapı üreten antimuanın eriyiğe ilavesi ile kısmi bir modifikasyon etkiside gözlenir. Modifikasyonun, Al-Si alaşımlarının mikroyapısında ve mekanik özelliklerinde yararlı etkileri ispat edilmiştir. Modifikasyonu gerçekleştirmek için gerekli modifiye edici elementin miktarı, modifiye edici elementin cinsine ve modifiye edici elementi kirleten empuritelerin konsantrasyonuna bağlıdır.

Yaklaşık % 0,05 ile % 0,01 Na komle bir modifikasyon gözlemek için yeterli iken aynı etkiyi sağlamak için % 0,01 ile % 0,02 Sr gerekli olabilir. Sodyum ve stronsiyum konsantrasyonları yukarıda belirtilen değerlerin üzerinde olduğunda zararlı etkilere neden olabilir. Sodyum ile modifikasyonun etkileri iyi bir şekilde tespit edilmiştir.

Gözlemlere göre yaklaşık % 0,015'in üzerinde artan Sr içeriği silisyum parçalarında bir büyümeye sebep olmaktadır. (Şekil 2.21)



**Şekil 2.21** : Stronsiyum konsantrasyonlu silisyum parça şekillerinin değişimini gösteren mikrograflar [17].



**Şekil 2.22** : Stronsiyum konsantrasyonlu silisyum parça ortalama çapı ve görünme oranının değişimi [17].

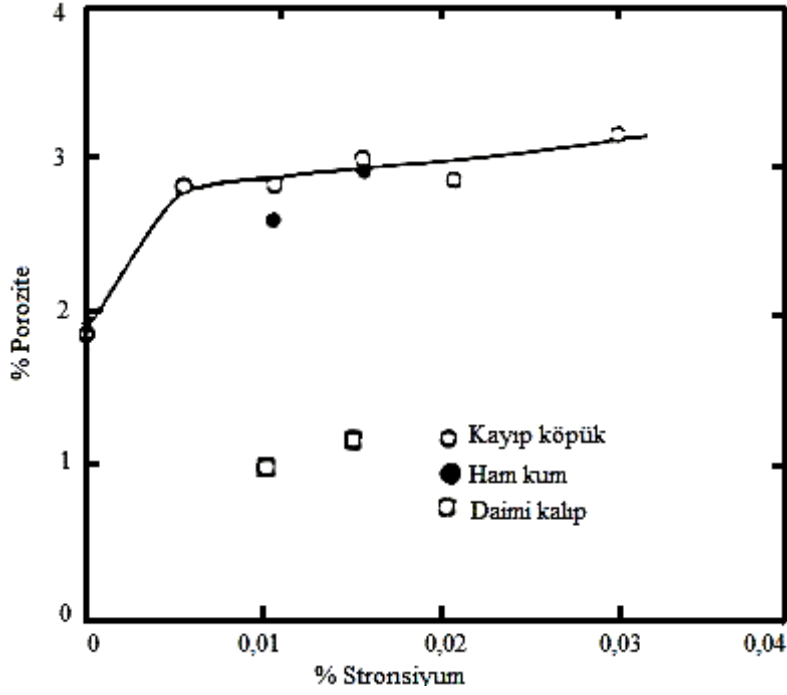
Yaklaşık % 0,015-0,02'den büyük stronsiyum seviyelerinde parça çapı ve görünüş oranı yükselmeye başlar (Şekil 2.22).

Bu durum 356 ve 319 alaşım dökümlerinde gözlenir. Silisyum parçalarının bu şekilde büyümesi, % 0,01 ile % 0,015'den büyük stronsiyum içeriğindeki mekanik özelliklerde bir azalmayı rapor eden Closset, Gruleski ve Ozelton etal'ın sonuçları ile açıklanabilir.

Dikkat edilmesi gereken, silisyum parçalarının büyümesini meydana getiren Sr içeriği, katılaşma sırasında soğuma oranına bağlı olabilir.

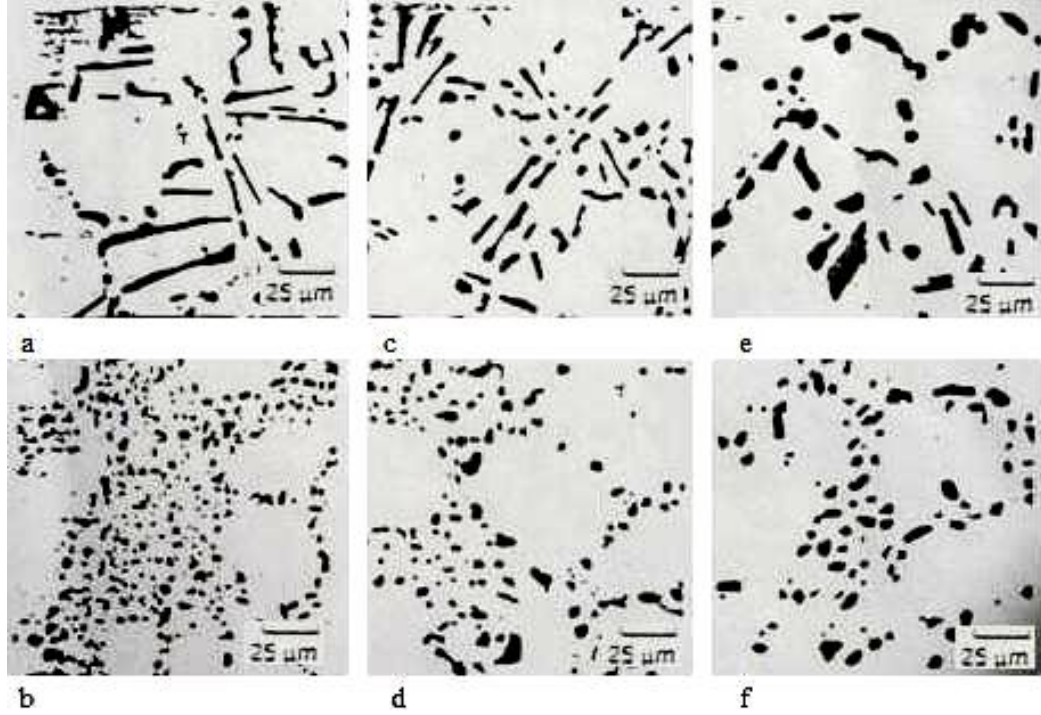
Kimyasal modifikasyon ile ilgili esas problemlerden biri, dökümlerin porozite oluşumuna olan hassasiyetidir.

Yüksek miktarda bir porozite genellikle, modifiye edilmiş pek çok numunede tespit edilir (Şekil 2.23).



**Şekil 2.23** : Stronsiyum konsantrasyonunun bir fonksiyonu olarak % porozite [17].

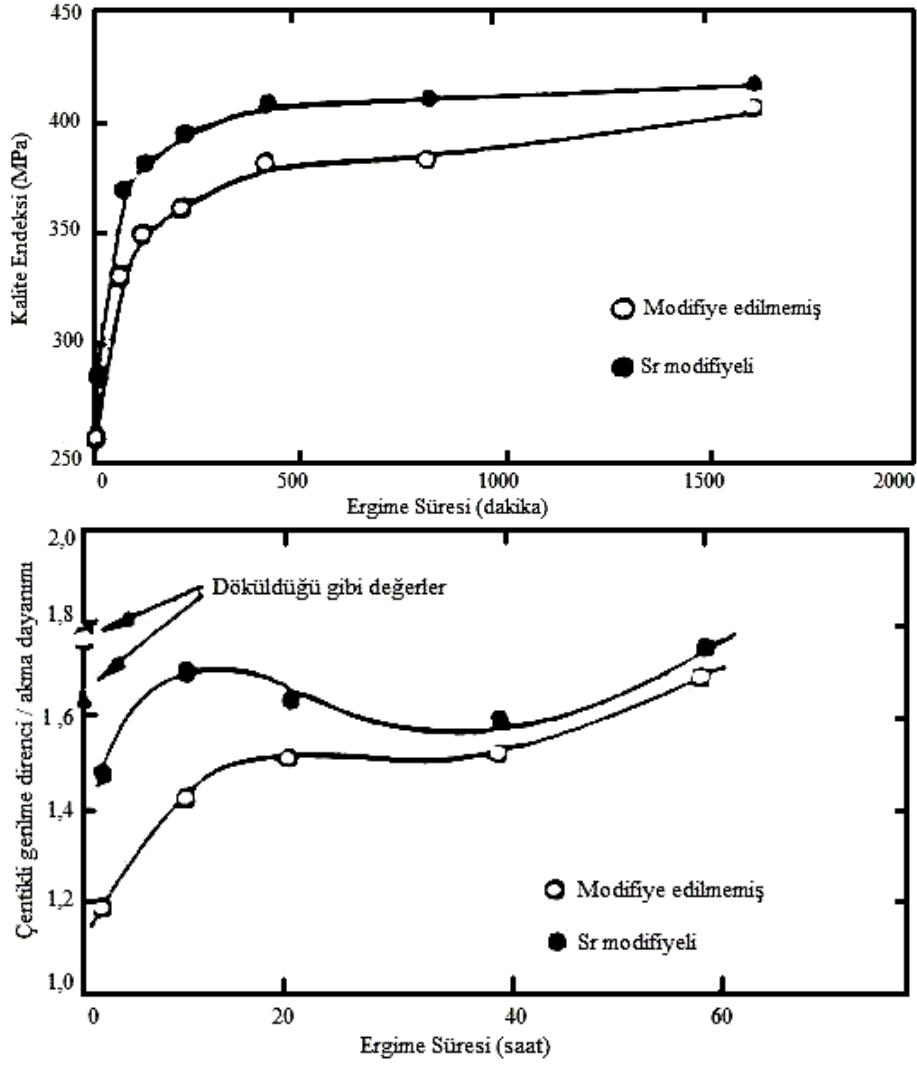
Ortalama gözenek ölçüsü de Şekil 2.23'de gösterildiği gibi modifikasyon ile artar. Modifikasyonun, porozite miktarını artıran tam mekanizması açıkça belirlenmemiştir. Bazı bilim adamlarına göre modifikasyon, eriyiğin hidrojen içeriğinin ve / veya eriyiğe yeniden gaz verme oranının yükselmesiyle, porozite problemini şiddetlendirir. Diğer bazı bilim adamlarının iddiası ise, stronsiyum ilavesinin hidrojen konsantrasyonunu veya yeniden gaz verme oranını arttırmadığıdır. Çeşitli faktörler, modifiye edilmiş dökümlerde porozitenin artmasına katkıda bulunabilir. Modifiye edilmiş alaşımlardaki ötektik sıcaklığın durgunluğu nedeniyle donma aralığı artar ve gözenekler uzun bir periyoda oluşur. Böylece, gözenekler modifiye olmuş alaşımlarda daha büyük ölçülere ulaşabilir. Argo ve Gruleski'nin çalışmalarına göre, modifiye alaşımlarda dendritler arası besleme ile ilişkili problemlerden dolayı büyük gözenekler gözlenebilir. Modifiye alaşımlarda ötektik sıcaklığın azalması, süngerimsi bölge uzunluğunu artırır ve böylece dendritler arası büyük sıvı çukurları izole edilmiş olur. Bu sıvının katılaşması büyük gözeneklerin oluşmasına sebep olabilir. Sodyum ve stronsiyum gibi reaktif elementlerin eriyiğe ilavesi yüzey gerilimini azaltır ve gözeneklerin çekirdeklenmesini kolaylaştırabilir. Fang ve Granger'a göre, stronsiyum eriyiğin inklüzyon içeriğini de artırır ve bu yüzden gözenek çekirdeklenmesi için ilave alanlar sağlar. Temel operasyon mekanizmasını anlamak ek bir çalışma gerektirir.



a) Modifiye edilmemiş, 200 dk., b) Modifiyeli 200 dk., c) Modifiye edilmemiş, 800dk.,  
d) Modifiyeli 800 dk., e) Modifiye edilmemiş, 1600 dk., f) Modifiyeli 1600 dk.

**Şekil 2.24 :** Eriyik ısıtma süresinin bir fonksiyonu olarak modifiye edilmemiş ve stronsiyum modifiyeli A356 alaşımlarında silisyum parça şekillerini gösteren mikrograflar [17].

Eriğin kimyasal modifikasyonu, ısıtma sırasında oluşan yapısal değişikliklerde sert bir yapıya sahiptir. Al-Si dökümler genellikle silisyum parça şeklini değiştirmek için nispeten uzun periyodlarla (6-12 saat) çözülmeye tabi tutulurlar. Ergime işlemi sırasında asıl amaç termal modifikasyon işlemleri boyunca silisyum parçalarını küresel hale getirmektir. Modifiye edilmemiş alaşımlarda gözlenen tabaka halinde ötektik yapılar şekil düzensizliklerine karşı direnç gösterir ve çok yavaş küresel hale gelir. Şekil 2.24'ten görülebileceği gibi, 26 saatlik ergime işleminden sonra bile modifiye olmamış yapı tam olarak küresel değildir. Karşılaştırıldığında; küreselleşme, kendiliğinden kırılmaya uğrayan Sr ile modifiye edilen alaşımlarda çok hızlı bir şekilde meydana gelir. Sonuç olarak Sr veya Na ile yapılan kimyasal modifikasyon ergime zamanlarını önemli ölçüde azaltmak için kullanılabilirler.



**Şekil 2.25 :** Eriyik ısıtma süresinin bir fonksiyonu olarak modifiye edilmemiş ve Sr modifiyeli A356 alaşımlarında kalite endeksi ve çentikli gerilme direnci ve akma dayanımının oranının değişimi [17].

Şekil 2.25'deki veriler göstermektedir ki, dökümdeki mekanik özellikleri azami düzeye çıkarmak için, Sr ile modifiye edilen örnekler optimum ergitme sürelerini modifiye edilmemiş örneklerden önemli ölçüde daha kısa kılar. Böylece, kimyasal modifikasyon bütün ısıtma maliyetlerini etkili bir şekilde azaltmak için kullanılabilir [17].

## 2.12 Alüminyum Döküm Isıl İşlemi

Alüminyum ve alaşımlarının metalurjisi istenilen mekanik ve fiziksel özelliklerin elde edilebilmesi için ısıtma uygulamalarına olanak tanır. Temper seçimi ile birlikte alüminyum alaşım dökümlerinin her alandaki uygulamaları için istenilen özelliklerin elde edilmesi mümkündür.

Özel mühendislik kriterlerini sağlamak için fiziksel ve mekanik özelliklerin ürünlerin metalurjik yapısıyla değiştirilerek sağlandığı tüm ısısal uygulamalara ısı işlem denir.

Temper seçimini temelini sırasıyla şu özellikler belirler:

a) Artan sertlik, b) Gelişmiş işlenebilirlik, c) Gelişmiş aşınma dayanımı, d) Artan dayanım ve/veya belirli bir malzeme durumu için belirlenmiş mekanik özelliklerin üretimi, e) Mekanik ve fiziksel özelliklerin dengelenmesi, f) Boyutsal dengenin sağlanması, g) Elektriksel karakteristiklerin değişmesi, h) Korozyon dayanımının değişmesi, ı) Artık gerilimin giderilmesi.

Alüminyumun kullanışlılığı geliştirilmiş ve ticari olarak kullanılan alaşımlarının sayısıyla gösterilir. Birçok alaşımın ısı işlemi ile birlikte istenilen mekanik ve fiziksel özellikler elde edilir.

Bu özellikler için parçalar tavlanabilir, çözeltiye alınabilir, su verme işlemine tabi tutulur, çözelti sertleşmesi yapılabilir, yaşlandırılabilir veya birkaç ısı işlem metodunun birleşimi ile uygulanabilir.

Alüminyum alaşımlarının ısı işlemi kristalografik monotropik sistem içerisinde yer alan metalurjik fazların değişen çözünürlüklerine bağlıdır. Ötektik fazın çözünürlüğü sıcaklığın katılma bölgesine yükselmesiyle artar, çökelen fazların oluşumu ve dağılımı malzeme özelliklerini etkilemek için idare edilir.

Çözünebilen elementlerin ve bileşimlerle ilişkilendirilmiş faz ve morfoloji değişimlerine ilave olarak diğer bazı etkenler yüksek sıcaklık işlemlerine eşlik eder. Tüm katılmış yapılardaki mikrosegregasyon minimize edilir veya tamamen giderilir. Katılma esnasında veya su verme öncesi oluşmuş artık gerilimler azaltılır, çözünmemiş fazlar fiziksel olarak değişebilir ve korozyona olan hassasiyet etkilenebilir [10].

Alüminyum alaşımlarında dayanımı arttırmak için yapılan ısı işlem 3 adımda gerçekleşir:

a) Çözelti ısı işlem: Çözünebilen fazların çözülmesi,

b) Su verme: Süper doygunluğun gelişimi,

c) Yaşlandırma: Oda sıcaklığında (doğal yaşlanmayla) veya yüksek sıcaklıklarda (suni yaşlandırma veya çökelti sertleşmesi) çözelmiş atomların çökmesi [18].

### **2.12.1 Çözelti ısıl işlemi**

Çökelti sertleşmesi reaksiyonunun avantajından faydalanmak için öncelikle katı bir çözelti üretmek gerekir. Bu işleme çözelti ısıl işlemi denilir. Bu prosesin amacı alaşımdaki çözülebilen sertleşmiş elementlerin büyük bir miktarını katı çözelti içine alabilmektir. Proses alaşımı gerekli olan yüksek bir sıcaklığa kadar ve uzun bir zaman aralığında çözeltiliye daldırarak homojene yakın bir katı çözelti elde etmektir.

Fazla ısıtma: Ötektik ergime sıcaklığını geçmemek için gerekli önem ve hassasiyet gösterilmelidir. Fazla ısıtma sonucu ötektik ergime gerçekleşirse, çekme dayanımı, süneklik ve kırılma tokluğu azalabilir.

Az ısıtma: Normal ısıtma sıcaklığının altında gerçekleşen ısıl işlem uygulamalarında, çözelti tamamlanmamış, eksiktir ve dayanım beklenenden daha düşüktür.

Çözelti işlemi süresi: Bu süre tamamen ısıl işleme girecek parçanın kalınlığı ile orantılıdır [18].

Çözelti sıcaklığına kadar ısıtma teknik olarak önemsizdir. Birden fazla çözünebilir fazın olduğu Al-Si-Cu-Mg ve Al-Zn-Cu-Mg sistemlerinde adımlı ısıl işlem, düşük ergime sıcaklığına sahip fazların erimesinin engellenmesi için gereklidir. Yavaş katılaşma hızına sahip proseslerle bağlantılı büyük mikroyapılar çözelti ısıl işlem sıcaklığına daha uzun süre ihtiyaç duyarlar. Ötektik ergime sıcaklığının hemen altındaki sıcaklıklar optimal özellik gelişimi için gereklidir.

Safsızlık elementlerini de içeren çözünmeyen fazların çözelti ısıl işlemden etkilenmediği düşünülür. Ancak sınırlı değişimler gerçekleşebilir. Birincil ve ötektik silisyum parçacıklarının yüzeyleri çözelti ısıl işlemi esnasında yuvarlak hale gelir [10].

### **2.12.2 Su verme**

Çoğu durumda, mekanik özelliklere ve korozyon dayanımını olumsuz etkileyecek çökeltileri engellemek için, çözelti ısıl işlemi esnasında oluşmuş katı çözelti hızlı bir

şekilde su verme ile oda sıcaklığına kadar süper doymuş bir çözelti haline getirilmelidir [18].

Su verme işleminin hedefi en düşük miktarda artık gerilime maruz kalan en yüksek miktarda çözeltiyi muhafaza etmektir. Çözelti sıcaklığından oda sıcaklığına hızlı soğutma kritiktir, zordur ve termal proseste en az kontrol edilebilen adımdır.

Şartnameler çoğunlukla su verme erteleme sınırlarını tanımlar veya tavsiye eder. Pratikte mümkün olan en kısa erteleme arzu edilir. Erteleme zamanındaki artış sıcaklık düşüşüne ve büyük çökeltilerin hızlı oluşumuna sebep olur. Bu da çökeltilerin sertleştirme amacı için gerekli olan etkilerini etkisiz kılar.

Yüksek dayanım hızlı su verme işlemi ile ilişkilidir [10].

### **2.12.3 Çökelti ısı işlemi / yaşlandırma**

Doğal veya suni çökelti sertleşmesi ardından çözelti ısı işlemi ve su verme işlemleri alüminyum döküm ürünlerin özelliklerini en kuvvetli şekilde değiştirir. Sertleşme metalurjik yapıdaki değişimin deformasyona olan artan direnci ile tanımlanır. Çoğu alüminyum alaşımı su verme işleminin ardından doğal olarak yaşlanır [10].

### **2.12.4 % 4-% 7 Si arası ısı işlemli ticari alaşımların özellikleri**

#### **2.12.4.1 308.0 (5,5 Si-4,5 Cu)**

Kimyasal Bileşim: % 5-6 Si, % 4-5 Cu, maksimum (% 0,1 Mg, % 0,5 Mn, % 1 Fe, % 1 Zn, % 0,25 Ti, % 0,25 diğerleri)

Yüksek demir, çinko veya kalay mekanik özellikleri düşürür, magnezyum sünekliliği azaltır.

Döküm hali: çekme dayanımı: 195 MPa, akma dayanımı: 110 MPa, uzama: % 2. Sertlik: 70 HB [18].

#### **2.12.4.2 319.0 (6,5 Si-3,5 Cu)**

Kimyasal Bileşim: % 5,5-6,5 Si, % 3-4 Cu, maksimum (% 0,1 Mg, % 0,5 Mn, % 1 Fe, % 1 Zn, % 0,25 Ti, % 0,35Ni).

Kum döküm:

Döküm hali: çekme dayanımı: 185 MPa, akma dayanımı: 125 MPa, uzama: % 2.  
Sertlik: 70 HB.

T6 ısıt işleml: çekme dayanımı: 250 MPa, akma dayanımı: 165 MPa, uzama:% 2.  
Sertlik: 80 HB

Sürekli döküm:

Döküm hali: çekme dayanımı: 235 MPa, akma dayanımı: 130 MPa, uzama: % 2,5.  
Sertlik: 85 HB.

T6 ısıt işleml: çekme dayanımı: 280 MPa, akma dayanımı: 185 MPa, uzama:% 3.  
Sertlik: 95 HB [18].

#### **2.12.4.3 355.0, C355.0 (5 Si-1,3 Cu-0,5 Mg)**

Kimyasal Bileşim: 355.0: % 4,5-5,5 Si, % 1-1,5 Cu, % 0,4-0,6 Mg, maksimum (% 0,5 Mn, % 0,6 Fe, % 0,25 Cr, % 0,35 Zn, % 0,25 Ti, % 0,05 diğlerleri (her biri)), C355: % 4,5-5,5 Si, % 1-1,5 Cu, % 0,4-0,6 Mg, maksimum (% 0,1 Mn, % 0,2 Fe, % 0,1 Zn, % 0,2 Ti, % 0,05 diğlerleri (her biri)).

Yüksek demir oranı sünekliliğı düşürür. Nikel korozyon dayanımını azaltır. Kalay mekanik özellikleri düşürür.

Kum döküm:

T51 ısıt işleml: çekme dayanımı: 195 MPa, akma dayanımı: 160 MPa, uzama: % 1,5.  
Sertlik: 65 HB.

T6 ısıt işleml: çekme dayanımı: 240 MPa, akma dayanımı: 170 MPa, uzama:% 3.  
Sertlik: 80 HB

T61 ısıt işleml: çekme dayanımı: 270 MPa, akma dayanımı: 240 MPa, uzama:% 1.  
Sertlik: 90 HB

Sürekli döküm:

T51 ısıt işleml: çekme dayanımı: 205 MPa, akma dayanımı: 165 MPa, uzama: % 2.  
Sertlik: 75 HB.

T6 ısııl işlem: çekme dayanımı: 290 MPa, akma dayanımı: 185 MPa, uzama:% 4.  
Sertlik: 90 HB

T62 ısııl işlem: çekme dayanımı: 310 MPa, akma dayanımı: 275 MPa, uzama:% 1,5.  
Sertlik: 105 HB [18].

#### **2.12.4.4 356.0, A356.0 (7 Si-0,3 Mg)**

Kimyasal Bileşim: 356.0: % 6,5-7,5 Si, % 0,25-0,45 Mg, maksimum (% 0,25 Cu, % 0,35 Mn, % 0,6 Fe, % 0,35 Zn, % 0,25 Ti, % 0,05 diğerleri (her biri), % 0,15 diğerleri), A356.0: % 6,5-7,5 Si, % 0,25-0,45 Mg, maksimum (% 0,2 Cu, % 0,1 Mn, % 0,2 Fe, % 0,1 Zn, % 0,2 Ti, % 0,05 diğerleri (her biri), % 0,15 diğerleri)

Kum döküm:

T51 ısııl işlem: çekme dayanımı: 172 MPa, akma dayanımı: 140 MPa, uzama: % 2.  
Sertlik: 60 HB.

T6 ısııl işlem: çekme dayanımı: 228 MPa, akma dayanımı: 165 MPa, uzama:% 3,5.  
Sertlik: 70 HB.

Sürekli döküm:

T6 ısııl işlem: çekme dayanımı: 262 MPa, akma dayanımı: 185 MPa, uzama: % 5.  
Sertlik: 80 HB [18].

#### **2.12.4.5 357.0, A357.0 (7 Si-0,5 Mg)**

Kimyasal Bileşim: 357.0: % 6,5-7,5 Si, % 0,45-0,6 Mg, maksimum (% 0,05 Cu, % 0,03 Mn, % 0,15 Fe, % 0,05 Zn, % 0,2 Ti, % 0,05 diğerleri (her biri), % 0,15 diğerleri), A357.0: % 6,5-7,5 Si, % 0,4-0,7 Mg, % 0,1-0,2 Ti, % 0,04-0,07 Be, maksimum (% 0,2 Cu, % 0,1 Mn, % 0,2 Fe, % 0,1 Zn, % 0,05 diğerleri (her biri), % 0,15 diğerleri)

Sürekli döküm:

T61 ısııl işlem: çekme dayanımı: 317 MPa, akma dayanımı: 248 MPa, uzama:% 3.  
Sertlik: 100 HB [18].

#### **2.12.4.6 443.0, A443.0, B443.0, C443.0 (5,2 Si)**

Kimyasal Bileşim: 443.0: % 4,5-6 Si, maksimum (% 0,6 Cu, % 0,05 Mg, % 0,5 Mn, % 0,8 Fe, % 0,25 Cr, % 0,5 Zn, % 0,25 Ti, % 0,35 diğerleri), A443.0: % 4,5-6 Si, maksimum (% 0,3 Cu, % 0,05 Mg, % 0,5 Mn, % 0,8 Fe, % 0,25 Cr, % 0,5 Zn, % 0,25 Ti, % 0,35 diğerleri), B443.0: % 4,5-6 Si, maksimum (% 0,15 Cu, % 0,05 Mg, % 0,35 Mn, % 0,8 Fe, % 0,35 Zn, % 0,25 Ti, % 0,25 diğerleri), C443.0: %4,5-6 Si, maksimum (% 0,6 Cu, % 0,1 Mg, % 0,35 Mn, % 2 Fe, % 0,5 Ni, % 0,5 Zn, % 0,15 Sn, % 0,25 diğerleri)

Yüksek bakır oranı korozyon dayanımını azaltır; yüksek demir ve magnezyum sünekliliği azaltır.

Kum döküm:

443.0 Döküm hali: çekme dayanımı: 130 MPa, akma dayanımı: 55 MPa, uzama: % 8. Sertlik: 40 HB.

Sürekli döküm:

B443.0 Döküm hali: çekme dayanımı: 160 MPa, akma dayanımı: 60 MPa, uzama: % 10. Sertlik: 45 HB.

C443.0 Döküm hali: çekme dayanımı: 230 MPa, akma dayanımı: 110 MPa, uzama: % 9. Sertlik: 65 HB [18].

### **2.13 Katılaşma mekanizmaları**

Yönlendirilmiş katılaşmada katı faz ile sıvı faz arasında üç farklı tipte kristallerin büyümesi gözlenir. Bu mekanizmalar sırasıyla eşsiz büyüme, kısmi eşli büyüme ve eşli büyümedir [19].

#### **2.13.1 Eşsiz büyüme**

Eşsiz büyüme esnasında fazlar birbirlerinden bağımsız yönde büyüme gösterirler. Fazlardan biri ( $\alpha$ -Al dendritler) diğerine göre çok ileride sıvıya doğru büyüme gösterir, diğer faz (ötektik silisyum) ise önde giden fazın arasında kalan bölgelerde geriden ilerleme gösterir. Böylece katı-sıvı ara yüzeyi izotermal olmaz ve şekil

olarak düzlemsel değildir, katı-sıvı ara yüzeyinde sıcaklık dalgalanması ve morfoloji bulunur [19].

### **2.13.2 Kısmen eşli büyüme**

Mikro yapıda birincil  $\alpha$ -Al dendritleri bulunmaz, katı-sıvı ara yüzeyde Y şeklinde silisyum kristal levhaları ile alüminyum ana fazı arasında kısmen eşli büyüme şekli bulunur. Katı sıvı ara yüzeyi genel olarak izotermal değildir [19].

### **2.13.3 Eşli büyüme**

Her iki faz aşağı yukarı düz bir katı-sıvı ara yüzey sağlayarak birlikte ve aynı sıcaklıkta katılaştır. Katı-sıvı ara yüzeye yakın sıvı bölgede atom yayılımını etkinleştirir [19].

## **2.14 Alaşım Faz Diyagramları**

Alaşım faz diyagramları metalurjistler, malzeme mühendisleri ve malzeme bilim adamları için özel uygulamalarda yeni alaşımların gelişimi, alaşımların üretimlerinin faydalı konfigürasyonlara dönüşmesi ve istenen mekanik, fiziksel ve kimyasal özellikleri sağlayacak özel alaşımların ısıl işlem prosedürlerinin dizayn ve kontrolü için ve de özel alaşımlarda karşılaşılan problemleri çözebilmek için araştırma, geliştirme ve üretimlerinin daha etkili ve maliyetli yapılabilmesi için gereklidir.

Tüm malzemeler gaz, sıvı veya katı şekilde yani durumlarına bağlıdır. Durum değişkenleri bileşim, sıcaklık, basınç, manyetik alan, elektrostatik alan, çekimsel alan vb.'dir. Faz terimi ise fiziksel homojen malzeme tarafından kaplanan alandır. Üç tip denge bulunmaktadır, kararlı, değişken ve kararsız. Kararlı denge nesne en düşük enerji durumundayken, değişken denge nesne gerçek dengeye geçmeden ilave enerjinin verildiği, kararsız denge ise değişken veya dengeli duruma geçmek için ilave enerjinin gerekmediği durumlarda gerçekleşir.

Katı elementlerin ve bileşimlerin kararlı denge durumundaki yapıları kristalindir ve her birinin kristal yapısı eşsizdir. Bazı element ve bileşimler çok şekillidir. Yani yapıları tek bir kristal yapıdan bir diğerine sıcaklık ve basınçtaki değişimlerle birlikte dönüşür, her bir farklı yapı farklı faza dönüşür.

Bazı koşullarda, değişken kristal yapılar dengeli yapılar yerine oluşabilirler. Hızlı donma değişken yapılar üretmek için bilinen bir yöntemdir. Ekstrem hızlı donmada, termodinamik olarak kararsız yapılar üretilebilir.

Fiziksel sistem bir maddeden veya çevresinden izole olmuş bir grup maddelerden oluşur. İzole olması maddenin çevresiyle herhangi bir kütle değişimi içermemesi demektir. Alaşım sistemlerindeki maddeler bakır ve çinko gibi iki metal; demir ve karbon gibi metal ve metal dışı element; demir ve sementit gibi metal ve inter metalik; alüminyum, magnezyum ve mangan gibi birkaç metal olabilir.

Faz kuralı ilk olarak J. Willard Gibbs tarafından 1876 yılında bir karışımın fiziksel durumunun sistem ve sistemin koşullarının bileşim sayılarıyla ilişkili olduğu belirtilmiştir. Gibbs ayrıca sistemdeki her bir homojen bölgeyi faz terimi olarak açıklayan kişidir. Basınç ve sıcaklığın durum değişkenleri olduğu durumda kural aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$f=c-p+2 \quad (2.1)$$

f: serbest değişkenlerin sayısı (serbestlik derecesi)

c: bileşimlerin sayısı

p: sistemdeki kararlı fazların sayısıdır [20].

Al ile ikili faz oluşturan elementlere ait faz diyagramları ekler kısmında verilmiştir.

## 2.15 Çeşitli Literatür Çalışmaları

### 2.15.1 AA3003 alaşımlarının Zn ve Si ilavesi ile yönlendirilmiş katılaşması

Çinko katı alüminyum içindeki yüksek çözünebilirliğinden ve göreceli kısa katılaşma süresi dolayısıyla seçilmiştir. Yüksek oranlarda ilave edilebilirliği çözelti sertleşmesini iyileştirir ve yüksek sıcaklıklardaki dayanımı arttırmaktadır. Silisyum ikincil faz oluşumunu ve geçişini etkiler ve ayrıca katılaşma aralığını kuvvetli bir şekilde artırır. Zn ilavesi ile malzemenin matrisinin dayanımı katı çözelti sertleşmesi ile artmıştır. % 5 Zn seviyelerinde sertlik % 50 miktarında artmıştır, fakat aynı zamanda katılaşma yapısı daha etkisiz hale gelmiştir. DAS ve ikinci fazlar daha

büyük hale gelmiştir ve katılaşma aralığı Zn oranının % 2,5'den % 5'e kadar yükselmesiyle birlikte artmıştır [12].

### **2.15.2 Ötektik Al-Si döküm alaşımlarına Na ve Sr'un birlikte ilavelerinin etkileri**

Sodyum ve stronsiyumun birlikte ilavesiyle, her iki elementin modifiye edici özelliklerinin etkileri görülmüştür, ötektik silisyumun inceltilmesi sodyum modifikasyonunun stronsiyumun uzun süreli etkili modifikasyonu ile birleşmesiyle elde edilmiştir. Stronsiyum sodyumun ergiyik içindeki var oluşunu her ikisi birlikte ilave edildiğinde dengelemektedir. Sodyum veya stronsiyumla birlikte üst modifikasyon sodyumla birleştiği zaman daha büyük ötektik silisyum bantları ve intermetalikler oluşur ve bu da çekme dayanımı ve uzamada zararlı etkilere yol açar. Sadece stronsiyumla üst modifikasyon ise,  $Al_4Si_2Sr$  parçacıklarına oluşumuna sebep verir ve bu da daha zararsız çekme dayanımlarına sebep verir. Sodyum % 0,02, stronsiyum % 0,06 seviyelerine kadar ilave edilmiştir.

Sodyum modifikasyonu ile çekme dayanımı 168 MPa'a çıkmıştır ancak 4 saatlik bekleme süresi sonunda modifiyesiz alaşım seviyelerine düşmüştür. Stronsiyum modifikasyonu ile çekme dayanımı 166,5 MPa'a çıkmıştır ve 4 saat bekleme süresiyle aynı kalmıştır. Sodyum ve stronsiyumun birlikte çekme dayanımı 174,5 MPa'a çıkmıştır [12].

### **2.15.3 % 1-4 arası Cu ilavelerinin yarı-katı şekilli 357 Al alaşımına etkileri**

Bakır 357 alaşımlarının genel sertliğini 15 Brinell sertliği kadar yükseltmiştir. Birincil alfa tanecikleri arasındaki ötektik bölgelerin mikrosertlikleri artmıştır. Bakır interdendritiklerin erime sıcaklıklarını düşürmüştür ve bu da tekrar katılaşmış ötektikte daha büyük silisyum parçacıklarının oluşmasına yol açmıştır [12].

### **2.15.4 Alüminyum jant sektörü**

Alüminyum jant sektöründe alçak basınçlı döküm ile üretim yönteminde genellikle iki tip alaşım kullanılmaktadır. Bunlar  $AlSi7Mg$  ve  $AlSi11Mg$ 'dir. % 7 Si içeren alaşımlar ısıtılma işlemiyle birlikte üretilirler. % 11 Si içeren alaşımlar ise döküm halleriyle üretilirler [21].

**Çizelge 2.10 :** AlSi7Mg ve AlSi11Mg alaşımlarının kimyasal bileşimi [21].

Alaşım	Bileşimler (Ağırlıkça %)							
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Cr
AlSi11Mg	10,5-12	0-0,18	0-0,02	0-0,04	0,1-0,2	0-0,04	0,08-0,14	0-0,02
AlSi7Mg	6,5-7,5	0-0,15	0-0,02	0-0,04	0,25-0,33	0-0,04	0,08-0,15	0-0,02
Alaşım	Bileşimler (Ağırlıkça %)							
	Ni	Pb	Sn	Ca	Sr	Sb	P	
AlSi11Mg	0-0,02	0-0,01	0-0,01	-	0,01-0,05	0-0,01	0-0,002	
AlSi7Mg	0-0,02	0-0,01	0-0,01	0-0,003	0,01-0,03	0-0,01	0-0,002	
-: Eser miktar								

**Çizelge 2.11 :** AlSi7Mg ve AlSi11Mg alaşımlarının istenen mekanik özellikleri [21].

Alaşım	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	% Uzama (E %)	Brinell Sertlik (HB 5 / 250)
AlSi11Mg	Min 80	Min 150	Min 3	Min 54
AlSi7Mg	Min 150	Min 220	Min 3	Min 70

### 2.15.5 Zamak alaşımları

Zamak alaşımları öncelikle gravite döküm için geliştirilmiştir. Kum döküm, sürekli döküm ve yapışma kalıp yöntemleriyle üretilerek mekanik özellikleri bronz, dökme demir ve alüminyumla rekabet etmektedir. Çinko ve alüminyum ana alaşım elementleridir, magnezyum ve bakır ise yardımcı elementler olarak ilave edilir [22].

**Çizelge 2.12 :** Zamak alaşımları kimyasal özellikleri [22].

Element	ZA-8 Bileşim (%)		ZA-12 Bileşim (%)		ZA-27 Bileşim (%)	
	İngot	Döküm	İngot	Döküm	İngot	Döküm
Al	8,2-8,8	8,0-8,8	10,8-11,5	10,5-11,5	25,5-28,0	25,0-28,0
Mg	0,020-0,030	0,015-0,030	0,020-0,030	0,015-0,030	0,012-0,020	0,010-0,020
Cu	0,8-1,3	0,8-1,3	0,5-1,2	0,5-1,2	2,0-2,5	2,0- 2,5
Fe (maks.)	0,065	0,075	0,065	0,075	0,072	0,075
Pb (maks.)	0,005	0,006	0,005	0,006	0,005	0,006
Cd (maks.)	0,005	0,006	0,005	0,006	0,005	0,006
Sn (maks.)	0,002	0,003	0,002	0,003	0,002	0,003
Ni	-	-	-	-	-	-
diğerleri						
Zn	Denge	Denge	Denge	Denge	Denge	Denge
-: eser miktar						

**Çizelge 2.13 : Zamak alaşımları mekanik özellikleri [22].**

	ZA-8		ZA-12		ZA-27	
	Kum Döküm	Sürekli Döküm	Kum Döküm	Sürekli Döküm	Kum Döküm	Kum Döküm (Isıl İşlemli)
<b>Çekme Mukavemeti (MPa)</b>	263	221-255	276-317	310-345	400-441	310-324
<b>Akma Mukavemeti (MPa)</b>	200	206	214	269	372	255
<b>Uzama %</b>	1-2	1-2	1-3	1-3	3-6	8-11
<b>Brinell Sertliği (HB)</b>	85	85-90	89-105	89-105	110-120	90-110

### 2.15.6 Kobe Steel şirketi buluşu

Kobe Steel Şirketi tarafından çekme dayanımı 780 MPa olan bir alüminyum alaşımı 2007 yılında geliştirilmiştir. Uzamasının % 14 olduğu belirtilmiştir. Malzemenin içerisinde mukavemeti arttırıcı çinko, magnezyum ve bakır kullanılmıştır. Konvansiyonel ergitme ve döküm proseslerinde alaşım elementleri miktarı yükseldiğinde, katılaşma esnasında segregasyon oluşmaktadır, bunun sonucu olarak malzemenin yapısının büyümesine yol açmaktadır. Bu sebepler alaşımlama elementlerinin miktarını sınırlamaktadır. Kobe Steel şirketinin spreylenmiş formuyla proses işlemleri bu problemlerin aşılmasıyla sonuçlanmıştır [23].

### 2.15.7 SPX şirketi çalışması

Yarı katı döküm prosesi basınçlı döküm, sürekli döküm ve sıvama döküm metodlarına göre mukavemet ve süneklik bakımından daha yüksek mekanik özellikler sergilerler. Das Gupta'nın çalışmasında standart A356.2 ve 357 alaşımlarından farklı olarak demir oranı daha düşük alaşım kullanılmıştır. Kullanılan alaşım eğer ısıl işlem kullanılırsa dökümün dayanımı daha da artmıştır. Bu ısıl işlem çözeltiye alma ve ardından suni yaşlandırma [24].

**Çizelge 2.14 : Das Gupta çalışması, A356 ve 357 alaşımı kimyasal özellikleri [24].**

Alaşım	Bileşimler (Ağırlıkça %)							
	Si	Fe	Mn	Mg	Zn	Ti	Cu	Diğerleri
A356.2	6,5-7,5	0,12 min.	0,05 min.	0,30-0,45	0,50 min.	0,20 min.	0,10 min.	0,15 toplam
357	6,5-7,5	0,12 min.	0,03 min.	0,45-0,60	0,05 min.	0,20 min.	0,03 min.	0,15 toplam
Das Gupta	6,5-8,5	0,6-1,0	0-0,5	0,35-0,65	0-1,0	0-0,2	2,0-2,5	0-0,3

### 2.15.8 Nippon Light metal çalışması

Isao Miki'nin çalışmasında % 7-12 Silisyum arasındaki A360 ve A380 alaşımlara ilave olarak yapılan yeni çalışmaların sonucunda ısıtılı olarak mukavemet ve % uzama değerlerinin arttığı görülmüştür.

Çözeltiyeye alma işlemi 450-530 °C'de ve yaşlandırma işlemi ise 150-230 °C arasında gerçekleşmiştir.

Genel olarak kullanılan alaşım aralıkları Çizelge 2.15'te gösterilmiştir. Parantez içindeki bileşim aralıkları çalışmada en çok tercih edilen aralıklardır.

**Çizelge 2.15 :** Miki çalışması A360 ve A380 alaşımı genel kimyasal özellikleri [25].

Alaşım	Bileşimler (Ağırlıkça %)				
	Cu	Si	Mg	Fe	Mn
Isao Miki	-	7-12	0,2-0,5	0,65-1,2	0,55-1,0
	-	(8-10)	(0,25-0,35)	(0,7-1,0)	(0,6-0,8)
A360	<=0,6	9,0-10,0	0,4-0,6	<=1,3	<=0,35
A380	3,0-4,0	7,5-9,5	<=0,1	<=1,3	<=0,5
-: eser miktar					

Çizelge 2.16'da gösterilen bileşim aralıklarında yapılan döküm parçalarından elde edilen numuneler 500 °C sıcaklıkta 2 saat süreyle çözeltiyeye alınmış daha sonra suda sertleştirilmiş ve 190 °C sıcaklıkta 4 saat süreyle yaşlandırılmışlardır.

**Çizelge 2.16 :** Isao Miki çalışması, A360 & A380 alaşımı kimyasal özellikleri [25].

Alaşım	Bileşimler (Ağırlıkça %)				
	Cu	Si	Mg	Fe	Mn
Isao Miki	-	9	0,3	1,0	0,65
A360	-	9	0,5	1,0	-
A380	3,1	9	-	1,0	-
-:eser miktar					

Bu ısıtılı işlem sonrası elde edilen mekanik özellikler Çizelge 2.17'de gösterilmiştir. Yine Çizelge 2.15'de gösterilen bileşim aralığındaki yeni buluş numunesi ayrıca 500 °C sıcaklıkta 5 saat süreyle çözeltiyeye alınmıştır.

Elde edilen sonuçlar Çizelge 2.17'de buluş 2 olarak adlandırılan satırda mekanik özellikleri gösterilmiştir [25].

**Çizelge 2.17 :** Isao Miki çalışması, A360 & A380 alaşımı mekanik özellikleri [25].

Alaşım	Çekme Mukavemeti (MPa)	Uzama (%)
Isao Miki	304	14
Isao Miki (2)	295	15,5
A360	299	6
A380	319	2

### 2.15.9 Worcester metal işlem enstitüsü çalışması

Alüminyum dökümdeki en olağan ve önemli hata porozitedir, bu iki etkinin sonucudur, birincisi yetersiz besleme ve / veya katılaşma esnasındaki hidrojen çökmesidir. Bu çalışmada Si, Fe, Mg, Mn, Cu, Sr, Ti ve soğuma hızının porozite üzerindeki etkileri incelenmiştir. Sıcak izostatik presleme yöntemi ile hazırlanan numuneler deney tasarımı 2 seviyeli Taguchi deney tasarımı ile yapılmıştır [26].

**Çizelge 2.18 :** Dash Manas, Makhlof çalışması, alaşım elementleri yüksek ve düşük seviyeler [26].

Alaşım Elementleri Yüksek ve Düşük Seviyeler		
Elementler	Birinci Seviye (Düşük) (%)	İkinci Seviye (Yüksek) (%)
Fe	0,1-0,3 (0,2)	1,2-1,4 (1,3)
Mn	0,0-0,1 (0,05)	0,6-0,8 (0,7)
Cu	0,1-0,3 (0,2)	3,25-3,75 (3,5)
Mg	0,0-0,1 (0,05)	0,55-0,65 (0,6)
Si	5,8-6,2 (6,0)	9,8-10,2 (10,0)
TiB <sub>2</sub>	0	0,15-0,25 (0,20)
Sr	0	0,015-0,025 (0,02)

( ) : hedeflenen değer

Çalışma sonucunda elde edilen sonuçlara göre Fe ve Si'nin poroziteye etkisi görülmemiştir ancak beslemeye etkisi olan intermetalikleri oluşturmuşlardır. Fe ve Si Al<sub>5</sub>FeSi iğnemi yapıyı oluşturmuşlardır. Mn yokluğunda Al<sub>5</sub>FeSi iğnelerinin uzunluğu Fe oranının artmasıyla ve soğuma hızının azalmasıyla birlikte yükselir. Fakat Mn'nin olduğu durumlarda etkisi tam tersidir. Al<sub>5</sub>FeSi bileşimi iç dendritik yapıyı bloke eder sıvı akışımı engeller. Mn'nin yanında Fe ve Si Al<sub>15</sub>(MnFe)<sub>3</sub>Si çin yazısı şeklinde görülür. Bu morfoloji beslemeyi etkiler ve mikro çekinti porozitesine

yol açar. Döküm boyunca düşük Fe ve yüksek Si daha iyi besleme karakteristikleri gösterir. Yüksek Mn seviyeleri beslemeyi olumlu etkiler.

Fe ve Si, Mg ve Cu ile birlikte  $Al_5Mg_8Cu_2Si_6$ 'yu oluşturur ve  $Al_2Cu$  ile birlikte yapıları oluşturur.  $Al_2Cu$  yapısı  $Al_5FeSi$  iğnelerinin üzerinde oluşur. Bu üç bileşim sıvı metal akışını engelleyen bir ağ oluşturur.  $Al_8Mg_3FeSi_6$  bileşimi  $Al_5FeSi$  iğnelerinin dönüşümü ile oluşur. ANOVA programı bu bileşimin poroziteye negatif etkisi olduğunu belirtmiş olsa da, mikroyapı analizlerinde bu yapıya rastlanılmamıştır. Kullanılan soğutma hızları  $Al_5FeSi$  iğnelerini  $Al_8Mg_3FeSi_6$  bileşimine çevirmek için çok hızlıdır. Ayrıca Mg miktarı % 0,05 oranı ile birlikte iğneleri  $Al_8Mg_3FeSi_6$  bileşimine çevirmeye yetersizdir. Eklenen tane inceltici  $TiB_2$  dökümdeki poroziteyi etkili şekilde dağıtır ve poroziteye pozitif etkisi görülmüştür. Yavaş soğuyan kum dökümlerde Sr varlığı poroziteyi yükseltir.

% 3,5 seviyelerindeki yüksek orandaki Cu,  $Al_2Cu$ 'yu oluşturur ve  $Al_5FeSi$  iğneleriyle birlikte beslemeyi bloke eder.

Sonuç olarak beslemede en büyük rolü soğuma hızı oynar ve porozite oluşumu yüzdesinde en büyük etkeni oluşturur [26].

#### 2.15.10 G.D. Searle & Co çalışması

Bu çalışmada Oshiro ve arkadaşları basınçlı döküm için T6 ısıl işlemlili yeni alaşımlar deneyerek çekme mukavemeti ve % uzama değerlerini geliştirmişlerdir, çekme dayanımı 343 MPa'dan, uzama % 5'den düşük olmayacak şekilde Cu'nun % 3,5-5, Si'un % 6,5-7,5, Mg'un maksimum 0,36, Fe'in maksimum 0,35 olduğu sonuçlar elde edilmiştir.

ADC10 ve ADC12 Al-Si alaşımları karbüratör, silindir bloğu, silindir kafası vb. motor parçalarında kullanılmaktadır ancak bu malzemelerde çekme dayanım değerleri 225-245 MPa, % uzama değerleri 1,4-1,5 arasında değişmektedir.

**Çizelge 2.19 :** ADC10 ve ADC12 kimyasal bileşimler [27].

Alaşım	(%) Cu	(%) Si	(%) Mg	(%) Zn	(%) Fe	(%) Mn	(%) Ni	(%) Sn
ADC10	2,0-4,0	7,5-9,5	<=0,3	<=1,0	<=1,3	<=0,5	<=0,5	<=0,3
ADC12	1,5-3,5	9,6-12,0	<=0,3	<=0,3	<=1,3	<=0,5	<=0,5	<=0,3

Çizelge 2.19 ve Çizelge 2.20’de görülen bileşimler daha sonra döküm haliyle ve T6 ısıl işlemleri olarak üretilmişlerdir.

NO1, NO2, NO3 alaşımları ve ADC10 ve ADC12 alaşımları sadece döküm haliyle üretilmişler ve sonuçları Çizelge 2.21’de verilmiştir.

T6 ısıl işlemi ise aşağıda belirtilmiş bileşimlere şu şekilde uygulanmıştır:

NO1, NO2 ve NO3 alaşımları için; 520 °C’de 6 saat süreyle çözeltiye alma ve 160°C’de 7 saat yaşlandırma uygulanmıştır.

NO4, NO5, XNO1, XNO3, ADC10 ve ADC12 alaşımları için; 500 °C’de 6 saat süreyle çözeltiye alma ve 160°C’de 7 saat yaşlandırma uygulanmıştır.

XNO2 için; 510 °C’de 6 saat süreyle çözeltiye alma ve 180°C’de 4 saat yaşlandırma uygulanmıştır.

XNO4 için; 515 °C’de 6 saat süreyle çözeltiye alma ve 160°C’de 7 saat yaşlandırma uygulanmıştır [27].

**Çizelge 2.20 :** Oshiro çalışması kimyasal bileşimler [27].

Deneme	(%) Cu	(%) Si	(%) Mg	(%) Fe
NO1	4,6	7	0,2	0,21
NO2	4,7	7	0,36	0,23
NO3	4,1	7	0,01	0,21
NO4	4,4	6,9	0,24	0,22
NO5	4,3	6,6	0,17	0,29
X NO1	2,9	7,3	0,19	0,18
X NO2	4,1	8,8	0,22	0,12
X NO3	4,5	7,1	0,42	0,19
X NO4	4,8	7,1	0,27	0,41

**Çizelge 2.21 :** Oshiro çalışması döküm hali mekanik özellikler [27].

Deneme	Çekme Mukavemeti (MPa) (Döküm Hali)	Akma Mukavemeti (MPa) (Döküm Hali)	Uzama (%) (Döküm Hali)
NO1	245	88	4,9
NO2	235	78	3,6
NO3	235	78	3,6
ADC10	245	157	1,5
ADC12	225	Değerlendirilmemiş	1,1

**Çizelge 2.22 : Oshiro çalışması T6 ısıt işlemlili mekanik özellikler [27].**

Deneme	Çekme Mukavemeti (MPa) (T6 Isıl İşlemlili)	Akma Mukavemeti (MPa) (T6 Isıl İşlemlili)	Uzama (%) (T6 Isıl İşlemlili)
NO1	451	372	5,1
NO2	441	353	5,8
NO3	373	196	11,1
NO4	412	363	5
NO5	373	284	5,6
X NO1	334	236	6,7
X NO2	451	412	3,2
X NO3	353	324	0,8
X NO4	382	314	3,5
ADC10	373	294	3,2
ADC12	373	284	3,5

#### **2.15.11 Fang, Que-Tsang çalışması**

Otomobil jantlarını da içeren şekilli dökümler ve yapısal parçalar için yüksek dayanımlı Al-Zn-Mg alaşımı üretimi Fang ve arkadaşları tarafından çalışılmıştır.

Bu çalışmada özellikle otomobil jantları için Cr ve Zr içermeyen % 4-7 Zn, tercihen % 4-5 Zn, % 1,2-1,8 Mg, % 0,3-0,6 Mn, % 0,1-0,25 Cu, % 0,25 Fe ve % 0,25 Si kullanılmıştır. Çekme dayanımı olarak T6 ısıt işlemlili 344 MPa ve üstü dayanım sağlanmışır [28].

#### **2.15.12 Alabi, Muftau Masud çalışması**

Otomobil klima sistemlerinde kullanılan hava kompresörü sistemlerinde tercih edilen ötektik altı Al-Si-Cu alaşımı Alabi ve arkadaşları tarafından kullanılmıştır.

Bu çalışmada kullanılan elementler % 6,5-10,5 Si, % 3-4 Cu, % 3-4 Bi, maksimum % 0,15 Fe, maksimum % 0,1 Mn ve maksimum % 0,1 Zn aralığında kullanılmışır [29].

Benzer olarak yapılan ikinci çalışmada ise % 7-9 Si, % 1-2 Bi, % 1-2 Sn, % 0,45-0,6 Mg, maksimum % 0,2 Cu, maksimum % 0,2 Fe, maksimum % 0,1 Mn, maksimum % 0,1 Zn ve % 0,005-0,015 P kullanılmışır [30]. Üçüncü çalışmada ise % 12-13 Si, % 4-5 Bi, % 2-3 Cu, % 1,5-2,5 Ni, % 0,01-0,02 P, maksimum % 0,8 Fe, maksimum 0,4 Mn ve maksimum % 0,2 Ti kullanılmışır [31].

### **2.15.13 Ulmann, John E. Granger çalışması**

Havacılık endüstrisinde uçaklarda kullanılan jantlarda ve fren parçalarında Ulmann ve arkadaşları tarafından iki tip farklı alaşım aralığında çalışılmıştır. Birinci çalışmada % 0-0,15 Cr, % 0,8-1,2 Cu, % 0,8-1,2 Fe, % 2,2-2,8 Mg, % 0-0,1 Mn, % 0,8-1,2 Ni, % 0-0,15 Si, % 0-0,15 Ti, % 5,5-7 Zn, % 0-0,25 Zr ve % 0-0,25 Sc kullanılmıştır. İkinci çalışmada ise % 0-0,25 Cr, % 0,8-1,2 Cu, % 0-0,3 Fe, % 2,3-2,9 Mg, % 2,7-3,1 Mn, % 2,85-3,25 Ni, % 0-0,15 Si, % 0-0,15 Ti, % 6,1-7,1 Zn, % 0-0,25 Zr ve % 0-0,25 Sc kullanılmıştır [32].

### **2.15.14 Lasalle, Jerry, C çalışması**

Havacılık endüstrisinde kullanılan Al-Li alaşımlarının hızlı katılaştırılması ile yapılan çalışmada üç farklı alaşımda şu sonuçlar elde edilmiştir. Birinci alaşımda % 2,2 Li, % 1 Cu, % 0,5 Mg ve % 0,6 Zr, ikinci alaşımda % 2,4 Li, % 1 Cu, % 0,5 Mg ve % 0,45 Zr ve üçüncü alaşımda % 2,6 Li, % 0,8 Cu, % 0,4 Mg ve % 0,6 Zr kullanılmıştır. Her üç alaşım içinde sırasıyla çözeltiyeye alma, su verme ve yaşlandırma ısıl işlem prosesleri uygulanmış ve birinci alaşım için 390 MPa akma dayanımı, 465 MPa çekme dayanımı ve % 7 uzama, ikinci alaşım için 410 MPa akma dayanımı, 490 MPa çekme dayanımı ve % 8,4 uzama, üçüncü alaşım için ise 400 MPa akma dayanımı, 495 MPa çekme dayanımı ve % 7 uzama elde edilmiştir [33].

### **2.15.15 Philip R. Sperry çalışması**

Motor pistonu ve benzer şekilde gerilime maruz kalan diğer otomotiv parçalarında kullanılmak üzere yapılan çalışmada % 7-12 Si, % 3,5-6 Cu, maksimum % 0,5 Mn, % 0,1-0,6 Mg, % 0,1-1 Ag, % 0,08-0,14 Fe ve % 0,09-0,1 Ti kullanılmıştır [34].

### **2.15.16 Richard S. Lindberg çalışması**

Otomobil jant üretiminde kullanılan Al-Si alaşımlarında yapılan çalışma sonucunda % 11-13,5 Si, % 0,25-0,6 Mg, % 0,25-0,6 Cu, % 0,5-1,5 Fe ve maksimum % 0,5 Mn kullanılmıştır [35].

### **2.15.17 Myron G. Urdea çalışması**

Myron G. Urdea çalışmasında % 3-10 Si, % 0,7-1,5 Mg, % 0,03-1 Be, % 0,05-1 Ti, % 0,2'den az miktarda Fe, % 0,1'den az miktarda Mn, Cu, Zn ve % 0,01'den az miktarda B, % 0,002'den az miktarda Li, Na ve Ca kullanılmıştır [36].

### **2.15.18 Tadao Ito ve Nippon firması çalışması**

Tadao Ito ve arkadaşlarının otomotiv sektöründe kullanılmak üzere yapılan çalışmasında % 6-13 Si, % 1-5 Cu, % 0,7-0,8 Mn, % 0,4-1,1 Mg, % 0,15 Sb, % 0,1 Ti, % 0,4-1,8 Ni ve % 0,3 Zr kullanılmıştır. Ayrıca bu alaşımlara 500°C'de 6 saat süreyle çözeltiye alma, ardından su verme ve 200°C'de 8 saat süreyle yaşlandırma ısıl işlem adımları uygulanmıştır. Sonuç olarak 284-333 MPa çekme dayanımı, 255-304 MPa akma dayanımı, % 0,7-5 uzama ve 98-119 HB sertlik değerleri elde edilmiştir [37].

### **2.15.19 Roger Huet çalışması**

Roger Huet çalışmasında % 0-0,1 Fe, % 6,5-7,5 Si, % 1-1,6 Cu, % 0-0,1 Zn, % 0,2-0,8 Mg, % 0-0,1 Mn, % 0,1-0,3 Ti ve % 0-0,3 Sb kullanılmıştır [38].

### **2.15.20 Masahiro Ogawa çalışması**

Ube şirketinin desteklediği Masahiro Ogawa ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada % 5-13 Si, % 1-5 Cu, % 0,1-0,5 Mg, % 0,005-0,3 Sr, % 0,05-0,5 Ti, % 0,05-0,3 B ve % 0-0,05 Be kullanılmıştır. Alaşımlara 500°C'de 2-4 saat süreyle çözeltiye alma, ardından su verme ve 180°C'de 2 saat süreyle suni yaşlandırma ısıl işlem adımları uygulanmıştır [39].

### **2.15.21 Leggett ve Platt Şirketi çalışması**

Leggett ve Platt şirketinin desteklediği ve Richard S. Lindberg'in yürüttüğü çalışmada % 4-5,5 Si, maksimum % 0,5 Fe, % 0,15-3,5 Mg, maksimum % 0,25 Mn, maksimum % 0,6 Cu, maksimum % 0,3 Zn, % 0,3-0,5 Ni, maksimum % 0,1 Pb, maksimum % 0,1 Sn, maksimum % 0,15 Ti, maksimum % 0,05 Cr ve % 0,005-0,08 P kullanılmıştır. Çalışmalar sonunda 230 MPa çekme dayanımı, 140 MPa akma dayanımı ve % 6 uzama elde edilmiştir [40].

### **2.15.22 Atashi Ota çalışması**

Atashi Ota ve arkadaşlarının çalışmasında % 2,5-4,4 Si, % 1,5-2,5 Cu, % 0,2-0,5 Mg ve % 0,005-0,2 Sr kullanılmıştır. Alaşımlara 520-550°C'de 3-10 saat süreyle çözeltiye alma, ardından 80°C'de su verme ve 150-190°C'de 2-10 saat süreyle yaşlandırma ısıl işlem adımları uygulanmıştır. Çalışmalar sonunda 402 MPa çekme dayanımı ve % 6 uzama elde edilmiştir [41].

### **2.15.23 Philippe Meyer çalışması**

Philippe Meyer'in yaptığı çalışmada % 7 Si ve % 0,3 Mg içeren alaşıma 535°C'de 5 saat süreyle çözeltiye alma, ardından 50°C'de su verme ve 160°C'de 3,5 saat süreyle yaşlandırma ısı işlem adımları uygulanmıştır. Çalışmalar sonunda 278 MPa çekme dayanımı, 220 MPa akma dayanımı ve % 5,5 uzama elde edilmiştir [42].

### **2.15.24 Hubert Koch çalışması**

Hubert Koch çalışmasında % 8-11,5 Si, % 0,3-0,8 Mn, % 0,08-0,4 Mg, maksimum % 0,4 Fe, maksimum % 0,1 Cu, maksimum % 0,1 Zn, maksimum % 0,15 Ti, % 0,05-0,5 Mo, % 0,05-0,3 Zr, 30-300 ppm Sr veya 5-30 ppm Na ve / veya 1-30 ppm Ca kullanılmıştır [43].



### **3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR**

Otomotiv sektöründe halen kullanılmakta olan ötektik altı Al-Si alaşımlarının farklı elementlerin ilavesi ile birlikte % uzama, çekme dayanımı, akma dayanımı, sertlik ve akışkanlık özelliklerini geliştirmek amacıyla ergitme deneyleri yapılmış, bu ergitme deneyleri sonucunda elde edilen farklı alaşımlardaki numunelerin kalıplara dökülerek döküm hali (ısıl işlemsiz) ve ısıl işlemlilerle mekanik ve metalografik özellikleri incelenmiştir. Bu bölümde ötektik altı Al-Si alaşımlarının deney tasarımı ile hazırlanması ve tasarlanan deneylerin karakterizasyonu için deneysel çalışmalarda kullanılan malzemeler ve cihazlar tanıtılmıştır. Bunun yanı sıra deney sistemi, deneylerin yapılışı hakkında bilgi verilmiştir.

#### **3.1 Deney Tasarımı ve Minitab Programı**

Literatürden belirlenen alaşım elementlerinin ilave miktarı minitab istatistiksel analiz yazılım programı kullanılarak belirlenmiş, böylece en az deney sayısı ile çalışma yapılması sağlanmıştır.

Günümüzde karşımıza çıkan problemi veya çalışılacak konuyu anlayabilmek, probleme etki eden faktörleri doğru seçmek, doğru deney tasarımı tekniğini saptamak, sonuçları doğru analiz etmek ve doğrulayıcı deneyleri yapmak için deney tasarımına başvurulur. İstatistiksel deney planlamasının amacı, deney sayısının azaltılması, istatistik tahminlerde az hata elde edilmesi, analiz sonuçlarının değerlendirilmesinde basitlik ve gerçekten ulaşılabilirliğinin güvence altına alınmasıdır [44]. Tasarım ve üretim proseslerinde var olan hataların ve verimsizliklerin genel nedeni, üretim girdi parametrelerindeki değişkenliklerdir. Bu değişkenliklerin proses çıktısına ve ürünlere olan etkisinin ortaya konulabilmesi için, bilimsel tekniklerin kullanılması gereklidir. Geleneksel yöntemlerden çok farklı deney tasarımı uygulamaları ile üretim çıktıları ve üretim girdileri arasında matematiksel modeller oluşturarak, ürünleri ve süreçleri en iyi duruma getirecek olan girdi seviyeleri belirlenebilir [45]. 1972 yılında istatistik eğitimi veren profesörlerin

işini kolaylaştırmak amacıyla ortaya çıkarılan Minitab, zaman içerisinde işletme ve verilerinin analizinde, ürün ve hizmetlerin kalitesinin iyileştirilmesinde kullanılan en önemli yazılım haline gelmiştir. Tüm dünyada 6 sigma (her bir milyon üründe 3 veya 4 hata yapma olasılığı) uygulamalarında kullanılan en önemli program olmasının yanı sıra istatistik eğitimi veren 4000'den fazla kolej ve üniversitede de kullanılmaktadır. Minitab; kalite, iyileştirme, kök sebep analizi ve birçok basit ve orta düzey istatistiksel analiz için sürekli geliştirilen bir yazılımdır, ilk bakışta karmaşık görünen istatistiksel analizleri, aslında grafiksel ve tablo yaklaşımı ile oldukça etkili bir görselliğe sahiptir [46].

İnsanların nasıl öğrendiklerini ve çalıştıklarını tamamlayan mantıksal arabirime sahiptir, dosya alma, verme, veri işleme, hesap tablosu, biçimli veri pencereleri gibi eksiksiz veri yönetim özellikleri içerir ve çıktıların yorumlanmasına yardımcı olmak amacıyla kapsamlı dokümantasyon içerir [47]. Bu çalışmada minitab programı ile hangi alaşım ve elementlerinin kullanılacağı öngörülmüştür. Yapılan deneyler sonucunda ise elde edilen tüm veriler minitab programı vasıtasıyla yorumlanmıştır.

### 3.2 Deneyde Kullanılan Malzemeler

Deney tasarımı sonucunda elde edilen 32 adet deneyin hazırlanmasında kullanılan malzemeler sırasıyla şöyledir; AlSi7Mg külçe, saf Al külçe, metalik silisyum, Al-Co master alaşım külçe, Al-Bi master alaşım külçe, Al-Zn master alaşım külçe, Al-Ce master alaşım külçe, Al-Mn master alaşım külçe, Al-Cu master alaşım külçe, Al-Ti master alaşım külçe, Na tablet, Mg külçe, Sr çubuk ve AlTi<sub>5</sub>B çubuktur.

**Çizelge 3.1 : AlSi7Mg külçe kimyasal bileşimi.**

Alaşım	Bileşimler (Ağırlıkça %)							
	Si	Fe	Mg	Ti	Sr	Sb	P	B
AlSi7Mg	7,08440	0,06510	0,28070	0,09440	0,03320	0,00030	0,00060	0,00030
Alaşım	Bileşimler (Ağırlıkça %)							
	Cu	Mn	Zn	Cr	Zr	V	Ca	Be
AlSi7Mg	0,0014	0,0021	0,0026	0,0014	0,0011	0,0095	0,0002	0,0000
Alaşım	Bileşimler (Ağırlıkça %)							
	Bi	Cd	Co	Ga	Li	Na	Ni	Pb
AlSi7Mg	0,0000	0,0000	0,0005	0,0107	0,0000	0,0003	0,0055	0,0016
Alaşım	Bileşimler (Ağırlıkça %)							
	Sn	Al						
AlSi7Mg	0,0005	92,4036						

**Çizelge 3.2 : Master alaşım külçelerin kimyasal bileşimi.**

Element	(%)							
	Al-Co	Al-Bi	Al-Mn	Al-Cu	Al-Zn	Al-Ce	Al-Ti	Na
	Co: 9-11	Bi: 8,5-9,5	Mn: 9-11	Cu: 80	Zn:9-11	Ce:9-11	Ti: 9-11	Na: 99,8
Si	0,2	0,2	0,3	0,3	0,2	0,2	0,3	-
Fe	0,3	0,3	0,4	-	0,3	0,3	0,35	-
Zn	-	0,1	-	-	-	-	-	-
Mn	-	-	-	-	0,2	0,2	-	-
V	-	-	-	-	-	-	0,05	-
B	-	-	-	-	-	-	0,04	-
K ppm	-	-	-	-	-	-	-	300
Ca ppm	-	-	-	-	-	-	-	20
Cl + Br ppm	-	-	-	-	-	-	-	550
Diğerleri	0,05	0,05	0,05	0,15	0,05	0,05	0,03	-
-:eser miktar								

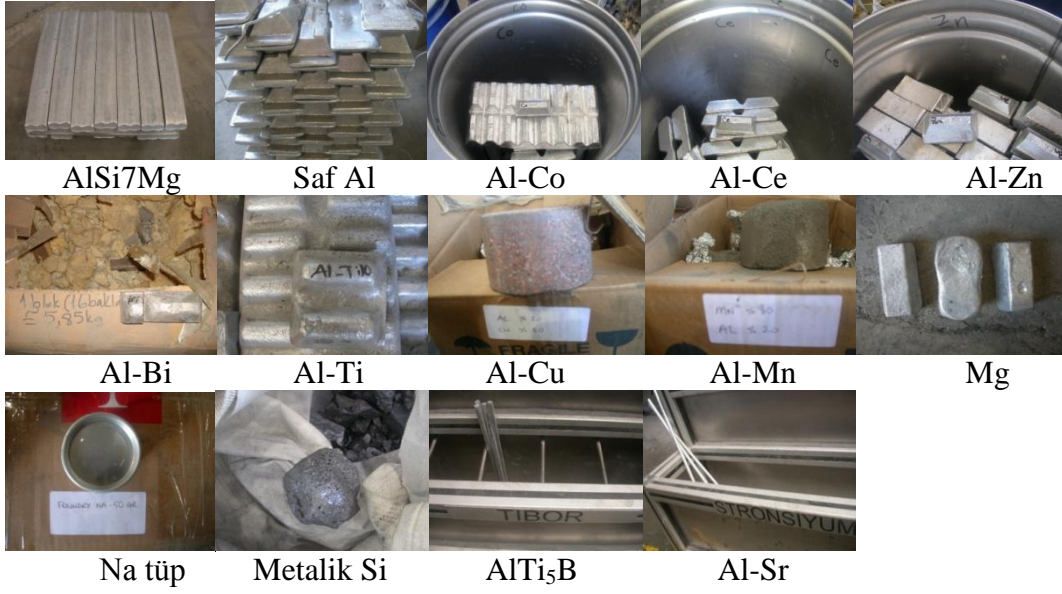
Master alaşımların her birinin deney tasarımında belirtilen aralıklarda kullanılması amacıyla ağırlıkları tek tek hesaplanmıştır. Bu alaşımların ortalama ağırlıkları şöyledir:

a) 1 adet AlSi7Mg külçe 9,7 kg., b) 1 adet Saf Al külçe 16 kg., c) 1 adet Al-Co master alaşım külçe 0,37 kg., d) 1 adet Al-Bi master alaşım külçe 0,36 kg., e) 1 adet Al-Zn master alaşım külçe 0,44 kg., f) 1 adet Al-Ce master alaşım külçe 0,32 kg., g) 1 adet Al-Mn master alaşım külçe 1 kg., h) 1 adet Al-Cu master alaşım külçe 1,25 kg., i) 1 adet Al-Ti master alaşım külçe 0,34 kg., j) 1 adet Na tablet 50 gr., k) 1 adet Mg külçe 50 gr., l) 1 adet Sr çubuk 50 gr., m) 1 adet TiB çubuk 50 gr.

Tüm master alaşımlar yaklaşık olarak 100 kg. ergitme kapasiteli indüksiyon ocağının verimli olduğu yaklaşık olarak 70-80 kg aralığında girdi oluşturacak şekilde şu şekilde hesaplanmıştır. % 4 Si iğereren deney grupları için 4 adet AlSi7Mg külçe ve 2 adet Saf Al külçe 70,8 kg toplam alaşım ağırlığını oluşturmuştur. % 7 Si iğereren deney grupları için ise 6 adet AlSi7Mg külçe kullanılmıştır.

Öncelikli olarak yapılan bu işlemlerde ana alaşım elementi olan % Si oranlarına ulaşılması hedeflenmiştir.

Ardından her bir 32 adet deney grubu için sırasıyla içerdikleri % Cu, Zn, Mg, B, Mn, Ce, Sr, Na, Bi, Co ve Ti elementleri için gerekli % ağırlıkça element ilaveleri hesaplanarak ilave edilmiştir.



Şekil 3.1 : Master alaşımlar.

### 3.3 İndüksiyon Ocağı

5M firmasının 100 kW, 1000 hz'de çalışan 100 kg kapasiteli Alüminyum indüksiyon ergitme ocağı kullanılmıştır. 750 °C sıcaklıkta saatte ergitme kapasitesi 134 kg'dır. Ergitme zamanı 45 dk/100 kg'dır.



Şekil 3.2 : 5M alüminyum indüksiyon ocağı.

### 3.4 Ergitme İşleminde Kullanılan Yardımcı Ekipmanlar

Master alaşım ve ilave elementlerin ocağa yüklenmesi için 1 adet külçe tutacağı, alüminyum ergitme işleminde oluşan gazlılığı gidermek amacıyla 1 adet Azot tüpü, ergimiş metal alaşımı indüksiyon ocağından alıp Metal Health Kalıp Sistemine aktarmak için 1 adet küçük, 1 adet büyük kepçe, cüruf temizlemek için 1 adet cüruf kepçesi, döküm işlemi tamamlandıktan sonra ocağın içini temizlemek için 1 adet temizleme kepçesi kullanılmıştır. Ayrıca yapılan döküm işlemlerinde kimyasal analiz ve metalografik analiz için 1'er adet mikro ve makro numune kalıbı, bu numuneleri tutmak için 1 adet numune tutacağı kullanılmıştır. Döküm esnasında ocağın sıcaklığını kontrol etmek için 1 adet pirometre kullanılmıştır.



Şekil 3.3 : 5M İndüksiyon ocağı yardımcı ekipmanlar.

### 3.5 Metal Health Döküm Sistemi

Metal Health Sistemi N-Tec Ltd firmasının bir ürünüdür, 50 Hz frekansta 32 amper girişli min akımda çalışır, sistemin ölçüm yapabilmesi için akışkanlık kalıbı için maksimum 1700 gr, sıcak yırtılma kalıbı için 1500 gr, çekme kalıbı için 3000 gr ve K-Testi için 300 gr ergimiş metal gereklidir. Sistemin çalışabilmesi için ortam sıcaklığı 0-50°C olması gereklidir.



**Şekil 3.4 :** Akışkanlık kalıbı.

Akışkanlık kalıbında kalınlıkları farklı 5 adet kol bulunmaktadır ve her bir kol kalıptaki farklı kesitleri simgeler.



**Şekil 3.5 :** K-testi kalıbı.

K Test kalıbında kalıp üzerinde çentikler bulunmaktadır ve bu çentikler numuneyi önceden belirlenmiş pozisyonda kırılmaya zorlayarak istatistiksel olarak dökümde meydana gelen inklüzyonların ölçülmesini sağlar.



**Şekil 3.6 :** Sıcak yırtılma kalıbı.

Sıcak yırtılma kalıbında farklı uzunlukta 5 farklı köpek kemiği şeklinde kesit bulunmaktadır ve her bir kalıbın sonunda konik bir bölüm bulunur. Beslemenin eksik olduğu durumlarda bu kollar çatlar, uzun kısımlar çatlamaya karşı daha hassastır.



**Şekil 3.7 :** Çekme testi kalıbı.

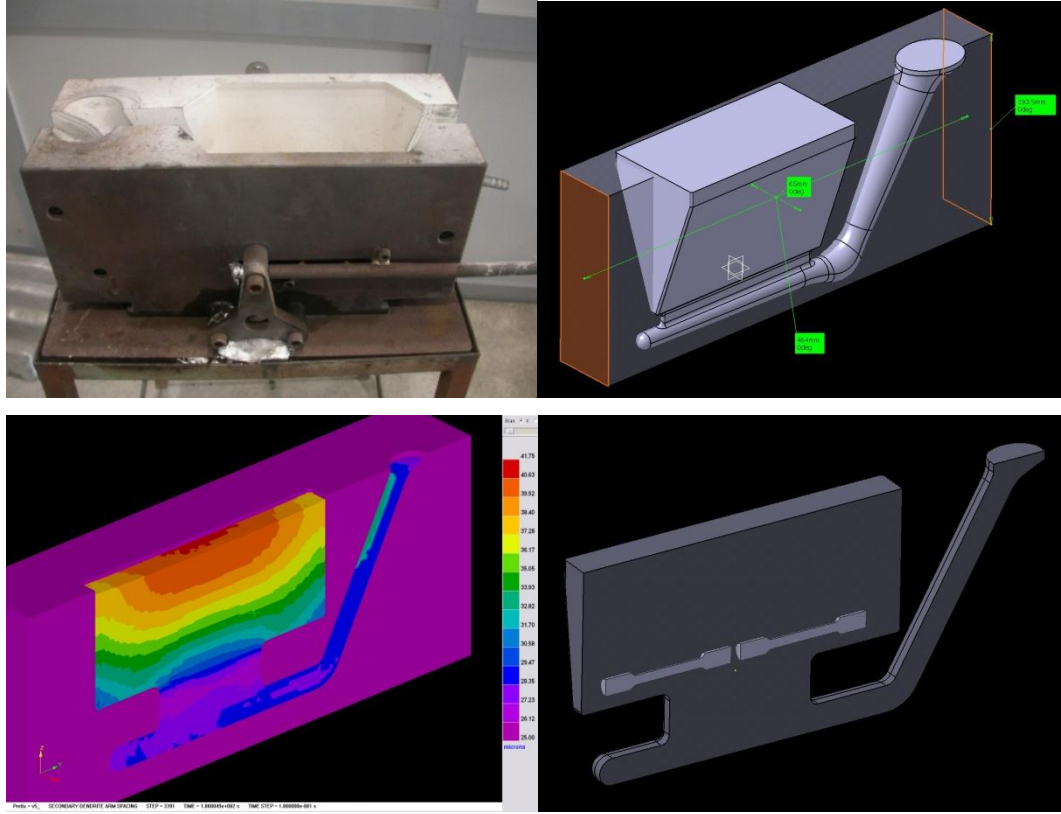
Çekme testi kalıbında 5 adet çekme çubuğu bulunmaktadır, bu test çubuklarındaki soğuma hızı sürekli dökümdeki soğuma hızına benzer bir şekildedir.

### **3.6 DAS Kalıbı**

DAS kalıbı jant üzerinde temel olarak 4 farklı kesidi temsil etmektedir. Bu kesitler göbek bölgesi, kol bölgesi, iç ve dış lastik yüzeyleridir. Her alaşım denemesinde jant dökmek yerine jantı temsil eden bir test parçasının tasarımı ihtiyacı doğmuştur. Bunun için gerekli katılma ve döküm simülasyonları ile bu 4 farklı bölgeyi temsil edecek üçgen prizma şeklinde bir test parçası tasarlanmıştır. Bu test parçasının tasarımında şirket içinde üretilen farklı modellerden 5 adet değişik geometriye sahip jant numunelerinden 1080 adet DAS ölçümü yapılarak istatistiksel veri havuzu oluşturulmuştur. Elde edilen bu veriler DAS tasarımında bahsi geçen 4 bölgeye uygun olarak simülasyon girdisi olacak şekilde kullanılmıştır. Katılma

simülasyonu üzerinden parça geometrisinin 7Si'li referans alaşıma göre soğuma hızı dağılımı incelenerek tasarım doğrulanmış ve dondurulmuştur.

DAS kalıbı ile dökümü yapılacak farklı alaşım grupları için kesit boyunca farklı soğuma hızlarında katılarak elde edilecek DAS kalıbı çıktılarında mikro yapı ve çekme testlerinde kesit boyunca farklı davranışların izlenmesine olanak tanır.



Şekil 3.8 : DAS kalıbı.

### 3.7 Spektrometre

Spektromax firmasının Spektromax-M CCD spektrometresi gerekli dalga boylarını tam ve sürekli olarak kapsayarak bütün elementlerin kimyasal analizine olanak tanır. CCD spektrometrelerde ise tüm elementler veri bankasında bulunmaktadır, analzi yapılacak elementlerin kullanılacağı zaman kalibrasyonunun yapılması yeterli olmaktadır. Spektromax M'de 30 elementin kimyasal analizi yapılabilmektedir, bu elementler sırasıyla; Ag, B, Ba, Be, Bi, Ca, Cd, Co, Ce, Cr, Cu, Fe, Ga, In, Hg, Li, Mg, Mn, Na, Ni, P, Pb, Sb, Si, Sn, Sr, Ti V, Zn ve Zr'dir. Cihazın çalışma dalga boyu 140-670 nm'dir.

### **3.8 Torna**

Tezsan firmasının üretimi olan torna tek aynalı ve parçaların bağlanabildiği x-y eksenlerinde hareket eden bir tezgahdır. Tezsan torna tezgahında çekme numune parçalarının işlenmesi ve kimyasal numunelerin yüzeylerinin tornalanma işlemleri gerçekleştirilmiştir.

### **3.9 Elektrikli Testere**

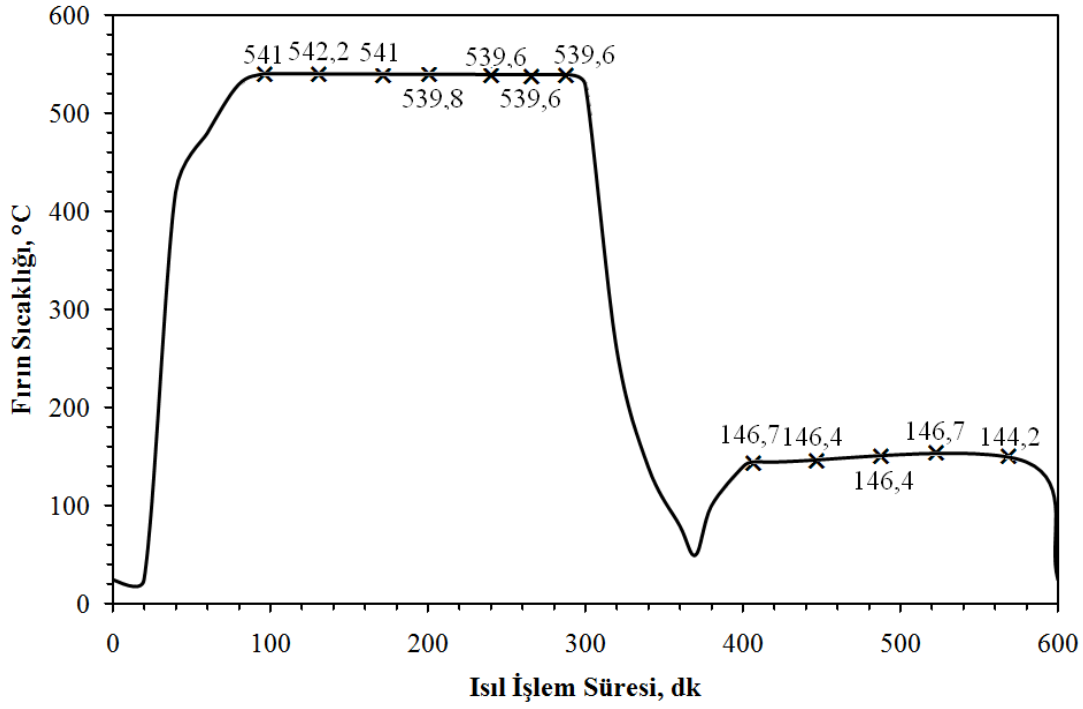
Elektrikli testere döküm işlemi sonucu Metal Health Sistemi kalıplarından elde edilen çekme test parçalarının ve DAS kalıbı çıktılarında elde edilen DAS yapı analizi parçaları ve DAS çekme numunelerinin kaba kesme işlemlerini gerçekleştirmek için kullanılmıştır.

### **3.10 Endüstriyel Isıl İşlem Fırını**

Sistem teknik firmasının endüstriyel tip bant tipi ısıl işlem fırını 2 katlı, asansörlü ve 3 ana bölümden oluşmaktadır. Birinci bölüm çözeltiye alma fırınıdır ve 7 ana ısıtma bölgesinden oluşmaktadır. İkinci bölüm su verme tankı bölümüdür ve 4 ana ısıtıcıdan oluşmaktadır. Son bölüm ise yaşlandırma fırınıdır ve 5 ana ısıtma bölgesinden oluşmaktadır.

Metal health döküm sisteminden elde edilen çekme numuneleri, DAS kalıbı çekme numuneleri ve sertlik numunelerinden 32 deney için ayrılan her set numuneler için referans ticari ürünün üretildiği jant sektörünün kullanmış olduğu T6 ısıl işlem şartlarında ısıl işlem prosesi gerçekleştirilmiştir. T6 ısıl işlem şartı jant üretim sektöründe müşteri özel şartname gerekliliği olarak kullanılmaktadır.

İlk olarak çözelti fırınında çözeltiye alma işlemi 540 °C sıcaklıkta 270 dk süreyle uygulanmıştır. Çözeltiye alma işleminden sonra su verme tankında su verme işlemi 87 °C sıcaklıkta 110 sn süreyle uygulanmıştır. En son olarak yaşlandırma işlemi yaşlandırma fırınında 145 °C sıcaklıkta 207 dk. süreyle uygulanmıştır. Şekil 3.9'da numunelere uygulanan ısıl işlem koşullarının sıcaklık zaman eğrileri gösterilmiştir.



**Şekil 3.9 :** Isıl işlem sıcaklık zaman eğrisi.

### 3.11 Isıl İşlem Numune Kafesi

Metal health çekme çubuğu kalıbına ve DAS kalıbına döküm yoluyla elde edilen çekme çubukları ayrıca ısıl işlem prosesine özel olarak tasarlanan ısıl işlem kafesi ile gerçekleştirilmiştir, kafes olarak çekme çubuklarının ve ısıl işleme girecek sertlik numunelerinin kafes içinde sabit durabilmesi amacıyla hazneleri delikli ve 3 katlı olarak aynı anda 600 adet numuneyi alacak şekilde imal edilmiştir.



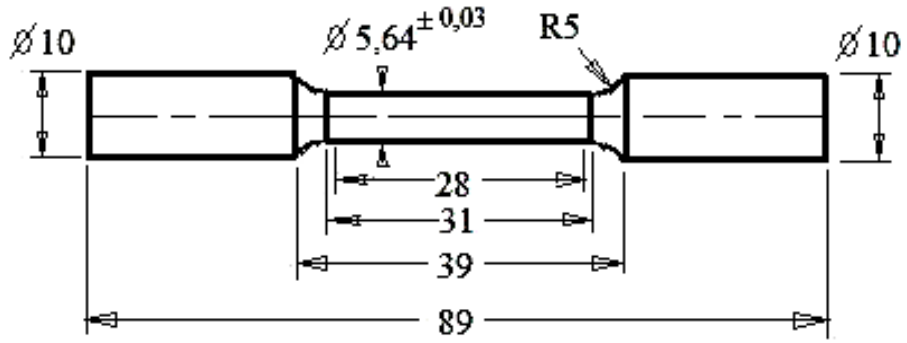
**Şekil 3.10 :** Isıl işlem numune kafesi.

### 3.12 Çekme Cihazı

Zwick firmasının Zwick/Roell Z100 marka çekme cihazı 100 kN test yüküyle 5 mm/dk test hızına sahiptir. Testler EN 10002-2 standardına göre yapılmıştır.

Çekme numuneleri metal health çekme kalıbı çıktılarından ve DAS kalıbından elde edilen numunelerin döküm hali (ısıl işlemsiz) ve ısıl işlemlili hali olmak üzere 2 farklı koşulda hazırlanmıştır.

Çekme çubukları yuvarlak çekme çubukları olup hazırlanan çubuk çapları 10 mm, boyları 89 mm'dir.



Şekil 3.11 : Çekme çubuğu ölçüleri.

### 3.13 Sertlik Cihazı

Wolpert firmasının sertlik ölçüm cihazında Brinell ve Rockwell cinsinden sertlik ölçümleri yapılabilmektedir.

Bu çalışmada Brinell sertlik ölçümleri yapılmıştır. Döküm hali ve ısıl işlemlili olarak iki farklı numune tipi için yapılan ölçümler 5 mm'lik bilya ile 250 kg yük ile gerçekleştirilmiştir.

Testler ISO 6506-2 standardına göre yapılmıştır. Cihazda kullanılan yazılım Testor Panel Assistent yazılımıdır.

### 3.14 Aydınlatma Cihazı

Gretag Macbeth aydınlatma cihazı beyaz ışık, sarı ışık, gün ışığı ve ultraviyole ışığı veren bir aydınlatma cihazıdır. Metalografik incelemede makro numunelerin incelenmesinde kullanılmıştır.



**Şekil 3.12 :** Gretag Macbeth aydınlatma cihazı.

### **3.15 Yüzey Hazırlama ve Parlatma Cihazı**

Gripo marka yüzey hazırlama ve parlatma cihazı, metalografik numunelerin ve sertlik numunelerinin yüzeylerinin hazırlanmasında kullanılmıştır. Cihazda farklı devir hızlarında ve yönde ayarlama yapılabilmektedir. Numunelerin yerleştirildiği tablaya cihazın üst kısmında bulunan yönlenebilir bir boru vasıtasıyla su verilmektedir. Zımpara ve keçeler yüzeyi hazırlanacak numunenin durumuna göre kullanılmaktadır.

### **3.16 Mikroskop, DAS ve Porozite Yazılımları**

Nikon Epiphot 200 mikroskop ile mikroyapı incelemeleri için 6 farklı lens ile büyütme yapabilmektedir. Bu lenslerin büyütmeleri sırasıyla 1,25 x 0,04; 2,5 x 0,075; 5 x 0,1; 10 x 0,25; 20 x 0,40 ve 50 x 0,75'dir. DAS Analizi ve Porozite analizi için Buehler firmasının OMNIMET rapor yazılımı kullanılmaktadır.

### **3.17 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)**

Jeol JSM-7000 F SEM cihazı ve entegre Oxford-Inca cihazı ile numunelerin yüzey ve kesitlerinin, yüksek büyütmelerde morfolojik ve kimyasal analizi yapılmıştır. Nokta analizi, çizgi analizi ve X-ışını haritalaması ile elementler analiz edilmiştir. Cihaza entegre Oxford Instruments INCAx-sight ile geri saçılan elektronların difraksiyonu ile faz analizleri gerçekleştirilmiştir.

### **3.18 X-Işını Difraktometre Cihazı (XRD)**

Philips X'Pert Pro Panalytical XRD cihazı Cu-K $\alpha$  X-ışını tüpü ile maksimum 60 kV gerilimle ve 55 mA akımda çalışır. X'Pert High Score Plus yazılımı ile numunelerin x-ışını difraksiyonu, malzemelerin kristallografik özellikleri ve içerdikleri fazlar belirlenmiştir. Ayrıca Rietveld analizi yönteminin kullanılmasıyla numunenin içerdiği bileşiklerin göreceli olarak miktarsal oranları belirlenmiştir.



#### 4. DENEYSEL SONUÇLAR

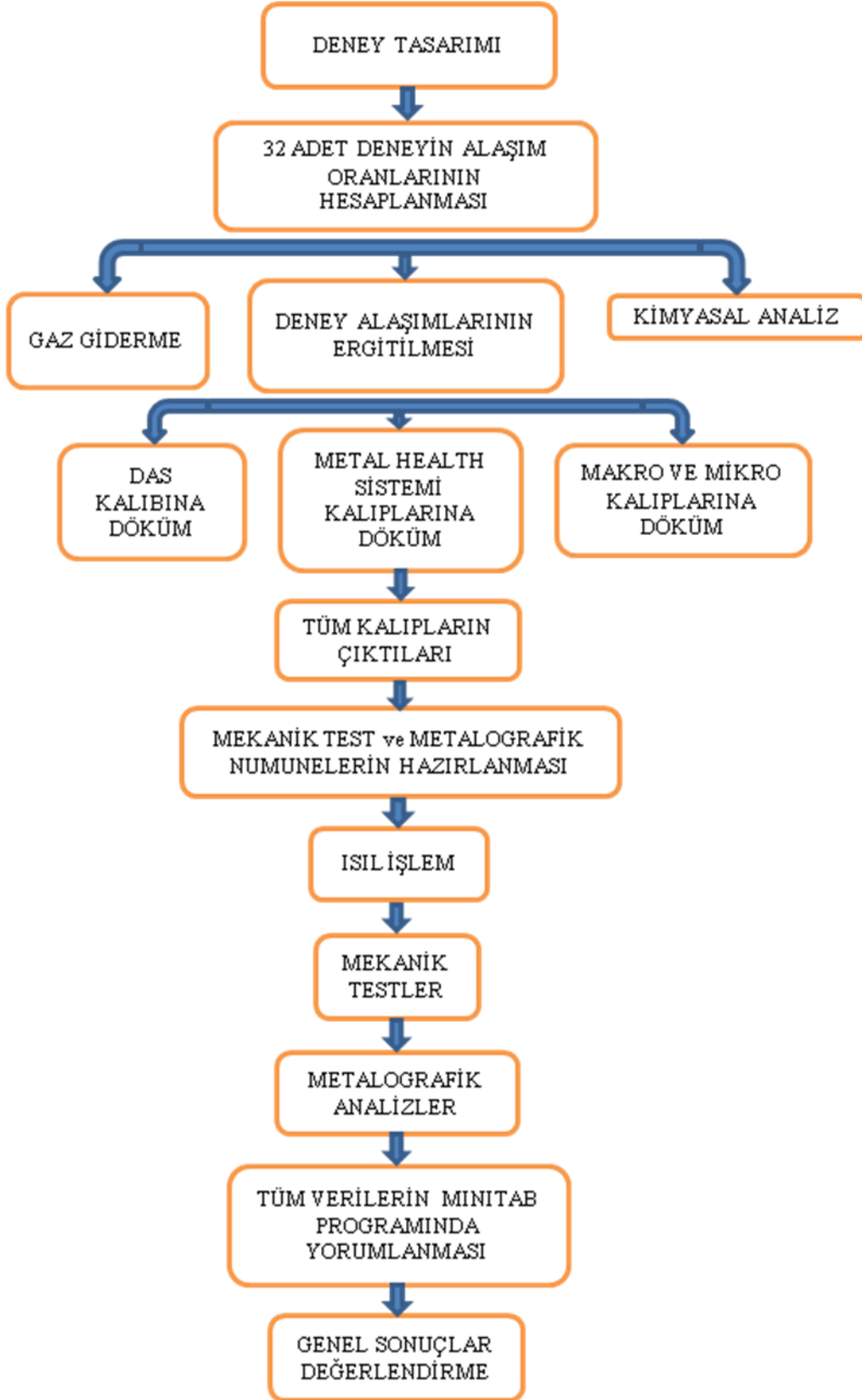
Bu bölümde deney tasarımının analiz edilmesiyle deneysel tasarım metodu kullanılarak minitab programından elde edilen 32 adet deneyin detayları verilmiştir, daha sonra elde edilen 32 adet deneyin alaşım miktarlarının hesaplanmasının ardından alaşımların ergitilmesi ve bu esnada yapılan gaz giderme ve kimyasal analiz çalışmalarına değinilmiştir.

Ergitilen alaşımlar DAS kalıbı ve Metal health sistemi kalıplarına dökülerek çekme numuneleri, akışkanlık numuneleri, k-testi numuneleri, sıcak yırtılma numuneleri, sertlik numuneleri, mikro ve makro numuneleri elde edilmiştir.

Daha sonra DAS çekme, metal health çekme ve sertlik çekme numuneleri 32 adet deneyin her biri için döküm hali (ısıl işlemsiz) durumlarını incelemek için numune hazırlama işlemlerine tabi tutulmuştur, ardından aynı numunelerin içinden ayrılan diğer parti numuneler ise T6 ısıl işlem koşullarında ısıl işlem prosesine girdikten sonra DAS çekme, metal health çekme ve sertlik numuneleri hazırlanmıştır.

Döküm sonrası alınan makro ve mikro numuneler yüzey hazırlama, zımparalama, dağlama ve parlatma işlemlerinden sonra mikro ve makro analize hazır hale getirilmiştir. Bu numunelerin mikroskopta mikro analiz, makro analiz, DAS analizi, % porozite analizleri yapılmış ardından mekanik ve dökülebilirlik özellikleri en iyi çıkan 10 adet deney numunelerinin (döküm sonrası) XRD ve SEM analizleri işlemleri gerçekleştirilmiştir.

Son olarak elde edilen tüm veriler Minitab programında verilerinin girişi yapılarak tüm çıktılarının ve elementlerin birbiriyle olan ilişkileri değerlendirilmiştir ve yorumlanmıştır.



Şekil 4.1 : Proje iş akış şeması.

#### 4.1 Deney Tasarımı ve Minitab Programı Çıktıları

Literatür araştırması sonucunda, alüminyum alaşımlarının mekanik özelliklerini iyileştirici olarak etki eden elementler belirlenmiş ancak ilave miktarları konusunda yeterli bilgiye ulaşılamaması nedeniyle minitab programı kullanılarak sayısal değerlere ulaşılmaya çalışılmıştır.

Deney tasarımı girdilerin ve çıktılarının analizi ile gerçekleştirilmiştir. Girdileri elementler oluşturmuştur. Çıktılar ise final ürüne etkisi olan çekme dayanımı, akma dayanımı, % uzama, sertlik ve akışkanlık değerleridir.

Yapılan analize ne kadar çok girdi girişi olursa deney sayısı da artmaktadır. N adet element için x adet seviye bulunmaktadır.

Teorik olarak hesaplandığı zaman yapılan çalışmada 12 adet element ve 2 adet seviye seçildiğinden 144 adet deney yapılma gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Ancak 144 adet deneyi yapmak çok uzun süreceğinden minitab programının faktöriyel analizi sonucunda 144 adet deneyde elde edilebilecek tüm verilerin optimum koşullar sağlanarak 32 adet deney sonucunda sağlanabileceği görülmüştür.

Diğer bir taraftan seviye seçimi ise en geniş aralığı temsil edebilecek düşük ve yüksek seviye olarak adlandırılan 2 farklı oran seçilerek analiz edilmiştir.

Element adedinin aynı kalması koşuluyla seçilen seviyenin 2 yerine 3 olması durumunda deney sayısı 1728 olacaktır. Bu kadar çok sayıda deneyin yapılması mümkün olamayacağından dolayı minitab programının faktöriyel hesaplamaları sonucunda değişken seviyeler ilave edilecek alaşım elementleri için en düşük ve en yüksek değerler hesaplanmaya çalışılmıştır.

Deney tasarımında kullanılacak elementlerin seviyeleri (düşük ve yüksek seviye) belirlenerek 12 adet element için 2 değişkenli deneysel tasarım metodu kullanılarak Minitab programında deney tasarımı oluşturulmuştur ve istatistiksel yazılıma girilmiştir.

Program hesaplamalar sonucunda katılacak alaşım elementi miktarını en düşük ve en yüksek olarak 2 ayrı seviyede kullanıma sunmaktadır.

Programın seviye belirleme şeması Çizelge 4.1'de, hesaplama sonucu elde edilen 32 adet deneye ait bileşimler de Çizelge 4.2'de gösterilmiştir.

**Çizelge 4.1 :** Deney tasarımı çıktıları (d:düşük, y:yüksek).

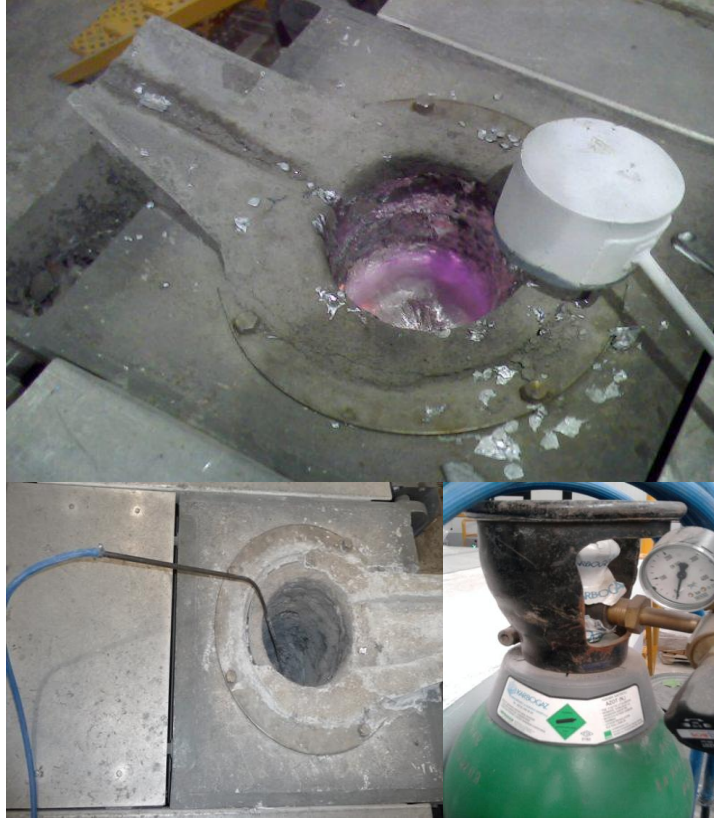
Deney Sıra No	Si	Cu	Zn	Mg	B	Mn	Ce	Sr	Na	Bi	Co	Ti
1	y	y	y	d	d	d	d	d	d	y	y	y
2	d	d	d	d	d	d	d	d	d	d	d	d
3	y	d	d	d	y	d	y	y	d	y	d	d
4	d	d	y	d	y	d	y	d	y	d	d	y
5	y	d	y	y	y	y	y	d	d	y	d	y
6	d	d	d	y	d	d	y	y	d	y	y	y
7	d	d	y	d	d	y	y	d	d	y	y	d
8	d	d	y	y	y	d	d	y	y	y	y	d
9	y	y	y	y	d	d	y	y	d	d	d	d
10	d	y	y	y	d	y	d	d	y	d	y	y
11	y	y	d	d	d	y	y	d	d	d	d	y
12	y	d	y	d	d	d	d	y	y	y	d	y
13	y	d	d	y	y	d	d	d	d	d	y	y
14	d	y	y	d	y	d	y	y	d	d	y	y
15	y	y	y	d	y	y	d	d	y	d	d	d
16	d	y	d	y	y	y	y	d	d	d	y	d
17	d	y	d	d	y	y	d	y	d	y	d	y
18	d	d	d	y	y	y	y	y	y	d	d	d
19	d	y	y	d	d	y	y	y	y	y	d	d
20	d	d	y	y	d	y	d	y	d	d	d	y
21	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y
22	y	d	y	y	d	d	y	d	y	d	y	d
23	y	d	d	d	d	y	y	y	y	d	y	y
24	d	y	y	y	y	d	d	d	d	y	d	d
25	d	y	d	d	d	d	d	y	y	d	y	d
26	y	y	d	y	d	y	d	y	d	y	y	d
27	y	d	y	d	y	y	d	y	d	d	y	d
28	d	d	d	d	y	y	d	d	y	y	y	y
29	y	y	d	y	y	d	d	y	y	d	d	y
30	y	d	d	y	d	y	d	d	y	y	d	d
31	y	y	d	d	y	d	y	d	y	y	y	d
32	d	y	d	y	d	d	y	d	y	y	d	y

**Çizelge 4.2 : Deney tasarımı final çıktıları.**

<b>DENEY</b>	<b>Si</b>	<b>Cu</b>	<b>Zn</b>	<b>Mg</b>	<b>B</b>	<b>Mn</b>	<b>Ce</b>	<b>Sr</b>	<b>Na</b>	<b>Bi</b>	<b>Co</b>	<b>Ti</b>
1	7	1,2	0,5	0,3	0,001	0,0	0,0	0,01	0,000	0,5	0,4	0,2
2	4	0,0	0,0	0,3	0,001	0,0	0,0	0,01	0,000	0,0	0,0	0,1
3	7	0,0	0,0	0,3	0,003	0,0	0,3	0,02	0,000	0,5	0,0	0,1
4	4	0,0	0,5	0,3	0,003	0,0	0,3	0,01	0,003	0,0	0,0	0,2
5	7	0,0	0,5	1,5	0,003	0,6	0,3	0,01	0,000	0,5	0,0	0,2
6	4	0,0	0,0	1,5	0,001	0,0	0,3	0,02	0,000	0,5	0,4	0,2
7	4	0,0	0,5	0,3	0,001	0,6	0,3	0,01	0,000	0,5	0,4	0,1
8	4	0,0	0,5	1,5	0,003	0,0	0,0	0,02	0,003	0,5	0,4	0,1
9	7	1,2	0,5	1,5	0,001	0,0	0,3	0,02	0,000	0,0	0,0	0,1
10	4	1,2	0,5	1,5	0,001	0,6	0,0	0,01	0,003	0,0	0,4	0,2
11	7	1,2	0,0	0,3	0,001	0,6	0,3	0,01	0,000	0,0	0,0	0,2
12	7	0,0	0,5	0,3	0,001	0,0	0,0	0,02	0,003	0,5	0,0	0,2
13	7	0,0	0,0	1,5	0,003	0,0	0,0	0,01	0,000	0,0	0,4	0,2
14	4	1,2	0,5	0,3	0,003	0,0	0,3	0,02	0,000	0,0	0,4	0,2
15	7	1,2	0,5	0,3	0,003	0,6	0,0	0,01	0,003	0,0	0,0	0,1
16	4	1,2	0,0	1,5	0,003	0,6	0,3	0,01	0,000	0,0	0,4	0,1
17	4	1,2	0,0	0,3	0,003	0,6	0,0	0,02	0,000	0,5	0,0	0,2
18	4	0,0	0,0	1,5	0,003	0,6	0,3	0,02	0,003	0,0	0,0	0,1
19	4	1,2	0,5	0,3	0,001	0,6	0,3	0,02	0,003	0,5	0,0	0,1
20	4	0,0	0,5	1,5	0,001	0,6	0,0	0,02	0,000	0,0	0,0	0,2
21	7	1,2	0,5	1,5	0,003	0,6	0,3	0,02	0,003	0,5	0,4	0,2
22	7	0,0	0,5	1,5	0,001	0,0	0,3	0,01	0,003	0,0	0,4	0,1
23	7	0,0	0,0	0,3	0,001	0,6	0,3	0,02	0,003	0,0	0,4	0,2
24	4	1,2	0,5	1,5	0,003	0,0	0,0	0,01	0,000	0,5	0,0	0,1
25	4	1,2	0,0	0,3	0,001	0,0	0,0	0,02	0,003	0,0	0,4	0,1
26	7	1,2	0,0	1,5	0,001	0,6	0,0	0,02	0,000	0,5	0,4	0,1
27	7	0,0	0,5	0,3	0,003	0,6	0,0	0,02	0,000	0,0	0,4	0,1
28	4	0,0	0,0	0,3	0,003	0,6	0,0	0,01	0,003	0,5	0,4	0,2
29	7	1,2	0,0	1,5	0,003	0,0	0,0	0,02	0,003	0,0	0,0	0,2
30	7	0,0	0,0	1,5	0,001	0,6	0,0	0,01	0,003	0,5	0,0	0,1
31	7	1,2	0,0	0,3	0,003	0,0	0,3	0,01	0,003	0,5	0,4	0,1
32	4	1,2	0,0	1,5	0,001	0,0	0,3	0,01	0,003	0,5	0,0	0,2

## 4.2 Ergitme ve Döküm Numunelerinin Kimyasal Analiz Sonuçları

Deneyel tasarım çıktısı olan 32 adet deneyde belirtilen alaşım miktarları ve ilave edilecek elementler % ağırlıkça miktarları hesaplanarak belirlenmiştir, her bir master alaşım elementi ve katkı malzemelerinin ağırlıkları ilave edilecek birim miktarları hesaplanarak alüminyum indüksiyon ocağında ergitilmiştir.



**Şekil 4.2 :** a) Deneylerde kullanılan fırının ergitme esnasında üstten görünüşü b) Gaz giderme c) Azot tüpü.

% 7 Si içeren deneyler için %7 Si içeren Al külçeler, % 4 Si içeren deneyler için ise % 7 Si içeren Al külçe ile birlikte ve saf alüminyum külçeler de kullanılmış olup ergitme işlemleri indüksiyon ocağı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ocak ilk 5 dakika süresince maksimum 40 hz ergitme hızına gelecek şekilde optimize edilmiş ardından yaklaşık olarak 70-80 hz aralığında tutularak 2-3 saat boyunca alaşımların ergitilmesi sağlanmıştır. Külçelerin tamamen erimeye başlamasıyla birlikte pirometre yardımıyla ergimiş alaşımın sıcaklığı ölçülerek kontrollü olarak 720°C sıcaklıkta kalması sağlanmıştır. Tüm külçelerin tamamen erimesinden ve sıcaklığın 720°C’de sabit olarak tutulmasından sonra her bir deney için ilave edilecek Al-Cu, Al-Zn, Mg, AlTi<sub>5</sub>B, Al-Mn, Al-Ce, Al-Sr, Na tablet, Al-Bi, Al-Co, Al-Ti master alaşım ve ilavelerin eklenmesi sağlanmıştır. Tüm ilavelerin ardından ergiyik sıcaklığı

maksimum 750 °C'ye gelecek şekilde potadaki tüm külçelerin erimesi sağlanmış ve sıcaklık ölçümü yapılarak deneylerde belirtilen alaşımların tamamen ergimesi sağlanmıştır. Bu işlemlerin ardından kimyasal numune almadan önce 2 dk süreyle Azot gazı ile bir boru vasıtasıyla potaya daldırma işlemi yapılarak gaz alma işlemi yapılmıştır. Ardından kimyasal analiz numunesi için hazırlanmış numune kalıbına ve makro numune kalıbına kepçe vasıtasıyla potadan alınan ergimiş alaşım boşaltılarak spektrometre döküm numuneleri ve makro numuneleri elde edilmiştir. Spektrometre döküm numuneleri daha sonra aynı zamanda mikroyapı analizi için kullanılmıştır.



Şekil 4.3 : Makro döküm numuneleri.



Şekil 4.4 : Spektrometre döküm numuneleri.

Her deney için 1'er adet spektrometre analiz numunesi alınmıştır. Numunelerin kimyasal analiz yapılacak yüzeyleri 800'lük zımpara kullanılarak yüzey hazırlama cihazında parlatılması ardından spektrometrede analiz işlemi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda deney tasarımı değerlerine ulaşıp ulaşılmadığı belirlenmiştir. Spektrometre sonuçlarına göre eksik veya fazla çıkan elementlerin tekrar ocağa ilavesiyle ergitme işlemi devam etmiştir. Gaz alma işlemi tekrarlanarak tekrar 2. kez spektrometrede kimyasal analizin yapılmasının ardından hazırlanan alaşım Metal Health kalıplarına ve DAS kalıplarına döküme hazır hale gelmiştir. Tüm numunelere ait kimyasal analiz sonuçları Çizelge 4.3'de gösterilmiştir.

**Çizelge 4.3 : 32 adet deneyin kimyasal analiz sonuçları.**

DENEY	Si	Cu	Zn	Mg	B	Mn	Ce	Sr	Na	Bi	Co	Ti	Fe
REF 7Si	7,61	0,00	0,00	0,27	0,000	0,00	0,00	0,01	0,001	0,00	0,00	0,11	0,09
DENEY 1	6,84	1,25	0,51	0,24	0,001	0,00	0,00	0,00	0,000	0,40	0,48	0,27	0,09
DENEY 2	4,17	0,02	0,02	0,40	0,001	0,00	0,00	0,04	0,000	0,01	0,01	0,13	0,10
DENEY 3	6,83	0,00	0,03	0,31	0,001	0,00	0,29	0,01	0,000	0,54	0,04	0,12	0,11
DENEY 4	4,07	0,00	0,55	0,45	0,002	0,00	0,30	0,01	0,001	0,03	0,04	0,27	0,11
DENEY 5	5,90	0,00	0,47	2,15	0,001	0,96	0,18	0,00	0,001	0,38	0,04	0,27	0,12
DENEY 6 E	3,73	0,00	0,02	0,35	0,000	0,03	0,01	0,00	0,001	0,40	0,43	0,22	0,09
DENEY 6	3,93	0,00	0,03	1,18	0,001	0,00	0,21	0,10	0,001	0,29	0,47	0,20	0,12
DENEY 7	3,84	0,00	0,49	0,42	0,002	0,82	0,29	0,03	0,001	0,52	0,40	0,15	0,12
DENEY 8	4,01	0,00	0,43	1,45	0,001	0,00	0,00	0,00	0,001	0,48	0,47	0,14	0,12
DENEY 9	6,92	1,32	0,44	1,38	0,000	0,00	0,29	0,02	0,000	0,02	0,04	0,21	0,12
DENEY 10	4,17	1,17	0,47	1,45	0,001	0,60	0,00	0,01	0,001	0,02	0,45	0,18	0,12
DENEY 11	6,88	1,10	0,04	0,50	0,000	0,02	0,27	0,02	0,000	0,02	0,04	0,28	0,11
DENEY 12	6,73	0,01	0,42	0,29	0,000	0,00	0,00	0,02	0,000	0,42	0,04	0,20	0,10
DENEY 13	7,21	0,00	0,01	1,53	0,004	0,00	0,00	0,03	0,001	0,02	0,48	0,26	0,11
DENEY 14	3,84	1,06	0,50	0,40	0,001	0,00	0,26	0,04	0,001	0,02	0,38	0,22	0,11
DENEY 15	6,96	1,16	0,46	0,30	0,002	0,96	0,00	0,01	0,000	0,02	0,04	0,11	0,10
DENEY 16	4,48	1,15	0,03	1,36	0,002	0,63	0,30	0,01	0,000	0,02	0,53	0,09	0,11
DENEY 17	4,12	1,14	0,50	0,25	0,002	0,80	0,00	0,07	0,001	0,41	0,04	0,19	0,10
DENEY 18	4,66	0,02	0,03	1,42	0,001	0,63	0,30	0,03	0,002	0,00	0,04	0,11	0,12
DENEY 19	4,11	1,15	0,55	0,32	0,001	0,69	0,25	0,02	0,001	0,35	0,04	0,07	0,12
DENEY 20	4,75	0,00	0,47	1,45	0,001	0,62	0,00	0,07	0,000	0,02	0,04	0,21	0,12
DENEY 21	6,82	0,94	0,45	1,31	0,002	0,58	0,25	0,00	0,001	0,33	0,42	0,17	0,11
DENEY 22	7,18	0,00	0,49	1,40	0,001	0,00	0,30	0,02	0,003	0,02	0,39	0,13	0,11
DENEY 23	7,18	0,00	0,03	0,26	0,001	0,66	0,27	0,01	0,001	0,02	0,43	0,19	0,10
DENEY 24	4,14	0,95	0,51	1,34	0,000	0,02	0,01	0,00	0,001	0,23	0,04	0,07	0,10
DENEY 25	4,47	1,23	0,02	0,32	0,002	0,00	0,00	0,02	0,002	0,05	0,45	0,07	0,10
DENEY 26	7,05	1,15	0,00	1,45	0,001	0,74	0,00	0,01	0,002	0,35	0,39	0,10	0,10
DENEY 27	7,25	0,01	0,47	0,32	0,002	0,63	0,00	0,02	0,000	0,07	0,39	0,11	0,10
DENEY 28	3,97	0,00	0,01	0,23	0,001	0,58	0,00	0,00	0,001	0,34	0,42	0,20	0,10
DENEY 29	7,72	1,17	0,00	1,46	0,001	0,00	0,00	0,03	0,002	0,02	0,04	0,18	0,11
DENEY 30	7,30	0,01	0,00	1,34	0,000	0,60	0,00	0,00	0,001	0,37	0,04	0,11	0,10
DENEY 31	6,88	0,97	0,03	0,24	0,001	0,01	0,30	0,01	0,000	0,50	0,42	0,11	0,11
DENEY 32	4,26	1,21	0,02	1,15	0,000	0,00	0,15	0,01	0,002	0,13	0,04	0,11	0,13

E:Eksik değer (Mg eksik ilave edilmiştir)

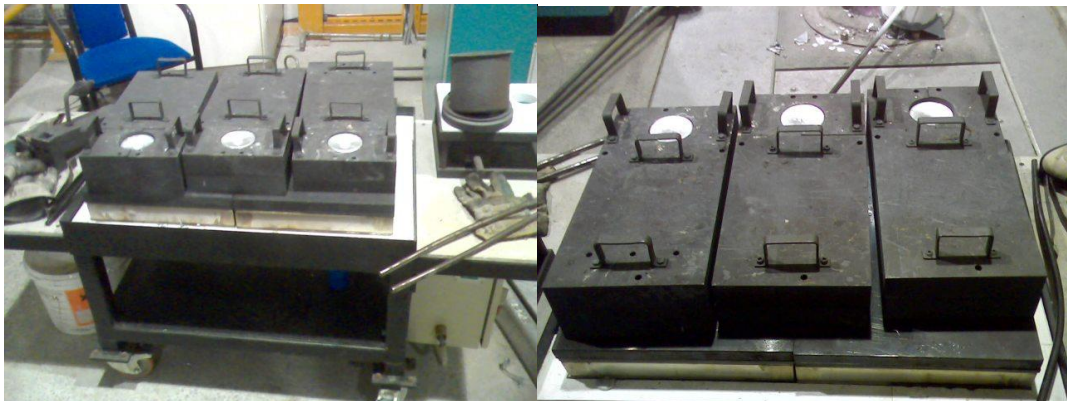
### 4.3 Metal Health Kalıplarına ve DAS Kalıbına Döküm ve Çıktıların Eldesi

İndüksiyon ocağında ergitilen 32 adet deney alaşımların kimyasal analizlerinin uygun olmasının ardından indüksiyon ocağındaki ergimiş metal Metal Health Döküm sistemine dökülmeye hazır hale gelmiştir. Metal health döküm sistemi kalıpları indüksiyon ocağına yapılan şarj işlemleri esnasında ısıtılmaya başlanmıştır. Operasyon kalıpların ısıtma plakaları üzerine yerleştirilmeleriyle başlamıştır. Otomatik sıcaklık kontrolüne sahip bu sistemde sıcaklıklar 350°C set değerlerine sabitlenerek ısıtılmaya başlanmıştır. Rezistanslı olarak metal bir masa üzerine konumlanmış olan ısıtılan sistem üzerlerine ısı yalıtımını sağlayan battaniyenin örtülmesi ile sıcaklığının korunması sağlanmıştır.



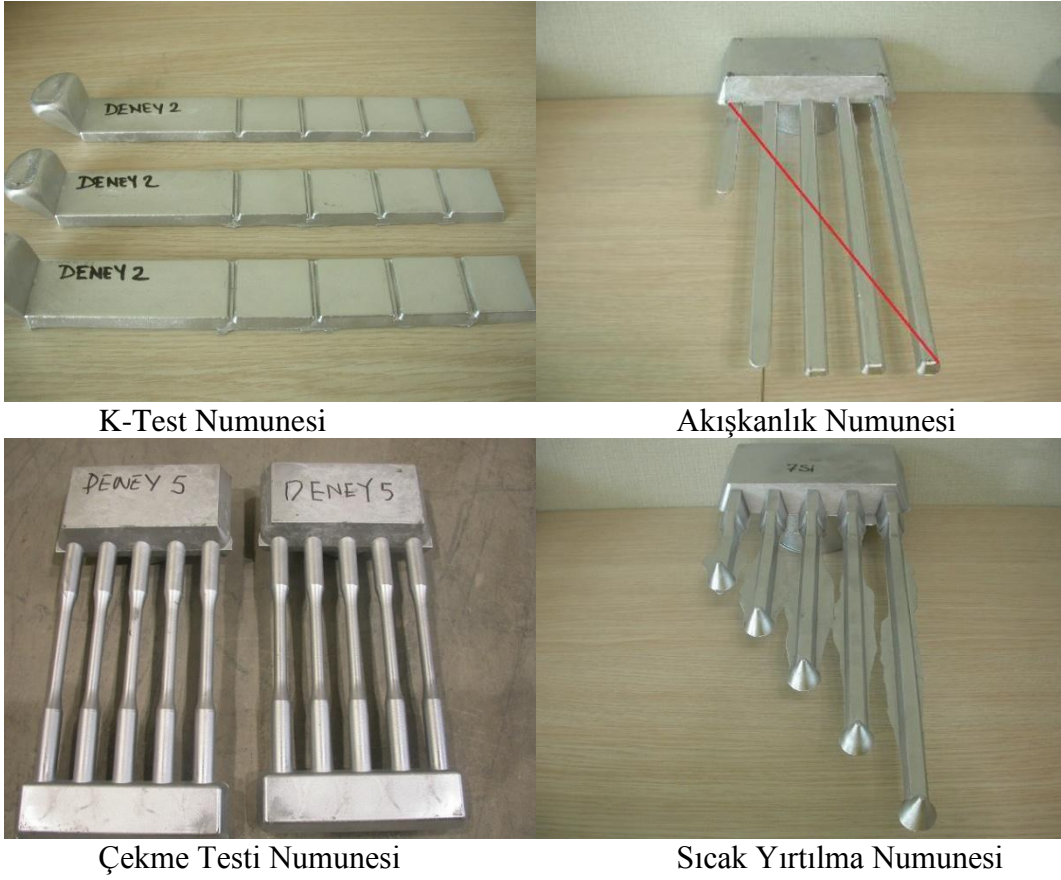
**Şekil 4.5 :** Metal Health sistemi ısıtılmasında kullanılan yalıtım battaniye görüntüsü.

350°C sıcaklığına gelmiş olan kalıplara sırasıyla kepçeler yardımı ile K-Testi, akışkanlık, sıcak yırtılma ve çekme kalıplarına döküm işlemi gerçekleştirilmiştir. Tüm bu işlemlerde öncelikle 3'er adet döküm yapılarak kalıpların rejime girmesi sağlandıktan sonra her deney için örnek numuneler alınmıştır.



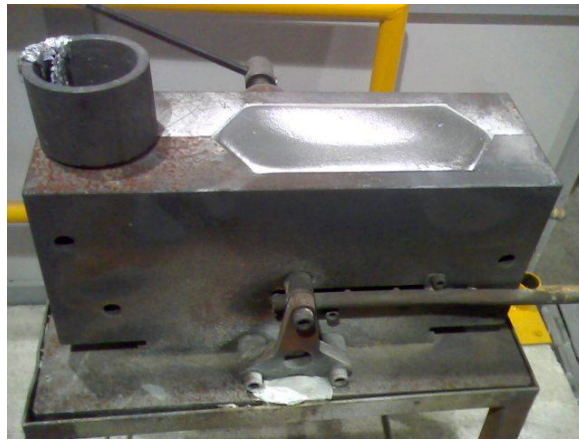
**Şekil 4.6 :** Metal Health sistemine döküm.

Tüm metal health döküm sisteminden elde edilen çıktılar Şekil 4.7’de gösterilmiştir.



**Şekil 4.7 :** Metal Health sistemi numuneleri.

DAS numune kalıbına döküm işlemleri de 32 adet deney için gerçekleştirilmiştir. Bu işlem için DAS numune kalıbı önceden şalemo vasıtasıyla 350 °C sıcaklığa ısıtılmıştır. Ardından DAS kalıbının rejime girmesi için 2’şer adet numune aldıktan sonra deney numuneleri alınmıştır.



**Şekil 4.8 :** DAS kalıbına döküm.



**Şekil 4.9 :** DAS kalıbı numuneleri.

32 adet deney için Metal Healt sistemi ve DAS kalıplarına dökülen numuneler elde edildikten sonra Al indüksiyon ocağında geriye kalan ergimiş alaşım, master alaşım külçe kalıplarına dökülerek master alaşım haline getirilmiştir.



**Şekil 4.10 :** Master alaşım kalıpları ve 32 adet deney çıktısı külçeler.

#### **4.4 K-Testi, Akışkanlık ve Sıcak Yırtılma Numunelerinin Analizi**

Sıvı metaldeki temizlik ölçütünü belirlemek için şekildeki çentikli K-testi kalıbı kullanılmıştır.

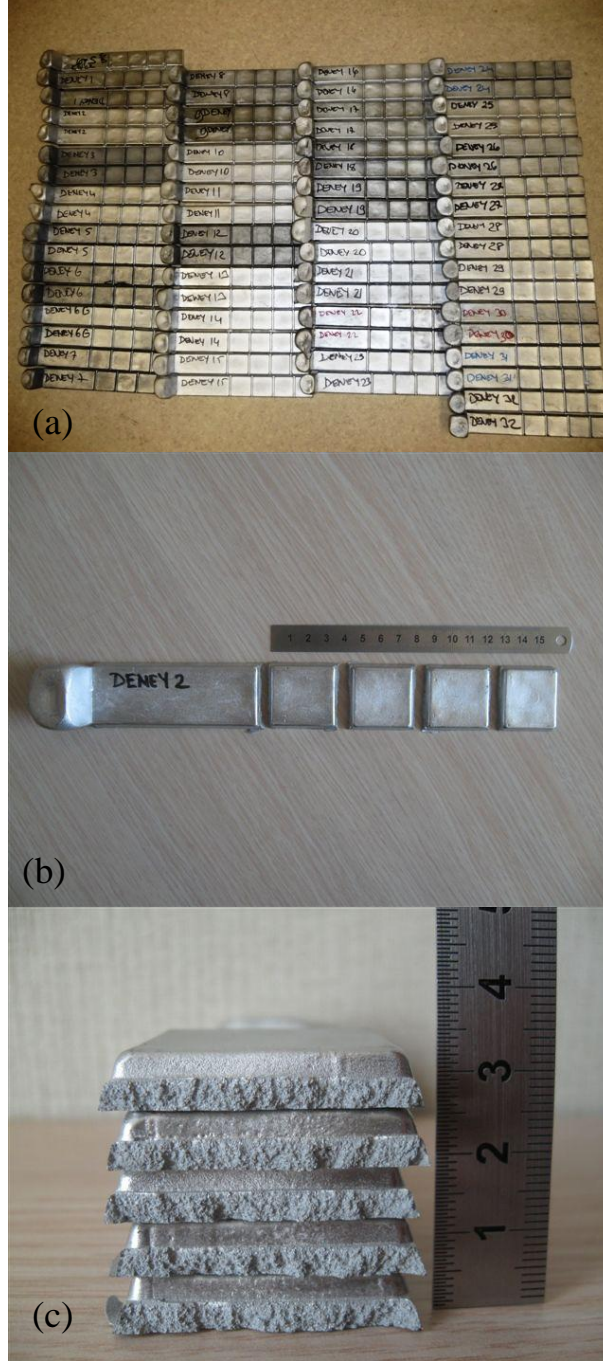
K-test kalıbı çıktılarının analizi dökülen parçalardaki çentikli yerlerin kırılarak yüzeylerdeki makro hataların incelenmesiyle yapılmıştır.

Kırılan yüzeylerdeki inklüzyonlar sayılarak K değerine göre metal temizliği değerlendirilmiştir.

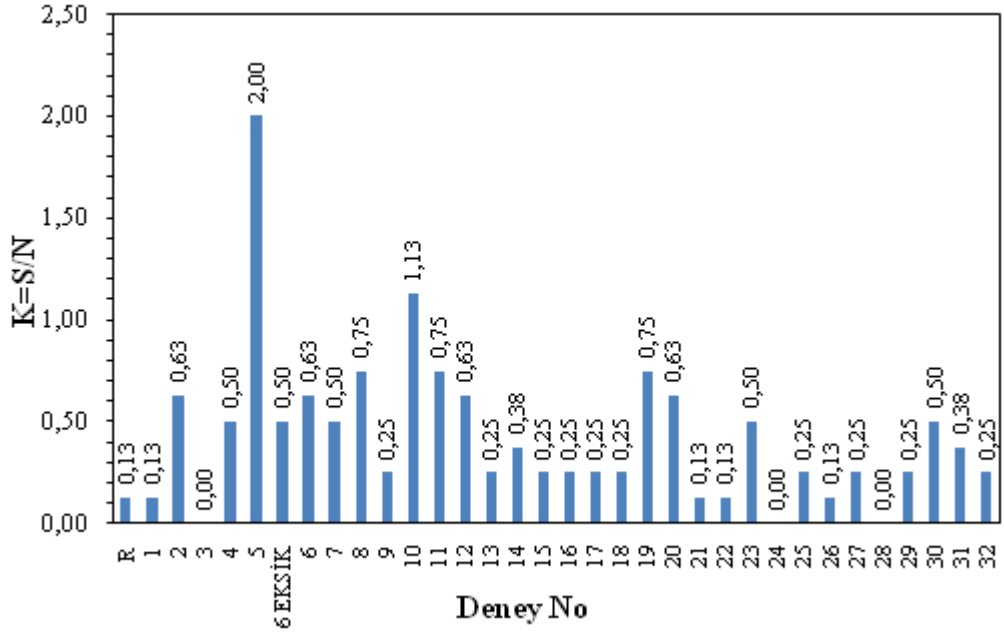
K-Testi analizi yapılırken n adet parçadaki inklüzyon sayısı S sayılarak, K değeri 32 adet deney için belirlenmiş olup Şekil 4.12’de sonuçlar verilmiştir.

$$K=S/n$$

(4.1)



Şekil 4.11 : K-testi analizi a) Tüm numuneler b) Numune üstten görünüm c) Kırılmış numune.



**Şekil 4.12 :** K-testi analizi değerleri.

Şekil 4.13’de K-test numunesinin çentikli yerlerinin kırılması sonucunda kırılmış yüzeylerdeki makro hataların incelenmesiyle 1 adet inklüzyon tespit edilmiştir. Şekil 4.11-b’de görüldüğü üzere 1 adet numunede bulunan n parça sayısı kırılan yüzeylerin sayılmasıyla elde edilmiştir, elde edilen sayı ise 8’dir. Şekil 4.13 için K değeri S adet inklüzyonun (1 adet) n adet parça sayısına (8 adet) bölünmesi sonucu 0,13’dür.

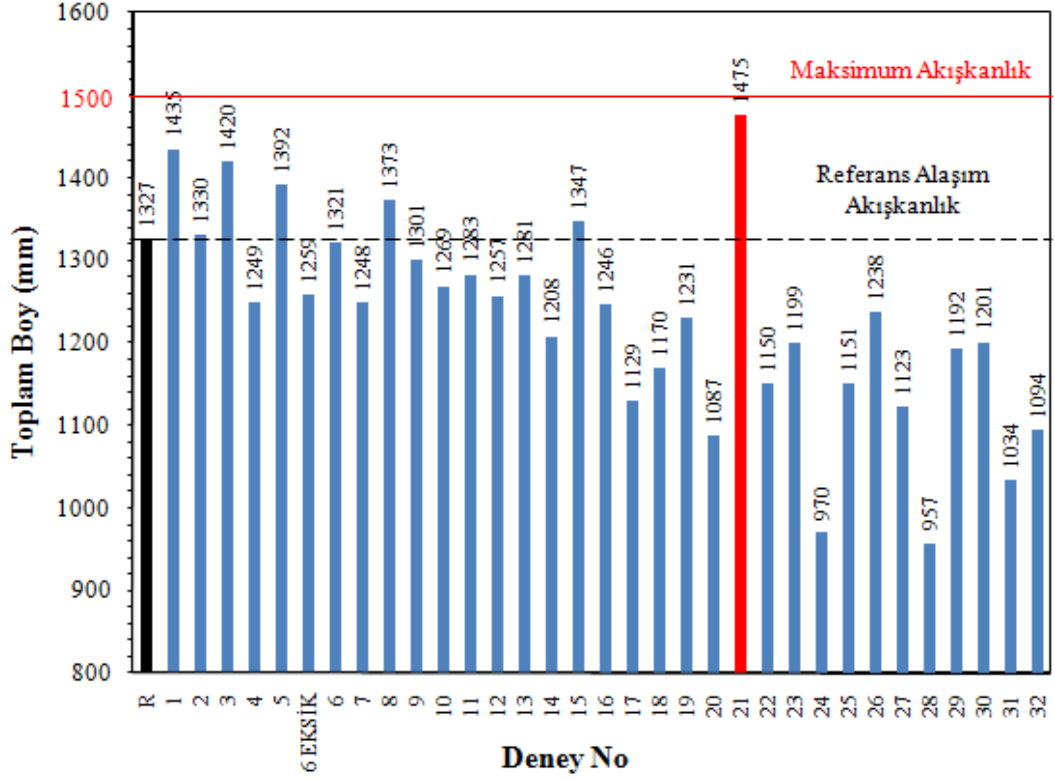


**Şekil 4.13 :** K-testi örnek inklüzyon görünümü.

32 adet deneyden (alaşımdan) elde edilen akışkanlık kalıbı numunelerinin (Şekil 4.14) 5 adet parmak boyları tek tek ölçülerek toplam boyları hesaplanmıştır.



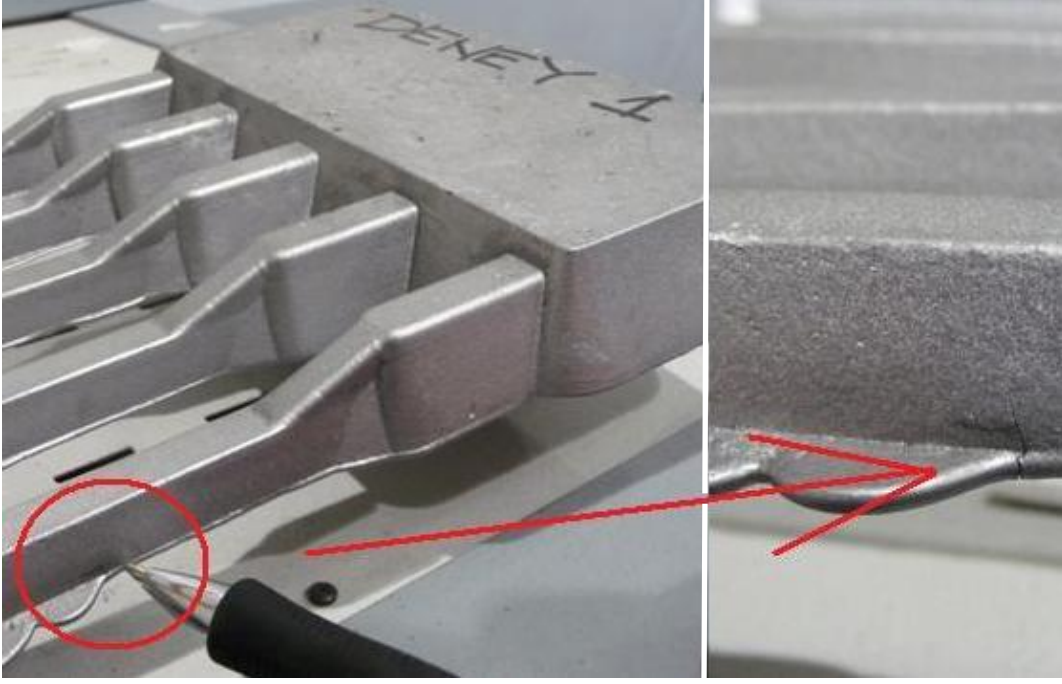
Şekil 4.14 : Akışkanlık kalıpları parmak boyları.



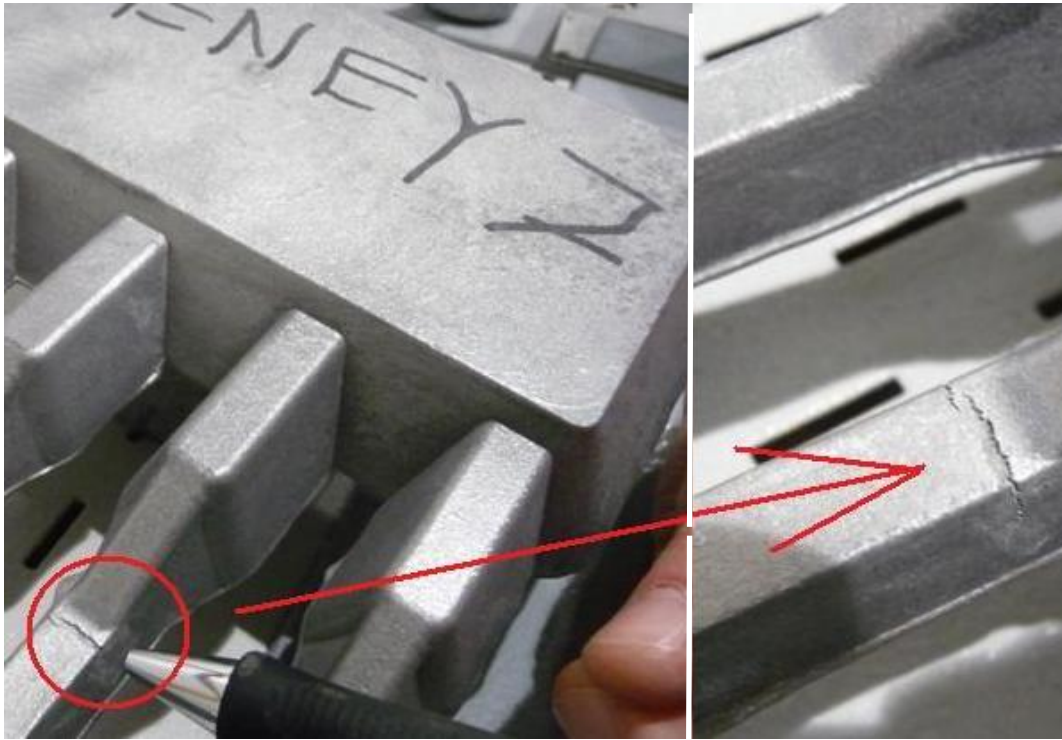
**Şekil 4.15 :** Akışkanlık kalıpları parmak boyları analizi.

Akışkanlık test kalıbı 5 parçadan oluşan parmakları içermektedir. Akışkanlık ergimiş metalin kalıp içerisinde akmaya karşı gösterdiği iç dirençtir. Bu parmakların her biri 300 mm boyundadır. Eğer tüm kalıplar ideal olarak dolar ise 1500 mm akışkanlık boyu elde edilir, bu değere en yüksek akışkanlık değeri (maksimum akışkanlık) denilir. Şekil 4.15’de görüldüğü üzere yapılan çalışmalarda en yüksek akışkanlık değerine 21 nolu alaşımda (1475 mm) ulaşılmıştır, bu alaşıma ait akışkanlık parmak boyu Şekil 4.14’de görülmektedir. Jant sektöründe kullanılan referans % 7 Si içeren R (referans alaşım) alaşımında parmak boyu toplam uzunluğu 1327 mm olarak ölçülmüştür. 1, 2, 3, 5, 8, 15 ve 21 nolu alaşımların sonucunda jant sektöründe de kullanılan referans % 7 Si içeren alaşımdan daha yüksek akışkanlık değerleri elde edilmiştir.

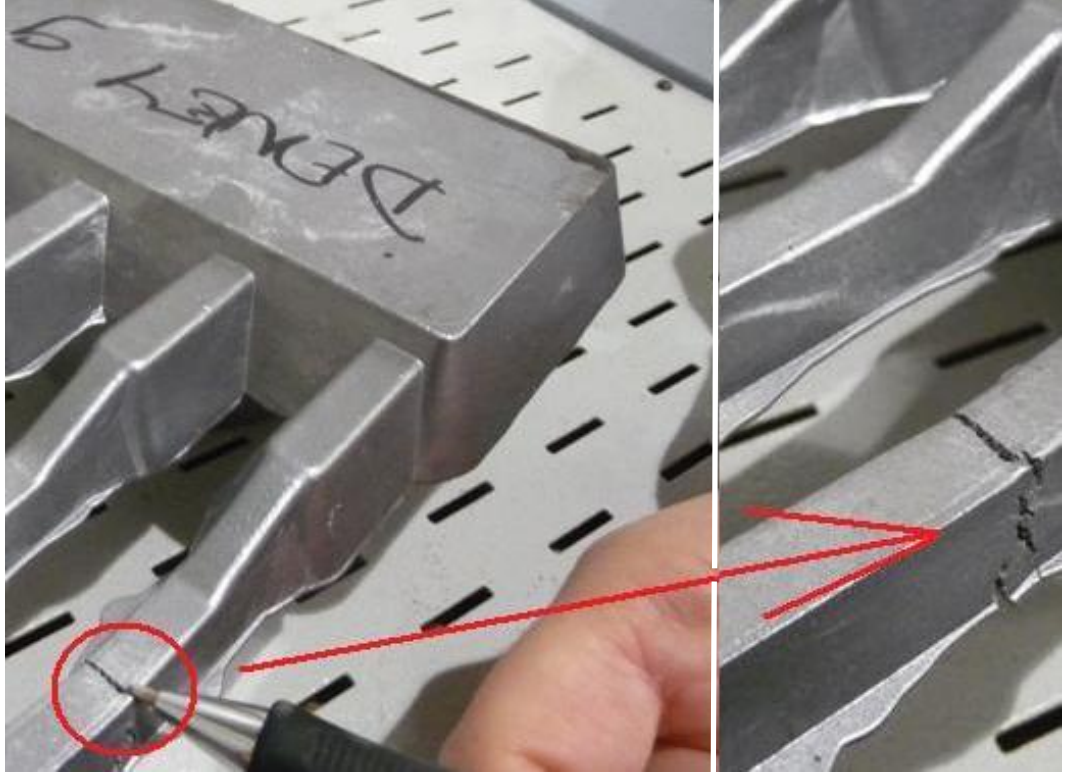
Metal Health sıcak yırtılma kalıbına dökümü yapılan 32 adet alaşıma ait sonuçlara göre 1, 7, 9, 11, 22 ve 29 nolu alaşımlara ait kalıplarda çatlağa rastlanmıştır. Sıcak yırtılma ergimiş metalin katılaşması esnasında oluşan iç gerilmelerin malzeme yüzeyinde çatlak oluşturmasıdır. Bu alaşımlara ait çatlaklar sırasıyla Şekil 4.16, Şekil 4.17, Şekil 4.18, Şekil 4.19, Şekil 4.20, Şekil 4.21’de gösterilmiştir.



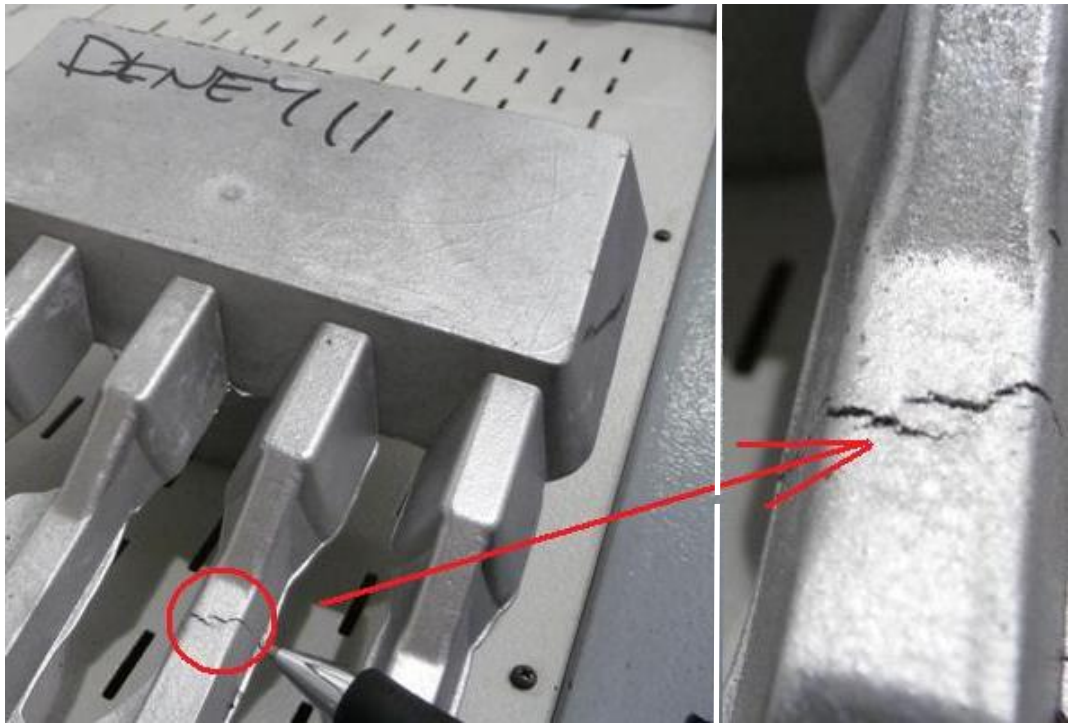
**Şekil 4.16 :** Sıcak yırtılma kalıbı % 7 Si içeren 1 nolu alaşım numunesinde oluşan çatlak.



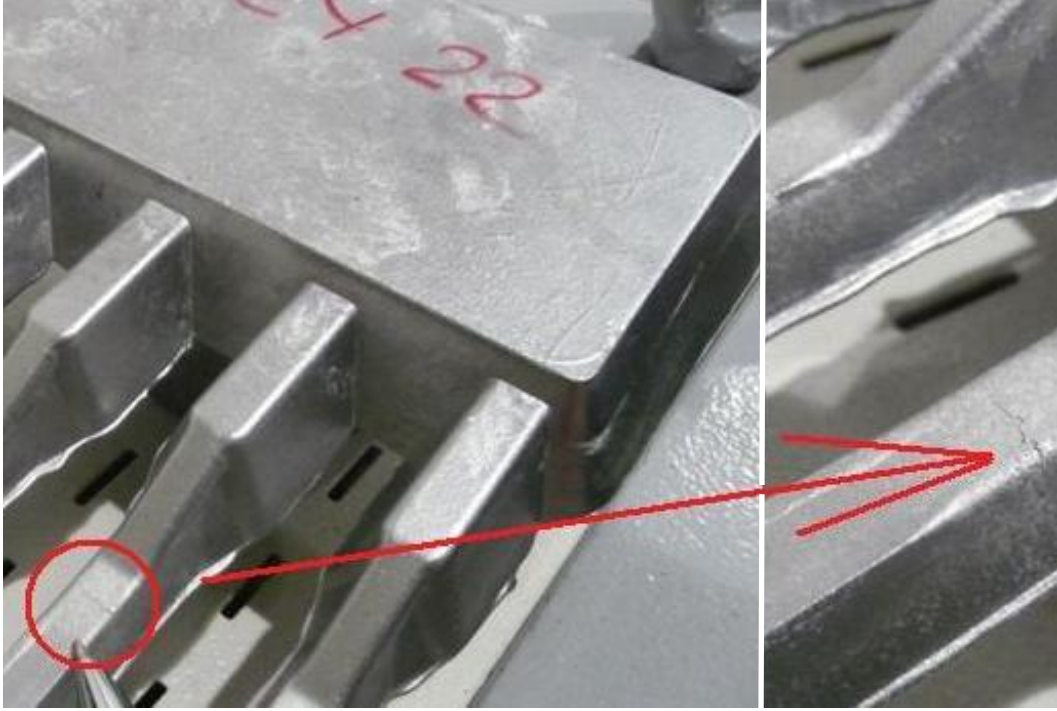
**Şekil 4.17 :** Sıcak yırtılma kalıbı % 4 Si içeren 7 nolu alaşım numunesinde oluşan çatlak.



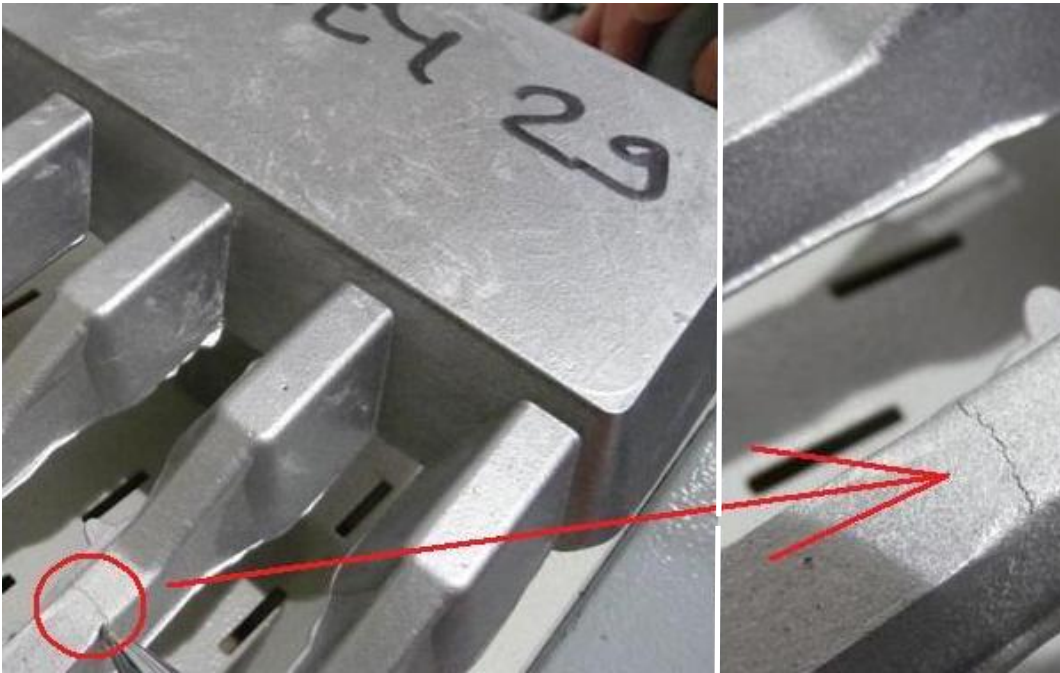
Şekil 4.18 : Sıcak yırtılma kalıbı % 7 Si içeren 9 nolu alaşım numunesinde oluşan çatlak.



Şekil 4.19 : Sıcak yırtılma kalıbı % 7 Si içeren 11 nolu alaşım numunesinde oluşan çatlak.



Şekil 4.20 : Sıcak yırtılma kalıbı % 7 Si içeren 22 nolu alaşım numunesinde oluşan çatlak.



Şekil 4.21 : Sıcak yırtılma kalıbı % 7 Si içeren 29 nolu alaşım numunesinde oluşan çatlak.

#### 4.5 Metal Health Çekme ve DAS Çekme Numunelerinin Analizi

Şekil 4.22 ve Şekil 4.23'te gösterilen Metal Health Çekme kalıbından ve DAS kalıbından döküm hali ve ısıl işlemlilik üzere her 2 koşul için çekme test numuneleri hazırlanarak çekme testleri gerçekleştirilmiştir. DAS çekme çubuk numuneleri ise soğuma bölgesi boyunca kesitlerden çekme numunelerinin çıkartılmasıyla sağlanmıştır.

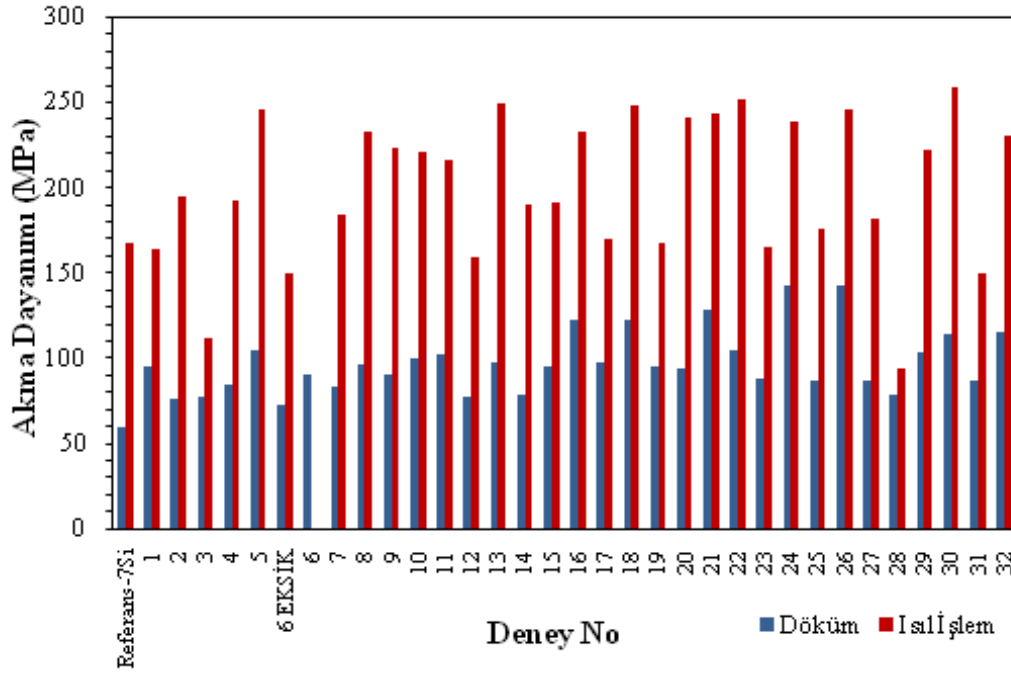


Şekil 4.22 : Metal Health işlenmemiş çekme çubukları (tornalama öncesi).

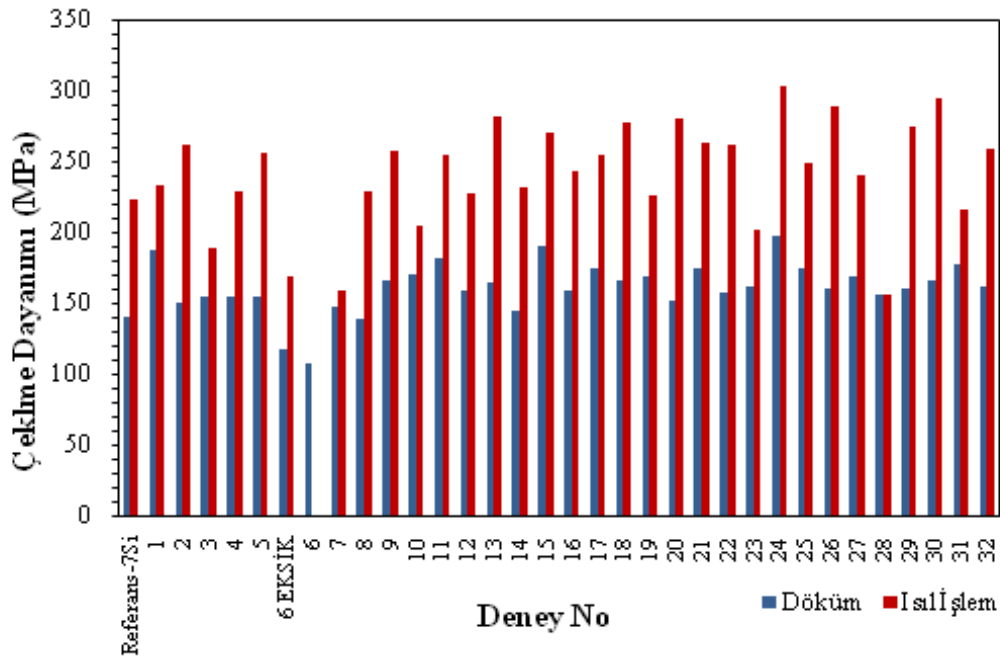


Şekil 4.23 : DAS çekme çubuğu kesit bölgeleri ve ham çekme çubukları.

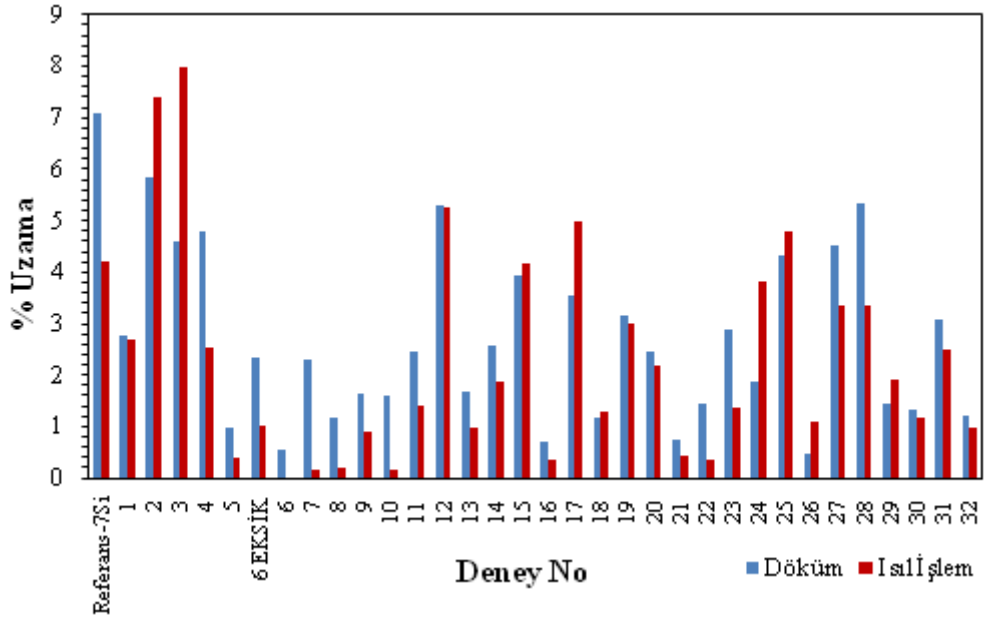
Metal health çekme kalıbından elde edilmiş döküm hali ve ısıl işlem şartları için akma mukavemeti, çekme mukavemeti dayanımları ve % uzama değerleri Şekil 4.24, Şekil 4.25, Şekil 4.26'da verilmiştir.



Şekil 4.24 : Metal Health kalıbı numuneleri akma dayanımları (döküm-ısıtma işlemi).

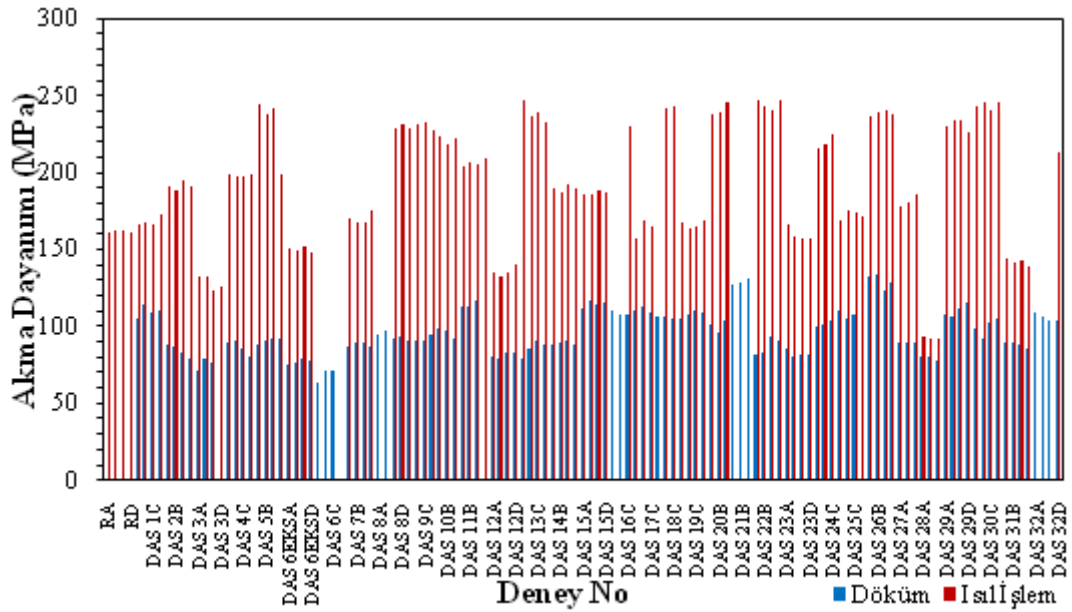


Şekil 4.25 : Metal Health kalıbı numuneleri çekme dayanımları (döküm-ısıtma işlemi).

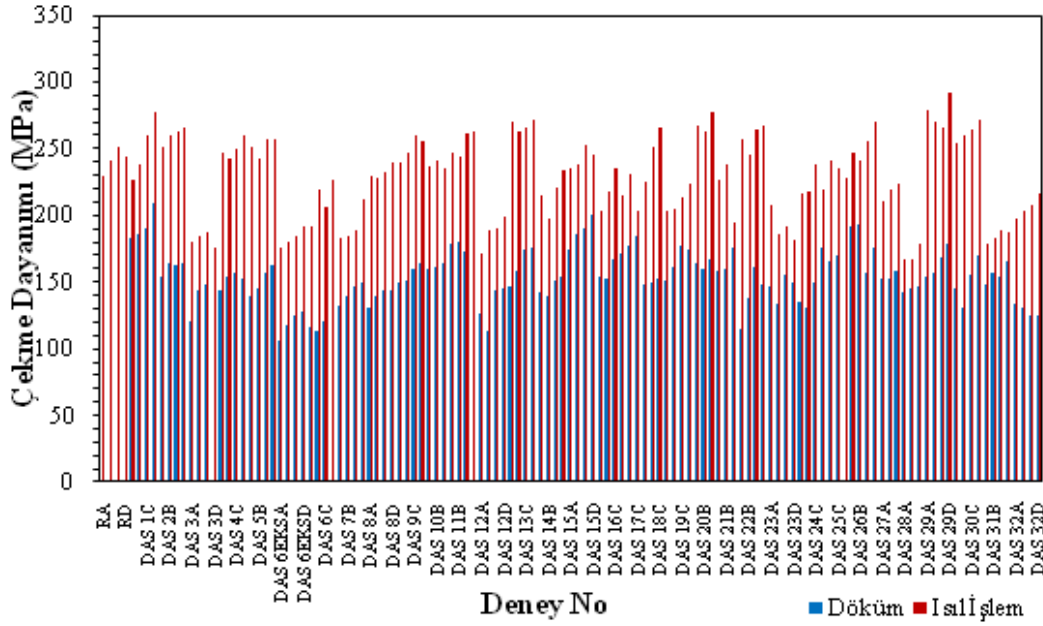


Şekil 4.26 : Metal Health kalıbı numuneleri % uzamaları (döküm-ısıl işlem).

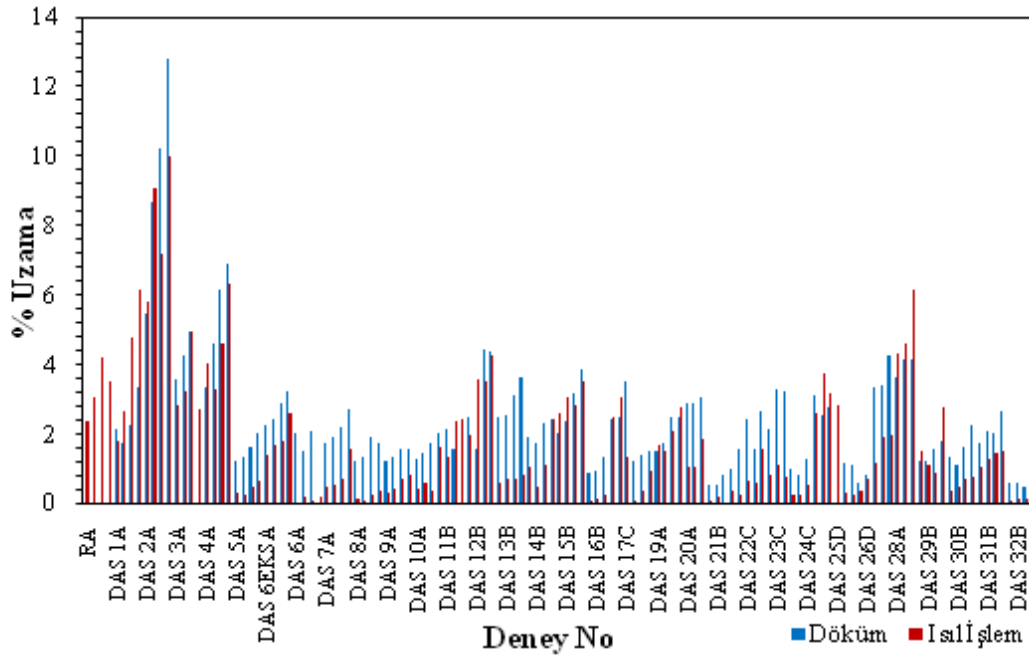
DAS kalıbından elde edilmiş çekme çubuklarının döküm hali ve ısıl işlem şartları için akma mukavemeti, çekme mukavemeti dayanımları, % uzama Şekil 4.27, Şekil 4.28, Şekil 4.29’da verilmiştir.



Şekil 4.27 : DAS kalıbı numuneleri akma dayanımı (döküm-ısıl işlem).



Şekil 4.28 : DAS kalıbı numuneleri çekme dayanımı (döküm-ısıtma işlemi).



Şekil 4.29 : DAS kalıbı numuneleri % uzamaları (döküm-ısıtma işlemi).

#### 4.6 Yüzey Hazırlama İşlemleri

Yüzey hazırlama işlemleri makro analiz, mikro analiz, DAS yapı analizi, sertlik analizi ve SEM analizi numunelerine uygulanmıştır.

Yüzey hazırlama işlemleri ISO/IEC 17025 Standardına belirtilen gerekliliklerine uygun şekilde gerçekleştirilir. Dağlama Çözeltisi mikroskop ve / veya makroskopta

incelenmek üzere parlatma cihazında hazırlanmış numune yüzeyini daha belirgin hale getirmek amacıyla yüzeye pamukla sürterek veya daldırma yoluyla tatbik edilen çözeltilerdir. Makrografik analiz için dağlama çözeltisi hazırlanmasında 250 ml.'lik behere 10 gr.  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  (demir klorür- Hexahydrate) alınmış ve 100 ml. saf su içinde çözündürülmüştür. Mikrografik analiz için dağlama çözeltisi hazırlanmasında 2,5 gr.  $(\text{NH}_4)_6\text{O}_24.4\text{H}_2\text{O}$  (amonyum molibdat) 10 ml. su içerisinde çözündürülmüş sonra üzerine 10 ml.  $\text{HNO}_3$  (nitrik asit) ilave edilmiştir. Elde edilen karışıma,  $90^\circ\text{C}$ 'ye ısıtılmış, 90 ml.  $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$  (alkol) ilave edilmiştir. 5 ml % 38-40'luk HF ile 95 ml saf su karıştırılarak % 5'lik HF çözeltisi elde edilmiştir. Numunenin üzerine piset ile bu çözelti dökülmüş ve 10 sn. bekletilmiştir. Son olarak numunenin üzerine alkol dökülerek yıkanmış ve kurutulmuştur. Mikro parlatma çözeltisi hazırlanmasında 150 ml. Trietanolamin, 850 ml % 99'luk alkol ile bir litreye tamamlanmıştır. Elmas pasta ile beraber numune parlatmada kullanılmıştır [48].

Mikrografik analiz numunelerin yüzeyleri parlatma cihazında temizlenerek düzleştirilmiştir. Bu amaçla numunelerin analiz edilecek yüzeyleri sırasıyla 180, 800, 1200 ve 2400 ölçülü zımparalardan geçirilerek temizlenmiş ve parlatılmıştır. Final parlatma olarak siyah keçe kullanılmıştır. Numuneler siyah keçe üzerinde, bezelye tanesi büyüklüğünde alümina veya elmas pasta kullanılarak temizlenmiş ve parlatılmıştır. Her zımpara ve keçe değişiminde parlatma yönü  $90^\circ$  değiştirilmiştir. Numuneler alkol ve saf su ile yıkandıktan sonra 15 saniye süreyle dağlama çözeltisi (0.5 % HF) içinde tutulmuş ardından alkol ve saf suyla durulanıp havayla kurutulmuşlardır [49].

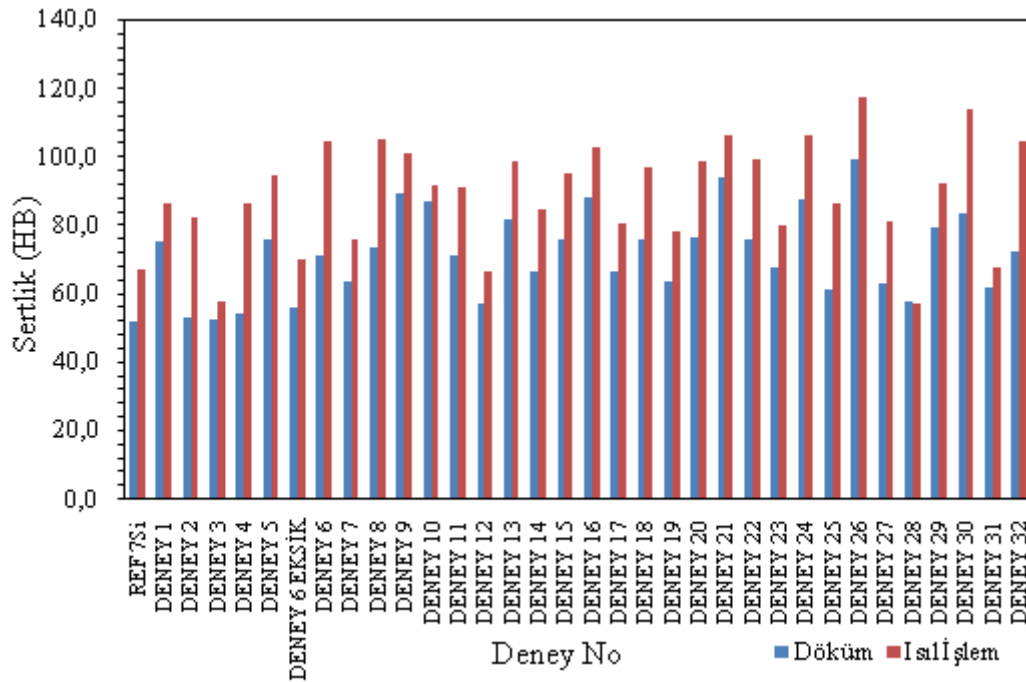
Makrografik analiz numunelerinin yüzeyleri parlatma cihazında temizlenerek düzleştirilmiştir. Bu amaçla numunelerin analiz edilecek yüzeyleri sırasıyla 180 ve 800 ölçülü zımparalardan geçirilerek temizlenmiş ve parlatılmıştır. Her zımpara değişiminde parlatma yönü  $90^\circ$  değiştirilmiş ardından numuneler alkol ve saf su ile yıkanmıştır. Numune yüzeyine 3 dakika süreyle pamuk kullanılarak dağlama çözeltisi ( $\text{FeCl}_3$ ) sürülmüş son olarak alkol ve saf suyla durulanıp havayla kurutulmuşlardır [50].

#### 4.7 Sertlik Numunelerinin Analizi

Sertlik numuneleri K-testi kalıbından elde edilen döküm parçalarına uygulanmıştır. İlk olarak 180'lik zımpara ile yüzeyleri hazırlanan numuneler döküm haliyle Wolpert Sertlik cihazında Brinell Sertlik (HB) değerlerine bakılmış, ardından aynı parçalar T6 ısıl işlem koşullarında ısıl işlem prosesine girdikten sonra tekrar 180'lik zımpara yapıldıktan sonra sertlik değerleri incelenmiştir.



Şekil 4.30 : Sertlik ölçümü yapılan 32 adet numune.



Şekil 4.31 : Sertlik değerleri (döküm hali-ısıl işlem).

32 adet döküm hali ve ısıtma işlemli numunelerin sertlik değerleri sonuçları Çizelge A.20 ve Şekil 4.31’de gösterilmiştir. Tüm sertlik değerleri Şekil 4.30’da da görüldüğü gibi numune üzerinden 3 farklı noktadan alınmıştır ve değerlerin ortalamaları alınmıştır.

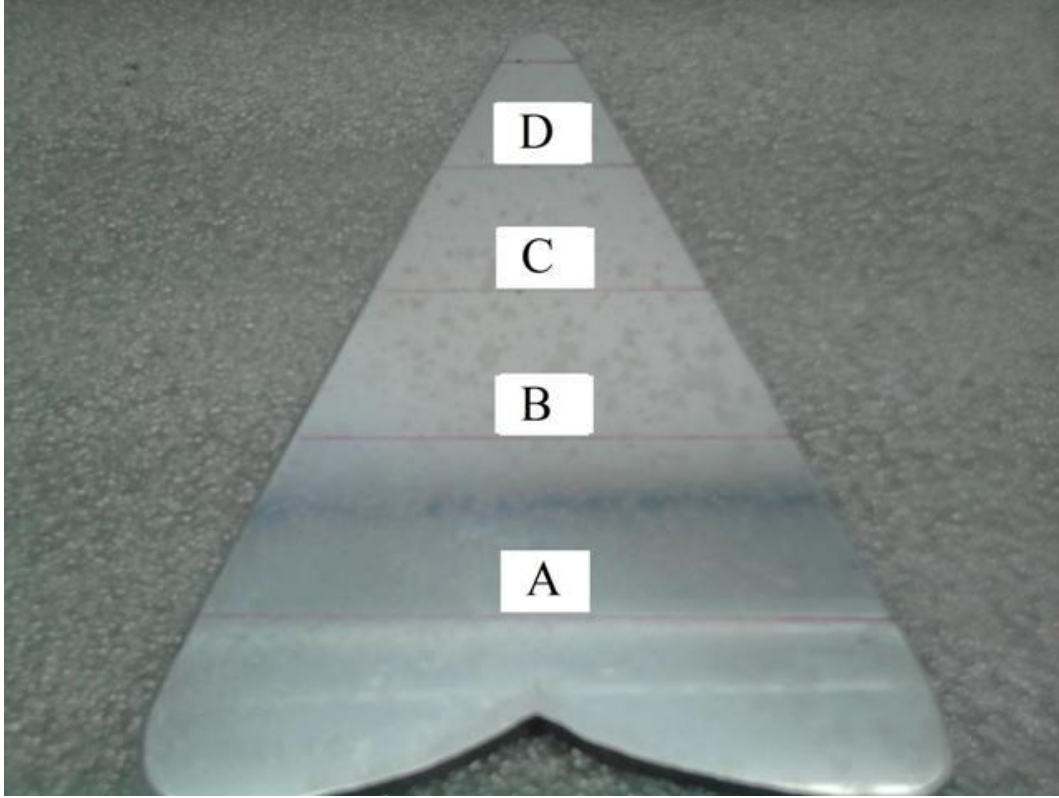
#### 4.8 DAS Numunelerinin DAS Analizi ve % Porozite Analizi

32 adet DAS kalıbından soğuma kesidi boyunca testere ile kesilen numuneler (Şekil 4.32) daha sonra DAS analizi yapılmadan önce mikro yapı için yüzey hazırlama işlemine tabi tutulmuştur.

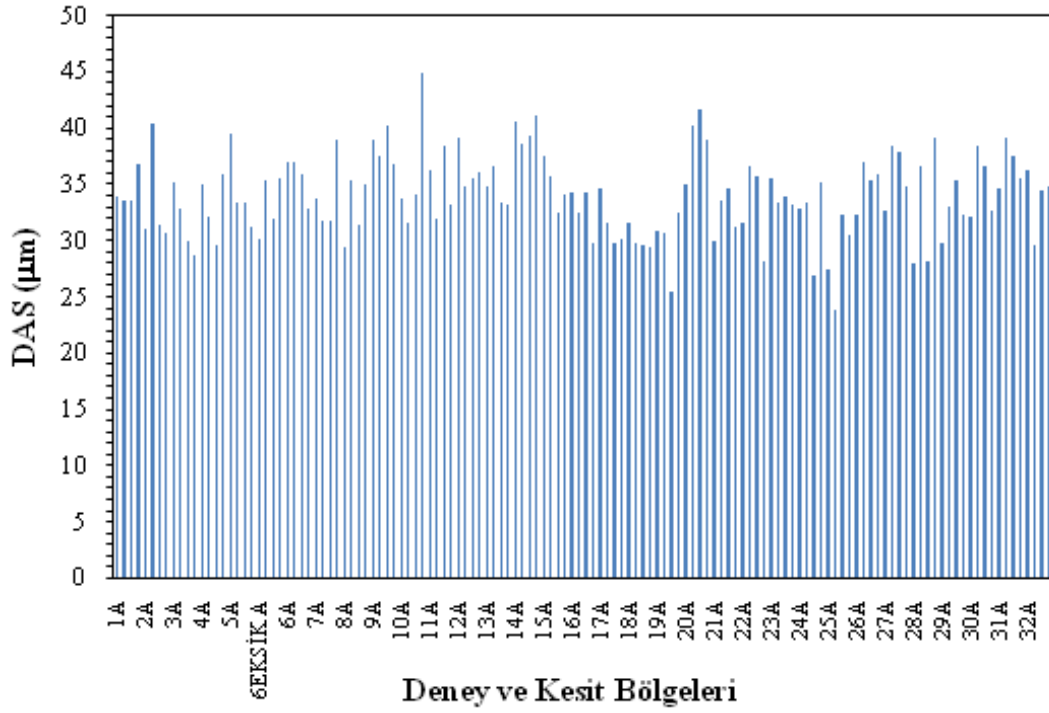


Şekil 4.32 : DAS kalıbı numuneleri döküm hali (yüzey hazırlama öncesi).

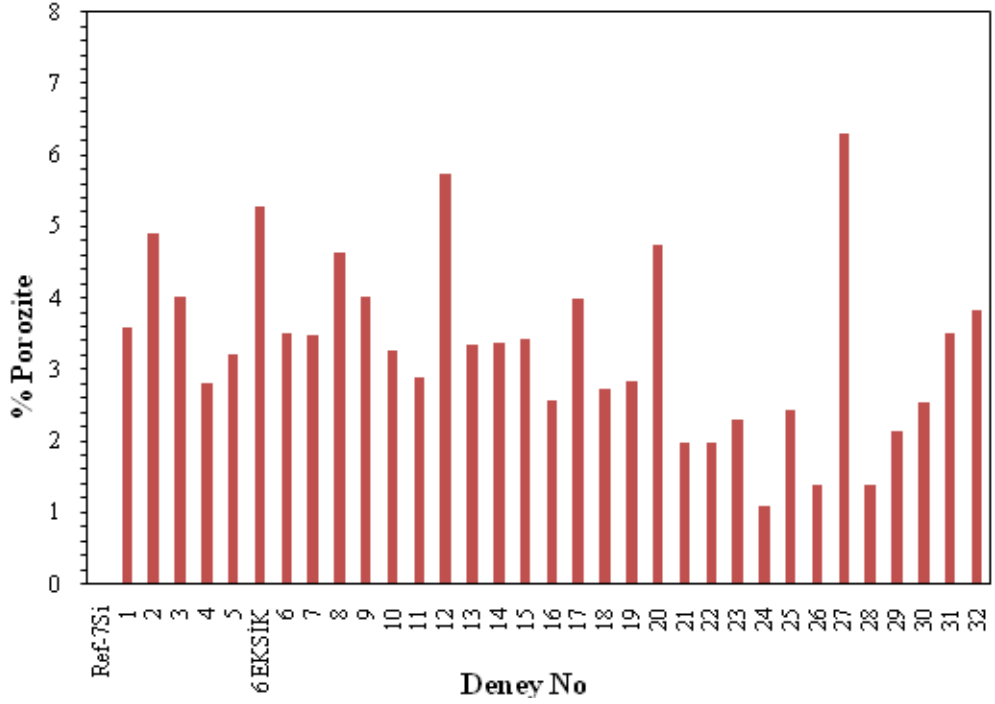
32 adet numune yüzey hazırlama işleminden sonra soğuma kesidi boyunca DAS değişimini incelemek için 4 farklı bölgeye ayrılmıştır ve bu bölgeler sırayla A, B, C ve D bölgeleri olarak Şekil 4.33’de gösterildiği şekilde tanımlanmıştır. Ardından sırayla tüm numuneler optik mikroskop ile Buehler OMNIMET yazılımı vasıtasıyla DAS analizi ve % porozite analizi işlemleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.33 : DAS analizi ve % porozite analizi numunesi.



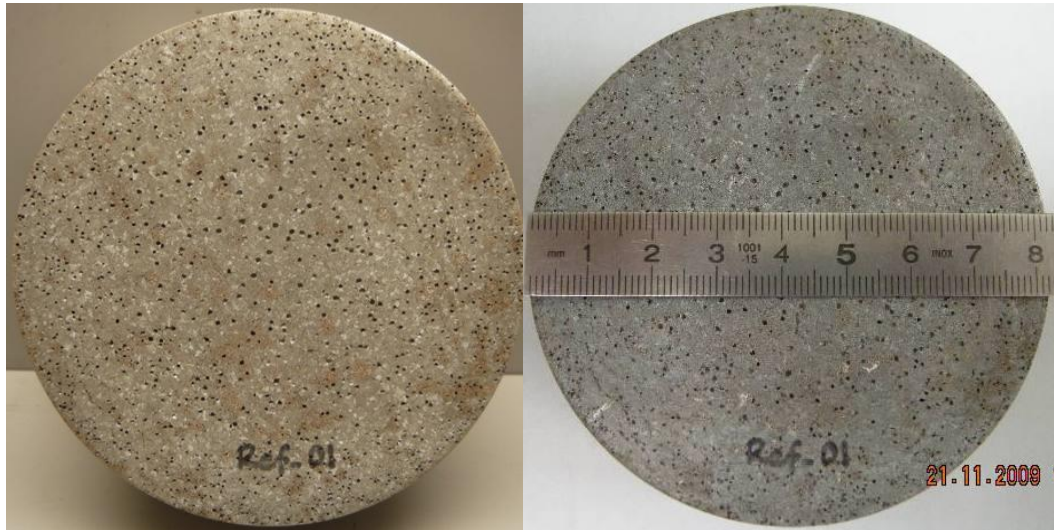
Şekil 4.34 : Soğuma kesiti boyunca DAS değerleri.



Şekil 4.35 : % Porozite miktarı.

#### 4.9 Makro Numunelerinin Analizi

Bütün makro numunelerin döküm işlemi sonrası yorumlanmasında deneysel kesidin orta bölgesine göre tane büyüklükleri ve yapısı değerlendirilmiştir. Kalıbın duvarları hızlı soğuduğundan dış bölgeler dikkate alınmamıştır. Tüm alaşımlara ait % bileşim miktarları Çizelge 4.2’de verilmektedir.



Şekil 4.36 : % 7 Si içeren referans alaşımının makro yapısı.

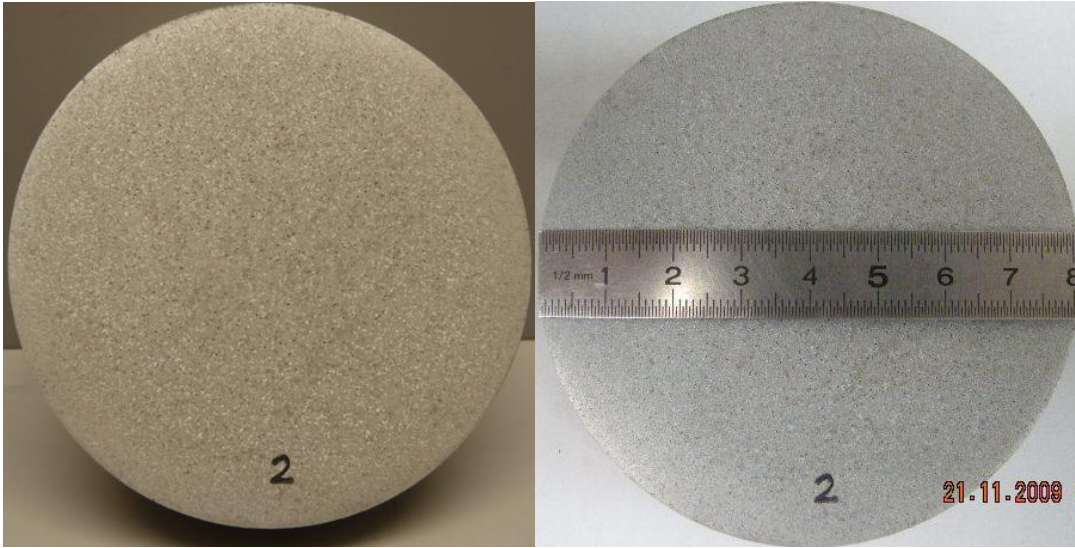
Şekil 4.36’da görüldüğü üzere Referans 7Si alaşımında taneler eş eksenli dağılmıştır. Ortalama tane büyüklüğü yaklaşık olarak 1 mm olarak ölçülmüştür.



**Şekil 4.37 :** % 7 Si içeren 1 nolu alaşımın makro yapısı.

Şekil 4.37’de görüldüğü üzere 1 nolu alaşımda taneler eş eksenli dağılmıştır.

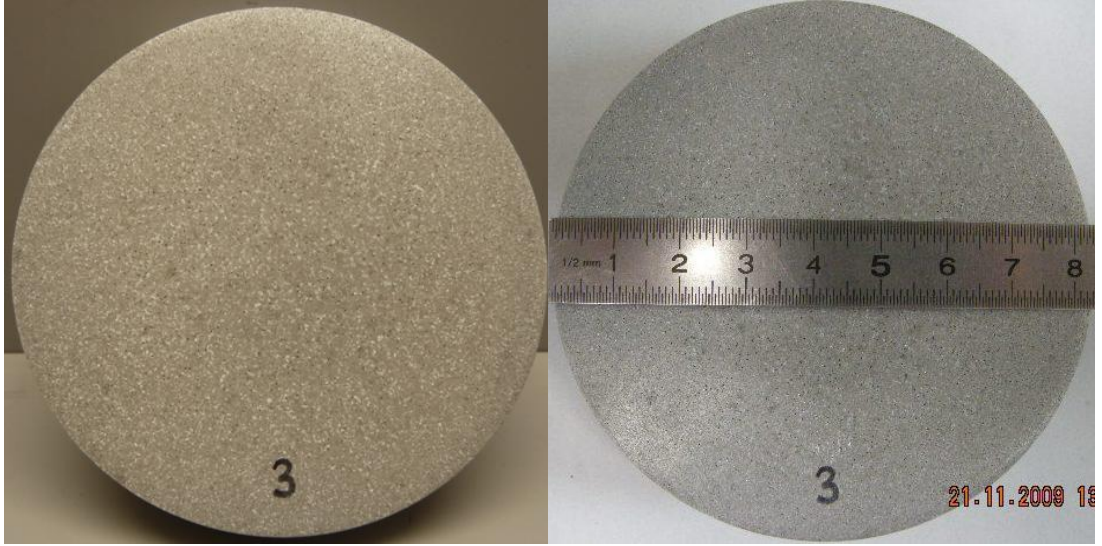
Ortalama tane büyüklüğü yaklaşık olarak 1 mm olarak ölçülmüştür.



**Şekil 4.38 :** % 4 Si içeren 2 nolu alaşımın makro yapısı.

Şekil 4.38’de görüldüğü üzere 2 nolu alaşımda çok ince taneler eş eksenli dağılmıştır.

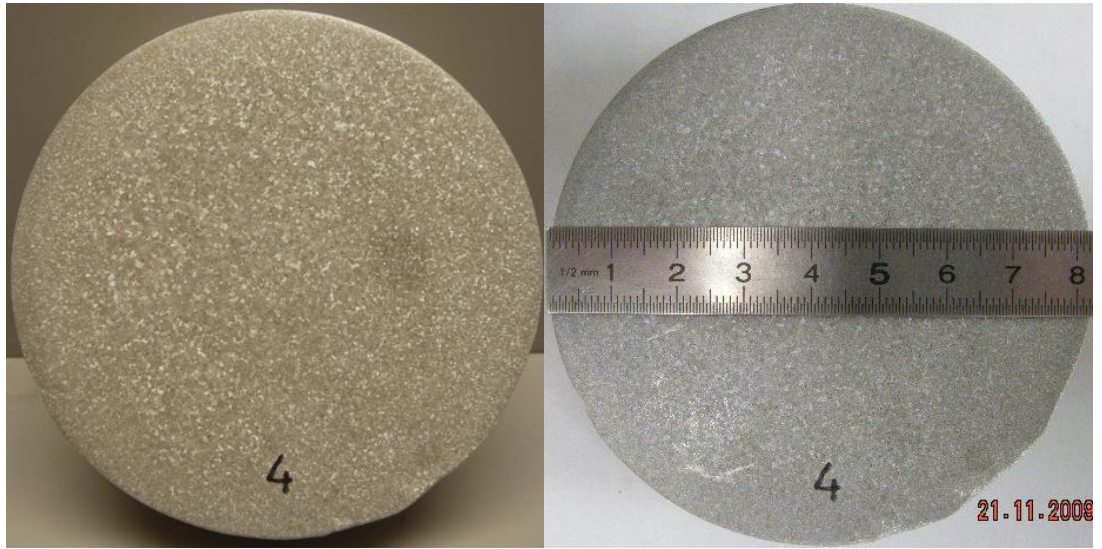
Ortalama tane büyüklüğü yaklaşık olarak 0,5 mm olarak ölçülmüştür.



**Şekil 4.39** : % 7 Si içeren 3 nolu alaşımın makro yapısı.

3 nolu alaşımda çok ince taneler eş eksenli dağılmıştır.

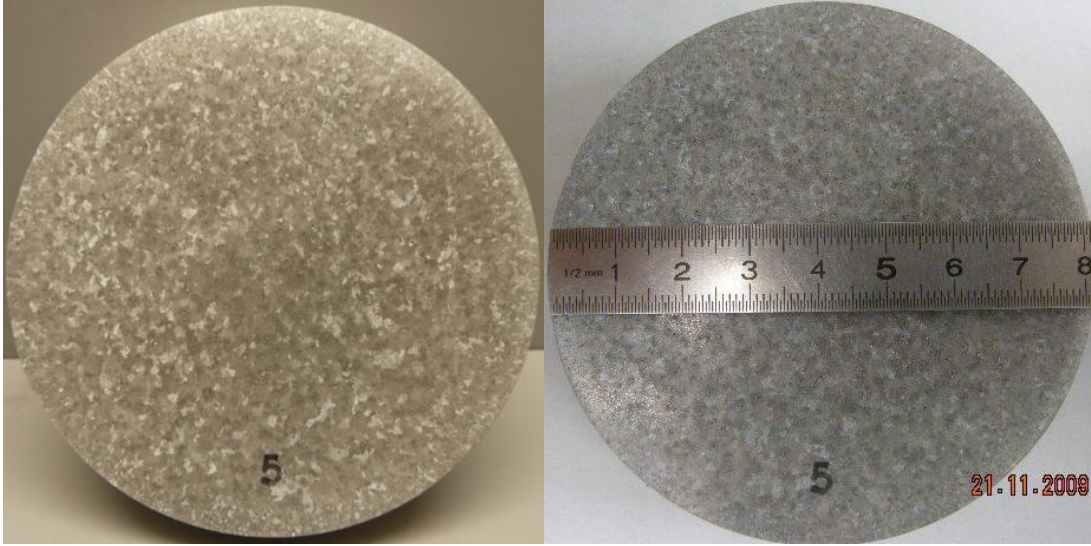
Ortalama tane büyüklüğü yaklaşık olarak 0,5 mm olarak ölçülmüştür.



**Şekil 4.40** : % 4 Si içeren 4 nolu alaşımın makro yapısı.

4 nolu alaşımda taneler eş eksenli dağılmıştır.

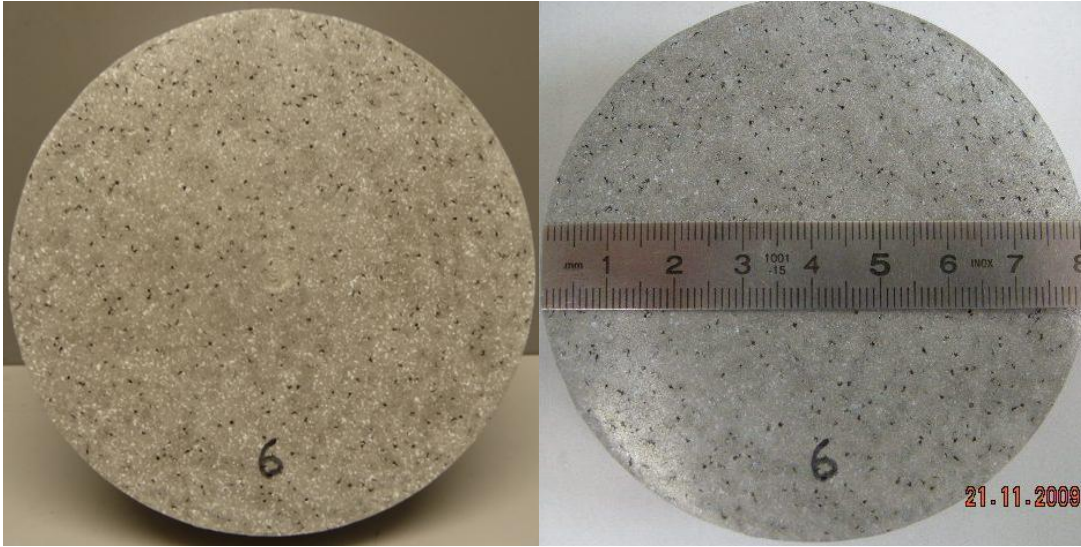
Ortalama tane büyüklüğü yaklaşık olarak 1 mm olarak ölçülmüştür.



**Şekil 4.41 :** % 7 Si içeren 5 nolu alaşımın makro yapısı.

5 nolu alaşımda taneler eş eksenli dağılmıştır.

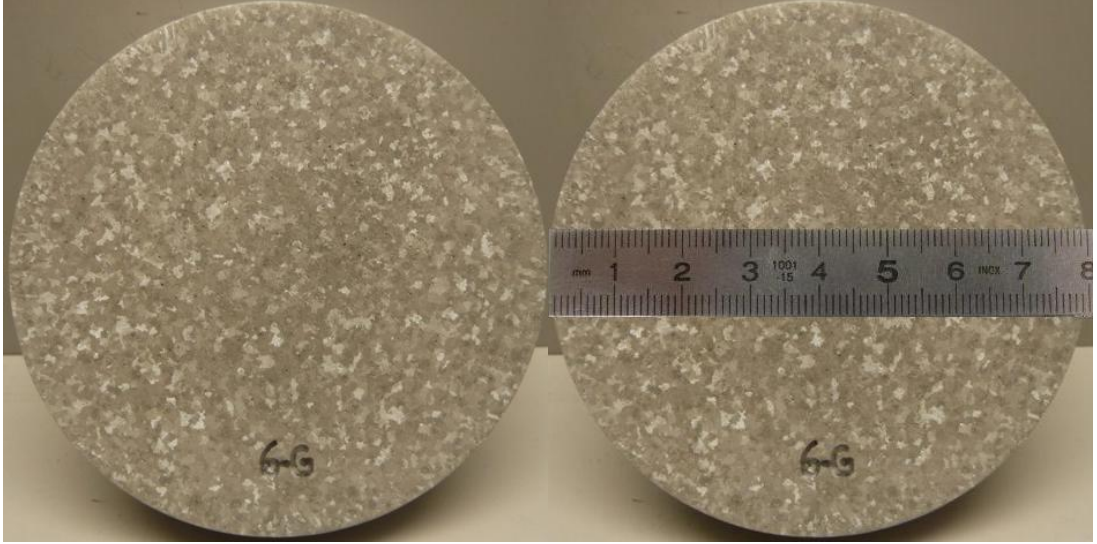
Ortalama tane büyüklüğü yaklaşık olarak 3 mm olarak ölçülmüştür.



**Şekil 4.42 :** % 4 Si içeren 6 nolu (eksik değerli) alaşımın makro yapısı.

6 nolu (eksik değerli) alaşımda çok ince taneler eş eksenli dağılmıştır.

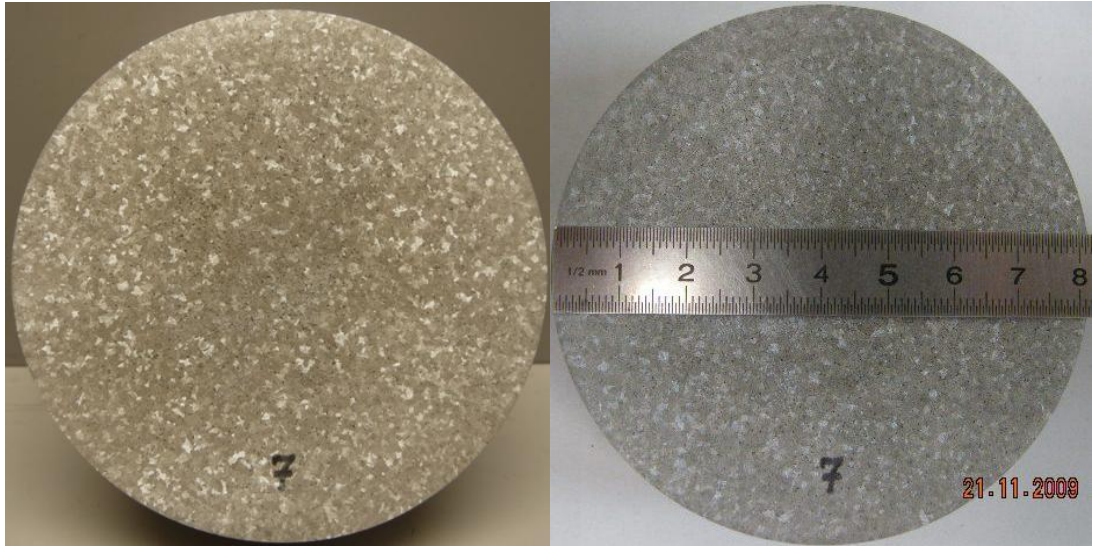
Ortalama tane büyüklüğü yaklaşık olarak 0,5 mm olarak ölçülmüştür.



**Şekil 4.43** : % 4 Si içeren 6 nolu alaşımın makro yapısı.

6 nolu alaşımda taneler eş eksenli dağılmıştır.

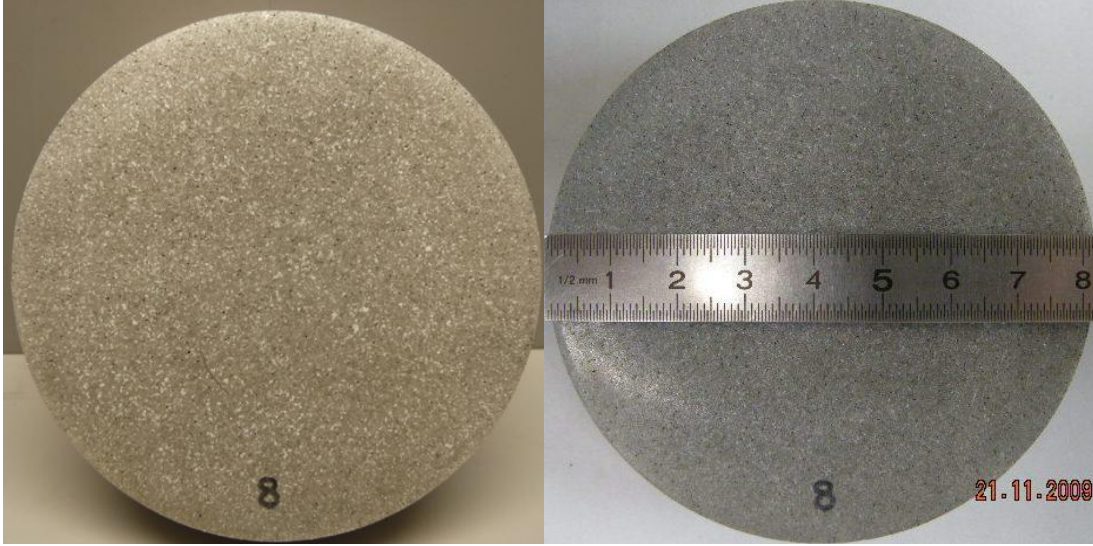
Ortalama tane büyüklüğü yaklaşık olarak 2 mm olarak ölçülmüştür.



**Şekil 4.44** : % 4 Si içeren 7 nolu alaşımın makro yapısı.

7 nolu alaşımda taneler eş eksenli dağılmıştır.

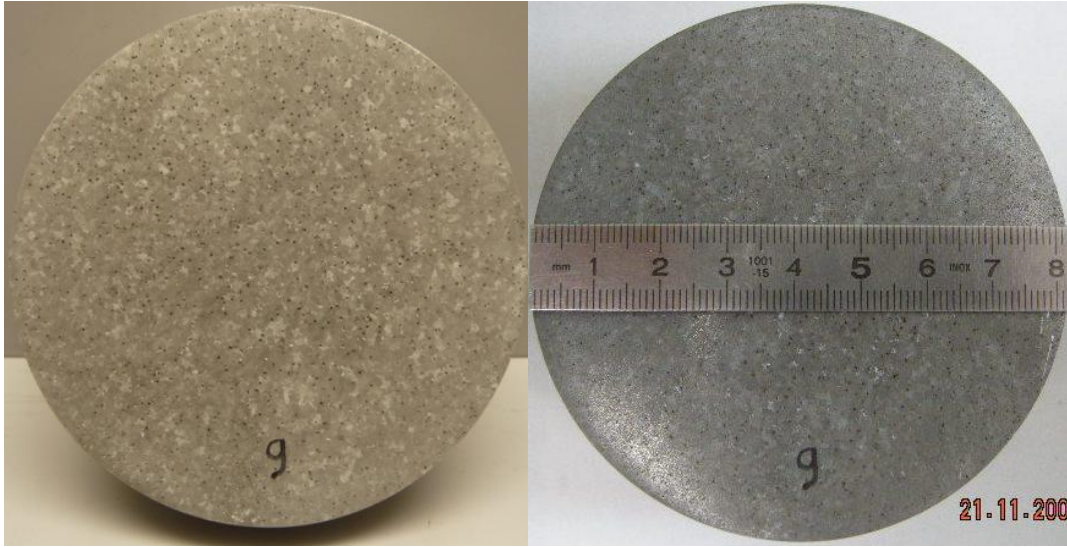
Ortalama tane büyüklüğü yaklaşık olarak 2 mm olarak ölçülmüştür.



**Şekil 4.45 :** % 4 Si içeren 8 nolu alaşımın makro yapısı.

8 nolu alaşımda taneler eş eksenli dağılmıştır.

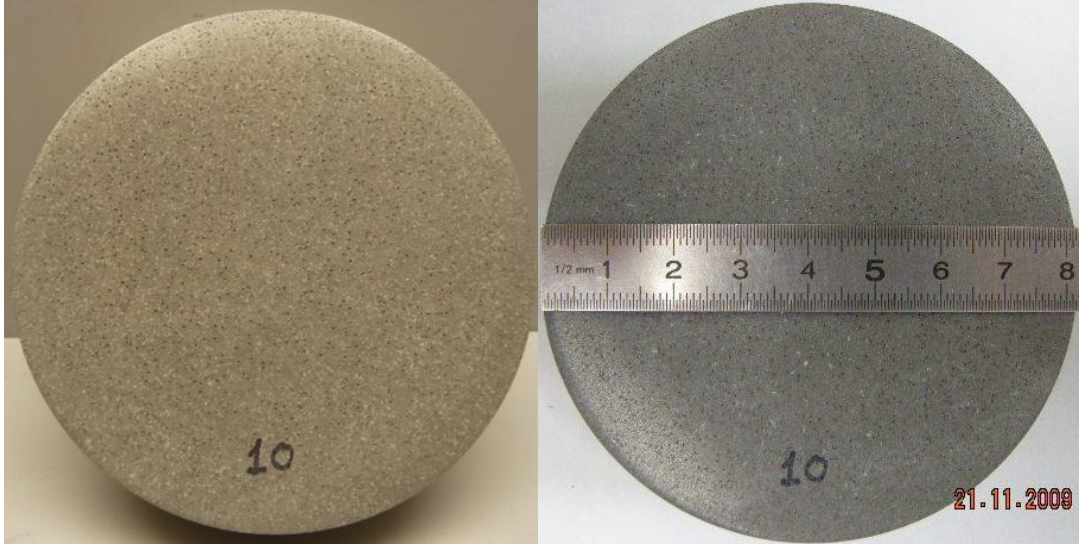
Ortalama tane büyüklüğü yaklaşık olarak 1 mm olarak ölçülmüştür.



**Şekil 4.46 :** % 7 Si içeren 9 nolu alaşımın makro yapısı.

9 nolu alaşımda taneler eş eksenli dağılmıştır.

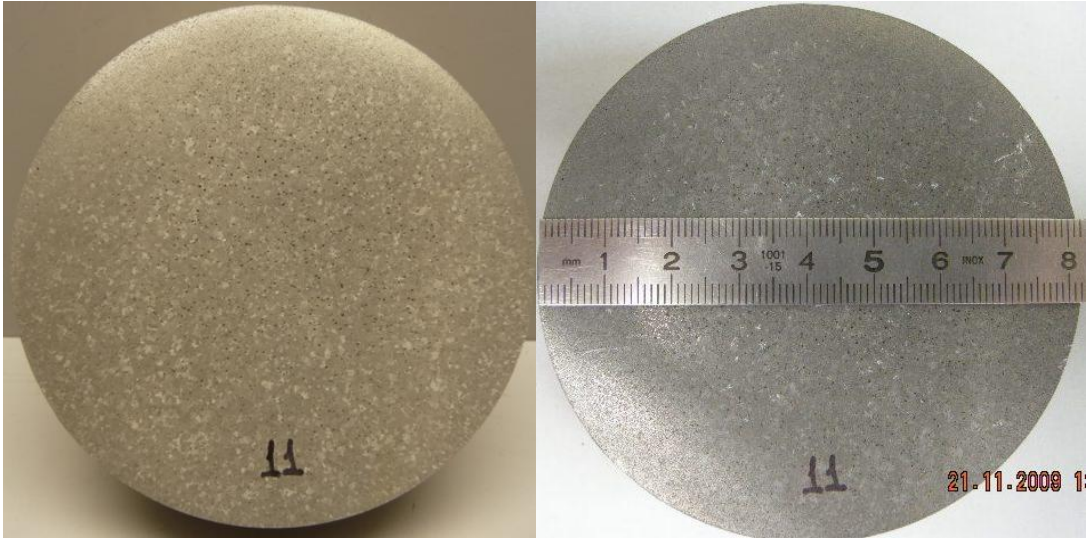
Ortalama tane büyüklüğü yaklaşık olarak 2,5 mm olarak ölçülmüştür.



**Şekil 4.47 :** % 4 Si içeren 10 nolu alaşımın makro yapısı.

10 nolu alaşımda çok ince taneler eş eksenli dağılmıştır.

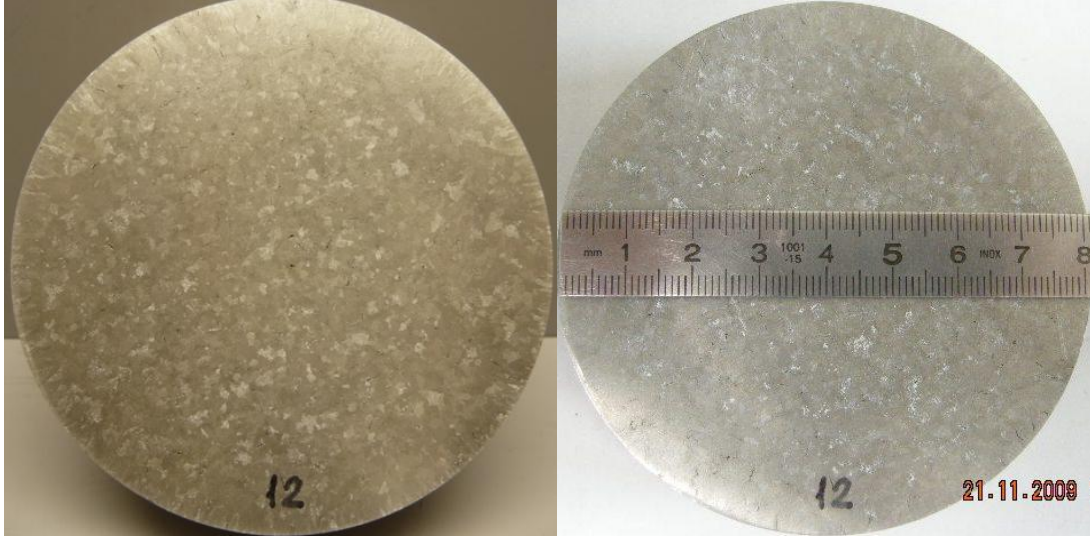
Ortalama tane büyüklüğü yaklaşık olarak 0,5 mm olarak ölçülmüştür.



**Şekil 4.48 :** % 7 Si içeren 11 nolu alaşımın makro yapısı.

11 nolu alaşımda taneler eş eksenli dağılmıştır.

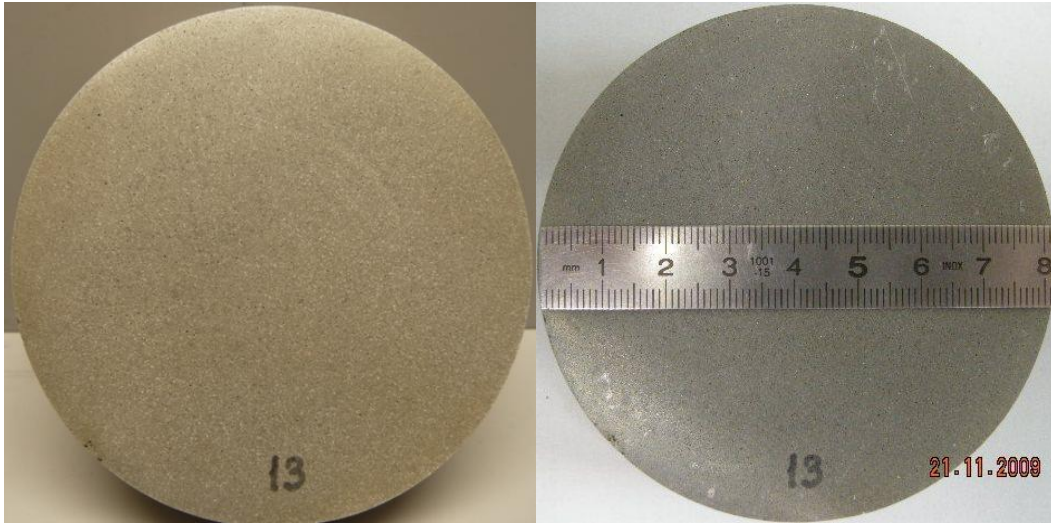
Ortalama tane büyüklüğü yaklaşık olarak 2 mm olarak ölçülmüştür.



**Şekil 4.49 :** % 7 Si içeren 12 nolu alaşımın makro yapısı.

12 nolu alaşımda taneler eş eksenli dağılmıştır.

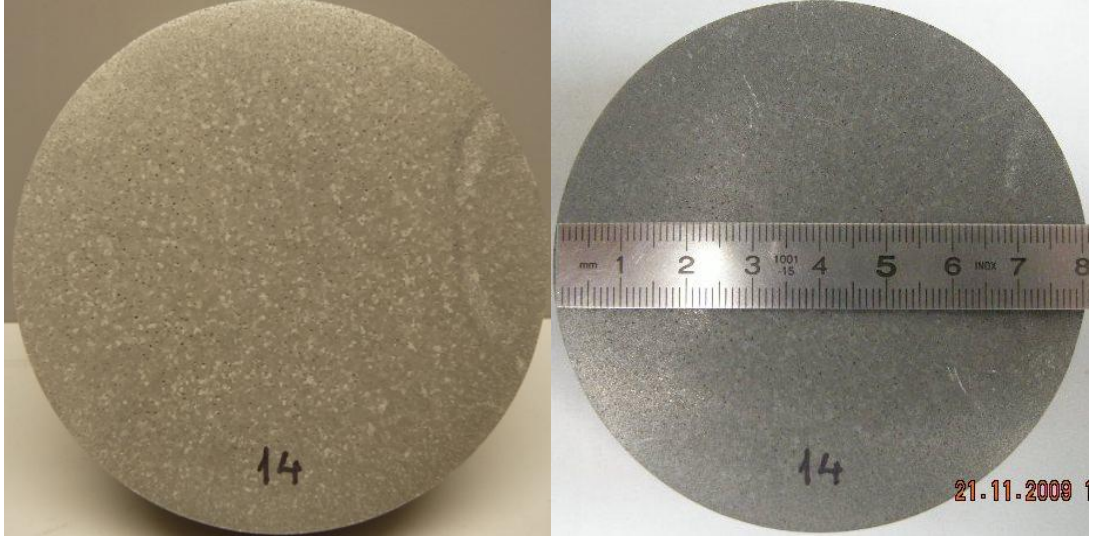
Ortalama tane büyüklüğü yaklaşık olarak 3 mm olarak ölçülmüştür.



**Şekil 4.50 :** % 7 Si içeren 13 nolu alaşımın makro yapısı.

13 nolu alaşımda çok ince taneler eş eksenli dağılmıştır.

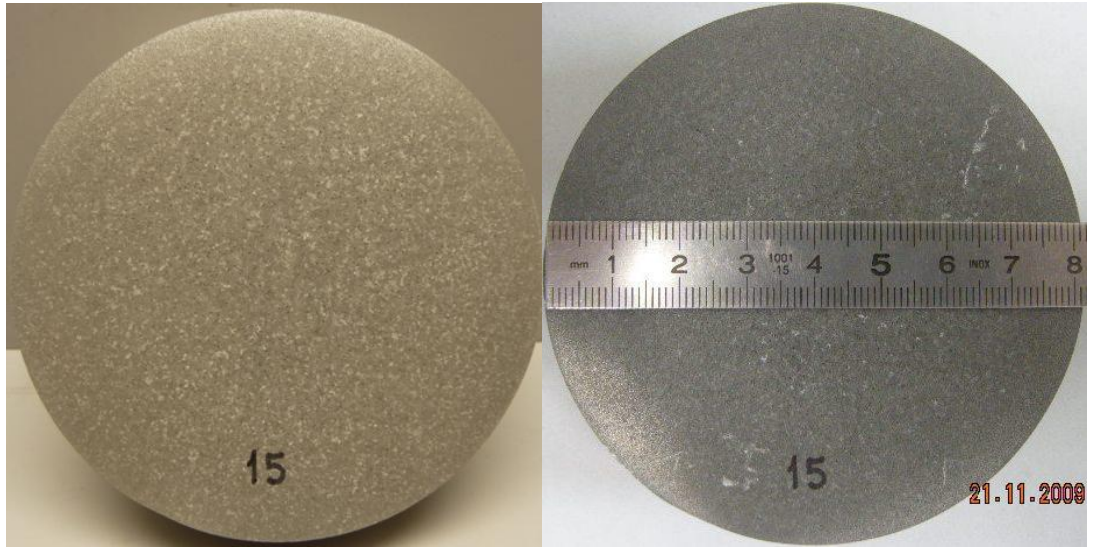
Ortalama tane büyüklüğü yaklaşık olarak 0,5 mm olarak ölçülmüştür.



**Şekil 4.51 :** % 4 Si içeren 14 nolu alaşımın makro yapısı.

14 nolu alaşımda taneler eş eksenli dağılmıştır.

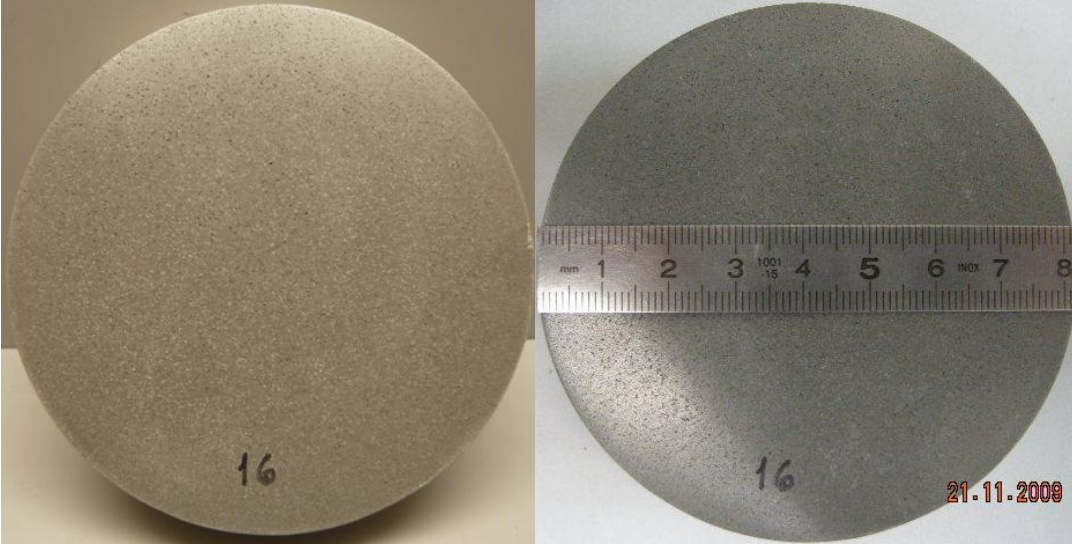
Ortalama tane büyüklüğü yaklaşık olarak 1 mm olarak ölçülmüştür.



**Şekil 4.52 :** % 7 Si içeren 15 nolu alaşımın makro yapısı.

15 nolu alaşımda taneler eş eksenli dağılmıştır.

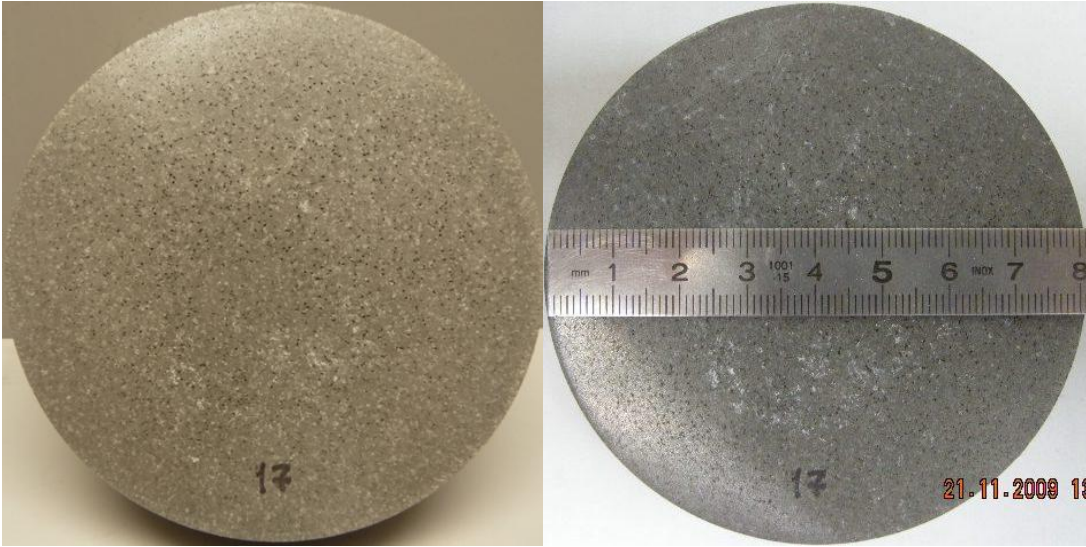
Ortalama tane büyüklüğü yaklaşık olarak 1 mm olarak ölçülmüştür.



**Şekil 4.53 :** % 4 Si içeren 16 nolu alaşımın makro yapısı.

16 nolu alaşımda çok ince taneler eş eksenli dağılmıştır.

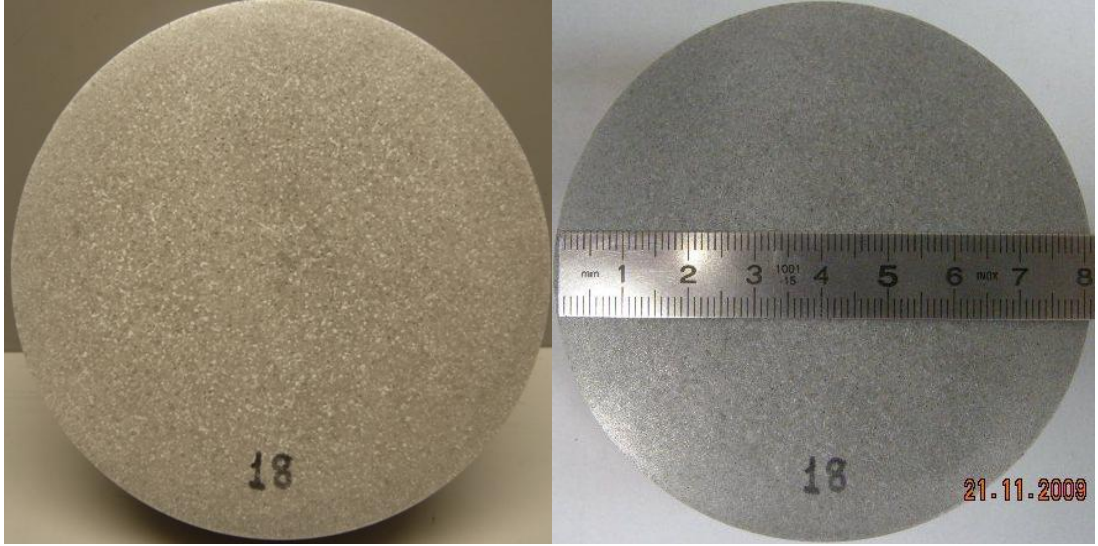
Ortalama tane büyüklüğü yaklaşık olarak 0,5 mm olarak ölçülmüştür.



**Şekil 4.54 :** % 4 Si içeren 17 nolu alaşımın makro yapısı.

17 nolu alaşımda taneler eş eksenli dağılmıştır.

Ortalama tane büyüklüğü yaklaşık olarak 1 mm olarak ölçülmüştür.



**Şekil 4.55 :** % 4 Si içeren 18 nolu alaşımın makro yapısı.

18 nolu alaşımda taneler eş eksenli dağılmıştır.

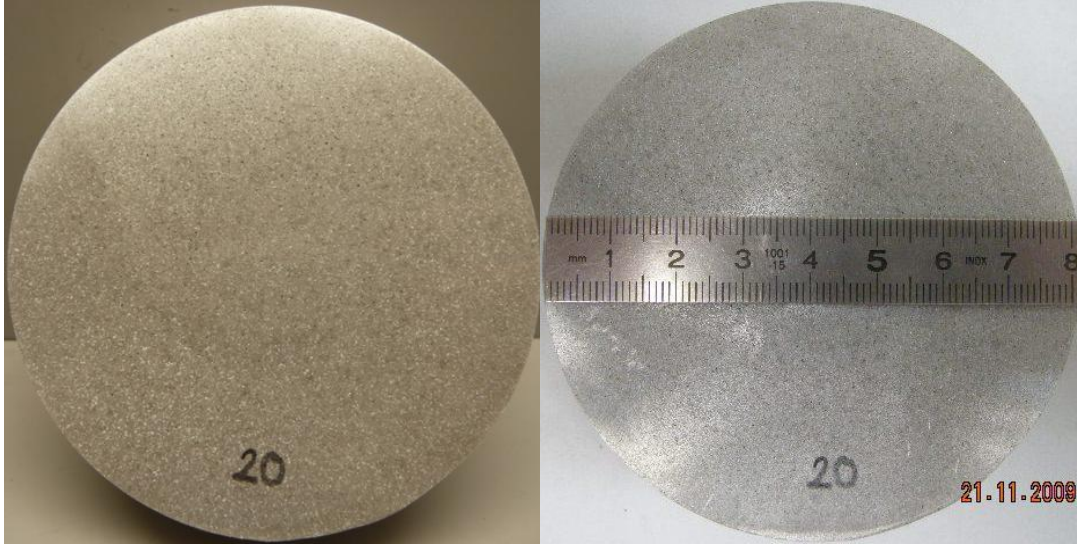
Ortalama tane büyüklüğü yaklaşık olarak 1 mm olarak ölçülmüştür.



**Şekil 4.56 :** % 4 Si içeren 19 nolu alaşımın makro yapısı.

19 nolu alaşımda taneler eş eksenli dağılmıştır.

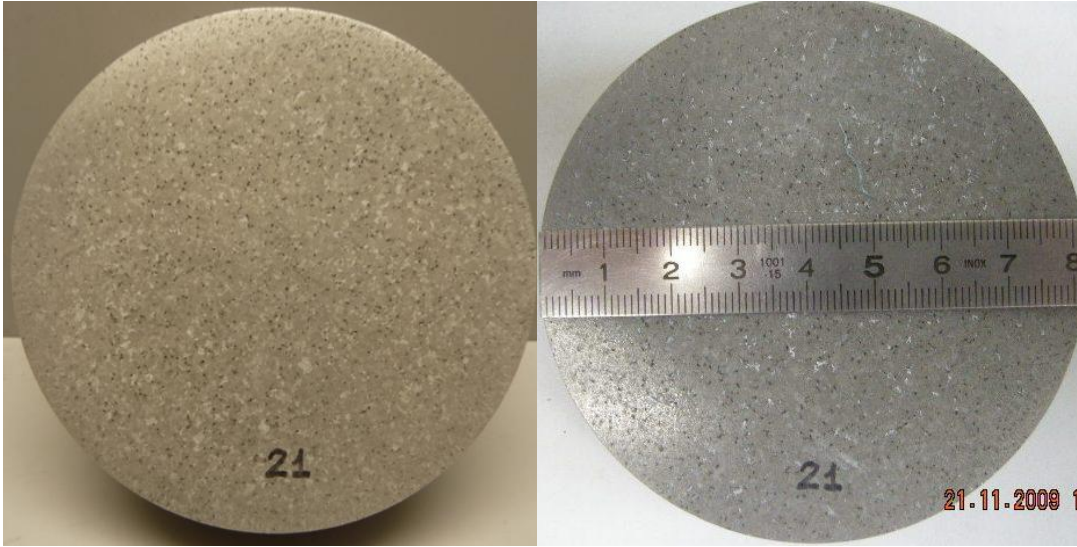
Ortalama tane büyüklüğü yaklaşık olarak 1 mm olarak ölçülmüştür.



**Şekil 4.57 :** % 4 Si içeren 20 nolu alaşımın makro yapısı.

20 nolu alaşımda çok ince taneler eş eksenli dağılmıştır.

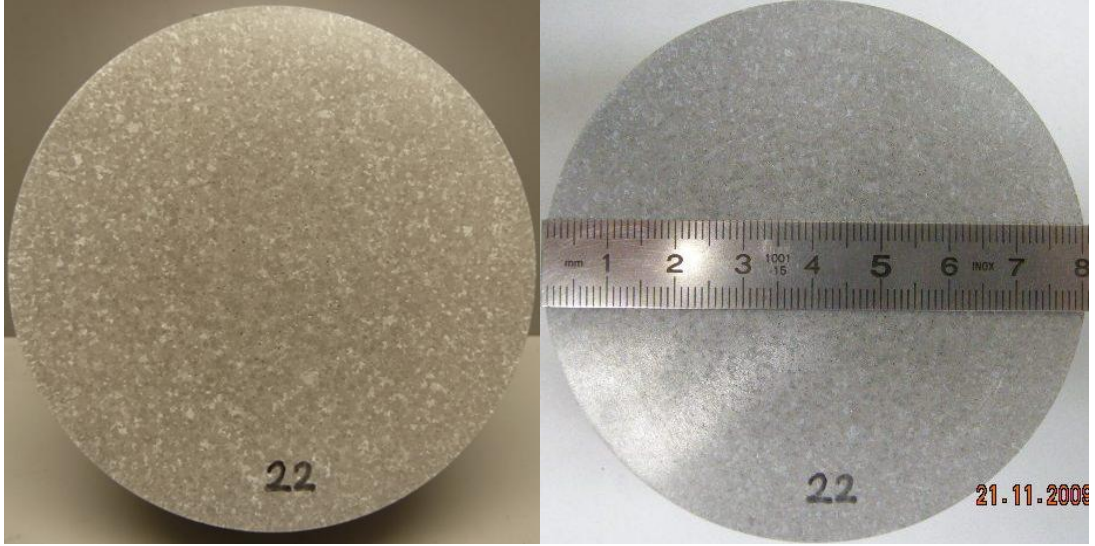
Ortalama tane büyüklüğü yaklaşık olarak 0,5 mm olarak ölçülmüştür.



**Şekil 4.58 :** % 7 Si içeren 21 nolu alaşımın makro yapısı.

21 nolu alaşımda taneler eş eksenli dağılmıştır.

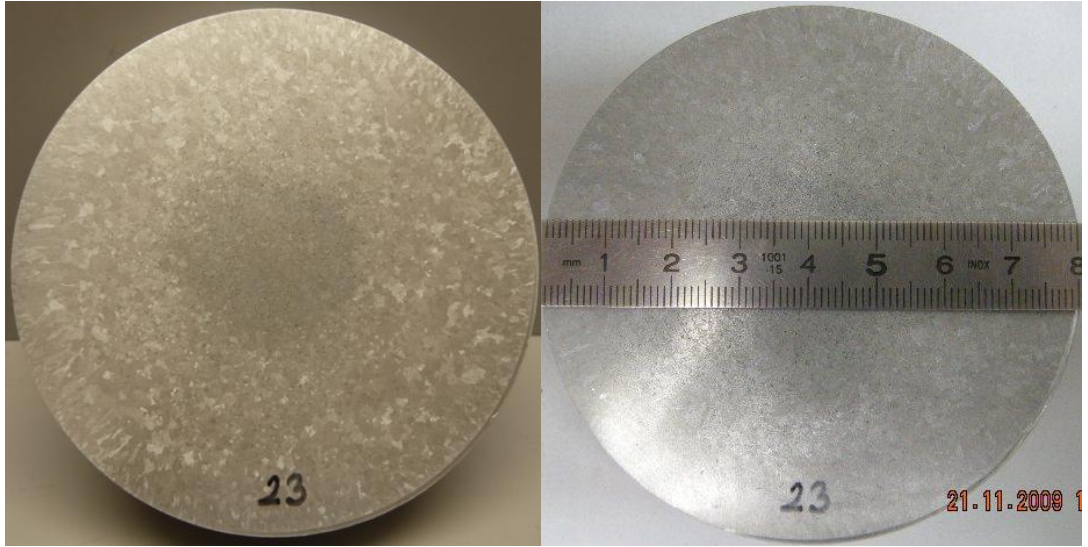
Ortalama tane büyüklüğü yaklaşık olarak 2 mm olarak ölçülmüştür.



**Şekil 4.59 :** % 7 Si içeren 22 nolu alaşımın makro yapısı.

22 nolu alaşımda taneler eş eksenli dağılmıştır.

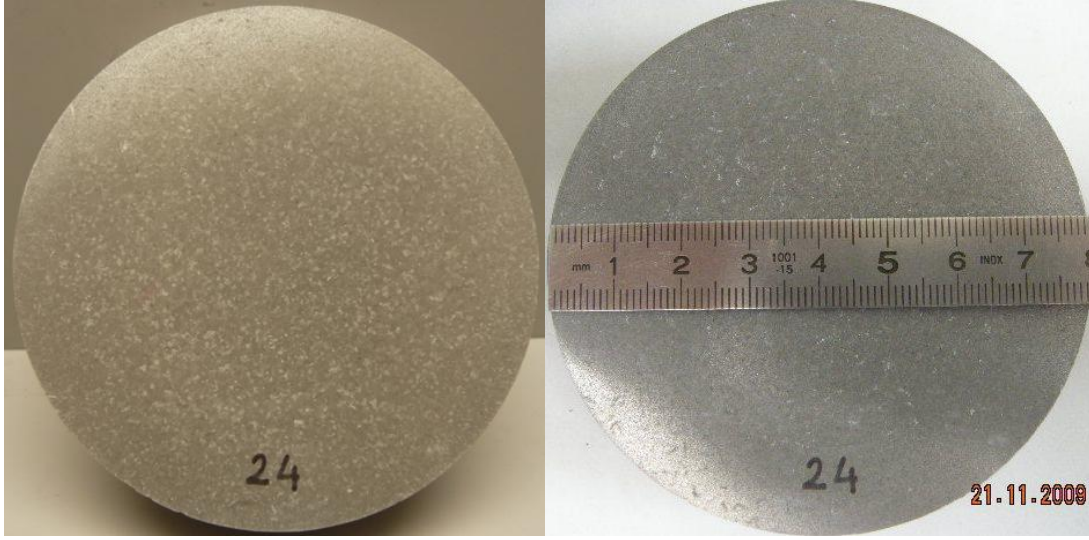
Ortalama tane büyüklüğü yaklaşık olarak 2 mm olarak ölçülmüştür.



**Şekil 4.60 :** % 7 Si içeren 23 nolu alaşımın makro yapısı.

23 nolu alaşımda taneler eş eksenli dağılmıştır.

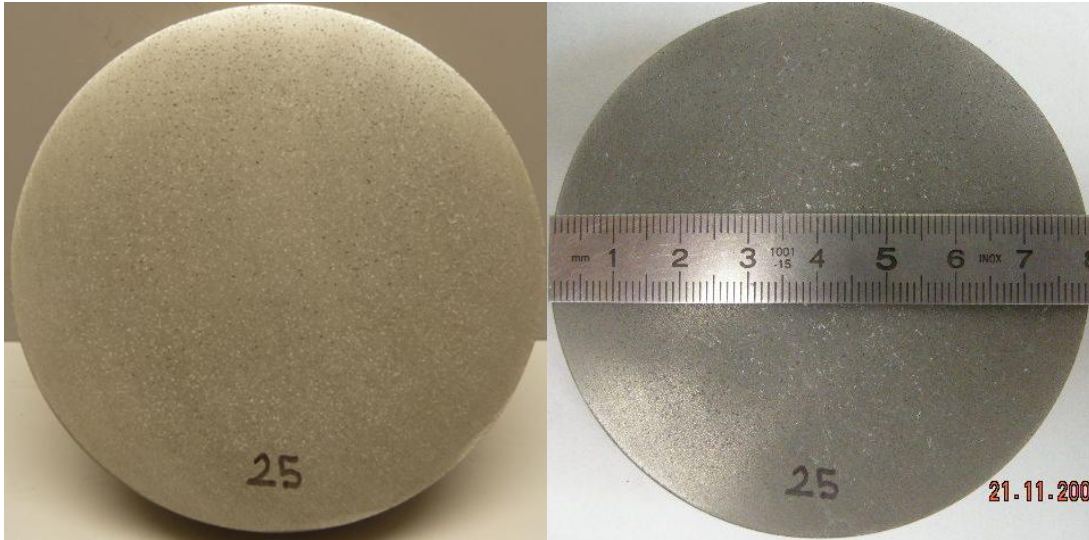
Ortalama tane büyüklüğü yaklaşık olarak 3 mm olarak ölçülmüştür.



**Şekil 4.61 :** % 4 Si içeren 24 nolu alaşımın makro yapısı.

24 nolu alaşımda taneler eş eksenli dağılmıştır.

Ortalama tane büyüklüğü yaklaşık olarak 1,5 mm olarak ölçülmüştür.



**Şekil 4.62 :** % 4 Si içeren 25 nolu alaşımın makro yapısı.

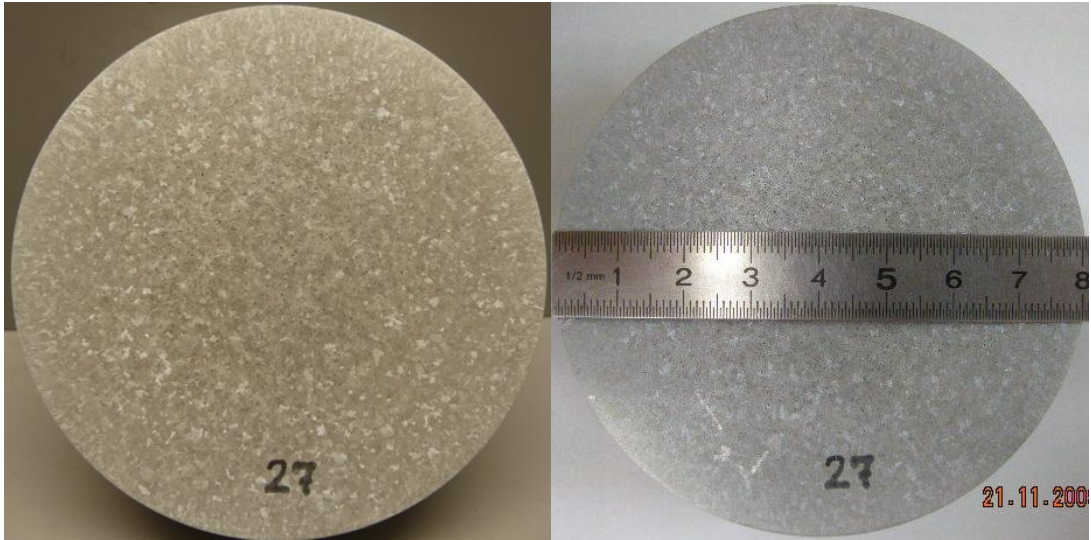
25 nolu alaşımda çok ince taneler eş eksenli dağılmıştır. Ortalama tane büyüklüğü yaklaşık olarak 0,5 mm olarak ölçülmüştür.



**Şekil 4.63 :** % 7 Si içeren 26 nolu alaşımın makro yapısı.

26 nolu alaşımda taneler eş eksenli dağılmıştır.

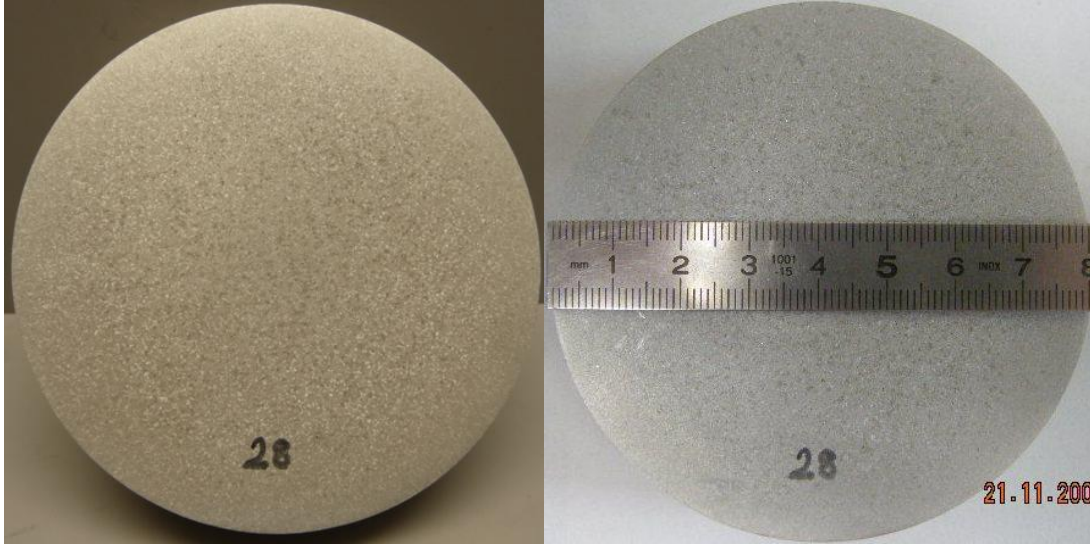
Ortalama tane büyüklüğü yaklaşık olarak 3 mm olarak ölçülmüştür.



**Şekil 4.64 :** % 7 Si içeren 27 nolu alaşımın makro yapısı.

27 nolu alaşımda taneler eş eksenli dağılmıştır.

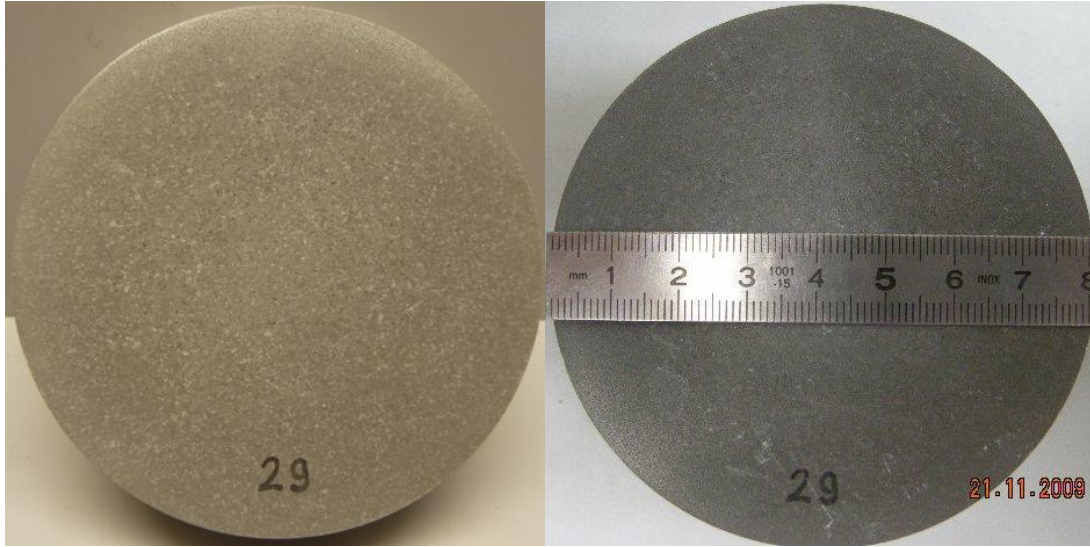
Ortalama tane büyüklüğü yaklaşık olarak 2 mm olarak ölçülmüştür.



**Şekil 4.65 :** % 4 Si içeren 28 nolu alaşımın makro yapısı.

28 nolu alaşımda çok ince taneler eş eksenli dağılmıştır.

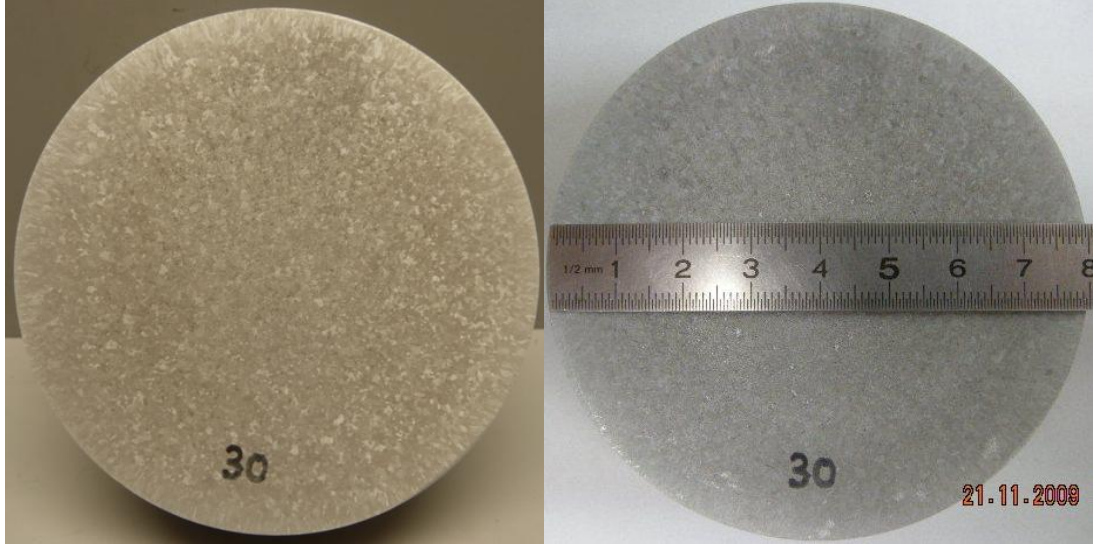
Ortalama tane büyüklüğü yaklaşık olarak 0,5 mm olarak ölçülmüştür.



**Şekil 4.66 :** % 7 Si içeren 29 nolu alaşımın makro yapısı.

29 nolu alaşımda çok ince taneler eş eksenli dağılmıştır.

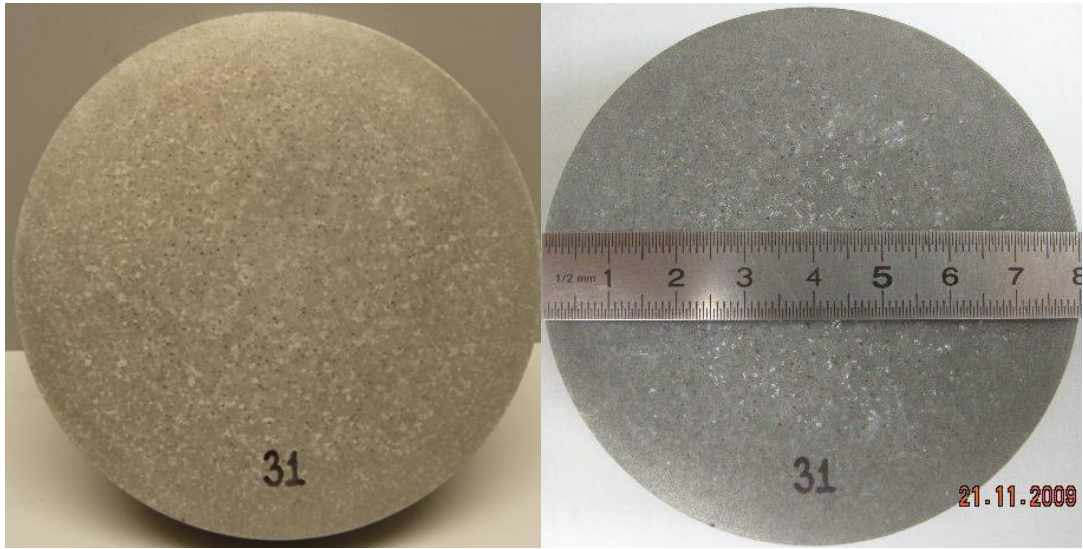
Ortalama tane büyüklüğü yaklaşık olarak 0,5 mm olarak ölçülmüştür.



**Şekil 4.67 :** % 7 Si içeren 30 nolu alaşımın makro yapısı.

30 nolu alaşımda taneler eş eksenli dağılmıştır.

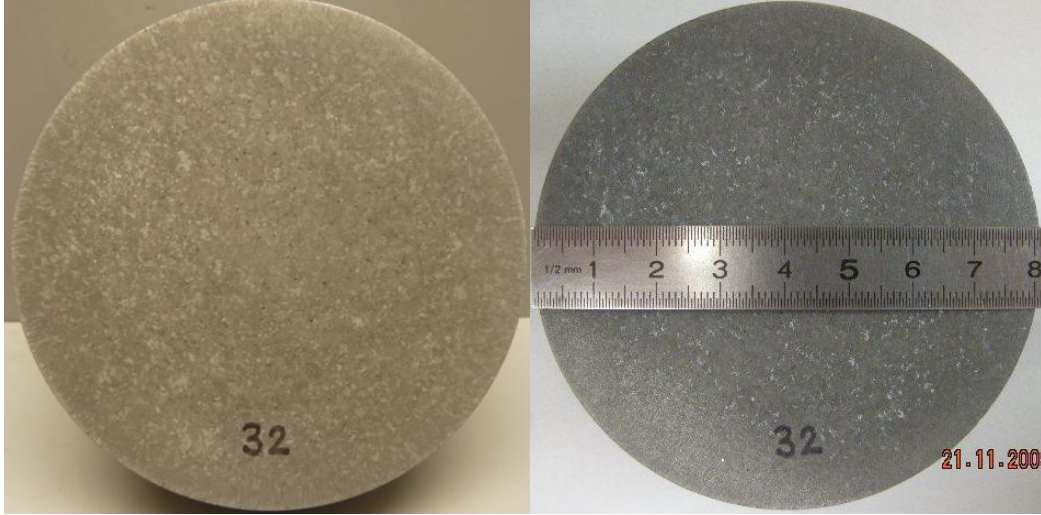
Ortalama tane büyüklüğü yaklaşık olarak 1,5 mm olarak ölçülmüştür.



**Şekil 4.68 :** % 7 Si içeren 31 nolu alaşımın makro yapısı.

31 nolu alaşımda taneler eş eksenli dağılmıştır.

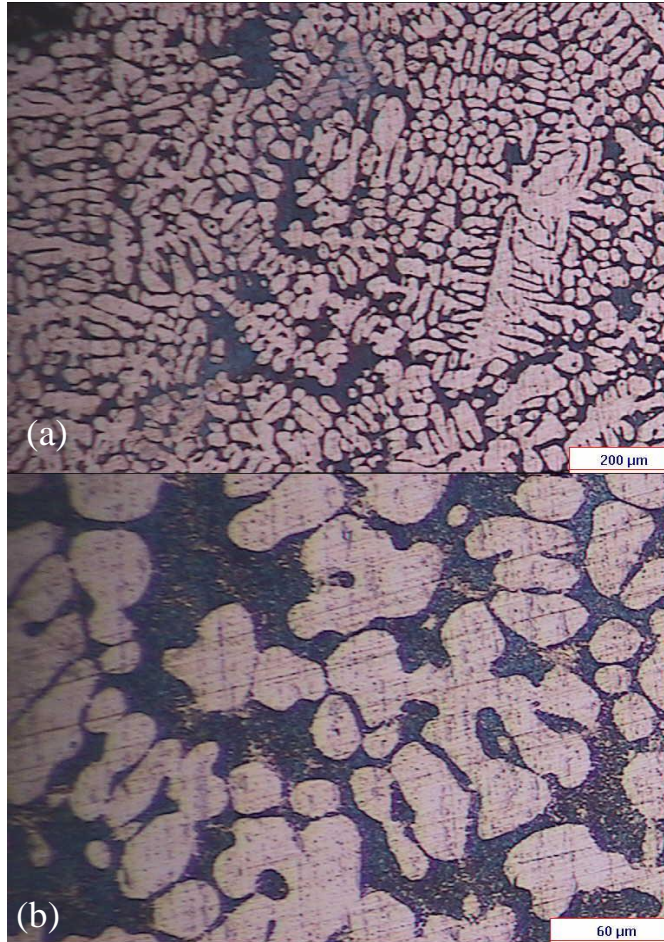
Ortalama tane büyüklüğü yaklaşık olarak 1,5 mm olarak ölçülmüştür.



**Şekil 4.69 :** % 4 Si içeren 32 nolu alaşımın makro yapısı.

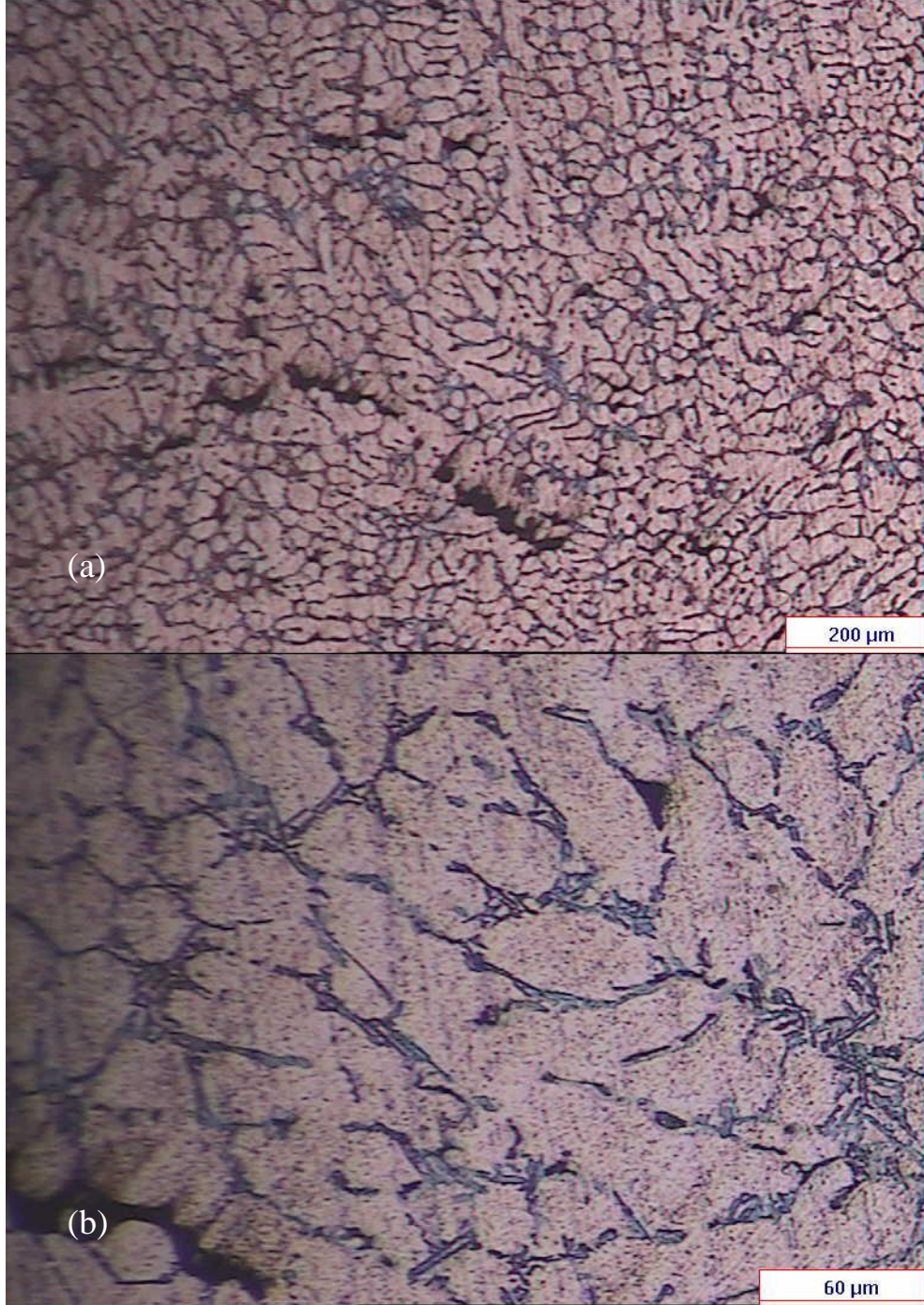
32 nolu alaşımda taneler eş eksenli dağılmıştır. Ortalama tane büyüklüğü yaklaşık olarak 1,5 mm olarak ölçülmüştür.

#### 4.10 Mikro Numunelerinin Analizi



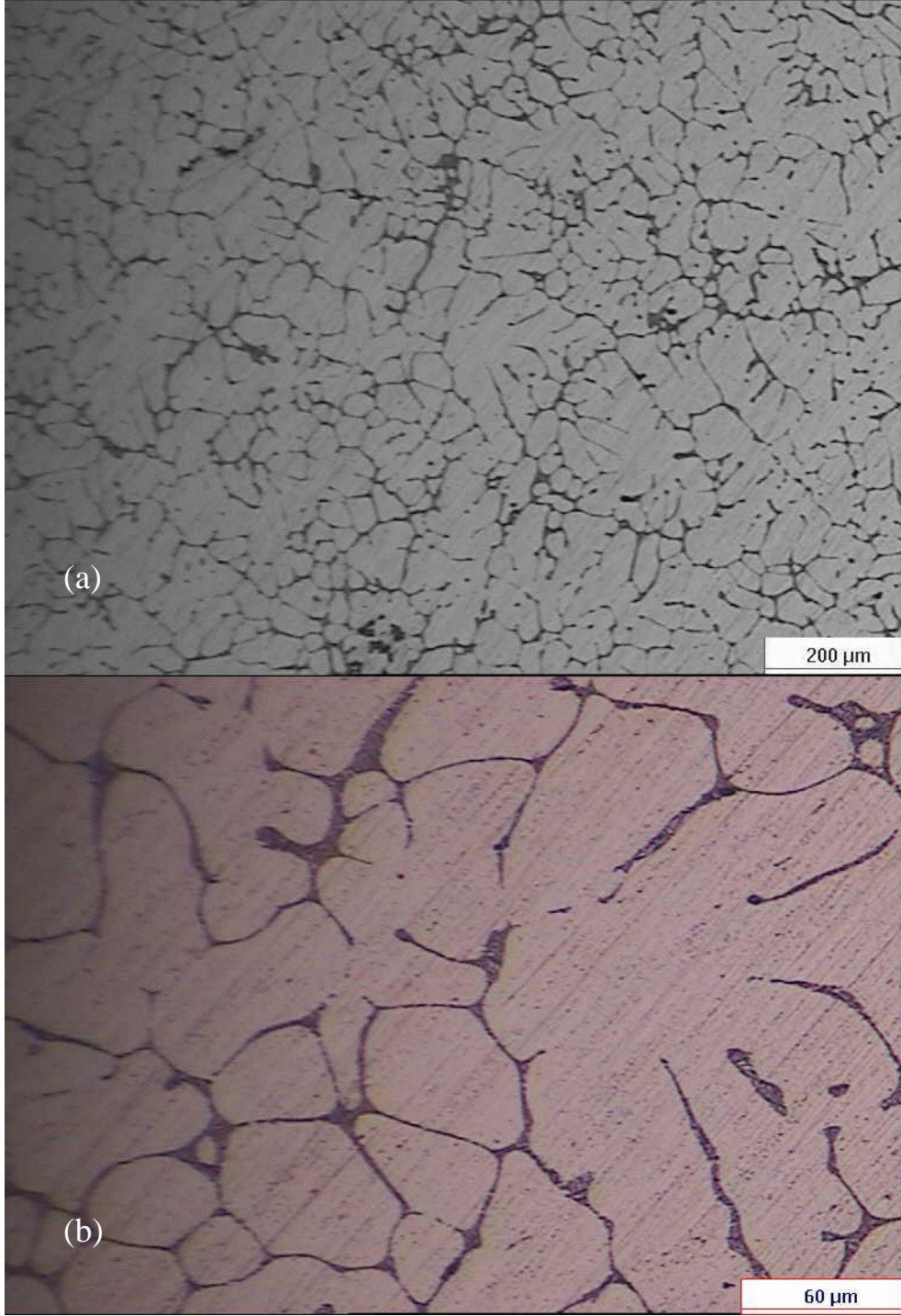
**Şekil 4.70 :** % 7 Si içeren referans alaşım mikro yapısı (a) 5x ve (b) 20x büyütme.

Şekil 4.70’de verilen referans alaşımında dendritik yapı homojen ve eşeksenli dağılmıştır. Ötektik yapı içerisinde mikro çekintiler görülmektedir. Ötektik yapı iyi modifiye olmuştur.



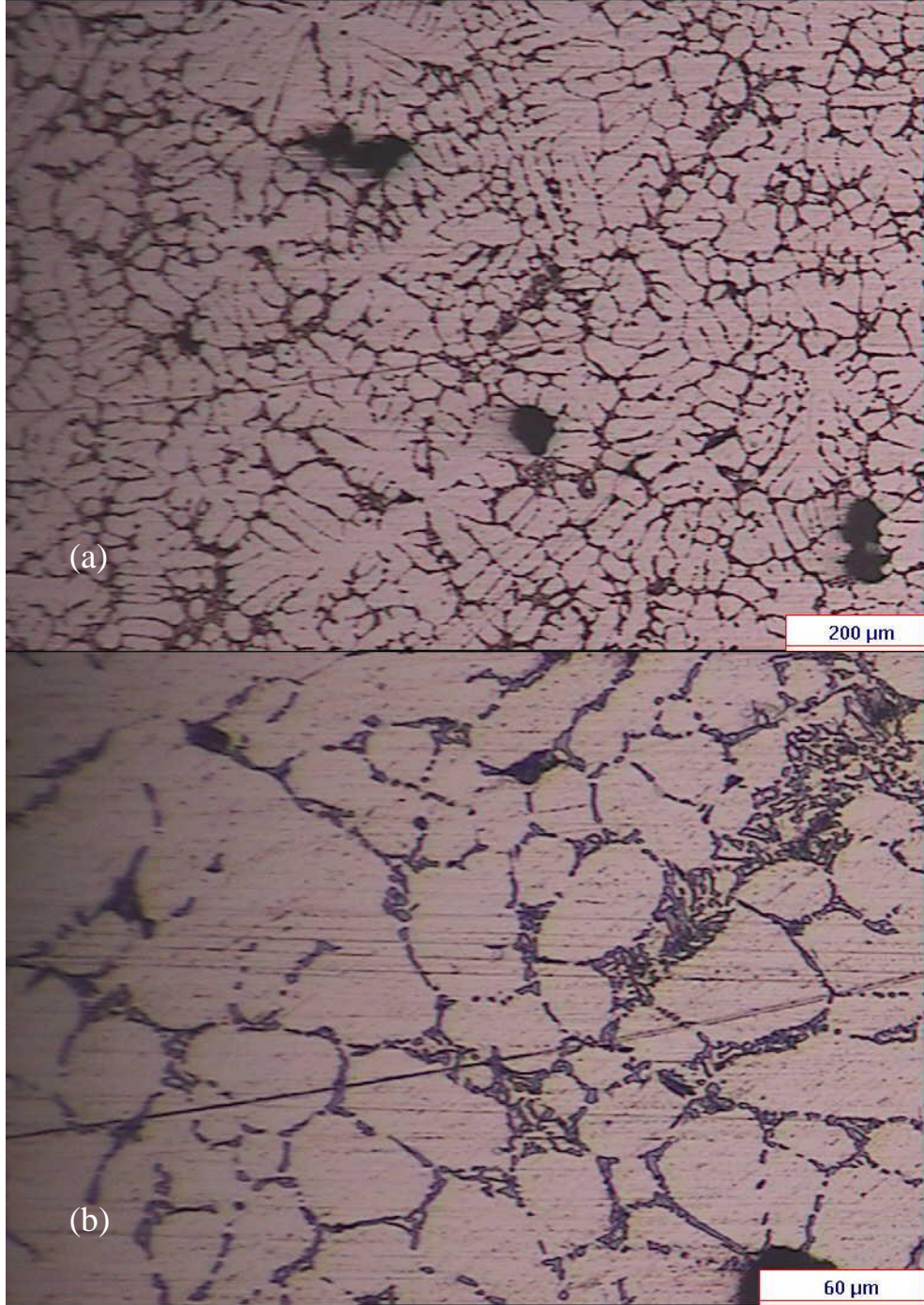
Şekil 4.71 : % 7 Si içeren 1 nolu alaşım mikro yapısı (a) 5x ve (b) 20x büyütme.

Şekil 4.71’de gösterilen % 7 Si içeren 1 nolu alaşımında dendritik yapı homojen ve eşeksenli dağılmıştır. Ötektik yapı içerisinde mikro çekintiler görülmektedir. Ötektik yapı modifiye olmamıştır. Primer silisyumlar mevcuttur.



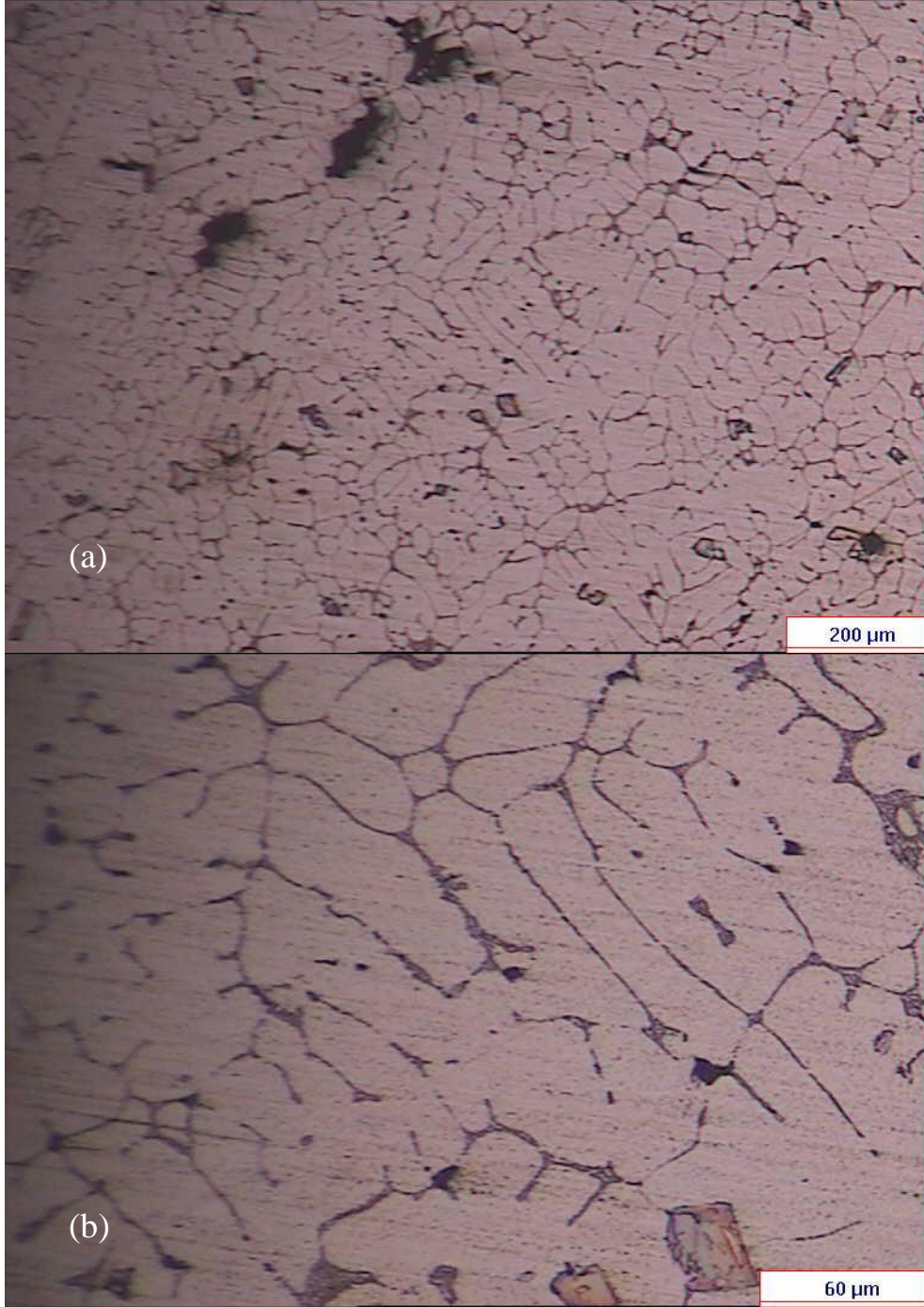
**Şekil 4.72 :** % 4 Si içeren 2 nolu alaşım mikro yapısı (a) 5x ve (b) 20x büyütme.

2 nolu % 4 Si içeren alaşımda dendritik yapı homojen dağılmıştır. Ötektik yapı içerisinde mikro çekintiler görülmektedir. Ötektik yapı çok iyi modifiye olmuştur.



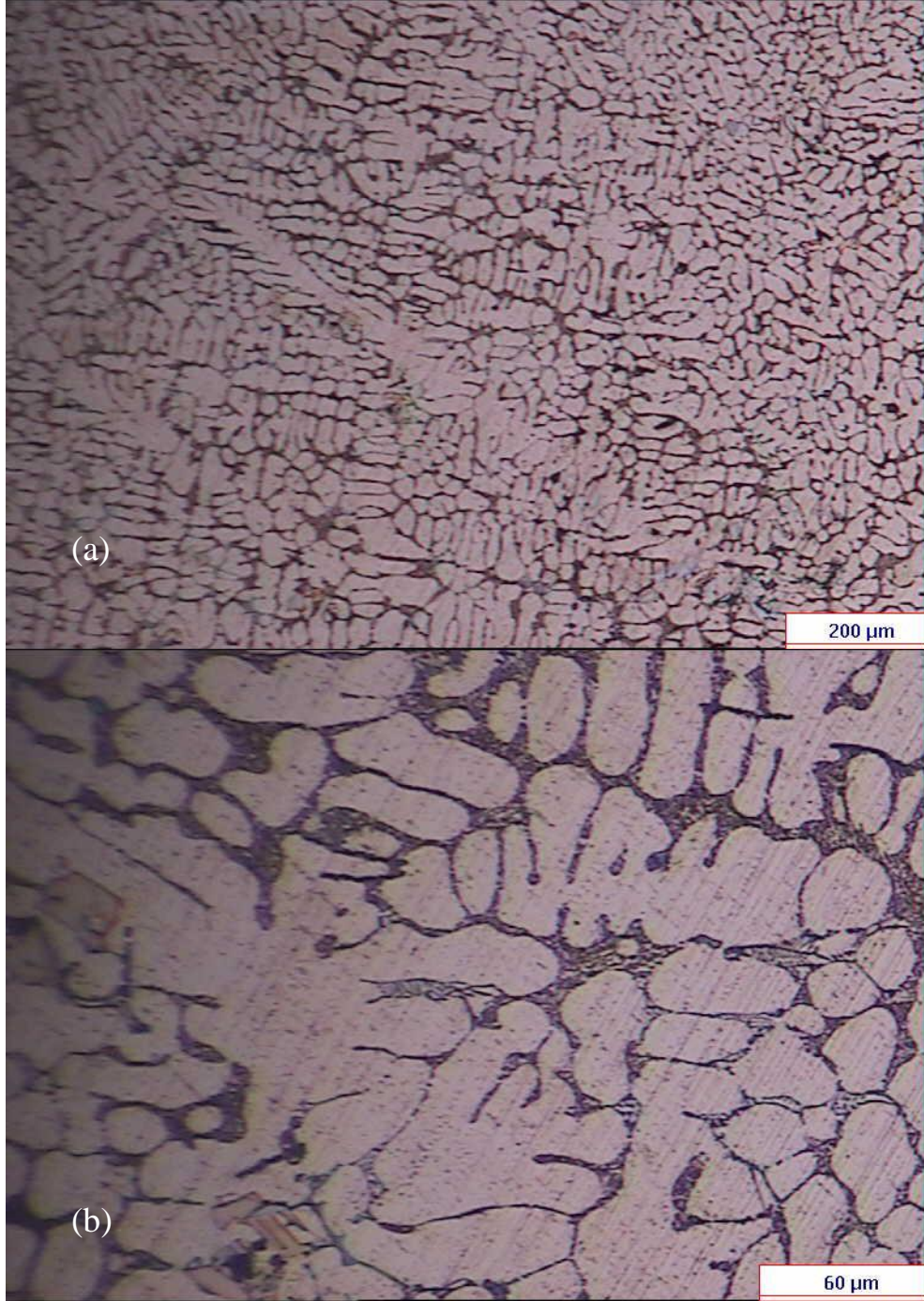
**Şekil 4.73** : % 7 Si içeren 3 nolu alaşım mikro yapısı (a) 5x ve (b) 20x büyütme.

3 nolu % 7 Si içeren alaşımda dendritik yapı homojen ve eşeksenli dağılmıştır. Ötektik yapı içerisinde mikro çekintiler ve gaz poroziteleri görülmektedir. Ötektik yapı modifiye olmamıştır. Primer silisyumlar mevcuttur.



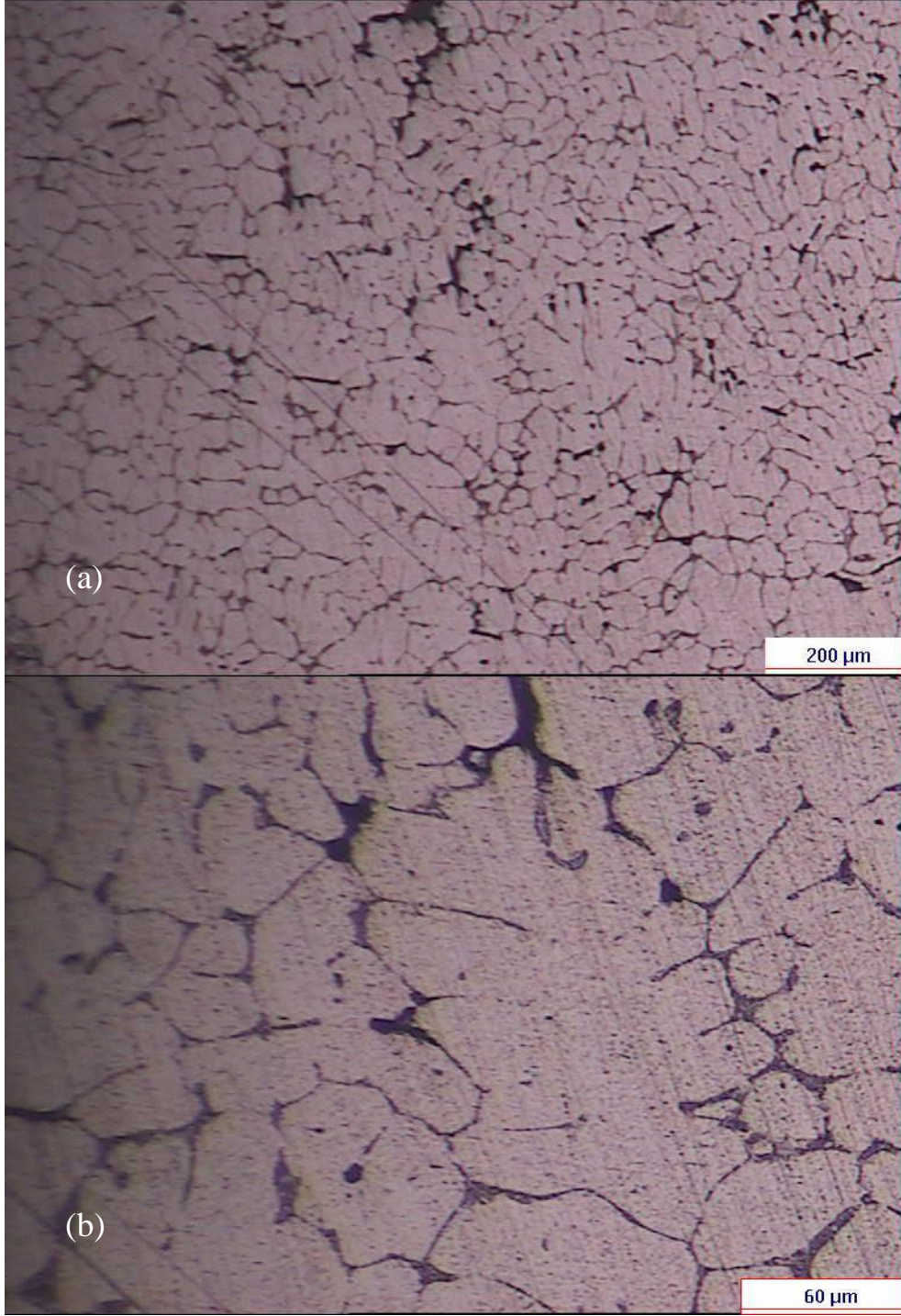
**Şekil 4.74** : % 4 Si içeren 4 nolu alaşım mikro yapısı (a) 5x ve (b) 20x büyütme.

4 nolu % 4 Si içeren alaşımda dendritik yapı homojen ve eşeksensiz dağılmıştır. Ötektik yapı içerisinde mikro çekintiler ve gaz poroziteleri görülmektedir. Ötektik yapı modifiye olmuştur.



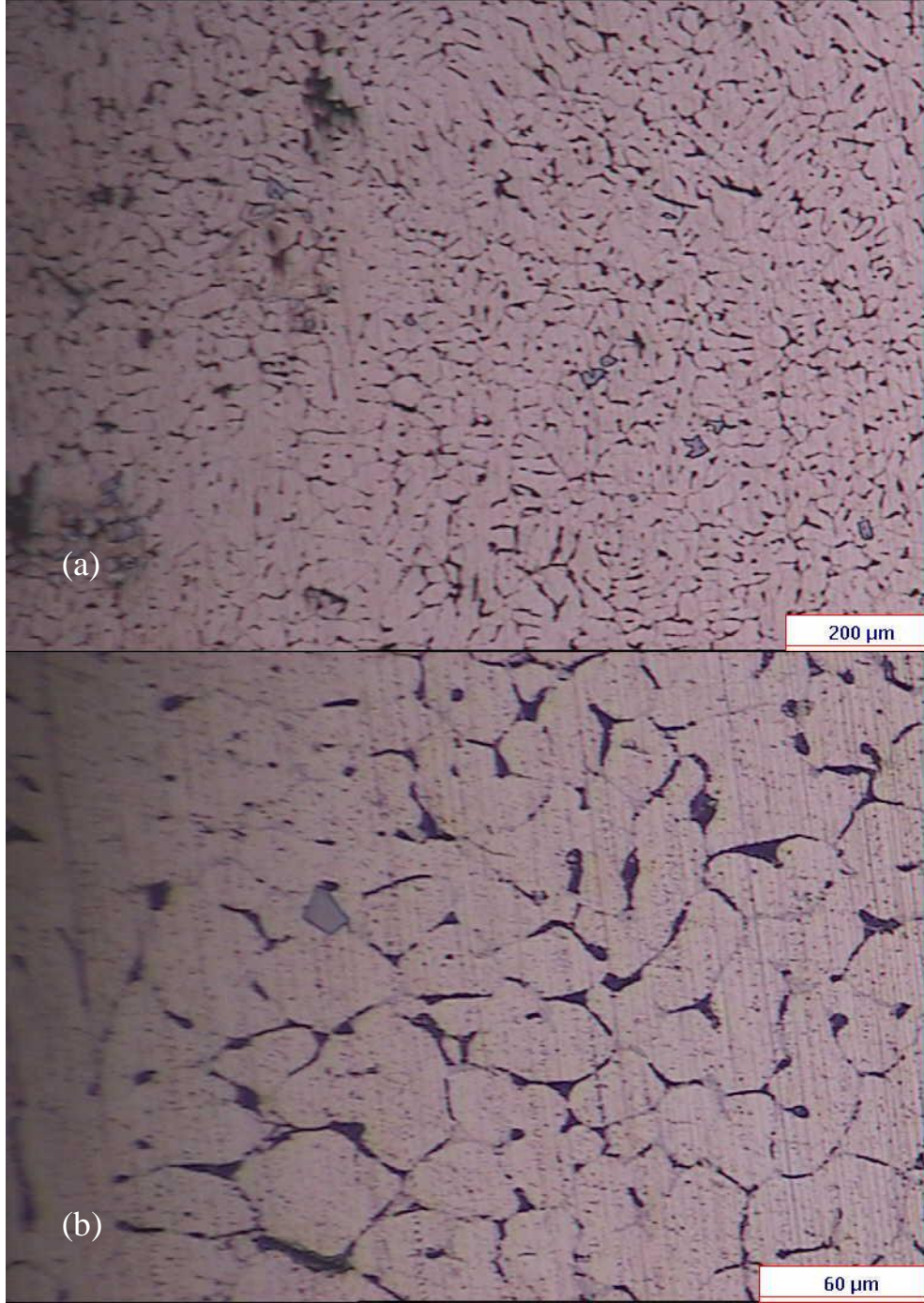
**Şekil 4.75 :** % 7 Si içeren 5 nolu alaşım mikro yapısı (a) 5x ve (b) 20x büyütme.

5 nolu % 7 Si içeren alaşımda dendritik yapı homojen ve eşekslenli dağılmıştır. Ötektik yapı içerisinde mikro çekintiler görülmektedir. Ötektik yapı modifiye olmuştur.



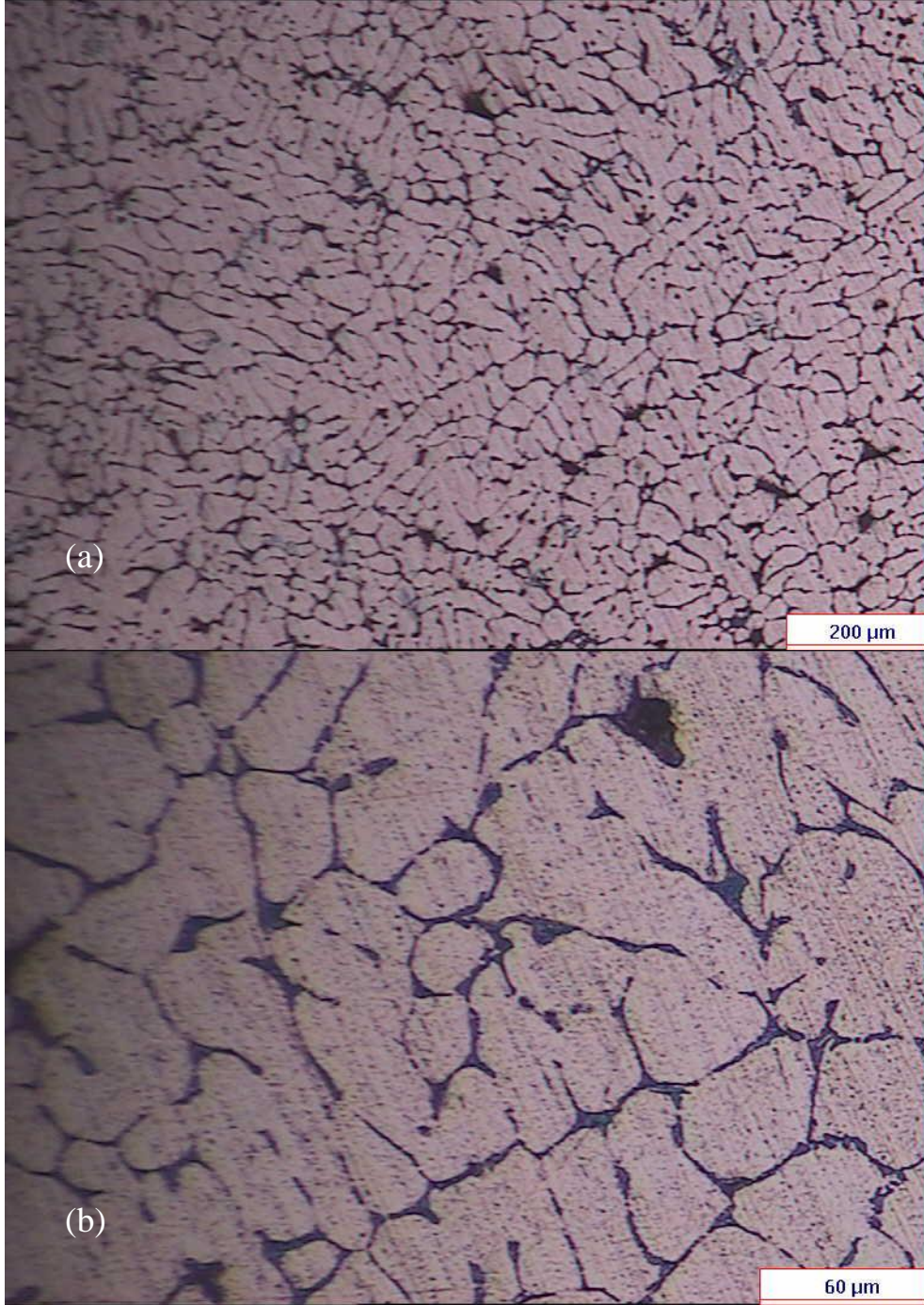
**Şekil 4.76 :** % 4 Si içeren 6 nolu (eksik değerli) alaşım mikro yapısı (a) 5x ve (b) 20x büyütme.

6 nolu (eksik değerli) % 4 Si içeren alaşımında dendritik yapı homojen dağılmıştır. Ötektik yapı içerisinde yoğun mikro çekintiler görülmektedir. Ötektik yapı modifiye olmamıştır.



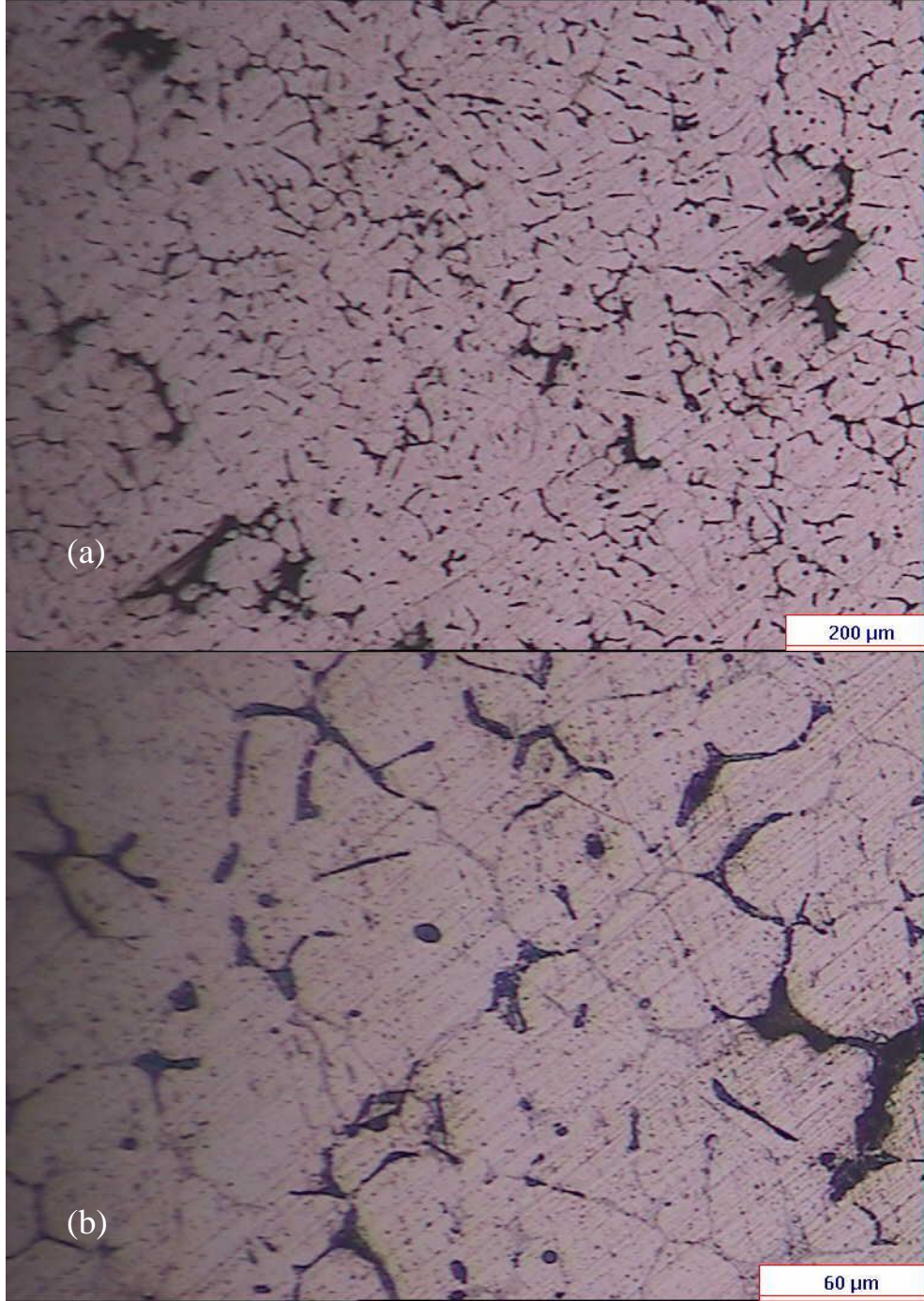
**Şekil 4.77 :** % 4 Si içeren 6 nolu alaşım mikro yapısı (a) 5x ve (b) 20x büyütme.

6 nolu % 4 Si içeren alaşımda dendritik yapı homojen dağılmıştır. Ötektik yapı içerisinde mikro çekintiler görülmektedir. Ötektik yapı iyi modifiye olmuştur. Primer silisyumlar mevcuttur.



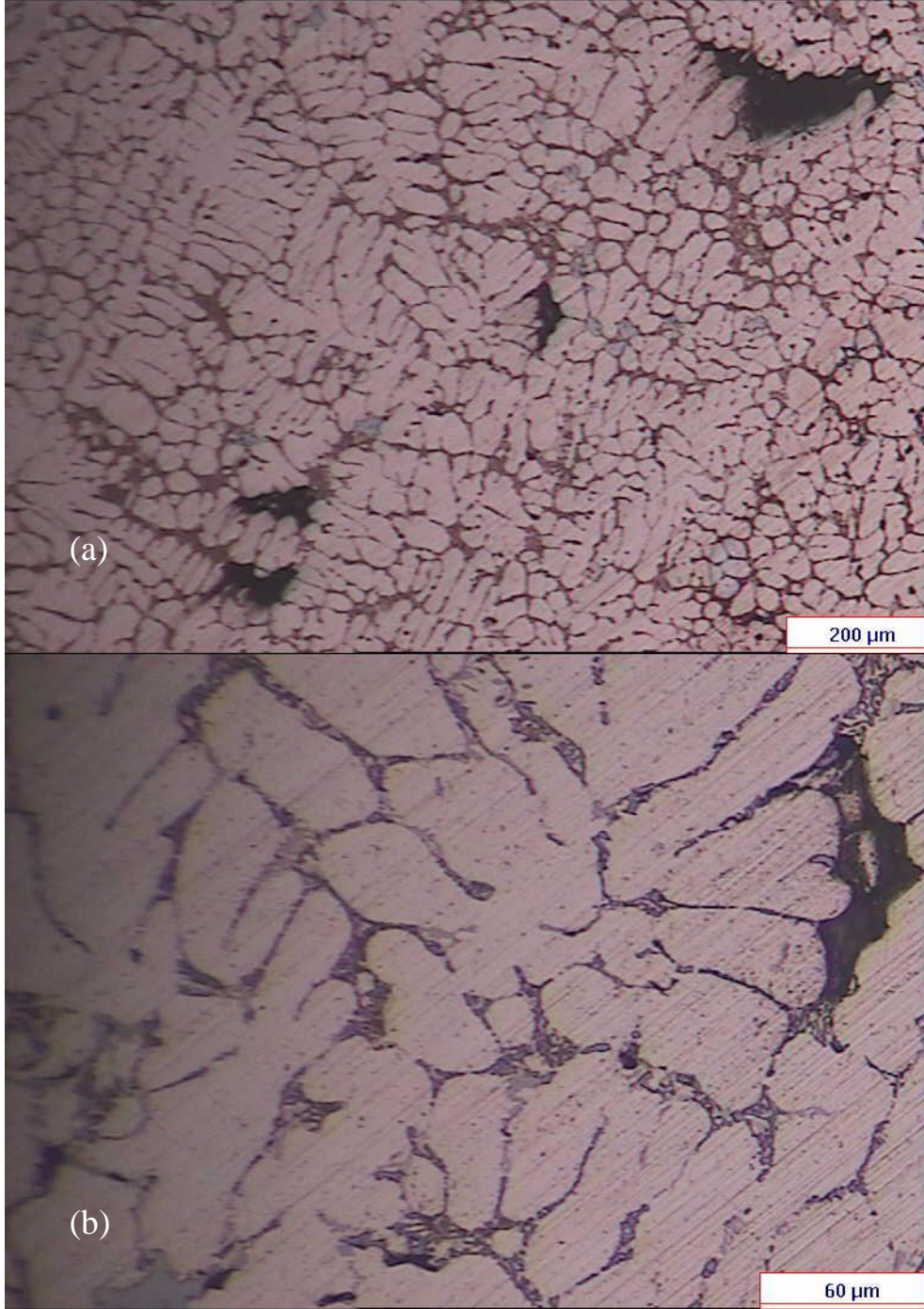
**Şekil 4.78 :** % 4 Si içeren 7 nolu alaşım mikro yapısı (a) 5x ve (b) 20x büyütme.

7 nolu % 4 Si içeren alaşımda dendritik yapı homojen dağılmıştır. Ötektik yapı içerisinde mikro çekintiler ve gaz poroziteleri görülmektedir. Ötektik yapı iyi modifiye olmuştur. Primer silisyumlar mevcuttur.



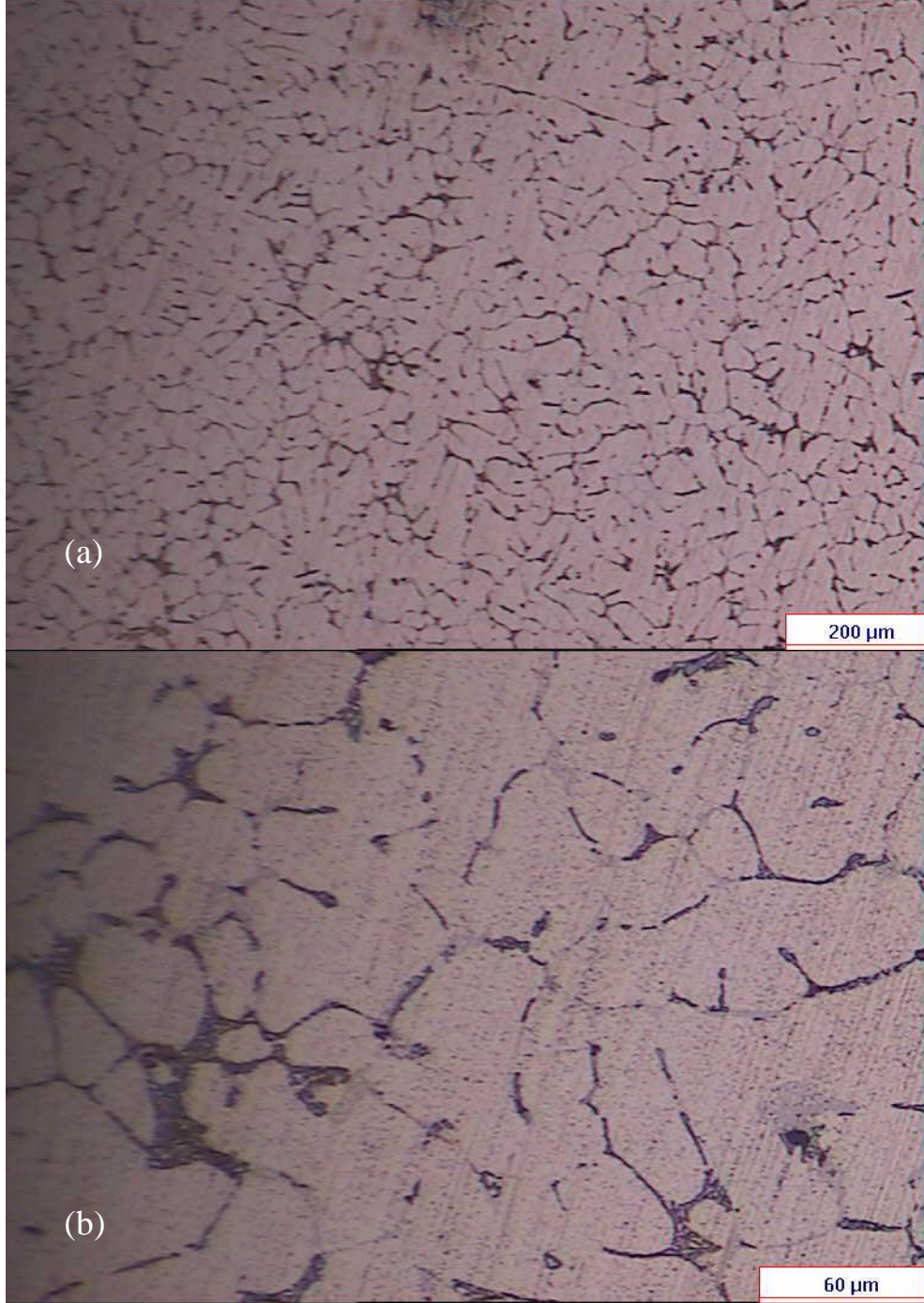
**Şekil 4.79** : % 4 Si içeren 8 nolu alaşım mikro yapısı (a) 5x ve (b) 20x büyütme.

8 nolu % 4 Si içeren alaşımda dendritik yapı homojen dağılmıştır. Ötektik yapı içerisinde yoğun mikro çekintiler görülmektedir. Ötektik yapı iyi modifiye olmuştur.



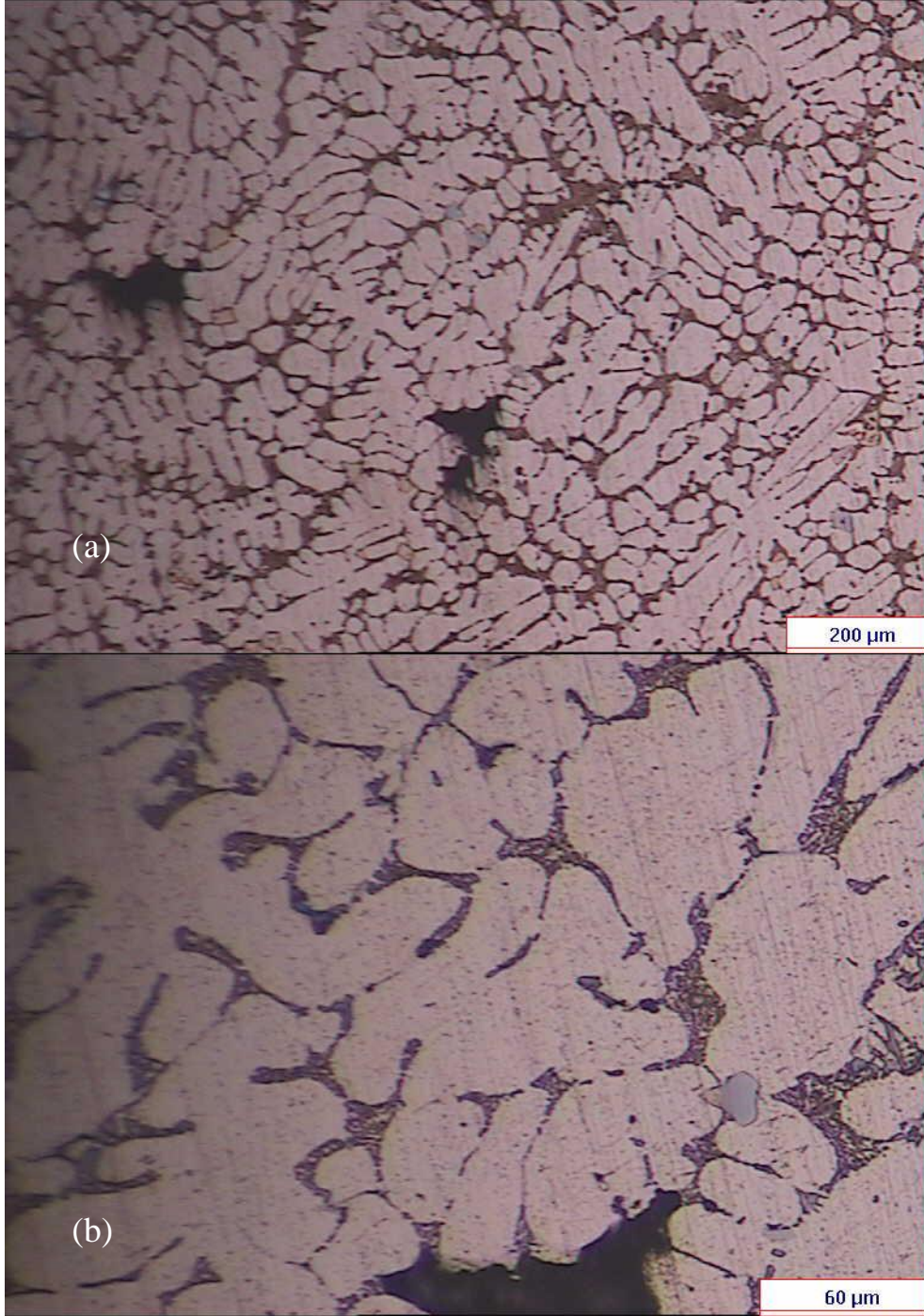
**Şekil 4.80 :** % 7 Si içeren 9 nolu alaşım mikro yapısı (a) 5x ve (b) 20x büyütme.

9 nolu % 7 Si içeren alaşımda dendritik yapı homojen ve eşekslenli dağılmıştır. Ötektik yapı içerisinde mikro çekintiler ve gaz poroziteleri görülmektedir. Ötektik yapı iyi modifiye olmuştur. Primer silisyumlar mevcuttur.



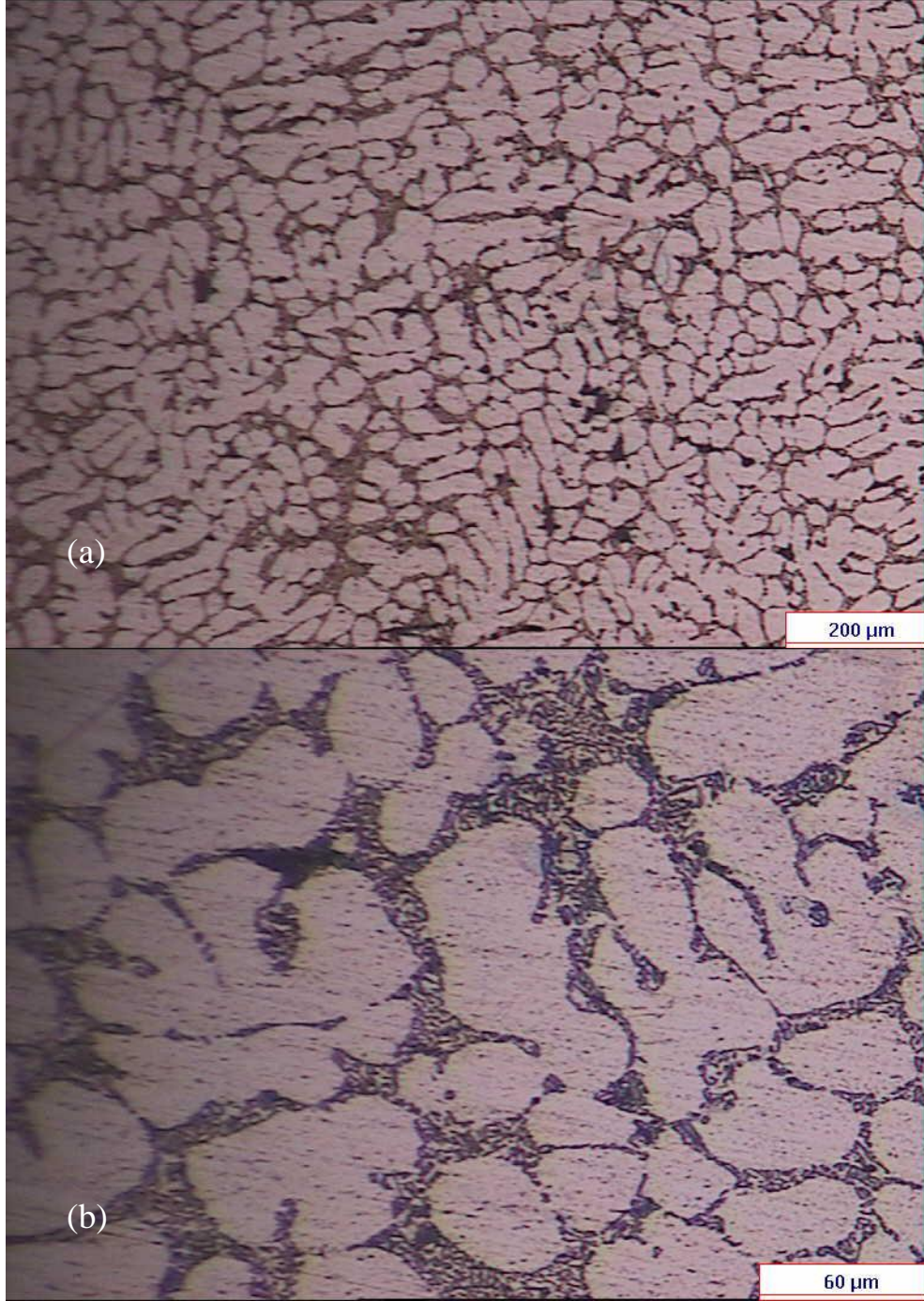
**Şekil 4.81** : % 4 Si içeren 10 nolu alaşım mikro yapısı (a) 5x ve (b) 20x büyütme.

10 nolu % 4 Si içeren alaşımında dendritik yapı homojen dağılmıştır. Ötektik yapı içerisinde mikro çekintiler ve gaz poroziteleri görülmektedir. Ötektik yapı modifiye olmuştur.

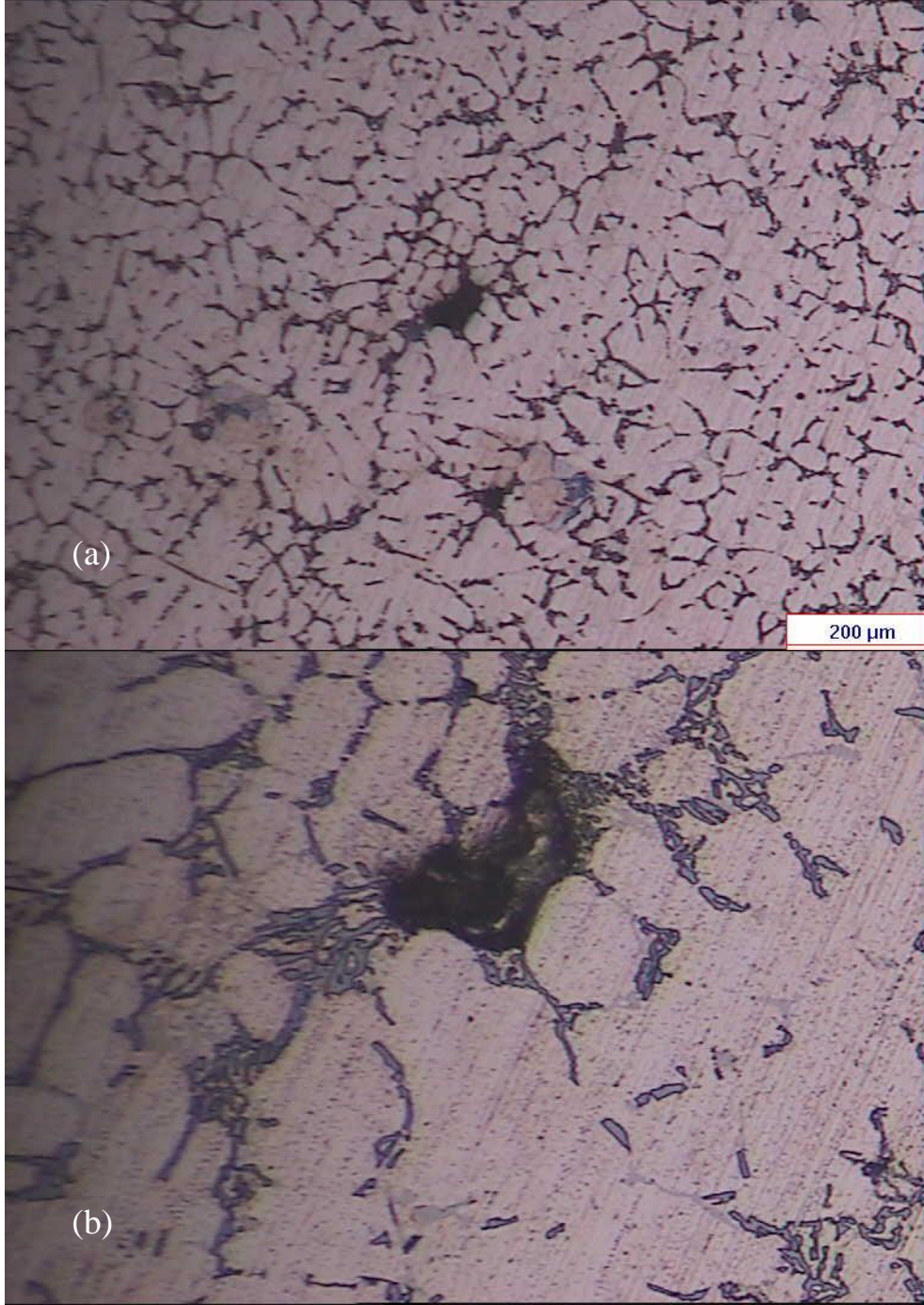


**Şekil 4.82 :** % 7 Si içeren 11 nolu alaşım mikro yapısı (a) 5x ve (b) 20x büyütme.

11 nolu % 7 Si içeren alaşımda dendritik yapı homojen ve eşekslenli dağılmıştır. Ötektik yapı içerisinde mikro çekintiler ve gaz poroziteleri görülmektedir. Ötektik yapı iyi modifiye olmuştur. Primer silisyumlar mevcuttur.

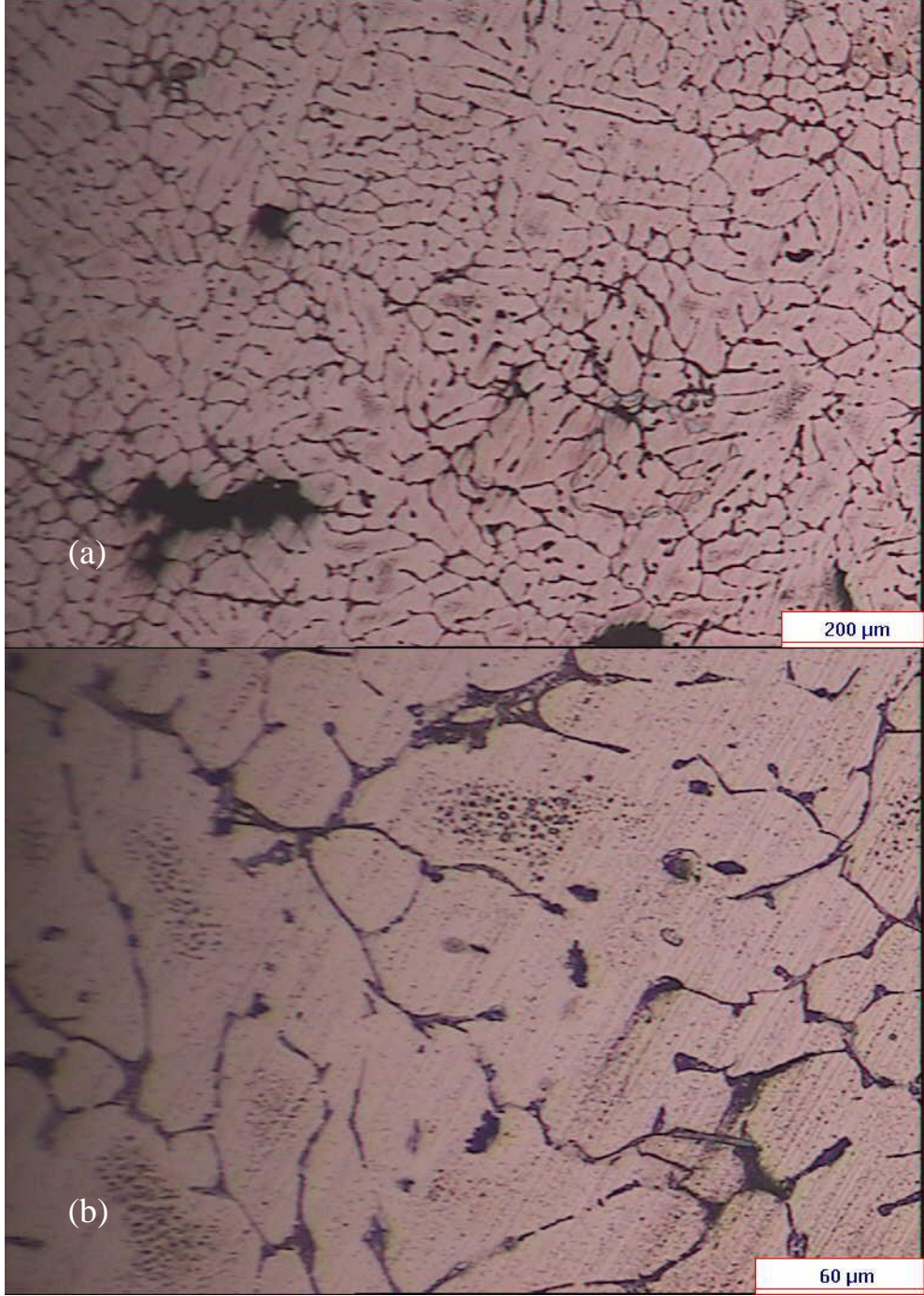


**Şekil 4.83 :** % 7 Si içeren 12 nolu alaşım mikro yapısı (a) 5x ve (b) 20x büyütme.  
12 nolu % 7 Si içeren alaşımda dendritik yapı homojen ve eşekslenli dağılmıştır. Ötektik yapı içerisinde gaz poroziteleri görülmektedir. Ötektik yapı iyi modifiye olmuştur.



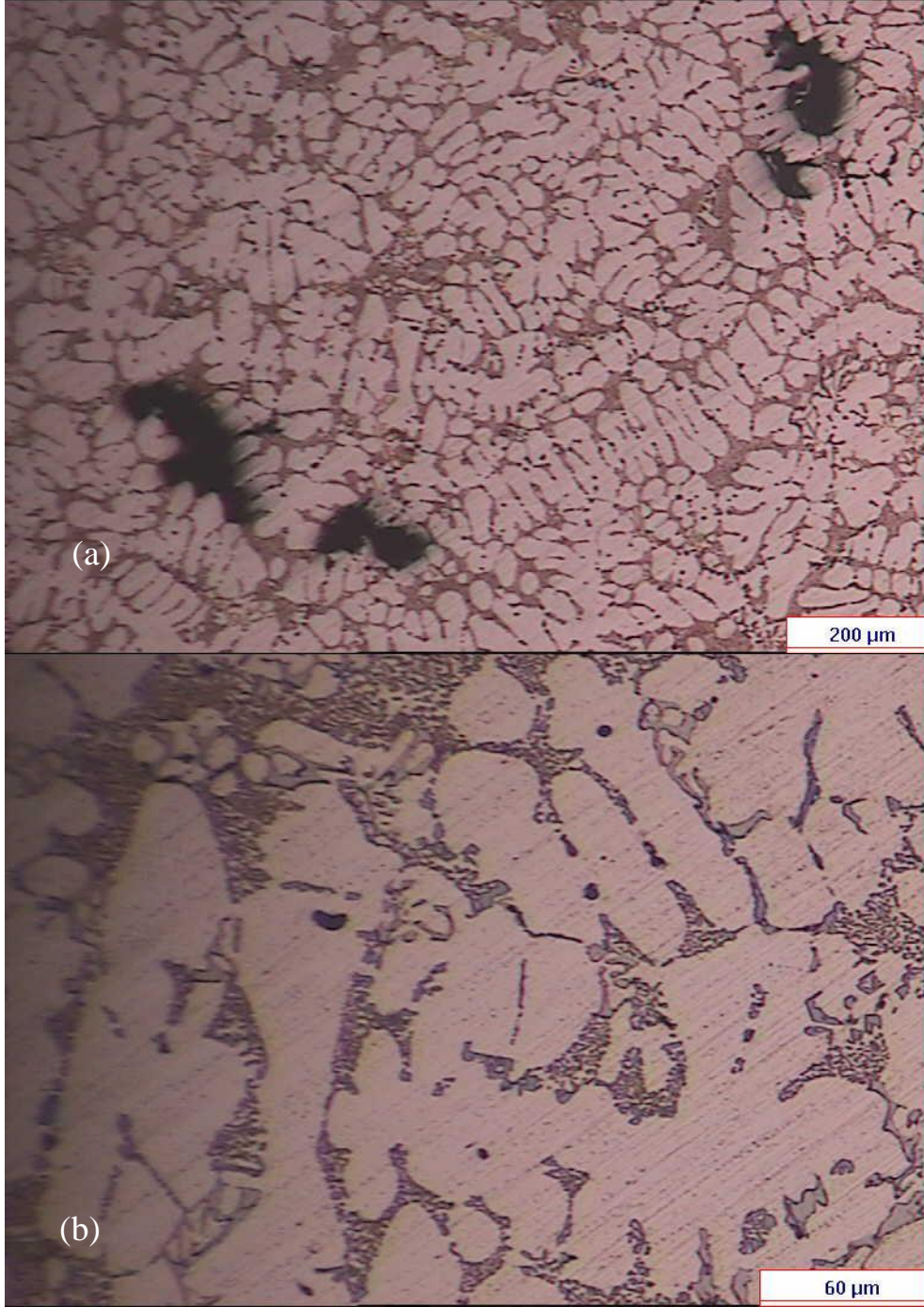
**Şekil 4.84 :** % 7 Si içeren 13 nolu alaşım mikro yapısı (a) 5x ve (b) 20x büyütme.

13 nolu % 7 Si içeren alaşımda dendritik yapı homojen dağılmıştır. Ötektik yapı içerisinde mikro çekintiler ve gaz poroziteleri görülmektedir. Ötektik yapı iyi modifiye olmuştur. Primer silisyumlar mevcuttur.



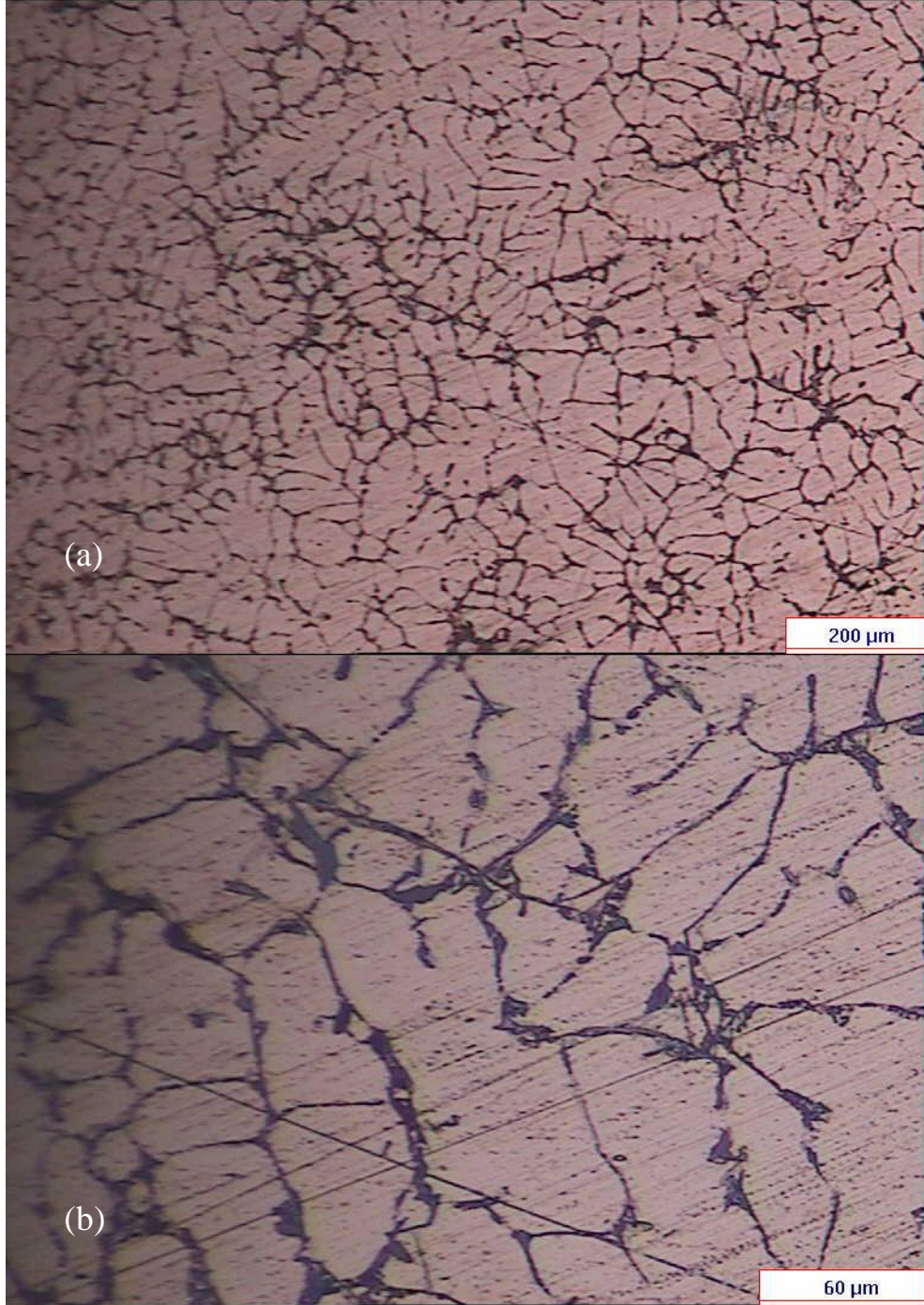
**Şekil 4.85 :** % 4 Si içeren 14 nolu alaşım mikro yapısı (a) 5x ve (b) 20x büyütme.

14 nolu % 4 Si içeren alaşımda dendritik yapı homojen dağılmıştır. Ötektik yapı içerisinde mikro çekintiler ve gaz poroziteleri görülmektedir. Ötektik yapı iyi modifiye olmuştur.

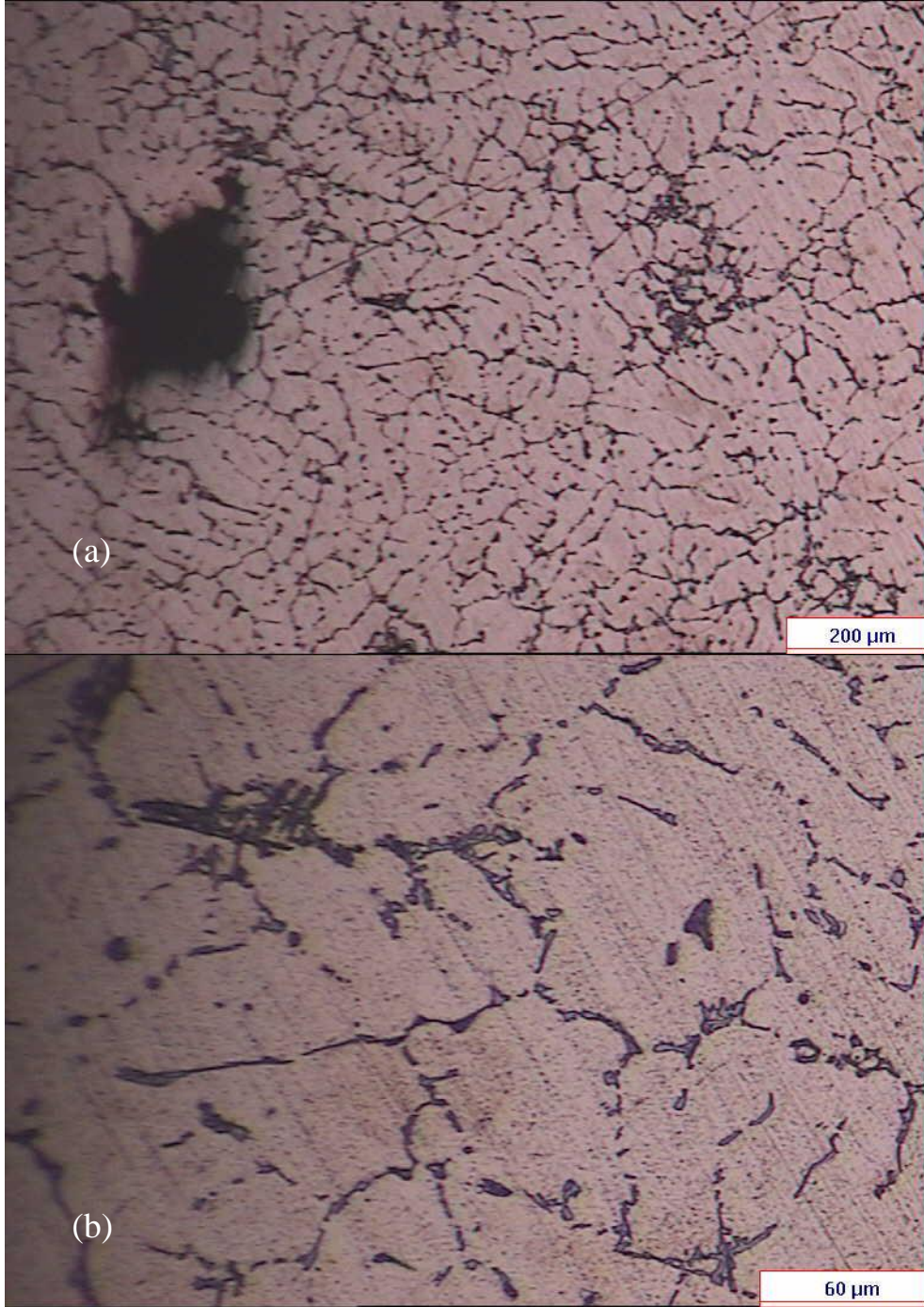


**Şekil 4.86 :** % 7 Si içeren 15 nolu alaşım mikro yapısı (a) 5x ve (b) 20x büyütme.

15 nolu % 7 Si içeren alaşımda dendritik yapı homojen ve eşekslenli dağılmıştır. Ötektik yapı içerisinde mikro çekintiler görülmektedir. Ötektik yapı modifiye olmuştur. Primer silisyumlar mevcuttur.

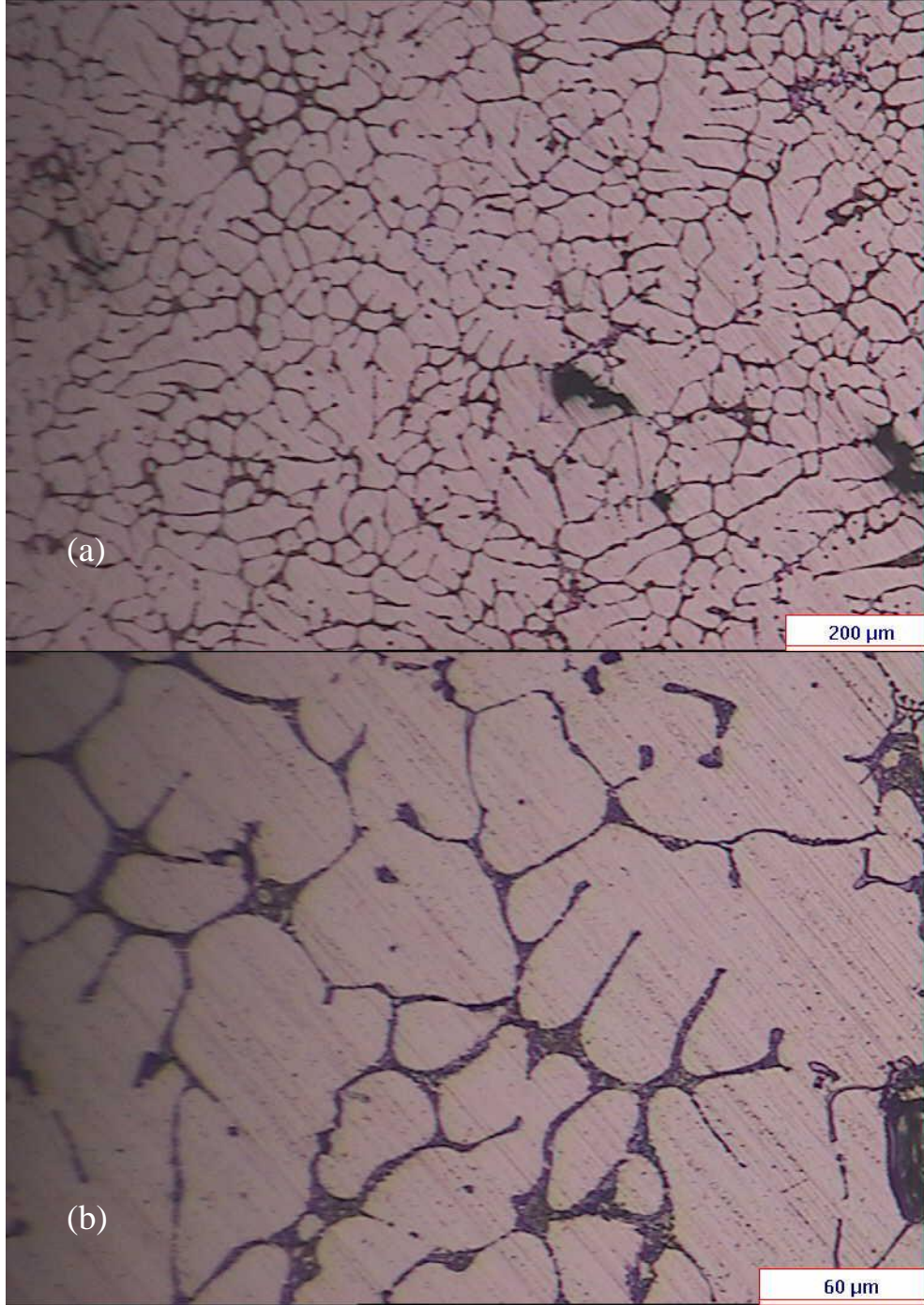


**Şekil 4.87 :** % 4 Si içeren 16 nolu alaşım mikro yapısı (a) 5x ve (b) 20x büyütme.  
16 nolu % 4 Si içeren alaşımında dendritik yapı homojen dağılmıştır. Ötektik yapı içerisinde mikro çekintiler görülmektedir. Ötektik yapı iyi modifiye olmamıştır.

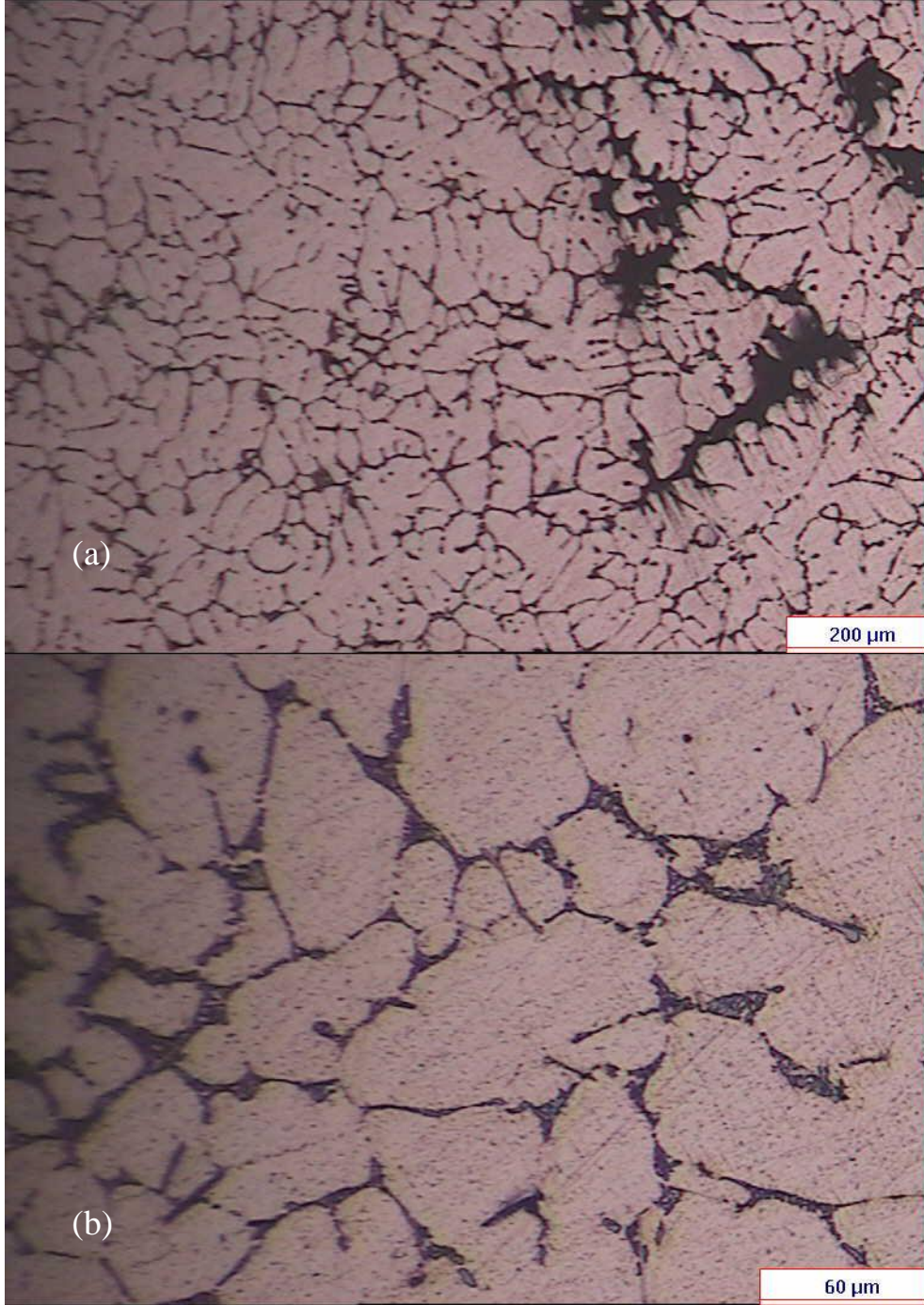


**Şekil 4.88 :** % 4 Si içeren 17 nolu alaşım mikro yapısı (a) 5x ve (b) 20x büyütme.

17 nolu % 4 Si içeren alaşımda dendritik yapı homojen dağılmıştır. Ötektik yapı içerisinde mikro çekintiler görülmektedir. Ötektik yapı iyi modifiye olmamıştır.

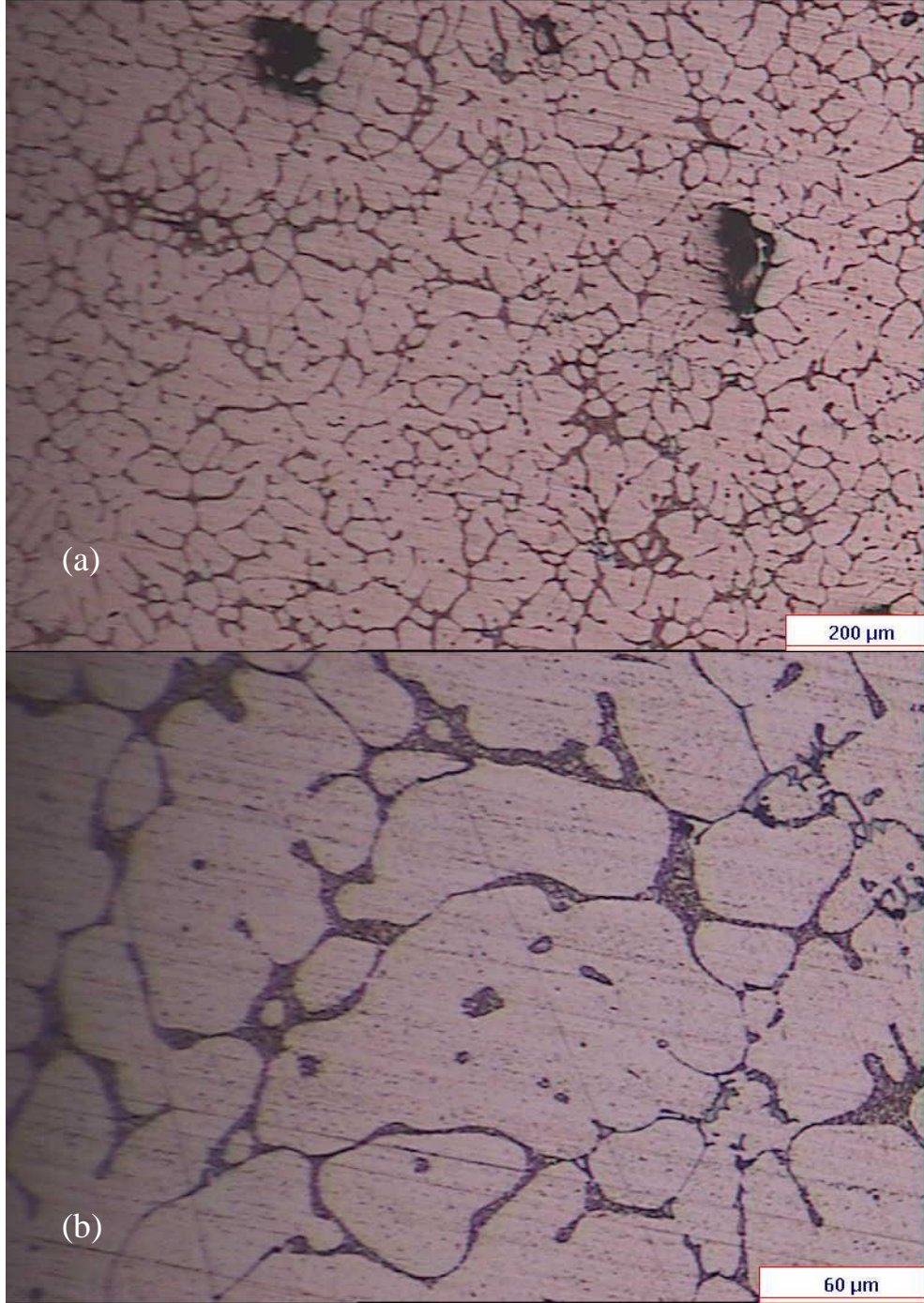


**Şekil 4.89 :** % 4 Si içeren 18 nolu alaşım mikro yapısı (a) 5x ve (b) 20x büyütme.  
18 nolu % 4 Si içeren alaşımında dendritik yapı homojen dağılmıştır. Ötektik yapı içerisinde mikro çekintiler görülmektedir. Ötektik yapı iyi modifiye olmuştur.

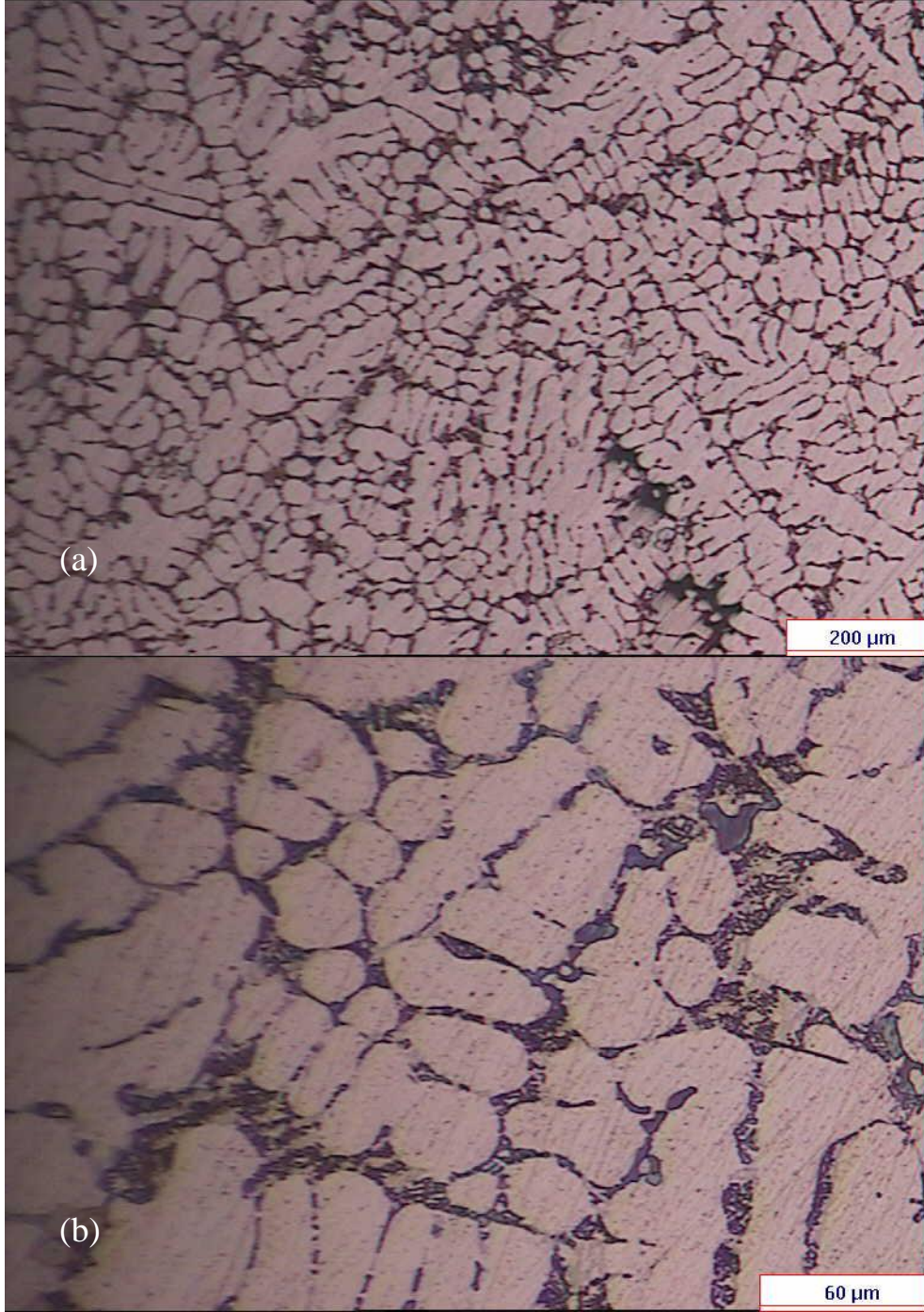


**Şekil 4.90 :** % 4 Si içeren 19 nolu alaşım mikro yapısı (a) 5x ve (b) 20x büyütme.

19 nolu % 4 Si içeren alaşımda dendritik yapı homojen dağılmıştır. Ötektik yapı içerisinde mikro çekintiler görülmektedir. Ötektik yapı iyi modifiye olmuştur.

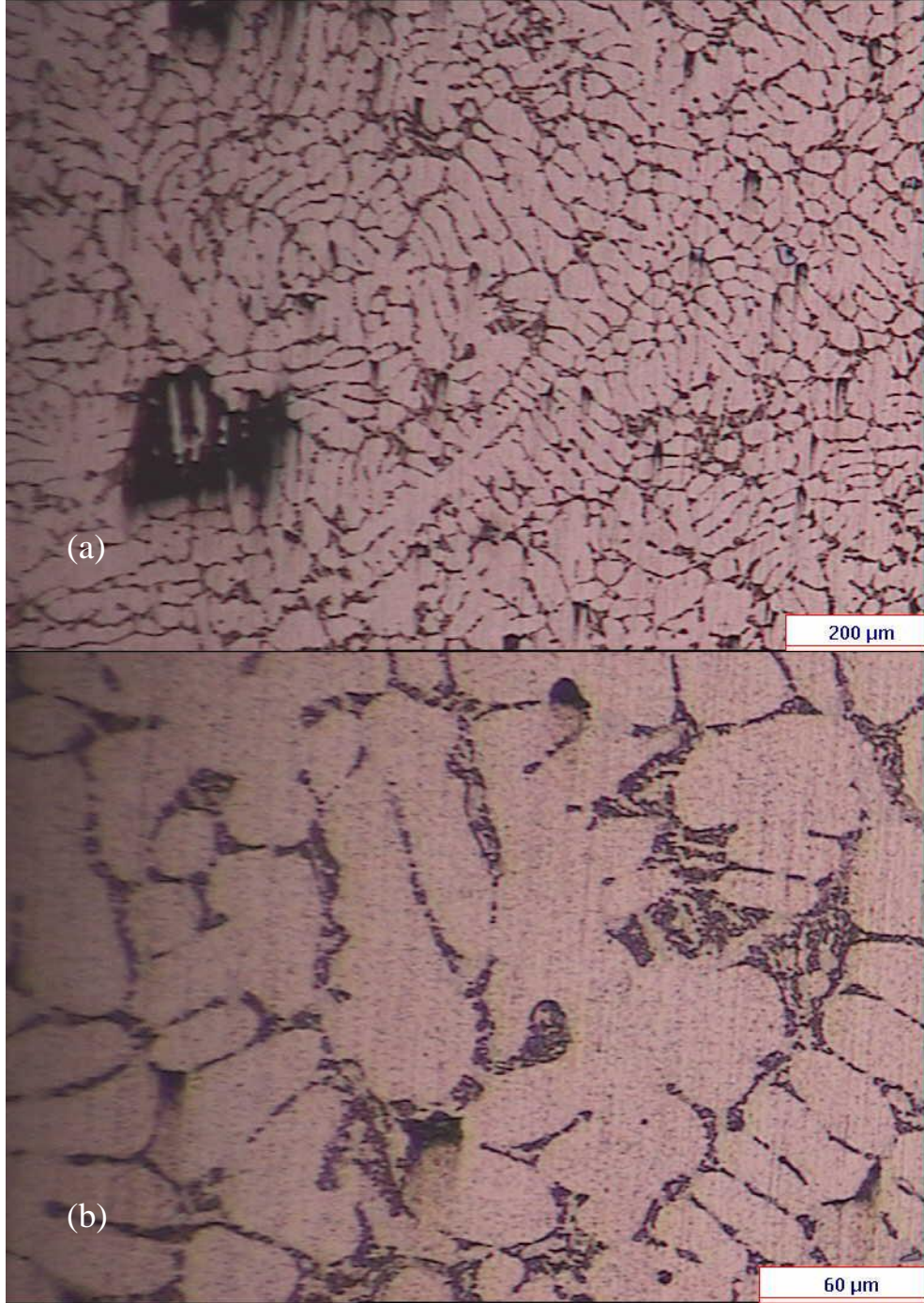


**Şekil 4.91** : % 4 Si içeren 20 nolu alaşım mikro yapısı (a) 5x ve (b) 20x büyütme.  
20 nolu % 4 Si içeren alaşımda dendritik yapı homojen dağılmıştır. Ötektik yapı içerisinde mikro çekintiler görülmektedir. Ötektik yapı modifiye olmuştur.

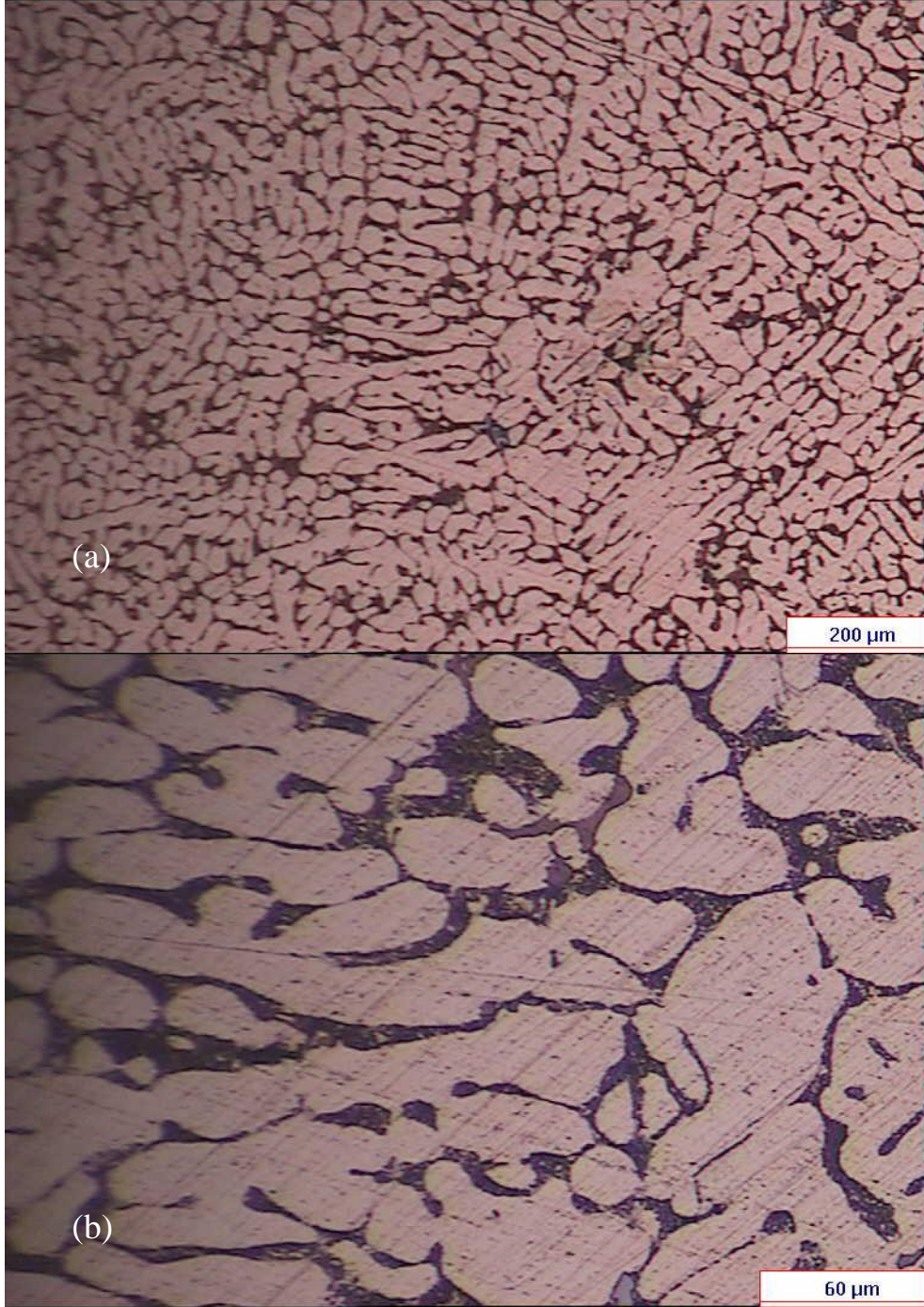


**Şekil 4.92 :** % 7 Si içeren 21 nolu alaşım mikro yapısı (a) 5x ve (b) 20x büyütme.

21 nolu % 7 Si içeren alaşımda dendritik yapı homojen ve eşekslenli dağılmıştır. Ötektik yapı içerisinde mikro çekintiler görülmektedir. Ötektik yapı modifiye olmamıştır.

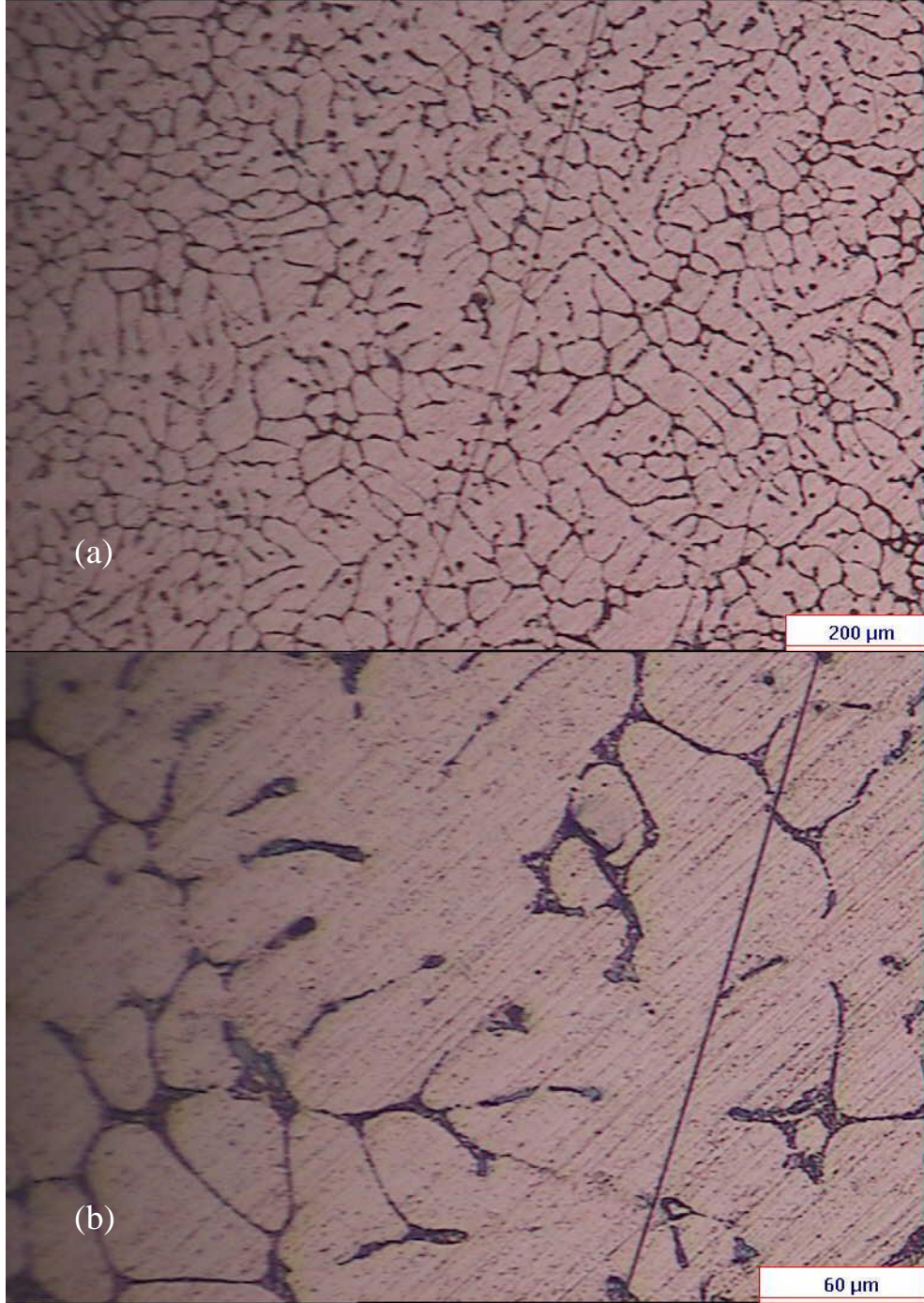


**Şekil 4.93 :** % 7 Si içeren 22 nolu alaşım mikro yapısı (a) 5x ve (b) 20x büyütme. 22 nolu % 7 Si içeren alaşımda dendritik yapı homojen ve eşeksenli dağılmıştır. Ötektik yapı içerisinde mikro çekintiler ve gaz poroziteleri görülmektedir. Ötektik yapı modifiye olmuştur. Primer silisyumlar mevcuttur.

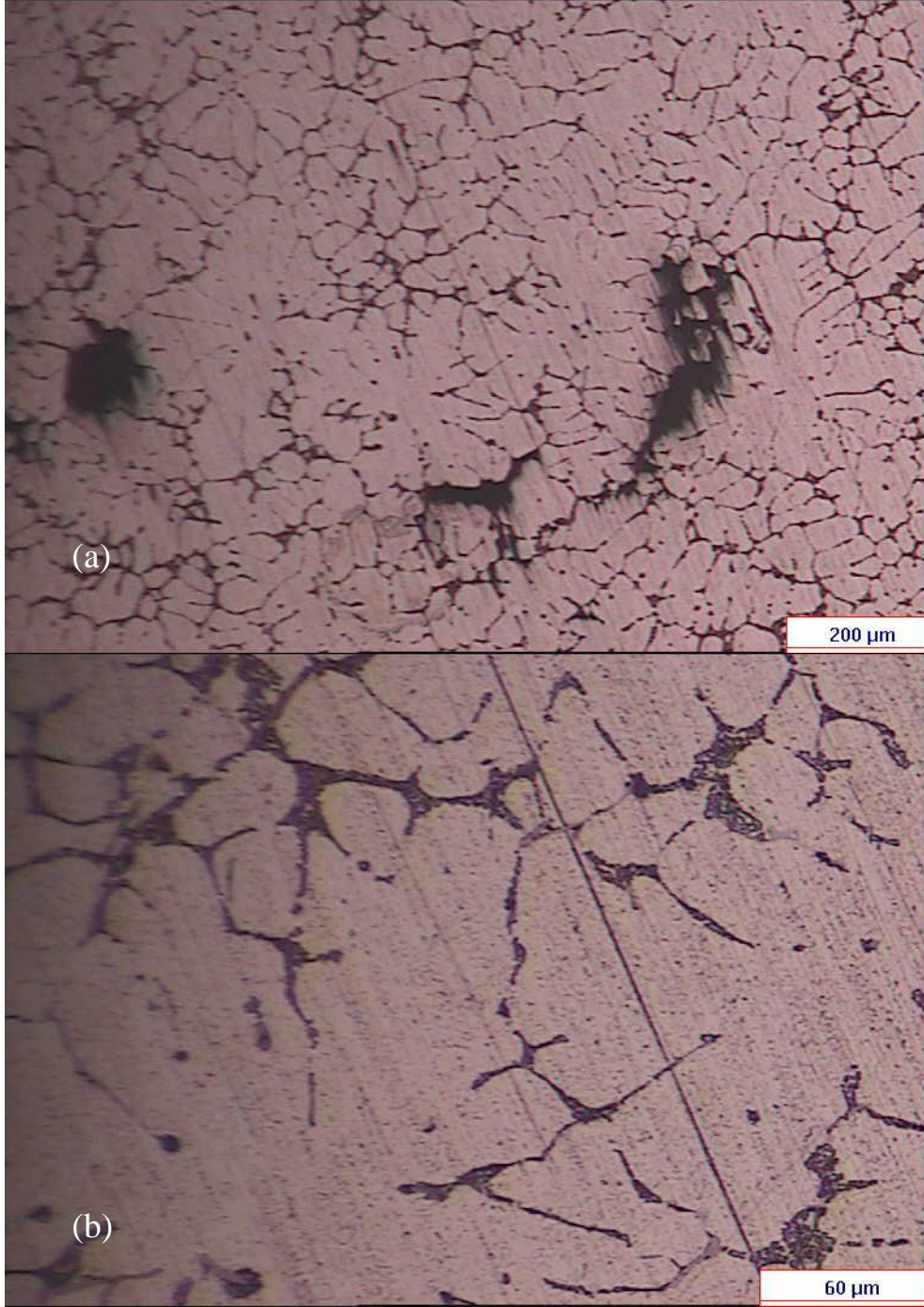


**Şekil 4.94 :** % 7 Si içeren 23 nolu alaşım mikro yapısı (a) 5x ve (b) 20x büyütme.

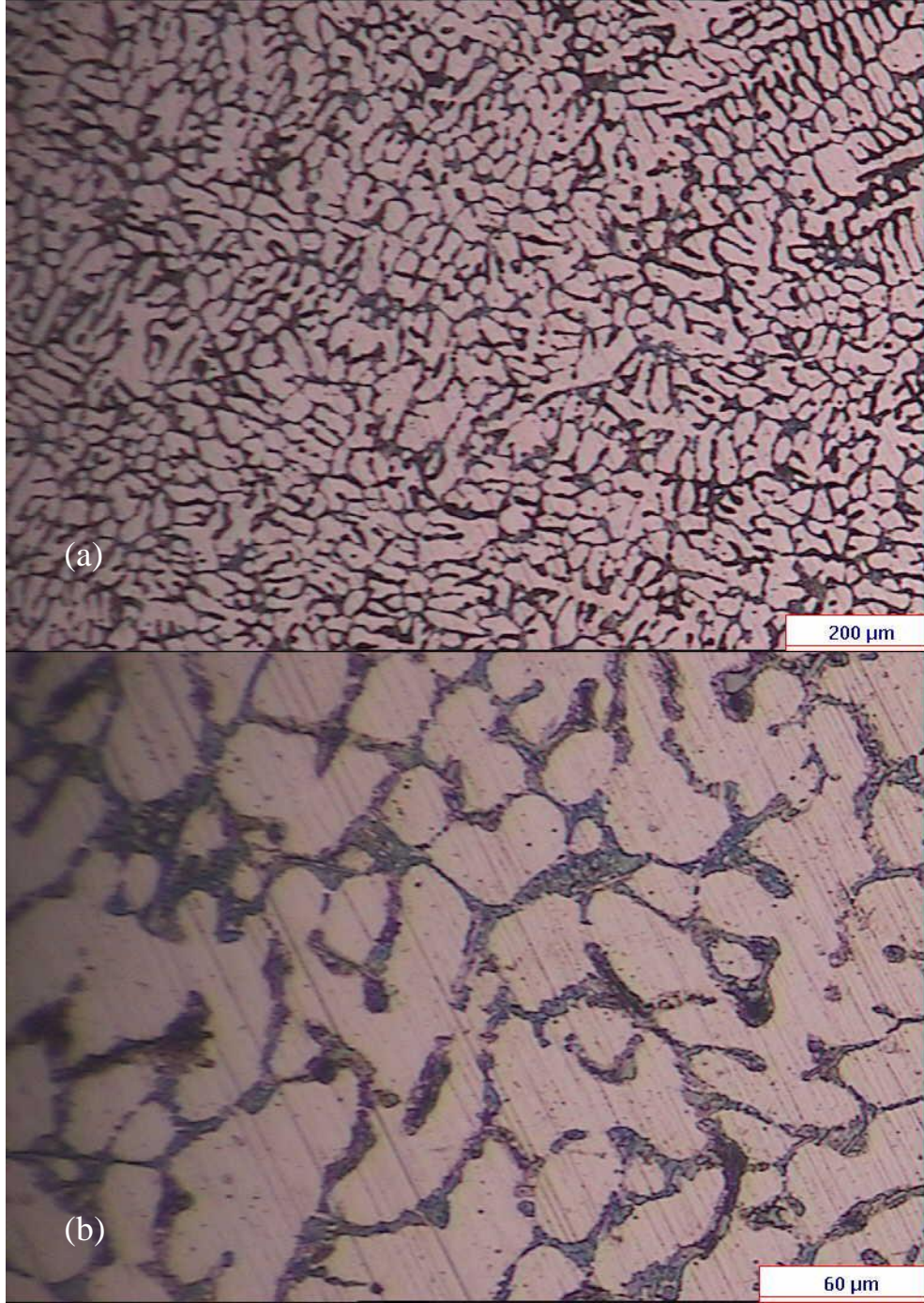
23 nolu % 7 Si içeren alaşımda dendritik yapı homojen dağılmıştır. Ötektik yapı içerisinde mikro çekintiler görülmektedir. Ötektik yapı modifiye olmuştur. Primer silisyumlar mevcuttur.



**Şekil 4.95 :** % 4 Si içeren 24 nolu alaşım mikro yapısı (a) 5x ve (b) 20x büyütme. 24 nolu % 4 Si içeren alaşımında dendritik yapı homojen dağılmıştır. Ötektik yapı içerisinde mikro çekintiler görülmektedir. Ötektik yapı modifiye olmamıştır. Primer silisyumlar mevcuttur.

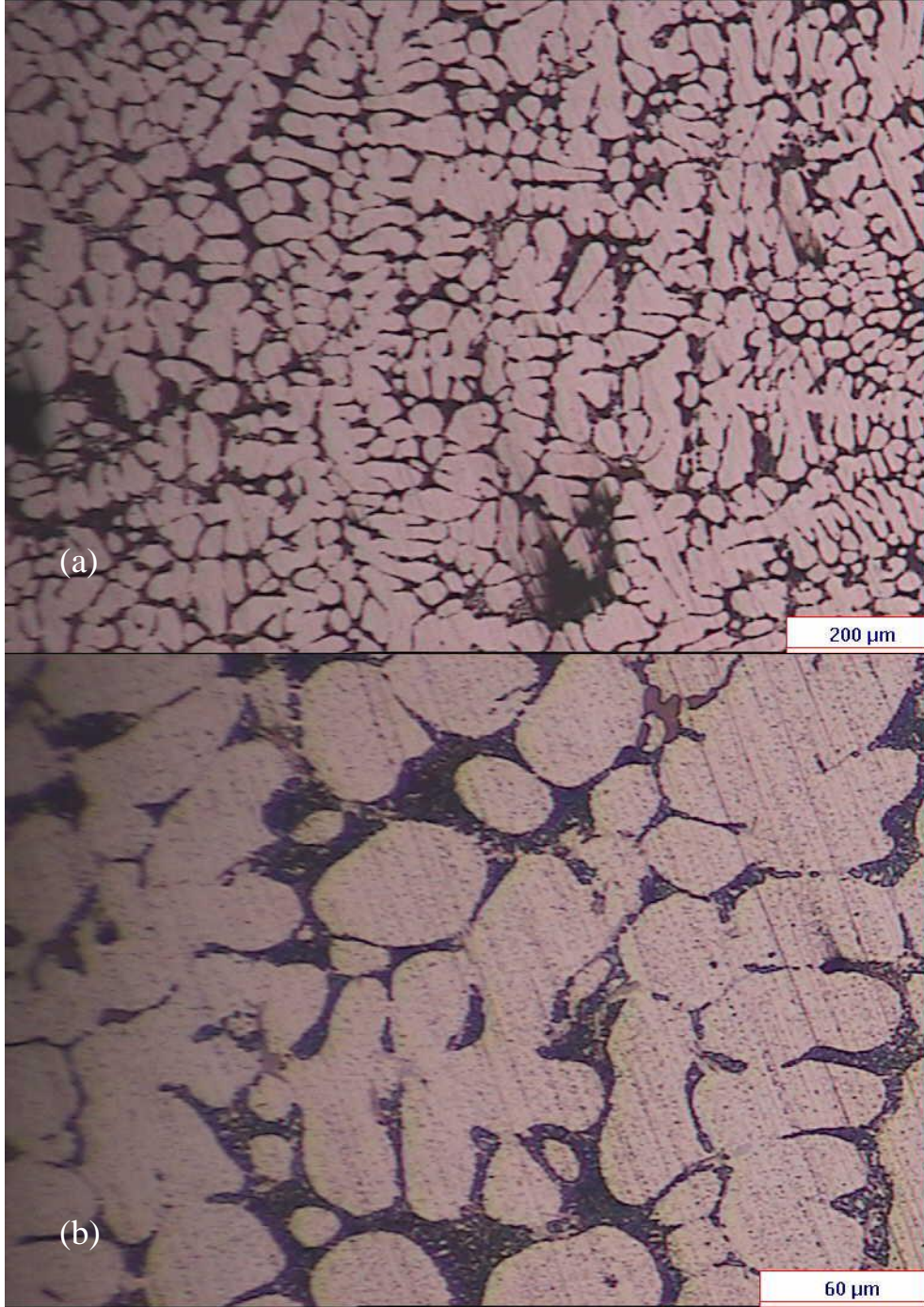


**Şekil 4.96 :** % 4 Si içeren 25 nolu alaşım mikro yapısı (a) 5x ve (b) 20x büyütme.  
25 nolu % 4 Si içeren alaşımda dendritik yapı homojen dağılmıştır. Ötektik yapı içerisinde mikro çekintiler görülmektedir. Ötektik yapı iyi modifiye olmuştur.



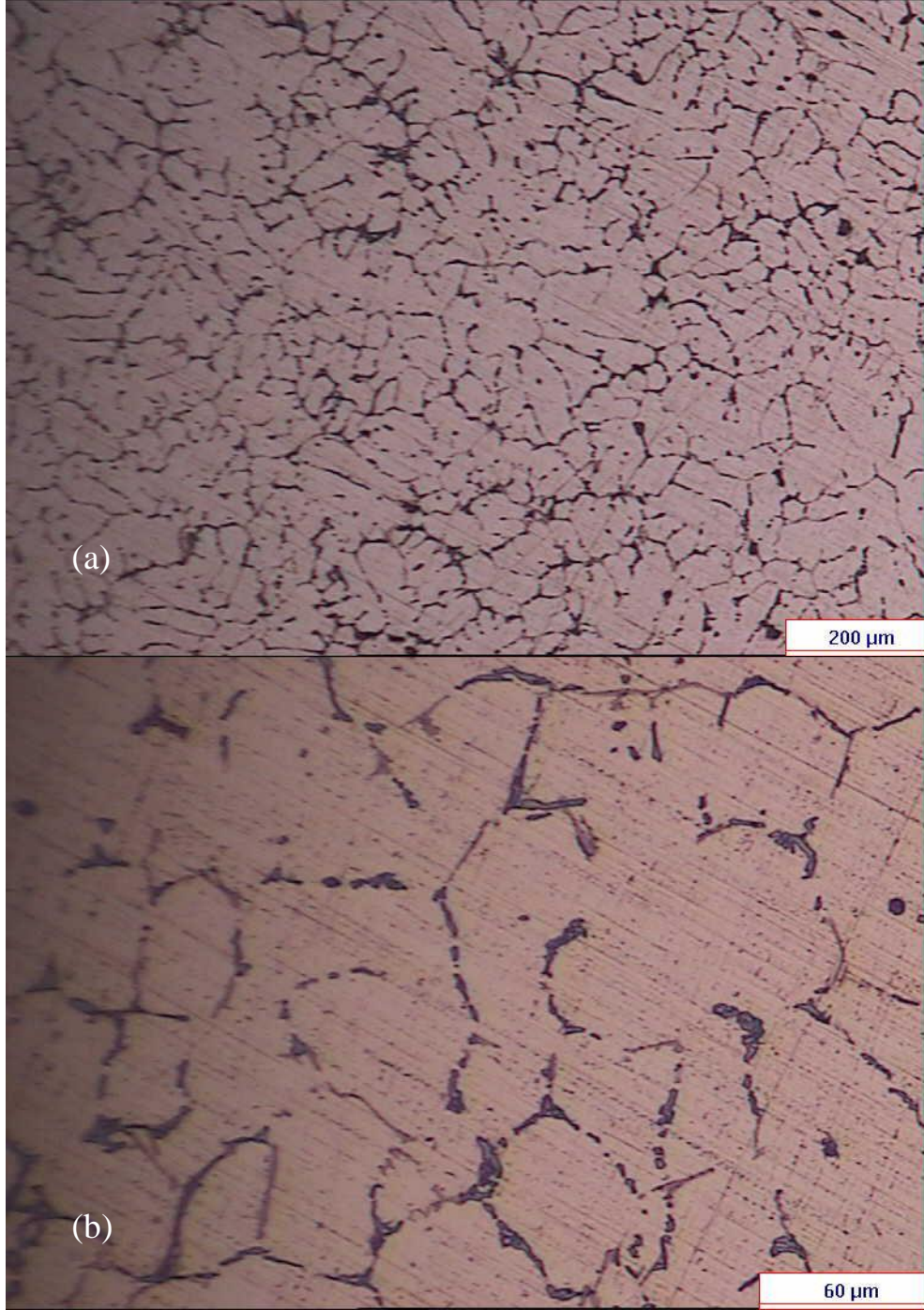
**Şekil 4.97 :** % 7 Si içeren 26 nolu alaşım mikro yapısı (a) 5x ve (b) 20x büyütme.

26 nolu % 7 Si içeren alaşımında dendritik yapı homojen ve eşeksensiz dağılmıştır. Ötektik yapı içerisinde mikro çekintiler ve gaz poroziteleri görülmektedir. Ötektik yapı modifiye olmuştur.



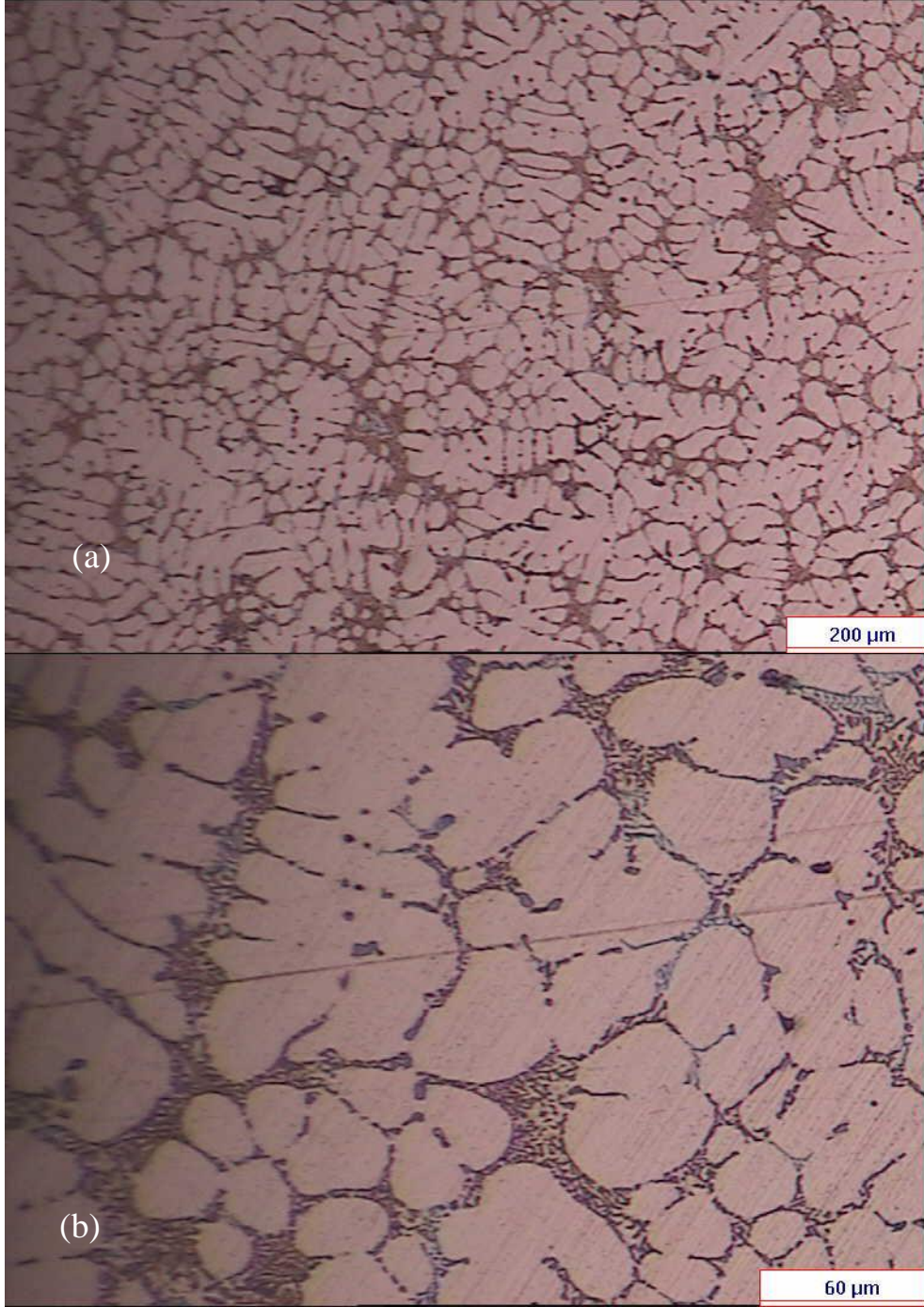
**Şekil 4.98 :** % 7 Si içeren 27 nolu alaşım mikro yapısı (a) 5x ve (b) 20x büyütme.

27 nolu % 7 Si içeren alaşımda dendritik yapı homojen dağılmıştır. Ötektik yapı içerisinde mikro çekintiler ve gaz poroziteleri görülmektedir. Ötektik yapı iyi modifiye olmuştur.



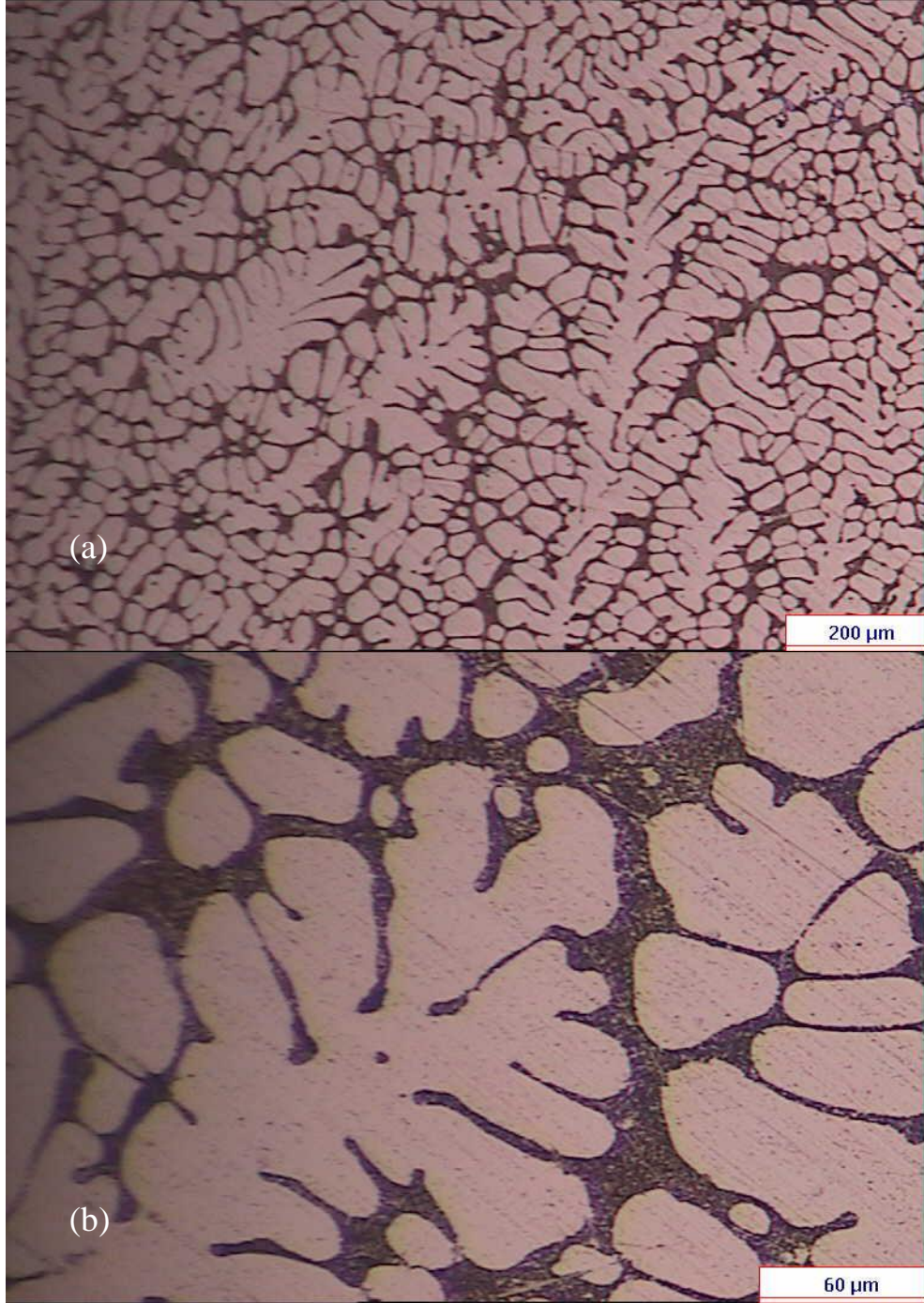
**Şekil 4.99 :** % 4 Si içeren 28 nolu alaşım mikro yapısı (a) 5x ve (b) 20x büyütme.

28 nolu % 4 Si içeren alaşımda dendritik yapı homojen dağılmıştır. Ötektik yapı içerisinde mikro çekintiler ve gaz poroziteleri görülmektedir. Ötektik yapı modifiye olmamıştır.

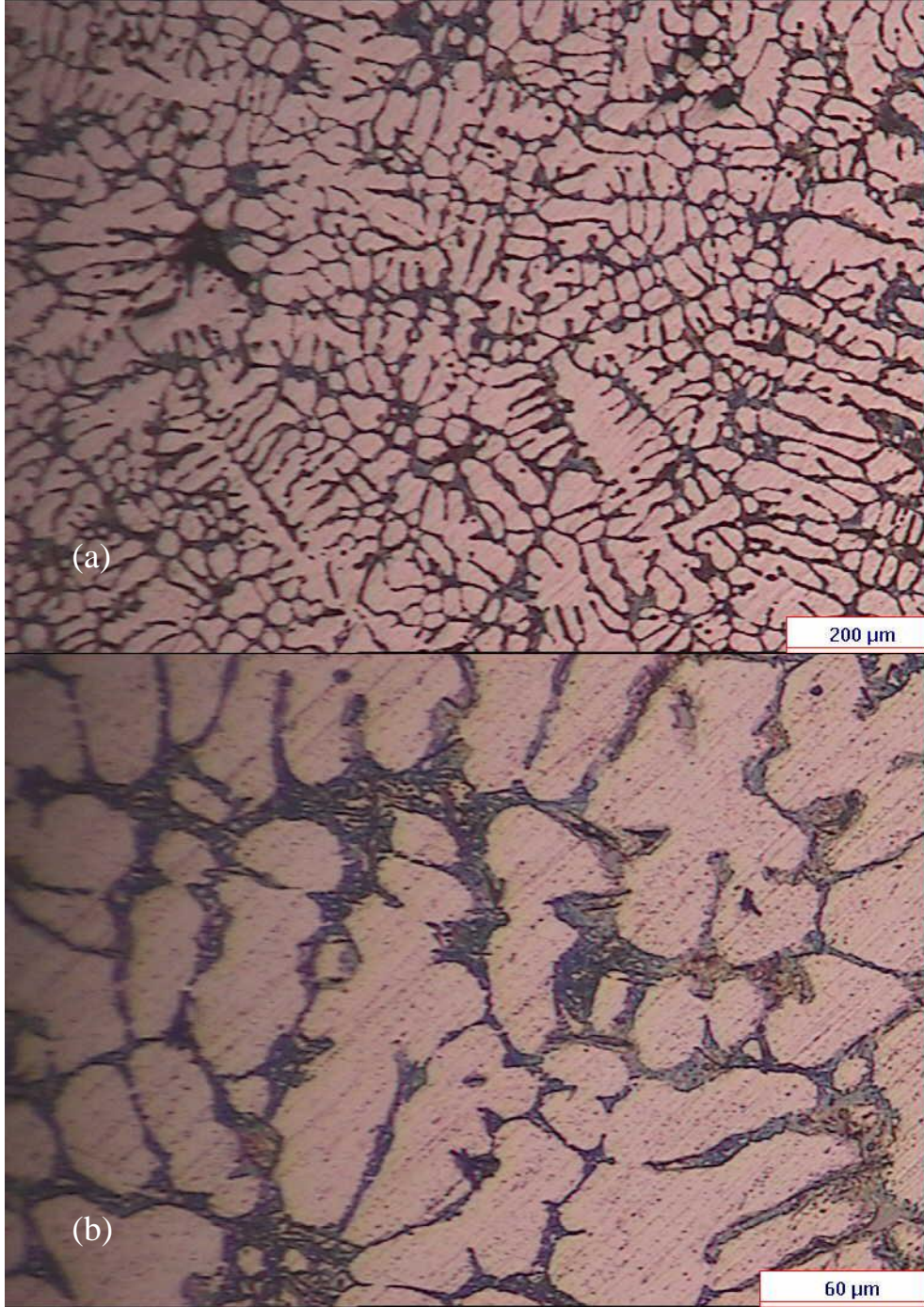


**Şekil 4.100 :** % 7 Si içeren 29 nolu alaşım mikro yapısı (a) 5x ve (b) 20x büyütme.

29 nolu % 7 Si içeren alaşımda dendritik yapı homojen ve eşeksenli dağılmıştır. Ötektik yapı içerisinde mikro çekintiler görülmektedir. Ötektik yapı iyi modifiye olmuştur.

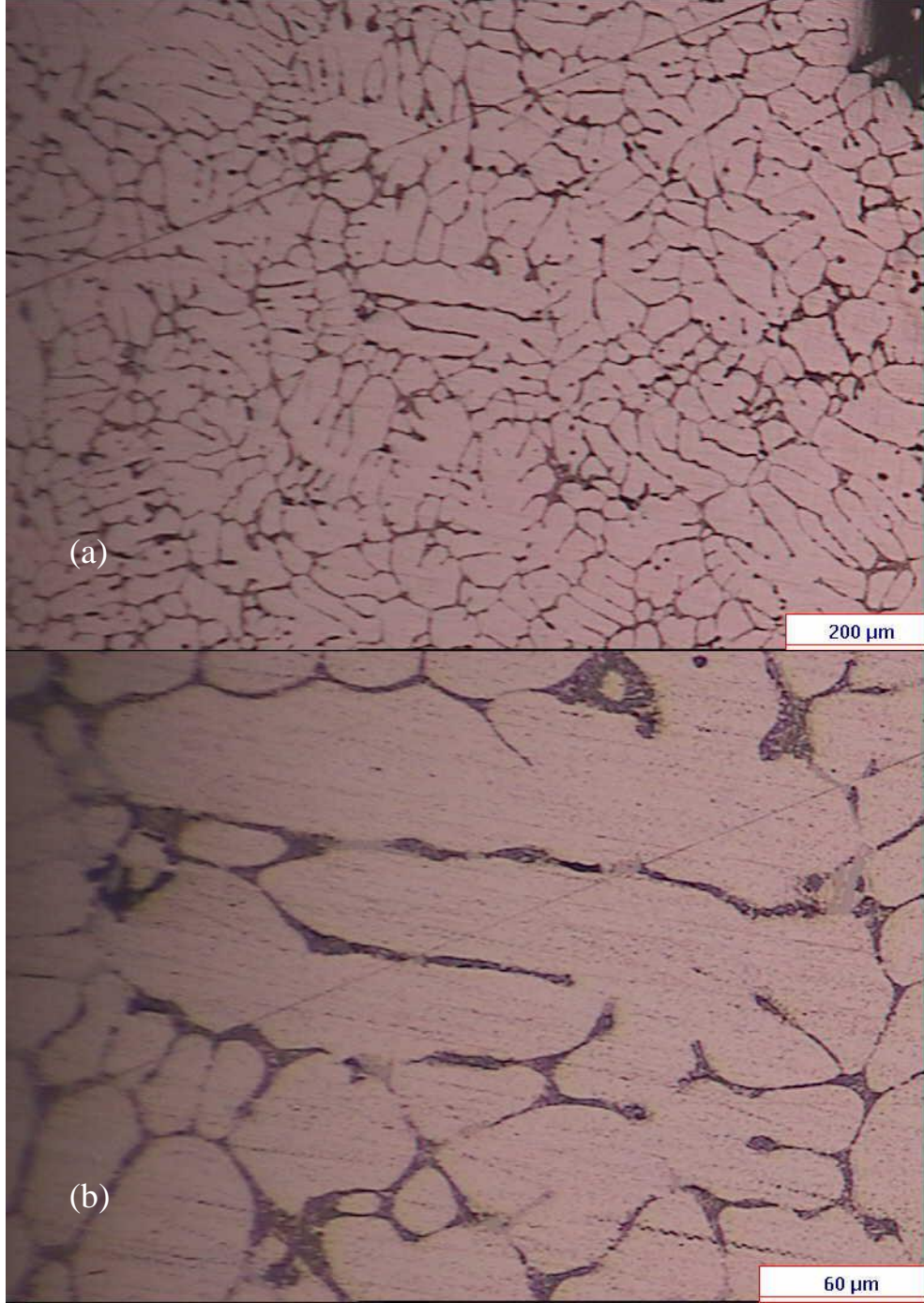


**Şekil 4.101 :** % 7 Si içeren 30 nolu alaşım mikro yapısı (a) 5x ve (b) 20x büyütme.  
30 nolu % 7 Si içeren alaşımda dendritik yapı homojen ve eşekslenli dağılmıştır.  
Ötektik yapı iyi modifiye olmuştur.



**Şekil 4.102 :** % 7 Si içeren 31 nolu alaşım mikro yapısı (a) 5x ve (b) 20x büyütme.

31 nolu % 7 Si içeren alaşımda dendritik yapı homojen ve eşekslenli dağılmıştır. Ötektik yapı içerisinde mikro çekintiler ve gaz poroziteleri görülmektedir. Ötektik yapı modifiye olmuştur.



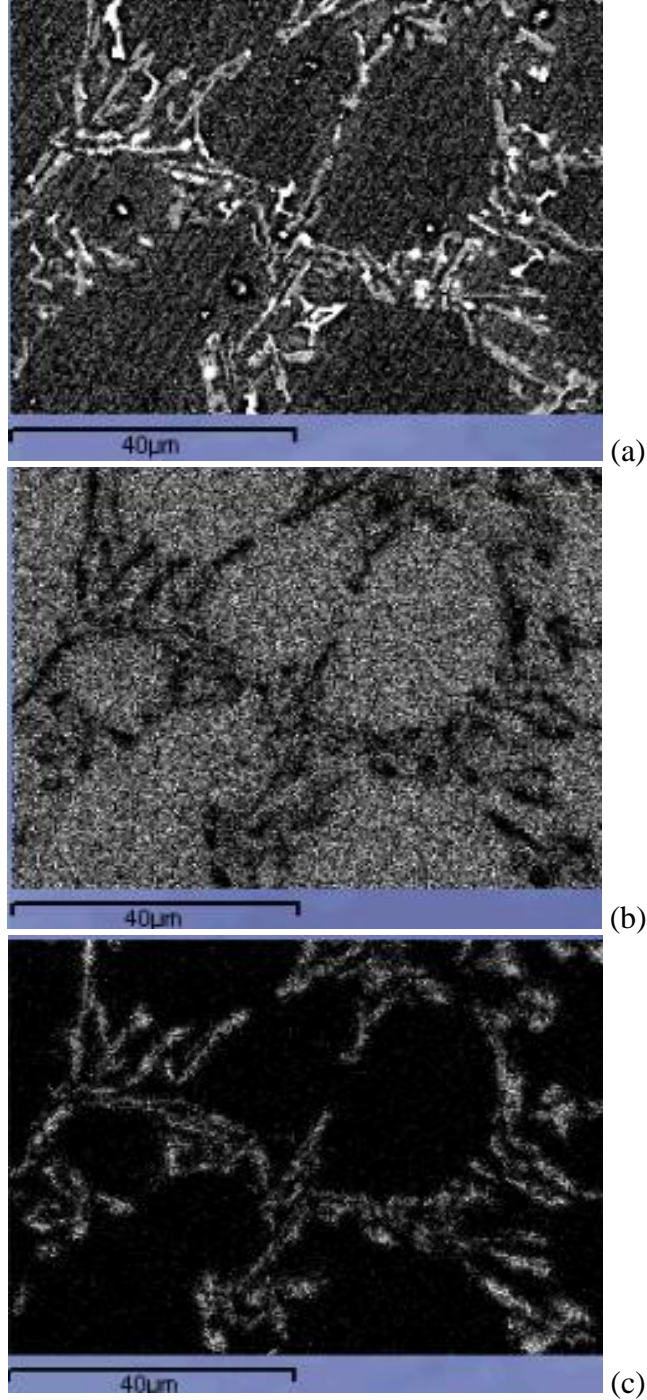
**Şekil 4.103 :** % 4 Si içeren 32 nolu alaşım mikro yapısı (a) 5x ve (b) 20x büyütme.

32 nolu % 4 Si içeren alaşımda dendritik yapı homojen dağılmıştır. Ötektik yapı içerisinde mikro çekintiler ve gaz poroziteleri görülmektedir. Ötektik yapı modifiye olmamıştır. Primer silisyumlar mevcuttur.

#### **4.11 SEM Analizi**

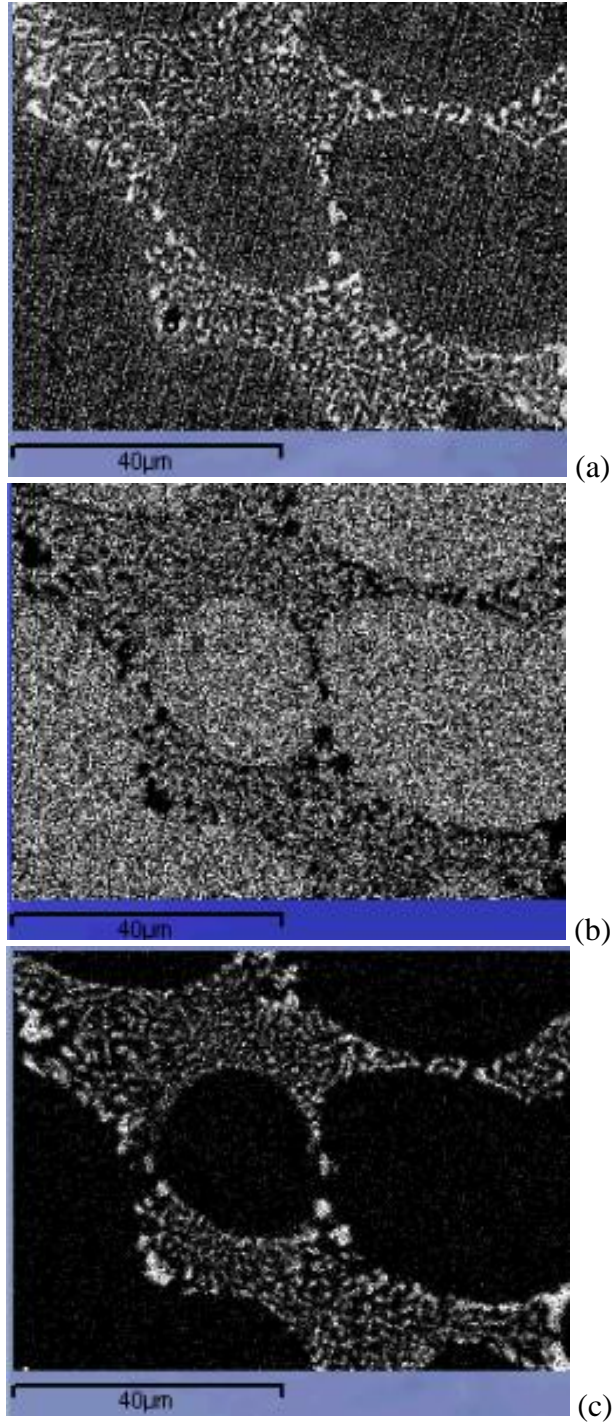
SEM Analizi çalışmaları mevcut jant sektöründe kullanılan ticari alaşımdan daha iyi mekanik özelliklerin elde edildiği % 7 Si içeren 1, 15, 3, 12, 27 nolu alaşımlarda ve

% 4 Si içeren 2, 4, 17, 24, 25 nolu alaşımlarda gerçekleştirilmiştir. Alaşımlara ait % bileşim miktarları Çizelge 4.2’de verilmektedir. Alaşımlardan 3 farklı SEM görüntüsü alınmıştır. İlk görüntülerde matris ve tane sınırlarının görüldüğü genel yapı, ikinci görüntülerde açık renkli bölgeler Al elementinin % ağırlıkça dağılımını, üçüncü görüntülerde ise açık renkli bölgeler Si elementinin % ağırlıkça dağılımını göstermektedir. SEM analizi sonuçları Çizelge A.25’de verilmiştir.



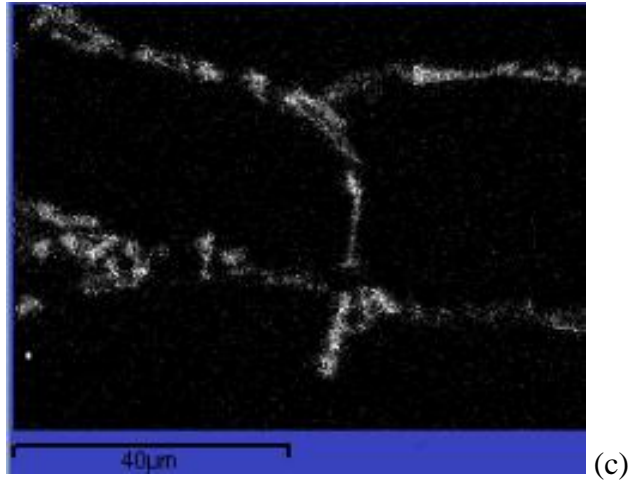
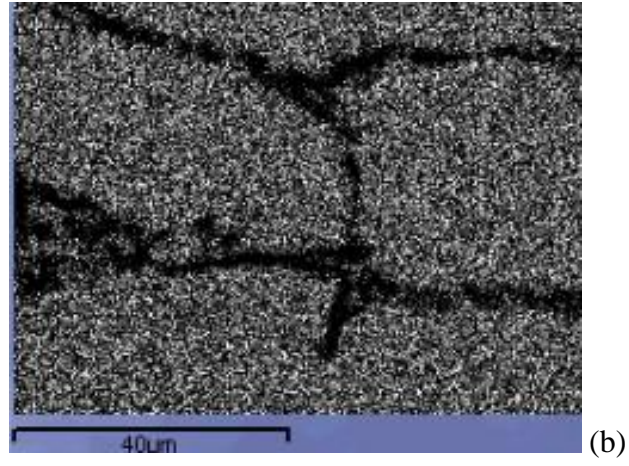
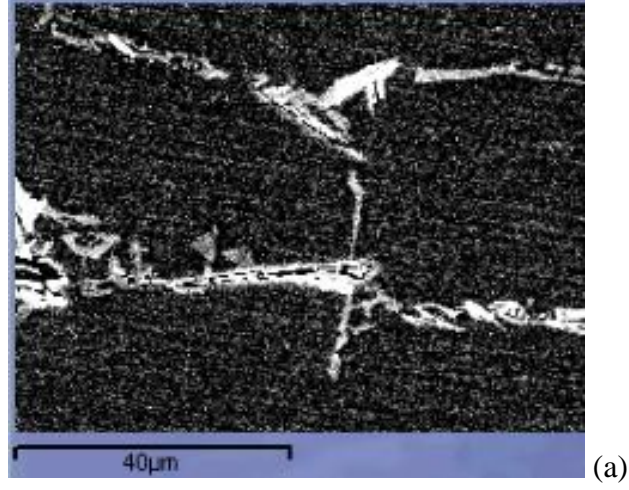
**Şekil 4.104** : % 7 Si içeren 1 nolu alaşımın SEM görüntüleri a) Genel yapı b) % Al dağılımı c) % Si dağılımı.

Şekil 4.104'de 1 nolu alaşımın genel analizinde % ağırlıkça Al, Si Cu, Zn, Mg, Co, Ti, Fe ve Na, matris analizinde % ağırlıkça Al, Si, Cu, Zn, Ti ve Fe, tane sınırı analizinde % ağırlıkça Al ve Si elementleri görülmüştür.



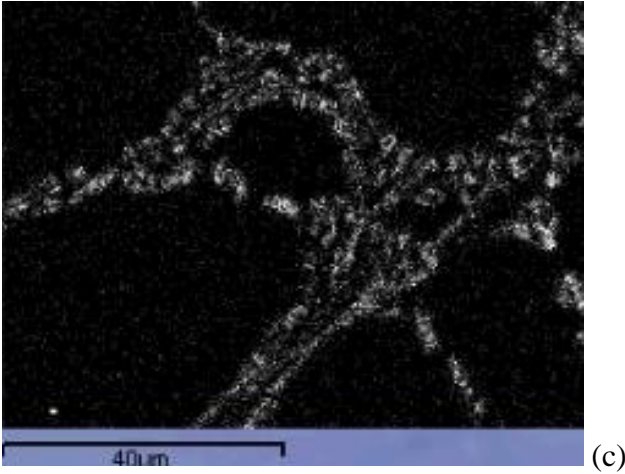
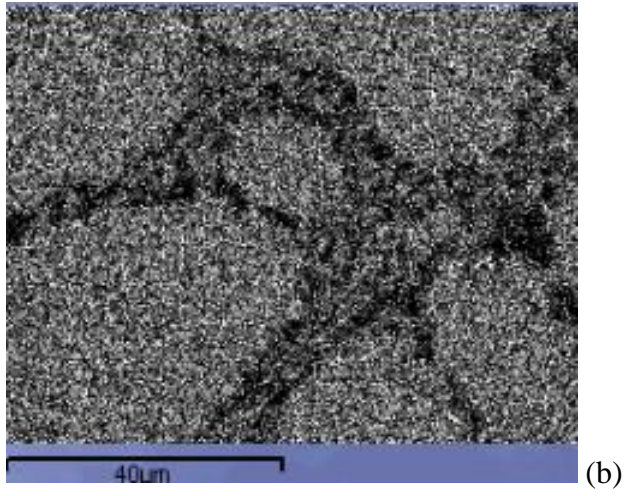
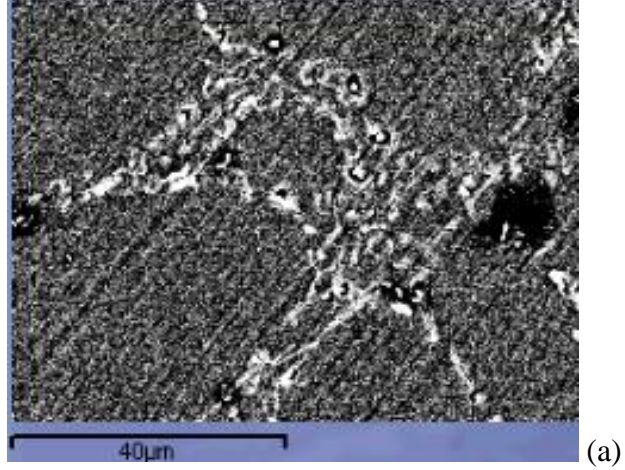
**Şekil 4.105 :** % 7 Si içeren 15 nolu alaşımın SEM görüntüleri a) Genel yapı b) % Al dağılımı c) % Si dağılımı.

Şekil 4.105'de 15 nolu alaşımın genel analizinde % ağırlıkça Al, Si, Cu, Mg, Mn, Co, Fe, Na ve Ca, matris analizinde % ağırlıkça Al, Si, Mn ve Fe, tane sınırı analizinde % ağırlıkça Al, Si, Mg, Mn ve Ca elementleri saptanmıştır.



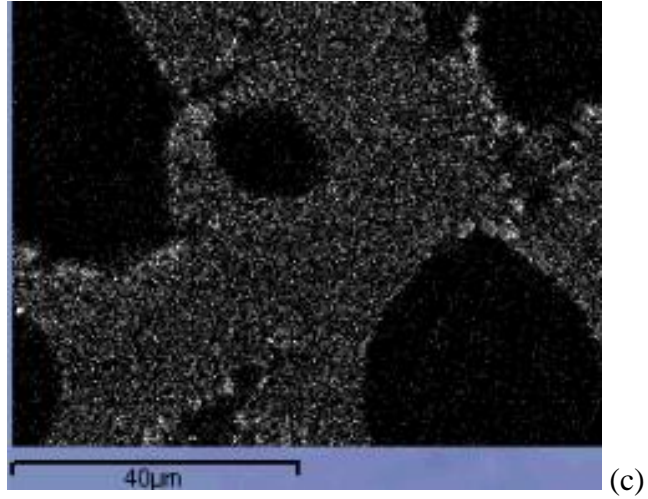
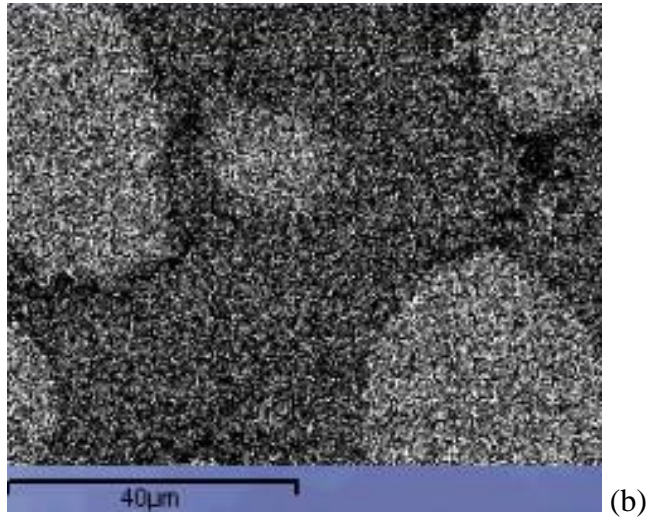
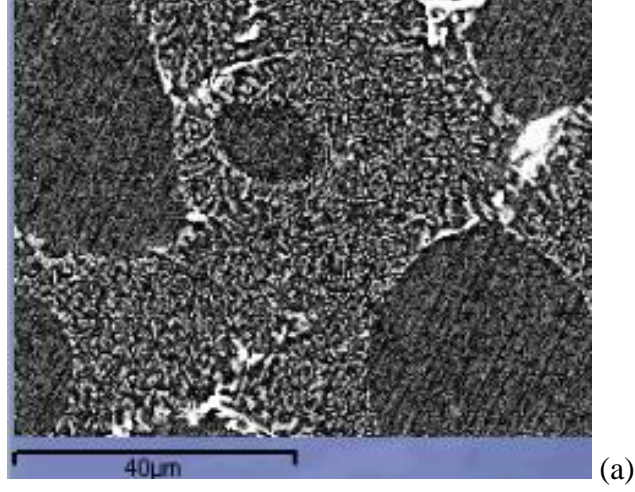
**Şekil 4.106** : % 7 Si içeren 3 nolu alaşımın SEM görüntüleri a) Genel yapı b) % Al dağılımı c) % Si dağılımı.

Şekil 4.106'da 3 nolu alaşımın genel analizinde % ağırlıkça Al, Si ve Mg, matris analizinde % ağırlıkça Al, Si ve Mg, tane sınırı analizinde % ağırlıkça Al, Si, Mg ve Ti elementleri görülmüştür.



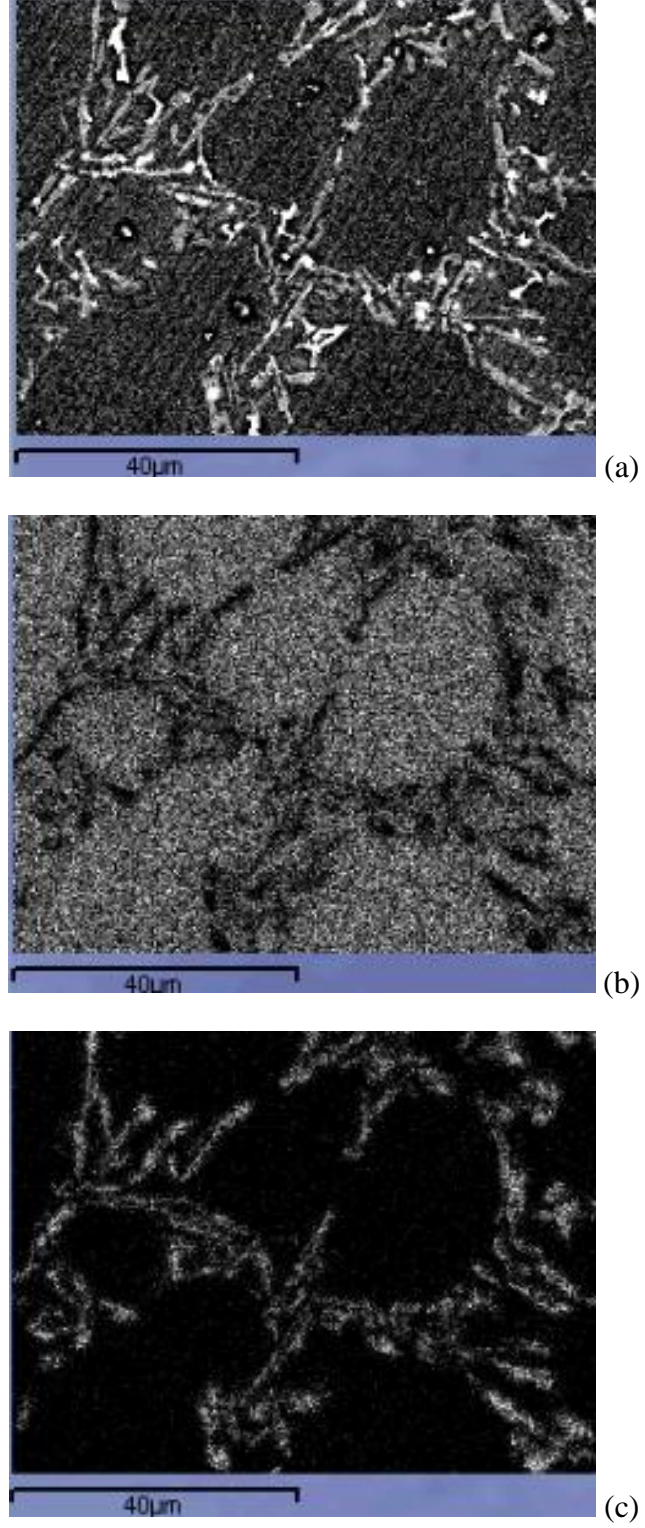
**Şekil 4.107 :** % 7 Si içeren 12 nolu alaşımın SEM görüntüleri a) Genel yapı b) % Al dağılımı c) % Si dağılımı.

Şekil 4.107’de 12 nolu alaşımın genel analizinde % ağırlıkça Al, Si, Cu, Ti ve Fe, matris analizinde % ağırlıkça Al, Si ve Mg, tane sınırı analizinde % ağırlıkça Al, Si, Cu ve Mg elementleri saptanmıştır.



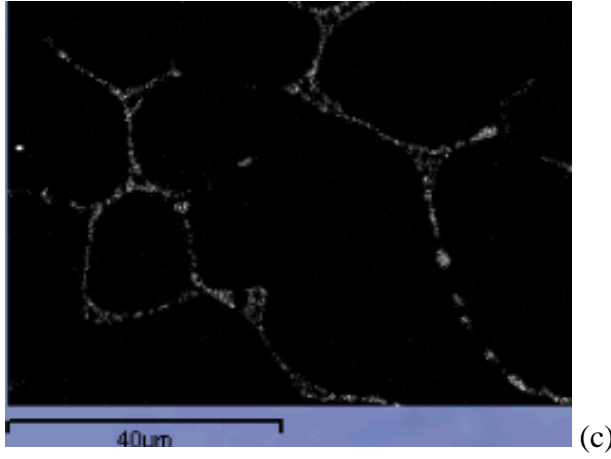
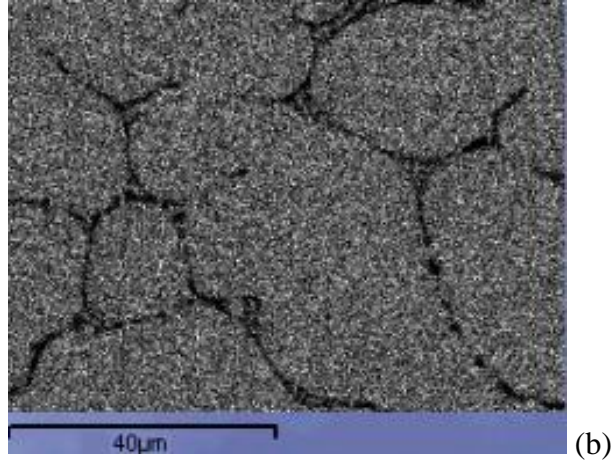
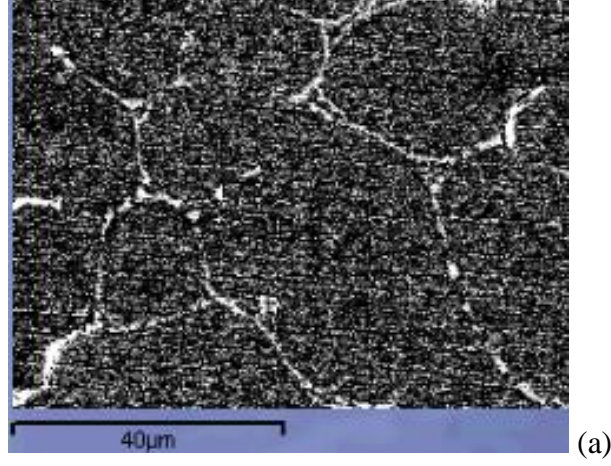
**Şekil 4.108** : % 7 Si içeren 27 nolu alaşımın SEM görüntüleri a) Genel yapı b) % Al dağılımı c) % Si dağılımı.

Şekil 4.108’de 27 nolu alaşımın genel analizinde % ağırlıkça Al, Si, Cu, Zn, Mg, Mn, Co ve Na, matris analizinde % ağırlıkça Al, Si, Zn, Mg, Mn, Co, Ti ve Fe, tane sınırı analizinde % ağırlıkça Al, Si, Zn, Mg, Mn, Co ve Fe elementleri görülmüştür.



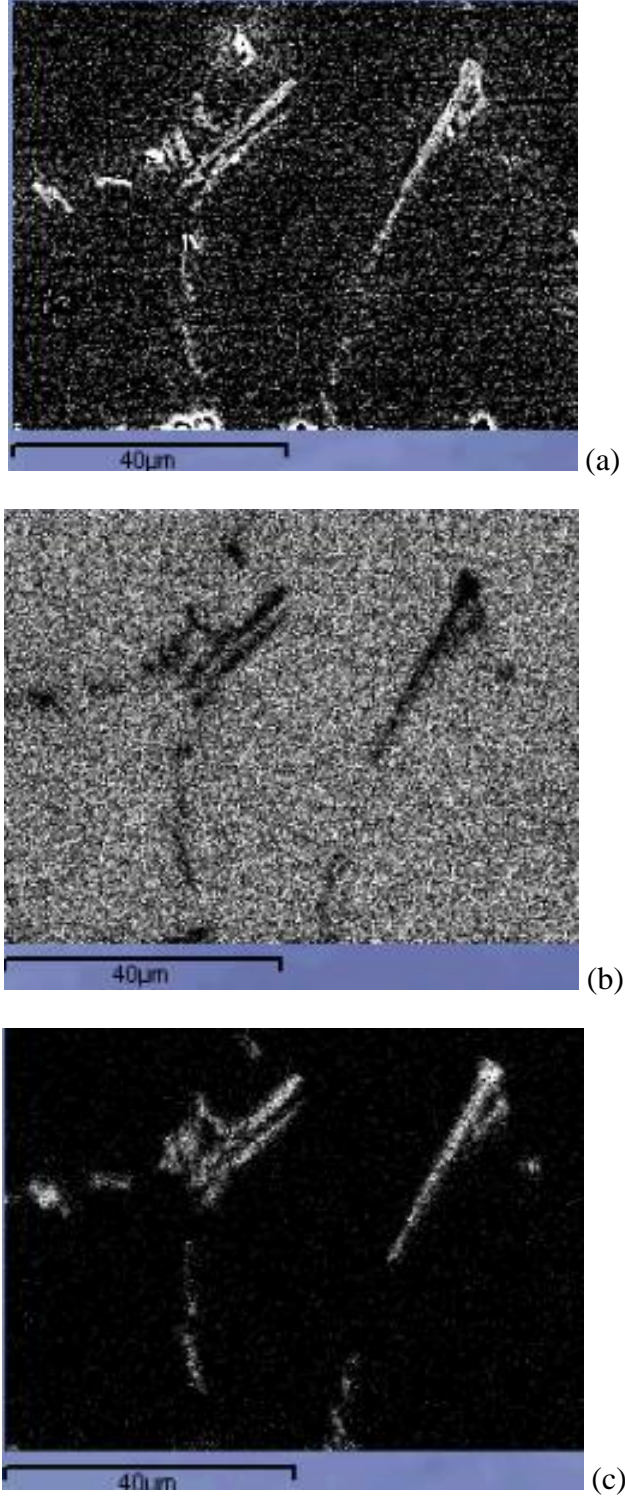
**Şekil 4.109 :** % 4 Si içeren 2 nolu alaşımın SEM görüntüleri a) Genel yapı b) % Al dağılımı c) % Si dağılımı.

Şekil 4.109'da 2 nolu alaşımın genel analizinde % ağırlıkça Al, Si, Cu, Mg, Ti ve Fe, matris analizinde % ağırlıkça Al, Si, Cu ve Mg, tane sınırı analizinde % ağırlıkça Al, Si, Cu, Mg, ve Fe elementleri görülmüştür.



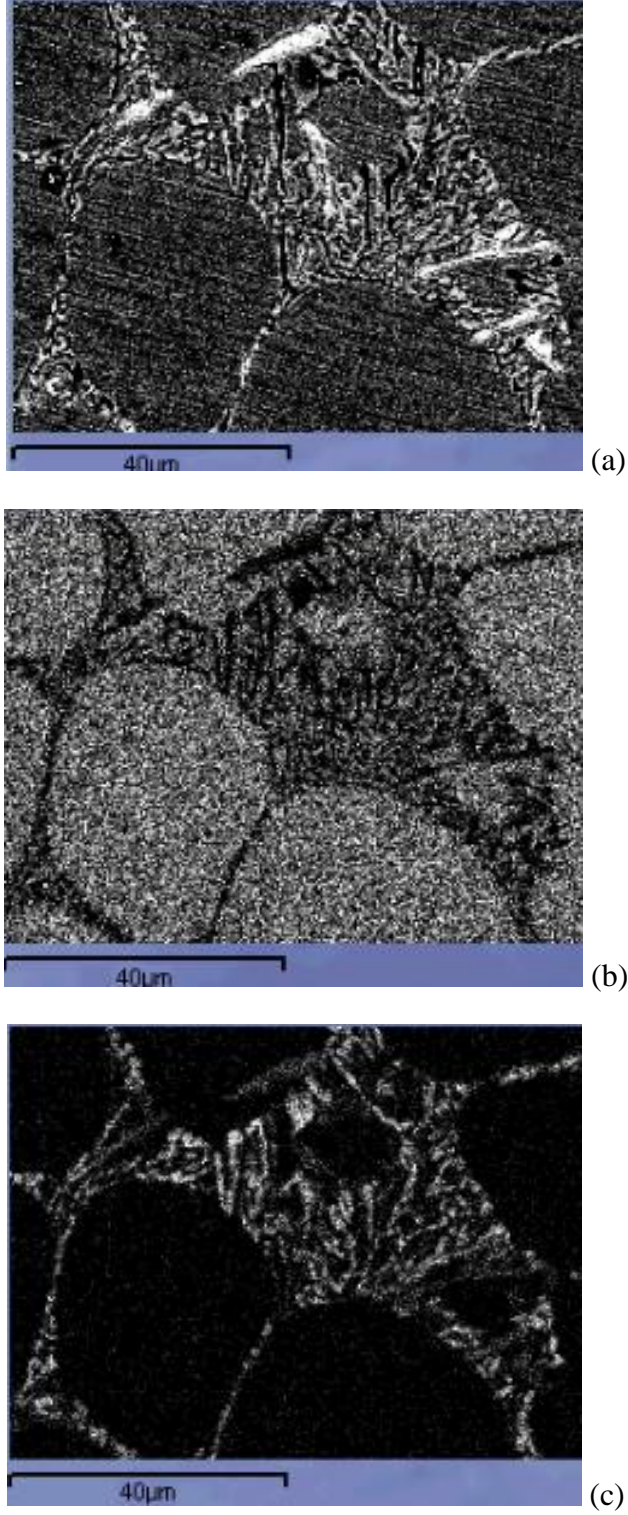
**Şekil 4.110** : % 4 Si içeren 4 nolu alaşımın SEM görüntüleri a) Genel yapı b) % Al dağılımı c) % Si dağılımı.

Şekil 4.110'da 4 nolu alaşımın genel analizinde % ağırlıkça Al, Si, Zn ve Mg, matris analizinde % ağırlıkça Al, Si, Mg, Mn, Fe ve Na tane sınırı analizinde % ağırlıkça Al, Si, Cu, Zn, Mg, Mn, Co ve Fe elementleri saptanmıştır.



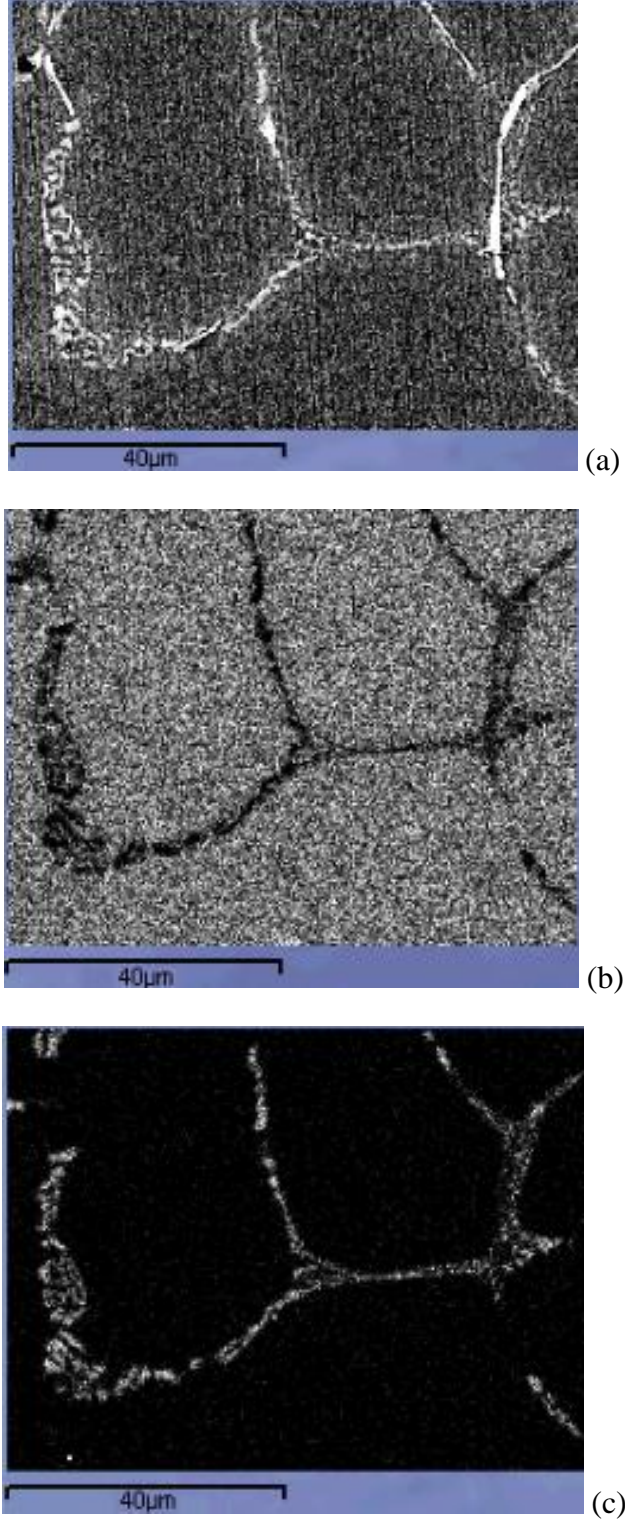
**Şekil 4.111** : % 4 Si içeren 17 nolu alaşımın SEM görüntüleri a) Genel yapı b) % Al dağılımı c) % Si dağılımı.

Şekil 4.111’de 17 nolu alaşımın genel analizinde % ağırlıkça Al, Si, Cu, Mg, Mn ve Ti, matris analizinde % ağırlıkça Al, Si, Zn, Mg, Mn, Ti, O ve F, tane sınırı analizinde % ağırlıkça Al, Si, Cu, Mg ve Ti elementleri görülmüştür.



**Şekil 4.112** : % 4 Si içeren 24 nolu alaşımın SEM görüntüleri a) Genel yapı b) % Al dağılımı c) % Si dağılımı.

Şekil 4.112’de 24 nolu alaşımın genel analizinde % ağırlıkça Al, Si, Mg, O ve C, matris analizinde % ağırlıkça Al, Si, Cu, Mg, Co ve Fe, tane sınırı analizinde % ağırlıkça Al, Si, Cu, Mg, Co, Fe ve Na elementleri saptanmıştır.



**Şekil 4.113 :** % 4 Si içeren 25 nolu alaşımın SEM görüntüleri a) Genel yapı b) % Al dağılımı c) % Si dağılımı.

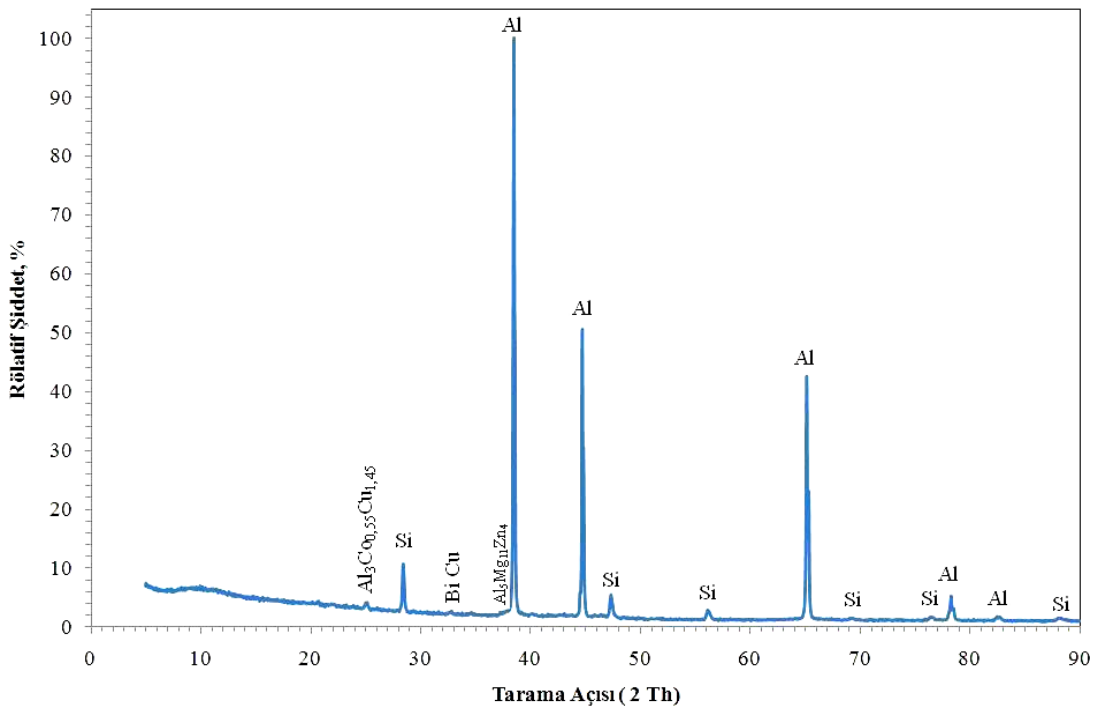
Şekil 4.113’de 25 nolu alaşımın genel analizinde % ağırlıkça Al, Si, Mg, Co, Fe ve Ca, matris analizinde % ağırlıkça Al ve Si, tane sınırı analizinde % ağırlıkça Al, Si, Cu, Mg, Co, Ti, Fe ve Na elementleri saptanmıştır.

#### 4.12 XRD Analizi

X ışını analizleri CuK  $\alpha$  (1,54 Å) ışınımı yardımıyla gerçekleştirilmiştir. 45 kV ve 40 mA çalışma koşulları seçilerek 5° ile 90° arasında tarama açısı ayarlanarak numunelerin analizleri tamamlanmıştır.

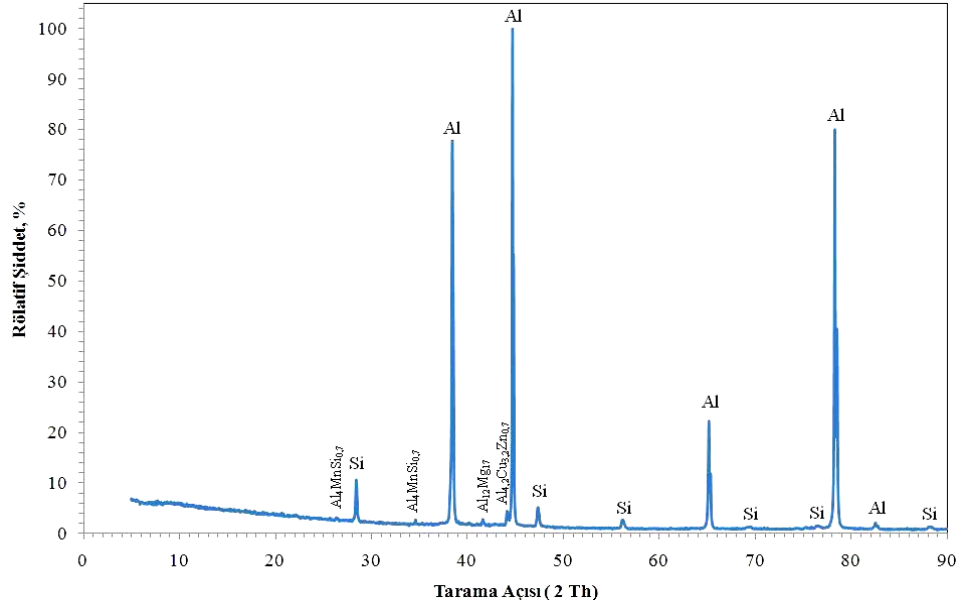
XRD Analizi çalışmaları mevcut jant sektöründe kullanılan ticari alaşımdan daha iyi mekanik özelliklerin elde edildiği % 7 Si içeren 1, 15, 3, 12, 27 nolu alaşımlarda ve % 4 Si içeren 2, 4, 17, 24, 25 nolu alaşımlarda gerçekleştirilmiştir.

Alaşımlara ait % bileşim miktarları Çizelge 4.2’de verilmektedir.



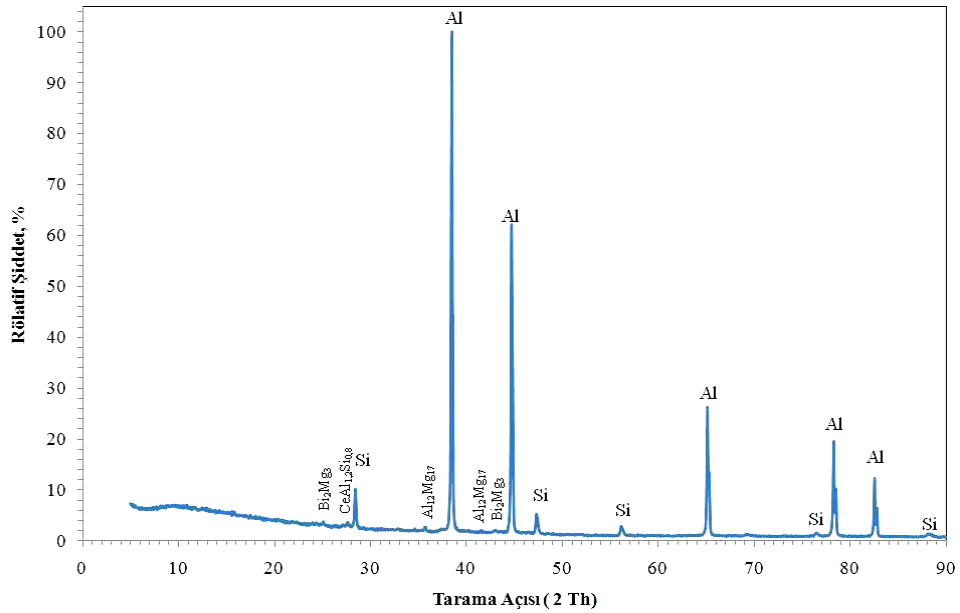
Şekil 4.114 : % 7 Si içeren 1 nolu alaşımın XRD görüntüsü.

1 numaralı alaşımın XRD analizine göre Şekil 4.114’de Al ve Si alaşımın ana yapılarını oluştururken alaşıma ilave edilen elementler az miktarlarda bulunan  $Al_3Co_{0.55}Cu_{1.45}$ , BiCu,  $Al_5Mg_{11}Zn_4$  yapılarını oluşturmuşlardır.



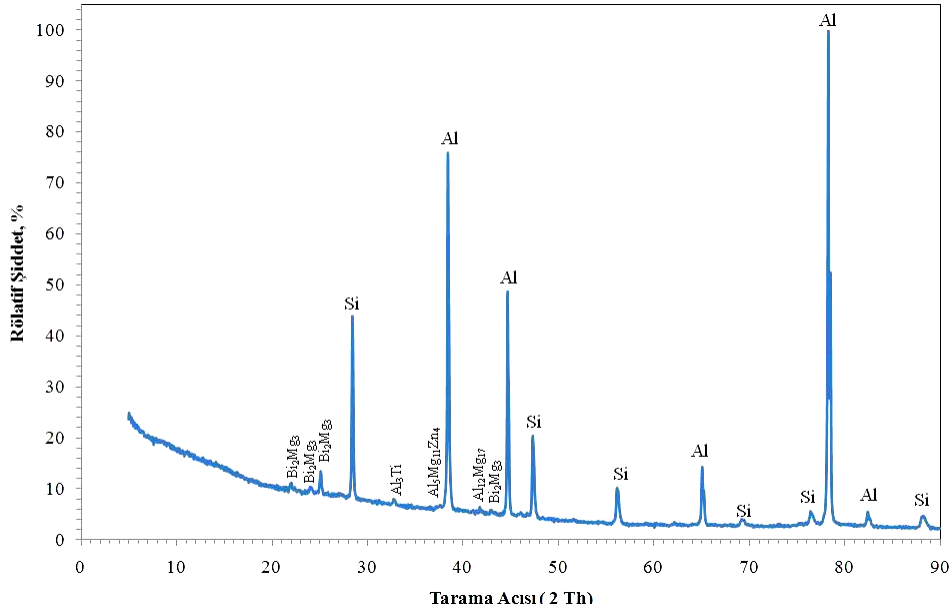
**Şekil 4.115 :** % 7 Si içeren 15 nolu alaşımın XRD görüntüsü.

Şekil 4.115’de XRD analizine göre 15 numaralı alaşımda Al ve Si ana yapılarının yanı sıra  $Al_{12}Mg_{17}$ ,  $Al_{4.2}Cu_{3.2}Zn_{0.7}$  ve  $Al_4MnSi_{0.7}$  ötektik alaşımlarının oluştuğu görülmektedir.



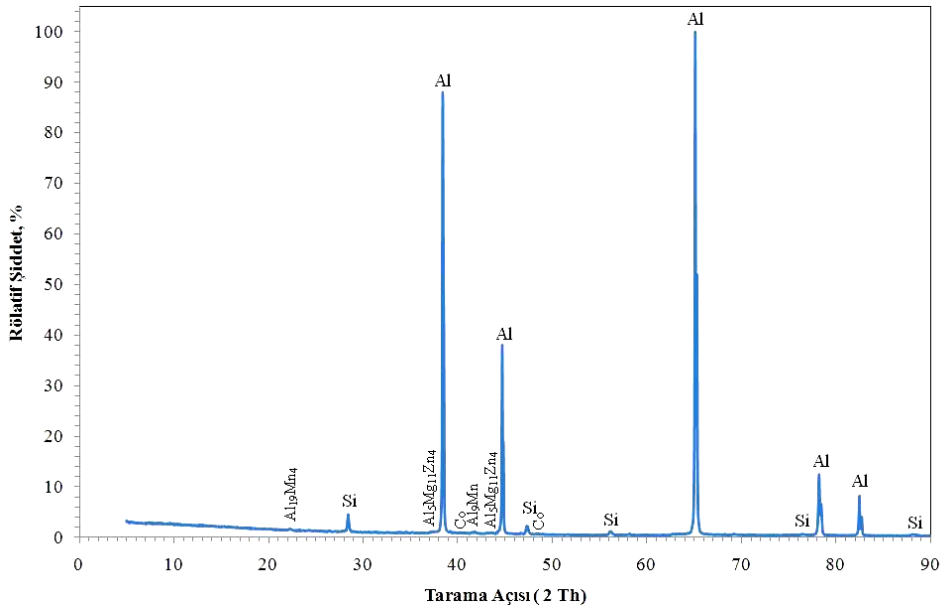
**Şekil 4.116 :** % 7 Si içeren 3 nolu alaşımın XRD görüntüsü.

3 numaralı alaşımın XRD analiz sonucunda Şekil 4.116’da ana yapıyı oluşturan Al ve Si fazlarının yanı sıra alaşım ilavesi olarak eklenen magnezyum, bizmut ve seryum elementlerinin oluşturduğu  $Al_{12}Mg_{17}$ ,  $Bi_2Mg_3$ ,  $CeAl_{1.2}Si_{0.8}$  fazlarının pikleri de görülmektedir.



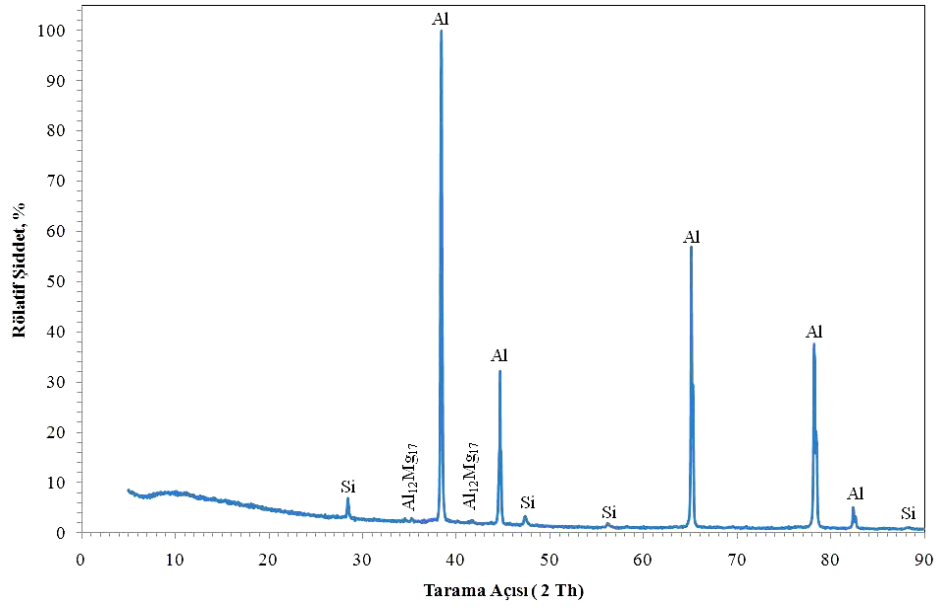
**Şekil 4.117 :** % 7 Si içeren 12 nolu alaşımın XRD görüntüsü.

12 numaralı alaşımda oluşan yapıda Şekil 4.117’de Al ve Si fazlarıyla birlikte  $\text{Bi}_2\text{Mg}_3$ ,  $\text{Al}_5\text{Mg}_{11}\text{Zn}_4$ ,  $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$  ve  $\text{Al}_3\text{Ti}$  fazları da yer almaktadır.



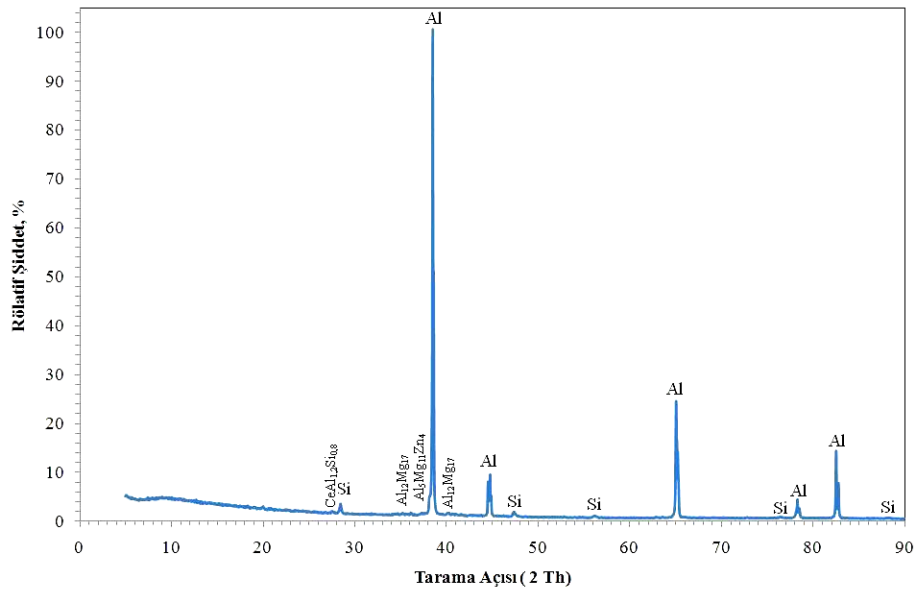
**Şekil 4.118 :** % 7 Si içeren 27 nolu alaşımın XRD görüntüsü.

27 numaralı alaşımın X ışını faz analizi sonucuna bakıldığında Şekil 4.118’de Al ve Si elementlerinin ana yapıyı oluşturduğu  $\text{Al}_5\text{Mg}_{11}\text{Zn}_4$ ,  $\text{Al}_9\text{Mn}$ ,  $\text{Al}_{19}\text{Mn}_4$  ve Co fazlarının da yapıda var olduğu saptanmıştır.



**Şekil 4.119 :** % 4 Si içeren 2 nolu alaşımın XRD görüntüsü.

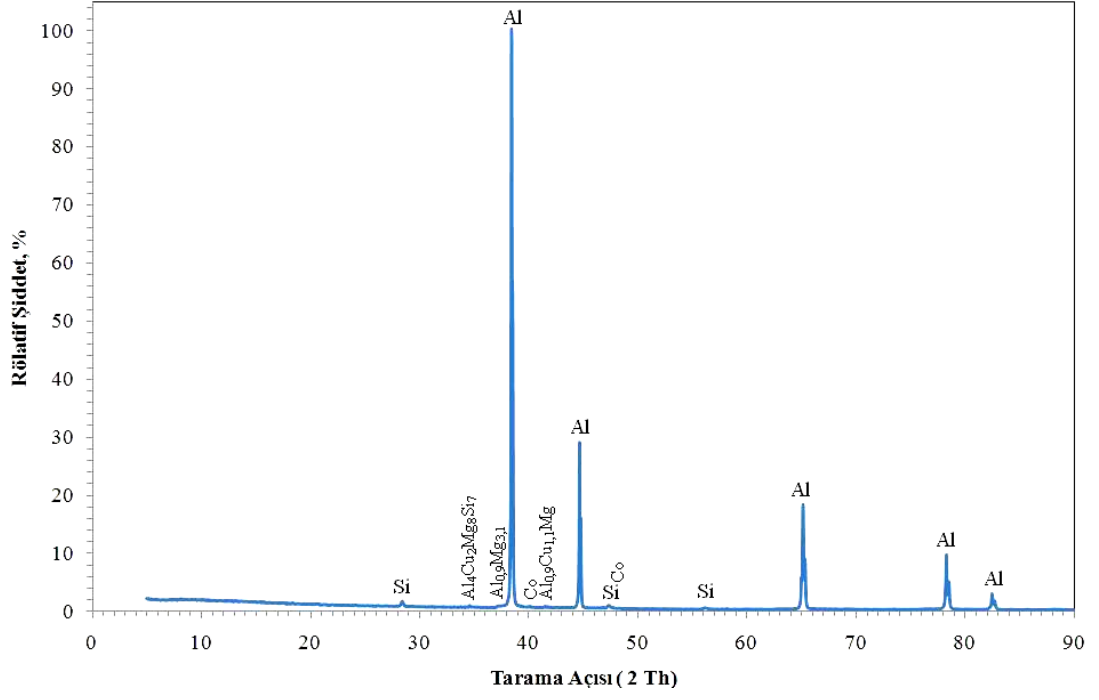
Şekil 4.119’da 2 numaralı alaşımın XRD analizine göre alaşımın temelini oluşturan Al ve Si fazlarının yanı sıra çok az miktarda bulunan kübik yapıya sahip  $Al_{12}Mg_{17}$  fazının karakteristik pikleri de gözlemlenmektedir.



**Şekil 4.120 :** % 4 Si içeren 4 nolu alaşımın XRD görüntüsü.

Şekil 4.120’de 4 numaralı alaşımın X ışını analizine bakıldığında matris olarak alınan Al fazının yanı sıra alaşım ilavesi olarak kullanılan elementlerin oluşturduğu Si,  $Al_{12}Mg_{17}$ ,  $CeAl_{1.2}Si_{0.8}$  ve  $Al_5Mg_{11}Zn_4$  fazlarının varlığı tespit edilmiştir.





**Şekil 4.123 :** % 4 Si içeren 25 nolu alaşımın XRD görüntüsü.

Şekil 4.123’de 25 numaralı alaşımın XRD analizi sonucuna bakıldığında yapıyı oluşturan ana fazın Al olduğu bununla beraber Si, Co, Al<sub>4</sub>Cu<sub>2</sub>Mg<sub>8</sub>Si<sub>7</sub>, Al<sub>0.9</sub>Cu<sub>1.1</sub>Mg ve Al<sub>0.9</sub>Mg<sub>3.1</sub> yapılarının da yer aldığı görülmektedir.



## 5. DENEYSEL SONUÇLARIN İRDELENMESİ

32 adet deneyin sonucunda Bölüm 4'te anlatılan deney sonuçlarının çıktılarını bölüm 5.1 ve 5.2'de irdelenmiştir.

### 5.1 Mekanik Test Sonuçlarının Ticari Referans Ürünlerle Kıyaslanması

Jant üretiminde mevcut kullanılan ısıtılmış işlemlenmiş % 11 Si'li malzemelerin akma dayanımı (min 80 MPa), çekme dayanımı (min 150 MPa), % uzama (min % 3) ve sertlik değerleri (min 54 HB) referans alındığında ve ısıtılmış işlemlenmiş % 7 Si'li malzemelerin akma dayanımı (150 MPa), çekme dayanımı (220 MPa), % uzama (min % 3) ve sertlik değerleri (min 70 HB) referans alındığında [21]

Çizelge 5.1'de verilen % 7 Si içeren 1, 15, 3, 12, 27 nolu alaşımlarda ve % 4 Si içeren 2, 4, 17, 24, 25 nolu alaşımlarda ticari referans ürünün (otomotiv jant sektörü) mekanik değerlerinden daha iyi sonuçlar elde edilmiştir.

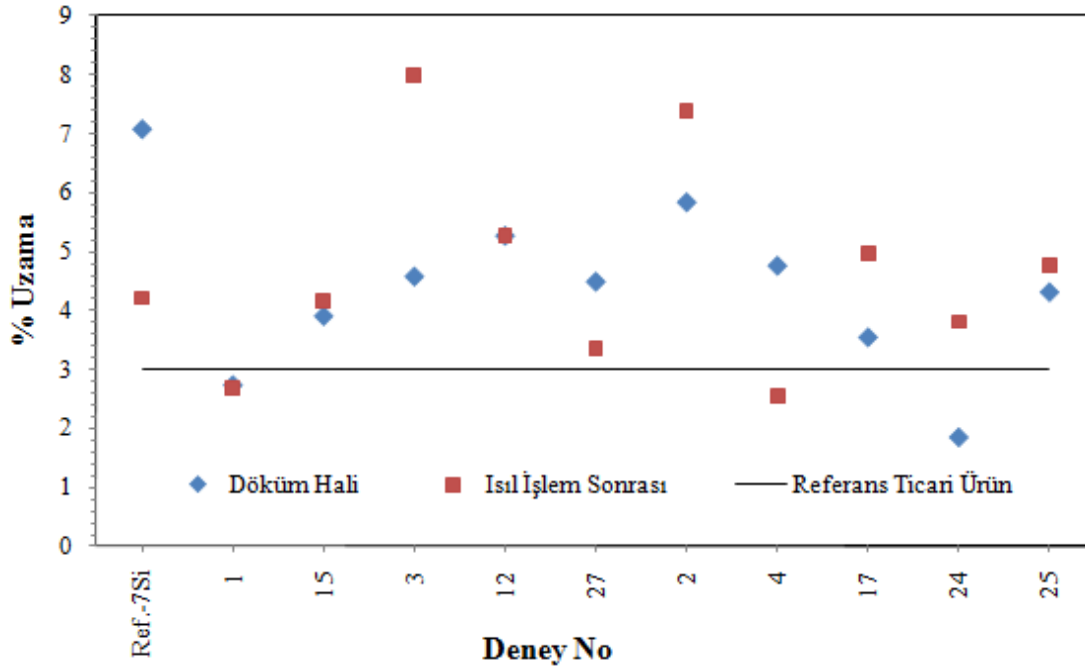
**Çizelge 5.1 :** En iyi değerlerin eldesi için deneysel tasarım programı ile hesaplanmış bileşimler (Ref: referans alaşım, % Fe = maks 0,15).

DENEY NO	Si	Cu	Zn	Mg	B	Mn	Ce	Sr	Na	Bi	Co	Ti
Ref-7Si	7	0-0,2	0-0,04	0,25-0,33	0,015	0-0,04	0	0,01-0,03	0	0	0	0,08-0,15
1 (7Si)	7	1,2	0,5	0,3	0,001	0	0	0,01	0	0,5	0,4	0,2
15 (7Si)	7	1,2	0,5	0,3	0,003	0,6	0	0,01	0,003	0	0	0,1
3 (7Si)	7	0	0	0,3	0,003	0	0,3	0,02	0	0,5	0	0,1
12 (7Si)	7	0	0,5	0,3	0,001	0	0	0,02	0,003	0,5	0	0,2
27 (7Si)	7	0	0,5	0,3	0,003	0,6	0	0,02	0	0	0,4	0,1
2 (4Si)	4	0	0	0,3	0,001	0	0	0,01	0	0	0	0,1
4 (4Si)	4	0	0,5	0,3	0,003	0	0,3	0,01	0,003	0	0	0,2
17 (4Si)	4	1,2	0	0,3	0,003	0,6	0	0,02	0	0,5	0	0,2
24 (4Si)	4	1,2	0,5	1,5	0,003	0	0	0,01	0	0,5	0	0,1
25 (4Si)	4	1,2	0	0,3	0,001	0	0	0,02	0,003	0	0,4	0,1

**Çizelge 5.2 :** En iyi mekanik değerlerin elde edildiği numunelerin ölçülmüş kimyasal bileşimleri.

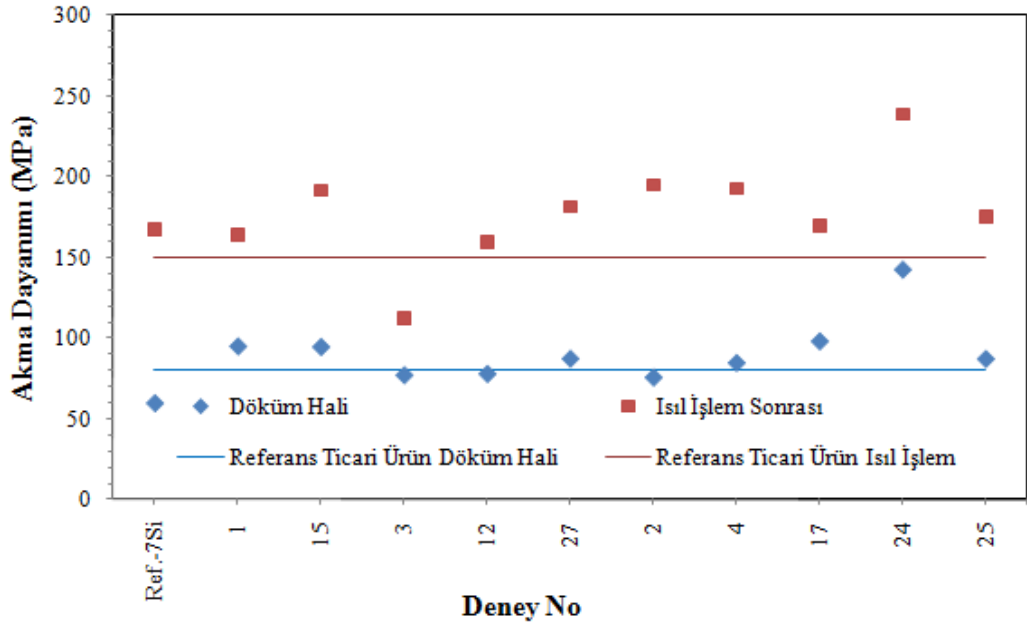
DENEY NO	Si	Cu	Zn	Mg	B	Mn	Ce	Sr	Na	Bi	Co	Ti	Fe
Ref-7Si	7,61	0,00	0,00	0,27	0,0001	0,00	0,00	0,012	0,0005	0,00	0,00	0,11	0,09
1 (7Si)	6,84	1,25	0,51	0,24	0,0006	0,00	0,00	0,003	0,0002	0,40	0,48	0,27	0,09
15 (7Si)	6,96	1,16	0,46	0,30	0,0019	0,96	0,00	0,014	0,0001	0,02	0,04	0,11	0,10
3 (7Si)	6,83	0,00	0,03	0,31	0,0005	0,00	0,29	0,010	0,0003	0,54	0,04	0,12	0,11
12 (7Si)	6,73	0,01	0,42	0,29	0,0001	0,00	0,00	0,016	0,0003	0,42	0,04	0,20	0,10
27 (7Si)	7,25	0,01	0,47	0,32	0,0022	0,63	0,00	0,017	0,0003	0,07	0,39	0,11	0,10
2 (4Si)	4,17	0,02	0,02	0,40	0,0007	0,00	0,00	0,040	0,0002	0,01	0,01	0,13	0,10
4 (4Si)	4,07	0,00	0,55	0,45	0,0017	0,00	0,30	0,013	0,0010	0,03	0,04	0,27	0,11
17 (4Si)	4,12	1,14	0,50	0,25	0,0021	0,80	0,00	0,068	0,0006	0,41	0,04	0,19	0,10
24 (4Si)	4,14	0,95	0,51	1,34	0,0001	0,02	0,01	0,004	0,0006	0,23	0,04	0,07	0,10
25 (4Si)	4,47	1,23	0,02	0,32	0,0016	0,00	0,00	0,018	0,0018	0,05	0,45	0,07	0,10

Şekil 5.1’de % 7 Si içeren (Ref 7 Si, 1, 15, 3, 12 ve 27 no) ile % 4 Si içeren (2, 4, 17, 24 ve 25 no) alaşımlara ait % uzama miktarlarının döküm hali ve ısıl işlemleri hallerinin referans ticari ürün ile karşılaştırılması görülmektedir.



**Şekil 5.1 :** En iyi mekanik değerlerin elde edildiği deneylerin % uzama sonuçlarının referans ticari ürün ile karşılaştırılması.

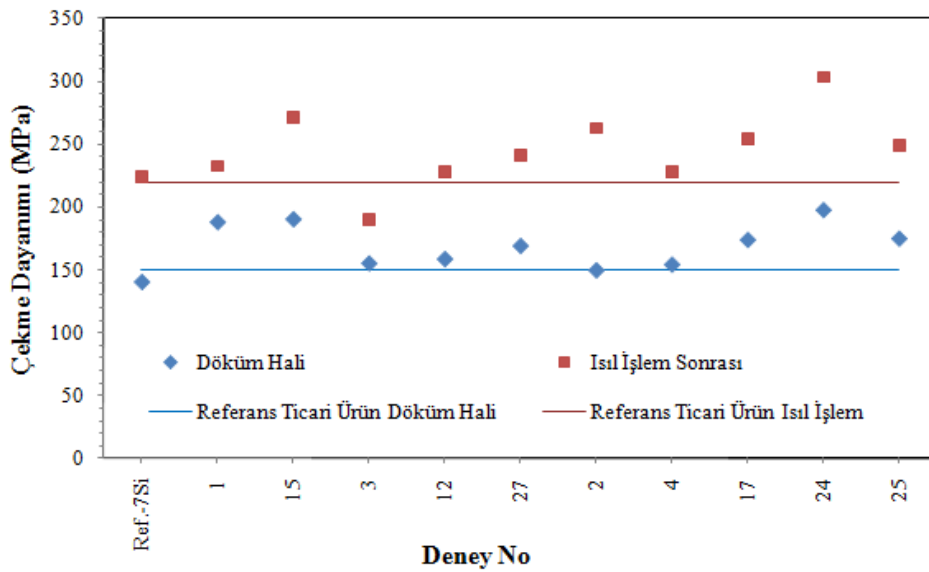
% 7 Si içeren alaşımlar içinde döküm hali ile en yüksek % uzama değerine referans 7 Si ve 12 nolu alaşımlarda, ısıl işlemleri olarak ise 3 nolu alaşımda ulaşılmıştır. % 4 Si içeren alaşımlar içinde döküm hali ve ısıl işlemleri olarak en yüksek % uzama değerine 2 nolu alaşımda ulaşılmıştır.



**Şekil 5.2** : En iyi mekanik değeri elde edildiği deneçlerin akma dayanımı sonuçlarının referans ticari ürün ile karşılaştırılması.

Şekil 5.2'de % 7 Si içeren (Ref 7 Si, 1, 15, 3, 12 ve 27 no) ile % 4 Si içeren (2, 4, 17, 24 ve 25 no) alaşımlara ait akma dayanımlarının döküm hali ve ısıtım hallerinin referans ticari ürün ile karşılaştırılması görülmektedir.

% 7 Si içeren alaşımlar içinde döküm hali ile en yüksek akma dayanımı değeri 1 ve 15 nolu alaşımlarda, ısıtım hali olarak ise 15 ve 27 nolu alaşımlarda ulaşılmıştır. % 4 Si içeren alaşımlar içinde döküm hali ile ve ısıtım hali olarak en yüksek akma dayanımı değeri 24 nolu alaşımda ulaşılmıştır.

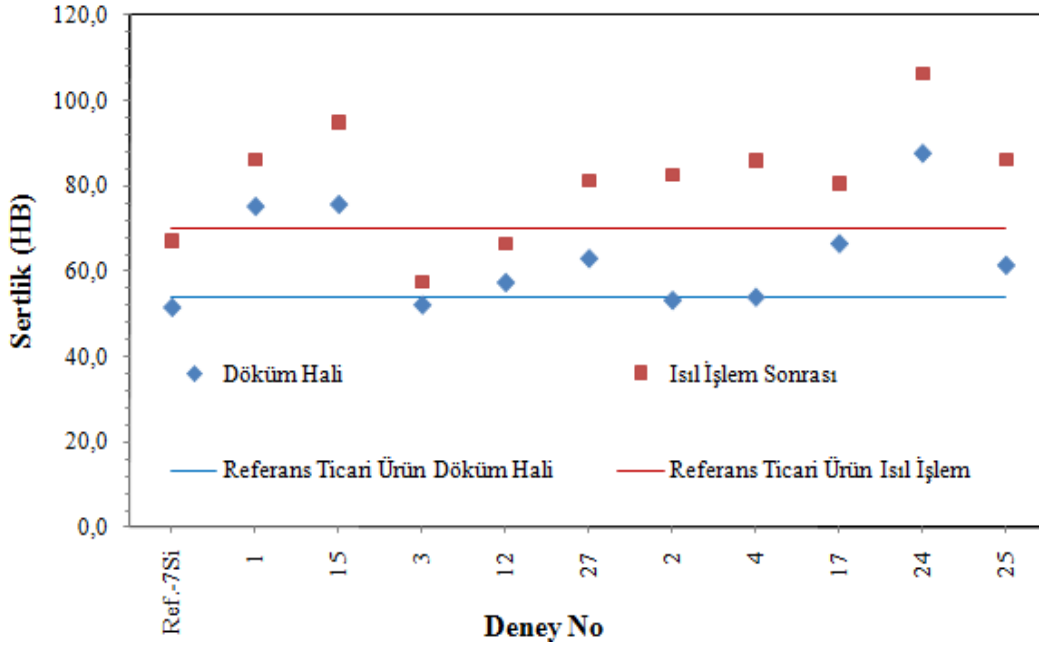


**Şekil 5.3** : En iyi mekanik değeri elde edildiği deneçlerin çekme dayanımı sonuçlarının referans ticari ürün ile karşılaştırılması.

Şekil 5.3'te % 7 Si içeren (Ref 7 Si, 1, 15, 3, 12 ve 27 no) ile % 4 Si içeren (2, 4, 17, 24 ve 25 no) alaşımlara ait çekme dayanımlarının döküm hali ve ısıl işlemlili hallerinin referans ticari ürün ile karşılaştırılması görülmektedir.

% 7 Si içeren alaşımlar içinde döküm hali ile en yüksek çekme dayanımı değerlerine 1 ve 15 nolu alaşımlarda, ısıl işlemlili olarak ise 15 ve 27 nolu alaşımlarda ulaşılmıştır.

% 4 Si içeren alaşımlar içinde döküm hali ile en yüksek çekme dayanımı değerlerine 24 ve 25 nolu alaşımlarda, ısıl işlemlili olarak ise 2 ve 24 nolu alaşımlarda ulaşılmıştır.

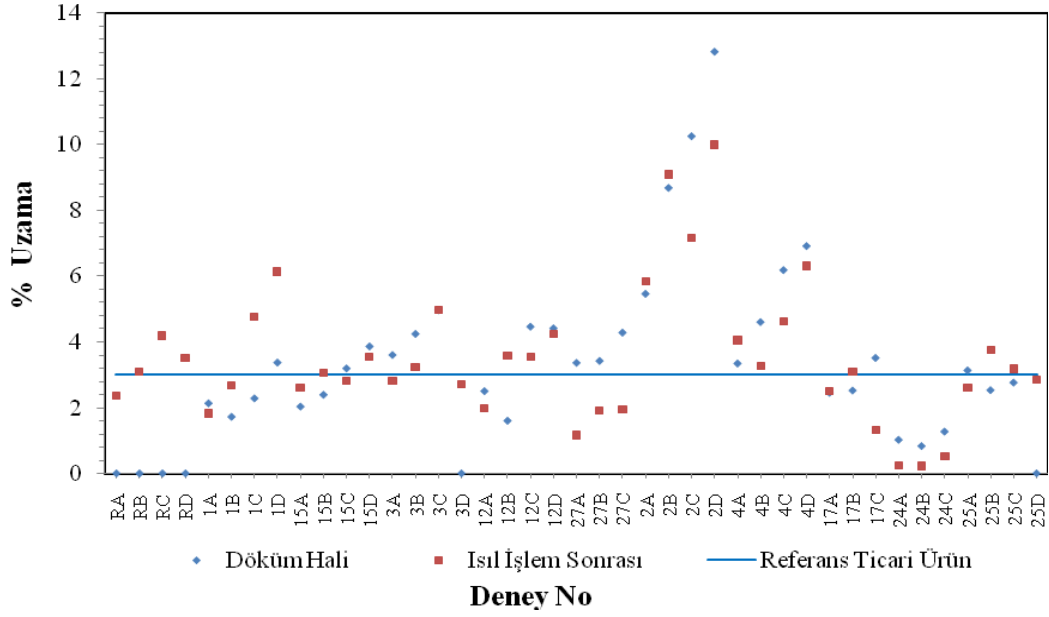


Şekil 5.4 : En iyi mekanik değerlerin elde edildiği deneylerin sertlik sonuçlarının referans ticari ürün ile karşılaştırılması.

Şekil 5.4'de % 7 Si içeren (Ref 7 Si, 1, 15, 3, 12 ve 27 no) ile % 4 Si içeren (2, 4, 17, 24 ve 25 no) alaşımlara ait sertlik değerlerinin döküm hali ve ısıl işlemlili hallerinin referans ticari ürün ile karşılaştırılması görülmektedir.

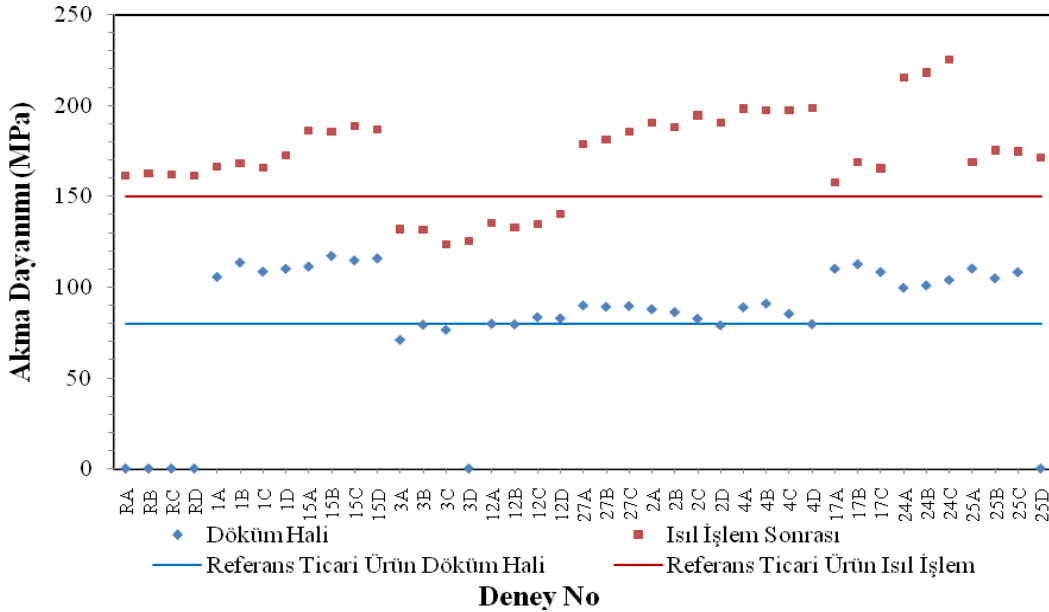
% 7 Si içeren alaşımlar içinde döküm hali ve ısıl işlemlili olarak en yüksek sertlik değerlerine 1 ve 15 nolu alaşımlarda ulaşılmıştır.

% 4 Si içeren alaşımlar içinde döküm hali ile en yüksek sertlik değerlerine 17, 24 ve 25 nolu alaşımlarda, ısıl işlemlili olarak ise 4, 24 ve 25 nolu alaşımlarda ulaşılmıştır.



**Şekil 5.5 :** En iyi mekanik değerlerin elde edildiği DAS deneylerinin % uzama sonuçlarının referans ticari ürün ile karşılaştırılması.

Şekil 5.5’de % 7 Si içeren ile % 4 Si içeren alaşımlara ait farklı soğuma kesitlerini temsil eden (A, B, C ve D) % uzama miktarlarının döküm hali ve ısıl işlemliler hallerinin referans ticari ürün ile karşılaştırılması görülmektedir. % 7 Si içeren alaşımlar içinde döküm hali ile en yüksek % uzama değerlerine 3, 12 ve 27 nolu alaşımlarda, ısıl işlemliler olarak ise referans 7 Si, 1, 3 ve 12 nolu alaşımlarda ulaşılmıştır. % 4 Si içeren alaşımlar içinde döküm hali ve ısıl işlemliler olarak en yüksek % uzama değerlerine 2 ve 4 nolu alaşımlarda ulaşılmıştır.

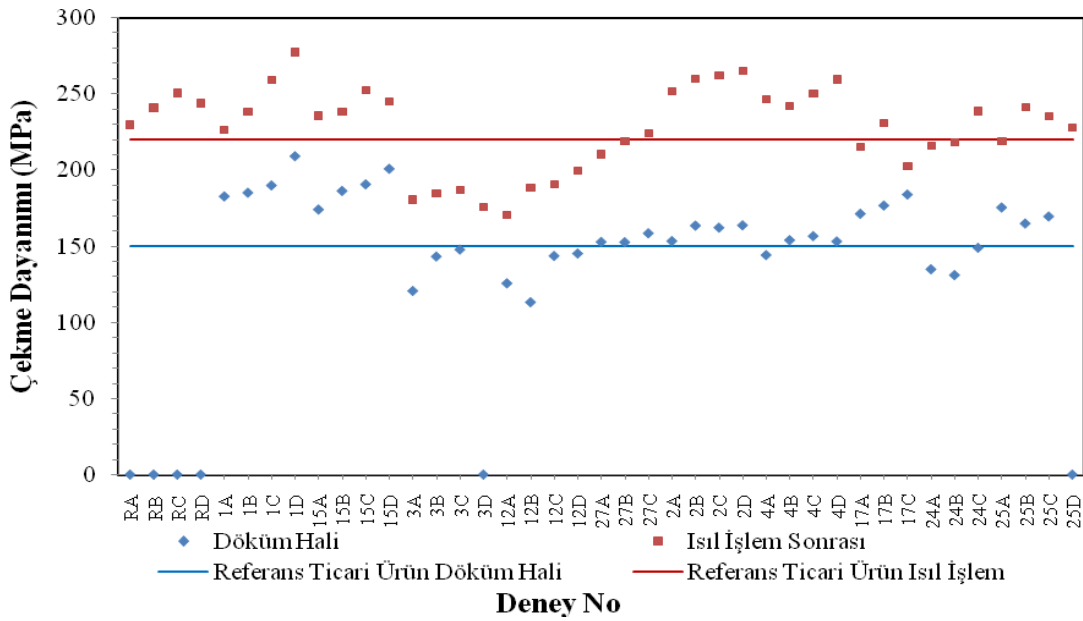


**Şekil 5.6 :** En iyi mekanik değerlerin elde edildiği DAS deneylerinin akma dayanımı sonuçlarının referans ticari ürün ile karşılaştırılması.

Şekil 5.6'da % 7 Si içeren (Ref 7 Si, 1, 15, 3, 12 ve 27 no) ile % 4 Si içeren (2, 4, 17, 24 ve 25 no) alaşımlara ait farklı soğuma kesitlerini temsil eden (A, B, C ve D) akma dayanımlarının döküm hali ve ısıl işlemliler hallerinin referans ticari ürün ile karşılaştırılması görülmektedir.

% 7 Si içeren alaşımlar içinde döküm hali ile en yüksek akma dayanımı değerlerine 1, 15 nolu alaşımlarda, ısıl işlemliler olarak ise 1, 15 ve 27 nolu alaşımlarda ulaşılmıştır.

% 4 Si içeren deneyler içinde döküm hali ile en yüksek akma dayanımı değerlerine 17, 24 ve 25 nolu alaşımlarda, ısıl işlemliler olarak ise 2, 4 ve 24 nolu alaşımlarda ulaşılmıştır.



Şekil 5.7 : En iyi mekanik değerlerin elde edildiği DAS deneylerinin çekme dayanımı sonuçlarının referans ticari ürün ile karşılaştırılması.

Şekil 5.7'de % 7 Si içeren (Ref 7 Si, 1, 15, 3, 12 ve 27 no) ile % 4 Si içeren (2, 4, 17, 24 ve 25 no) alaşımlara ait farklı soğuma kesitlerini temsil eden (A, B, C ve D) çekme dayanımlarının döküm hali ve ısıl işlemliler hallerinin referans ticari ürün ile karşılaştırılması görülmektedir.

% 7 Si içeren alaşımlar içinde döküm hali ile en yüksek çekme dayanımı değerlerine 1, 15 nolu alaşımlarda, ısıl işlemliler olarak ise referans 7 Si, 1 ve 15 nolu alaşımlarda ulaşılmıştır.

% 4 Si içeren alaşımlar içinde döküm hali ile en yüksek çekme dayanımı değerlerine 2, 17 ve 25 nolu alaşımlarda, ısıl işlemliler olarak ise 2, 4 ve 25 nolu alaşımlarda ulaşılmıştır.

## 5.2 Tüm Analiz Sonuçlarının Minitab Programında Yorumu ve İrdelenmesi

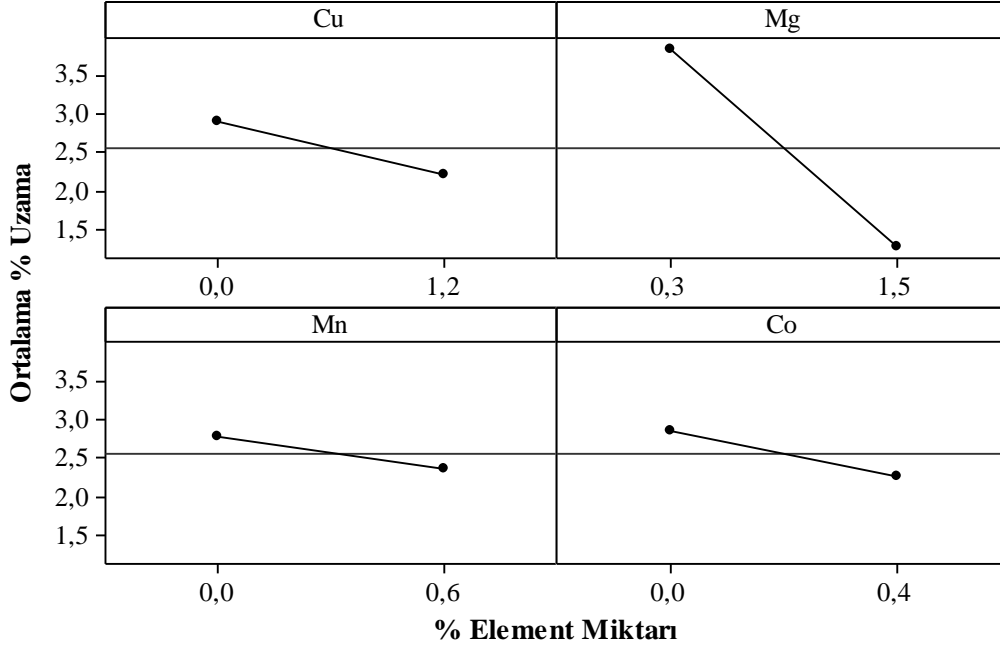
Dökümü gerçekleştirilen 32 adet deney için elde edilen numunelerin yapılan testler için incelenen parametrelere ( % uzama, akma dayanımı, çekme dayanımı, sertlik ve akışkanlık) tüm elementlerin etkileri değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar geneli itibariyle literatür araştırma safhasında tespit edilmiş önemli elementlere göre paralellik göstermiştir. Tüm deney sonuçlarından elde edilen tüm sayısal veriler (ısıl işlemsiz ve ısıl işlemliler uzama, akma dayanımı, çekme dayanımı, sertlik, akışkanlık, kimyasal analiz sonuçları) programa girilerek yorumlanmıştır.

Bu sonuçlar içerisinde söz konusu elementlerin; a) Tek başına etkileri (ana etkileşim elementleri), b) Birbirleriyle oluşturdukları muhtemel intermetalik bileşiklerin ikili etkileri (ikili etkileşim elementleri) ve c) Genel olarak ana etki, ikili etkileşim ve diğer faktörler olarak adlandırılan (çevresel faktörler, açıklanamayan parametreler, ortam sıcaklığı, nem, vb.) özelliklerin % olarak etkilerinin istenen özelliklerde hangi doğruluk oranında gerçekleştiği şekilleriyle tespit edilmiştir.

Ana etkileşim elementleri incelenen parametreye en yüksek oranda etkisi olan elementlerin belirlenmesidir, bu özellik hem % 4 Si hem % 7 Si içeren alaşımlarda incelenmiştir. Ana etkileşim elementlerinin irdelenmesinde çıkarılacak sonuç etki eden elementlerin dışında kalan elementlerin incelenen parametreye olumlu ya da olumsuz yönde etkisinin olmadığı yönde olacaktır.

İkili etkileşim elementleri incelenen parametreye alaşımlar içerisinde her iki elementin bulunduğu durumlarda etkilerin incelendiği durumdur. İstatiksel anlamda ikili etkileşimler; taraflardan her ikisinin birlikte belli oranlarda bulunması durumunda sonuca etki ettiğini ifade etmektedir. Örnek olarak döküm hali ile Si ve Zn'nun % uzamaya ikili etkileşimi tespit edilmiştir (Şekil 5.9). Burada incelemek gerekirse Si'un % 4 olduğu durumda en iyi uzama değeri Zn'nun oranının % 0 olduğu şartta sağlanmaktadır. Tersinir olarak Si'un % 7 olduğu durumda ise en iyi uzama değeri Zn'nun oranının % 0,5 olduğu şartta sağlanmaktadır.

% etki eden parametrelerin incelendiği analizler ise elde edilen sonuçların doğruluk oranının yüzdesel anlamda %100'e yakın oranda doğru olduğunu göstermektedir. Bu analizde ana etkileşim ve ikili etkileşim elementlerinin % olarak toplamı ne kadar yüksek olursa ve diğer faktörler olarak adlandırılan kontrol edilemeyen parametreler % olarak ne kadar düşük olursa ortaya çıkan % miktarına göre deneye ait istatistiksel sonucun doğruluk payının ne kadar yüksek olduğu görülür.



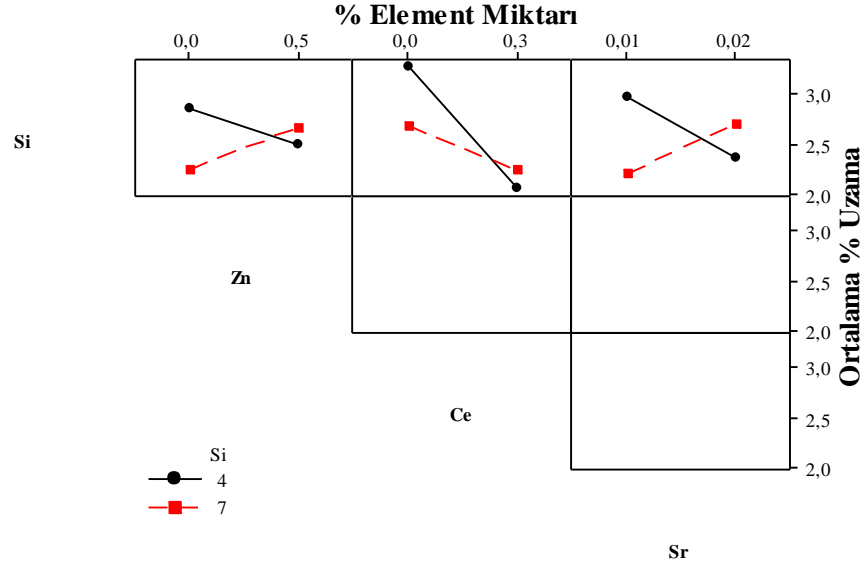
**Şekil 5.8 :** % Uzamaya (döküm hali) ana etkisi olan elementler.

İstatistiksel deneysel tasarım programı analizi sonucunda 32 adet deney içinde % 4 veya % 7 Si içeren alaşımlarında döküm hali ile % uzamaya ana etkisi olan elementler Cu, Mg, Mn ve Co olarak tespit edilmiştir (Şekil 5.8).

Bu 4 element haricindeki bulunan diğer tüm elementlerin % uzamaya (döküm hali) tek başına eklendiklerinde artı yönde veya eksi yönde etkisi yoktur.

Döküm hali ile en yüksek % uzama değerleri elde edebilmek için alaşım içerisinde;

- a) Cu (% 0),
- b) Mn (% 0) ve
- c) Co (% 0) elementlerinin bulunmaması gerekmektedir,
- d) Mg ise % 0,3 oranında ilave edilmelidir.



**Şekil 5.9 :** % Uzamaya (döküm hali) ikili etkileşimde bulunan elementler.

Şekil 5.9'da verilen ve % uzamaya (döküm hali) ikili etkileşim gösteren elementler;

a) Si-Zn,

b) Si-Ce ve

c) Si-Sr olarak tespit edilmiştir.

Eğer alaşım % 4 Si içeriyor ise;

a) Zn (% 0) ve,

b) Ce (% 0) elementlerinin alaşım içerisinde bulunmaması gerekmektedir,

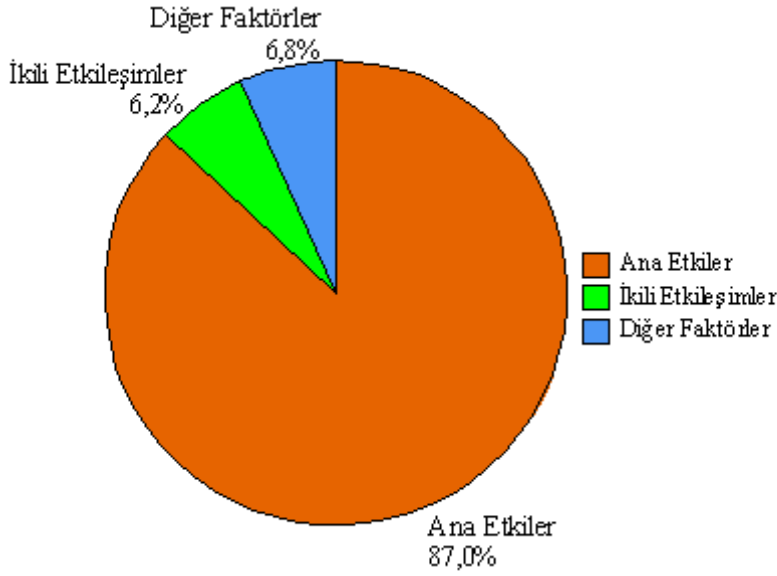
c) Sr miktarı ise % 0,01 olmalıdır.

Eğer alaşım % 7 Si içeriyor ise;

a) Ce (% 0) elementinin alaşım içerisinde bulunmaması gerekmektedir,

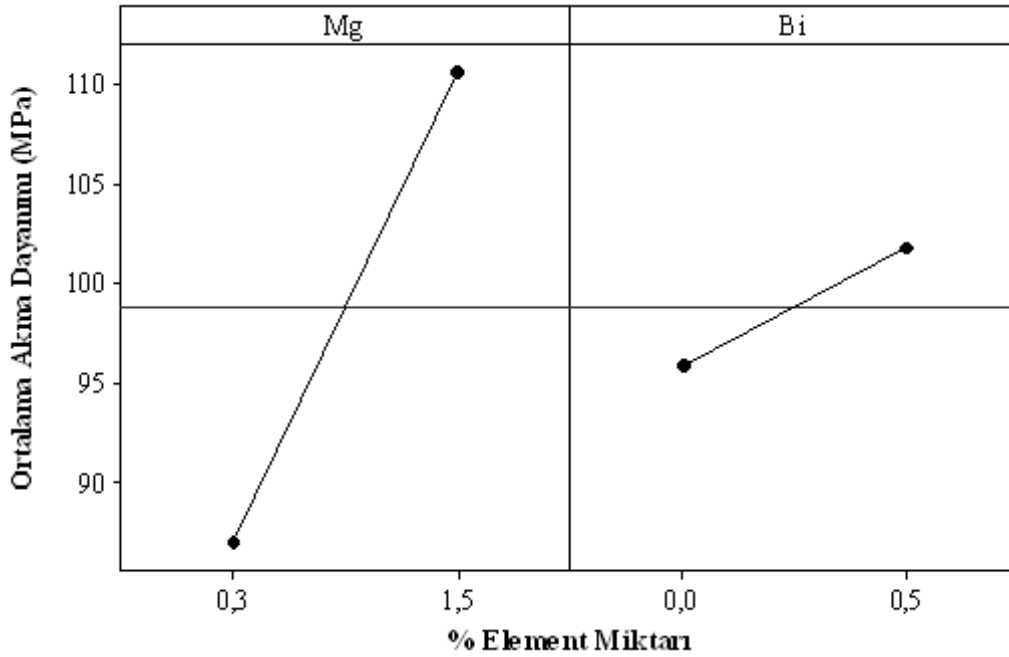
b) Zn miktarı % 0,5 ve

c) Sr miktarı % 0,02 olmalıdır.



**Şekil 5.10 :** % Uzamaya (döküm hali) etki eden parametreler.

Şekil 5.10’da verilen % uzama (döküm hali) değerleri için yapılan istatistiksel analizler sonucunda elde edilen bulgular neticesinde % 93,2 oranında (ana etkiler+ikili etkileşimler) doğruluk oranına ulaşılmıştır. Bu sonuç % uzama döküm hali için elde edilen ana etki elementlerinin ve ikili etkileşim elementlerinin alaşım içerisine eklendiğinde % 93,2 oranında doğru sonuç vereceğini göstermektedir. Diğer faktörler adı altında bulunan % 6,8 oranı ise ortam gürültüsünü belirtmektedir, bu da kontrol edilemeyen şartları göstermektedir. (açıklanamayan parametreler; sıcaklık)



**Şekil 5.11 :** Akma dayanımına (döküm hali) ana etkisi olan elementler.

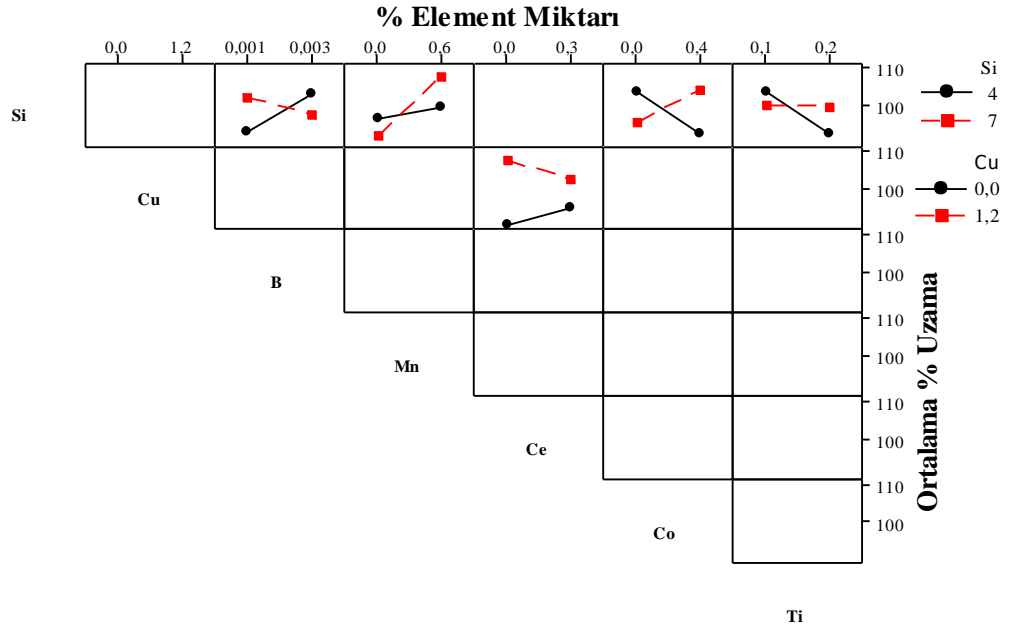
İstatiksel deneysel tasarım programı analizi sonucunda 32 adet deney içinde % 4 veya % 7 Si içeren alaşımlarında döküm hali ile akma dayanımına ana etkisi olan elementler Mg ve Bi olarak tespit edilmiştir (Şekil 5.11).

Bu 2 element haricindeki bulunan diğer tüm elementlerin akma dayanımına (döküm hali) tek başına eklendiklerinde artı yönde veya eksi yönde etkisi yoktur.

Döküm hali ile en yüksek akma dayanımı değerleri elde edebilmek için alaşım içerisine;

a) Mg % 1,5 ve

b) Bi % 0,5 oranlarında ilave edilmelidir.



**Şekil 5.12** : Akma dayanımına (döküm hali) ikili etkileşimde bulunan elementler.

Şekil 5.12'de verilen ve akma dayanımına (döküm hali) ikili etkileşim gösteren elementler;

a) Si-B, b) Si-Mn, c) Si-Co, d) Si-Ti ve d) Cu-Ce olarak tespit edilmiştir.

Eğer alaşım % 4 Si içeriyor ise;

a) Co (% 0) elementinin alaşım içerisinde bulunmaması gerekmektedir,

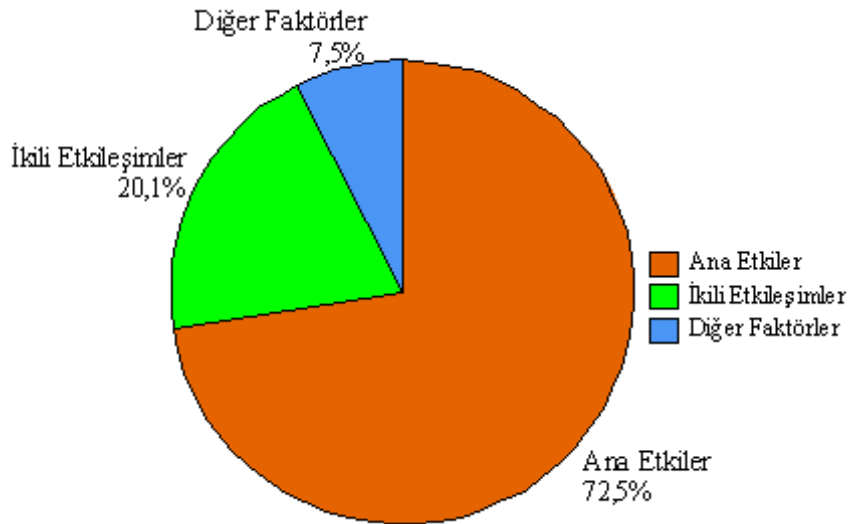
- b) B miktarı % 0,003,  
c) Mn miktarı % 0,6 ve  
d) Ti miktarı % 0,1 olmalıdır.

Eğer alaşım % 7 Si içeriyor ise;

- a) B miktarı % 0,001,  
b) Mn miktarı % 0,6  
c) Co miktarı % 0,4  
d) Ti miktarı % 0,1 veya % 0,2 olmalıdır.

Eğer alaşım içerisinde;

- a) Cu miktarı % 1,2 ise Ce (% 0) elementi bulunmamalıdır,  
b) Cu (% 0) elementi bulunmuyor ise Ce miktarı % 0,3 olmalıdır.

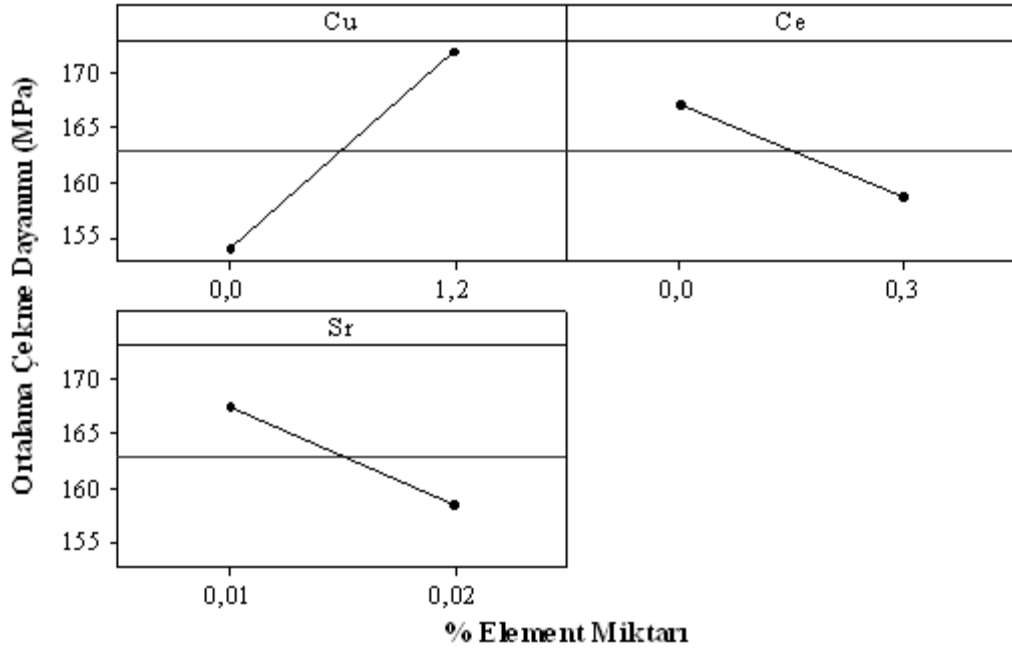


**Şekil 5.13 :** Akma dayanımına (döküm hali) etki eden parametreler.

Şekil 5.13’de verilen, akma dayanımı (döküm hali) değerleri için yapılan istatistiksel analizler sonucunda elde edilen bulgular neticesinde % 92,6 oranında (ana etkiler+ikili etkileşimler) doğruluk oranına ulaşılmıştır.

Bu sonuç akma dayanımı döküm hali için elde edilen ana etki elementlerinin ve ikili etkileşim elementlerinin alaşım içerisine eklendiğinde % 92,6 oranında doğru sonuç vereceğini göstermektedir.

Diğer faktörler adı altında bulunan % 7,5 oranı ise ortam gürültüsünü belirtmektedir, bu da kontrol edilemeyen şartları göstermektedir.



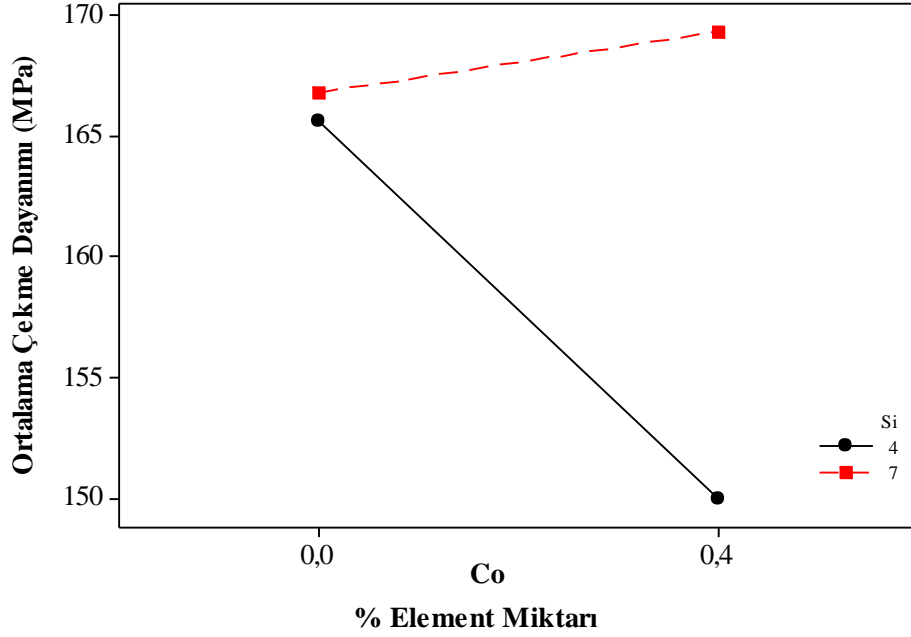
**Şekil 5.14 :** Çekme dayanımına (döküm hali) ana etkisi olan elementler.

İstatiksel deneysel tasarım programı analizi sonucunda 32 adet deney içinde % 4 veya % 7 Si içeren alaşımlarında döküm hali ile çekme dayanımına ana etkisi olan elementler Cu, Ce ve Sr olarak tespit edilmiştir (Şekil 5.14).

Bu 3 element haricindeki bulunan diğer tüm elementlerin çekme dayanımına (döküm hali) tek başına eklendiklerinde artı yönde veya eksi yönde etkisi yoktur.

Döküm hali ile en yüksek çekme dayanımı değerleri elde edebilmek için alaşım içerisinde;

- Ce (% 0) elementi bulunmamalıdır,
- Cu % 1,2 ve
- Sr % 0,01 oranlarında ilave edilmelidir.

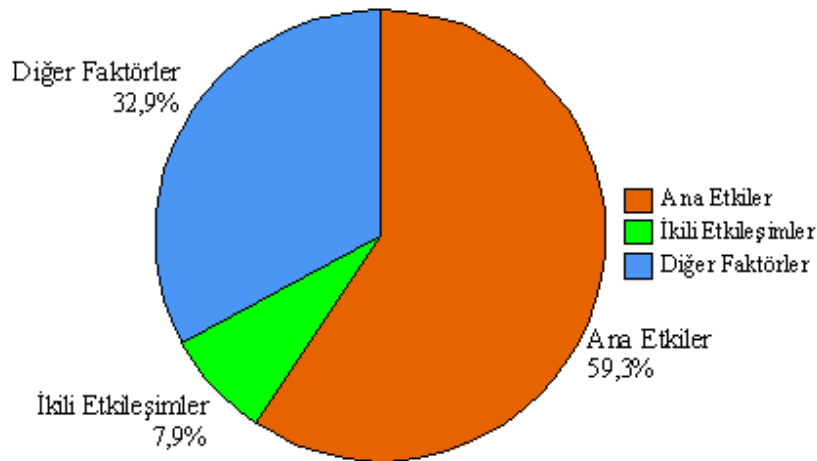


**Şekil 5.15 :** Çekme dayanımına (döküm hali) ikili etkileşimde bulunan elementler.

Şekil 5.15'te verilen ve çekme dayanımına (döküm hali) ikili etkileşim gösteren element; a) Si-Co'dır.

Eğer alaşım % 4 Si içeriyor ise; a) Co (% 0) elementi alaşım içerisinde bulunmamalıdır.

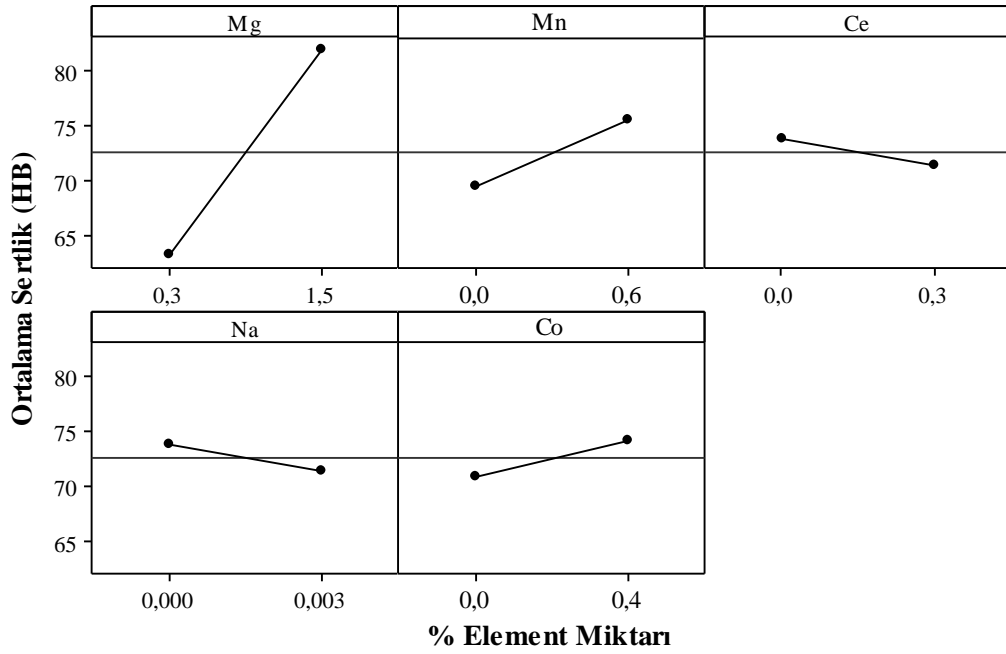
Eğer alaşım % 7 Si içeriyor ise; a) Co miktarı % 0,4 olmalıdır.



**Şekil 5.16 :** Çekme dayanımına (döküm hali) etki eden parametreler.

Şekil 5.16'da verilen, çekme dayanımı (döküm hali) değerleri için yapılan istatistiksel analizler sonucunda elde edilen bulgular neticesinde % 67,2 oranında (ana etkiler+ikili etkileşimler) doğruluk oranına ulaşılmıştır.

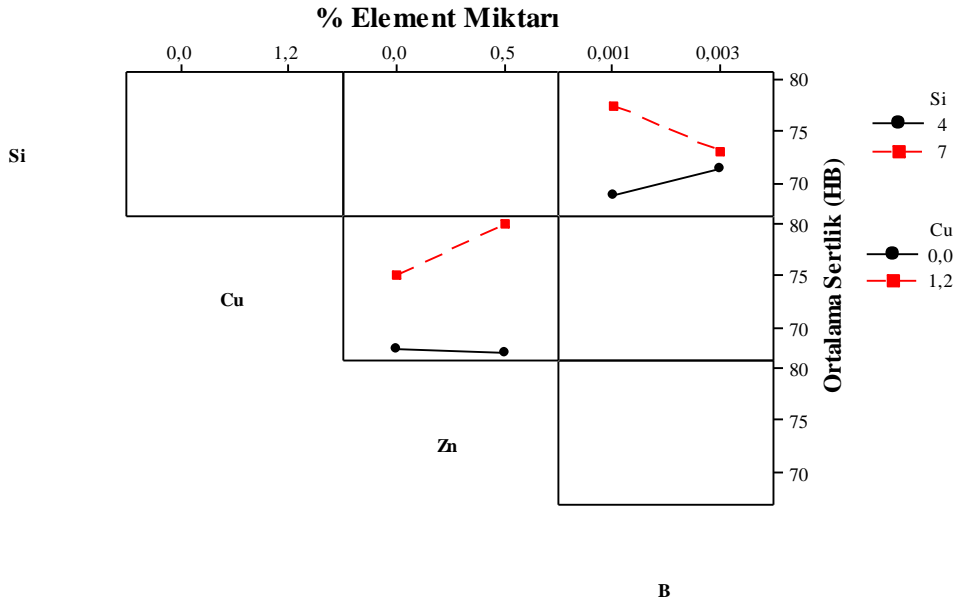
Bu sonuç çekme dayanımı döküm hali için elde edilen ana etki elementlerinin ve ikili etkileşim elementlerinin alaşım içerisine eklendiğinde % 67,2 oranında doğru sonuç vereceğini göstermektedir. Diğer faktörler adı altında bulunan % 32,9 oranı ise ortam gürültüsünü belirtmektedir, bu da kontrol edilemeyen şartları göstermektedir.



**Şekil 5.17 :** Sertliğe (döküm hali) ana etkisi olan elementler.

İstatistiksel deneysel tasarım programı analizi sonucunda 32 adet deney içinde % 4 veya % 7 Si içeren alaşımlarında döküm hali ile sertliğe ana etkisi olan elementler, Mg, Mn, Ce, Na ve Co olarak tespit edilmiştir (Şekil 5.17). Bu 5 element haricindeki bulunan diğer tüm elementlerin sertliğe (döküm hali) tek başına eklendiklerinde artı yönde veya eksi yönde etkisi yoktur. Döküm hali ile en yüksek sertlik değerleri elde edebilmek için alaşım içerisinde;

- Ce (% 0) ve, b) Na (% 0) elementleri bulunmamalıdır,
- Mg % 1,5, d) Mn % 0,6 ve e) Co % 0,4 oranlarında ilave edilmelidir.



**Şekil 5.18 :** Sertliğe (döküm hali) ikili etkileşimde bulunan elementler.

Şekil 5.18’de verilen ve sertliğe (döküm hali) ikili etkileşim gösteren elementler;

a) Si-B,

b) Cu-Zn elementleridir.

Eğer alaşım % 4 Si içeriyor ise;

a) B miktarı % 0,003 olmalıdır.

Eğer alaşım % 7 Si içeriyor ise;

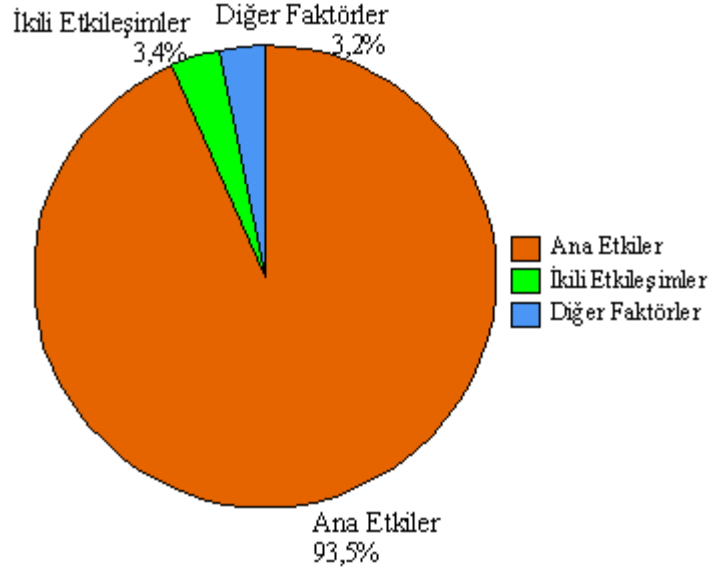
a) B miktarı % 0,001 olmalıdır.

Eğer alaşım % 1,2 Cu içeriyor ise;

a) Zn miktarı % 0,5 olmalıdır.

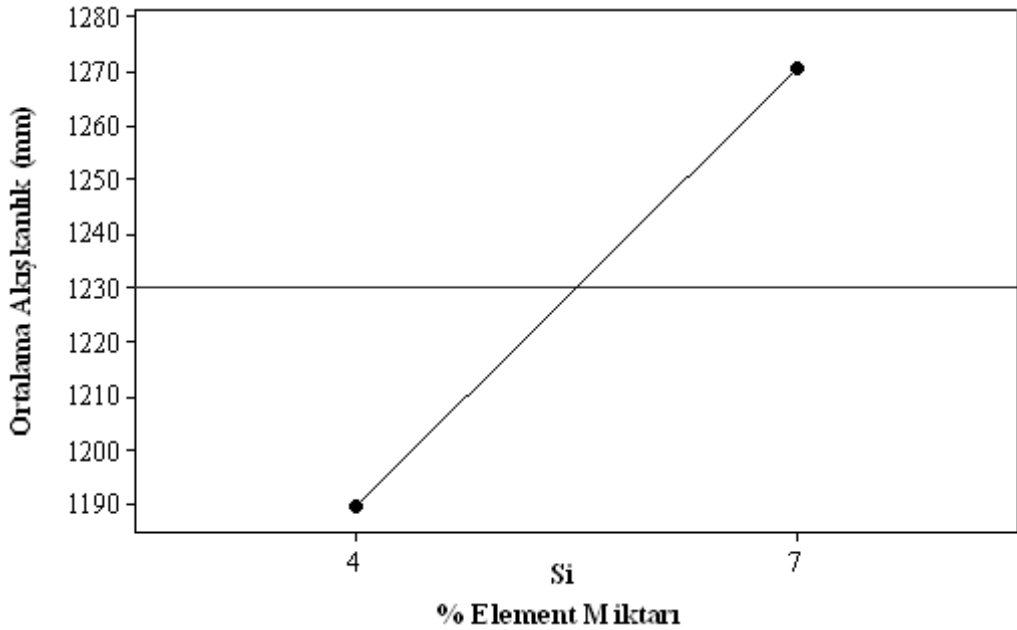
Eğer alaşım (% 0) Cu içermiyor ise;

a) Zn (% 0) elementi alaşım içinde bulunmamalıdır.



**Şekil 5.19 :** Sertliğe (döküm hali) etki eden parametreler.

Şekil 5.19’da verilen, sertlik (döküm hali) değerleri için yapılan istatistiksel analizler sonucunda elde edilen bulgular neticesinde % 97,9 oranında (ana etkiler+ikili etkileşimler) doğruluk oranına ulaşılmıştır. Bu sonuç sertlik döküm hali için elde edilen ana etki elementlerinin ve ikili etkileşim elementlerinin alışım içerisine eklendiğinde % 97,9 oranında doğru sonuç vereceğini göstermektedir. Diğer faktörler adı altında bulunan % 3,2 oranı ise ortam gürültüsünü belirtmektedir, bu da kontrol edilemeyen şartları göstermektedir.

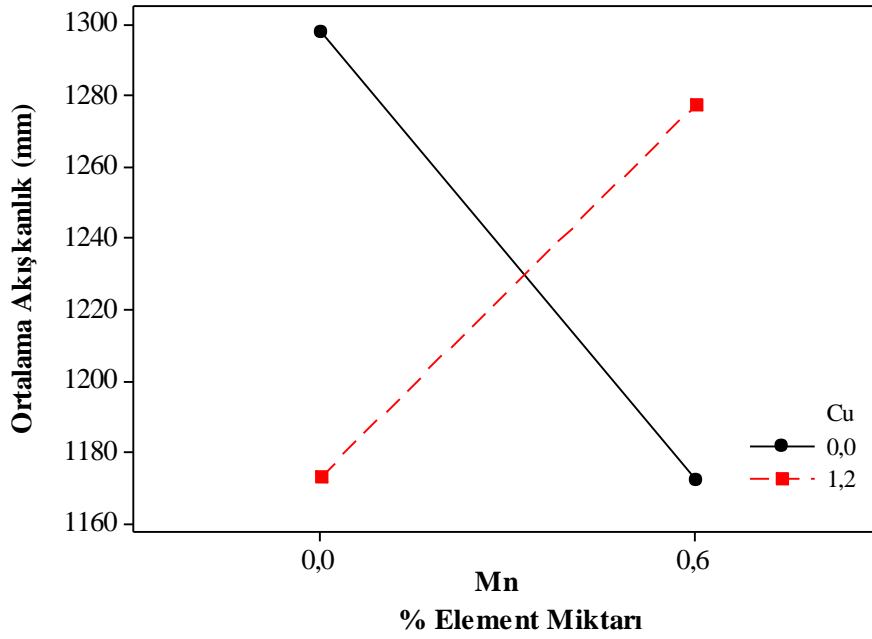


**Şekil 5.20 :** Akışkanlığa ana etkisi olan elementler.

İstatiksel deneysel tasarım programı analizi sonucunda 32 adet deney içinde % 4 veya % 7 Si içeren alaşımlarında akışkanlığa ana etkisi olan element Si olarak tespit edilmiştir (Şekil 5.20). Bu element haricindeki bulunan diğer tüm elementlerin akışkanlığa tek başına eklendiklerinde artı yönde veya eksi yönde etkisi yoktur.

En yüksek akışkanlık değerleri elde edebilmek için alaşım içerisinde;

a) % 7 oranında Si bulunmalıdır.



Şekil 5.21 : Akışkanlığa ikili etkileşimde bulunan elementler.

Şekil 5.21’de verilen ve akışkanlığa ikili etkileşim gösteren elementler;

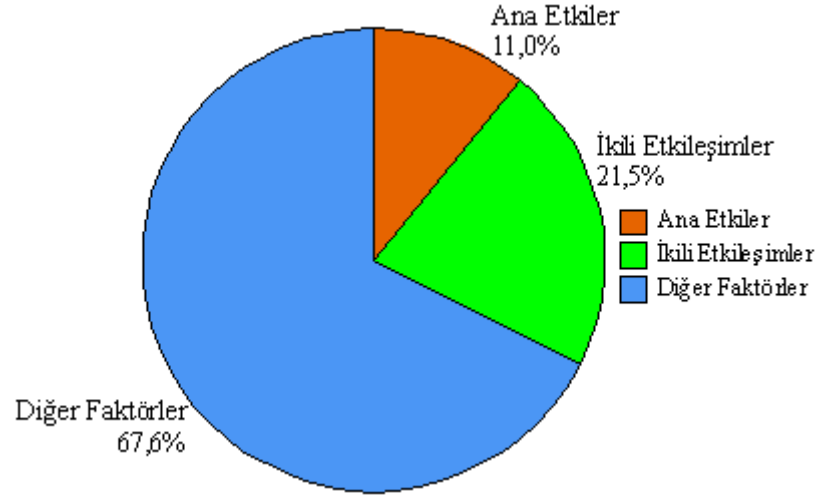
a) Cu-Mn elementleridir.

Eğer alaşım % 1,2 Cu içeriyorsa;

a) Mn miktarı % 0,6 olmalıdır.

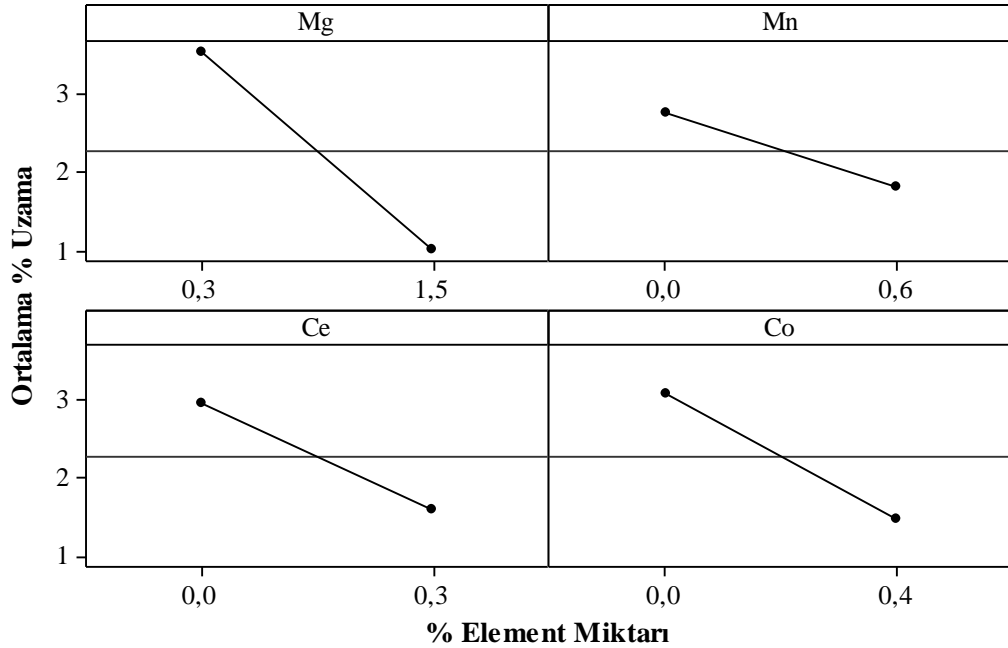
Eğer alaşım Cu (% 0) elementi içermiyorsa;

a) Mn (% 0) elementi bulunmamalıdır.



**Şekil 5.22 :** Akışkanlığa etki eden parametreler.

Şekil 5.22’de verilen akışkanlık değerleri için yapılan istatistiksel analizler sonucunda elde edilen bulgular neticesinde % 32,5 oranında (ana etkiler+ikili etkileşimler) doğruluk oranına ulaşılmıştır. Bu sonuç akışkanlık için elde edilen ana etki elementlerinin ve ikili etkileşim elementlerinin alaşım içerisine eklendiğinde % 32,5 oranında doğru sonuç vereceğini göstermektedir. Diğer faktörler adı altında bulunan % 67,6 oranı ise ortam gürültüsünü belirtmektedir, bu da kontrol edilemeyen şartları göstermektedir.



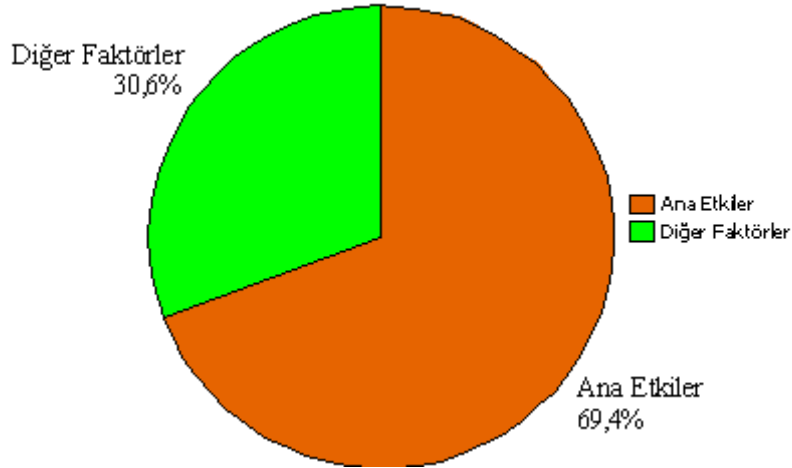
**Şekil 5.23 :** % Uzamaya (ısıtılmış) ana etkisi olan elementler.

İstatiksel deneysel tasarım programı analizi sonucunda 32 adet deney içinde % 4 veya % 7 Si içeren alaşımlarında ısıl işlemlili % uzamaya ana etkisi olan elementler Mg, Mn, Ce ve Co olarak tespit edilmiştir (Şekil 5.23).

Bu 4 element haricindeki bulunan diğer tüm elementlerin % uzamaya (ısıl işlemlili) tek başına eklendiklerinde artı yönde veya eksi yönde etkisi yoktur.

Isıl işlemlili en yüksek % uzama değerleri elde edebilmek için alaşım içerisinde;

- a) Mn (% 0),
- b) Ce (%0) ve
- c) Co (% 0) elementleri bulunmamalıdır,
- d) Mg % 0,3 oranlarında ilave edilmelidir.

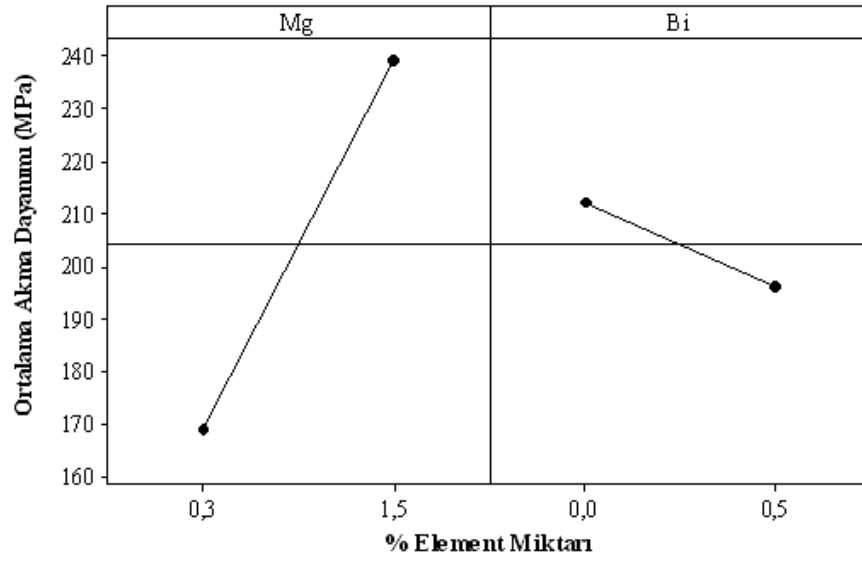


**Şekil 5.24 :** % Uzamaya (ısıl işlemlili) etki eden parametreler.

Şekil 5.24'de verilen ve % uzama (ısıl işlemlili) değerleri için yapılan istatistiksel analizler sonucunda elde edilen bulgular neticesinde % 69,4 oranında (ana etkiler) doğruluk oranına ulaşılmıştır.

Bu sonuç % uzama ısıl işlemlili hali için elde edilen ana etki elementlerinin alaşım içerisinde eklendiğinde % 69,4 oranında doğru sonuç vereceğini göstermektedir.

Diğer faktörler adı altında bulunan % 30,6 oranı ise ortam gürültüsünü belirtmektedir, bu da kontrol edilemeyen şartları göstermektedir.



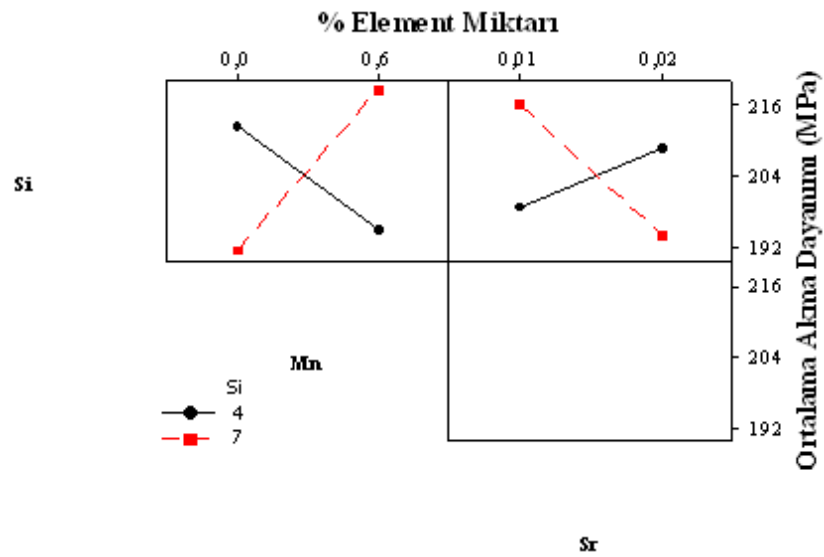
**Şekil 5.25 :** Akma dayanımına (ısıl işlemlili) ana etkisi olan elementler.

İstatiksel deneysel tasarım programı analizi sonucunda 32 adet deney içinde % 4 veya % 7 Si içeren alaşımlarında ısıl işlemlili hali ile akma dayanımına ana etkisi olan elementler Mg ve Bi olarak tespit edilmiştir (Şekil 5.25).

Bu 2 element haricindeki bulunan diğer tüm elementlerin akma dayanımına (ısıl işlemlili) tek başına eklendiklerinde artı yönde veya eksi yönde etkisi yoktur.

Isıl işlemlili en yüksek akma dayanımı değerleri elde edebilmek için alaşım içerisinde;

- Bi (% 0) elementi bulunmamalıdır,
- Mg % 1,5 oranlarında ilave edilmelidir.



**Şekil 5.26 :** Akma dayanımına (ısıl işlemlili) ikili etkileşimde bulunan elementler.

Şekil 5.26'ya göre akma dayanımına (ısıl işlemlili) ikili etkileşim gösteren elementler;

a) Si-Mn, b) Si-Sr olarak tespit edilmiştir.

Eğer alaşım % 4 Si içeriyor ise;

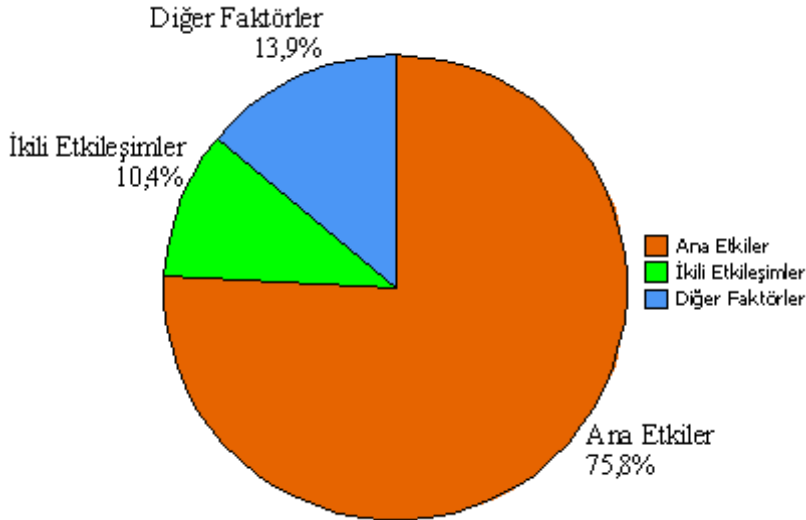
a) Mn (% 0) elementi alaşım içerisinde bulunmamalıdır,

b) Sr miktarı % 0,02 olmalıdır.

Eğer alaşım % 7 Si içeriyor ise;

a) Mn miktarı % 0,6,

b) Sr miktarı % 0,01 olmalıdır.

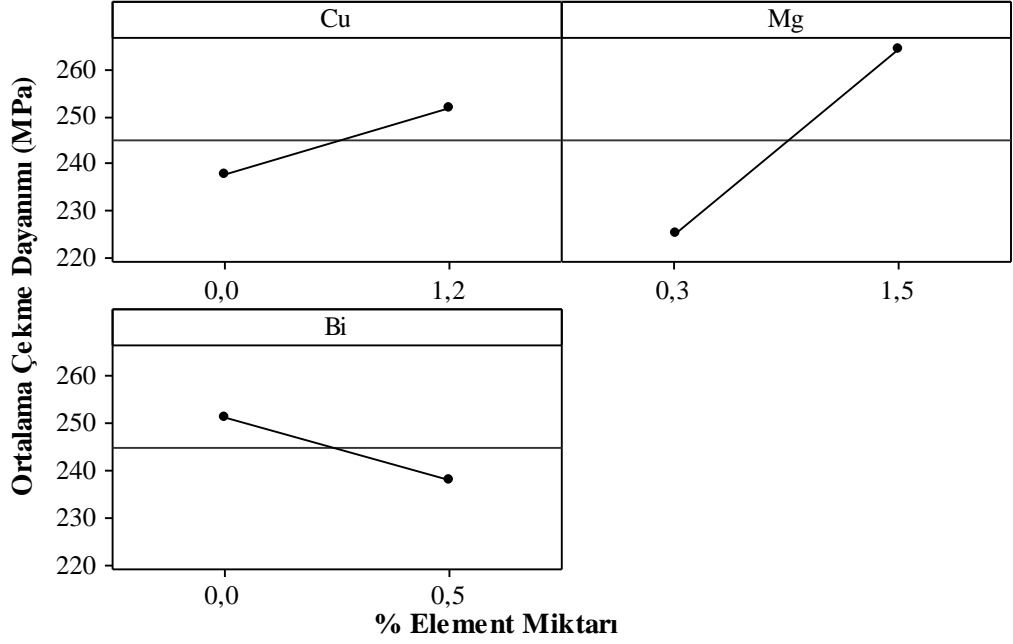


Şekil 5.27 : Akma dayanımına (ısıl işlemlili) etki eden parametreler.

Şekil 5.27'de verilen, akma dayanımı (ısıl işlemlili) değerleri için yapılan istatistiksel analizler sonucunda elde edilen bulgular neticesinde % 86,2 oranında (ana etkiler+ikili etkileşimler) doğruluk oranına ulaşılmıştır.

Bu sonuç akma dayanımı ısıl işlemlili hali için elde edilen ana etki elementlerinin ve ikili etkileşim elementlerinin alaşım içerisine eklendiğinde % 86,2 oranında doğru sonuç vereceğini göstermektedir.

Diğer faktörler adı altında bulunan % 13,9 oranı ise ortam gürültüsünü belirtmektedir, bu da kontrol edilemeyen şartları göstermektedir.



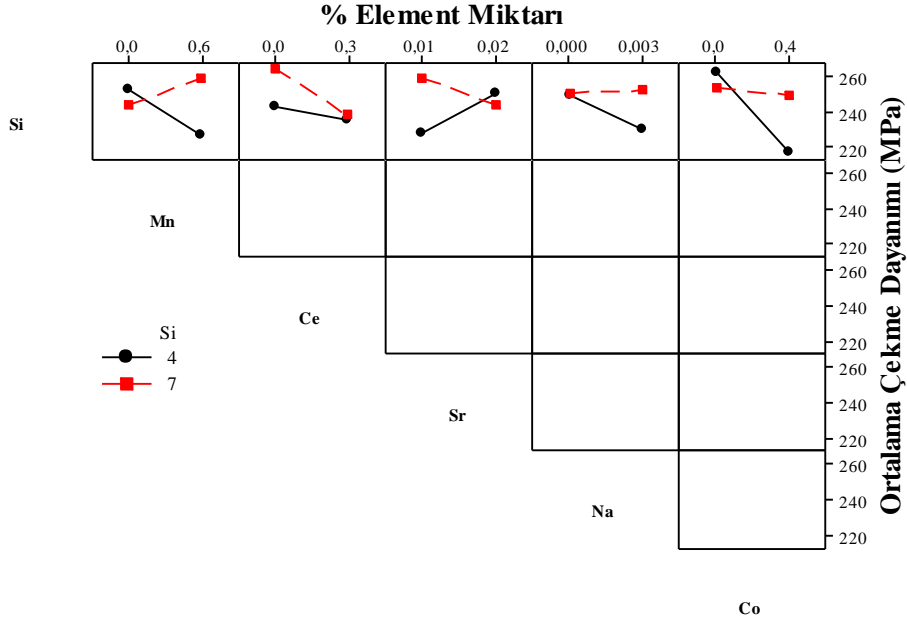
**Şekil 5.28 :** Çekme dayanımına (ısıtılmış) ana etkisi olan elementler.

İstatiksel deneysel tasarım programı analizi sonucunda 32 adet deney içinde % 4 veya % 7 Si içeren alaşımlarında ısıtılmış çekme dayanımına ana etkisi olan elementler Cu, Mg ve Bi olarak tespit edilmiştir (Şekil 5.28).

Bu 3 element haricindeki bulunan diğer tüm elementlerin çekme dayanımına (ısıtılmış) tek başına eklendiklerinde artı yönde veya eksi yönde etkisi yoktur.

Isıtılmış en yüksek çekme dayanımı değerleri elde edebilmek için alaşım içerisinde;

- Bi (% 0) elementi bulunmamalıdır,
- Cu % 1,2 ve
- Mg % 1,5 oranlarında ilave edilmelidir.



**Şekil 5.29** : Çekme dayanımına (ısıtılmış) ikili etkileşimde bulunan elementler.

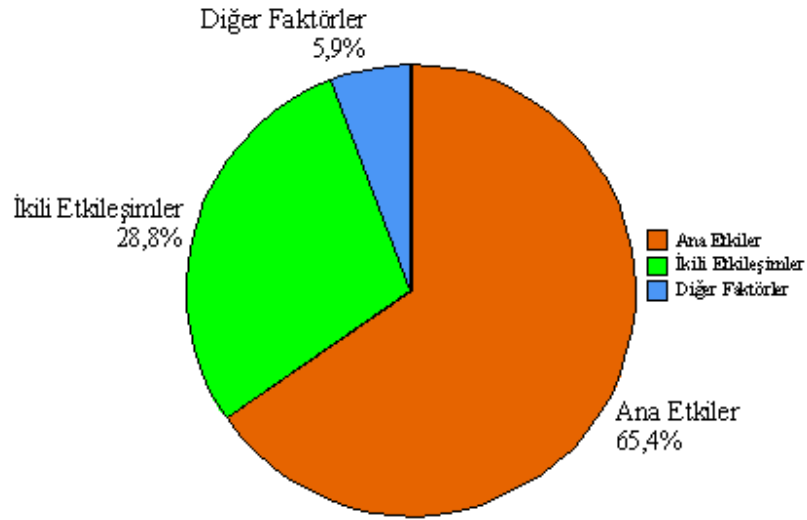
Şekil 5.29’da verilen, çekme dayanımına (ısıtılmış) ikili etkileşim gösteren elementler; a) Si-Mn, b) Si-Ce, c) Si-Sr, d) Si-Na ve e) Si-Co’dır.

Eğer alaşım % 4 Si içeriyor ise;

- a) Mn (% 0),
- b) Ce (% 0),
- c) Na (% 0) ve
- d) Co (% 0) elementleri alaşım içerisinde bulunmamalıdır,
- e) Sr miktarı % 0,02 olmalıdır.

Eğer alaşım % 7 Si içeriyor ise;

- a) Ce (% 0) ve
- b) Co (% 0) elementleri alaşım içerisinde bulunmamalıdır,
- c) Mn miktarı % 0,6,
- d) Sr miktarı % 0,01 ve e) Na miktarı % 0,003 olmalıdır.

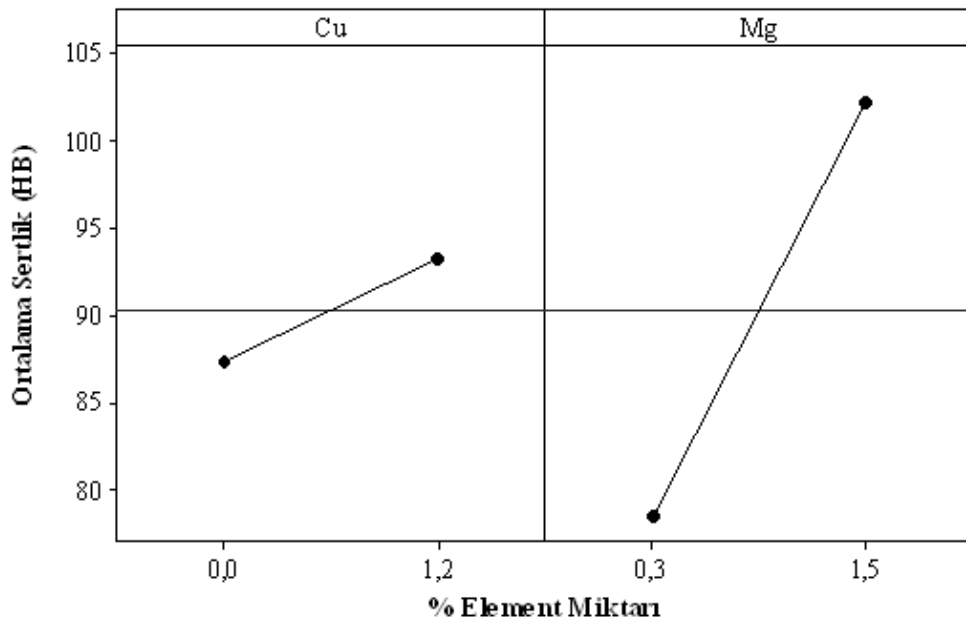


**Şekil 5.30 :** Çekme dayanımına (ısıl işlemlili) etki eden parametreler.

Şekil 5.30'de verilen, çekme dayanımı (ısıl işlemlili) değerleri için yapılan istatistiksel analizler sonucunda elde edilen bulgular neticesinde % 94,2 oranında (ana etkiler+ikili etkileşimler) doğruluk oranına ulaşılmıştır.

Bu sonuç çekme dayanımı (ısıl işlemlili) için elde edilen ana etki elementlerinin ve ikili etkileşim elementlerinin alışım içerisine eklendiğinde % 94,2 oranında doğru sonuç vereceğini göstermektedir.

Diğer faktörler adı altında bulunan % 5,9 oranı ise ortam gürültüsünü belirtmektedir, bu da kontrol edilemeyen şartları göstermektedir.



**Şekil 5.31 :** Sertliğe (ısıl işlemlili) ana etkisi olan elementler.

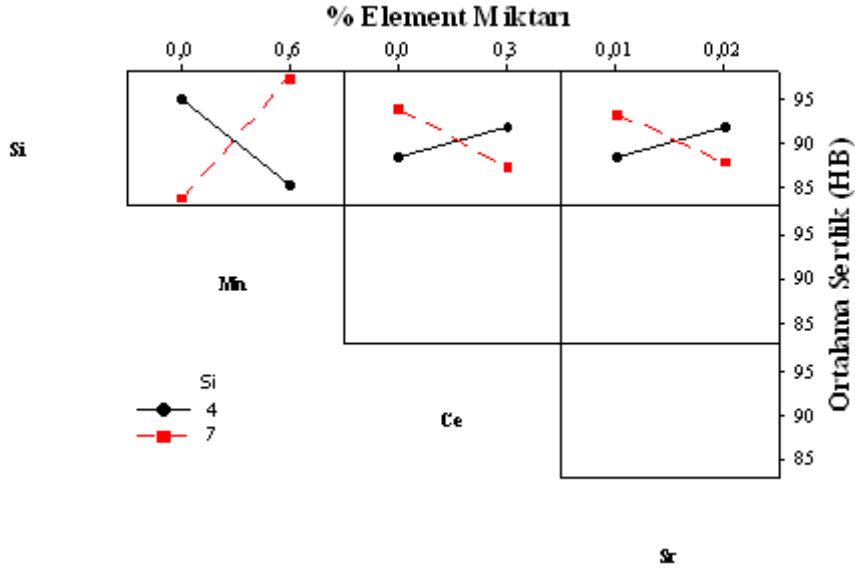
İstatiksel deneysel tasarım programı analizi sonucunda 32 adet deney içinde % 4 veya % 7 Si içeren alaşımlarında ısıl işlemlenmiş sertliğe ana etkisi olan elementler Cu ve Mg olarak tespit edilmiştir (Şekil 5.31).

Bu 2 element haricindeki bulunan diğer tüm elementlerin sertliğe (ısıl işlemlenmiş) tek başına eklendiklerinde artı yönde veya eksi yönde etkisi yoktur.

Isıl işlemlenmiş en yüksek sertlik değerleri elde edebilmek için alaşım içerisinde;

a) Cu % 1,2 ve

b) Mg % 1,5 oranlarında ilave edilmelidir.



Şekil 5.32 : Sertliğe (ısıl işlemlenmiş) ikili etkileşimde bulunan elementler.

Şekil 5.32'ye göre sertliğe (ısıl işlemlenmiş) ikili etkileşim gösteren elementler;

a) Si-Mn, b) Si-Ce, c) Si-Sr elementleridir.

Eğer alaşım % 4 Si içeriyor ise;

a) Mn (% 0) elementi alaşım içerisinde bulunmamalıdır,

b) Ce miktarı % 0,3 ve

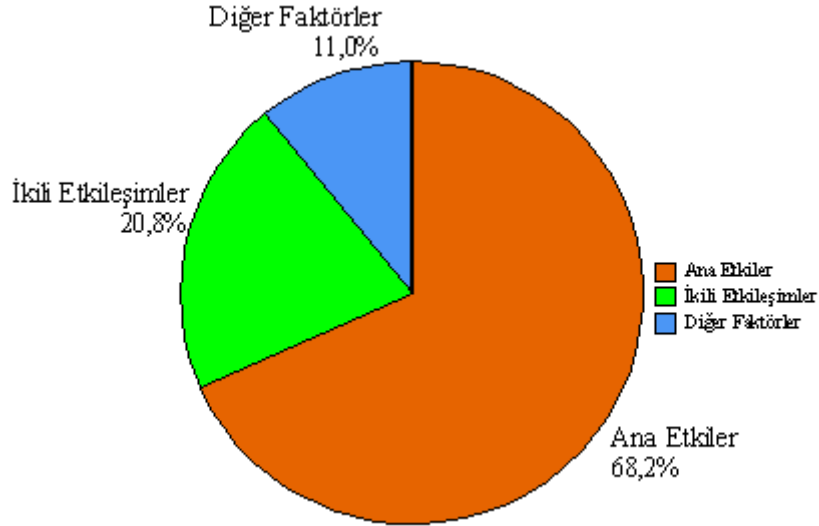
c) Sr miktarı % 0,02 olmalıdır.

Eğer alaşım % 7 Si içeriyor ise;

a) Ce (% 0) elementi alaşım içerisinde bulunmamalıdır,

b) Mn miktarı % 0,6 ve

c) Sr miktarı % 0,01 olmalıdır.



**Şekil 5.33 :** Sertliğe (ışıl iŐlemlı) etki eden parametreler.

Şekil 5.33'de verilen, sertlik (ışıl iŐlemlı) değerleri için yapılan istatıksel analizler sonucunda elde edilen bulgular neticesinde % 89 oranında (ana etkiler+ikili etkileşimler) doğruluk oranına ulaşılmıştır.

Bu sonuç sertlik (ışıl iŐlemlı) için elde edilen ana etki elementlerinin ve ikili etkileşim elementlerinin alaşım içerisine eklendiğinde % 89 oranında doğru sonuç vereceğini göstermektedir.

Diğer faktörler adı altında bulunan % 11 oranı ise ortam gürültüsünü belirtmektedir, bu da kontrol edilemeyen Şartları göstermektedir.



## 6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

### 6.1 Genel Sonuçlar ve Değerlendirmeler

1- Günümüz otomotiv sektöründe artan rekabet koşullarında ve çevrenin korunmasına yönelik yönetmeliklere istinaden çevreyi daha az kirleten araçların üretimi önem kazanmıştır. Çevreyi daha az kirleten araçların üretimi, otomobilin toplam ağırlığının hafifletilmesiyle gerçekleştirilebilmektedir. Otomobil jantlarında kullanılan alaşımların mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi ile daha ince kesite sahip jantlar üretilebilecek ve dolayısıyla toplam jant ağırlığında azalma mümkün olacaktır.

Bu çalışmada halen ticari olarak kullanılmakta olan ötektik altı Al-Si (% 7 Si ve % 11 Si) alaşımli otomobil jantlarının mekanik dayanım ve dökülebilirlik özelliklerinden daha üstün değerlerin elde edildiği alaşımlar geliştirilmiştir.

Yapılan bu çalışmada otomobil jantı döküm sektöründe halen kullanılan ve referans olarak gösterilen ticari ürün değerleri olan, döküm hali minimum % 3 uzama, çekme dayanımı minimum 150 MPa, akma dayanımı minimum 80 MPa, sertlik minimum 54 HB ve ısıtılı olarak minimum % 3 uzama, çekme dayanımı minimum 220 MPa, akma dayanımı minimum 150 MPa, sertlik minimum 70 HB değerlerine sahip alaşımların değerleri ile karşılaştırılıp, irdelenmiştir.

Literatür çalışması sonucunda mekanik dayanım özellikleri üzerine olumlu etkisi olduğu bilinen elementler belirlenmiştir. Minitab programı ile yapılan istatistiksel deney tasarımı sonucunda 32 adet deney grubu oluşturulmuştur. % 4 Si veya % 7 Si içeren 2 tip alüminyum alaşım grubuna Co, Ce, Bi, Cu, Zn, Mg, Mn, Ti, Sr, Na ve B elementlerinin farklı oranlarda ilavesi gerçekleştirilerek alüminyum indüksiyon ocağında 750°C'de ergitilmiştir. Ergimiş alaşımlar metal health sisteminde bulunan K-testi, akışkanlık, sıcak yırtılma, çekme kalıbı ve DAS kalıplarına dökümleri yapılmıştır. Çekme testi kalıplarından elde edilen numuneler ve sertlik numuneleri T6 ısıtılı işlem koşulunda çözeltiye alma işlemi (540 °C sıcaklıkta 270 dk.), ardından su

verme işlemi (87 °C sıcaklıkta 110 sn.) ve son olarak yaşlandırma işlemi (145 °C sıcaklıkta 207 dk.) uygulanmıştır. Dökümü gerçekleştirilen tüm deney numunelerinin kimyasal analizleri, % uzama, çekme dayanımı, akma dayanımı, sertlik, % porozite miktarı, DAS analizi, K-testi, akışkanlık, sıcak yırtılma ile mikro yapı, makro yapı, XRD ve SEM analizleri gerçekleştirilmiştir.

2- Döküm hali ile ulaşılan en yüksek % uzama değeri olan % 5,854 değerine 2 nolu alaşımda (% 4 Si, % 0,3 Mg, % 0,001 B, % 0,01 Sr ve % 0,1 Ti), en yüksek çekme dayanımı değeri olan 197,896 MPa değerine 24 nolu alaşımda (% 4 Si, % 1,2 Cu, % 0,5 Zn, % 1,5 Mg, % 0,003 B, % 0,01 Sr, % 0,5 Bi ve % 0,1 Ti), en yüksek akma dayanımı ve en yüksek sertlik değeri olan 142,412 MPa ve 99,2 HB değerlerine 26 nolu alaşımda (% 7 Si, % 1,2 Cu, % 1,5 Mg, % 0,001 B, % 0,6 Mn, % 0,02 Sr, % 0,5 Bi, % 0,4 Co ve % 0,1 Ti) ulaşılmıştır.

3- Isıl işlem ile ulaşılan en yüksek % uzama değeri olan % 7,982 değeri 3 nolu alaşımda (% 7 Si, % 0,3 Mg, % 0,003 B, % 0,3 Ce, % 0,02 Sr, % 0,5 Bi ve % 0,1 Ti), en yüksek çekme dayanımı değeri olan 303,27 MPa değeri 24 nolu alaşımda (% 4 Si, % 1,2 Cu, % 0,5 Zn, % 1,5 Mg, % 0,003 B, % 0,01 Sr, % 0,5 Bi ve % 0,1 Ti), en yüksek akma dayanımı değeri olan 258,746 MPa değeri 30 nolu alaşımda (% 7 Si, % 1,5 Mg, % 0,001 B, % 0,6 Mn, % 0,01 Sr, % 0,003 Na, % 0,5 Bi ve % 0,1 Ti) ve en yüksek sertlik değeri olan 117,7 HB değeri 26 nolu alaşımda (% 7 Si, % 1,2 Cu, % 1,5 Mg, % 0,001 B, % 0,6 Mn, % 0,02 Sr, % 0,5 Bi, % 0,4 Co ve % 0,1 Ti) elde edilmiştir.

4- En yüksek akışkanlık değeri olan 1475 mm değeri 21 nolu alaşımda (% 7 Si, % 1,2 Cu, % 0,5 Zn, % 1,5 Mn, % 0,003 B, % 0,6 Mn, % 0,3 Ce, % 0,02 Sr, % 0,003 Na, % 0,5 Bi, % 0,4 Co ve % 0,2 Ti) ölçülmüştür.

5- Ticari referans üründen daha üstün mekanik değerler % 7 Si içeren 1, 15, 3, 12, 27 nolu deneylerde ve % 4 Si içeren 2, 4, 17, 24 ve 25 nolu alaşımlarda elde edilmiştir. Elde edilen bu alaşımlar içerisinde optimum özelliklere sahip alaşımlar;

% 7 Si içeren alaşımlar içerisinde döküm hali için optimum mekanik özellikler 15 nolu alaşımda (% 1,2 Cu, % 0,5 Zn, % 0,3 Mg, % 0,003 B, % 0,6 Mn, % 0,01 Sr, % 0,003 Na ve % 0,1 Ti) % 3,924 uzama, 75,7 HB sertlik, 94,6 MPa akma dayanımı ve 190,564 MPa çekme dayanımı değerlerine ulaşılmıştır.

% 7 Si içeren alaşımlar içerisinde ısıl işlem ile ulaşılmış optimum mekanik özellikler 15 nolu alaşımda ( % 1,2 Cu, % 0,5 Zn, % 0,3 Mg, % 0,003 B, % 0,6 Mn, % 0,01 Sr, % 0,003 Na ve % 0,1 Ti) % 4,158 uzama, 94,9 HB sertlik, 191,454 MPa akma dayanımı ve 271,268 MPa çekme dayanımı değerlerine ulaşılmıştır.

% 4 Si içeren alaşımlar içerisinde döküm hali için optimum mekanik özellikler 25 nolu alaşımda ( % 1,2 Cu, % 0,3 Mg, % 0,001 B, % 0,02 Sr, % 0,003 Na, % 0,4 Co ve % 0,1 Ti) % 4,33 uzama, 61,5 HB sertlik, 87,203 MPa akma dayanımı ve 175,14 MPa çekme dayanımı değerlerine ulaşılmıştır.

% 4 Si içeren alaşımlar içerisinde ısıl işlem ile ulaşılmış optimum mekanik özellikler 2 nolu alaşımda (% 0,3 Mg, % 0,001 B, % 0,01 Sr ve % 0,1 Ti) % 7,398 uzama, 82,6 HB sertlik, 195,038 MPa akma dayanımı ve 262,694 MPa çekme dayanımı değerlerine ulaşılmıştır.

6- Optimum mekanik özelliklerin elde edildiği alaşımların makro yapı incelemeleri sonucunda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir;

% 7 Si içeren 15 nolu alaşımın ( % 1,2 Cu, % 0,5 Zn, % 0,3 Mg, % 0,003 B, % 0,6 Mn, % 0,01 Sr, % 0,003 Na ve % 0,1 Ti) dökümü sonrası yapılan makro yapı incelemesinde tanelerin eş eksenli dağılmış olduğu görülmüştür ve ortalama tane büyüklüğü yaklaşık olarak 1 mm olarak ölçülmüştür,

% 4 Si içeren 25 nolu alaşımın ( % 1,2 Cu, % 0,3 Mg, % 0,001 B, % 0,02 Sr, % 0,003 Na, % 0,4 Co ve % 0,1 Ti) dökümü sonrası yapılan makro yapı incelemesinde çok ince tanelerin olduğu, tanelerin eş eksenli dağılmış ve ortalama tane büyüklüğünün yaklaşık olduğu 0,5 mm belirlenmiştir,

% 4 Si içeren 2 nolu alaşımın (% 0,3 Mg, % 0,001 B, % 0,01 Sr ve % 0,1 Ti) dökümü sonrası yapılan makro yapı incelemesinde yapının çok ince tanelerden oluşmuş, tanelerin eş eksenli dağılmış olduğu ve ortalama tane büyüklüğünün yaklaşık olarak 0,5 mm olduğu ölçülmüştür.

7- Optimum mekanik özelliklerin elde edildiği alaşımların mikro yapı incelemeleri sonucunda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir;

% 7 Si içeren 15 nolu alaşımın ( % 1,2 Cu, % 0,5 Zn, % 0,3 Mg, % 0,003 B, % 0,6 Mn, % 0,01 Sr, % 0,003 Na ve % 0,1 Ti) dökümü sonrası yapılan mikro yapı incelemesinde dendritik yapı homojen ve eşekslenli dağılmıştır. Ötektik yapı içerisinde mikro çekintiler ve primer silisyumlar görülmüş olup ötektik yapı modifiye olmuştur.

% 4 Si içeren 25 nolu alaşımın ( % 1,2 Cu, % 0,3 Mg, % 0,001 B, % 0,02 Sr, % 0,003 Na, % 0,4 Co ve % 0,1 Ti) dökümü sonrası yapılan mikro yapı incelemesinde dendritik yapı homojen dağılmıştır. Ötektik yapı içerisinde mikro çekintiler görülmüş olup ötektik yapı iyi modifiye olmuştur.

% 4 Si içeren 2 nolu alaşımın (% 0,3 Mg, % 0,001 B, % 0,01 Sr ve % 0,1 Ti) dökümü sonrası yapılan mikro yapı incelemesinde dendritik yapı homojen dağılmıştır. Ötektik yapı içerisinde mikro çekintiler görülmüş olup ötektik yapı çok iyi modifiye olmuştur.

8- Optimum mekanik özelliklerin elde edildiği alaşımların XRD analizlerinin incelenmesi sonucunda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir;

% 7 Si içeren 15 nolu alaşımın ( % 1,2 Cu, % 0,5 Zn, % 0,3 Mg, % 0,003 B, % 0,6 Mn, % 0,01 Sr, % 0,003 Na ve % 0,1 Ti) dökümü sonrası yapılan XRD analizi sonucunda Al ve Si ana yapılarının yanı sıra  $Al_{12}Mg_{17}$ ,  $Al_{4,2}Cu_{3,2}Zn_{0,7}$  ve  $Al_4MnSi_{0,7}$  ötektik alaşımlarının oluştuğu görülmüştür.

% 4 Si içeren 25 nolu alaşımın ( % 1,2 Cu, % 0,3 Mg, % 0,001 B, % 0,02 Sr, % 0,003 Na, % 0,4 Co ve % 0,1 Ti) dökümü sonrası yapılan XRD analizi sonucu yapıyı oluşturan ana fazın Al olduğu bununla beraber Si, Co,  $Al_4Cu_2Mg_8Si_7$ ,  $Al_{0,9}Cu_{1,1}Mg$  ve  $Al_{0,9}Mg_{3,1}$  yapılarının da yer aldığı görülmüştür.

% 4 Si içeren 2 nolu alaşımın (% 0,3 Mg, % 0,001 B, % 0,01 Sr ve % 0,1 Ti) dökümü sonrası yapılan XRD analizine göre alaşımın temelini oluşturan Al ve Si fazlarının yanı sıra çok az miktarda bulunan kübik yapıya sahip  $Al_{12}Mg_{17}$  fazının karakteristik pikleri de gözlemlenmiştir.

9- Optimum mekanik özelliklerin elde edildiği alaşımların SEM analizlerinin incelenmesi sonucunda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir;

% 7 Si içeren 15 nolu alaşımın ( % 1,2 Cu, % 0,5 Zn, % 0,3 Mg, % 0,003 B, % 0,6 Mn, % 0,01 Sr, % 0,003 Na ve % 0,1 Ti) dökümü sonrası yapılan SEM genel analizinde Al, Si, Cu, Mg, Mn, Co, Fe, Na ve Ca elementlerine, matris analizinde Al, Si, Mn ve Fe elementlerine, tane sınırı analizinde Al, Si, Mg, Mn ve Ca elementlerine rastlanmıştır.

% 4 Si içeren 25 nolu alaşımın ( % 1,2 Cu, % 0,3 Mg, % 0,001 B, % 0,02 Sr, % 0,003 Na, % 0,4 Co ve % 0,1 Ti) dökümü sonrası yapılan SEM genel analizinde Al, Si, Mg, Co, Fe ve Ca elementleri, matris analizinde Al ve Si elementleri, tane sınırı analizinde Al, Si, Cu, Mg, Co, Ti, Fe ve Na elementleri saptanmıştır.

% 4 Si içeren 2 nolu alaşımın (% 0,3 Mg, % 0,001 B, % 0,01 Sr ve % 0,1 Ti) dökümü sonrası yapılan SEM genel analizinde Al, Si, Cu, Mg, Ti ve Fe elementleri, matris analizinde Al, Si, Cu ve Mg elementleri, tane sınırı analizinde Al, Si, Cu, Mg, ve Fe elementleri görülmüştür.

10- Tüm alaşım sonuçlarının istatistiksel olarak incelendiği minitab programı sonucuna göre % uzama (döküm hali-ısıtılı işlemliler), çekme dayanımı (döküm hali-ısıtılı işlemliler), akma dayanımı (döküm hali-ısıtılı işlemliler), sertlik (döküm hali-ısıtılı işlemliler) ve akışkanlık parametrelerine etkisi olan elementler irdelenmiştir ve sonuçları aşağıdaki gibidir;

% Uzamaya (döküm hali); ana etkisi olan elementler Cu, Mg, Mn ve Co olarak tespit edilmiştir. Yüksek % uzama değerleri elde edebilmek için alaşım içerisinde; Cu, Mn ve Co elementlerinin bulunmaması gerekmektedir, Mg ise % 0,3 oranında ilave edilmelidir.

% Uzamaya (ısıtılı işlem uygulanmış); ana etkisi olan elementler Mg, Mn, Ce ve Co olarak tespit edilmiştir. Yüksek % uzama değerleri elde edebilmek için alaşım içerisinde; Mn, Ce ve Co elementleri bulunmamalıdır, Mg % 0,3 oranlarında ilave edilmelidir.

Çekme dayanımına (döküm hali); ana etkisi olan elementler Cu, Ce ve Sr olarak tespit edilmiştir. Yüksek çekme dayanımı değerleri elde edebilmek için alaşım içerisinde; Ce elementi bulunmamalıdır, Cu % 1,2 ve Sr % 0,01 oranlarında ilave edilmelidir.

Çekme dayanımına (ısıtıl işlem uygulanmış); ana etkisi olan elementler Cu, Mg ve Bi olarak tespit edilmiştir. Yüksek çekme dayanımı değerleri elde edebilmek için alaşım içerisinde; Bi elementi bulunmamalıdır, Cu % 1,2 ve Mg % 1,5 oranlarında ilave edilmelidir.

Akma dayanımına (döküm hali); ana etkisi olan elementler Mg ve Bi olarak tespit edilmiştir. Yüksek akma dayanımı değerleri elde edebilmek için alaşım içerisinde; Mg % 1,5 ve Bi % 0,5 oranlarında ilave edilmelidir.

Akma dayanımına (ısıtıl işlem uygulanmış); ana etkisi olan elementler Mg ve Bi olarak tespit edilmiştir. Yüksek akma dayanımı değerleri elde edebilmek için alaşım içerisinde; Bi elementi bulunmamalıdır, Mg % 1,5 oranlarında ilave edilmelidir.

Sertliğe (döküm hali); ana etkisi olan elementler, Mg, Mn, Ce, Na ve Co olarak tespit edilmiştir. Yüksek sertlik değerleri elde edebilmek için alaşım içerisinde; Ce ve Na elementleri bulunmamalıdır, Mg % 1,5, Mn % 0,6 ve Co % 0,4 oranlarında ilave edilmelidir.

Sertliğe (ısıtıl işlem uygulanmış); ana etkisi olan elementler Cu ve Mg olarak tespit edilmiştir. Yüksek sertlik değerleri elde edebilmek için alaşım içerisinde; Cu % 1,2 ve Mg % 1,5 oranlarında ilave edilmelidir.

Akışkanlığa; ana etkisi olan element Si olarak tespit edilmiştir. Yüksek akışkanlık değerleri elde edebilmek için alaşım içerisinde; % 7 oranında Si bulunmalıdır.

## 6.2 Öneriler

Deneylerin gerçekleştirildiği alüminyum indüksiyon ocağı açık tipte olup (atmosfere açık) normal seri koşullarda kullanılan koruyucu atmosfer koşullarında alaşımı muhafaza edebilen ergitme ocaklarından ve bekletme ocaklarından farklı bir yapı sergilemektedir, seri imalata uygun olmayan bu tip ocaklarda yaşanan olumsuzluklar bu çalışmada da görülmüştür. Elde edilen deney sonuçlarında görülen % porozite miktarının mekanik özellikler üzerindeki olumsuz etkisinin bu sebepten oluştuğu ve seri imalatta bu olumsuz durumun ortadan kalkacağı öngörülmektedir.

Seri üretim koşullarında kapalı (atmosfer kontrollü) indüksiyon ocağında yapılacak üretim ile porozitenin alaşım üzerindeki olumsuz etkisi ortadan kaldırılabilir.

Tez çalışmalarında kullanılmış laboratuvar ölçekli gaz giderme işlemi ergiyik alaşım üzerine azot gazının bir boru vasıtasıyla üflenmesi ile gerçekleştirilmiştir. Seri imalat koşullarında kullanılmakta olan tam otomatik, hata önleyici sisteme sahip gaz giderme sistemleri sayesinde laboratuvar ölçekli çalışmaların yetersiz gaz giderme işleminden kaynaklı porozite oluşumu önlenir.

Bu çalışma sonucunda elde edilen veriler neticesinde daha kapsamlı bir deney tasarımı ve istatistiksel analiz yapılarak ikinci bir çalışma yapılabilir. İleriki çalışmalarda yukarıda bahsedilen olumsuz koşulların iyileştirilmesi ve alaşımın mekanik özelliklerine olumsuz etkisi olan elementlerin elimine edilmesi sonucunda yeni alaşımlar üretilebilir.

Elde edilecek bu yeni alaşım için daha ince kesite sahip dolayısıyla daha hafif bir jant modeli tasarlanarak bu model için kapsamlı testler gerçekleştirilebilir.



## KAYNAKLAR

- [1] **Totten, G. E. and Mac Kenzie, D. S.**, 2003: *Handbook of Aluminum Volume 2, Alloy Production and Materials Manufacturing*, Marcel Dekker Inc., New York, USA.
- [2] **Davis, J. R.**, 1996: *ASM Speciality Handbook, Aluminum and Aluminum Alloys*, ASM International, Materials Park, Ohio, USA.
- [3] **Zeytin, H. K.**, 2000: *Alüminyum Alaşımları Otomotiv Endüstrisinde Uygulamaları ve Geleceği*, TMAM, OSD, Kocaeli, Türkiye.
- [4] **Url-1** < [http://stats.world-aluminium.org/iai/stats\\_new/formServer.asp?form=1](http://stats.world-aluminium.org/iai/stats_new/formServer.asp?form=1) > alındığı tarih 10.09.2009.
- [5] **Davis, J. R.**, 2001: *Alloying, Understanding The Basics*, ASM International, Materials Park, Ohio, USA.
- [6] **Url-2** < <http://nonferrous.keymetals.com/default.aspx?ID=CheckArticle&NM=1> > alındığı tarih 10.09.2009.
- [7] **Url-3** < <http://www.autoaluminum.org/main/index.cfm?secID=2&ArticleID=29> > alındığı tarih 10.09.2009.
- [8] **Automotive & Light Truck Group**, 2001: *Aluminum The Corrosion Resistant Automotive Material*, Aluminum Association, Inc. USA.
- [9] **Kaufmann, J. G.**, 2000: *Introduction to Aluminum Alloys and Tempers*, ASM International, USA.
- [10] **Kaufmann, J. G. and Rooy, E. L.**, 2005: *Aluminum Alloy Castings, Properties, Processes, and Applications*, ASM International, American Foundry Society, USA.
- [11] **Gruzleski, J. E. and Closset, B. M.**, 1990: *The Treatment of Liquid Aluminum-Silicon Alloys*, The American Foundrymen's Society, Inc., USA.
- [12] **Chu, M. G., Granger, D. A. And Han, Q. Y.**, 2004: *Solidification of Aluminum Alloys*, TMS, Pennsylvania, USA.
- [13] **Url-4** < <http://nonferrous.keymetals.com/default.aspx?ID=CheckArticle&NM=55> > alındığı tarih 10.09.2009.

- [14] **Url-5** < <http://nonferrous.keytometals.com/default.aspx?ID=CheckArticle&NM=191> > alındığı tarih 10.09.2009.
- [15] **Ali Fahmy, A. S. and Inkin, S. V.**, 1995: Limitations of Impurities in Aluminium Alloys, *61st World Foundry Congress*, 24-29 September, Beijing, China, pp. 373-381.
- [16] **Centre Technique Des Industries De La Fonderie**, 1989: *Metallographic Atlas of Cast Aluminium Alloys*, Centre Technique Des Industries De La Fonderie, France.
- [17] **Shivkumar, S., Wang, L., and Apeliani D.**, 1991: Molten Metal Processing of Advanced Cast Aluminum Alloys, In *Journal of Metals*, **43**, 26-32
- [18] **Chandler, H.**, 2006: *Heat Treater's Guide, Practices and Procedures for Nonferrous Alloys*, ASM International, USA.
- [19] **Dursun, T.**, 2002: "Ötektik Al-Si Alaşımının Mikroyapı Kontrolunda Yavaş Soğutma Tekniği", Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [20] **ASM International**, 2006: *ASM Handbook Volume 3, Alloy Phase Diagrams*, ASM International, USA.
- [21] **CMS**, 2008: Dökülmüş Ürün Malzeme Spesifikasyonu, Şartname no: MHZ.06.001, İzmir, Türkiye.
- [22] **Url-6** < <http://www.eazall.com/gravitycasting.aspx#top#top> > alındığı tarih 10.09.2009.
- [23] **Url-7** < <http://www.kobelco.co.jp/english> > alındığı tarih 10.09.2009.
- [24] **Gupta, D.**, 2005: Aluminum Alloy, *United States Patent*, No:6,908,590 dated 21.06.2005.
- [25] **Miki, I.**, 1978: Die Cast Aluminum Alloy Products, *United States Patent*, No:4,104, 089 dated 01.08.1978.
- [26] **Dash Manas, D. and Makhlof, M.**, 2001: Effect of key alloying elements on the feeding characteristics of aluminum-silicon casting alloys, In *Journal of Light Metals*, **1**, 251-265.
- [27] **Oshiro, N.**, et al., 2002: High strength aluminum alloy for pressure casting and cast aluminum alloy comprising the same, *United States Patent*, No: 6,416,710 B1 dated 09.07.2002

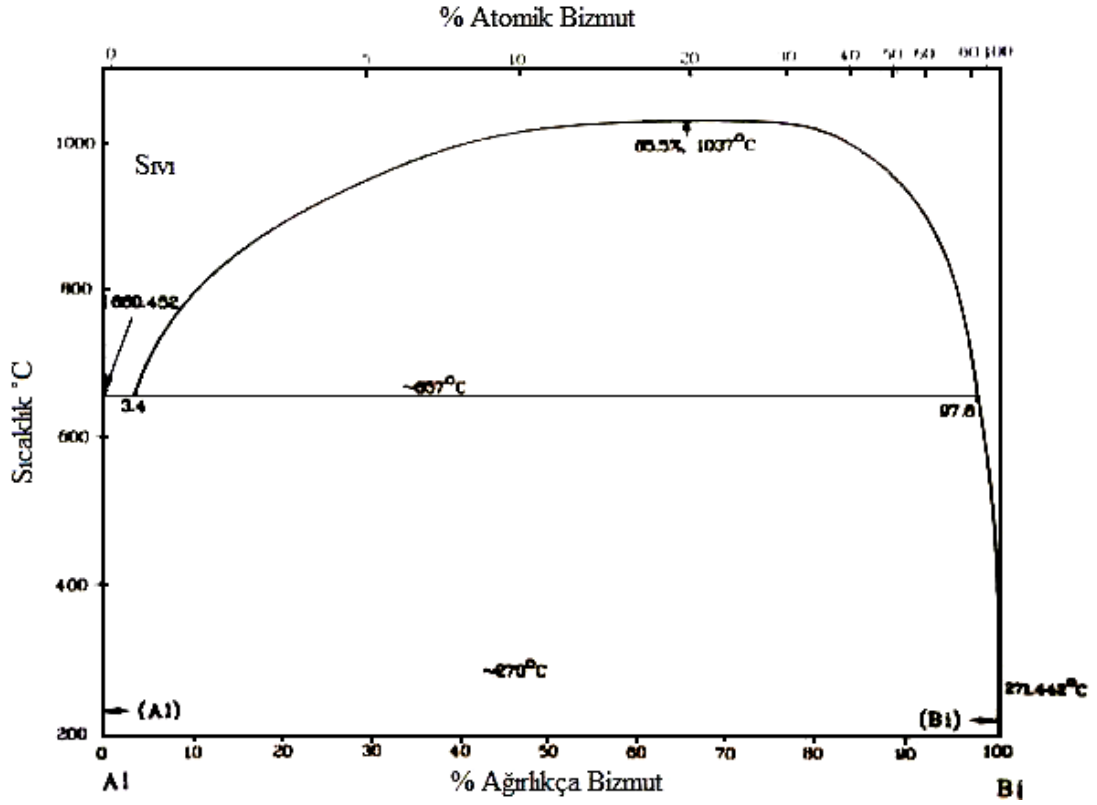
- [28] **Fang Q.T. and Shabel B. S.** 2001: High strength Al-Zn-Mg alloy for making shaped castings including vehicle wheels and structural components, *United States Patent*, No: 2001028861 A1 dated 11.10.2001
- [29] **Alabi M.M.** 1993: Hypo-eutectic aluminium-silicon-copper alloy having bismuth additions, *European Patent*, No: 0528453 A1 dated 24.02.1993.
- [30] **Alabi M.M.** 1993: Hypo-eutectic aluminium-silicon-copper alloy having tin and bismuth additions, *European Patent*, No: 0528454 A1 dated 24.02.1993.
- [31] **Alabi M.M.** 1993: Wear resistant eutectic aluminium-silicon alloy, *European Patent*, No: 0540069 A1 dated 05.05.1993.
- [32] **Ullman J.E.** 2006: High strength aluminium alloys for aircraft wheel and brake components, *European Patent*, No: 1726671 A2 dated 29.11.2006.
- [33] **Lasalle J.C. and Das S.K.** 1993: Rapidly solidified aluminum lithium alloys having zirconium for aircraft landing wheel applications, *International Patent*, No: 93/17138 dated 02.09.1993.
- [34] **Sperry, P.R., Winter, J. and Pryor, M.J.** 1973: High strength aluminum base alloy, *United States Patent*, No: 3765877 dated 16.10.1973.
- [35] **Lindberg, R.S. and Armstrong, G.L.** 1974: Aluminum base alloy die casting wheel, *United States Patent*, No: 3856360 dated 24.12.1974.
- [36] **Urdea, M.G.** 1978: High strength aluminum alloy, *United States Patent*, No: 4067733 dated 10.01.1978.
- [37] **Ito, T. and Hashimoto, A.** 1984: Aluminum alloy for casting, *United States Patent*, No: 4462961 dated 31.07.1984.
- [38] **Huet, R.** 1987: Aluminum alloy having improved properties, *United States Patent*, No: 4714588 dated 22.12.1987.
- [39] **Ogawa, M., Ueno, T. and Iwai, H.** 1988: Solution heat treated high strength aluminum alloy, *United States Patent*, No: 4786340 dated 22.11.1988.
- [40] **Lindberg, R.S.** 1991: Hypoeutectic aluminum silicon magnesium nickel and phosphorus alloy, *United States Patent*, No: 5023051 dated 11.06.1991.
- [41] **Ota, A., et. al.** 1994: Aluminum alloy casting having high strength and high toughness and process for producing the same, *United States Patent*, No: 5298094 dated 29.03.1994.

- [42] **Meyer, P.** 2005: Method of producing a light alloy wheel rim and an improved light alloy wheel rim for a motor vehicle, *United States Patent*, No: 2005/0034305 dated 17.02.2005.
- [43] **Koch, H.** 2006: Aluminum diecasting alloy, *United States Patent*, No: 2006/0011321 dated 19.01.2006.
- [44] **Url-8** < <http://www.inotec.com.tr/Presentations/einv0700.pdf> > alındığı tarih 10.09.2009.
- [45] **Url-9** < <http://iesc.atilim.edu.tr/forum/index.php?topic=159.0> > alındığı tarih 10.09.2009.
- [46] **Url-10** < [http://www.trigonal.com.tr/index.php?option=com\\_content&task=view&id=214&Itemid=317](http://www.trigonal.com.tr/index.php?option=com_content&task=view&id=214&Itemid=317) > alındığı tarih 10.09.2009
- [47] **Url-11** < <http://www.inovasoft.com.tr/minitab101.html> > alındığı tarih 10.09.2009
- [48] **CMS**, 2003: Laboratuvar Numuneleri İçin Çözelti Hazırlama Talimatı, Talimat no: DC3.10.002, İzmir, Türkiye.
- [49] **CMS**, 2003: Mikrografik Analiz Talimatı, Talimat no: D06.10.002, İzmir, Türkiye.
- [50] **CMS**, 2001: Makrografik Analiz Talimatı, Talimat no: D06.10.003, İzmir, Türkiye.

## EKLER

### EK A. Şekiller ve Çizelgeler

#### Al-Bi

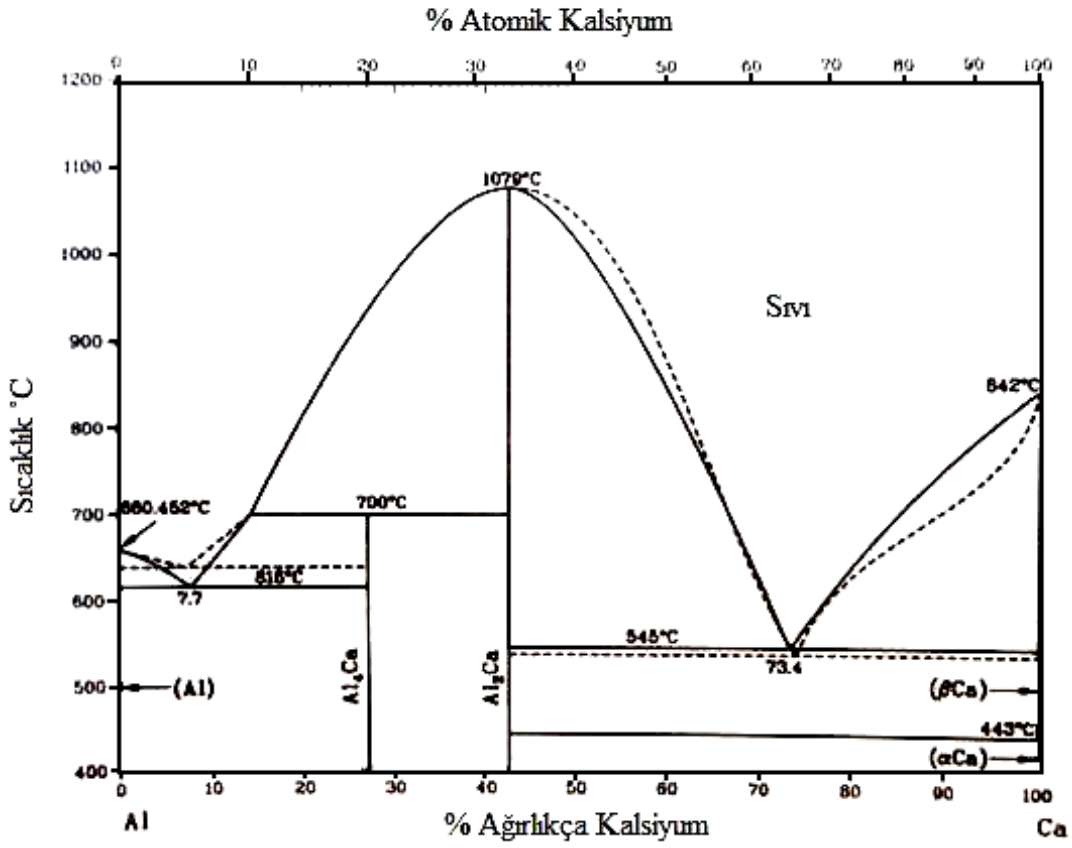


Şekil A.1 : Al-Bi ikili faz diyagramı [20].

Çizelge A.1 : Al-Bi faz diyagramı faz dağılımı [20].

Faz	% Ağırlıkça Bi
Al	0-0,23
Bi	100

## Al-Ca

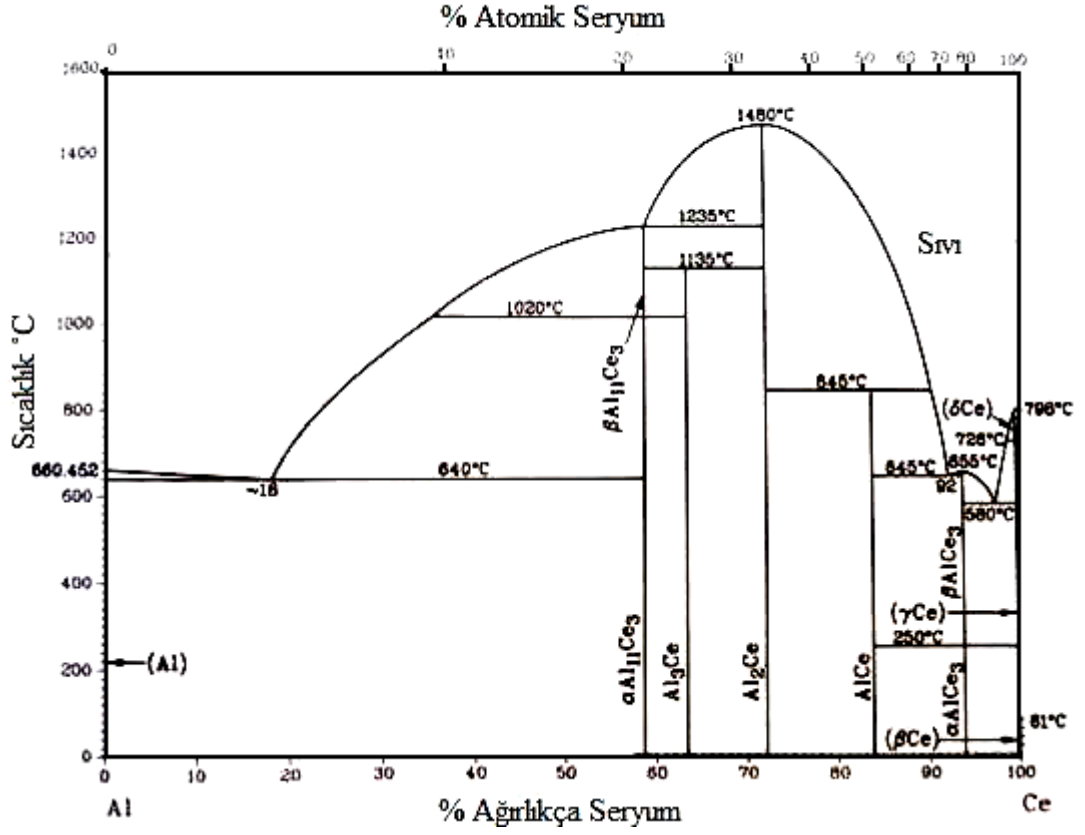


Şekil A.2 : Al-Ca ikili faz diyagramı [20].

Çizelge A.2 : Al-Ca faz diyagramı faz dağılımı [20].

Faz	% Ağırlıkça Ca
Al	0
Al <sub>4</sub> Ca	27
Al <sub>2</sub> Ca	42,6
(αCa)	100
(βCa)	100

## Al-Ce

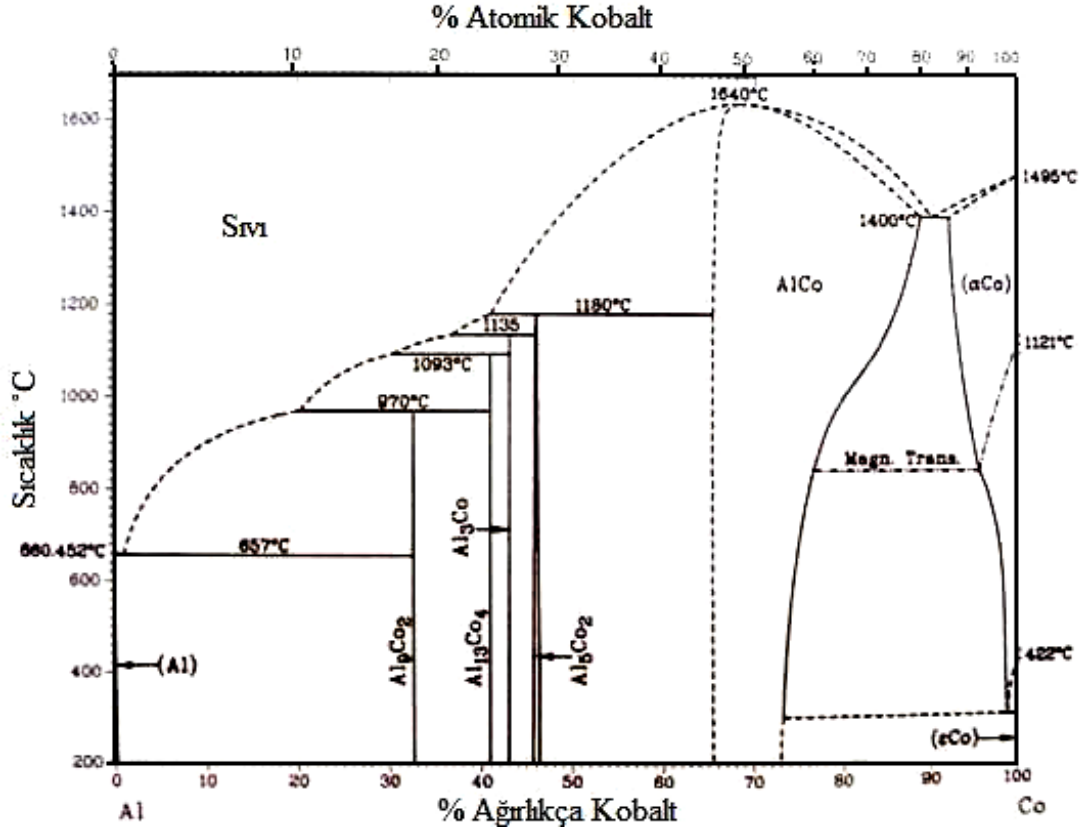


Şekil A.3 : Al-Ce ikili faz diyagramı [20].

Çizelge A.3 : Al-Ce faz diyagramı faz dağılımı [20].

Faz	% Ağırlıkça Ce
(Al)	0
$\alpha\text{Al}_{11}\text{Ce}_3$	58,6
$\beta\text{Al}_{11}\text{Ce}_3$	58,6
$\text{Al}_3\text{Ce}$	63
$\text{Al}_2\text{Ce}$	72,2
AlCe	83,9
$\alpha\text{AlCe}_3$	94
$\beta\text{AlCe}_3$	94
( $\alpha\text{Ce}$ )	100
( $\beta\text{Ce}$ )	100
( $\gamma\text{Ce}$ )	100
( $\delta\text{Ce}$ )	100

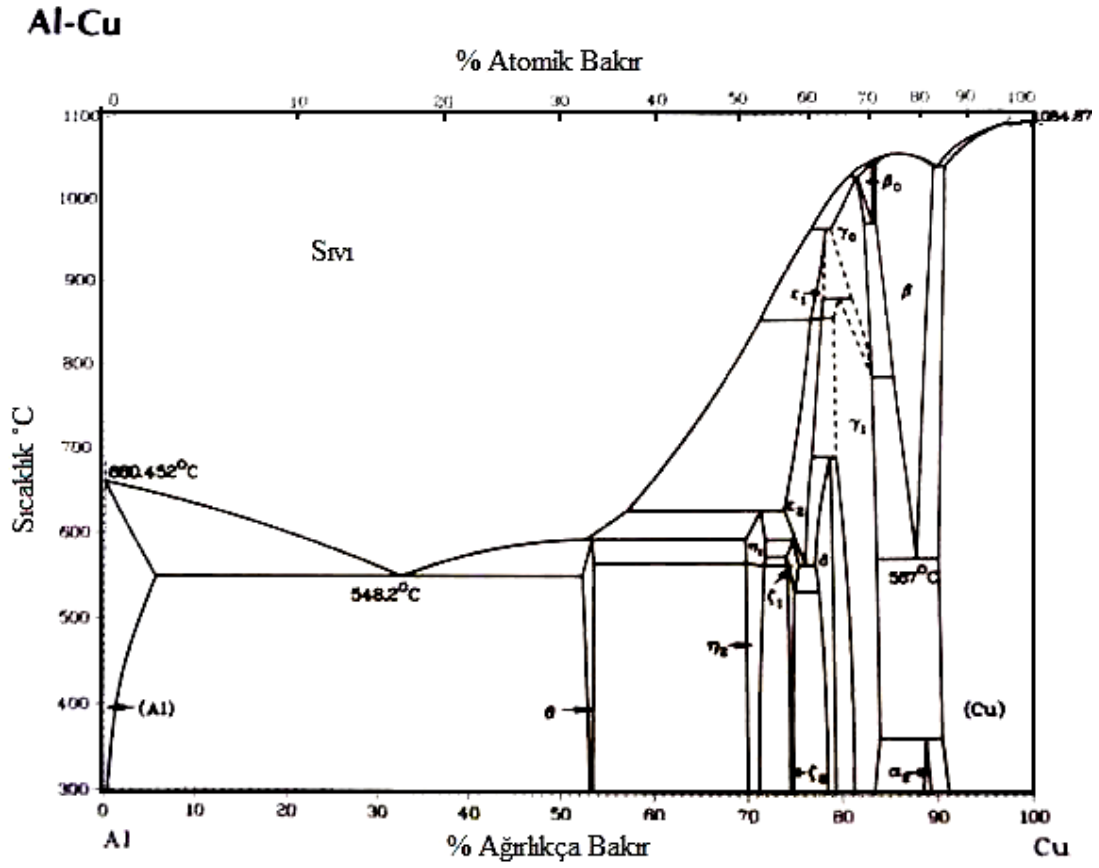
## Al-Co



Şekil A.4 : Al-Co ikili faz diyagramı [20].

Çizelge A.4 : Al-Co faz diyagramı faz dağılımı [20].

Faz	% Ağırlıkça Co
(Al)	0
$Al_9Co_2$	32,6
$Al_{13}Co_4$	40,2
$Al_3Co$	42,9
$Al_5Co_2$	46,7
$AlCo$	67-88,9
(εCo)	92-100
(αCo)	97-100
Değişken Fazlar	
$\alpha_{II}^I$	95-98
$\alpha_{III}$	93-94
$\alpha_{IV}$	92-93
$\alpha$	93-94

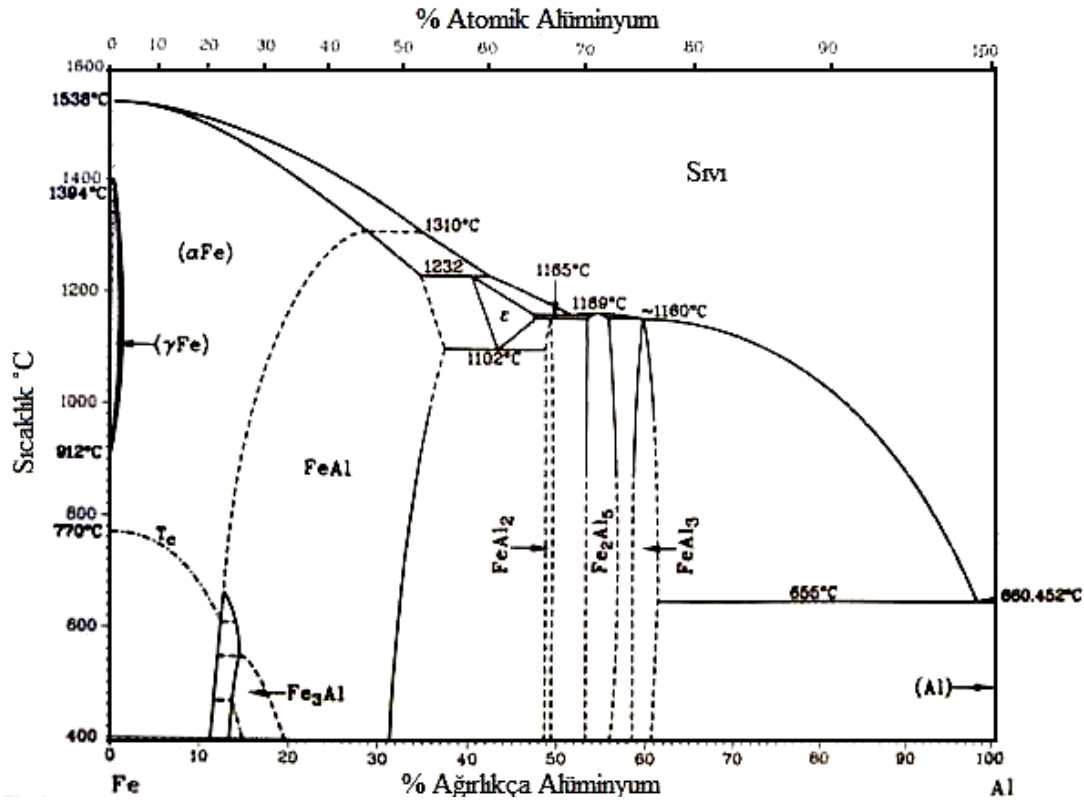


Şekil A.5 : Al-Cu ikili faz diyagramı [20].

Çizelge A.5 : Al-Cu faz diyagramı faz dağılımı [20].

Faz	% Ağırlıkça Cu
(Al)	0-5,65
θ	52,5-53,7
η <sub>1</sub>	70-72,2
η <sub>2</sub>	70-72,1
ζ <sub>1</sub>	74,4-77,8
ζ <sub>2</sub>	74,4-75,2
ε <sub>1</sub>	77,5-79,4
ε <sub>2</sub>	72,2-78,7
δ	77,4-78,3
γ <sub>0</sub>	77,8-84
γ <sub>1</sub>	79,7-84
β <sub>0</sub>	83,1-84,7
β	85-91,5
α <sub>2</sub>	88,5-89
(Cu)	90,6-100
Değişken fazlar	
θ'	---
β'	---
Al <sub>3</sub> Cu <sub>2</sub>	61-70

## Al-Fe

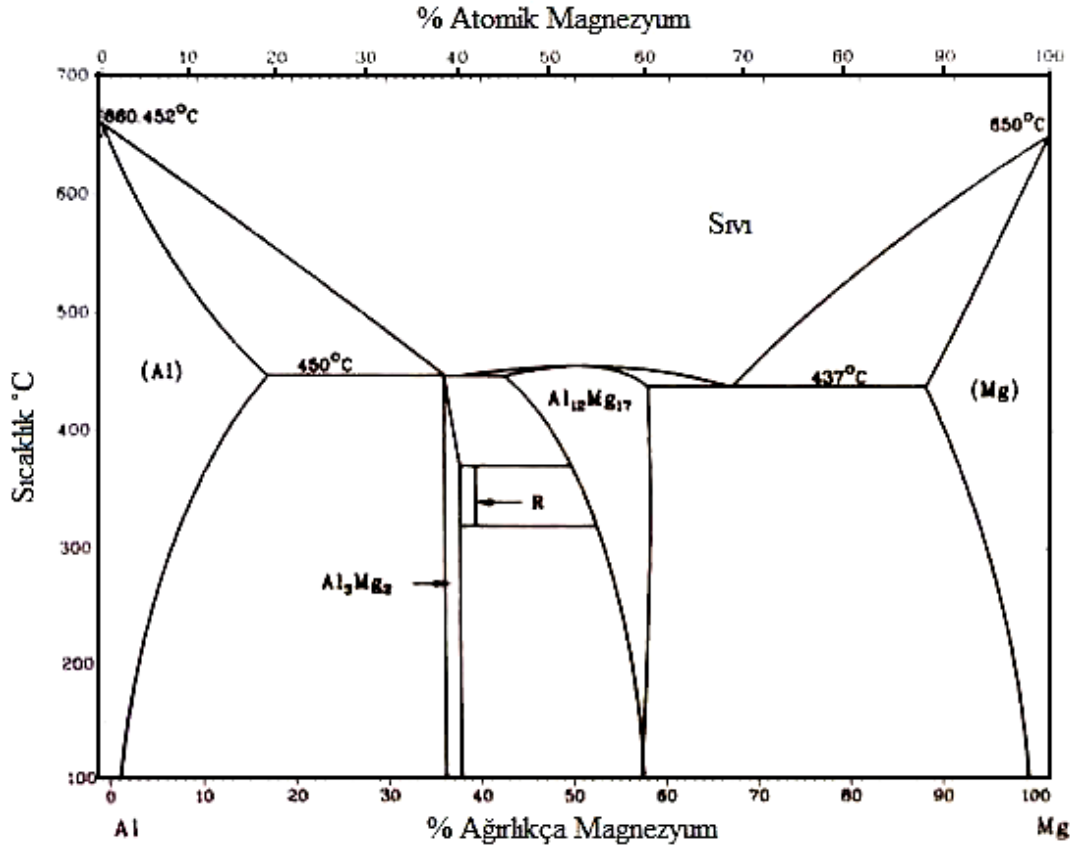


Şekil A.6 : Al-Fe ikili faz diyagramı [20].

Çizelge A.6 : Al-Fe faz diyagramı faz dağılımı [20].

Faz	% Ağırlıkça Fe
(αFe)	0-28
(γFe)	0-0,6
FeAl	12,8-37
Fe <sub>3</sub> Al	13-20
ε	40-47
FeAl <sub>2</sub>	48-49,4
Fe <sub>2</sub> Al <sub>5</sub>	53-57
FeAl <sub>3</sub>	58,5-61,3
(Al)	100
Değişken fazlar	
Fe <sub>2</sub> Al <sub>9</sub>	68,5
FeAl <sub>6</sub>	74,3

## Al-Mg

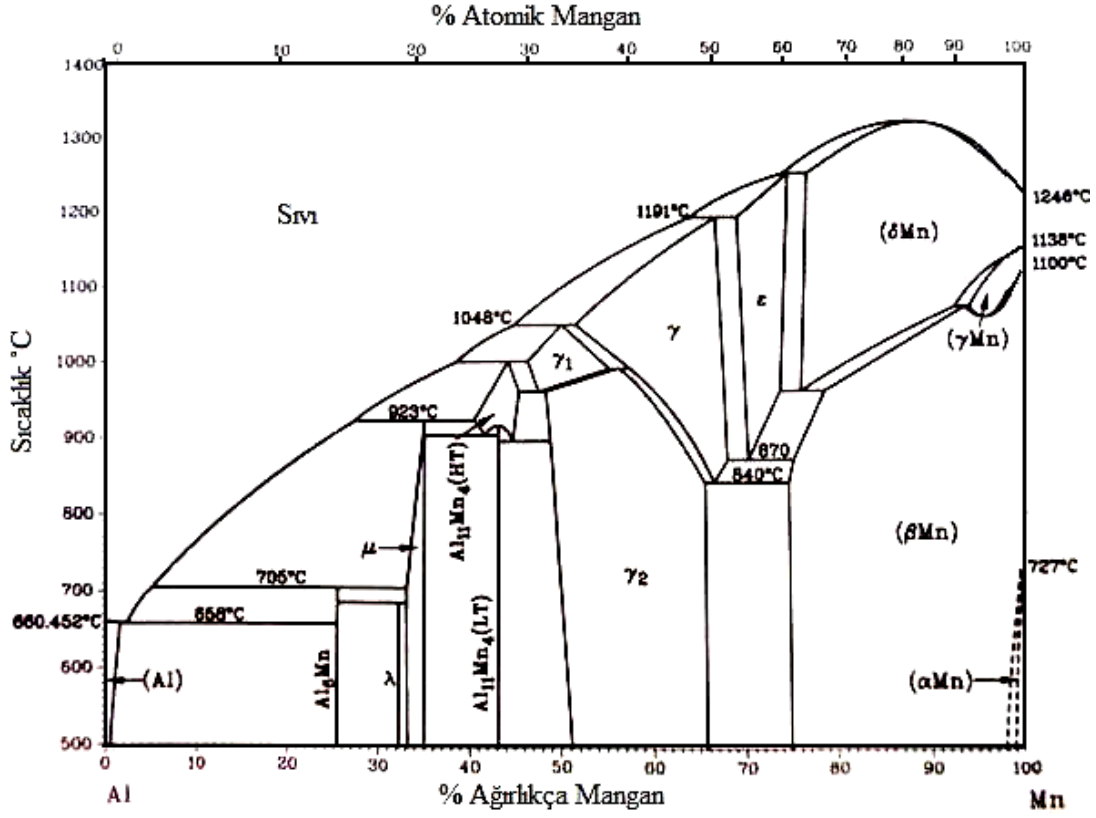


Şekil A.7 : Al-Mg ikili faz diyagramı [20].

Çizelge A.7 : Al-Mg faz diyagramı faz dağılımı [20].

Faz	% Ağırlıkça Mg
(Al)	0-17,1
$\beta(\text{Al}_3\text{Mg}_2)$	36,1-37,8
R	39
$\gamma(\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17})$	42-58
(Mg)	87,1-100
Değişken fazlar	
$\text{Al}_2\text{Mg}$	31
$\gamma$	38-56,2

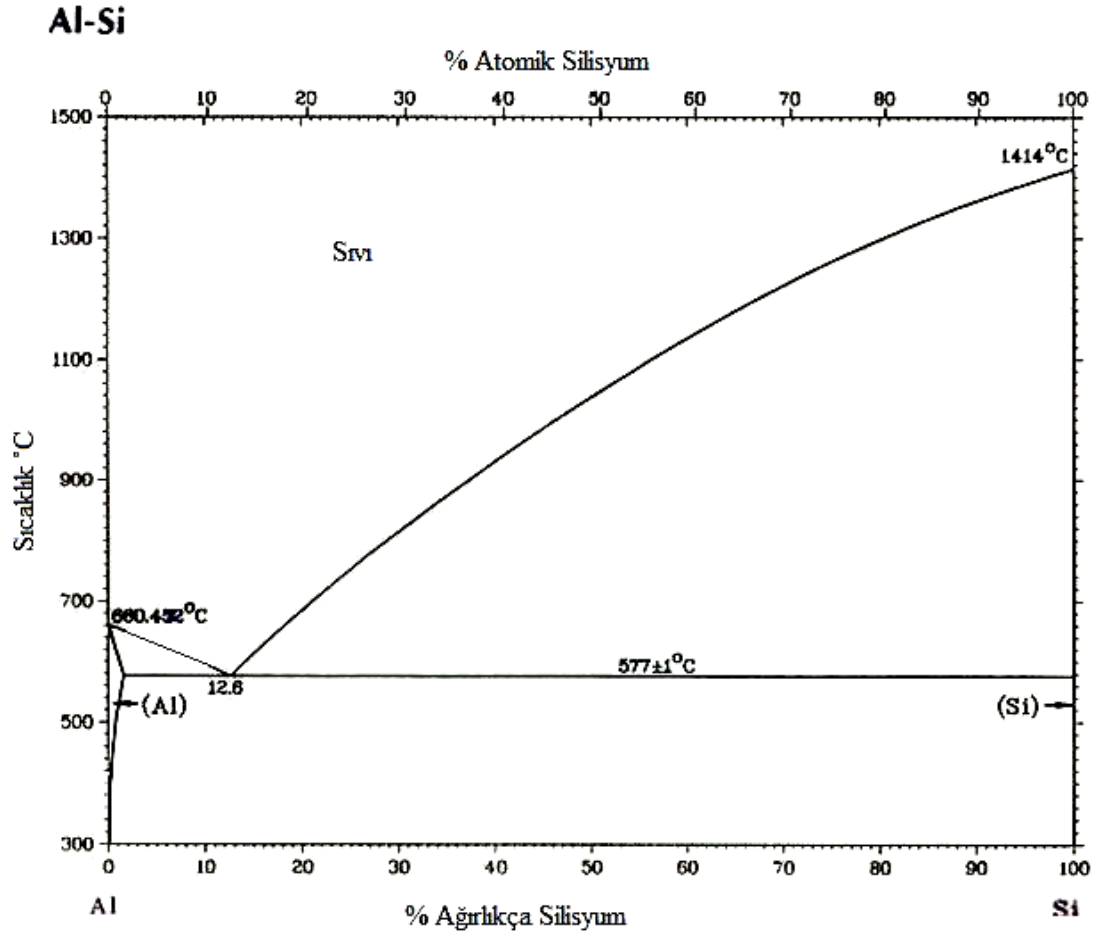
## Al-Mn



Şekil A.8 : Al-Mn ikili faz diyagramı [20].

Çizelge A.8 : Al-Mn faz diyagramı dağılımı [20].

Faz	% Ağırlıkça Mn
(Al)	0-1,25
G	Değişken faz
Al <sub>6</sub> Mn	25,2
λ(Al <sub>4</sub> Mn)	29,4-32
μ	32-34,8
Al <sub>10</sub> Mn <sub>3</sub> (φ)	Değişken faz
Al <sub>11</sub> Mn <sub>4</sub> (LT)	43
Al <sub>11</sub> Mn <sub>4</sub> (HT)	40-45
γ <sub>1</sub>	47-55,7
γ <sub>2</sub>	48,2-64
γ	51,8-68,2
ε	69,8-75
τ	Değişken faz
(δMn)	76,5-100
(γMn)	95,3-100
(βMn)	75-100
(αMn)	99-100

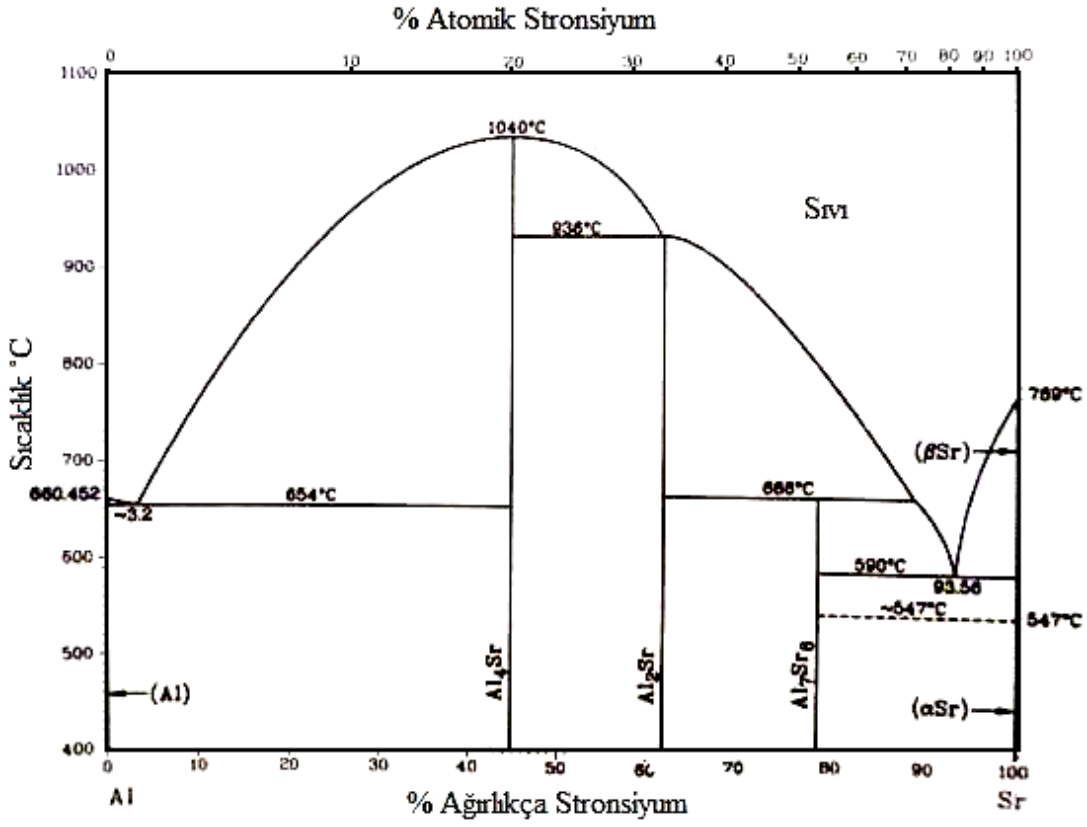


Şekil A.9 : Al-Si ikili faz diyagramı [20].

Çizelge A.9 : Al-Si faz diyagramı faz dağılımı [20].

Faz	% Ağırlıkça Si
(Al)	0-1,6
(Si)	99,985-100

## Al-Sr

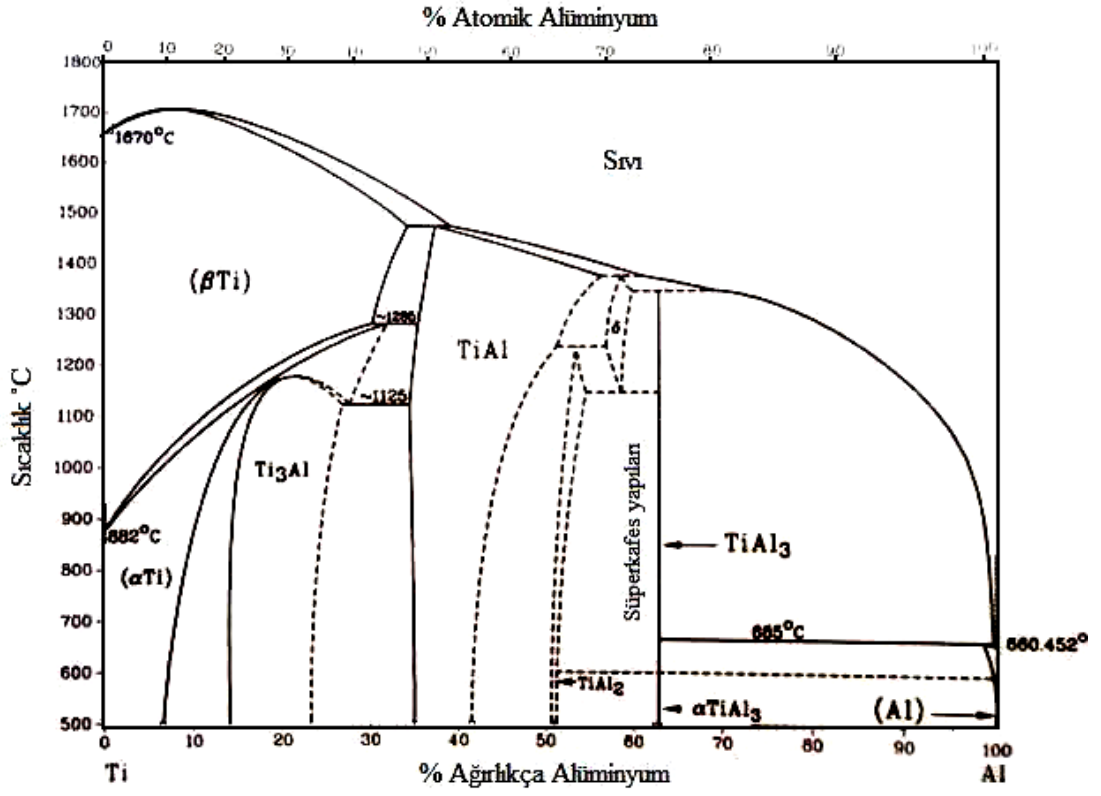


Şekil A.10 : Al-Sr ikili faz diyagramı [20].

Çizelge A.10 : Al-Sr faz diyagramı faz dağılımı [20].

Faz	% Ağırlıkça Sr
(Al)	0
Al <sub>4</sub> Sr	45
Al <sub>2</sub> Sr	61,9
Al <sub>7</sub> Sr <sub>8</sub>	78,8
(βSr)	100
(αSr)	100

## Al-Ti

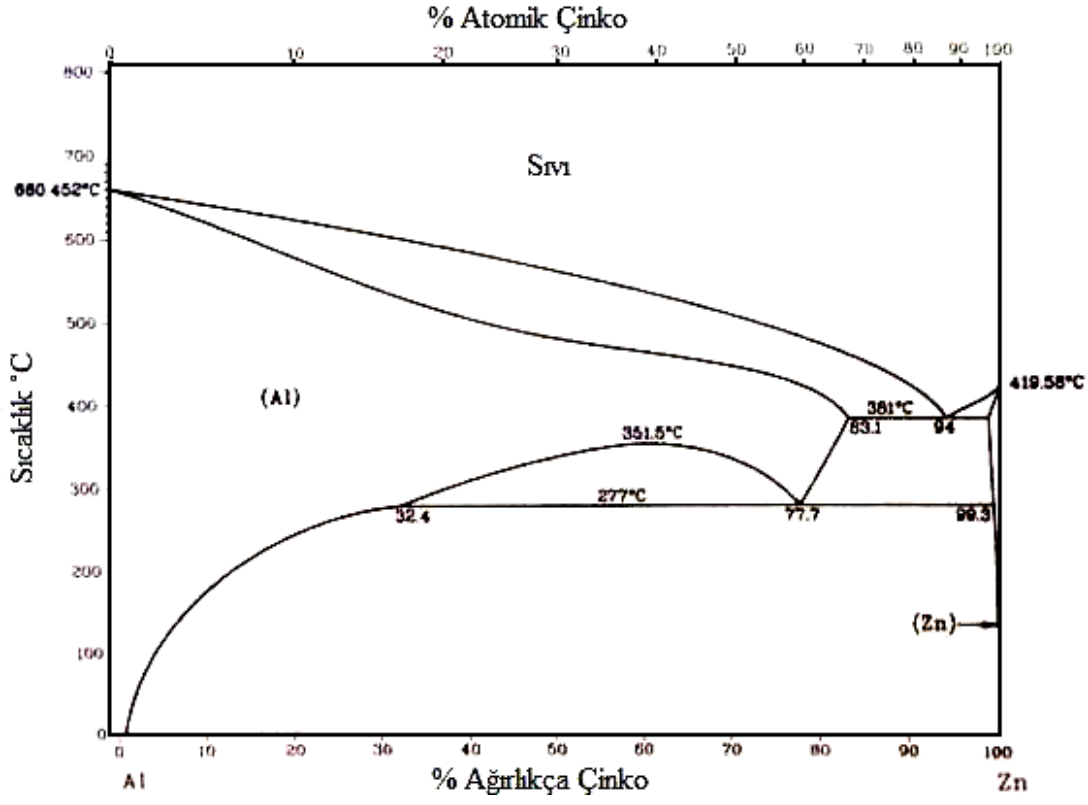


Şekil A.11 : Al-Ti ikili faz diyagramı [20].

Çizelge A.11 : Al-Ti faz diyagramı faz dağılımı [20].

Faz	% Ağırlıkça Ti
(βTi)	0-33,8
(αTi)	0-32
Ti <sub>3</sub> Al	14-26
TiAl	34-56,2
Ti <sub>3</sub> Al <sub>5</sub>	44-49
TiAl <sub>2</sub>	51-54
αTiAl <sub>2</sub>	---
δ	57-59,8
TiAl <sub>3</sub>	63
αTiAl <sub>2</sub>	63
(Al)	98,8-100

## Al-Zn



Şekil A.12 : Al-Zn ikili faz diyagramı [20].

Çizelge A.12 : Al-Zn faz diyagramı faz dağılımı [20].

Faz	% Ağırlıkça Zn
(Al)	0-83,1
(Zn)	98,8-100
Değişken fazlar	
( $\alpha'$ Al) <sub>R</sub>	78-85
'R''	Yapışık Çökelti
Y	---

**Çizelge A.13 : Spektromax-M spektrometre element analiz limitleri.**

ELEMENT	ALT LİMİT, %	ÜST LİMİT, %
Ag	0,0001	1
B	0,0001	0,022
Ba	0,0001	0,006
Be	0,00005	0,05
Bi	0,001	2
Ca	0,0001	0,04
Cd	0,0001	0,5
Co	0,0005	2
Ce	0,0015	2
Cr	0,0003	0,5
Cu	0,0001	49
Fe	0,0005	12
Ga	0,001	0,13
In	0,0003	0,016
Hg	0,002	0,21
Li	0,0001	9
Mg	0,0001	11
Mn	0,0003	22
Na	0,0001	0,022
Ni	0,0004	2,8
P	0,001	0,01
Pb	0,0005	1,5
Sb	0,002	0,55
Si	0,0005	24
Sn	0,001	15
Sr	0,0001	10,5
Ti	0,0004	2,5
V	0,0005	0,1
Zn	0,001	12
Zr	0,0003	0,25

**Çizelge A.14 : K-testi analiz sonuçları.**

K-TESTİ		
DENEY NO	K=S/N	
R	1/8	0,13
1	1/8	0,13
2	5/8	0,63
3	0/8	0,00
4	4/8	0,50
5	16/8	2,00
6 EKSİK	4/8	0,50
6	5/8	0,63
7	4/8	0,50
8	6/8	0,75
9	2/8	0,25
10	9/8	1,13
11	6/8	0,75
12	5/8	0,63
13	2/8	0,25
14	3/8	0,38
15	2/8	0,25
16	2/8	0,25
17	2/8	0,25
18	2/8	0,25
19	6/8	0,75
20	5/8	0,63
21	1/8	0,13
22	1/8	0,13
23	4/8	0,50
24	0	0,00
25	2/8	0,25
26	1/8	0,13
27	2/8	0,25
28	0/8	0,00
29	2/8	0,25
30	4/8	0,50
31	3/8	0,38
32	2/8	0,25
S=İnklüzyon adedi N=Parça sayısı K=S/N		

**Çizelge A.15 : Akışkanlık kalıbı toplam parmak boyları.**

<b>DENEY NO</b>	<b>PARMAK BOYLARI</b>					<b>TOPLAM BOY (mm)</b>
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	
<b>R</b>	300	300	300	294	133	1327
<b>1</b>	300	300	300	300	235	1435
<b>2</b>	300	300	300	269	161	1330
<b>3</b>	300	300	300	300	220	1420
<b>4</b>	300	300	300	249	100	1249
<b>5</b>	300	300	300	300	192	1392
<b>6 EKSİK</b>	300	300	300	200	159	1259
<b>6</b>	300	300	300	277	144	1321
<b>7</b>	300	300	300	235	113	1248
<b>8</b>	300	300	300	284	189	1373
<b>9</b>	300	300	300	216	185	1301
<b>10</b>	300	300	300	237	132	1269
<b>11</b>	300	300	300	246	137	1283
<b>12</b>	300	300	300	215	142	1257
<b>13</b>	300	300	300	226	155	1281
<b>14</b>	300	300	256	205	147	1208
<b>15</b>	300	300	300	268	179	1347
<b>16</b>	300	300	300	246	100	1246
<b>17</b>	300	300	246	161	122	1129
<b>18</b>	300	300	279	189	102	1170
<b>19</b>	300	300	300	209	122	1231
<b>20</b>	300	300	241	154	92	1087
<b>21</b>	300	300	300	300	275	1475
<b>22</b>	300	300	300	148	102	1150
<b>23</b>	300	300	300	190	109	1199
<b>24</b>	300	281	213	141	35	970
<b>25</b>	300	300	300	170	81	1151
<b>26</b>	300	300	300	222	116	1238
<b>27</b>	300	300	274	165	84	1123
<b>28</b>	300	256	200	131	70	957
<b>29</b>	300	300	231	210	151	1192
<b>30</b>	300	300	300	172	129	1201
<b>31</b>	300	274	189	168	103	1034
<b>32</b>	300	300	283	147	64	1094

**Çizelge A.16 : Sıcak yırtılma kalıbı çatlak oluşumu.**

SICAK YIRTIILMA TESTİ		
DENEY NO	ÇATLAK ADEDİ	ÇATLAK OLUŞUMU
R	0	YOK
1	1	VAR
2	0	YOK
3	0	YOK
4	0	YOK
5	0	YOK
6 EKSİK	0	YOK
6	0	YOK
7	2	VAR
8	0	YOK
9	1	VAR
10	0	YOK
11	5	VAR
12	0	YOK
13	0	YOK
14	0	YOK
15	0	YOK
16	0	YOK
17	0	YOK
18	0	YOK
19	0	YOK
20	0	YOK
21	0	YOK
22	2	VAR
23	0	YOK
24	0	YOK
25	0	YOK
26	0	YOK
27	0	YOK
28	0	YOK
29	1	VAR
30	0	YOK
31	0	YOK
32	0	YOK

**Çizelge A.17 : Metal Health çekme kalıbı çekme test sonuçları.**

DENEY NO	% UZAMA (Döküm Hali)	AKMA DAYANIMI (MPa) (Döküm Hali)	ÇEKME DAYANIMI (MPa) (Döküm Hali)	% UZAMA (Isıl İşlem)	AKMA DAYANIMI (MPa) (Isıl İşlem)	ÇEKME DAYANIMI (MPa) (Isıl İşlem)
Referans-7Si	7,094	59,846	140,54	4,216	167,402	223,938
1	2,754	94,984	188,274	2,68	163,952	232,75
2	5,854	75,76	149,854	7,398	195,038	262,694
3	4,596	77,182	155,436	7,982	112,216	189,752
4	4,778	84,714	154,376	2,546	192,776	228,428
5	0,974	104,766	154,834	0,378	246,142	256,106
6 EKSİK	2,358	72,834	116,88	0,998	150,132	168,934
6	0,536	90,732	108,192	-	-	-
7	2,316	83,786	147,3	0,168	184,16	159,588
8	1,156	96,712	139,332	0,212	232,65	229,484
9	1,63	90,298	165,91	0,882	223,262	257,114
10	1,584	99,836	169,786	0,176	220,62	204,966
11	2,47	101,9475	181,5275	1,395	216,3825	254,2225
12	5,286	77,95	158,828	5,268	159,202	228,268
13	1,694	97,762	164,718	0,972	249,41	282,26
14	2,556	78,622	145,022	1,86	190,236	231,428
15	3,924	94,6	190,564	4,158	191,454	271,268
16	0,7025	122,6025	158,8225	0,342	232,418	243,354
17	3,564	98,114	174,078	4,966	169,52	254,372
18	1,17	122,984	165,76	1,282	248,378	277,492
19	3,148	95,646	168,488	2,982	167,358	226,634
20	2,442	93,724	151,928	2,176	241,528	280,722
21	0,755	128,39	174,405	0,432	243,16	263,042
22	1,4575	105,255	157,7975	0,362	251,266	262,704
23	2,9	88,2175	161,88	1,376	164,862	201,902
24	1,868	142,3	197,896	3,808	238,734	303,27
25	4,33	87,2025	175,14	4,772	175,42	248,802
26	0,458	142,4125	160,86	1,1	245,585	288,7025
27	4,508	87,302	169,312	3,348	181,478	241,14
28	5,334	78,766	155,856	3,358	93,768	156,422
29	1,458	102,93	161,112	1,904	221,726	275,366
30	1,31	114,564	166,058	1,17	258,746	294,86
31	3,092	87,156	177,218	2,496	149,308	215,726
32	1,21	114,93	162,628	0,97	230,774	259,434

- : Isıl işlemlerle sonuç elde edilmemiştir.

**Çizelge A.18 : Metal Health çekme kalıbı detaylı çekme test sonuçları.**

DENEYLER	% UZAMA (Döküm Hali)	AKMA DAYANIMI (MPa) (Döküm Hali)	ÇEKME DAYANIMI (MPa) (Döküm Hali)	% UZAMA (Isıl İşlem)	AKMA DAYANIMI (MPa) (Isıl İşlem)	ÇEKME DAYANIMI (MPa) (Isıl İşlem)
R	7,07	63,11	141,87	3,93	165,05	216,68
R	8,24	58,37	141,95	3,5	168,58	222,83
R	7,18	59,62	141,36	4,06	167,42	222,91
R	5,73	58,75	138,02	4,08	167,48	225,4
R	7,25	59,38	139,5	5,51	168,48	231,87
1	2,9	96,76	195,75	1,5	161,28	214,44
1	1,85	92,34	168	3,26	165,93	246,54
1	3,22	96,54	197,22	1,01	163,22	200,46
1	2,43	95,24	184,12	3,62	167,59	253,13
1	3,37	94,04	196,28	4,01	161,74	249,18
2	5,35	74,49	146,01	7,53	196,35	263,33
2	5,95	79,32	154,23	7,23	197,08	261,74
2	6,52	74,91	150,66	6,85	193,73	259,96
2	5,9	75,52	149,85	8,33	197,09	268,42
2	5,55	74,56	148,52	7,05	190,94	260,02
3	4,35	77,25	156,06	7,73	114,4	192,46
3	4,84	77,88	157,73	7,99	112,23	189,32
3	2,92	76,97	142,85	7,91	112,06	189,48
3	5,33	77,04	160,38	7,91	112,37	189,05
3	5,54	76,77	160,16	8,37	110,02	188,45
4	4,74	85,39	154,58	2,55	195,93	230
4	5,21	85,5	157,54	2,26	188,97	224,27
4	5,02	83,61	154,76	2,4	192,73	227,12
4	4,46	84,43	152,29	2,62	193,03	230,05
4	4,46	84,64	152,71	2,9	193,22	230,7
5	1,22	101	157,15	0,46	242,57	256,27
5	0,96	103,44	153,35	0,33	246,99	254,15
5	0,94	107,42	158,4	0,26	249,11	253,16
5	0,93	104,3	153,26	0,46	245,87	259,04
5	0,82	107,67	152,01	0,38	246,17	257,91
6E	2,06	71,7	108,31	0,88	148,97	167,85
6E	2,37	74,22	117,76	0,76	153,06	167,8
6E	2,65	72,01	122,34	0,68	147,55	161,78
6E	2,26	72,78	114,85	1,02	151,11	166,76
6E	2,45	73,46	121,14	1,65	149,97	180,48
6	0,3	85,73	90,46	-	-	-

**Çizelge A.18 (devam) : Metal Health çekme kalıbı detaylı çekme test sonuçları.**

DENEYLER	% UZAMA (Döküm Hali)	AKMA DAYANIMI (MPa) (Döküm Hali)	ÇEKME DAYANIMI (Mpa) (Döküm Hali)	% UZAMA (Isıl İşlem)	AKMA DAYANIMI (Mpa) (Isıl İşlem)	ÇEKME DAYANIMI (MPa) (Isıl İşlem)
6	0,41	94,11	107,21	-	-	-
6	0,85	96,34	131,83	-	-	-
6	0,9	95,86	129,37	-	-	-
6	0,22	81,62	82,09	-	-	-
7	2,28	82,68	144,9	0,14	-	163,9
7	2,4	83,87	149,01	0,07	-	146,5
7	2,71	83,36	151,95	0,08	-	146,36
7	2,34	84,36	147,6	0,05	-	142,09
7	1,85	84,66	143,04	0,5	184,16	199,09
8	1,09	95,97	138,25	0,27	226,79	230,48
8	1,13	99,41	141,86	0,33	235,27	242,04
8	1,23	90,53	135,5	0,25	235,89	238,64
8	1,1	100,63	140,74	0,14	-	219,57
8	1,23	97,02	140,31	0,07	-	216,69
9	1,61	91,06	167,22	0,66	223,88	252,06
9	1,43	81,4	150,46	1,53	227,36	277,11
9	1,63	94,49	170,12	0,79	223,28	256,94
9	1,86	91,92	172,23	0,62	217,6	241,9
9	1,62	92,62	169,52	0,81	224,19	257,56
10	1,42	111,04	178,04	0,08	-	192,54
10	1,51	100,93	173,16	0,52	220,62	241,41
10	1,56	102,97	171,9	0,1	-	204,04
10	1,43	95,74	159,33	0,08	-	196,11
10	2	88,5	166,5	0,1	-	190,73
11	2,34	99,61	178,29	2,11	226,2	279,05
11	2,34	107,77	182,48	0,77	209,51	233,77
11	2,42	102,52	180,76	2,05	212,3	263,76
11	2,78	97,89	184,58	0,65	217,52	240,31
11	-	-	-	-	-	-
12	4,28	79,34	155,66	6,57	163,85	238,7
12	4,32	77,74	154,05	5,53	159,84	231,2
12	4,77	76,94	155,37	6,14	156,12	229,14
12	9,38	78,14	178,83	4,27	167,64	234,09
12	3,68	77,59	150,23	3,83	148,56	208,21
13	2,66	100,14	184	0,89	246,19	281,35
13	0,84	98,83	143,47	0,67	245,83	274,27

**Çizelge A.18 (devam) : Metal Health çekme kalıbı detaylı çekme test sonuçları.**

DENEYLER	% UZAMA (Döküm Hali)	AKMA DAYANIMI (MPa) (Döküm Hali)	ÇEKME DAYANIMI (MPa) (Döküm Hali)	% UZAMA (Isıl İşlem)	AKMA DAYANIMI (MPa) (Isıl İşlem)	ÇEKME DAYANIMI (MPa) (Isıl İşlem)
13	2,09	92,6	170,51	1,38	254,31	291,77
13	1,53	92,76	159,69	1,1	252,77	287,26
13	1,35	104,48	165,92	0,82	247,95	276,65
14	2,37	78,98	145,09	1,69	192,83	232,58
14	3,99	78,31	163,9	1,59	191,52	230,15
14	1,84	77,16	130,21	1,77	191,26	231,06
14	2,44	79,47	145	2,52	188,4	236,94
14	2,14	79,19	140,91	1,73	187,17	226,41
15	3,87	93,56	191,67	3,71	191,66	269,19
15	4,07	93,4	193,44	4,33	197,87	282,18
15	4,45	92,81	194,91	5,32	188,72	276,44
15	3,06	89,75	177,8	2,46	192	256,22
15	4,17	94,6	195	4,97	187,02	272,31
16	0,64	120,97	154,19	0,42	232,74	249,11
16	0,88	124,06	170,89	0,33	230,36	241,02
16	0,72	120,2	156,98	0,29	236,61	242,4
16	0,57	125,18	153,23	0,34	232,79	244,22
16	-	-	-	0,33	229,59	240,02
17	1,92	100,26	152,56	5,12	173,27	259,02
17	4,75	97,19	186,38	3,64	165,37	239,86
17	4,65	95,54	184	4,48	171,48	254,47
17	2,26	99,13	162,2	6,13	168,25	261,22
17	4,24	98,45	185,25	5,46	169,23	257,29
18	0,77	123,66	157,99	1,27	246,74	275,88
18	1,1	118,64	161,82	1,08	251,14	278,82
18	1,82	122,93	176,47	1,17	250,99	278,15
18	1,26	124,2	170,45	1,25	246,26	274,55
18	0,9	125,49	162,07	1,64	246,76	280,06
19	3,06	94,04	165,12	2,89	171,06	227,52
19	3,41	95,22	170,42	3,1	167,78	229,88
19	3,17	96	171	2,27	167,68	219,37
19	3,38	97,76	173,93	3,47	165,32	230,31
19	2,72	95,21	161,97	3,18	164,95	226,09
20	3,64	100,33	170,55	2,26	234,24	273,61
20	1	96,06	131,43	2,4	239,41	278,72
20	2,39	83,69	146,07	2,09	247,05	286,95

**Çizelge A.18 (devam) : Metal Health çekme kalıbı detaylı çekme test sonuçları.**

DENEYLER	% UZAMA (Döküm Hali)	AKMA DAYANIMI (MPa) (Döküm Hali)	ÇEKME DAYANIMI (MPa) (Döküm Hali)	% UZAMA (Isıl İşlem)	AKMA DAYANIMI (MPa) (Isıl İşlem)	ÇEKME DAYANIMI (MPa) (Isıl İşlem)
20	3,73	96,16	172,13	2,03	238,91	277,47
20	1,45	92,38	139,46	2,1	248,03	286,86
21	1,04	128,54	191,5	0,4	233,25	250,61
21	0,8	130,24	179,62	0,58	246,13	275,53
21	0,49	124,85	153,36	0,31	246,17	257,16
21	0,69	129,93	173,14	0,41	246,78	266,13
21	-	-	-	0,46	243,47	265,78
22	2,11	106,05	173,99	0,44	260,22	277,68
22	0,8	104,95	139,57	0,4	268,36	281,53
22	1,15	105,44	151,43	0,38	250,52	263,64
22	1,77	104,58	166,2	0,35	234,1	244,88
22	-	-	-	0,24	243,13	245,79
23	2,89	87,98	162,24	0,65	169,59	193,92
23	2,86	89,79	162,23	1,83	164,94	211,77
23	2,75	86,12	156,57	0,59	153,5	174,35
23	3,1	88,98	166,48	1,65	167,03	210,77
23	-	-	-	2,16	169,25	218,7
24	1,98	145,7	203,42	3,9	237,08	304,89
24	1,77	141,85	194,97	3,3	242,7	302,78
24	1,77	147,16	201,26	4,15	235,95	301,35
24	1,73	138,29	193,06	3,94	237,93	303,75
24	2,09	138,5	196,77	3,75	240,01	303,58
25	4,38	87,58	176,66	5,72	178,04	260,83
25	4,15	87,17	172,77	6,5	176,49	263,85
25	4,8	87,29	178,87	4,7	176,35	249,35
25	3,99	86,77	172,26	4,05	173,33	238,57
25	-	-	-	2,89	172,89	231,41
26	1,15	142,35	205,54	0,65	246,61	278,96
26	0,37	141,42	159,2	1,74	253,25	309,27
26	0,23	145,25	148,35	0,93	248,03	286,85
26	0,37	140,63	158,09	1,08	234,45	279,73
26	0,17	-	133,12	-	-	-
27	3,94	86,02	163,45	2,31	181,74	228,74
27	5,37	87,35	173,67	3,37	175,21	233,95
27	4,22	87,79	167,79	3,47	184,34	243,34
27	4,48	85,96	169,44	3,83	182	242,52

**Çizelge A.18 (devam) : Metal Health çekme kalıbı detaylı çekme test sonuçları.**

DENEYLER	% UZAMA (Döküm Hali)	AKMA DAYANIMI (MPa) (Döküm Hali)	ÇEKME DAYANIMI (MPa) (Döküm Hali)	% UZAMA (Isıl İşlem)	AKMA DAYANIMI (MPa) (Isıl İşlem)	ÇEKME DAYANIMI (MPa) (Isıl İşlem)
27	4,53	89,39	172,21	3,76	184,1	241,14
28	5,94	79,31	162,87	3,72	96,37	170,06
28	4,7	78,18	151,45	5,72	98,37	188,64
28	5,25	80,47	155,45	2,23	92,35	137,25
28	5,44	78,19	155,72	2,98	88,9	148,53
28	5,34	77,68	153,79	2,14	92,85	137,63
29	1,9	102,61	170,73	2,42	220,42	284,92
29	1,11	102,12	150,47	1,85	226,42	281,3
29	1,51	103,85	164,76	0,61	217,85	245,1
29	1,33	99,62	154,29	1,91	224,73	280,26
29	1,44	106,45	165,31	2,73	219,21	285,25
30	1,39	115,62	169,67	0,98	260,76	295,62
30	0,86	114,35	152,91	1,13	266,88	302,93
30	2,05	112,76	184,18	1,77	264,79	306,99
30	0,82	112,82	149,78	1,08	253,19	289,84
30	1,43	117,27	173,75	0,89	248,11	278,92
31	3,36	86,39	177,04	2,25	151,13	216,98
31	2,5	86,33	169,37	2,46	146,7	212,35
31	3,53	88,77	184,37	2,49	152,54	218,07
31	3,27	85,24	177,72	2,38	146,67	211,01
31	2,8	89,05	177,59	2,9	149,5	220,22
32	1,3	113,4	164,14	0,89	233,07	260,27
32	0,95	118	158,06	0,85	235,24	260,66
32	1,26	116,68	162,35	0,98	229,92	259,66
32	1,08	116,62	160,26	0,95	234,29	260,38
32	1,46	114,93	168,33	1,18	221,35	256,2

-: Ölçüm sonucu yoktur, R: referans 7Si içeren alaşım, E: eksik değerli deney

**Çizelge A.19 : DAS kalıbı detaylı DAS çekme test sonuçları.**

DENEYLER	BÖLGE	% UZAMA (Döküm Hali)	AKMA DAYANIMI (MPa) (Döküm Hali)	ÇEKME DAYANIMI (MPa) (Döküm Hali)	% UZAMA (Isıl İşlem)	AKMA DAYANIMI (MPa) (Isıl İşlem)	ÇEKME DAYANIMI (MPa) (Isıl İşlem)
RA	A	-	-	-	2,38	161,48	229,72
RB	B	-	-	-	3,09	162,72	240,8
RC	C	-	-	-	4,19	162,08	250,61
RD	D	-	-	-	3,52	161,16	243,82
DAS 1A	A	2,13	105,67	182,74	1,83	166,49	226,57
DAS 1B	B	1,72	113,61	185,18	2,67	168,17	238,34
DAS 1C	C	2,28	108,62	189,96	4,76	165,67	259,27
DAS 1D	D	3,37	110,16	209,14	6,14	172,46	277,41
DAS 2A	A	5,46	87,88	153,38	5,83	190,46	251,91
DAS 2B	B	8,68	86,24	163,54	9,09	187,81	259,99
DAS 2C	C	10,25	82,63	162,23	7,16	194,55	262,3
DAS 2D	D	12,82	79	163,77	9,99	190,49	265,33
DAS 3A	A	3,6	70,96	120,64	2,81	131,94	180,54
DAS 3B	B	4,24	79,29	143,25	3,24	131,79	184,95
DAS 3C	C	4,96	76,51	147,82	4,97	123,34	187,12
DAS 3D	D	-	-	-	2,72	125,42	175,96
DAS 4A	A	3,34	88,94	144,19	4,05	198,28	246,71
DAS 4B	B	4,6	90,98	154,01	3,28	197,54	241,9
DAS 4C	C	6,18	85,35	156,66	4,63	197,39	250,08
DAS 4D	D	6,91	79,69	153,17	6,31	198,71	259,4
DAS 5A	A	1,22	87,98	139,78	0,31	244,22	250,78
DAS 5B	B	1,37	90,89	144,96	0,28	237,71	242,85
DAS 5C	C	1,65	92,49	156,93	0,51	241,76	256,99
DAS 5D	D	2,02	91,67	162,03	0,64	198,58	256,57
DAS 6E A	A	2,28	74,89	106,27	1,38	150,57	176,37
DAS 6E B	B	2,42	76,85	117,29	1,67	148,89	180,16
DAS 6E C	C	2,87	78,95	124,46	1,79	152,07	183,8
DAS 6E D	D	3,25	77,28	127,53	2,63	147,96	192,06
DAS 6A	A	2,06	63,81	115,51	0,04	-	191,89
DAS 6B	B	1,51	71,04	113,11	0,19	-	218,89
DAS 6C	C	2,09	71,08	120,78	0,06	-	206,25
DAS 6D	D	-	-	-	0,18	-	226,66
DAS 7A	A	1,72	87,08	131,98	0,5	169,6	182,7
DAS 7B	B	1,91	89,22	138,91	0,55	167,82	184,52
DAS 7C	C	2,23	89,82	146,06	0,73	166,96	188,2
DAS 7D	D	2,7	86,57	149,09	1,55	174,88	211,52
DAS 8A	A	1,23	94,46	131,36	0,16	-	229,09
DAS 8B	B	1,34	97,22	139,29	0,07	-	228,19

**Çizelge A.19 (devam) : DAS kalıbı detaylı DAS çekme test sonuçları.**

DENEYLER	BÖLGE	% UZAMA (Döküm Hali)	AKMA DAYANIMI (MPa) (Döküm Hali)	ÇEKME DAYANIMI (MPa) (Döküm Hali)	% UZAMA (Isıl İşlem)	AKMA DAYANIMI (MPa) (Isıl İşlem)	ÇEKME DAYANIMI (MPa) (Isıl İşlem)
DAS 8C	C	1,94	91,63	143,21	0,26	228,74	232,65
DAS 8D	D	1,74	93,57	143,12	0,38	231,31	239,69
DAS 9A	A	1,21	91,28	149,32	0,33	229,16	239,52
DAS 9B	B	1,33	90,6	151,59	0,42	231,51	246,42
DAS 9C	C	1,58	91,34	160,13	0,74	232,48	260,02
DAS 9D	D	1,6	95,2	164,2	0,81	227,93	255,75
DAS 10A	A	1,27	98,92	159,4	0,41	223,16	236,46
DAS 10B	B	1,45	96,68	160,72	0,63	217,89	240,49
DAS 10C	C	1,77	91,66	164,1	0,39	221,86	235,02
DAS 11A	A	2,02	112,53	178,29	1,66	204,22	247,13
DAS 11B	B	2,13	113,19	180,66	1,36	206,74	244,24
DAS 11C	C	1,56	116,49	172,81	2,35	205,15	260,9
DAS 11D	D	-	-	-	2,41	208,74	263,35
DAS 12A	A	2,5	79,83	125,64	1,98	135,25	170,78
DAS 12B	B	1,6	79,53	113,25	3,58	132,82	188,53
DAS 12C	C	4,46	83,48	143,63	3,54	134,53	190,72
DAS 12D	D	4,41	82,84	145,21	4,24	140,22	199,55
DAS 13A	A	2,49	78,54	146,96	0,63	247,28	270,58
DAS 13B	B	2,57	86,16	158,12	0,71	236,08	263,56
DAS 13C	C	3,14	91,23	173,93	0,74	239,21	265,47
DAS 13D	D	3,63	88,52	175,29	0,83	233,06	271,19
DAS 14A	A	1,9	88,54	142,45	1,06	189,86	215,44
DAS 14B	B	1,73	89,54	139,39	0,47	187,46	198,13
DAS 14C	C	2,3	90,24	150,88	1,14	191,83	220,53
DAS 14D	D	2,46	88,15	153,49	2,43	190,08	233,95
DAS 15A	A	2,03	111,45	174,12	2,62	186,15	235,75
DAS 15B	B	2,39	117,28	186,34	3,07	185,66	238,53
DAS 15C	C	3,19	114,81	190,67	2,82	188,75	252,61
DAS 15D	D	3,86	115,92	200,86	3,55	186,75	245,04
DAS 16A	A	0,88	110,57	153,6	0,08	-	202,67
DAS 16B	B	0,94	107,45	152,77	0,17	-	218,48
DAS 16C	C	1,32	108,16	167,7	0,28	230,11	235,15
DAS 17A	A	2,45	110,21	171,31	2,51	157,71	215,42
DAS 17B	B	2,52	112,69	176,77	3,09	168,6	230,82
DAS 17C	C	3,51	108,41	183,97	1,33	165,37	202,62
DAS 18A	A	1,24	106,82	147,64	0,09	-	224,52
DAS 18B	B	1,41	105,87	149,47	0,38	241,66	250,65
DAS 18C	C	1,52	105,41	152,91	0,96	243,46	265,97

**Çizelge A.19 (devam) : DAS kalıbı detaylı DAS çekme test sonuçları.**

DENEYLER	BÖLGE	% UZAMA (Döküm Hali)	AKMA DAYANIMI (MPa) (Döküm Hali)	ÇEKME DAYANIMI (MPa) (Döküm Hali)	% UZAMA (Isıl İşlem)	AKMA DAYANIMI (MPa) (Isıl İşlem)	ÇEKME DAYANIMI (MPa) (Isıl İşlem)
DAS 19A	A	1,49	104,99	151,42	1,7	167,56	203,9
DAS 19B	B	1,77	107,64	160,84	1,5	163,55	204,17
DAS 19C	C	2,5	109,95	176,93	2,09	165,36	213,72
DAS 19D	D	2,47	108,98	173,97	2,78	169,35	223,94
DAS 20A	A	2,92	100,85	164,42	1,07	237,58	266,6
DAS 20B	B	2,92	96	159,71	1,08	239,3	262,65
DAS 20C	C	3,04	104,38	166,76	1,86	246,22	277,91
DAS 21A	A	0,57	126,84	157,61	0,09	-	226,16
DAS 21B	B	0,53	128,55	159,04	0,18	-	237,86
DAS 21C	C	0,83	130,65	175,81	0,02	-	194
DAS 22A	A	1,01	81,11	114,65	0,39	247,25	257,67
DAS 22B	B	1,6	83,58	137,48	0,24	242,63	245,97
DAS 22C	C	2,42	92,78	160,89	0,64	240,87	263,91
DAS 22D	D	1,57	91,27	147,52	0,58	247,24	267,38
DAS 23A	A	2,67	85,69	146,36	1,57	166,61	207,05
DAS 23B	B	2,15	80,44	134,02	0,83	158,92	185,44
DAS 23C	C	3,32	82,2	155,64	1,14	157,19	191,06
DAS 23D	D	3,24	82,03	149,25	0,78	157,36	181,12
DAS 24A	A	1,02	99,71	134,9	0,25	215,31	216,17
DAS 24B	B	0,83	101,02	131,04	0,23	218,07	218,16
DAS 24C	C	1,27	103,99	148,99	0,52	225,01	238,68
DAS 25A	A	3,13	110,33	175,45	2,61	168,82	219,16
DAS 25B	B	2,53	104,92	164,96	3,76	175,29	241,04
DAS 25C	C	2,76	108,3	169,56	3,18	174,62	235,08
DAS 25D	D	-	-	-	2,86	171,35	228
DAS 26A	A	1,18	131,83	191,22	0,32	236,14	246,72
DAS 26B	B	1,13	133,77	192,74	0,24	238,69	241,03
DAS 26C	C	0,59	123,31	156,44	0,37	241,06	256,31
DAS 26D	D	0,85	128,25	175,37	0,69	237,79	270,73
DAS 27A	A	3,36	89,94	152,82	1,17	178,52	210,42
DAS 27B	B	3,42	89,22	152,67	1,92	181,07	218,85
DAS 27C	C	4,28	89,63	158,54	1,95	185,35	223,99
DAS 28A	A	3,61	80,8	141,62	4,33	93,8	166,86
DAS 28B	B	4,18	80,68	145,89	4,62	92,33	167,13
DAS 28C	C	4,15	78,14	146,65	6,13	92,45	178,65
DAS 29A	A	1,22	107,38	154,65	1,49	230,49	278,18
DAS 29B	B	1,26	106,7	156,92	1,1	234,13	269,81
DAS 29C	C	1,55	110,95	168,74	0,88	233,74	266,36

**Çizelge A.19 (devam) : DAS kalıbı detaylı DAS çekme test sonuçları.**

DENEYLER	BÖLGE	% UZAMA (Döküm Hali)	AKMA DAYANIMI (MPa) (Döküm Hali)	ÇEKME DAYANIMI (MPa) (Döküm Hali)	% UZAMA (Isıl İşlem)	AKMA DAYANIMI (MPa) (Isıl İşlem)	ÇEKME DAYANIMI (MPa) (Isıl İşlem)
DAS 29D	D	1,78	115,72	178,47	2,79	225,82	291,32
DAS 30A	A	1,34	98,76	144,83	0,37	243,54	253,58
DAS 30B	B	1,09	92,2	130,58	0,46	245,36	259,33
DAS 30C	C	1,65	102,42	155,2	0,73	240,79	264,93
DAS 30D	D	2,24	105,48	170,59	0,76	246,15	271,35
DAS 31A	A	1,77	88,99	147,64	1,04	144,24	178,49
DAS 31B	B	2,09	89,57	157,33	1,31	141,87	183,38
DAS 31C	C	2,06	88,7	154,49	1,47	143,05	188,28
DAS 31D	D	2,66	86,12	165,79	1,54	138,63	186,67
DAS 32A	A	0,59	108,64	133,28	0,09	-	198,03
DAS 32B	B	0,6	105,94	130,62	0,13	-	203,6
DAS 32C	C	0,49	104,09	124,16	0,13	-	207,83
DAS 32D	D	0,52	104,09	125,4	0,25	213,19	216,07

-: Ölçüm sonucu yoktur, R: referans 7Si içeren alaşım, E: eksik değerli deney, A-B-C-D: Das kesit bölgeleri

**Çizelge A.20 : Sertlik değerleri sonuçları (döküm hali-ısıtıl işlem).**

DENEYLER	Sertlik Döküm Hali (HB)	Sertlik Isıl İşlem (HB)
REF 7Si	51,6	67,2
DENEY 1	75,3	86,2
DENEY 2	53,2	82,6
DENEY 3	52,2	57,6
DENEY 4	54,0	86,1
DENEY 5	75,9	94,8
DENEY 6 EKSİK	55,9	70,0
DENEY 6	70,9	104,3
DENEY 7	63,7	75,8
DENEY 8	73,8	105,0
DENEY 9	89,2	100,7
DENEY 10	87,1	91,6
DENEY 11	71,0	90,9
DENEY 12	57,4	66,5
DENEY 13	81,6	98,7
DENEY 14	66,7	84,5
DENEY 15	75,7	94,9
DENEY 16	88,0	103,0
DENEY 17	66,5	80,6
DENEY 18	75,8	96,9
DENEY 19	63,5	78,2
DENEY 20	76,6	98,7
DENEY 21	94,1	106,3
DENEY 22	76,1	99,3
DENEY 23	67,5	79,7
DENEY 24	87,7	106,3
DENEY 25	61,5	86,2
DENEY 26	99,2	117,7
DENEY 27	63,0	81,2
DENEY 28	57,8	57,0
DENEY 29	79,4	92,5
DENEY 30	83,7	114,0
DENEY 31	61,7	67,7
DENEY 32	72,4	104,7

**Çizelge A.21 : DAS analizi sonuçları.**

DENEYLER	DAS (mm)	DENEYLER	DAS (mm)	DENEYLER	DAS (mm)
1A	33,9103	11A	36,3259	22A	31,6422
1B	33,6392	11B	32,0130	22B	36,6186
1C	33,6080	11C	38,3387	22C	35,6708
1D	36,8459	11D	33,2225	22D	28,2420
2A	31,1186	12A	39,2069	23A	35,4576
2B	40,4810	12B	34,8598	23B	33,3261
2C	31,3840	12C	35,4958	23C	33,9204
2D	30,5980	12D	36,0417	23D	33,2829
3A	35,1159	13A	34,8147	24A	32,7639
3B	32,8989	13B	36,6414	24B	33,4276
3C	29,9438	13C	33,4120	24C	26,9627
3D	28,6620	13D	33,1941	24D	35,1056
4A	34,9600	14A	40,5336	25A	27,4123
4B	32,0510	14B	38,5773	25B	23,8338
4C	29,6436	14C	39,2392	25C	32,3799
4D	35,9195	14D	41,1336	25D	30,5602
5A	39,4135	15A	37,5602	26A	32,2286
5B	33,3749	15B	35,7068	26B	36,9868
5C	33,3843	15C	32,5579	26C	35,3250
5D	31,1865	15D	34,1512	26D	35,9799
6EKSIK A	30,1871	16A	34,2530	27A	32,6086
6EKSIK B	35,3649	16B	32,5227	27B	38,4326
6EKSIK C	31,9391	16C	34,3563	27C	37,9148
6EKSIK D	35,5314	16D	29,7479	27D	34,7446
6A	36,9319	17A	34,7002	28A	27,9438
6B	37,0285	17B	31,5078	28B	36,6882
6C	35,8389	17C	29,7367	28C	28,0706
6D	32,7609	17D	30,0749	28D	39,0757
7A	33,7500	18A	31,5211	29A	29,7180
7B	31,7248	18B	29,7613	29B	33,0038
7C	31,7475	18C	29,5205	29C	35,3664
7D	38,8971	18D	29,3617	29D	32,2630
8A	29,4034	19A	30,8397	30A	32,1173
8B	35,2925	19B	30,6040	30B	38,3535
8C	31,4329	19C	25,5194	30C	36,6294
8D	35,0326	19D	32,4817	30D	32,6698
9A	38,9919	20A	34,9155	31A	34,6735
9B	37,4754	20B	40,2001	31B	39,0632
9C	40,1903	20C	41,7042	31C	37,5096
9D	36,7456	20D	38,9383	31D	35,5279
10A	33,7559	21A	30,0400	32A	36,3282
10B	31,6091	21B	33,6010	32B	29,5605
10C	34,0899	21C	34,7229	32C	34,4031
10D	44,8377	21D	31,2956	32D	34,8318

**Çizelge A.22 : % Porozite sonuçları.**

DENEY NO	% POROZİTE
Ref-7Si	---
1	3,59515
2	4,91437
3	4,00736
4	2,80806
5	3,21356
6 EKSİK	5,27474
6	3,5176
7	3,47212
8	4,63334
9	4,02613
10	3,25251
11	2,90018
12	5,73996
13	3,34259
14	3,3766
15	3,41941
16	2,57066
17	3,98049
18	2,73459
19	2,82258
20	4,73129
21	1,98107
22	1,98229
23	2,3072
24	1,07997
25	2,42788
26	1,39261
27	6,30506
28	1,38955
29	2,13067
30	2,5305
31	3,5138
32	3,82248
---:Ölçülmemiştir	

**Çizelge A.23** : En iyi mekanik özelliklerin elde edildiği deneylerin ticari referans ürünle karşılaştırılması.

<b>DENEY NO</b>	<b>% UZAMA (Döküm Hali)</b>	<b>AKMA DAYANIMI (MPa) (Döküm Hali)</b>	<b>ÇEKME DAYANIMI (MPa) (Döküm Hali)</b>	<b>% UZAMA (Isıl İşlem)</b>	<b>AKMA DAYANIMI (MPa) (Isıl İşlem)</b>	<b>ÇEKME DAYANIMI (MPa) (Isıl İşlem)</b>
<b>Referans Ticari Ürün</b>	<b>Min 3</b>	<b>Min 80</b>	<b>Min 150</b>	<b>Min 3</b>	<b>Min 150</b>	<b>Min 220</b>
<b>Ref-7Si</b>	7,094	59,846	140,54	4,216	167,402	223,938
<b>1 (7Si)</b>	2,754	94,984	188,274	2,68	163,952	232,75
<b>15 (7Si)</b>	3,924	94,6	190,564	4,158	191,454	271,268
<b>3 (7Si)</b>	4,596	77,182	155,436	7,982	112,216	189,752
<b>12 (7Si)</b>	5,286	77,95	158,828	5,268	159,202	228,268
<b>27 (7Si)</b>	4,508	87,302	169,312	3,348	181,478	241,14
<b>2 (4Si)</b>	5,854	75,76	149,854	7,398	195,038	262,694
<b>4 (4Si)</b>	4,778	84,714	154,376	2,546	192,776	228,428
<b>17 (4Si)</b>	3,564	98,114	174,078	4,966	169,52	254,372
<b>24 (4Si)</b>	1,868	142,3	197,896	3,808	238,734	303,27
<b>25 (4Si)</b>	4,33	87,2025	175,14	4,772	175,42	248,802

**Çizelge A.24** : En iyi mekanik özelliklerin elde edildiği DAS deneylerinin ticari referans ürünle karşılaştırılması.

DENEYLER	BÖLGE	% UZAMA (Döküm Hali)	AKMA DAYANIMI (MPa) (Döküm Hali)	ÇEKME DAYANIMI (MPa) (Döküm Hali)	% UZAMA (Isıl İşlem)	AKMA DAYANIMI (MPa) (Isıl İşlem)	ÇEKME DAYANIMI (MPa) (Isıl İşlem)
<b>Ref. Tic. Ü.</b>	YOK	Min 3	Min 80	Min 150	Min 3	Min 150	Min 220
RA (7Si)	A	-	-	-	2,38	161,48	229,72
RB (7Si)	B	-	-	-	3,09	162,72	240,8
RC (7Si)	C	-	-	-	4,19	162,08	250,61
RD (7Si)	D	-	-	-	3,52	161,16	243,82
DAS 1A (7Si)	A	2,13	105,67	182,74	1,83	166,49	226,57
DAS 1B (7Si)	B	1,72	113,61	185,18	2,67	168,17	238,34
DAS 1C (7Si)	C	2,28	108,62	189,96	4,76	165,67	259,27
DAS 1D (7Si)	D	3,37	110,16	209,14	6,14	172,46	277,41
DAS 15A (7Si)	A	2,03	111,45	174,12	2,62	186,15	235,75
DAS 15B (7Si)	B	2,39	117,28	186,34	3,07	185,66	238,53
DAS 15C (7Si)	C	3,19	114,81	190,67	2,82	188,75	252,61
DAS 15D (7Si)	D	3,86	115,92	200,86	3,55	186,75	245,04
DAS 3A (7Si)	A	3,6	70,96	120,64	2,81	131,94	180,54
DAS 3B (7Si)	B	4,24	79,29	143,25	3,24	131,79	184,95
DAS 3C (7Si)	C	4,96	76,51	147,82	4,97	123,34	187,12
DAS 3D (7Si)	D	-	-	-	2,72	125,42	175,96
DAS 12A (7Si)	A	2,5	79,83	125,64	1,98	135,25	170,78
DAS 12B (7Si)	B	1,6	79,53	113,25	3,58	132,82	188,53
DAS 12C (7Si)	C	4,46	83,48	143,63	3,54	134,53	190,72
DAS 12D (7Si)	D	4,41	82,84	145,21	4,24	140,22	199,55
DAS 27A (7Si)	A	3,36	89,94	152,82	1,17	178,52	210,42
DAS 27B (7Si)	B	3,42	89,22	152,67	1,92	181,07	218,85
DAS 27C (7Si)	C	4,28	89,63	158,54	1,95	185,35	223,99
DAS 2A (4Si)	A	5,46	87,88	153,38	5,83	190,46	251,91

**Çizelge A.24 (devam) : En iyi mekanik özelliklerin elde edildiği DAS deneylerinin ticari referans ürünle karşılaştırılması.**

DENEYLER	BÖLGE	% UZAMA (Döküm Hali)	AKMA DAYANIMI (MPa) (Döküm Hali)	ÇEKME DAYANIMI (MPa) (Döküm Hali)	% UZAMA (Isıl İşlem)	AKMA DAYANIMI (MPa) (Isıl İşlem)	ÇEKME DAYANIMI (MPa) (Isıl İşlem)
DAS 2B (4Si)	B	8,68	86,24	163,54	9,09	187,81	259,99
DAS 2C (4Si)	C	10,25	82,63	162,23	7,16	194,55	262,3
DAS 2D (4Si)	D	12,82	79	163,77	9,99	190,49	265,33
DAS 4A (4Si)	A	3,34	88,94	144,19	4,05	198,28	246,71
DAS 4B (4Si)	B	4,6	90,98	154,01	3,28	197,54	241,9
DAS 4C (4Si)	C	6,18	85,35	156,66	4,63	197,39	250,08
DAS 4D (4Si)	D	6,91	79,69	153,17	6,31	198,71	259,4
DAS 17A (4Si)	A	2,45	110,21	171,31	2,51	157,71	215,42
DAS 17B (4Si)	B	2,52	112,69	176,77	3,09	168,6	230,82
DAS 17C (4Si)	C	3,51	108,41	183,97	1,33	165,37	202,62
DAS 24A (4Si)	A	1,02	99,71	134,9	0,25	215,31	216,17
DAS 24B (4Si)	B	0,83	101,02	131,04	0,23	218,07	218,16
DAS 24C (4Si)	C	1,27	103,99	148,99	0,52	225,01	238,68
DAS 25A (4Si)	A	3,13	110,33	175,45	2,61	168,82	219,16
DAS 25B (4Si)	B	2,53	104,92	164,96	3,76	175,29	241,04
DAS 25C (4Si)	C	2,76	108,3	169,56	3,18	174,62	235,08
DAS 25D (4Si)	D	-	-	-	2,86	171,35	228

-. Ölçülmemiştir, Ref. Tic. Ü.: Referans Ticari Ürün

**Çizelge A.25 :** En iyi mekanik özelliklerin elde edildiği deneylerde SEM analizi sonucu tespit edilen elementlerin % ağırlıkça miktarları.

	D deney No	% Al	% Si	% Cu	% Zn	% Mg	% Mn	% Co	% Ti	% Fe	% Na	% Ca	% O	% F	% C	
% 7 Si İçeren Deneyler	1	G.A	87,29	10,12	0,92	0,71	0,19	-	0,17	0,29	0,21	0,1	-	-	-	-
		M	97,38	1,51	0,63	0,12	-	-	-	0,27	0,09	-	-	-	-	-
		T.S	43,42	56,58	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	15	G.A	87,16	7,57	3,11	-	0,17	0,76	0,13	-	0,76	0,25	0,09	-	-	-
		M	98,14	0,91	-	-	-	0,45	-	-	0,49	-	-	-	-	-
		T.S	57,27	42,22	-	-	0,15	0,23	-	-	-	-	0,12	-	-	-
	3	G.A	90,77	8,73	-	-	0,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		M	98,44	1,48	-	-	0,08	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		T.S	29,25	70,63	-	-	0,06	-	-	0,06	-	-	-	-	-	-
	12	G.A	91,68	7,89	0,07	-	-	-	-	0,23	0,13	-	-	-	-	-
		M	98,51	1,4	-	-	0,08	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		T.S	68,83	30,8	0,12	-	0,25	-	-	-	-	-	-	-	-	-
27	G.A	89,87	8,05	0,22	0,67	0,54	0,46	0,06	-	-	0,13	-	-	-	-	
	M	96,72	1,57	-	0,74	0,24	0,24	0,07	0,32	0,11	-	-	-	-	-	
	T.S	72,15	26,63	-	0,63	0,38	0,12	0,07	-	0,01	-	-	-	-	-	
% 4 Si İçeren Deneyler	2	G.A	94,19	4,22	0,72	-	0,34	-	-	0,49	0,02	-	-	-	-	-
		M	99,27	0,53	0,01	-	0,19	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		T.S	72,94	26,51	0,13	-	0,37	-	-	-	0,04	-	-	-	-	-
	4	G.A	94,91	4,86	-	0,06	0,17	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		M	97,76	1,47	-	-	0,12	0,09	-	-	0,39	0,17	-	-	-	-
		T.S	49,12	25,82	2,67	0,01	12,62	0,06	0,11	-	9,58	-	-	-	-	-
	17	G.A	93,08	4,66	1,11	-	0,22	0,7	-	0,22	-	-	-	-	-	-
		M	96,07	0,84	-	0,73	0,03	0,52	-	0,47	-	-	-	0,85	0,49	-
		T.S	29,17	70,09	0,62	-	0,06	-	-	0,06	-	-	-	-	-	-
	24	G.A	87,06	3,39	-	-	0,69	-	-	-	-	-	-	1,76	-	7,1
		M	90,33	1,17	7,78	-	0,51	-	0,12	-	0,1	-	-	-	-	-
		T.S	51,19	24,46	2,55	-	14,12	-	0,52	-	7,1	0,06	-	-	-	-
25	G.A	92,82	5,64	-	-	0,08	-	0,93	-	0,51	-	0,02	-	-	-	
	M	98,51	1,49	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	T.S	42,51	54,32	2,72	-	0,02	-	0,03	0,11	0,18	0,11	-	-	-	-	

-.: Analizde görülmemiştir, G.A.: Genel Analiz, M: Matris, T.S: Tane Sınırı



## **ÖZGEÇMİŞ**

**Ad Soyad:** Murat Güçlü BÜYÜKUNCU

**Doğum Yeri ve Tarihi:** LONDRA, 16.07.1975

**İş Adresi:** CMS JANT ve MAK. SAN. A.Ş., Kemalpaşa Cad.No:40 / A, 35060  
Pınarbaşı / İzmir

### **Eğitim:**

**1998-2000:** Yüksek Lisans, İ.T.Ü., Kimya ve Metalurji Fakültesi, Metalurji Müh.

**Tez Konusu:** Bor Karbür Silisyum Karbür Kompozitlerin Üretimi

**1993-1998:** Lisans, Y.T.Ü, Kimya ve Metalurji Fakültesi Metalurji Müh.

