

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

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
KONSTRÜKSİYON VE İMALAT BİLİM DALI**

**AlSi5Cu3Mg ALAŞIMININ KOKİL DÖKÜM YÖNTEMİ İLE  
ÜRETİMİ, ISIL İŞLEM SONRASI METALURJİK VE MEKANİK  
KARAKTERİZASYONU**

**İpek ERTEM DİVRİK**

**Danışman  
Dr.Öğr.Üyesi Simge İRİZALP**



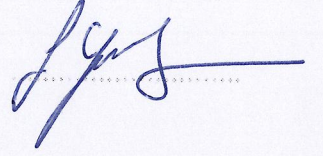
**MANİSA-2019**

## TEZ ONAYI

**İpek ERTEM DİVRİK** tarafından hazırlanan "**AlSi5Cu3Mg alaşımının kokil döküm yöntemi ile üretimi, ısıtıl işlem sonrası metalurjik ve mekanik karakterizasyonu**" adlı tez çalışması 20/08/2019 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri önünde Manisa Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak başarı ile savunulmuştur.

**Danışman**

**Dr.Öğr.Üyesi Simge İRİZALP**  
Manisa Celal Bayar Üniversitesi



**Jüri Üyesi**

**Dr.Öğr.Üyesi Can ÇİVİ**  
Manisa Celal Bayar Üniversitesi



**Jüri Üyesi**

**Dr. Öğretim Üyesi Metin YURDDAŞKAL**  
Dokuz Eylül Üniversitesi



**İpek ERTEM      AISi5Cu3Mg ALAŞIMININ KOKİL DÖKÜM YÖNTEMİ İLE ÜRETİMİ, ISIL İŞLEM  
DİVRİK      SONRASI METALURJİK VE MEKANİK KARAKTERİZASYONU**

**2019**

## TEZ ONAYI

**İpek ERTEM DİVRİK** tarafından hazırlanan " **AlSi5Cu3Mg alaşımının kokil döküm yöntemi ile üretimi, ısıtım sonrası metalurjik ve mekanik karakterizasyonu** "adlı tez çalışması 20/08/2019 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri önünde Manisa Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak başarı ile savunulmuştur.

**Danışman**

**Dr.Öğr.Üyesi Simge İRİZALP**  
Manisa Celal Bayar Üniversitesi

**Jüri Üyesi**

**Dr.Öğr.Üyesi Can ÇİVİ**  
Manisa Celal Bayar Üniversitesi

**Jüri Üyesi**

**Dr. Öğretim Üyesi Metin YURDDAŞKAL**  
Dokuz Eylül Üniversitesi

## **TAAHHÜTNAME**

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

**İpek ERTEM DİVRİK**



# İÇİNDEKİLER

	Sayfa
İÇİNDEKİLER .....	I
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	III
TABLO DİZİNİ .....	VI
TEŞEKKÜR.....	VII
ÖZET.....	VIII
ABSTRACT.....	X
1 GİRİŞ.....	1
2 GENEL BİLGİLER.....	2
2.1 Alüminyum .....	2
2.1.1 Alüminyum.....	2
2.1.2 Alüminyum Alaşımlarının Sınıflandırılması.....	6
2.1.2.1 Alüminyum Döküm Alaşımları .....	7
2.1.3 Alüminyum ve Alüminyum Alaşımları İçin Temper Gösteriliş Sistemleri.....	7
2.1.4 Alüminyum Döküm Malzemelerin Özellikleri .....	9
2.1.5 Alaşım Elemanları.....	11
2.1.6 Yapı İncelemesi.....	12
2.1.6.1 Alüminyum Alaşımlarına Uygulanan Mukavemet Artırma İşlemleri ..	14
2.1.6.1.1 Tane inceltme.....	14
2.1.6.1.2 Alaşım Sertleşmesi .....	15
2.1.6.1.3 Yaşlandırma .....	16
2.1.6.2 İntermetalikler.....	23
2.2 Döküm Yöntemleri .....	24
2.2.2 Kokil Döküm.....	28
2.2.3 Döküm Hataları .....	29
2.3 Isıl İşlem.....	33
2.3.2 Alüminyum Alaşımlarının Isıl İşlemi .....	33
2.3.2.1 Solüsyona Alma.....	33
2.3.2.2 Su Verme .....	34
2.3.2.2.1 Su Verme Hızının Özelliklere Etkisi .....	34
2.3.2.2.3 Yaşlandırma .....	34
3 MATERYAL VE YÖNTEMLER.....	35
3.1 Materyal .....	35
3.2 Yöntem.....	35
3.2.1 Kimyasal Analiz.....	39
3.2.2 X-Ray Analizi .....	39
3.2.3 Çekme Testi.....	39
3.2.4 Sertlik Testi .....	40
3.2.5 AlSi5Cu3Mg Alaşımının JmatPro Yazılımı İle Döküm ve Isıl İşlem Sonrası Simülasyon .....	40
3.2.6 Mikroyapı Analizi .....	40
4 ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA.....	42
4.1 Kimyasal Analiz Sonuçları .....	42
4.2 X-Ray Analiz Sonuçları.....	42
4.3 Çekme Testi Sonuçları.....	44
4.4 Sertlik Testi Sonuçları.....	49
4.4.2 Brinell Sertlik Testi Sonuçları.....	49

4.4.3 Vickers Mikrosertlik Testi Sonuçları .....	54
4.5 AlSi5Cu3Mg Alaşımının Döküm Ve Isıl İşlem Sonrası Simülasyonu.....	59
4.5.2 Döküm Sonrası Simülasyon İnceleme Sonuçları .....	59
4.5.3 Isıl İşlem Sonrası Simülasyon İnceleme Sonuçları .....	61
4.6 Mikroyapı Analiz Sonuçları.....	63
5 SONUÇ VE ÖNERİLER .....	94
KAYNAKLAR .....	97
ÖZGEÇMİŞ .....	99



## ŞEKİLLER DİZİNİ

	<b>Sayfa</b>
Şekil 2.1. 2018 yılında dünya birincil alüminyum üretiminin yüzde dağılımı .....	3
Şekil 2.2. 2016 yılı araç başına ortalama bileşen içeriği.....	3
Şekil 2.3. Alüminyumun ağırlık tasarrufu ve pazar penetrasyonu.....	4
Şekil 2.4. Avrupa'da üretilen otomobil başına ortalama alüminyum içeriğinin gelişimi .....	5
Şekil 2.5. Avrupa otomobillerinde alüminyum dağılımı .....	5
Şekil 2.6. Al-Si faz diyagramı.....	10
Şekil 2.7. A356-T62 alüminyum alaşımının alçı döküm plakalar için dentrit hücre boyutu ve dayanım ilişkisi .....	13
Şekil 2.8. AlSi7Mg alaşımı tane boyutları karşılaştırması.....	14
Şekil 2.9. Farklı tane incelticiler arasında karşılaştırma .....	15
Şekil 2.10. Dislokasyonların partikülleri kesememe durumu .....	19
Şekil 2.11. Dislokasyonların çökeltiyi kesme durumu.....	19
Şekil 2.12. Matris ve ikinci faz arasındaki farklı kristalografik ilişkiler .....	21
Şekil 2.13. 130 °C' de çeşitli Al-Cu alaşımlarının zamanla sertlik değişimi .....	22
Şekil 2.14. ASTM E 155 standardında belirtilen hata görselleri .....	32
Şekil 3.1. Çekme çubuğu kalıbı görseli .....	37
Şekil 3.2. Kokil Döküm Prosesi.....	37
Şekil 3.3. A tipi test parçası, dairesel kesitli, pürüzsüz, silindirik uçlu kama saplarında sıkma için .....	38
Şekil 4.1. ASTM E 155 standardında belirtilen seviye-1 hata boyutları .....	43
Şekil 4.2. Çekme çubuklarına ait örnek radyaskopi görüntüsü.....	44
Şekil 4.3. T4 uygulanan numunelere ait çekme mukavemeti değerleri grafiği .....	45
Şekil 4.4. T4 uygulanan numunelere ait %uzama değerleri grafiği.....	45
Şekil 4.5. 1 Numaralı numune grubuna ait çekme mukavemeti değerleri grafiği .....	46
Şekil 4.6. 1 Numaralı numune grubuna ait uzama değerleri grafiği .....	46
Şekil 4.7. 2 Numaralı numune grubuna ait çekme mukavemeti değerleri grafiği .....	47
Şekil 4.8. 2 numaralı Numune grubuna ait uzama değerleri grafiği .....	47
Şekil 4.9. 3 Numaralı numune grubuna ait çekme mukavemeti değerleri grafiği .....	48
Şekil 4.10. 3 Numaralı numune grubuna ait uzama değerleri grafiği .....	48
Şekil 4.11. T4 uygulanan numunelere ait Brinell sertlik değerleri grafiği.....	50
Şekil 4.12. 1 Numaralı numune grubuna ait Brinell sertlik değerleri grafiği .....	51
Şekil 4.13. 2 Numaralı numune grubuna ait Brinell sertlik değerleri grafiği .....	52
Şekil 4.14. 3 Numaralı numune grubuna ait Brinell sertlik değerleri grafiği .....	53
Şekil 4.15. T4 uygulanan numunelere ait Vickers mikrosertlik değerleri grafiği.....	54
Şekil 4.16. 1 Numaralı numune grubuna ait Vickers mikrosertlik değerleri grafiği..	55
Şekil 4.17. 2 Numaralı numune grubuna ait Vickers mikrosertlik değerleri grafiği..	56
Şekil 4.18. 3 Numaralı numune grubuna ait Vickers mikrosertlik değerleri grafiği..	57
Şekil 4.19. 3-3 numaralı numuneye ait mikroyapı görüntüleri .....	58
Şekil 4.20. 2-10 numaralı numuneye ait mikroyapı görüntüleri .....	59
Şekil 4.21. Jmat Pro analiz parametreleri.....	59
Şekil 4.22. 710 °C döküm sıcaklığı için analiz edilen soğuma eğrisi .....	60
Şekil 4.23. 715 °C döküm sıcaklığı için analiz edilen soğuma eğrisi.....	60
Şekil 4.24. 720 °C döküm sıcaklığı için analiz edilen soğuma eğrisi .....	60
Şekil 4.25. Soğuma oranına bağlı döküm sonrası mekanik özellikler grafiği .....	61
Şekil 4.26. 170 °C' de % faz dağılımı.....	61
Şekil 4.27. 170 °C' de bulunan fazların kimyasal içerikleri.....	62



Şekil 4.28. Fazların sıcaklığa bağlı katı fraksiyonları.....	62
Şekil 4.29. Sıcaklığa bağlı % faz dağılım grafiği.....	63
Şekil 4.30. 1-1 Numaralı numune grubuna ait mikroyapı görüntüleri.....	63
Şekil 4.31. 2-1 Numaralı numune grubuna ait mikroyapı görüntüleri.....	64
Şekil 4.32. 3-1 Numaralı numune grubuna ait mikroyapı görüntüleri.....	64
Şekil 4.33. 1-2 Numaralı numune grubuna ait mikroyapı görüntüleri.....	64
Şekil 4.34. 2-2 Numaralı numune grubuna ait mikroyapı görüntüleri.....	64
Şekil 4.35. 3-2 Numaralı numune grubuna ait mikroyapı görüntüleri.....	64
Şekil 4.36. 1-3 Numaralı numune grubuna ait mikroyapı görüntüleri.....	65
Şekil 4.37. 2-3 Numaralı numune grubuna ait mikroyapı görüntüleri.....	65
Şekil 4.38. 3-3 Numaralı numune grubuna ait mikroyapı görüntüleri.....	65
Şekil 4.39. 1-4 Numaralı numune grubuna ait mikroyapı görüntüleri.....	65
Şekil 4.40. 2-4 Numaralı numune grubuna ait mikroyapı görüntüleri.....	65
Şekil 4.41. 3-4 Numaralı numune grubuna ait mikroyapı görüntüleri.....	66
Şekil 4.42. 1-5 Numaralı numune grubuna ait mikroyapı görüntüleri.....	66
Şekil 4.43. 2-5 Numaralı numune grubuna ait mikroyapı görüntüleri.....	66
Şekil 4.44. 3-5 Numaralı numune grubuna ait mikroyapı görüntüleri.....	66
Şekil 4.45. 1-6 Numaralı numune grubuna ait mikroyapı görüntüleri.....	66
Şekil 4.46. 2-6 Numaralı numune grubuna ait mikroyapı görüntüleri.....	67
Şekil 4.47. 3-6 Numaralı numune grubuna ait mikroyapı görüntüleri.....	67
Şekil 4.48. 1-7 Numaralı numune grubuna ait mikroyapı görüntüleri.....	67
Şekil 4.49. 2-7 Numaralı numune grubuna ait mikroyapı görüntüleri.....	67
Şekil 4.50. 3-7 Numaralı numune grubuna ait mikroyapı görüntüleri.....	67
Şekil 4.51. 1-8 Numaralı numune grubuna ait mikroyapı görüntüleri.....	68
Şekil 4.52. 2-8 Numaralı numune grubuna ait mikroyapı görüntüleri.....	68
Şekil 4.53. 3-8 Numaralı numune grubuna ait mikroyapı görüntüleri.....	68
Şekil 4.54. 1-9 Numaralı numune grubuna ait mikroyapı görüntüleri.....	68
Şekil 4.55. 2-9 Numaralı numune grubuna ait mikroyapı görüntüleri.....	68
Şekil 4.56. 3-9 Numaralı numune grubuna ait mikroyapı görüntüleri.....	69
Şekil 4.57. 1-10 Numaralı numune grubuna ait mikroyapı görüntüleri.....	69
Şekil 4.58. 2-10 Numaralı numune grubuna ait mikroyapı görüntüleri.....	69
Şekil 4.59. 3-10 Numaralı numune grubuna ait mikroyapı görüntüleri.....	69
Şekil 4.60. 1-11 Numaralı numune grubuna ait mikroyapı görüntüleri.....	69
Şekil 4.61. 2-11 Numaralı numune grubuna ait mikroyapı görüntüleri.....	70
Şekil 4.62. 3-11 Numaralı numune grubuna ait mikroyapı görüntüleri.....	70
Şekil 4.63. 1-12 Numaralı numune grubuna ait mikroyapı görüntüleri.....	70
Şekil 4.64. 2-12 Numaralı numune grubuna ait mikroyapı görüntüleri.....	70
Şekil 4.65. 3-12 Numaralı numune grubuna ait mikroyapı görüntüleri.....	70
Şekil 4.66. Yapı içerisinde $\alpha$ -Al, Si, Al <sub>2</sub> Cu, AlFeSi fazlarının gösterimi.....	71
Şekil 4.67. 3-2 nolu numunenin 100X büyütme ile çekilmiş mikroyapı görüntüsü ..	72
Şekil 4.68. 3-5 nolu numunenin 100X büyütme ile çekilmiş mikroyapı görüntüsü ..	72
Şekil 4.69. 2-6 nolu numunenin 100X büyütme ile çekilmiş mikroyapı görüntüsü ..	73
Şekil 4.70. 2-12 nolu numunenin 100X büyütme ile çekilmiş mikroyapı görüntüsü	74
Şekil 4.71. 2-6 ve 2-12 nolu numunelerin mikroyapı faz analiz görüntüleri (200X)	74
Şekil 4.72. 1-10 nolu numunenin 100X büyütme ile çekilmiş mikroyapı görüntüsü	75
Şekil 4.73. 1-12 nolu numunenin 100X büyütme ile çekilmiş mikroyapı görüntüsü	75
Şekil 4.74. 2-10 nolu numunenin 200X büyütme ile çekilmiş mikroyapı görüntüsü	76
Şekil 4.75. 2-12 nolu numunenin 200X büyütme ile çekilmiş mikroyapı görüntüsü	76
Şekil 4.76. 3-10 nolu numunenin 200X büyütme ile çekilmiş mikroyapı görüntüsü	77
Şekil 4.77. 3-12 nolu numunenin 200X büyütme ile çekilmiş mikroyapı görüntüsü	77

Şekil 4.78. 1-5 nolu numunenin 200X büyütme ile çekilmiş mikroyapı görüntüsü ..	78
Şekil 4.79. 1-6 nolu numunenin 200X büyütme ile çekilmiş mikroyapı görüntüsü ..	78
Şekil 4.80. 2-5 nolu numunenin 200X büyütme ile çekilmiş mikroyapı görüntüsü ..	79
Şekil 4.81. 2-6 nolu numunenin 200X büyütme ile çekilmiş mikroyapı görüntüsü ..	79
Şekil 4.82. JmatPro T6 ısıtma işlem grafiği ..	80
Şekil 4.83. 710°C’ de dökülüp, 4 saat solüsyona alma işlemi uygulanan numuneler için yaşlandırma işleminin çekme mukavemetine etkisi ..	81
Şekil 4.84. 715°C’ de dökülüp, 4 saat solüsyona alma işlemi uygulanan numuneler için yaşlandırma işleminin çekme mukavemetine etkisi ..	81
Şekil 4.85. 720°C’ de dökülüp, 4 saat solüsyona alma işlemi uygulanan numuneler için yaşlandırma işleminin çekme mukavemetine etkisi ..	81
Şekil 4.86. 710°C’ de dökülüp, 8 saat solüsyona alma işlemi uygulanan numuneler için yaşlandırma işleminin çekme mukavemetine etkisi ..	82
Şekil 4.87. 715°C’ de dökülüp, 8 saat solüsyona alma işlemi uygulanan numuneler için yaşlandırma işleminin çekme mukavemetine etkisi ..	82
Şekil 4.88. 720°C’ de dökülüp, 8 saat solüsyona alma işlemi uygulanan numuneler için yaşlandırma işleminin çekme mukavemetine etkisi ..	82
Şekil 4.89. 3 numaralı numune grubunda yaşlanma süresine bağlı AlFeSi fazının değişimi ..	86
Şekil 4.90. 2 numaralı numune grubunda yaşlanma süresine bağlı AlFeSi fazının değişimi ..	89
Şekil 4.91. 2 numaralı numune grubunda yaşlanma süresine bağlı AlFeSi ve Al <sub>2</sub> Cu fazının değişimi ..	92

## TABLO DİZİNİ

	<b>Sayfa</b>
<b>Tablo 2.1.</b> Bazı çökelme sertleştirme sistemleri.....	17
<b>Tablo 2.2.</b> 3xx.x alüminyum alaşımlarında görülen çeşitli fazların biçimsel özellikleri.....	24
<b>Tablo 2.3.</b> Alüminyum alaşımları için döküm işlemi seçimini etkileyen faktörler...	25
<b>Tablo 2.4.</b> Döküm proseslerine göre soğuma oranı ve dentrit kol mesafeleri.....	27
<b>Tablo 3.1.</b> AlSi5Cu3 kimyasal analiz limitleri.....	35
<b>Tablo 3.2.</b> Sınırlandırılmış AlSi5Cu3Mg kimyasal analiz limitleri .....	35
<b>Tablo 3.3.</b> A tipi test parçası için ölçüler.....	38
<b>Tablo 3.4.</b> 710 °C' de dökülen çekme çubukları için uygulanan ısıl işlem süreleri..	38
<b>Tablo 3.5.</b> 715 °C' de dökülen çekme çubukları için uygulanan ısıl işlem süreleri..	38
<b>Tablo 3.6.</b> 720 °C' de dökülen çekme çubukları için uygulanan ısıl işlem süreleri..	39
<b>Tablo 4.1.</b> Farklı döküm sıcaklıklarında alınan numunelerin kimyasal analizleri ....	42
<b>Tablo 4.2.</b> T4 ısıl işlemi uygulanan numunelere ait çekme test sonuçları .....	45
<b>Tablo 4.3.</b> 1 Numaralı numune grubuna ait çekme test sonuçları .....	46
<b>Tablo 4.4.</b> 2 Numaralı numune grubuna ait çekme test sonuçları .....	47
<b>Tablo 4.5.</b> 3 Numaralı numune grubuna ait çekme test sonuçları .....	48
<b>Tablo 4.6.</b> T4 ısıl işlemi uygulanan numunelere ait Brinell Sertlik test sonuçları ....	50
<b>Tablo 4.7.</b> 1 Nolu numune grubuna ait Brinell Sertlik test sonuçları.....	51
<b>Tablo 4.8.</b> 2 Nolu numune grubuna ait Brinell Sertlik test sonuçları.....	52
<b>Tablo 4.9.</b> 3 Nolu numune grubuna ait Brinell Sertlik test sonuçları.....	53
<b>Tablo 4.10.</b> T4 ısıl işlemi uygulanan numunelere ait Vickers mikrosertlik test sonuçları.....	54
<b>Tablo 4.11.</b> 1 Nolu numune grubuna ait Vickers mikrosertlik test sonuçları .....	55
<b>Tablo 4.12.</b> 2 Nolu numune grubuna ait Vickers mikrosertlik test sonuçları .....	56
<b>Tablo 4.13.</b> 3 Nolu numune grubuna ait Vickers mikrosertlik test sonuçları .....	57

## TEŞEKKÜR

Bu tez çalışması boyunca bana destek olan, bilgi ve tecrübelerinden faydalandığım değerli danıŐmanım Sayın Dr. Öğretim Üyesi Simge İRİZALP' e, tez materyelleri, numune üretimi ve Őirket içerisinde yaptığım analizler konusunda imkan ve olanak sağlayan aynı zamanda mesleki gelişimime katkısı bulunan Özay Döküm İmalat Sanayi ve Tic A.Ő Genel Müdür' ü Serkan ÖZKAYALAR' a, çalışma kapsamında numune üretim ve test süreçlerinde yardımlarını sunan çalışma arkadaşlarıma, yüksek lisans öğrenimim boyunca bana destek olan annem Nuray ERTEM' e, babam Mustafa ERTEM' e ve eŐim Mehmet DİVRİK' e teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak varlığı ile hayatıma anlam katan oğlum Giray Divrik' e teşekkür ederim.

İpek ERTEM DİVRİK  
Manisa, 2019

## ÖZET

### Yüksek Lisans Tezi

#### AlSi5Cu3Mg Alaşımının Kokil Döküm Yöntemi ile Üretimi, Isıl İşlem Sonrası Metalurjik ve Mekanik Karakterizasyonu

İpek ERTEM DİVRİK

Manisa Celal Bayar Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr.Öğr. Üyesi Simge İRİZALP

Alüminyum, endüstride en yaygın kullanılan demir dışı metallerin başında gelmektedir. Diğer metallere göre sahip olduğu hafiflik, görünüm, üretilebilirlik, fiziksel ve mekanik özellikler ve korozyon direnci gibi avantajlar alüminyum ve alaşımlarını endüstride ön plana çıkarmaktadır. Avrupa Alüminyum Birliği verilerine göre ulaşım sektörü, Avrupa'daki alüminyum ürünleri için en büyük sektördür ve sektörün neredeyse % 40'ını temsil etmektedir. Alüminyumun hafiflik özelliği, yolcu uçaklarından arabalara kadar birçok aracın ağırlığını azaltır, yakıt verimliliğini artırır ve CO<sub>2</sub> emisyonlarını azaltır. Alüminyum güç aktarma sistemi bileşenlerinin çoğu (%80-85) farklı döküm teknolojileri ile üretilen döküm parçalardır. Döküm alaşımları, genellikle %20' ye kadar, çoğunlukla silisyum olmak üzere magnezyum ve bakır alaşımlı konsantrasyonlara sahiptir. Alüminyum alaşımlarına uygulanan ısıl işlemler ile mekanik özelliklerinin artırılması söz konusudur.

Bu çalışmada otomotiv endüstrisinde kullanım yeri olan AlSi5Cu3Mg alaşımı kullanılacaktır. Bu alaşım genel olarak mekanik bileşenler, silindir başlıkları, motor endüstrisi ve hidrolik bileşenlerin üretiminde kullanılmaktadır. AlSi5Cu3Mg alüminyum alaşımı ile kokil döküm yöntemiyle üretilen parçalar üzerinde döküm sıcaklığı, solüsyona alma ve suni yaşlandırma sürelerinin malzemenin mekanik dayanımına ve mikroyapısına etkisi incelenerek, ürün kalitesini en yüksek seviyede tutmak için gerekli proses şartlarının belirlenmesi hedeflenmektedir.

Bu çalışma için kullanılan AlSi5Cu3Mg alaşımında Si miktarı %4,5-7 aralığında tutulmuştur. AlSi5Cu3Mg alaşımı üç farklı döküm sıcaklığında dökülerek üretilen numunelere, kimyasal analiz ve tahribatsız muayene kapsamında X-Ray analizi yapılmıştır. X-Ray analizi uygun sonuçlanan numuneler, sabit solüsyona alma sıcaklığında (495 °C) 4 ve 8 saat olmak üzere iki farklı saatte bekletilerek, su verme işlemine tabi tutulup sonrasında sabit suni yaşlandırma sıcaklığında (170 °C) 6, 7, 8, 9 ve 10 saat bekletilmiştir. Suni yaşlandırma ile elde edilen numunelere ek olarak solüsyona alma işleminden sonra bir grup numune de 6 gün doğal yaşlanmaya bırakılarak gerekli testler gerçekleştirilmiştir.

Yukarıda belirtilen koşullarda oluşturulan 36 parametre doğrultusunda elde edilen 36 grup numunenin analizi için çekme testi, sertlik testi ve mikroyapı analizi yapılmıştır. Ayrıca AlSi5Cu3Mg alaşımının ısıl işlem koşullarına bağlı olarak

fazların oluşum ve dönüşümlerinin hangi oranda hangi sıcaklıkta gerçekleştiğini tahmin edebilmek için JMatPro (Java-tabanlı Malzeme Özellikleri) simülasyon yazılımından faydalanılmıştır.

Sonuç olarak; 710°C, 715°C ve 720 °C döküm sıcaklıklarında üretilmiş, 2 farklı sürede (4 ve 8 saat olmak üzere) solüsyona alma işlemi uygulanmış ve 170 °C’ de 5 farklı sürede (6, 7, 8, 9 ve 10 saat olmak üzere) yaşlandırılmış numuneler incelendiğinde; en büyük dayanıma sahip numune 715°C döküm sıcaklığı, 495 °C’ de 4 saat solüsyona alma ve 170°C’ de 10 saat yaşlandırma süresi ile elde edilmiştir.

Mekanik sonuçlar karşılaştırıldığında T4 ısıtılmasının çekme dayanımına katkısı, T6 ısıtılmasına göre daha azdır. Elde edilen test sonuçlarına göre T6 işlemi uygulanan numunelerin çekme dayanımı, T4 işlemi uygulanan numunelere göre %14,30 daha fazladır. Aynı şekilde T6 işlemi uygulanan numunelerin % uzama miktarları, T4 işlemi uygulanan numunelere göre daha fazladır. Mikroyapı görüntüleri karşılaştırıldığında T4 işlemi sonrasında çökeltilerin yapı içerisinde homojen dağıtılamadığı, T6 işlemi sonrasında ise çökeltilerin homojen olarak dağıtıldığı görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:**(AlSi5Cu3Mg, alüminyum, kokil döküm, yaşlandırma)

**2019, 99 sayfa**

## **ABSTRACT**

**M.Sc. Thesis**

### **Production of AlSi5Cu3Mg Alloy by Gravity Casting Method, and Metallurgical and Mechanical Characterization After Heat Treatment**

**İpek ERTEM DİVRİK**

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

**Supervisor: Asst. Prof. Dr. Simge İRİZALP**

Aluminum is one of the most widely used non-ferrous metals in the industry. Advantages such as lightness, appearance, reproducibility, physical and mechanical properties and corrosion resistance compared to other metals make aluminum and its alloys prominent in the industry. According to the European Aluminum Association data, the transport sector is the largest sector for aluminum products in Europe and represents almost 40% of the sector. The lightness of aluminum reduces the weight of many vehicles, from passenger aircraft to cars, increases fuel efficiency and reduces CO<sub>2</sub> emissions. Most of the aluminum powertrain components (80-85%) are cast parts produced with different casting technologies. Casting alloys generally have concentrations of up to 20% of magnesium and copper alloys, mainly silicon. [1] It is possible to increase the mechanical properties by heat treatments applied to aluminum alloys.

In this study AlSi5Cu3Mg alloy which is used in automotive industry will be used. This alloy is mainly used in the manufacture of mechanical components, cylinder heads, the engine industry and hydraulic components. It is aimed to determine the necessary process conditions in order to keep the product quality at the highest level by examining the effect of casting temperature, solution and artificial aging times on the mechanical strength and microstructure of the material on the parts that will be produced by AlSi5Cu3Mg aluminum alloy gravity casting method.

The Si content of AlSi5Cu3Mg alloy used for this study was kept in the range of 4.5-7%. Chemical analysis and X-Ray analysis in the scope of non-destructive testing was applied to the samples produced by casting AlSi5Cu3Mg alloy at three different casting temperatures. Samples with suitable X-Ray analysis results waited in two different periods at a constant solution temperature (495 °C) for 4 and 8 hours, then received quenching process and kept at a constant artificial age hardening temperature (170 °C) for 6, 7, 8, 9 and 10 hours. In addition to the samples obtained by artificial aging, a group of samples was left to natural aging for 6 days after the solution process and necessary tests were performed.

Tensile test, hardness test, and microstructure analysis were performed for the analysis of 36 groups of samples obtained in accordance with the 36 parameters created under the above conditions. Besides, JMatPro (Java-based Material

Properties) simulation software was used to estimate at which rate and at which temperature the formation and transformation of the phases occurred depending on the heat treatment conditions of AlSi5Cu3Mg alloy.

As a result, when the samples produced at casting temperatures of 710 °C, 715 °C and 720 °C, taken to the solution in 2 different periods (4 and 8 hours), and aged for 5 different periods (6, 7, 8, 9 and 10 hours) at 170 °C were examined, the sample with the highest strength was obtained with a casting temperature of 715 °C, 4 hours of solution at 495 °C and an aging time of 10 hours at 170 °C.

When mechanical results are compared, the contribution of T4 heat treatment to tensile strength is less than that of T6 heat treatment. According to the test results, tensile strength of T6 treated samples is 14.30% higher than that of T4 treated samples. Likewise, the% elongation amounts of the samples treated with T6 are higher than the samples treated with T4 treatment. When the microstructure images were compared, it was seen that the precipitates could not be distributed homogeneously in the structure after the T4 process and that the precipitates were homogeneously distributed after the T6 process.

**Keywords:**(AlSi5Cu3Mg, aluminum, gravity casting, ageing)

**2019, 99 pages**



# 1 GİRİŞ

Kullanışlı mühendislik özellikleri ve çeşitli kimyasal bileşim yelpazesine sahip alüminyum alaşımları hemen hemen tüm döküm yöntemleriyle üretilebilmektedir. Alüminyum ve alaşımlarının düşük yoğunluk, nispeten iyi işlenebilirlik, dökülebilirlik gibi özellikleri göz önünde bulundurulduğunda, otomobillerde kullanılan alüminyum döküm parçaların oranında artış gözlemlenmiştir. Esas olarak araç performansını artıracak olan döküm parçaların ağırlık, ses ve titreşimlerini azaltmaktır. Motor blokları, dişli kutuları ve jantlar, otomotiv endüstrisinde toplam döküm parça çeşitliliğinin büyük bir oranını temsil etmektedir [2].

Birçok alüminyum alaşımları arasında Al-Si ve Al-Si-Cu alaşımları en popülerdir. Bu alaşımlar, otomobil bileşenlerinin üretimi için yaygın olarak kullanılmaktadır. Alüminyum döküm parçaların uygulamasının başarılı bir şekilde geliştirilmesi, yüksek mukavemet ve uzama gerektirmektedir. Tane büyüklüğü ve morfolojisi, dendrit kol aralığı, ikincil fazların büyüklüğü ve dağılımı, döküm parçaların mekanik özelliklerini kontrol eden etkili parametrelerdir [3]. Çeşitli ısı işlemler aracılığıyla bu alaşımların mukavemetini artırmak mümkündür. T6 ısı işlemleri endüstride yaygın olarak kokil döküm yöntemiyle üretilen Al-Si alaşımı ürünlerin mukavemetini artırmak için kullanılmaktadır. T6 ısı işlemleri solüsyona alma, su verme ve yaşlandırma işlemlerinden oluşur. Solüsyona alma işlemleri büyük intermetalik parçacıkları çözmek ve alaşım elementlerini homojenleştirmek için yüksek sıcaklıkta uygulanır sonrasında yüksek bir soğutma hızında söndürülerek daha düşük sıcaklıkta suni yaşlandırma uygulanır. Alaşım bileşimi, yaşlandırma sıcaklığı ve termal tarih, yaşlandırmayı etkileyen ana parametrelerdir [4].

Bu araştırmanın amacı otomotiv endüstrisinde motor endüstrisi, mekanik bileşenler, silindir başlıkları ve hidrolik bileşenlerin üretiminde kullanım alanı olan AlSi5Cu3Mg alüminyum alaşımının kokil döküm yöntemiyle üretiminde döküm sıcaklığı ve ısı işlem uygulamasında solüsyona alma ve suni yaşlandırma sürelerinin malzemenin mekanik dayanımına etkisinin incelenmesi ve ürün kalitesini en yüksek seviyede tutacak proses şartlarının tespit edilmesidir.

## 2 GENEL BİLGİLER

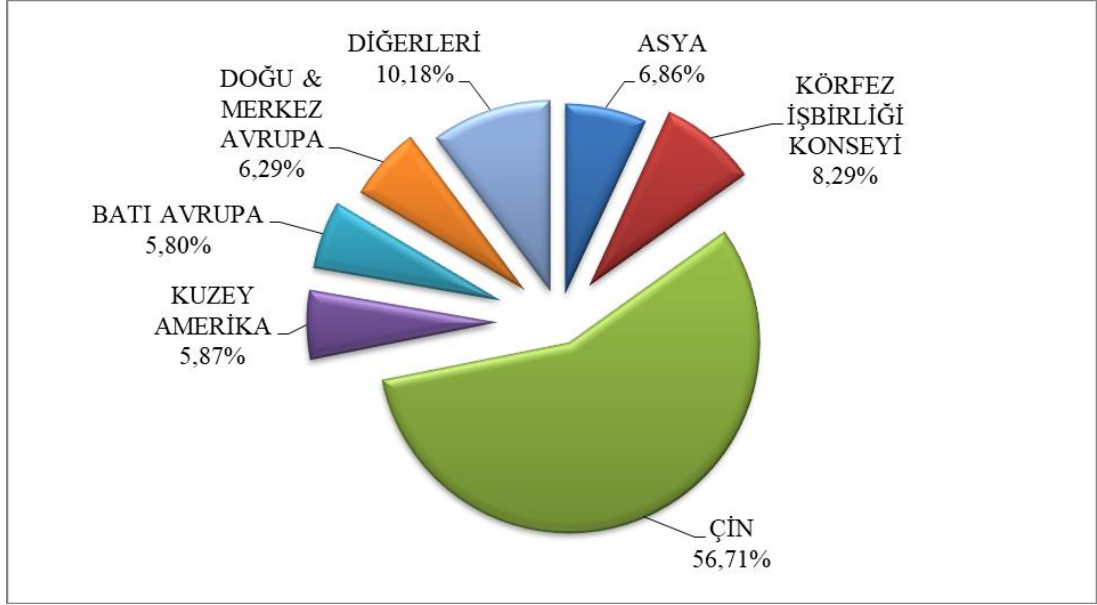
### 2.1 Alüminyum

#### 2.1.1 Alüminyum

Alüminyum, dünyada en fazla bulunan metalik element olarak 19. yüzyılın sonlarına doğru mühendislik uygulamalarında ekonomik rakip haline gelmiştir. Alüminyumun en dikkat çekici özellikleri arasında çok yönlülüğü de vardır. Geliştirilebilecek fiziksel ve mekanik özelliklerin yelpazesi, rafine edilmiş yüksek saflıktaki alüminyumdan en karmaşık alaşımlara kadar dikkat çekicidir. Yaygın olarak bilinen, birçok uluslararası tedarikçi/müşteri tarafından üç yüzden fazla alaşım bileşimi geliştirilmiştir. Alüminyum ve alaşımlarını çok çeşitli kullanımlar için en ekonomik ve çekici kılan özellikleri, görünüm, hafiflik, üretilebilirlik, fiziksel özellikler, mekanik özellikler ve korozyon direncidir. Alüminyum yoğunluğu  $2,7 \text{ g/cm}^3$  tür. Çeliğin ( $7,83 \text{ g/cm}^3$ ), bakırın ( $8,93 \text{ g/cm}^3$ ), princiin ( $8,53 \text{ g/cm}^3$ ) yaklaşık üçte biri kadardır. Alüminyum, petrokimyasallar ve birçok kimyasal sistemler de dahil olmak üzere, sulu ortamlarda (tuzlu su dahil), atmosfer ve çoğu ortamlarda mükemmel korozyon direnci gösterebilir[5].

Tüm alüminyum üretimi, Hall-Heroult işlemine dayanmaktadır. Boksitten rafine edilmiş alümina, cryolite banyosunda eritilir; banyo sıcaklığını, yoğunluğu, özdirençliği ve alümin çözünürlüğünü kontrol etmek için çeşitli florür tuzları ilave edilir. Daha sonra, çözünmüş alümini elektrolize etmek için karbon anotunda oksijen oluşumu ve reaksiyonu ile reaksiyona giren bir elektrik akımı geçirilir ve katotta metal bir ped olarak alüminyum toplanır. Ayrılan metal, sifon veya vakum yöntemleriyle periyodik olarak potalar içerisine çıkarılır; bunlar daha sonra eritilen veya imal edilen külçelerin üretildiği döküm tesislerine aktarılır [5].

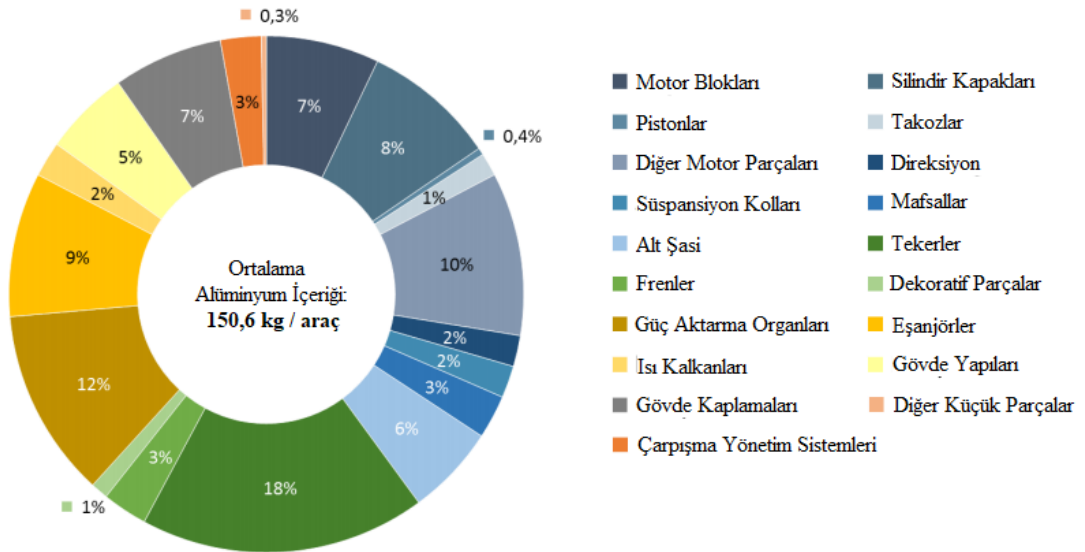
2018 yılında dünyada üretilen alüminyum 64.336 metrik tondur. Alüminyum üretimi son on yılda %61, yıllık olarak %4,98 oranında artmıştır. 2018 yılında Çin, dünya alüminyum üretiminin %56,71' lik oranını sahiplenirken, Körfez İşbirliği Konseyi %8,29 Asya %6,86, Doğu ve Merkez Avrupa %6,29, Kuzey Amerika %5,87, Batı Avrupa % 5,80 ve diğerleri %10,18'lik üretim oranını sahiplenmiştir [6]. Bu oranlar Şekil 2.1.' de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.1. 2018 yılında dünya birincil alüminyum üretiminin yüzde dağılımı [6]

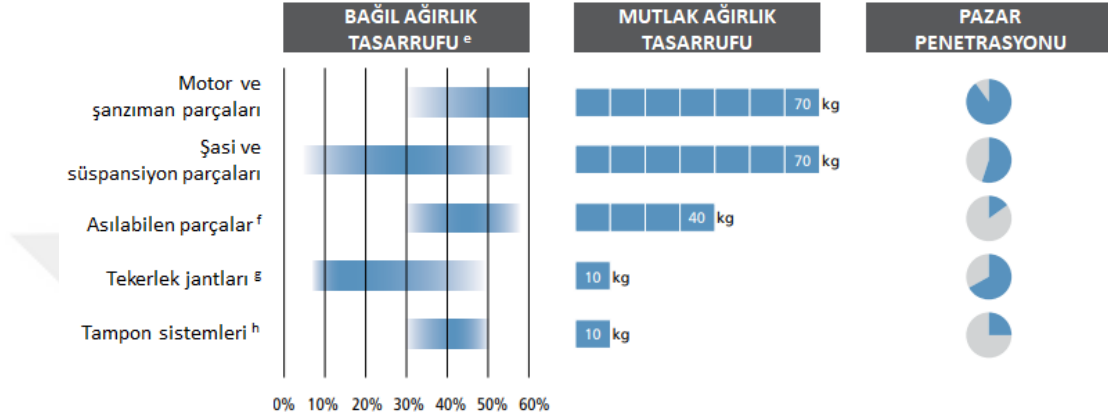
Alüminyum; inşaat, ulaşım, ambalaj, elektrik ve elektronik, genel mühendislik alanı, mobilya ve ofis eşyaların, demir çelik ve metalürji sanayii, kimya ve tarım ürünleri sanayii ve diğer alanlarda kullanım alanına sahiptir.

Otomobillerde kullanılan alüminyum içeriğine baktığımızda her ne kadar gövde ve kaporta için alüminyum levha ürünlerine odaklanılsada, alüminyum döküm ürünlerinin payı aktarma organları ve tekerlekler arasındaki toplam ortalama alüminyum içeriğinin yaklaşık % 50'sidir. 2016 yılı toplam Avrupa otomobil üretiminde araç başına ortalama bileşen içeriği Şekil 2.2.' de verilmiştir [7].



Şekil 2.2. 2016 yılı araç başına ortalama bileşen içeriği [7]

Otomotiv endüstrisinde, özellikle araçların CO<sub>2</sub> emisyonlarının azaltılması adına, araçlarda ağırlık azaltma çalışmaları yapılmaktadır. Bu kapsamda alüminyumun otomotiv sanayisindeki yeri ön plana çıkmaktadır. Alüminyum, birçok uygulamada rakip malzemelere kıyasla% 50'ye varan oranda tasarruf sağlar. Alüminyumun ağırlık tasarrufu ve pazar penetrasyonu ile ilgili verileri gösteren grafikler Şekil 2.3.' de verilmiştir.

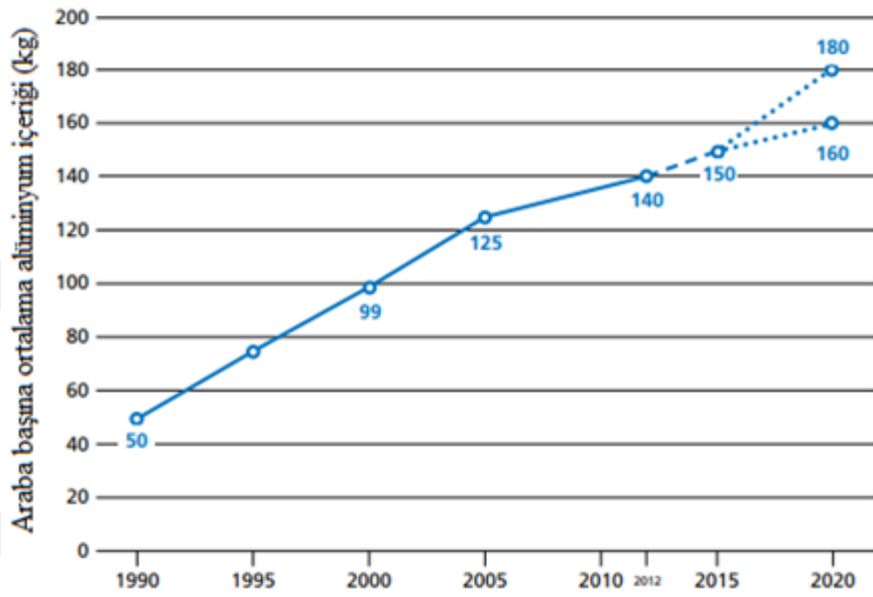


**Şekil 2.3.** Alüminyumun ağırlık tasarrufu ve pazar penetrasyonu [8]

- e İkame edilmiş parçaların ağırlığına göre.
- f Asılan parçalar, kaputlar / kaportalar, kanatlar / çamurluklar, kapılar, bagaj kapaklarıdır. Avrupa'da alüminyum bonnetlerin pazar penetrasyonu% 21'dir.
- g Tekerlek jantları şu anda her zaman ağırlık için optimize edilmemiştir. Bununla birlikte,% 50 ağırlık tasarrufu sağlanabilmektedir.
- h Avrupa'da alüminyum tamponların piyasaya girişi% 25'tir, ancak ön tamponlar için% 40'a yakındır.

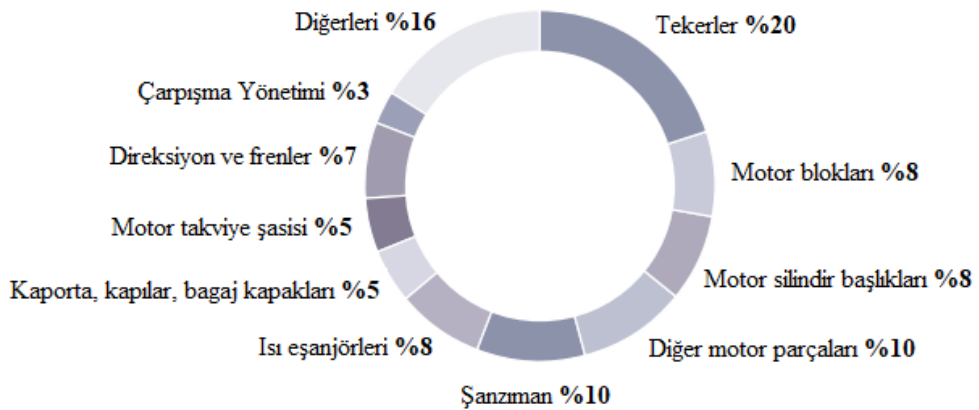
Alüminyumun yoğunluğu çeliğin üçte biri kadardır. Ancak, bu kadar bir ağırlık azalmasına nadiren ulaşılmaktadır, çünkü çok sayıda parça için, alüminyum çelik ile karşılaştırıldığında aynı parça özelliklerini elde etmek için ortalama kalınlığın artırılması gerekmektedir. Yapısal uygulamalarda en sık karşılaşılan kalınlık oranı yaklaşık 1,5' tur. Örneğin 0.8 mm çelik bileşenin 1,2 mm alüminyum bileşen ile değiştirilebileceği anlamına gelir: bu durumda ağırlık azaltma hala% 50'dir. Bununla birlikte, malzeme özellikleri ve bir bileşenin mukavemeti, sertliği ve ağırlığı arasındaki ilişki çok karmaşıktır ve parça geometrisinden kuvvetli bir şekilde etkilenebilir, yani mutlak bir kural yoktur. Uygulamada, gerçek ağırlık azaltma potansiyelini belirlemek için her bir bileşenin tasarımını ayrı ayrı düşünmek gerekmektedir [8].

Avrupa Alüminyum Birliği ile işbirliği içinde Ducker Worldwide tarafından yayınlanan bir araştırma, Avrupa'da üretilen otomobil başına kullanılan alüminyum miktarının 1990 ve 2012 arasında üç katına çıkıp 50 kg'dan 140 kg'a yükseldiğini gösteriyor. Bu miktarın 2020 yılına kadar 160 kg'a çıkacağı ve hatta küçük ve orta ölçekli otomobillerin, otomobil endüstrisinin üst segmentlerinde kaydedilen evrimi takip etmesi durumunda 180 kg'a kadar ulaşacağı tahmin edilmektedir (Şekil 2.4.) [8].



**Şekil 2.4.** Avrupa'da üretilen otomobil başına ortalama alüminyum içeriğinin gelişimi [8]

2012 yılında 17 milyon adetlik bir Avrupa üretim hacmini temsil eden araba modellerinin ayrıntılı bir analizinde 140 kg'nin çeşitli parçalara dağılımı Şekil 2.5.'te görülebilir.



**Şekil 2.5.** Avrupa otomobillerinde alüminyum dağılımı [8]

Otomotiv endüstrisi ve alüminyum endüstrisinin işbirliği ile sayısız yenilikçi alüminyum çözümleri geliştirilmiştir. Temel başarı faktörleri, ürüne özgü gelişmeler, uygun alüminyum alaşımlarının seçimi ve çeşitli ürün formları için gereken kalite seviyesinin tutarlı bir şekilde çoğaltılmasıdır. Ortak araştırma ve geliştirme faaliyetleri, hem yüksek hacimli üretimde güvenli hem de düşük maliyetli hafif alüminyum konseptlerinin pratik kullanımını sağlamıştır.

### **2.1.2 Alüminyum Alaşımlarının Sınıflandırılması**

Alüminyum alaşımları iki ana kategoriye ayrılmaktadır. Bunlar döküm alüminyum alaşımları ve dövme alüminyum alaşımlarıdır.

Dövme alüminyum alaşımları genellikle kütük halinde dökülür ve daha sonra plastik şekil verme ile plastik deformasyon uygulanarak istenilen nihai şekli verilir. Döküm alaşımları ise ergitme işlemi sonrası üretilecek parça şekline sahip kalıba dökülür ve katılaştırılır [9]. Pek çok alaşım, faz çözünürlüklerine dayalı olarak ısıtılma işlemine cevap verir. Bu işlemler arasında, solüsyona alma ısıtılma işlemi, su verme ve yaşlandırma sayılabilir [5]. Yaşlanmanın gerçekleşebilmesi için alaşımların denge diyagramında solvüs eğrisi bulunması gerekir. Yaşlanmanın, sadece solvüs eğrisinin sınırlandırdığı katı eriyik bileşimlerinde meydana gelebildiği bilinse de endüstriye bakıldığında solvüs eğrisinin dışında kalan alaşımlarda da yaşlanma prosedürünün uygulandığı görülmektedir. Bu durumda fazların tamamı çözündürülmeden kısmen çözeltiye alma işleminin ardından, diğer fazların çökeltilmesi söz konusudur. Ancak literatüre bakıldığında solvüs eğrisi içermesi açısından bazı Al alaşımları yaşlandırılabilir [10, 11]. Döküm veya dövme alüminyum alaşımları ısıtılma işlemi yapılabilenler ve ısıtılma işlemi yapılamayanlar olarak ayrılmaktadır.

Alüminyum döküm alaşımlarından 1xx.x, 5xx.x ve 8xx.x alaşımları ısıtılma işlemi yapılamayan alaşımlardır. 2xx.x, 3xx.x, 4xx.x, 6xx.x, 7xx.x alaşımları ısıtılma işlemi yapılabilen alaşımlardır [5].

Alüminyum döküm alaşım bileşimleri pek çok bakımdan dövme alaşım bileşimlerine paraleldir. Sertleştirme ve arzulanan özellikler, alaşım elementleri ilavesi ve ısıtılma işlemi yoluyla sağlanmaktadır. Deformasyon sertleşmesi, döküm özelliklerinin geliştirilmesinde önemli bir rol oynamamaktadır bu nedenle bazı

alaşım elementlerinin kullanımı ve kullanım amaçları döküm ve dövme alaşımlarında farklılık göstermektedir [12].

### **2.1.2.1 Alüminyum Döküm Alaşımları**

Amerikan Alüminyum Birliği' ne göre, döküm alaşımları, üç basamaklı bir sistemle ve ardından ondalık bir değerle tarif edilir.

Tarif edilen sınıflandırma aşağıda açıklanmaktadır.

- 1xx.x Saf alüminyum. Özellikle rotor üretimi için
- 2xx.x Bakırın ana alaşım elementi olduğu alaşımlardır, ancak diğer alaşım elementleri olabilir.
- 3xx.x Ana alaşım elementi silisyumdur. Bakır ve magnezyum gibi alaşım elementleri de bulunabilir. Sanayide kullanılan döküm alaşımlarının % 90'ı 3xx.x serisidir.
- 4xx.x Ana alaşım elementi silisyumdur.
- 5xx.x Ana alaşım elementi magnezyumdur.
- 6xx.x Bu seri numarası kullanılmamaktadır.
- 7xx.x Ana alaşım elementi çinkodur. Bakır ve magnezyum gibi alaşım elementleri de bulunabilir.
- 8xx.x Ana alaşım elementi kalaydır
- 9xx.x Bu seri numarası kullanılmamaktadır [5].

### **2.1.3 Alüminyum ve Alüminyum Alaşımları İçin Temper Gösteriliş Sistemleri**

Alüminyum ve alüminyum alaşımları için ABD' de kullanılan temper tanımlama sistemi külçe hariç tüm ürün formları için kullanılır (döküm ve dövme).

Sistem mekanik veya ısıl işlemlere dayanmaktadır. Temper tasarımları, alaşım tasarımlarını takip eder ve tire (-) ile ayrılır. Esas temperin alt bölümleri bir veya daha fazla basamakla takip edilir.

Temel temper tasarımları;

- F, Üretildiği gibi
- O, Tavlanmış

- H, Pekleştirilmiş (Sadece dövme ürünler için)
- W, Solüsyona alma ısıl işlemi görmüş (Çözelti ısıl işleminden sonra doğal olarak yaşlanan (kendiliğinden oda sıcaklığında yaşlanan) herhangi bir alaşıma uygulanabilir dengesiz bir temperdir. Doğal yaşlanma süresinin verilmesi ile kesinleştirilmiş olur.)
- T, O dışındaki istikrarlı temperlerin üretilmesi için ısıl işlem görmüş (ısıl işlem yapılarak elde edilen temperleri tarifler.) T'yi her zaman bir veya daha fazla sayı izler, tanımlamalar aşağıda belirtilmiştir.

W dizilimi dengesiz bir temperi gösterirken, T dizilimi F, O ve H dışında kararlı bir temperi gösterir [5].

T' yi 1'den 10'a kadar bir sayı takip eder, her sayı belli bir temel işlem dizisini gösterir.

T1, Yüksek sıcaklıkta bir şekillendirme işleminden soğutulmuş ve doğal yaşlandırılarak büyük ölçüde istikrarlı bir duruma getirilmiştir.

T2, Yüksek sıcaklıkta bir şekillendirme işleminden soğutulmuş, soğuk şekillendirilmiş ve doğal yaşlandırılarak büyük ölçüde istikrarlı bir duruma getirilmiştir.

T3, Solüsyona alma ısıl işlemi görmüş, soğuk şekillendirilmiş ve doğal yaşlandırılarak büyük ölçüde istikrarlı bir duruma getirilmiştir.

T4, Solüsyona alma ısıl işlemi görmüş ve doğal yaşlandırılarak büyük ölçüde istikrarlı bir duruma getirilmiştir.

T5, Yüksek sıcaklıkta bir şekillendirme işleminden soğutulmuş ve yapay yaşlandırılmıştır.

T6, Solüsyona alma ısıl işlemi görmüş ve yapay yaşlandırılmıştır.

T7, Solüsyona alma ısıl işlemi görmüş ve stabilize edilmiştir.

T8, Solüsyona alma ısıl işlemi görmüş, soğuk işlemden geçirilmiş ve yapay yaşlandırılmıştır.



T9, Solüsyona alma ısı işlemini görmüş, yapay yaşlandırılmış ve soğuk şekillendirilmiştir.

T10, Yüksek sıcaklıkta bir şekillendirme işleminden soğutulmuş, soğuk şekillendirilmiş ve yapay olarak yaşlandırılmıştır [13].

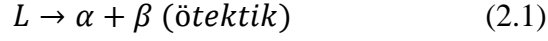
#### 2.1.4 Alüminyum Döküm Malzemelerin Özellikleri

Alüminyum döküm alaşımları, tüm yaygın döküm alaşımları arasında çok yönlüdür ve genellikle en yüksek dökülebilirlik derecelerine sahiptir. Döküm malzemeleri olarak, alüminyum alaşımları aşağıdaki olumlu özelliklere sahiptir;

- İnce bölümleri doldurmak için iyi akışkanlık,
- Diğer birçok metal için gerekli olan erime noktasına göre düşük erime noktası,
- Kimyasal stabilite
- Parlak yüzeyler ve çok az lekelenme veya lekelenme olmadan iyi döküm yüzeyi
- Erimiş alüminyumdan kalıba hızlı ısı transferi ile daha kısa döküm döngü süreleri,
- Hidrojen, alüminyum ve alaşımlarında kayda değer çözünürlüğe ve hidrojen çözünürlüğüne sahip tek gazdır. Alüminyumda proses yöntemleri ile kolayca kontrol edilebilir,
- Birçok alüminyum alaşımı sıcak çatlama ve yırtılma eğilimlerinden nispeten uzaktır [5].

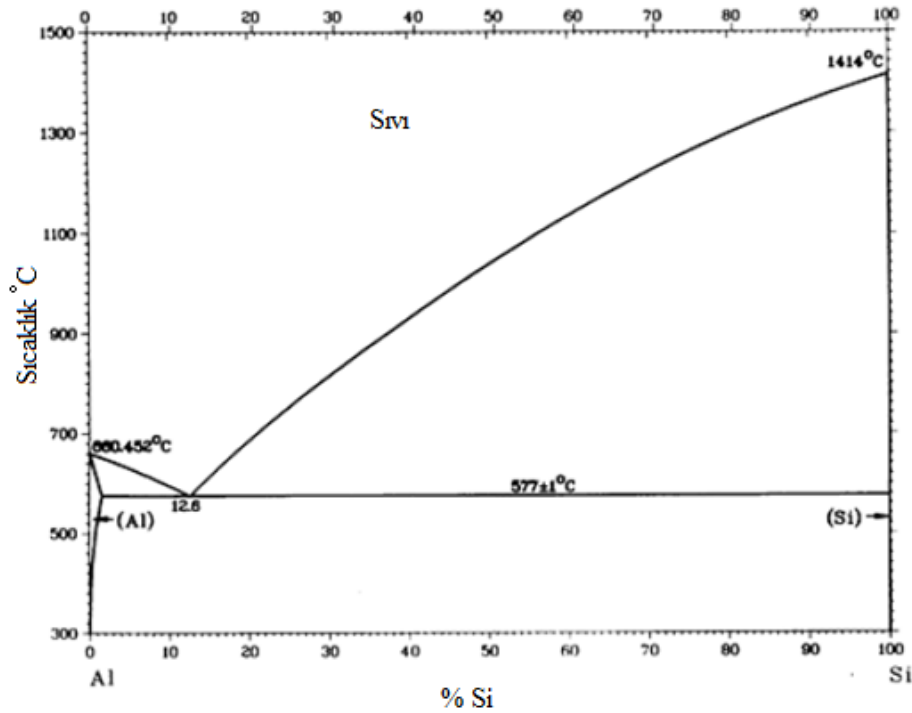
Alüminyum döküm alaşımları, dövme alüminyum alaşımlarla aynı alaşım sistemlerine dayanır, aynı mekanizmalarla (gerilme sertleşmesi hariç) güçlendirilir ve benzer şekilde ısı işlem gören ve ısı işlem görmeyen olarak sınıflandırılır. En büyük farkı, büyük hacimlerde kullanılan döküm alaşımlarının çoğu, dövme alaşımında bulunanlardan çok daha fazla silisyum alaşımları içermesidir. Alüminyum döküm alaşımları, güçlendirme elementlerine ek olarak, dökümlerde meydana gelen büzülmeyle beslemek ve yeterli akışkanlığa sahip olmak için yeterli miktarda ötektik oluşturuç elemanlar içermelidir. Alüminyum-silisyum bileşimlerinin faz davranışı, en yüksek hacimli alüminyum dökümün ticari uygulanabilirliğini mümkün kılan basit bir ötektik biçimlendirme sistemi sağlar [5].

Alüminyum silisyum faz diyagramı, silisyum içerisinde sınırlı alüminyum çözünürlüğüne ve alüminyum içerisinde sınırlı silisyum çözünürlüğe sahip basit bir ikili ötektiktir. Silisyumun alüminyumdaki çözünürlüğü ötektik sıcaklıkta en fazla %1,5' a ulaşır [14]. Alüminyum silisyum alaşımına ait faz diyagramı Şekil 2.6.' da verilmiştir. Bu diyagramda sadece bir değişmez tepkime vardır, yani;



L, sıvı fazdır,  $\alpha$ , ağırlıklı olarak alüminyumdur ve  $\beta$ , ağırlıklı olarak silisyumdur. Ötektik reaksiyonun 577 °C' de ve % 12,6 silisyum seviyesinde gerçekleştiği yaygın olarak kabul edilmektedir. Alüminyum silisyum denge diyagramı, Al-Si ötektiğinin aşağıdaki şekillerde oluşabileceğini göstermektedir [14].

1. % 12,6' lık bir silisyum konsantrasyonu durumunda doğrudan sıvıdan (yani, bir ötektik Al-Si alaşımı için),
2. % 12,6' dan az silisyum içeriği durumunda birincil alüminyum varlığında (yani, hipoötektik Al-Si alaşımları için) ve
3. % 12,6' dan fazla silisyum içeriği durumunda birincil silisyum kristalleri varlığında (hiperötektik Al - Si alaşımları için).



Şekil 2.6. Al-Si faz diyagramı [15]

Yaklaşık % 4 ile % 12 arasında ötektik seviyeye kadar değişen silisyum içerikleri hurda kayıplarını azaltır, kesit kalınlığında daha fazla çeşitlilik gösteren çok daha karmaşık tasarımların üretilmesine izin verir ve daha yüksek yüzey ve iç kalite ile döküm elde edilmesini sağlar. Bu yararlar, silisyumun akışkanlığı arttırma, çatlama ve büzülme gözenekliliğini en aza indirmek için beslemeyi iyileştirme etkilerinden kaynaklanmaktadır [5].

### **2.1.5 Alaşım Elemanları**

Silisyumun alüminyum alaşımlarındaki üstün etkisi, döküm özelliklerini iyileştirmesidir. Silisyumun saf alüminyuma ilavesi akışkanlığı, sıcak yırtılma direncini ve besleme özelliklerini önemli ölçüde geliştirir. Tüm döküm işlemlerinde en çok kullanılan bileşimler alüminyum-silisyum ailesinin bileşimleridir. Genel olarak, döküm işlemlerine optimum bir silisyum içeriği aralığı atanabilir. Yavaş soğutma oranı işlemleri için aralık %5 ila %7, kalıcı kalıp %7 ila %9 ve enjeksiyon döküm % 8 ila %12' dir. Bu önerilerin temelleri, soğutma hızı ve akışkanlık arasındaki ilişki ile ötektik yüzdesinin beslenmeye etkisidir. Silisyum ilavelerine ayrıca özgül ağırlıktaki ve termal genleşme katsayısındaki bir azalma da eşlik eder.

Demir; sıcak yırtılma direncini arttırır ve enjeksiyon dökümünde kalıp kaynak veya lehimleme eğilimini azaltır. Bununla birlikte, demir içeriğindeki artışlara önemli ölçüde azalmış süneklik eşlik eder. Demir, Al-Si alaşımlarında bulunması istenmeyen elementlerin başında gelmektedir. Demir alüminyum ile kararlı yapıda ancak kırılabilir yapıya sahip intermetalik bileşikler oluşturur. Parçanın sünekliğini olumsuz etkilemesine ek olarak korozyon direncini de düşürür.

Bakır; ilk ve en çok kullanılan alüminyum alaşımları % 4 ila %10 Cu içerenlerdir. Bakır, döküm ve ısı işlem görmüş koşullarda dayanımı ve sertliği büyük ölçüde iyileştirir. % 4 ila %6 Cu içeren alaşımlar, ısı işlemi en güçlü şekilde yanıt verir. Bakır genel olarak genel korozyona karşı direnci ve spesifik kompozisyonlarda ve malzeme koşullarında strese karşı korozyona duyarlılığı azaltır. Bakır ilaveleri ayrıca sıcak yırtılma direncini azaltır ve dökülebilirliği azaltır.

Mangan; normal olarak döküm bileşimlerinde bir kirlilik olarak kabul edilir ve çoğu kokil döküm bileşimlerinde düşük seviyelere kontrol edilir. Deformasyon

sertleşmesinin olmaması durumunda mangan, dökme alüminyum alaşımlarında önemli bir fayda sağlamaz.

Magnezyum; ısıtım işlem görmüş Al-Si alaşımlarında dayanıklılık ve sertlik gelişiminin temelidir ve aynı amaç için bakır, nikel ve diğer elementler içeren daha karmaşık Al-Si alaşımlarında yaygın olarak kullanılır. Al-Si ailesindeki dayanıklı bileşimlerde, % 0.40 ila %0.070 arasında magnezyum kullanılır.

Nikel; genellikle yüksek sıcaklık özelliklerini geliştirmek için bakırla birlikte kullanılır. Ayrıca termal genişleme katsayısını azaltır.

Çinko; alüminyuma eklenmesiyle önemli teknik fayda elde edilmez. Bununla birlikte çinko, bakır ve / veya magnezyum ilavesiyle birlikte, ısıtım işlem görebilen veya doğal olarak yaşlanan bileşimlerle sonuçlanır.

Kurşun; daha iyi işlenebilirlik için alüminyum döküm alaşımlarında %0.1' den daha fazla kullanılır.

Kalay; sürtünme önleyici özelliklerin geliştirilmesinde etkilidir, bu nedenle rulman uygulamalarında yararlıdır. İşlenebilirliği arttırmak için ilaveler de yapılabilir. Kalay bazı alaşım sistemlerinde yaşlandırmaya tepki verebilir.

Titanyum; genellikle daha az miktarda borla birlikte, alüminyum döküm alaşımlarının tane yapısını geliştirmek için yaygın olarak kullanılır [5].

### **2.1.6 Yapı İncelemesi**

Mekanik özellikleri en güçlü şekilde etkileyen mikroyapısal özellikler şunlardır:

- Tane büyüklüğü ve şekli
- Dendrit kolu aralığı
- İkinci faz partikülleri ve inklüzyonların boyut ve dağılımı [5]

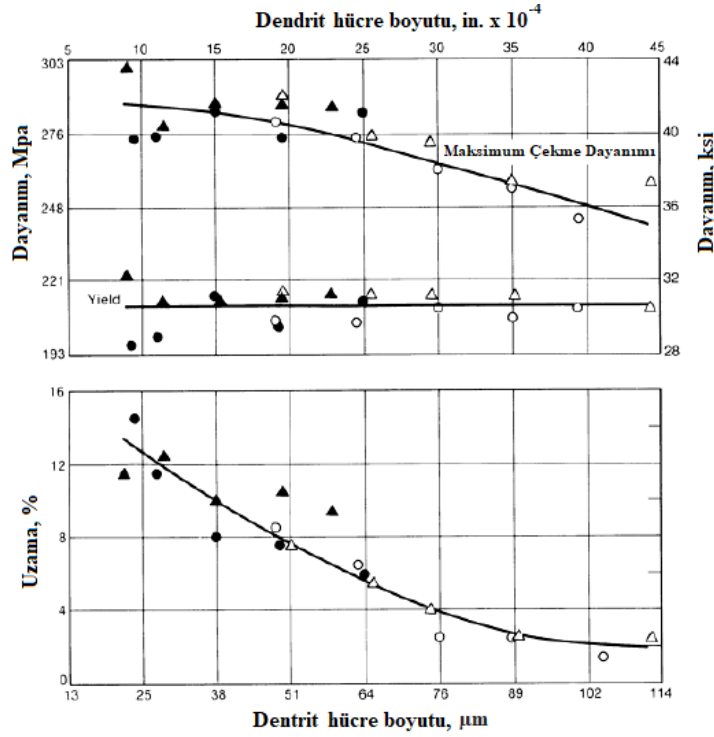
Tane büyüklüğü ve dendrit kolu aralığı gibi mikroyapısal özelliklerden bazıları, öncelikle soğutma ve katılaşma oranları ile kontrol edilir [5].

Tane büyüklüğü ve dendritik aralık gibi, inklüzyonların ve ikinci faz parçacıklarının dağılımı ne kadar ince olursa, dökümün özellikleri de o kadar iyi

olur. İyi dağılım küçük parçacıklar gerektirir; büyük oksit kitleleri veya intermetalik bileşikler aşırı kırılabilirlik üretir. Mikro bileşenlerin büyüklük ve şekillerinin kontrolü bir dereceye kadar bileşimi kontrol ederek yapılabilir, ancak mikro bileşenlerin büyüyebileceği süreyi en aza indirerek daha verimli bir şekilde gerçekleştirilir. Tane büyüklüğünün en aza indirilmesi ve dendritik aralığın azaltılması gibi, mikro bileşenler için büyümenin en aza indirilmesi de hızlı soğutma gerektirir. Bu nedenle, yüksek döküm hızının, iyi döküm kalitesi elde etmede çok önemli olduğu açıktır.

Alüminyum-silisyum alaşımlarında ötektik ve hiperötektik yapıları etkilemek için modifiye edicilerin ve incelticilerin kullanılması, döküm işlemlerinde mikro ve makro yapıların en iyi duruma getirilebilme örneklerinden biridir.

Dendrit kolları ne kadar uzak olursa, mikro bileşenlerin dağılımı o kadar büyüktür ve özellikleri üzerindeki olumsuz etkileri daha belirgindir. Bu nedenle, yüksek döküm kalitesi için kısa dendritik mesafe gereklidir. Şekil 2.7. katılma oranı ile kontrol edilen dendrit oluşumundaki değişikliklerle elde edilebilen mekanik özelliklerde iyileşmeyi göstermektedir. Bazı faktörler mesafeyi bir dereceye kadar etkilese de, ince boşluğu sağlamanın tek etkili yolu hızlı soğutma kullanımınıdır [5].



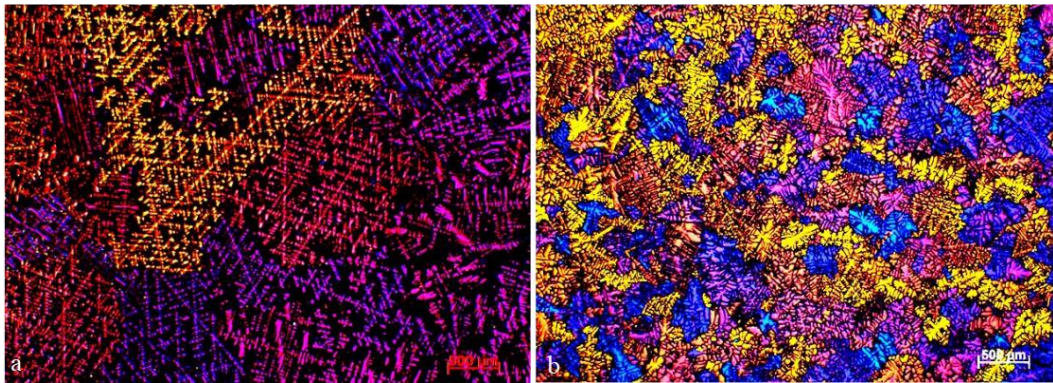
**Şekil 2.7.** A356-T62 alüminyum alaşımının alçı döküm plakalar için dendrit hücre boyutu ve dayanım ilişkisi [5]

## 2.1.6.1 Alüminyum Alaşımlarına Uygulanan Mukavemet Artırma İşlemleri

### 2.1.6.1.1 Tane inceltme

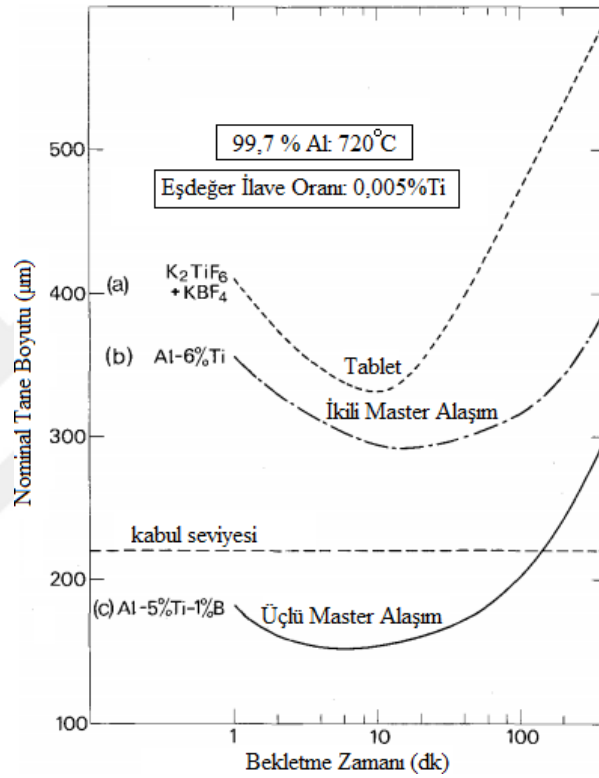
Alüminyum dökümlerde normal olarak ince ve eş eksenli bir tane yapısı istenmektedir, çünkü ince ve eş eksenli taneli dökümler en iyi mukavemet ve süneklik kombinasyonunu sunmaktadır. Oluşan taneciklerin tipi ve boyutu, alaşım bileşimi, katılaşma oranı ve heterojen tanecik çekirdeklemesi için yerler sağlayan, metalik faz parçacıkları içeren ana alaşımların (tane incelticilerin) eklenmesi ile belirlenir. Tane büyüklüğü, katılaşma oranı artırılarak inceltir, fakat aynı zamanda alaşımdaki tane inceltici elementlerin (temel olarak titanyum bor) varlığına da bağlıdır. Bir dereceye kadar, tanelerin büyüklüğü ve şekli, tane incelticilerin eklenmesiyle kontrol edilebilir, ancak düşük dökme sıcaklıklarının ve yüksek soğutma hızlarının kullanılması tercih edilen yöntemlerdir. Tüm alüminyum alaşımları, uygun tane inceltici ilaveleriyle, tamamen eş eksenli, ince taneli bir yapı ile katılaşacak şekilde dökülebilir. Alüminyum dökümde en yaygın kullanılan tane incelticiler, titanyum veya titanyum ve borun ana alaşımlarıdır [5].

Biol, alüminyum döküm alaşımlarında tane inceltme konulu bildirisinde AlSi7Mg döküm alaşımında Al-5Ti-1B ilavesinin, daha yüksek ilave seviyelerinde bile tane inceltme kapasitesinin sınırlı olduğunu belirtmiştir, bu çalışmada Al-5Ti-1B ilavesinin tane inceltme etkisi Şekil 2.8.' de verilmiştir [16].



**Şekil 2.8.** AlSi7Mg alaşımı tane boyutları karşılaştırması [16]  
a AlSi7Mg alaşımı (katkısız) tane boyutu,  
b AlSi7Mg alaşımına AlTi5B1 katkısı sonrası tane boyutu

Jones ve Pearson, 1976 yılında alüminyumun dökümü için tane inceltme tekniklerinin geliştirilmesi ve üçlü Al-Ti-B ana alaşımlarının ilavesi kullanılarak elde edilen sonuçları incelemişlerdir. Sonuçlar incelendiğinde Al-%5Ti-%1B üçlü alaşımının, Al-%6Ti ikili alaşımdan ve tablet şeklindeki K<sub>2</sub>TiF<sub>6</sub> ve KBF<sub>4</sub> tuz katışımından daha üstün olduğunu ve Al-%5Ti-%1B alaşımında borun tane arıtma performansı üzerinde çok önemli bir etkiye sahip olduğu görülmektedir [17]. Bu etki Şekil 2.9.' da gösterilmektedir.



Şekil 2.9. Farklı tane incelticiler arasında karşılaştırma [17]

Tane inceltici olarak kullanılan titanyum (Ti) ve bor (B) elementleri %0,01 gibi çok düşük oranlarda bile alaşıma ilave edildiğinde tane inceltme etkisi göstermektedir. Tane inceltme ile ikinci faz partiküllerinin dağılımı değiştirildiğinden, döküm parçaların mekanik özellikleri etkilenir. Tane inceltme sayesinde homojen bir döküm yapısı elde edilir [18].

### 2.1.6.1.2 Alaşım Sertleşmesi

Hipoötektik alüminyum-silisyum alaşımlarının modifikasyonu, normalde ortaya çıkan ötektik yapısal modifikasyonunu indükleyerek özelliklerin geliştirilmesini içerir. Kalsiyum, sodyum, stronsiyum ve antimon gibi bazı

elementlerin eklenmesiyle modifikasyon yapılır. Ayrıca, arttırılmış katılaşmanın değiştirilmiş yapıların elde edilmesinde yararlı olduğu anlaşılmaktadır.

Tipik olarak, modifiye edilmiş yapılar benzer ancak değiştirilmemiş yapılarla karşılaştırıldığında biraz daha yüksek çekme özellikleri ve kayda değer ölçüde geliştirilmiş süneklik sergilerler. Dökümdeki iyileştirilmiş performans, iyileştirilmiş akışla karakterize edilir ve yüksek sıcaklıkta çatlama karşı üstün direnç ile beslenir [5].

### **2.1.6.1.3 Yaşlandırma**

Yaşlandırma veya çökeltme sertleşmesi bazı metalik alaşımları güçlendirmek için çok yönlü bir yöntemdir. Bu güçlendirme tekniğinden yararlanan iki önemli alaşım sistemi alüminyum alaşımları ve nikel bazlı süper alaşımlardır. Yaşlandırma işlemi, bir dizi yarı kararlı ve kararlı çökeltinin homojen olmayan, aşırı doymuş bir katı çözeltiden çökeltmesini içerir. Çeşitli yarı kararlı yapılar, dislokasyon hareketine karşı farklı direnç seviyeleri sunar [19].

Aşırı doymuş katı çözelti, alaşımın tek bir faza sahip olduğu yeterince yüksek bir sıcaklıktan ani soğutma ile elde edilir. Çözeltinin çökmesine neden olan ısıl işlem yaşlandırma olarak adlandırılır. İşlem birkaç alaşım sistemine uygulanabilir. Spesifik davranış alaşım ile değişmekle birlikte, alaşım en azından:

1. Yüksek sıcaklıklarda tek fazlı katı bir çözelti oluşturmak zorundadır.
2. Yaşlandırma sırasında ince dağılmış bir çökeltinin reddedilmesi, yani faz diyagramının azalan bir solvus çizgisi göstermesi gerekmektedir [19].

Çökeltme işlemi aşağıdaki adımlardan oluşur:

1. Çözünme: Bu, alaşımı monofaz bölgesine ısıtmayı ve çözülebilir çökeltileri çözmek için yeterince uzun bir süre orada tutmayı içerir.

2. Su verme. Bu, tek fazlı alaşımın çok hızlı bir şekilde oda sıcaklığına veya daha düşük bir sıcaklığa soğutulmasını içerir, böylece kararlı çökeltilerin oluşumundan kaçınılır. Böylece, aşırı doymuş katı bir çözelti elde edilir.

3. Yaşlandırma. Bu işlem aşırı doymuş katı çözeltiyi oda sıcaklığında veya biraz daha yüksek bir sıcaklıkta bırakmaktan ibarettir. İnce ölçekli çökeltilerin ortaya çıkmasına neden olur [19].



Tablo 2.1. çökeltme sırası ve denge çökeltileri ile birlikte bazı çökeltme sertleştirme sistemlerini göstermektedir.

**Tablo 2.1.** Bazı çökeltme sertleştirme sistemleri [19]

<u>Ana Metal</u>	<u>Alaşım</u>	<u>Çökeltme Sırası</u>
	Al-Ag	Bölgeler (küreler) __ $\gamma'$ (plakalar) __ $\gamma'$ (Ag,Al)
	Al-Cu	Bölgeler (diskler) __ $\theta''$ (diskler) __ $\theta'$ __ $\theta$ (Al <sub>2</sub> Cu)
Al	Al-Zn-Mg	Bölgeler (küreler) __ M' (plakalar) __ (MgZn <sub>2</sub> )
	Al-Mg-Si	Bölgeler (çubuklar) __ $\beta'$ __ (Mg <sub>2</sub> Si)
	Al-Mg-Cu	Bölgeler (çubuklar veya küreler) __ S' __ S(Al <sub>2</sub> CuMg)

Her ne kadar farklı sistemlerin davranışları ayrıntılı olarak değişse de, genel yaşlanma sırası aşağıdaki gibi yazılabilir.

aşırı doymuş katı çözeltiler → geçiş yapısı  
→ yaşlanma evresi

Yaşlandırma işlemi sonunda yapıda bulunan aşırı doymuş katı fazdan, çok ince çökelti fazının dağılması mekanik özelliklerin gelişmesi için genel şarttır. İnce çökelti fazının oluşması, doğal yaşlandırma veya yapay yaşlandırma ile gerçekleşebilir. Alüminyum alaşımlarında, yapay yaşlandırma ile doğal yaşlandırmaya göre daha yüksek mukavemet kazandırılır [10].

Alüminyum alaşımlarında genel olarak solüsyona alma sıcaklığı 465-565 °C dir. Al<sub>2</sub>Cu fazının tamamen çözünebilmesi için solüsyona alma işleminde ısıtma yavaş yapılmalıdır, ısıtma hızlı yapılırsa bu faz tamamen çözünemez. Solüsyona alma sıcaklığı normalden düşük tutulduğunda ikinci fazın tamamen çözünmesi mümkün olmaz ve alaşım yumuşar [10].

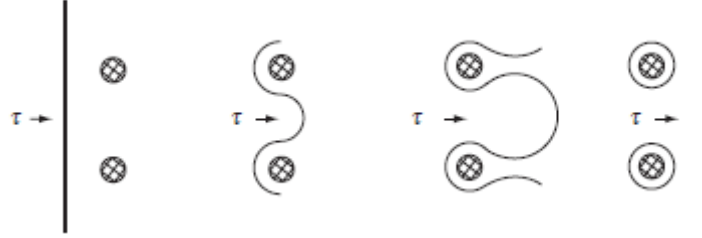
Aşırı doymuş katı çözeltilerin yaşlandırma işlemi için genel gereksinim, yaşlanma ısıl işlemleri sırasında (doğal yaşlanma veya yapay yaşlanma) ince dağılmış çökeltilerin oluşumunu içerir. Yaşlanma, sadece denge solvus sıcaklığının altında değil, Guinier-Preston (GP) bölgesi solvus hattı adı verilen, yarı kararlı bir karışabilirlik aralığının altında da yapılmalıdır. Boşlukların aşırı doymunluğu, difüzyona izin verir ve böylece bölge oluşumunun, denge difüzyon katsayılarından

beklenenden çok daha hızlı gerçekleşmesini sağlar. Yaşlandırma işleminde, doymuş katı çözelti ilk önce çözünen kümeler geliştirir, bu daha sonra geçiş (kaymaz) çökeltilerinin oluşumunda rol oynar [13].

Yaşlanma işleminin ilk aşamalarında, matris ile uyumlu bölgeler belirir. Bu bölgeler, matrisin belirli kristalografik düzlemlerinde çözünen atom kümeleridir. Bölgeler geçiş yapılanmasıdır ve ilk keşfeden iki araştırmacının onuruna Guinier - Preston bölgeleri veya GP bölgeleri olarak adlandırılır. Bölgelerin, çökelti parçacıkları şeklini almayan, küçük bir çözünen atom grubu kümesini temsil ettiğini vurgulamak için çökeltiler yerine bu bölgelere GP bölgesi denir. GP bölgeleri çok küçüktür ve alüminyum matris ile çok küçük bir kafes uyumsuzluğuna sahiptir. Böylece, matris ile uyumludurlar; yani, kafes düzlemleri arayüzü sürekli bir şekilde geçmektedir. Bu tür uyumlu arayüzler çok düşük enerjilere sahiptir, ancak matristeki küçük elastik bağdaşım gerinimleri vardır. Bu bağdaşım gerinimleri büyüdükçe, bunlarla ilişkili elastik enerji, uyumsuzluk gerinimini almak için ara yüzünde dislokasyonların oluştuğu yarı bağdaşık bölgelerin oluşmasıyla azalır. Yarı bağdaşık bölgelerin veya çökeltilerin daha da büyümesi, tam bir bağdaşım kaybına neden olur: Çökelti ve matris arasında bağdaşmayan bir arayüzey oluşur. Bağdaşım, çökeltilen kafes ile matrisinki arasında bire bir uyum olduğunu gösterir [19].

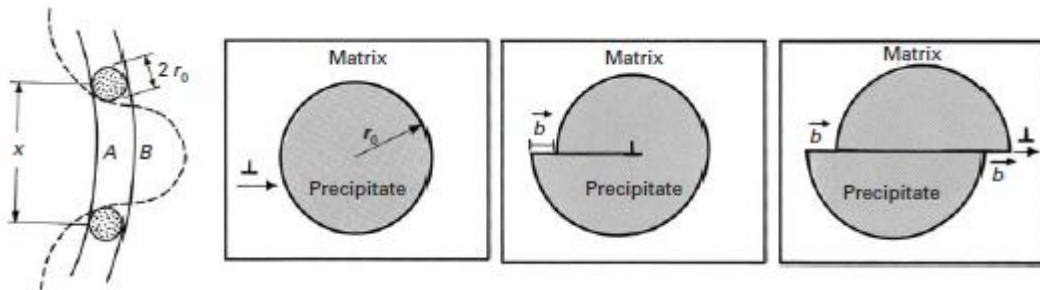
Bilindiği üzere çökeltiler ile matris fazı arasında bir uyumsuzluk vardır. Bu uyumsuzluk atomsal dizilime bağlı gelişmekte olup bir takım fiziksel özellik farklılıkları da getirmektedir. Atomal ilişki açısından uyumsuzluk değerlendirildiğinde GP bölgeleri açısından değerlendirme yapılmalıdır. Eğer ki bu uyumsuzluk sadece atom çaplarından kaynaklandıysa GP1 bölgesi olarak tanımlanırken, büyüme arttıkça yarı uyumlu olan GP2 bölgesi oluşur ve GP2 bölgesi daha uzun yaşlanmaya tabii tutulursa çökelti yapısı  $\theta''$  den önce  $\theta'$  ne ardından  $\theta$  ya dönüşür. Bu kademedeki çökelti boyutları çok büyük ve azdır.  $\theta'$  de çökelti matris ara yüzeyi kısmen uyumludur. Yani arayüzde bir takım düzlemlerde uyumluluk varken örneğin yatayda uyumsuzluk vardır.  $\theta$  yapısında ise çökelti ve matris atomları tamamen yani hem yataydaki hem de dikeydeki atom düzlemleri açısından arayüzeyde uyumsuzluk vardır. Bilindiği üzere yaşlandırma işlemleri ardında yatan mukavemet artırıcı mekanizma partiküllerin dislokasyon hareketine engel olmasıdır. Dislokasyonların partikülleri aşamaması durumunda etrafını halka şeklinde sarar ve

bu halkaların sayısı giderek artar sonuçta dislokasyon yoğunluğunu da artırır. Dislokasyonların partikülleri kesememe durumu Şekil 2.10.' da şematik olarak gösterilmiştir.



**Şekil 2.10.** Dislokasyonların partikülleri kesememe durumu [19]

Çökeltiler GP2 ( $\theta'$ ) bölgesine tekabül eden büyüklüğe ulaştıklarında dayanımda maksimum artış olması beklenmektedir. Böylece çökeltiler dislokasyonların hareketine engel olabilecek büyüklüğe gelmiş olurlar. Sonuç olarak yaşlandırma işleminde maksimum mekanik dayanım, çökeltinin belirli bir boyuta ulaşması ve çökelti matrisi ara yüzeyinin yarı uyumlu veya uyumlu olması halinde elde edilmektedir. Maksimum dayanımdan sonra yaşlandırma süresinin artmasıyla mukavemetin düşmesi beklenmektedir. Çökelti  $\theta'$  veya  $\theta$  yapısındadır. Bu fazda çökelti ile matris arayüzeyi artık uyumsuz hale gelmiştir. Artık arayüzde de dislokasyon söz konusudur ve bu dislokasyonlar öncelikle hareket edeceklerinden sertlik düşüşü meydana getirir. Bu durum aşırı yaşanmadır. Bu durumda çökeltiler dislokasyon hareketine engel olamazlar ve artık dislokasyonlar çökeltiyi kesebilirler. Dislokasyonların çökeltiyi kesme durumu Şekil 2.11.' de gösterilmiştir.



**Şekil 2.11.** Dislokasyonların çökeltiyi kesme durumu [19]

Dislokasyonların çökeltiyi kesmesi mukavemet düşüşü ile sonuçlanır. Yani partikül mukavemetinin ve partikül/matris arayüzeyinin kristalografik doğası, dislokasyonların parçacıkları kesip kesmeyeceğini belirleyecek olandır. Parçacık

kayması için gerekli gerilme ( $\tau_m$ ' ye ek olarak) partiküller ( $=Gb/x$ ) arasındaki dislokasyonun bükülmesi için gerekenden az ise, partiküller akma sonrasında dislokasyonlar tarafından kesilecektir.

$$\tau_y < \tau_m + Gb/x \quad (2.2)$$

$\tau_m$ : Bir çökeltinin bulunmaması durumunda matrisin akması için gerekli kayma gerilmesidir.

$x$ : kayma düzlemindeki iki parçacık arasında bulunan ortalama mesafe

$G$  kayma modülü: Nümerik olarak  $E'$  den büyüktür ve poisson oranı ile  $E$  ye bağlıdır.

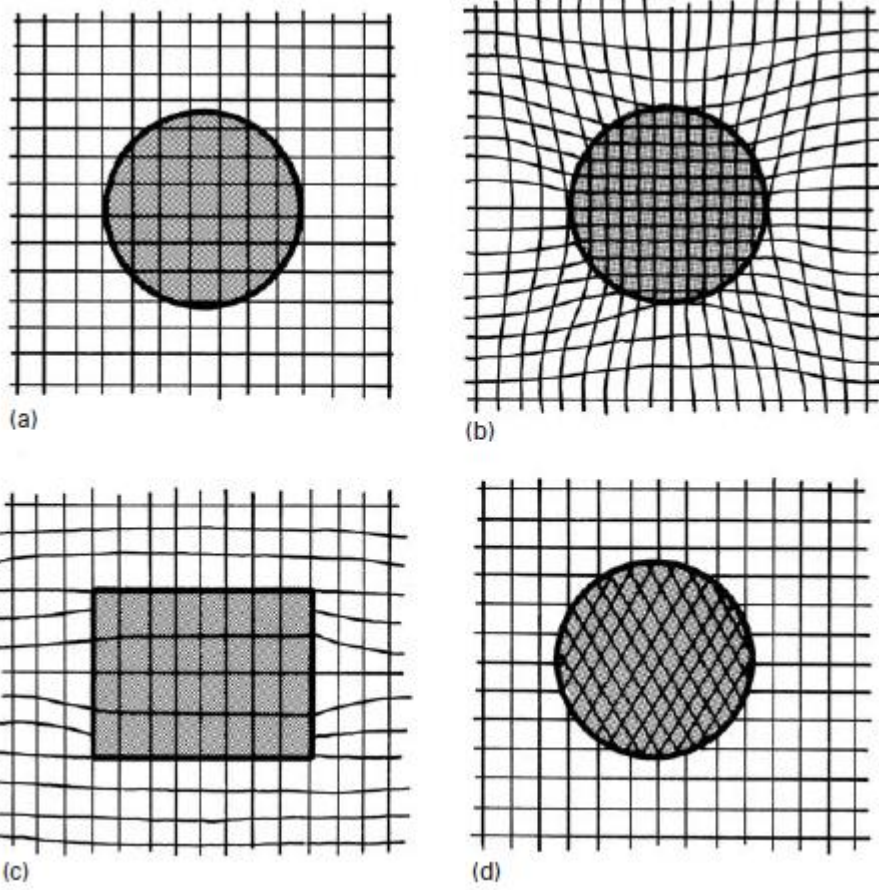
$b$ : Burgers vektörü

Dislokasyonun partikülleri kesmek yerine çevrede bükülmesi için gereken gerilme değerinin  $Gb/x$ ' den büyük olması gerekir. Bu durum özünde uyumsuz çökeltilerden dolayı mukavemet artması orrowen modelidir. Partiküllerin varlığından dolayı akma mukavemetindeki artış  $\tau \approx Gb/x$  bağlantısı ile verilir. Öyle ki partikül kesmesi (kayması) olmadığı sürece uyumsuz çökelti tarafından (yoluyla) mukavemetlendirilmiş bir alaşım için total akma gerilimi;

$$\tau_y = \tau_m + Gb/x \quad (2.3)$$

Mukavemetlenme çökelti boyutu ile anılır, çünkü bu durum çökelti arası mesafedeki artışa karşılık gelmektedir. Çökelti arası mesafenin artması mukavemeti düşürecektir.

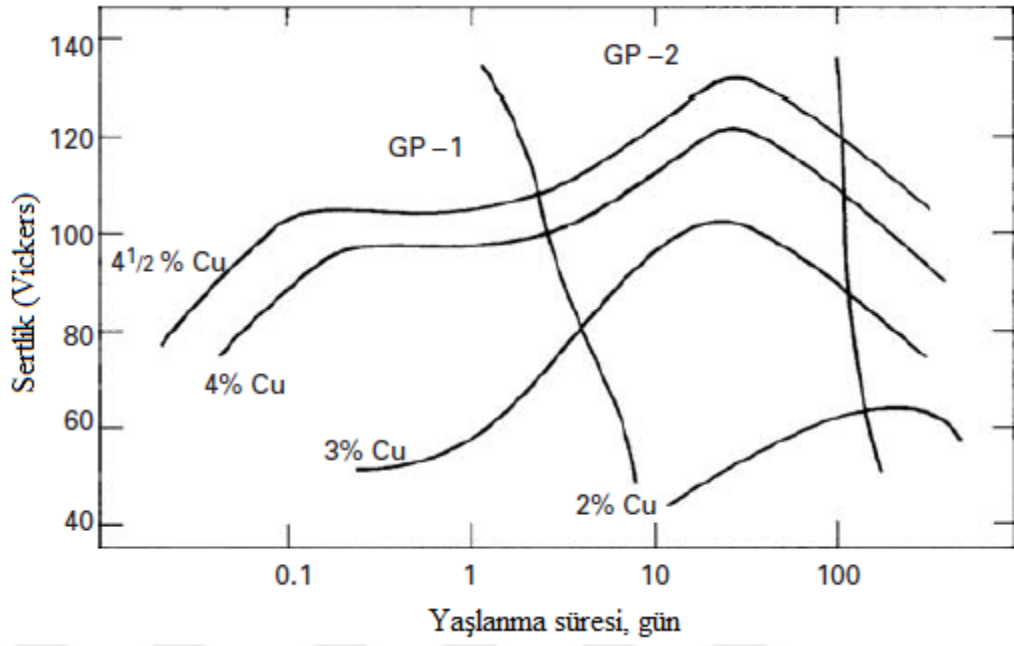
Yaşlandırma işlemi sırasında üretilen çökelti / matris arayüzünün yapısı bağdaşık (uyumlu), yarı bağdaşık (yarı uyumlu) veya bağdaşık olmayan (uyumsuz) olabilir (Şekil 2.12.) [19].



**Şekil 2.12.** Matris ve ikinci faz arasındaki farklı kristalografik ilişkiler [19]

- (a) Tam uyum.
- (b) Sınır boyunca gerilmiş ancak kesintisiz kafes düzlemleriyle uyum.
- (c) Yarı uyum, Kafes düzlemlerinin arayüz boyunca kısmi sürekliliği.
- (d) Uyumsuz denge çökeltisi,  $\theta$ ; Arayüz boyunca kafes düzlemlerinin sürekliliği yoktur.

GP bölgelerinin büyüklüğü arttıkça sertlik artar, böylece dislokasyonların partikülleri kesmesi daha da zorlaşır. Zaman geçtikçe, tutarsız denge çökeltileri ortaya çıkmaya başlar ve parçacıklar etrafındaki dislokasyonların Orowan yaylanma mekanizması işler hale gelir. Maksimum sertlik veya dayanım, uyumlu veya yarı uyumlu çökeltilerin kritik bir dağılımı ile ilişkilidir. Daha ileri yaşlanma, parçacıklar arası mesafenin artmasına neden olur ve dislokasyonların yaylanması kolaylaştıkça daha düşük bir mukavemetle sonuçlanır. Belirli koşullar altında çökeltme uniform olmayan şekilde gerçekleşebilir ve çoğunlukla tane sınırları çökeltinin neredeyse yok olduğu tane sınırı bölgesine yakın bir bölgede sonuçlanabilir. Çünkü çözünen atom sınır boyunca çökeltilerin oluşması için harcanmıştır [19]. Bu durumu gösteren, alüminyum-bakır alaşımı için yaşlanma zaman-sertlik ilişkisi Şekil 2.13.' te verilmiştir.



**Şekil 2.13.** 130 °C' de çeşitli Al-Cu alaşımlarının zamanla sertlik değişimi [19]

Maksimum mukavemet noktasında çökeltiler uyumlu, yarı uyumlu veya uyumsuz olabilirler. Yarı uyumlu ve uyumsuz olanlar dislokasyonlar tarafından kesilmez orrowan mekanizması ile bükülürler. Bu da dayanımı maksimum seviyeye çıkartır. Maksimum mukavemetten sonra yaşlandırma süresi arttıkça çökelti büyür ve çökeltiler arası mesafe de artar. Bu durumda uyumsuz arayüze sahip çökeltiler etrafında dislokasyonlar çok daha kolay bükülür. Dolayısıyla mukavemet düşer.

Çökeltilerin tane sınırlarında olması kötü değildir. Hatta tane sınırlarından fazla göç etmeleri durumunda tane sınırlarını korozyona ve yorulmaya duyarlı hale getirir.

Çökeltilerden güçlendirme mekanizması, çözünen atomların uyumlu kümelerinin oluşumunu içerir (yani, çözünen atomlar bir küme halinde toplanmıştır, ancak yine de çözücü faz ile aynı kristal yapıya sahiptir). Çözen ve çözünen atomlar arasındaki büyüklük farkı çok miktarda gerilime neden olmaktadır. Sonuç olarak, çökeltiler parçacıklarının ve daha da önemlisi uyumlu parçacıkları çevreleyen matristeki gerilme alanlarının varlığı, dislokasyonların hareketini engelleyerek ve geciktirerek daha yüksek mukavemet sağlar [13].

İnce dağılmış çökelti, dislokasyon hareketinin önünde etkili bir engel oluşturur. Çökeltilerden kaynaklanan güçlenmeyi açıklayan önemli modellerden ikisi, sırasıyla (1) kayma düzlemindeki partikülleri kesen dislokasyonları ve (2) kayma düzlemindeki partiküllerin çevresini dolaşan dislokasyonları içermektedir.. Hem çökeltinin doğasına hem de çökeltiyle matris arasındaki kristalografik ilişkiye bağlı olarak, iki sınırlayıcı durum olabilir:

1. Çökelti partikülleri dislokasyonlara nüfuz edemez.
2. Çökelti partikülleri dislokasyonlara nüfuz edebilir [19].

### **2.1.6.2 İntermetalikler**

Alüminyum döküm alaşımlarının yapısında bulunan çeşitli intermetalik parçacıklar, döküm parçaların hem mekanik, hem tribolojik özelliklerini, hem de korozyon dayanımlarını olumsuz yönde etkileyebilmektedir. Ancak her intermetalik parçacık için aynı şeyi söylenememektedir. Parçacıkların sahip olduğu sertliğe, biçimsel ve kimyasal özelliklere ve parçacıkların dağılımlarına göre ortaya çıkarttıkları etkileri değişmektedir. Bu nedenle hangi parçacıkların, ne oranda yapıda bulunmalarına izin verilmesi gerektiğinin iyi bilinmesi, dökülen parçaların özellikleri üzerinde kontrol sağlanabilmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Örneğin küresel biçime ve homojen dağılıma sahip küçük parçacıklar mekanik özellikler açısından olumlu etkiler yaratabilirken, sivri kenarlara sahip nispeten büyük parçacıklar, özellikle belli konumlarda topaklanarak ortaya çıkmışlarsa, mekanik özellikleri ciddi şekilde olumsuz etkilemektedirler. İntermetalik parçacıklar, farklı boyut ve biçimsel özelliklere sahip olacak şekilde olabilmektedir. Örneğin ötektik Si parçacıkları büyük ve iğnemi bir biçime sahip olmalarına rağmen, alaşımda bakır bulunması bu parçacıkların ince, fiber yapısına sahip olmalarını sağlayarak tribolojik özellikleri olumlu yönde etkileyebilmektedir. Alaşımda bir miktar magnezyum da varsa,  $Al_2Cu$  parçacıklarını incelterek  $Al_2CuMg$  yapısının ortaya çıkmasını sağlayabilmektedir. Genel bir kural olarak, intermetalliklerin boyutları incelidikçe mekanik özellikler üzerinde olumlu etkiler yarattıklarını söyleyenebilir. Büyük parçacıklar, sergiledikleri biçimsel özellikler nedeniyle malzemenin sadece mekanik özelliklerini değil, tribolojik özelliklerini ve korozyon dirençlerini de olumsuz yönde etkileyebilmektedirler. Bu parçacıkları inceltmenin en bilinen yolu ise soğuma hızını arttırmaktır. Soğuma hızı arttığı zaman bu parçacıkların hem inceldiklerini, hem de belli konumlarda topaklanma eğilimlerinin azaldığını ve buna bağlı olarak

malzemenin güçlendiği birçok araştırmada gözlemlenebilmektedir. Bu parçacıkların belli konumlarda toplanmak yerine homojen bir dağılım eğilimi göstermeleri sadece mekanik özellikleri değil, korozyon dayanımını da arttıran bir etki ortaya çıkarmaktadır. Tablo 2.2.' de 3xx.x alaşımlarında görülen başlıca intermetalik fazların boyutları ve biçimsel özellikleri gösterilmektedir [20].

**Tablo 2.2.** 3xx.x alüminyum alaşımlarında görülen çeşitli fazların biçimsel özellikleri [20]

Yapı	Gösterim	Boyut ( $\mu\text{m}$ )	Biçim
Si		5-12	Köşeli yumru
$\text{Al}_2\text{Cu}$	$\theta$	< 50	İğnemsî
$\text{Al}_2\text{CuMg}$	S	0,5 – 10	Düzensiz yuvarlak
$\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$	$\Omega$	0,7 – 2,7	İnce iğnemsî
$\text{Al}_5\text{Cu}_2\text{Mg}_8\text{Si}_6$	Q	< 20	Bal peteği
$\text{Al}_{12}(\text{FeMn})_3\text{Si}$	A	< 0,5	Çok yüzlü
$\text{Al}_{20}\text{Cu}_2\text{Mn}_3$	T	< 0,1	Dağıntı
$\text{Mg}_2\text{Si}$	B	~10	Katmanlı, çubuk
$\text{Al}_8\text{Mg}_3\text{FeSi}_2$	$\Pi$	< 0,5	Çin harfi

Irızalp ve Saklakoğlu 2014 yılında tikso şekillendirme ve kokil döküm yöntemleriyle üretilen A380 alaşımında  $\alpha$ -Fe ve  $\beta$ -Fe intermetaliklerinin konsantrasyon ve morfolojisine ek  $\alpha$ -Al morfolojisinin mikroyapı ve mekanik özelliklere etkisini incelemiştir. Kokil döküm yöntemi ile üretilen ürünlerde  $\alpha$ - $\text{Al}_{15}\text{Si}_2(\text{Fe,Mn})_3$  intermetalik tanecik çin yazısı morfolojisinde gözlemlenirken,  $\beta$ - $\text{Al}_5\text{FeSi}$  taneciği,  $\alpha$ -Al'nin tane sınırlarında iğne benzeri formda katılaştığı gözlemlenmiştir [21].

## 2.2 Döküm Yöntemleri

Alüminyum, döküm metalleri arasında tüm döküm yöntemlerinde kullanılabilir az sayıdaki metallerden biridir. Alüminyum döküm yöntemleri kullanım sırasına göre; basınçlı döküm, kokil döküm, kum kalıba döküm, alçı kalıba döküm ve hassas dökümdür. Alüminyum sürekli dökümde de dökülebilmektedir.



Belirli bir alüminyum alaşımlı parçanın üretilmesi için bir döküm işleminin seçimini etkileyen birçok faktör vardır. Kum, kalıcı kalıp ve dökümde önemli faktörlerin bazıları Tablo 2.3.' te verilmiştir [5].

**Tablo 2.3.** Alüminyum alaşımları için döküm işlemini etkileyen faktörler [5]

Faktör	Döküm Prosesi		
	Kum Kalıba Döküm	Kokil Kalıba Döküm	Basınçlı Döküm
Ekipman Maliyeti	Sadece birkaç ürün gerekliyse en düşük maliyetli	Basınçlı döküme göre daha düşük	En yüksek
Döküm Hızı	En düşük hız	Yaygın olarak 11 kg/h, daha yüksek hız mümkün	Yaygın olarak 4,5 kg/h, 45 kg/h mümkün
Döküm Parça Büyüklüğü	Herhangi bir döküm yönteminin en büyüğü	Makine büyüklüğü ile sınırlı	Makine büyüklüğü ile sınırlı
Dış ve İç Şekil	Maça gerektiren karmaşık şekiller için en uygun	Basit kum maçaları kullanılabilir, ancak takılması kum dökümlere göre daha zordur	Kalıp geometrisine uygun kalıpla beraber çalışan metal maçalar kullanılabilir
Minimum Duvar Kalınlığı	3.0-5.0 mm gerekli, Nominali 4.0 mm	3.0-5.0 mm gerekli, Nominali 3.5 mm	1.0-2.5 mm, döküm boyutuna bağlıdır
Maça Tipi	Karmaşık kum maçalar kullanılabilir.	Yeniden kullanılabilir çelik maçalar veya yeniden kullanılmayan kum maçalar kullanılabilir.	Sadece kalıp geometrisine uygun kalıp ile birlikte çalışacak çelik maçalar kullanılabilir.

Faktör	Döküm Prosesi		
	Kum Kalıba Döküm	Kokil Kalıba Döküm	Basınçlı Döküm
Elde Edilebilir Tolerans	En zayıf; En iyi doğrusal tolerans 300 mm / m'dir	En iyi doğrusal tolerans 10 mm / m'dir	En iyi doğrusal tolerans 4 mm / m'dir
Yüzey Pürüzlülüğü	6.5-12.5 µm	4.0-10 µm	1.5 µm
Gaz porozitesi	İyi teknikle mümkün olan en düşük porozite	En iyi basınç sızdırmazlığı, iyi teknikle düşük porozite	porozite mevcut olabilir.
Soğuma Hızı	0.1-0.5 °C/s	0.3-1.0 °C/s	50-500 °C/s
Tane Boyutu	Kaba	İnce	Yüzeyde çok ince
Mukavemet	En düşük	Mükemmel	En yüksek, genellikle döküm halinde kullanılır
Yorulma Özelliği	İyi	İyi	Mükemmel
Aşınma Dayanımı	İyi	İyi	Mükemmel
Genel Kalite	Döküm tekniğine bağlı	En yüksek kalite	Tolerans ve tekrar edilebilirlik çok iyi
Notlar	Boyut, şekil ve dahili konfigürasyonlar konusunda çok yönlü	...	Hızlı üretim oranları için mükemmel

En önemli döküm işlemi faktörleri:

- Fizibilite ve maliyet faktörleri
- Kalite faktörleri

Fizibilite açısından, mevcut yöntemlerden herhangi biriyle birçok alüminyum alaşımlı döküm üretilebilir. Ancak, çok sayıda döküm için, boyutlar veya tasarım özellikleri en iyi döküm yöntemini otomatik olarak belirler.

Belirli bir parça için iki veya daha fazla döküm yöntemi uygun olduğunda, yöntem maliyetler tarafından belirlenir. Genel bir kural olarak, takım (kalıplar, kalıplar ve yardımcı ekipman) ne kadar ucuzsa, her bir parçanın üretilmesinin maliyeti o kadar artar. Bu nedenle, parça sayısı bir döküm yöntemi seçiminde önemli bir faktördür. Eğer sadece birkaç parça yapılacaksa, her parçanın döküm maliyeti çok yüksek olsa bile, en ucuz takımı içeren metod kullanılmalıdır. Diğer taraftan çok büyük üretim adetleri için, takım maliyetinin çok sayıda döküm parça ile paylaşıldığı durumlarda, dayanıklı takım kullanımı genellikle parça başına maliyeti düşürür. Kokil kalıba döküm ve basınçlı dökümler bu duruma örnektir.

Döküm yönteminin seçiminde kalite faktörleri de önemlidir. Kalite faktörü döküm yöntemleri için ele alındığında hem sağlamlık derecesini (poroziteden, çatlamadan ve yüzey kusurlarından kurtulma) hem de mekanik özellik seviyelerini (dayanım ve süneklik) belirtir.

"Yapı İncelemesi" bölümündeki açıklamalardan, yüksek soğutma oranının iyi döküm kalitesi elde etmede büyük önemi olduğu açıktır.

Tablo 2.4. çeşitli döküm işlemleri için soğutma oranlarının özelliklerini göstermektedir.

**Tablo 2.4.** Döküm proseslerine göre soğuma oranı ve dentrit kol mesafeleri [5]

Döküm Prosesi	Soğuma Oranı, °C/(s)	Dentrit Kol Mesafesi, mm
Alçı, Kuru Kum	0,05-0,2	0,1-1
Yaş Kum, Kabuk	0,1-0,5	0,05-0,5
Kokil Döküm	0,3-1	0,03-0,07
Basınçlı Döküm	50-500	0,005-0,015
Sürekli Döküm	0,5-2	0,03-0,07

### 2.2.2 Kokil Döküm

Endüstride kalıcı kalıba döküm olarak bilinen bu yöntem daha ziyade karmaşık şekilli, dar boyut toleransları olan ve çok sayıda üretilmesi istenen parçalar için kullanılır. Dökülecek metalin gerektirdiği özelliklere sahip olması gereken kalıp malzemesi olarak genellikle özel kalite dökme demir veya çelik kullanılır. Düşük sıcaklıkta ergiyen metallerin dökümü için bronzda kullanılmaktadır. Kokil dökümde tek bir kalıpla demir esaslı malzemelerden 3.000 ila 10.000 adet, alüminyum gibi düşük ergime sıcaklıklı metallere 100.000 adete kadar parça dökülebilir. Metal kalıba döküm yönteminde katılma hızı kum kalıplardan daha yüksek olduğu için bu yöntemle dökülen parçaların içyapısı (ötektik ve diğer fazlar) incedir ve tane boyutu küçüktür. Boyut hassasiyeti  $\pm 0,25$  mm olup parçaların yüzey düzgünlüğü ilave işlem gerektirmeyecek kadar yüksektir.

Kokil kalıplar genellikle açılıp kapanan iki veya daha çok parçadan oluşur. Kalıp kapandıktan sonra oluşan boşluğa sıvı metal dökülür ve katılma sonrası kalıp açılarak parça çıkarılır. Kalıp malzemesi geçirgen olmadığından gaz çıkışı için hava kanallarının açılması gerekir.

Kokil kalıba dökümün üstünlükleri şöyle sıralanabilir.

- İnce taneli içyapı sayesinde mekanik özellikler yüksektir.
- Dar boyut toleransları sağlanabilir. Karmaşık parçaların üretimi mümkündür.
- Parça yüzeyleri kaliteli olup, temizleme masrafları düşüktür.

Yöntemin sakıncaları ise şunlardır.

- Kokil kalıba döküm ancak seri üretimde ekonomiktir.
- Bu yöntemle her malzeme dökülemez.
- Büyük parçaların dökümüne uygun değildir.

Genellikle demir dışı metallerin dökümünde kullanılan kokil döküm yöntemiyle üretilen parçalara örnek olarak soğutucu kompresör gövdeleri, hidrolik fren silindirleri, biyel kolları, motor pistonları gösterilebilir [22].

Kokil döküm yöntemi ile üretilen parçalarda hatasız döküm, pratikte mümkün olmasa da, daha büyük ölçüde hatalar, döküm işlemini büyük ölçüde etkileyebilecek

optimum proses parametre değerleri kullanılarak en aza indirilebilir. Kokil dökümde ürün kalitesini etkileyebilecek döküm parametreleri aşağıda verilmiştir.

Döküm sıcaklığı; genellikle 650 ile 800 °C arasında değişir. Alüminyum alaşımının dökümünde akışkanlık, yüksek oranda döküm sıcaklığına bağlıdır. Genel olarak, yüksek sıcaklıkta daha iyi bir akışkanlık, döküm sıcaklığının artmasıyla, azalan viskozite ve erimiş metalin yüzey gerilimi ile bağlantılıdır, bu da artan doldurma hızına yol açar.

Ön ısıtma sıcaklığı; kokil dökümde ön ısıtma, sıcaklık gradyanlarının oluşma olasılığını ortadan kaldırmak için yapılır. Ön ısıtma sıcaklığı belirli bir sıcaklık üzerine çıkarılırsa kalıp kaplaması etkilenebilir ve parça yüzey kalitesinde düşüş gözlemlenebilir. Ön ısıtma sıcaklığı belirli bir sıcaklık altında kalırsa katılaşmayı etkileyen soğutma etkisine neden olabilir ve büzülme gibi hatalara sebep olabilir. Ürün kalitesinin yüksek tutulabilmesi için en önemli ön koşul kalıp gözlerinin optimum sıcaklıkta tutulmasıdır.

Yolluk ve besleyicinin tasarımının seçimi; Yolluk, bir sıvı metal hazne görevi görür, katılaşma sonuna kadar sıvı metal beslenmesini sağlar, ayrıca yönlendirme katılaşmasına neden olan bir sıcaklık gradyanı yaratarak bir ısı haznesi görevi görür.

Gaz giderme malzeme ve süresi; gazdan arındırma için kullanılan gaz çoğunlukla inert gaz olan argon ve azottur. Ergitme işleminde sonra “gaz alma işlemine” geçilmelidir. Alüminyum dökümlerde gözeneklilik kontrolü aşağıdaki yollarla yapılabilir. Erimiş metaldeki hidrojen içeriği, gaz giderme süresini artırarak azalır. Gaz alma işlemi optimum sıcaklıkta yapılmalıdır.

Kalıp kaplama malzemesi ve kalınlığı; düzgün yüzey kalitesi elde etmek, kalıbın erimiş metale doğrudan maruz kalmasını önlemek ve doğrudan soğuma etkisinden kaçınmak için kokil dökümde kalıplara kaplama yapılır. Kalıp kaplama için kullanılan malzeme genellikle kalsiyum karbid ve silikon karışımı ve grafitir [23].

### **2.2.3 Döküm Hataları**

Kokil dökümlerde meydana gelebilecek hatalar, gözeneklilik (çekme boşlukları, gaz boşlukları), cüruf, metalik olmayan inklüzyonlar, eksik döküm, soğuk

birleşme, çarpılma ve çatlama. Alüminyum alaşımlı dökümler bu kusurların tümüne tabidir [24].

Hata oranı parça boyutu ve biçimi, malzeme ve döküm uygulamalarına bağlı olarak %30' a kadar varabilir. Üretimin değişik aşamalarında ortaya çıkan döküm hataları aşağıda belirtilen olaylardan biri veya birkaçındaki yanlışlardan kaynaklanmaktadır;

- Parça tasarımı,
- Model tasarımı ve üretimi,
- Kalıp tasarımı, malzemeleri ve kalıplama işlemi,
- Döküm işlemi,
- Malzeme seçimi,
- Bitirme işlemleri.

Döküm yöntemiyle üretilen parçalarda rastlanan kusurlar ve nedenleri aşağıda özetlenmiştir.

#### 1. Çekme boşlukları

Katılma sırasında sıvı metal ile beslenemeyen kalın kesitlerde oluşan ve genellikle cidarları pürüzlü olan boşluklardır. İç ve dış çekme boşlukları genellikle kalıp ve parça tasarımındaki hatalardan kaynaklanır. Ayrıca alaşımların dentritik cephede katılma sırasında belirli koşullar altında mikro boşluklarda ortaya çıkabilir.

#### 2. Gaz boşlukları

Kalıp boşluğunda var olan veya sıvı metalde çözünmüş gazların metali ve kalıbı terk edememesi sonucu oluşur. Çekme boşluklarından farkı cidarların düzgün oluşudur. Metal içinde çözünmüş gaz miktarının yüksek ve kalıbın gaz geçirgenliğinin düşük olması bu hatanın başlıca nedenleridir.

#### 3. Soğuk birleşme

Kalıp içinde önceden katılmış bölgelerin daha sonra gelen sıvı metal cephesi ile birleştiği ve aradaki oksit tabakası nedeniyle kaynamanın tam olmadığı bölgelerde görülür. Bu hatanın nedenleri arasında metalin dökümündeki kesiklikler,

yolluk sisteminin yetersizliği nedeniyle besleme hızının yavaş olması döküm sıcaklığının düşük ve et kalınlıklarının ince olması sayılabilir.

#### 4. Eksik Döküm

Dökülen sıvı metalin kalıbı tam doldurmaması sonucu oluşur. Döküm sıcaklığının düşük olması, gaz geçirgenliğinin yeterli olmayışı, parça kesitlerinin kullanılan kalıp türü ve malzeme için çok ince seçilmiş olması başlıca nedenleridir.

#### 5. Yabancı Malzemeler

Cüruf, oksit ve kum parçacıkları gibi yabancı maddelerin sıvı metale karışmasıyla, genellikle parça yüzeyinde gözle görülebilir kusurlar ortaya çıkar. Potanın kirliliği, döküm sırasında gerekli özenin gösterilmemesi, kalıp boşluğunda bağlanmamış kum bulunması, yolluk sisteminin yanlış tasarımı ve gevşek kalıplama gibi çok değişik nedenlerle oluşabilir.

#### 6. Çatlaklar ve çarpılmalar

Katılma tamamlanmış, ancak hala sıcak olması nedeniyle yeterli dayanıma sahip olmayan parçalar kalıp içinde soğurken büzülme serbestçe gerçekleşemez, yani iç gerilmeler ortaya çıkar ise, kritik kesitlerde sıcak yırtılmalar oluşur. Yırtılma yüzeyi pürüzlü ve oksitlenmiş bir görünümdedir. Bu iç gerilmeler daha düşük sıcaklıklarda soğuk çatlaklara veya çarpılmalara da neden olabilirler. Çarpılmaların bir diğer nedeni de değişik kalınlıklardaki kesitlerin soğuma hızları arasındaki farklılıklardır [22].

Döküm parçaların radyoskopik yöntemle değerlendirilmesinde kullanılan ASTM E 155 standardında verilen X-Ray analizinde karşılaşılan döküm hatalarına ait açıklamalar aşağıdadır.

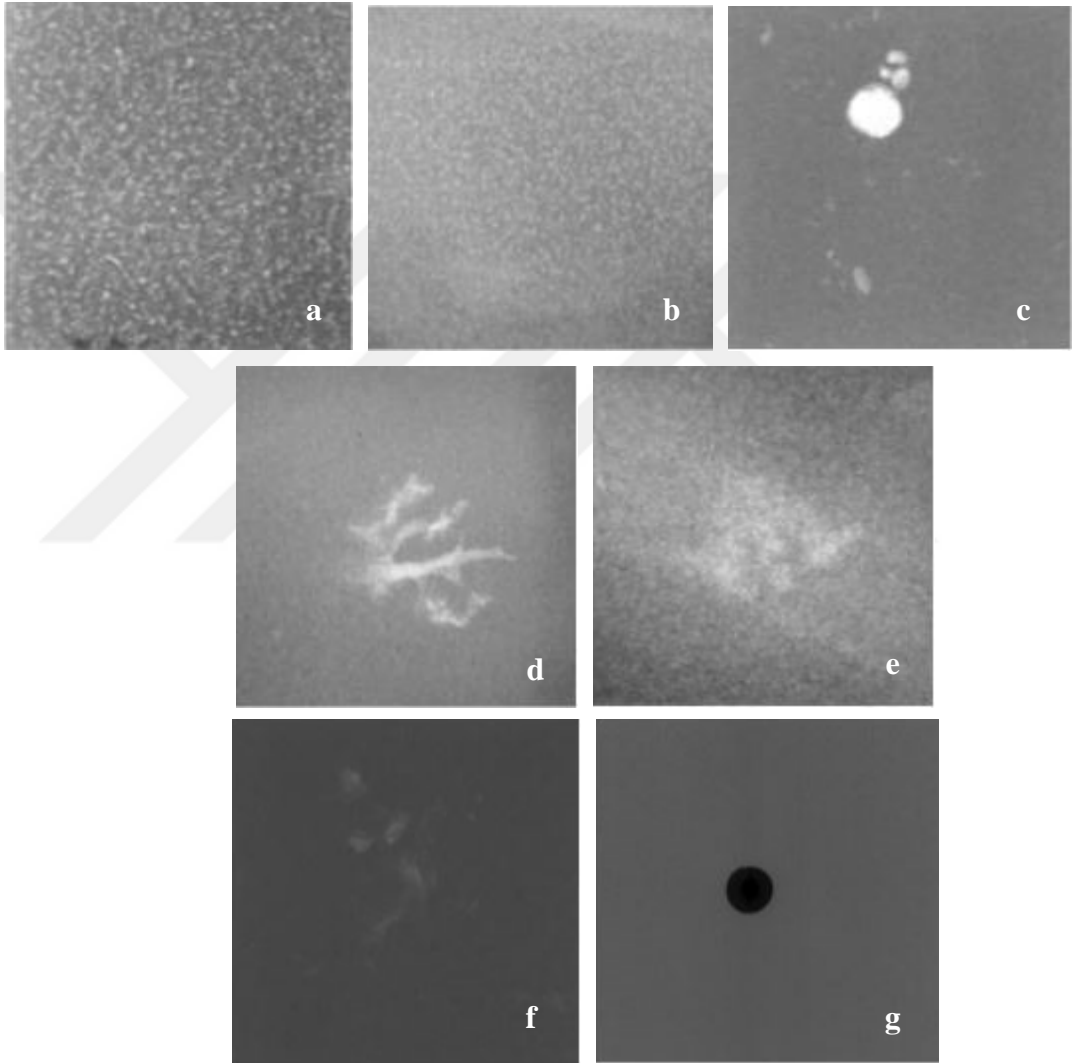
Yabancı maddeler: Malzemenin kalınlığındaki değişikliklere veya boşluklara karşılık gelmeyen, izole, düzensiz veya uzun film yoğunluğu değişimleri olarak görünür. Kum, cüruf, oksit veya cüruf veya farklı yoğunluktaki metal varlığından dolayı olabilirler.

Gaz boşlukları: Tek tek, kümeler halinde oluşan veya döküm boyunca dağılmış yuvarlak veya uzun, pürüzsüz kenarlı koyu noktalar gibi görünür.

Gaz porozitesi: Genellikle tüm döküm boyunca dağılan çok küçük boşluklarına karşılık gelen yuvarlak veya uzun karanlık noktalar olarak görünür.

Çekinti boşluğu: Tüy benzeri çizgilere benzeyen uzun bir görünüme sahip çekinti boşluğudur.

Süngerimsi çekinti boşluğu: Süngerimsi bir görünüme sahip çekinti boşluğudur. Çekinti boşluğuna göre daha iri ve eş eksenli görünüme sahiptirler [25].



**Şekil 2.14.** ASTM E 155 standardında belirtilen hata görselleri [25]

- a Uzamış gaz porozitesi,
- b Yuvarlak gaz porozitesi,
- c Gaz boşluğu,
- d Çekinti boşluğu,
- e Süngerimsi çekinti boşluğu,
- f Düşük yoğunluklu yabancı madde
- g Yüksek yoğunluklu yabancı madde



## 2.3 Isıl İşlem

Isıl işlem, en geniş anlamıyla, mekanik özelliklerin, metalurjik yapının veya metal bir ürünün kalıntı gerilme durumunun değiştirilmesi amacıyla gerçekleştirilen kontrollü ısıtma ve soğutma işlemlerinden herhangi birini ifade eder. Isıl işlem terimi alüminyum alaşımlarına uygulandığında, sıklıkla kullanımı, yaşlandırma ile sertleşebilen dövme ve döküm alaşımlarının dayanımını ve sertliğini arttırmak için kullanılan spesifik işlemlerle sınırlandırılmaktadır.

Alüminyum alaşımlarındaki bazı elementlerin varlığı mukavemeti ve sertliği ısıtma işlemi ile arttırabilen metalik bir yapı meydana getirir. Bazen de alaşım elementi olarak kullanılan elementler ısıtma işlemi uyumsuzluk yaratır. Bu nedenle alaşımlar, ısıtma işlemi karşı gösterdikleri hassasiyete göre ısıtma işlemi görebilen ve ısıtma işlemi görmeyen alaşımlar olarak ikiye ayrılır. Mukavemeti azaltmak ve sünekliği arttırmak için ısıtma (tavlama) her iki tip alaşımda da kullanılır; metalurjik reaksiyonlar, alaşım tipine ve istenen yumuşama derecesine göre değişebilir [13].

### 2.3.2 Alüminyum Alaşımlarının Isıl İşlemi

Alüminyum alaşımlarının mukavemetini arttırmak için ısıtma işlemi üç aşamada gerçekleştirilir.

- Solüsyona alma ısıtma işlemi: çözünür fazların çözünmesi
- Su verme: aşırı doygunluğun gelişimi
- Yaşlandırma: çözünen atomların oda sıcaklığında (doğal yaşlanma) veya yüksek sıcaklıkta (yapay yaşlanma) yaşlandırılması [13]

#### 2.3.2.1 Solüsyona Alma

Yaşlandırma veya çökelme sertleşmesi reaksiyonundan yararlanmak için önce katı bir çözelti üretmek gerekir. Bunun gerçekleştirildiği sürece solüsyona alma ısıtma işlemi denir ve amacı, alaşımdaki çözülebilir sertleştirme elemanlarının azami pratik miktarlarını katı çözelti haline getirmektir. İşlem, alaşımın yeterince yüksek bir sıcaklıkta ve neredeyse homojen bir katı çözelti elde etmek için yeterince uzun bir süre boyunca ısıtılmasından oluşur. Solüsyona alma ısıtma işlemi sıcaklığı, alaşımın bileşim limitleri ve istenmeyen sıcaklık değişimleri için verilen toleransa göre belirlenir. Normalde listelenen aralıklar, nominal değerden  $\pm 6$  °C değişiklik göstermesine rağmen, bazı yüksek alaşımlı, kontrollü tokluk ve yüksek mukavemetli alaşımlar, sıcaklığın daha kısıtlayıcı sınırlar içinde kontrol edilmesini gerektirir.

Solvus ve ötektik erime sıcaklıkları arasında daha fazla sıcaklık aralığına sahip alaşımlar için daha geniş aralıklar kullanılabilir [13].

### **2.3.2.2 Su Verme**

Pek çok açıdan ısıtma işlemi operasyonları sırasındaki en kritik adımdır. Su vermenin amacı, çözelti ısıtma işlemi sıcaklığında oluşturulmuş katı çözeltiyi, genellikle oda sıcaklığına yakın bir miktar düşük sıcaklığa hızla soğutmak suretiyle korumaktır [13].

#### **2.3.2.2.1 Su Verme Hızının Özelliklere Etkisi**

Geniş bir genelleme olarak, elde edilebilecek en yüksek dayanım ve en iyi tokluk kombinasyonları, en hızlı su verme oranları ile ilişkili olanlardır. Korozyona ve gerilme-korozyonuna karşı dayanıklılık, genel olarak maksimum su verme hızı ile geliştirilmiş olan diğer özelliklerdir [13].

### **2.3.2.3 Yaşlandırma**

Solüsyona alma ve su vermeden sonra, oda sıcaklığında (doğal yaşlanma) veya bir yaşlandırma ısıtma işlemiyle (yapay yaşlanma) sertleşme sağlanır. Bazı alaşımlarda, birçok uygulama için yeterli özelliklere sahip kararlı ürünler elde etmek için birkaç gün içinde oda sıcaklığında yeterli çökeltme meydana gelir [13].

### 3 MATERYAL VE YÖNTEMLER

#### 3.1 Materyal

Bu tez çalışmasında alüminyum alaşımlarından AlSi5Cu3Mg alaşımı kullanılmıştır. AlSi5Cu3Mg alaşımı belirtilen analiz limitleri içerisinde külçe olarak alınmıştır. Alaşıma ait TS EN 1706’ da verilen kimyasal analiz limitleri Tablo 3.1.’ de verilmiştir.

**Tablo 3.1.** AlSi5Cu3 kimyasal analiz limitleri [26]

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Pb	Sn	Ti	Diğerleri <sup>a,g</sup>		Alüminyum
											Her Biri	Toplam	
4,5-6,0	0,60 (0,50)	2,6-3,6	0,55	0,15-0,45 (0,20-0,45)	-	0,10	0,20	0,10	0,05	0,25 (0,20)	0,05	0,15	Kalan

a “Diğerleri”, Na, Sr, Sb ve P gibi elementlerin değiştirilmesini veya rafine edilmesini içermez.  
g “Diğerleri”, bu Tabloda listelenmemiş veya belirli değerleri olmayan tüm unsurları içerir.

Bu çalışmada kullanılan AlSi5Cu3Mg alaşımı kimyasal analiz değerlerine, otomotivde kullanılan fren sistemleri için talep edilen mekanik gereksinim değerlerini elde etmek amacıyla sınırlandırma getirilmiştir. Kullanılan alaşıma ait limit değerler Tablo 3.2.’ de verilmiştir.

**Tablo 3.2.** Sınırlandırılmış AlSi5Cu3Mg kimyasal analiz limitleri

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Pb	Sn	Ti	Diğerleri		Alüminyum
											Her Biri	Toplam	
4,5 7,0	- 0,85	2,6 3,6	- 0,60	0,15 0,40	-	- 0,30	0,40	0,10	0,05	- 0,20	- 0,05	- 0,15	Kalan

#### 3.2 Yöntem

Çalışmada kullanılan numuneler Özay Döküm İmalat Sanayi ve Tic. A.Ş. bünyesinde DIN 50125 standardında belirtilen A tipi çekme çubuğu ölçülerine uygun çekme çubuğu kalıbıyla kokil döküm yöntemi ile üretilmiştir.

Numunelerin üretimi için kullanılacak malzeme belirtilen kimyasal analiz limitleri içerisinde olacak şekilde külçe halinde satın alınmıştır. Külçelerin ergitme işlemi ergitme ocağında gerçekleştirilmiştir. Ergiyen metalin bekletme ocağına transferi gerçekleştirildikten sonra bekletme ocağı sıcaklık değerleri sırasıyla 710°C, 715°C ve 720°C’ ye sabitlenerek 3 grup numunenin dökümü gerçekleştirilmiştir.

Döküm sırasında sıcaklık kontrolü bekletme ocağı içerisinde bulunan termokupl aracılığıyla bekletme ocağına ait dijital ekrandan kontrol edilmiş ek olarak K tipi termokupl aracılığıyla ergiyik madenden sıcaklık ölçümü ile maden sıcaklığı kontrol altında tutulmuştur.

Bekletme ocağına alınan sıvı metal (200 kg) içerisine 3 ad AlSr15 (150 g/ad) ve 2 ad AlTi5B1(100 g/ad) ilavesi yapılmıştır. Çan yardımıyla 2 ad degaser (200 g/ad) sıvı metalin içerisine daldırılıp, metal içindeki yabancı maddelerden temizlenmesi sağlanarak, metal yüzeyine çıkan cüruf tabakası temizlenmiş ve sıvı metal 5 dk dinlendirilmiştir.

Kalıp hazırlığı aşamasında kalıp yüzeyi kumlanıp, yüzey oksit ve yabancı maddelerden temizlenmiştir. Kaplama için kalıp, şalama ile 180°C' ye kadar ısıtılmıştır, kalıbın sıcaklık kontrolü lazer pirometre ile yapılmıştır. Kalıbın yolluk ve besleyici kısımları kaplama boyası ile en az 2 mm en fazla 3 mm olacak şekilde kaplanmıştır. Kalıbın iş yüzeyi de kalıp boyasıyla tabanca yardımıyla püskürtme şeklinde kaplanmıştır.

Kalıp hazırlığı önceden yapılan çekme çubuğu döküm kalıbının kalıp sıcaklığının döküm aşamasında en az 260°C en fazla 300°C sıcaklıkta olması sağlanmıştır. Hazırlanan sıvı metalin, döküm kalıbına transferi döküm kepçesi yardımıyla yapılmıştır. Döküm kalıbının içerisine yeterli miktarda sıvı metal boşaltılarak 50 sn kadar bekletilip, katılaşması sağlanmıştır. Kalıp açılarak içindeki numuneler çıkartılmıştır. Tüm numune gruplarının dökümünde anlatılan işlemler tekrarlanmıştır.

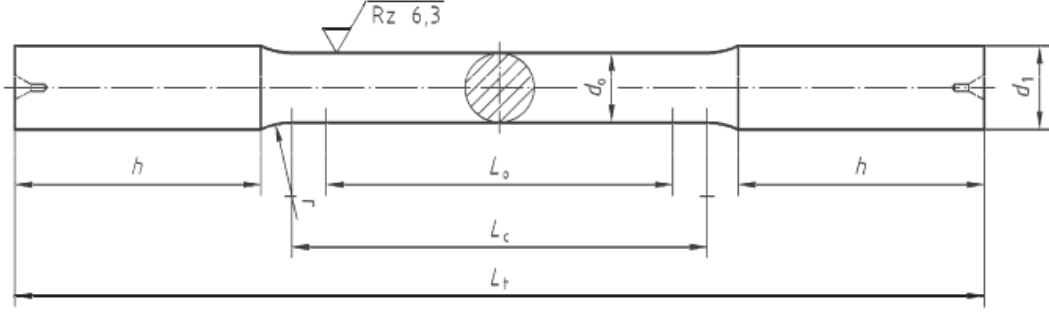
Numunelerin üretiminde kullanılan çekme çubuğu döküm kalıbına ait görsel Şekil 3.1.' de, kokil döküm prosesine ait görseller Şekil 3.2.' de, çekme çubuğuna ait teknik çizim Şekil 3.3.' te verilmiştir.



Şekil 3.1. Çekme çubuğu kalıbı görseli



Şekil 3.2. Kokil Döküm Prosesi



**Şekil 3.3.** A tipi test parçası, dairesel kesitli, pürüzsüz, silindirik uçlu kama saplarında sıkma için

$d_0$	test parçasının çapı	$L_0$	orijinal ölçü uzunluğu ( $L_0 = 5 d_0$ )
$d_1$	kavrama uçlarının çapı ( $\geq 1,2 d_0$ )	$L_c$	paralel uzunluk ( $L_c \geq L_0 + d_0$ )
$h$	kavrama uçlarının uzunluğu	$L_t$	test parçasının toplam uzunluğu

Numunler  $d_0$  12 mm olarak dökülmüştür. Çekme çubuklarının ölçü uygunluğu ve yüzey kalitesini sağlamak için döküm çubuklar CNC tezgahında  $d_0$  10 mm olacak şekilde işlenmiştir.

**Tablo 3.3.** A tipi test parçası için ölçüler [27]

$d_0$	$L_0$	$d_1$ $\geq$	$r$ min.	$h$ min.	$L_c$ min.	$L_t$ min.
10	50	12	8	35	60	138
12	60	15	9	40	72	162

710, 715 ve 720 °C olmak üzere 3 ayrı döküm sıcaklığında elde edilen numuneler 495 °C' de 4 ve 8 saat olmak üzere iki farklı sürede solüsyona alma işlemi uygulanarak, su verme işlemi yapılmıştır. Numuneler yine aynı fırında 170 °C' de 6, 7, 8, 9 ve 10 saat olmak üzere farklı sürelerde yapay yaşlandırma işlemine tabi tutulmuştur. Bir grup numune yapay yaşlandırma yapılmadan, 6 gün doğal yaşlandırma uygulanarak (T4 ısıl işlemi) teste tabi tutulmuştur. Isıl işlemler, MCBÜ Makine Mühendisliği Laboratuvarında bulunan Protherm marka fırında yapılmıştır.

Numunelerin üretimi için kullanılan parametreler Tablo 3.4, 3.5, ve 3.6' da gösterilmiştir. Yapılan tüm analizlerin değerlendirmesinde Tablo 3.4, 3.5, ve 3.6' da verilen numune numaraları kullanılmıştır.

**Tablo 3.4.** 710 °C' de dökülen çekme çubukları için uygulanan ısı işlem süreleri

Numune No	Döküm Sıcaklığı (°C)	Solüsyona Alma Sıcaklığı (°C)	Bekleme Süresi (Saat)	Su verme	Yaşlandırma Sıcaklığı (°C)	Bekleme Süresi (Saat)
1-1	710	495	4	+	170	0
1-2	710	495	4	+	170	6
1-3	710	495	4	+	170	7
1-4	710	495	4	+	170	8
1-5	710	495	4	+	170	9
1-6	710	495	4	+	170	10
1-7	710	495	8	+	170	0
1-8	710	495	8	+	170	6
1-9	710	495	8	+	170	7
1-10	710	495	8	+	170	8
1-11	710	495	8	+	170	9
1-12	710	495	8	+	170	10

**Tablo 3.5.** 715 °C' de dökülen çekme çubukları için uygulanan ısı işlem süreleri

Numune No	Döküm Sıcaklığı (°C)	Solüsyona Alma Sıcaklığı (°C)	Bekleme Süresi (Saat)	Su verme	Yaşlandırma Sıcaklığı (°C)	Bekleme Süresi (Saat)
2-1	710	495	4	+	170	0
2-2	710	495	4	+	170	6
2-3	710	495	4	+	170	7
2-4	710	495	4	+	170	8
2-5	710	495	4	+	170	9
2-6	710	495	4	+	170	10
2-7	710	495	8	+	170	0
2-8	710	495	8	+	170	6
2-9	710	495	8	+	170	7
2-10	710	495	8	+	170	8
2-11	710	495	8	+	170	9
2-12	710	495	8	+	170	10

**Tablo 3.6.** 720 °C' de dökülen çekme çubukları için uygulanan ısıtıl işlem süreleri

Numune No	Döküm Sıcaklığı (°C)	Solüsyona Alma Sıcaklığı (°C)	Bekleme Süresi (Saat)	Su verme	Yaşlandırma Sıcaklığı (°C)	Bekleme Süresi (Saat)
3-1	720	495	4	+	170	0
3-2	720	495	4	+	170	6
3-3	720	495	4	+	170	7
3-4	720	495	4	+	170	8
3-5	720	495	4	+	170	9
3-6	720	495	4	+	170	10
3-7	720	495	8	+	170	0
3-8	720	495	8	+	170	6
3-9	720	495	8	+	170	7
3-10	720	495	8	+	170	8
3-11	720	495	8	+	170	9
3-12	720	495	8	+	170	10

### 3.2.1 Kimyasal Analiz

Kimyasal analiz doğrulaması için döküm sırasında erimiş madenden alınan analiz numuneleri Özay Döküm İmalat Sanayi ve Ticaret A.Ş laboratuvarında bulunan Spektromax F06 spektrometre cihazı kullanılmıştır. Her bir döküm sıcaklığı için analiz yapılarak alaşım doğrulanmıştır.

### 3.2.2 X-Ray Analizi

Döküm numunelerin olası döküm hatalarının kontrolü için Özay Döküm İmalat Sanayi ve Ticaret A.Ş laboratuvarında bulunan Bosello SRE M@X 70-120 X-Ray radyoskopi cihazı kullanılmıştır. Numunelerin X-Ray analizinde ASTM E 155 standardı referans alınmıştır. ASTM E 155' e göre 6,35 mm - 12,7 mm kalınlık aralığındaki dökümlerde 1 / 4 " radyografilerinin kullanılması amaçlanmıştır [25].

### 3.2.3 Çekme Testi

Mekanik özelliklerin tayini için çekme testi MCBÜ Makine Mühendisliği Laboratuvarında bulunan Schimadzu marka 100kN kapasiteli çekme cihazında videoekstansometre kullanılarak yapılmıştır. Çekme testi ile malzemelerin çekme



mukavemeti ve % uzama değerleri tespit edilmiştir. Çekme testlerinde en az 3 adet numune kullanılmıştır. Deneyle sırasında uygunsuz bölgeden kopan test çubukları sonuçlara dahil edilmemiştir. Verilen ortalama mekanik test sonuçları uygun sonuçlanan 3 adet test numunesinin sonuçlarının ortalamasıdır. Bu durum deney sonuçlarını güvenilir kılmaktadır.

#### **3.2.4 Sertlik Testi**

Sertlik testi hem Brinell hem de Vickers mikrosertlik yöntemleriyle uygulanmıştır. Brinell sertliğinin ölçümü için zay Döküm bünyesinde bulunan AFFRI marka sertlik ölçüm cihazı ve mikrosertlik için MCBÜ Makine Mühendisliği Laboratuvarında bulunan mikrosertlik cihazı kullanılmıştır. Brinell sertlik yönteminde 62,5 kgf, 2,5 bilya çapı kullanılmıştır. Vickers mikrosertlikte 10 gf uygulanmıştır. Brinell sertlik ile malzemenin genel sertliği hakkında bilgi sahibi olunurken, Vickers mikrosertlik ile de  $\alpha$  fazlarının döküm ve ısıl koşullarına göre sertlik değişimleri tespit edilebilmiştir.

#### **3.2.5 AlSi5Cu3Mg Alaşımının JmatPro Yazılımı İle Döküm ve Isıl İşlem Sonrası Simülasyon**

JMatPro yazılımı, çok bileşenli alaşımların özelliklerini hesaplayan simülasyon yazılımıdır. Yazılım, halihazırda hesaplanmış malzeme karakterizasyon verilerini içeren bir veri tabanı değildir ancak literatürde doğrulanmış fiziksel malzeme modellerini içerir. JMatPro, C/C ++ kullanarak hesaplama modülleri içeren Java tabanlı bir programdır. JMatPro kullanarak; kararlı ve faz dengesi, katılaşma davranışı ve özellikleri, mekanik özellikler, termo-fiziksel ve fiziksel özellikler, faz dönüşümleri, kimyasal özellikler hesaplanabilmektedir [28].

JmatPro yazılımının bu avantajları göz önünde bulundurularak, bu yazılım aracılığıyla malzemenin kimyasal bileşimi ve kokil döküm prosesinde kullanılan parametreler ile döküm sonrası ve ısıl işlem sonrası simülasyonu yapılmıştır.

#### **3.2.6 Mikroyapı Analizi**

Mikroyapı analizi için numune hazırlık aşamasında 600, 800, 1000 ve 1200 gritlik zımparalar kullanılmıştır. Zımpara sonrasında kaba parlatma ve ince parlatma yapılmıştır. Numunelerin dağlanması Keller zltisi kullanılmıştır.

Mikroyapı analizi için MCBÜ Makine Mühendisliği Laboratuvarında bulunan optik mikroskop (Nikon Eclipse LV150N) ile incelemeler gerçekleştirilmiştir.



## 4 ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Çalışma kapsamında, AlSi5Cu3Mg alaşımı ile kokil döküm yöntemiyle farklı sıcaklıklarda dökülen çekme çubukları farklı sürelerde T6 ısıl işlemine tabi tutulmuş, numuneler üzerinde mekanik ve mikroyapı analizleri yapılmıştır.

### 4.1 Kimyasal Analiz Sonuçları

Çalışmada 710, 715 ve 720 °C olmak üzere 3 farklı döküm sıcaklığında döküm yapılmıştır. Her bir döküm sıcaklığına ait eriyik madenden alınan kimyasal analiz değerleri Tablo 4.1.' de verilmiştir. Kimyasal analizin doğruluğunun sağlanması için her bir döküm sıcaklığından alınan numuneler üzerinde 3'er adet analiz yapılmıştır. Tablo 4.1.' de verilen sonuçlar her bir döküm sıcaklığı numunesinin 3 analizinin ortalama değerleridir.

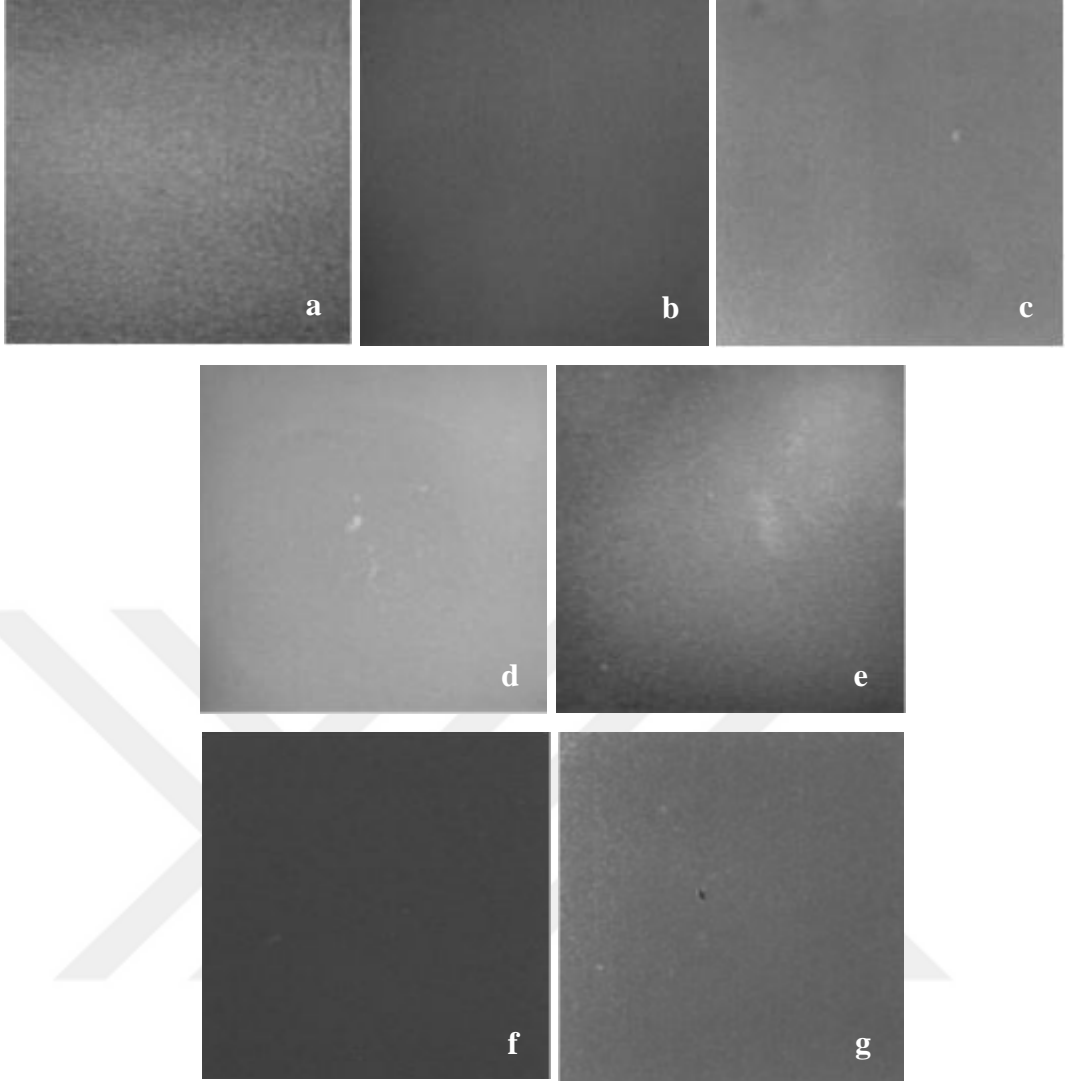
**Tablo 4.1.** Farklı döküm sıcaklıklarında alınan numunelerin kimyasal analizleri

Döküm Sıcaklığı (°C)	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Pb	Sn	Ti	Al	Diğerleri
Limit	4,5 7,0	- 0,85	2,6 3,6	- 0,60	0,15 0,40	-	- 0,30	0,40	0,10	0,05	- 0,20	Kalan	
710	6,90	0,588	2,75	0,102	0,178	-	0,0197	0,331	0,0231	0,0038	0,0718	88,97	0,0626
715	6,95	0,586	2,84	0,099	0,170	-	0,0206	0,305	0,0220	0,0025	0,0790	88,85	0,0759
720	6,95	0,605	2,79	0,097	0,182	-	0,0195	0,318	0,0220	0,0028	0,0777	88,85	0,086

### 4.2 X-Ray Analiz Sonuçları

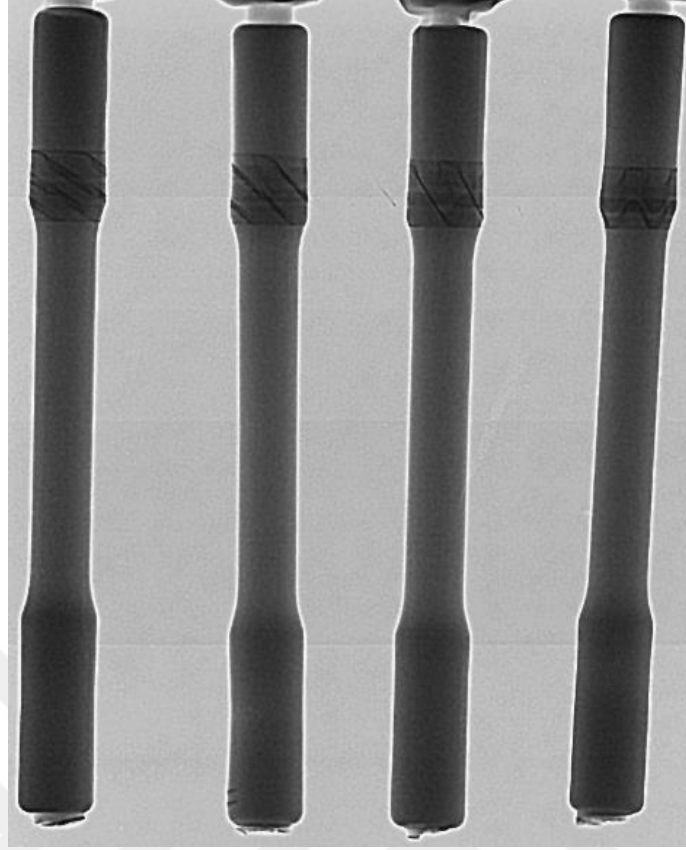
X-ray analizinde ASTM E 155' e göre 1 / 4 " seviye-1 seviyesi referans alınarak analiz gerçekleştirilmiştir. Seviye-1 seviyesinden büyük hata seviyesi tespit edilen çekme çubukları analiz dışı bırakılarak, diğer analizlere dahil edilmemiştir. Tüm numunelere % 100 X-Ray analizi yapılmıştır.

Şekil 4.1.' de ASTM E 155 Seviye-1 referansına ait görüntüler verilmiştir. Numunelere ait örnek X-Ray analiz görüntüleri Şekil 4.2.' de verilmiştir. Örnek X-Ray görüntülerine bakıldığında, analiz numunelerinin porozite ve çekme boşluklarından uzak ASTM E 155 seviye-1 referansına uygun seçildiğini söylemek mümkündür.



**Şekil 4.1.** ASTM E 155 standardında belirtilen seviye-1 hata boyutları

- a Uzamış gaz porozitesi,
- b Yuvarlak gaz porozitesi,
- c Gaz boşluğu,
- d Çekinti boşluğu,
- e Süngerimsi çekinti boşluğu,
- f Düşük yoğunluklu yabancı madde
- g Yüksek yoğunluklu yabancı madde



**Şekil 4.2.** Çekme çubuklarına ait örnek radyoskopi görüntüsü

### **4.3 Çekme Testi Sonuçları**

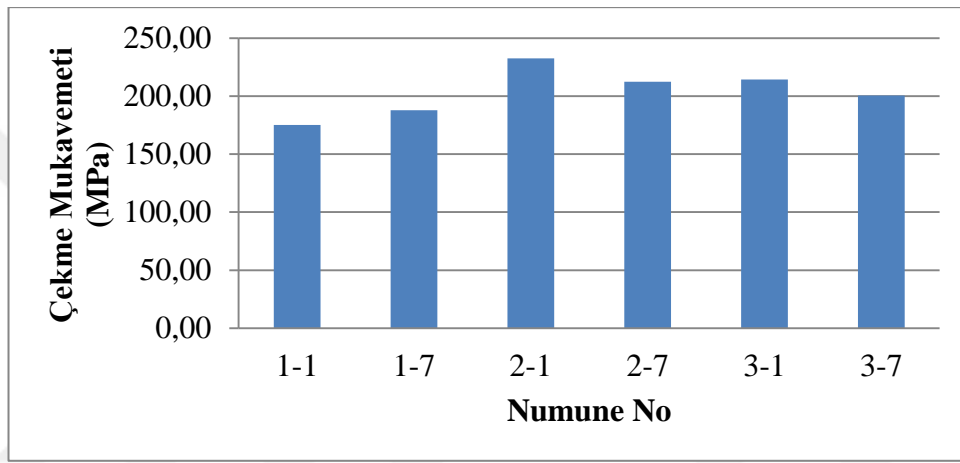
Farklı sıcaklıklarda dökülen numunelere farklı sürelerde ısıtma işlemi uygulanmıştır. Çekme testi analizi 36 grup numune üzerinden yapılmıştır. Herbir numune grubu için minimum 3 adet test gerçekleştirilmiştir. Testi geçersiz kılan çubuklar analiz dışı bırakılmıştır. Ayrıca çekme testi sonuçlarında genelden çok küçük veya çok büyük değerler elde edildiyse onlar da hesaba katılmamıştır.

Tablo 4.2.' de verilen değerler T4, Tablo 4.3, 4.4. ve 4.5.' te verilen değerler T6 ısıtma işlemine tabi tutulan numunelerin çekme test sonuçlarıdır. Sonuçlara ait çekme mukavemeti ve uzama grafikleri tabloların altında verilmiştir.

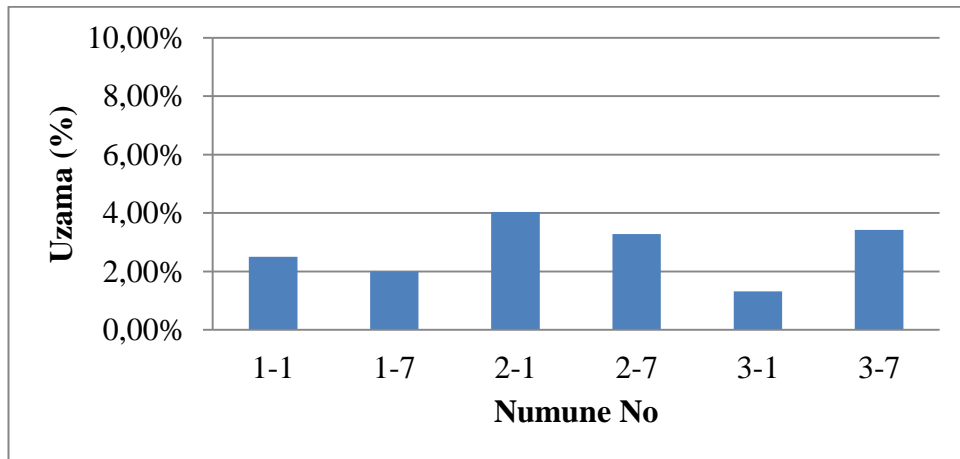
Tablolarda verilen test sonuçları, geçerli test sonuçlarına ait 3 testin ortalama değerleridir.

**Tablo 4.2.** T4 ısıt işlemleri uygulanan numunelere ait çekme test sonuçları

Numune No	Çekme Mukavemeti (MPa)	Uzama (%)
1-1	175,10	2,50%
1-7	188,02	2,00%
2-1	232,62	4,04%
2-7	212,43	3,27%
3-1	214,40	1,32%
3-7	200,53	3,42%



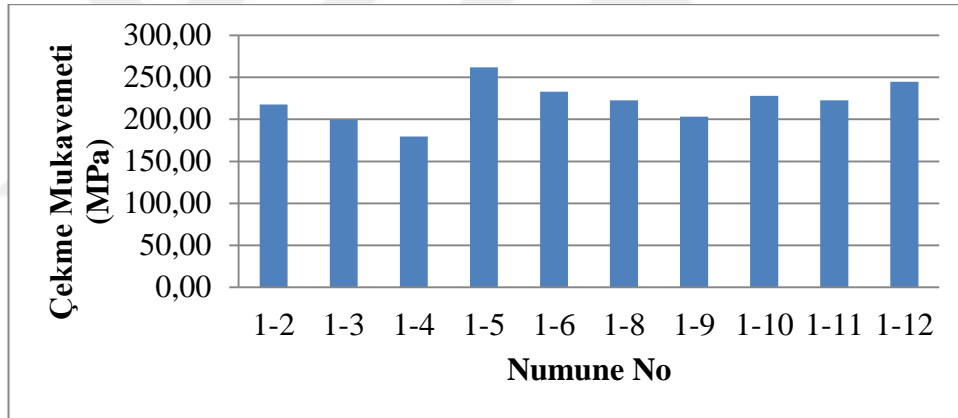
**Şekil 4.3.** T4 uygulanan numunelere ait çekme mukavemeti değerleri grafiği



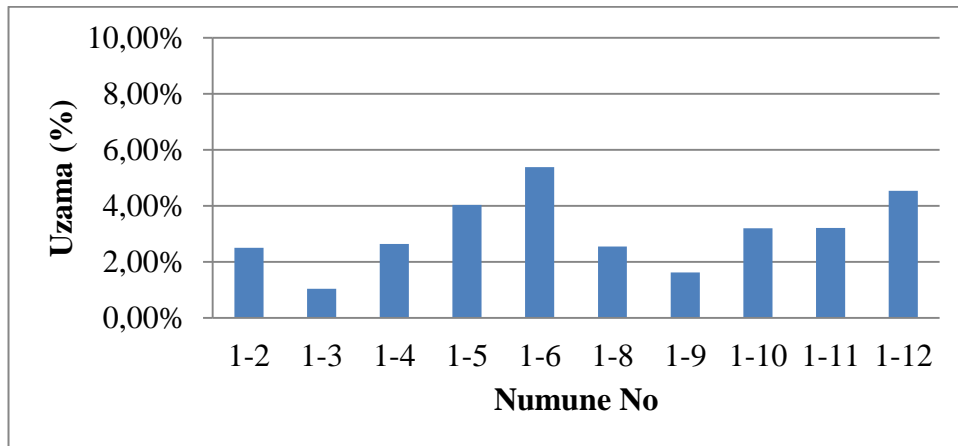
**Şekil 4.4.** T4 uygulanan numunelere ait %uzama değerleri grafiği

**Tablo 4.3.** 1 Numaralı numune grubuna ait çekme test sonuçları

Numune No	Çekme Mukavemeti (MPa)	Uzama (%)
1-2	217,50	2,50%
1-3	199,20	1,03%
1-4	179,66	2,63%
1-5	262,01	4,03%
1-6	232,84	5,38%
1-8	222,70	2,54%
1-9	203,28	1,62%
1-10	227,78	3,20%
1-11	222,50	3,21%
1-12	244,65	4,54%



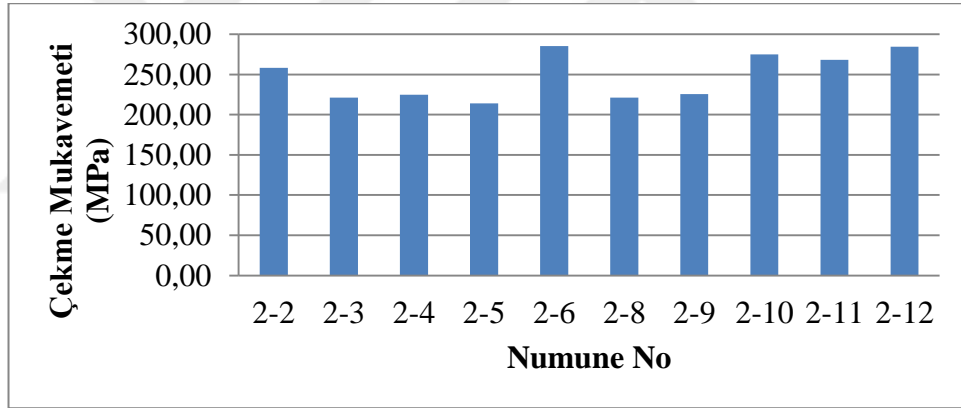
**Şekil 4.5.** 1 Numaralı numune grubuna ait çekme mukavemeti değerleri grafiği



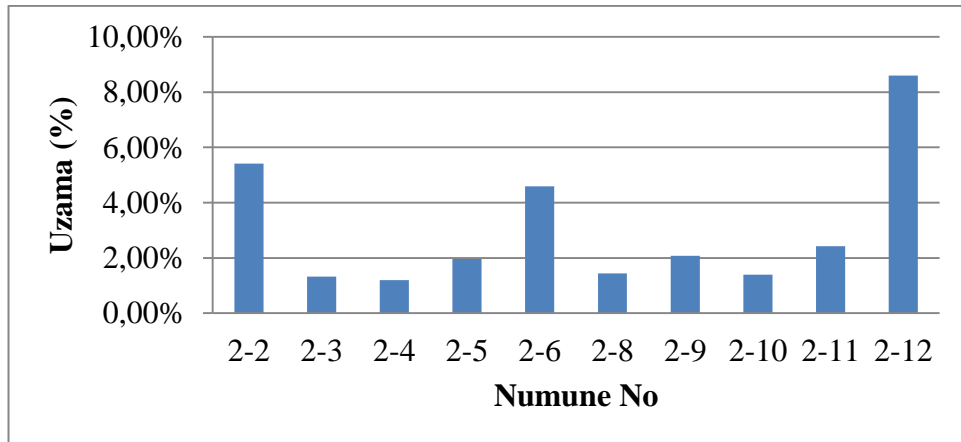
**Şekil 4.6.** 1 Numaralı numune grubuna ait uzama değerleri grafiği

**Tablo 4.4.** 2 Numaralı numune grubuna ait çekme test sonuçları

Numune No	Çekme Mukavemeti (MPa)	Uzama (%)
2-2	258,11	5,41%
2-3	221,38	1,33%
2-4	224,83	1,20%
2-5	213,85	1,97%
2-6	285,34	4,59%
2-8	221,36	1,44%
2-9	225,54	2,07%
2-10	274,77	1,39%
2-11	268,04	2,42%
2-12	284,30	8,60%



**Şekil 4.7.** 2 Numaralı numune grubuna ait çekme mukavemeti değerleri grafiği

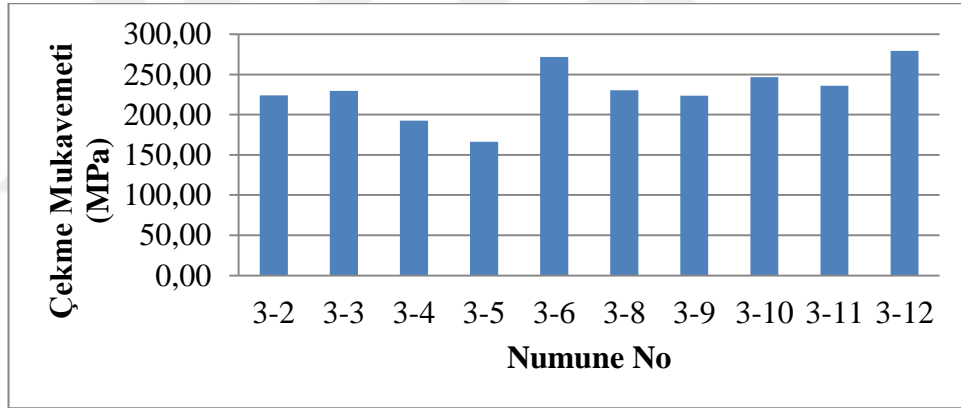


**Şekil 4.8.** 2 numaralı Numune grubuna ait uzama değerleri grafiği

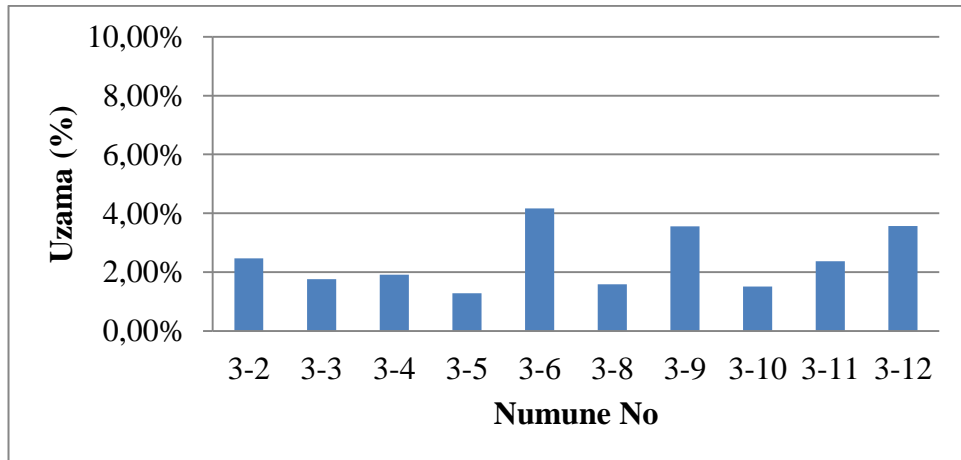


**Tablo 4.5.** 3 Numaralı numune grubuna ait çekme test sonuçları

Numune No	Çekme Mukavemeti (MPa)	Uzama (%)
3-2	224,13	2,47%
3-3	229,51	1,76%
3-4	192,46	1,92%
3-5	166,06	1,28%
3-6	271,66	4,16%
3-8	230,42	1,59%
3-9	223,79	3,56%
3-10	246,58	1,51%
3-11	236,01	2,37%
3-12	279,46	3,56%



**Şekil 4.9.** 3 Numaralı numune grubuna ait çekme mukavemeti değerleri grafiği



**Şekil 4.10.** 3 Numaralı numune grubuna ait uzama değerleri grafiği

Çekme testi sonuçlarına bakıldığında T6 yaşlandırma ısıl işlemi ile mukamette bir artış olduğu görünmektedir. Yaşlandırma süreleri açısından bir değerlendirme yapıldığında ise genel eğilim düşük yaşlandırma sürelerinden sonra dayanımda bir miktar düşüş ve ardından tekrar yükseliş söz konusudur.

Aşırı yaşlanma davranışı genel olarak 10 saat sonunda görülmemiş sadece 1-6 nolu numunede aşırı yaşlanma evresine geçildiği saptanmıştır.

Durum, uzama davranışı (süneklik) açısından da benzer niteliktedir. Başlangıçta nispeten yüksek olan uzama miktarları yaşlandırma süresinin artmasıyla azalmış, en büyük dayanımın elde edildiği 9 ve 10. saatlerde en büyük uzama değerlerine ulaşılmıştır. Bu durum malzemenin dayanım-süneklik ilişkisi açısından değerlendirildiğinde ilginçtir. Bilindiği üzere malzeme biliminde mukavemet arttıkça süneklik düşmektedir. Bu durum mikroyapı incelemelerinin ardından açıklanmıştır.

#### **4.4 Sertlik Testi Sonuçları**

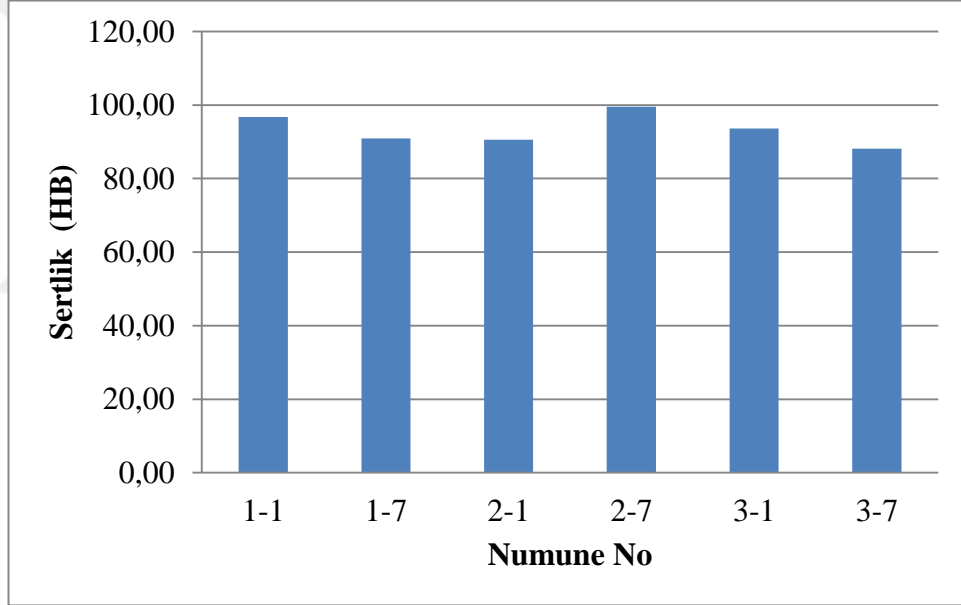
##### **4.4.2 Brinell Sertlik Testi Sonuçları**

Brinell sertlik testi 36 grup numune üzerinden yapılmıştır. Herbir numune grubu için minimum 3 adet sertlik ölçümü gerçekleştirilmiştir. Brinell sertlik testi sonuçlarında genelden çok küçük veya çok büyük değerler elde edildiyse bu değerler hesaba katılmamıştır.

Tablo 4.6.' da verilen değerler T4, Tablo 4.7, 4.8. ve 4.9.' da verilen değerler T6 ısıl işlemine tabi tutulan numunelerin Brinell sertlik test sonuçlarıdır. Tablolarda verilen değerler, 3 testin ortalama değerleridir. Sonuçlara ait Brinell sertlik değerleri grafikleri tabloların altında verilmiştir.

**Tablo 4.6.** T4 ısıl işlemleri uygulanan numunelere ait Brinell Sertlik test sonuçları

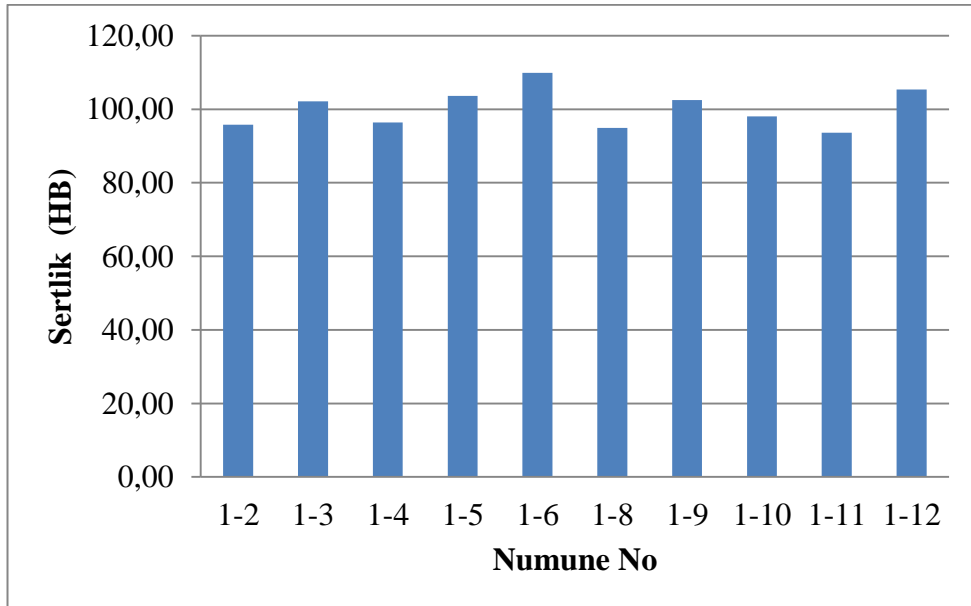
Numune No	Sertlik (HB)
1-1	96,73
1-7	90,90
2-1	90,60
2-7	99,50
3-1	93,60
3-7	88,17



**Şekil 4.11.** T4 uygulanan numunelere ait Brinell sertlik değerleri grafiği

**Tablo 4.7.** 1 Nolu numune grubuna ait Brinell Sertlik test sonuçları

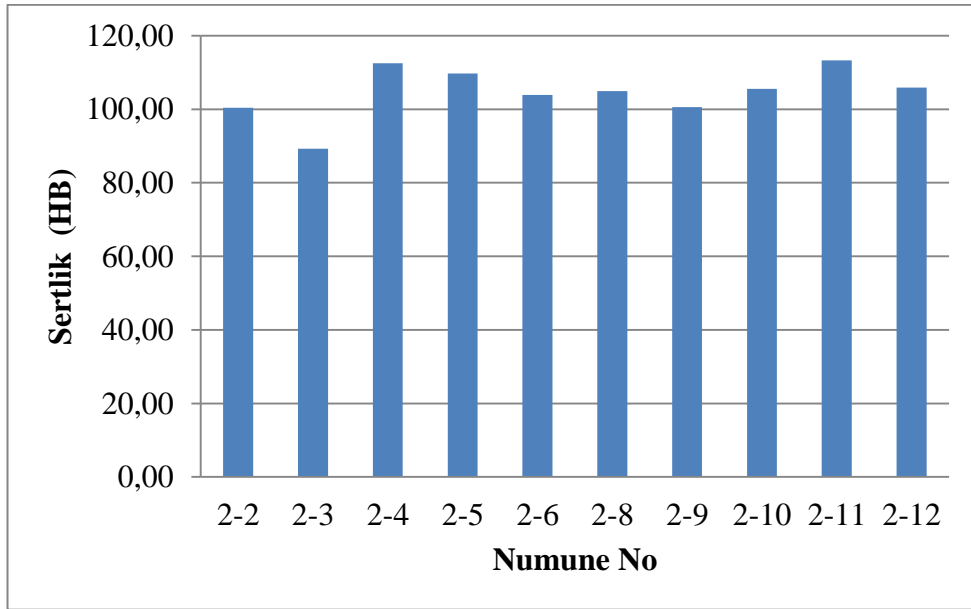
Numune No	Sertlik (HB)
1-2	95,77
1-3	102,17
1-4	96,40
1-5	103,60
1-6	109,87
1-8	94,93
1-9	102,47
1-10	98,07
1-11	93,63
1-12	105,37



**Şekil 4.12.** 1 Numaralı numune grubuna ait Brinell sertlik değerleri grafiği

**Tablo 4.8.** 2 Nolu numune grubuna ait Brinell Sertlik test sonuçları

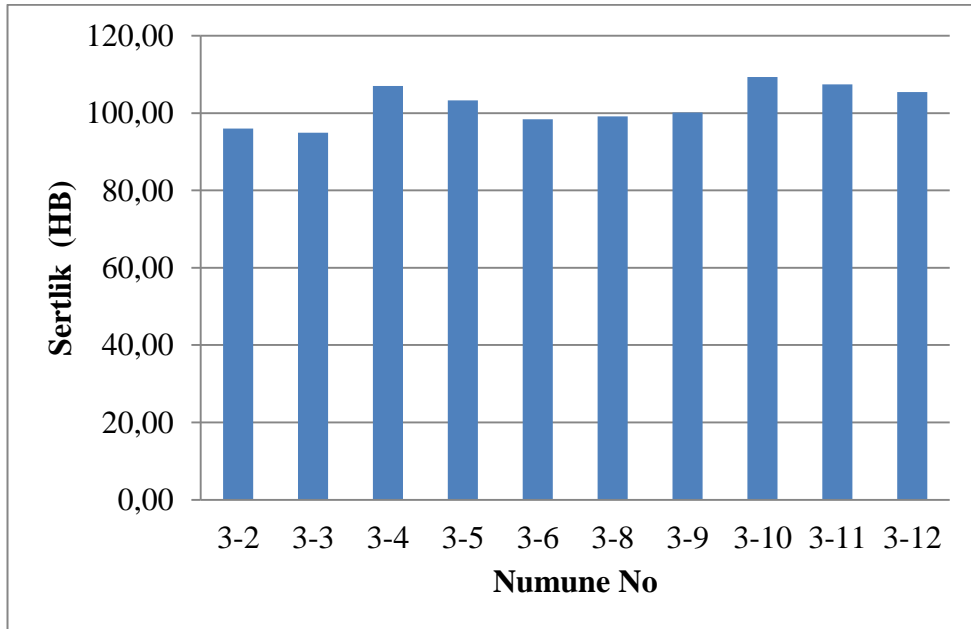
Numune No	Sertlik (HB)
2-2	100,40
2-3	89,23
2-4	112,55
2-5	109,70
2-6	103,90
2-8	104,93
2-9	100,57
2-10	105,53
2-11	113,27
2-12	105,90



**Şekil 4.13.** 2 Numaralı numune grubuna ait Brinell sertlik değerleri grafiği

**Tablo 4.9.** 3 Nolu numune grubuna ait Brinell Sertlik test sonuçları

Numune No	Sertlik (HB)
3-2	96,00
3-3	94,93
3-4	107,00
3-5	103,30
3-6	98,43
3-8	99,17
3-9	100,17
3-10	109,30
3-11	107,43
3-12	105,47



**Şekil 4.14.** 3 Numaralı numune grubuna ait Brinell sertlik değerleri grafiği

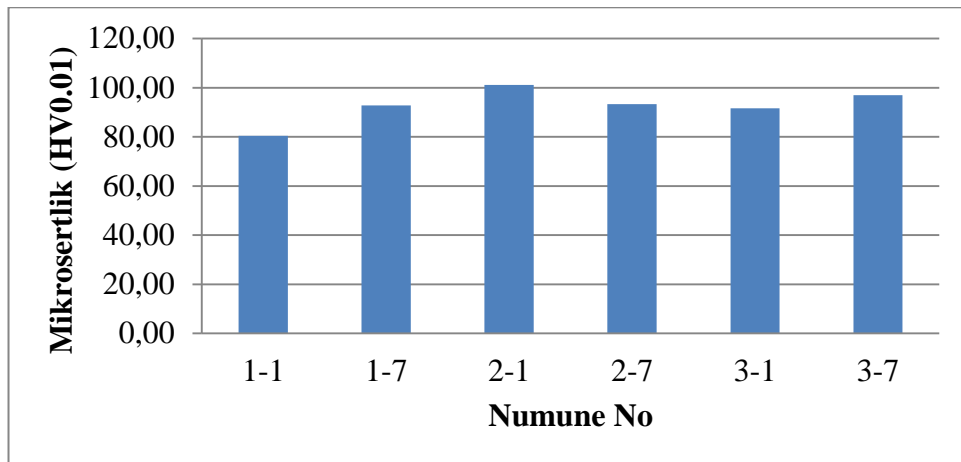
T4 ve T6 ısıtıl işleminden elde edilmiş olan Brinell sertlik değerleri incelendiğinde T6 ısıtıl işlemi ile T4' e göre daha büyük sertlik değerlerine ulaşılmıştır. Koşullar çoklu olduğundan yüzde cinsinden farklar ifade edilmemiştir. Bilindiği üzere yapay yaşlandırma ile oluşan ve morfolojisi ve dağılımı değişen çökeltilerin dislokasyonların hareketine daha fazla engel oluşturması beklenmektedir.

#### 4.4.3 Vickers Mikrosertlik Testi Sonuçları

Vickers mikrosertlik testi 36 grup numune üzerinden yapılmıştır. Herbir numune grubu için  $\alpha$  fazı üzerinden sertlik ölçümü yapılmıştır. Tablo 4.10.' da verilen değerler T4, Tablo 4.11, 4.12. ve 4.13.' de verilen değerler T6 ısıtıl işlemine tabi tutulan numunelerin mikrosertlik test sonuçlarıdır. Tablolarda verilen değerler, 3 testin ortalama değerleridir. Sonuçlara ait Vickers mikrosertlik değerleri grafikleri tabloların altında verilmiştir.

**Tablo 4.10.** T4 ısıtıl işlemi uygulanan numunelere ait Vickers mikrosertlik test sonuçları

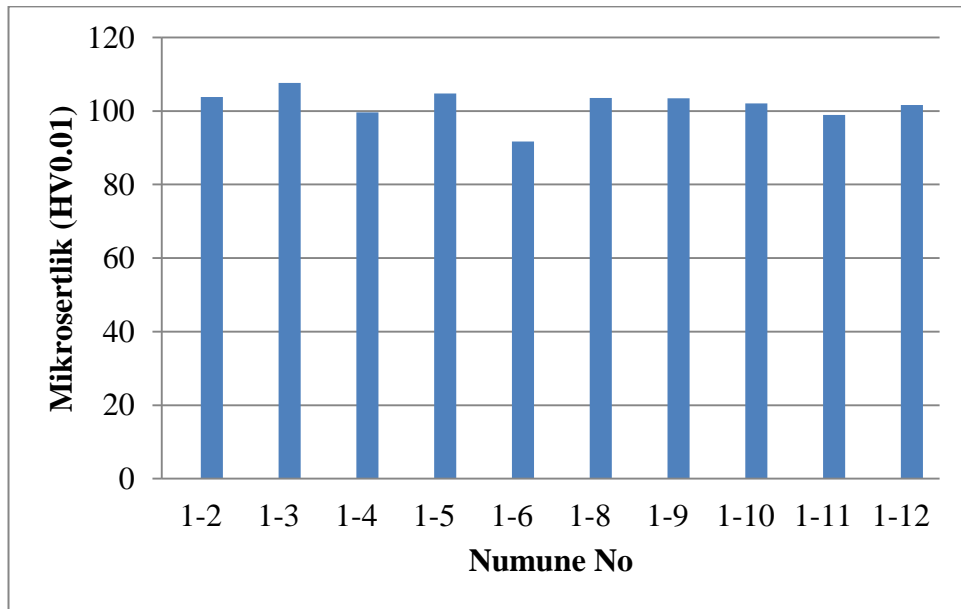
Numune No	$\alpha$ Fazı Sertlik Değeri (HV0.01)
1-1	80,40
1-7	92,73
2-1	101,07
2-7	93,33
3-1	91,63
3-7	96,97



**Şekil 4.15.** T4 uygulanan numunelere ait Vickers mikrosertlik değerleri grafiği

**Tablo 4.11.** 1 Nolu numune grubuna ait Vickers mikrosertlik test sonuçları

Numune No	$\alpha$ Fazı Sertlik Değeri (HV0.01)
1-2	103,83
1-3	107,60
1-4	99,63
1-5	104,80
1-6	91,67
1-8	103,53
1-9	103,43
1-10	102,10
1-11	98,90
1-12	101,60

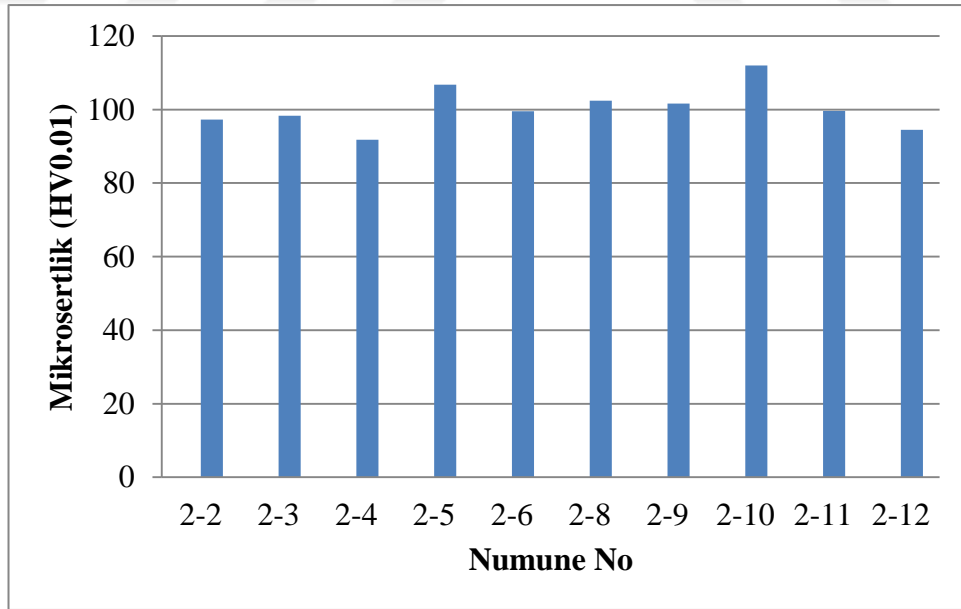


**Şekil 4.16.** 1 Numaralı numune grubuna ait Vickers mikrosertlik değerleri grafiği



**Tablo 4.12.** 2 Nolu numune grubuna ait Vickers mikrosertlik test sonuçları

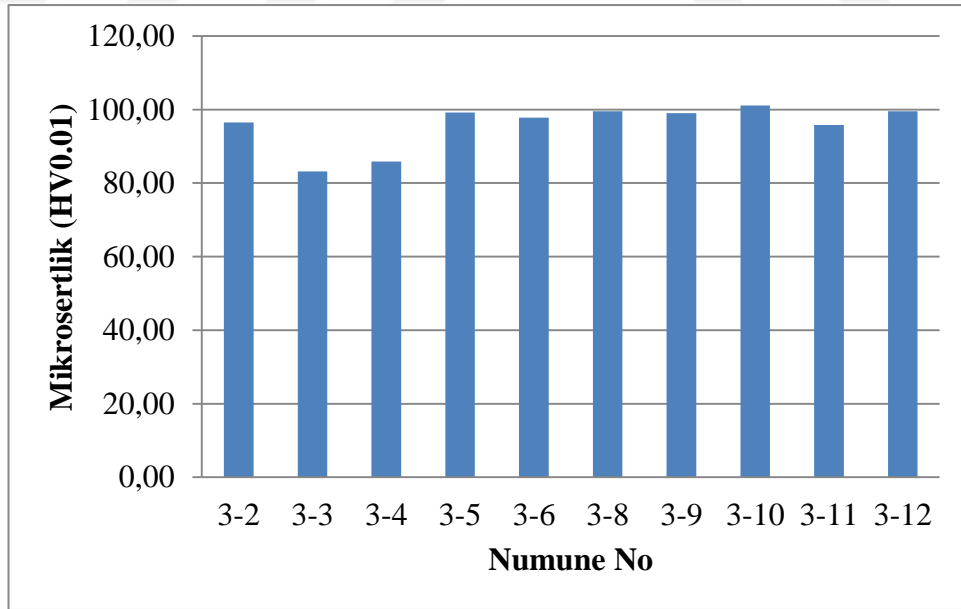
Numune No	$\alpha$ Fazı Sertlik Değeri (HV0.01)
2-2	97,27
2-3	98,30
2-4	91,83
2-5	106,77
2-6	99,57
2-8	102,40
2-9	101,60
2-10	111,97
2-11	99,60
2-12	94,53



**Şekil 4.17.** 2 Numaralı numune grubuna ait Vickers mikrosertlik değerleri grafiği

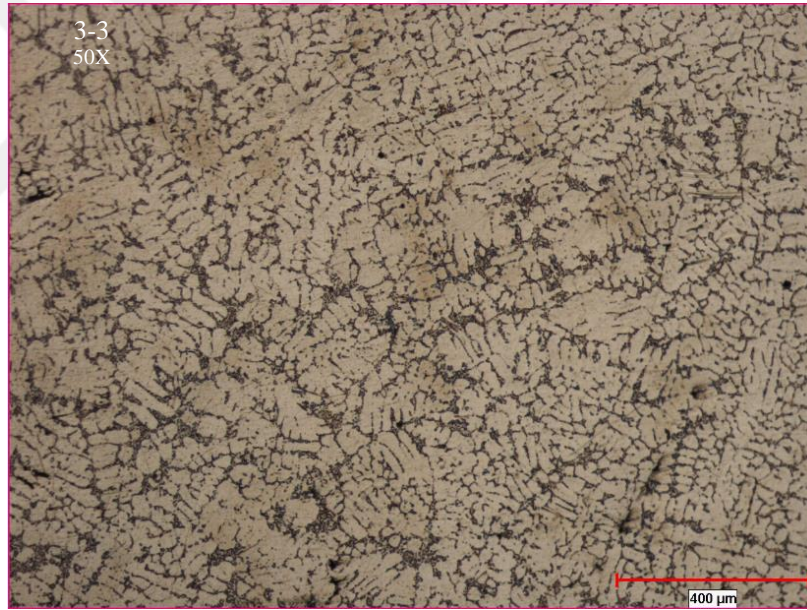
**Tablo 4.13.** 3 Nolu numune grubuna ait Vickers mikrosertlik test sonuçları

Numune No	$\alpha$ Fazı Sertlik Değeri (HV0.01)
3-2	96,50
3-3	83,13
3-4	85,90
3-5	99,23
3-6	97,80
3-8	99,57
3-9	99,00
3-10	101,07
3-11	95,77
3-12	99,57

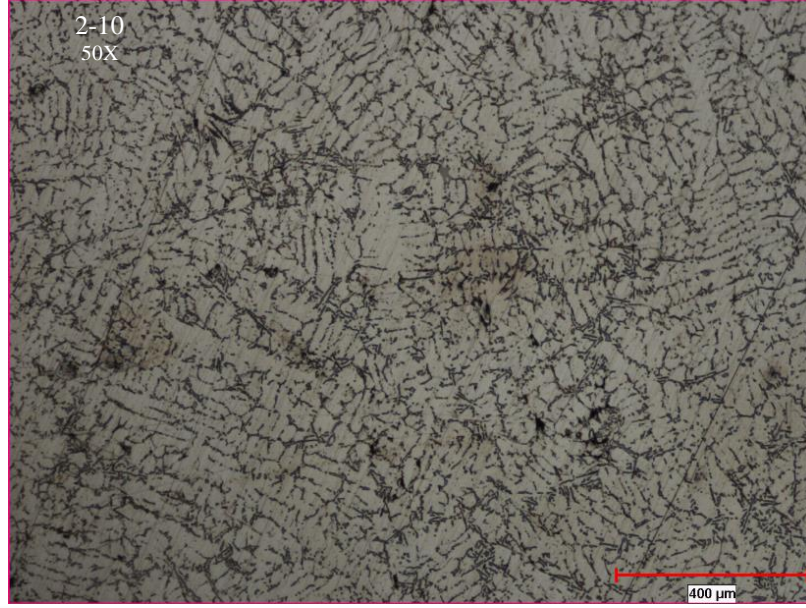


**Şekil 4.18.** 3 Numaralı numune grubuna ait Vickers mikrosertlik değerleri grafiği

$\alpha$ -fazı üzerinden alınan Vickers mikrosertlik ölçümlerinde T4-T6 ısı işlemleri ve döküm sıcaklıkları ve yaşlandırma süreleri arasında lineer bir etkileşime rastlanmamıştır. Bunun sebebinin mikrosertlik ölçümü yaparken birim alanda çok fazla  $\alpha$ -fazının mevcut olması ve tüm  $\alpha$ -fazlarının taranamamasından dolayı genel ortalamaya ulaşamaması olarak düşünülmektedir. Dahası bilindiği üzere döküm sonrası söz konusu olan heterojen katılaşma davranışı ve mikrosegregasyonlar  $\alpha$ -fazı morfolojilerini lokal olarak değiştirebilmektedir. Dolayısıyla döküm sonrası  $\alpha$ -fazının genel sertliğine dair fikir sahibi olabilmek güçtür. Ancak Vickers sertlik değerlerinin genel trende göre düşük seyrettiği (örneğin 3-3) veya genel trende göre yüksek seyrettiği (örneğin 2-10) durumlar için mikroyapılar Şekil 4.19. ve Şekil 4.20.' de verilmiştir. Buna göre dendritlerin kalınlaştığı durumda yani  $\alpha$ -fazının daha kaba bir morfoloji sergilediği durumun ince yapılı olmasına göre daha düşük sertlik getirdiği ortadadır.



**Şekil 4.19.** 3-3 numaralı numuneye ait mikroyapı görüntüleri



Şekil 4.20. 2-10 numaralı numuneye ait mikroyapı görüntüleri

#### 4.5 AlSi5Cu3Mg Alaşımının Döküm Ve Isıl İşlem Sonrası Simülasyonu

##### 4.5.2 Döküm Sonrası Simülasyon İnceleme Sonuçları

Jmat Pro yazılımı ile Şekil 4.21’ de verilen parametreler kullanılarak analiz gerçekleştirilmiştir. Kimyasal analiz değerleri olarak üç farklı döküm sıcaklığından alınan analiz değerlerinin ortalaması girilmiştir.

wt %	wt %
Al	88.725
Bi	0.0
Ca	0.0
Co	0.0
Cr	0.0
Cu	2.793
Fe	0.593
La	0.0
Li	0.0
Mg	0.177
Mn	0.099
Mo	0.0
Ni	0.02
Pb	0.022
Sc	0.0
Si	6.933
Sn	0.0030
Sr	0.225
Ti	0.076
V	0.0
Zn	0.318
Zr	0.0
B	0.016
C	0.0
H	0.0

Aluminium Alloy  
T5/T6 Strength

Alloy type  
 Wrought  Cast

Casting type  
 Sand casting  
 Permanent mold casting  
 High pressure die casting

Heat treatment  
 T5  T6

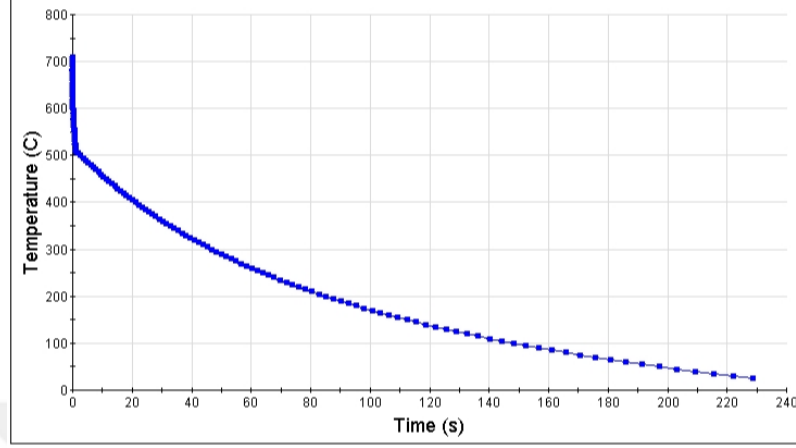
Solution treatment temperature  
Temp. (C) 495

Ageing temperature  
Temp. (C) 170

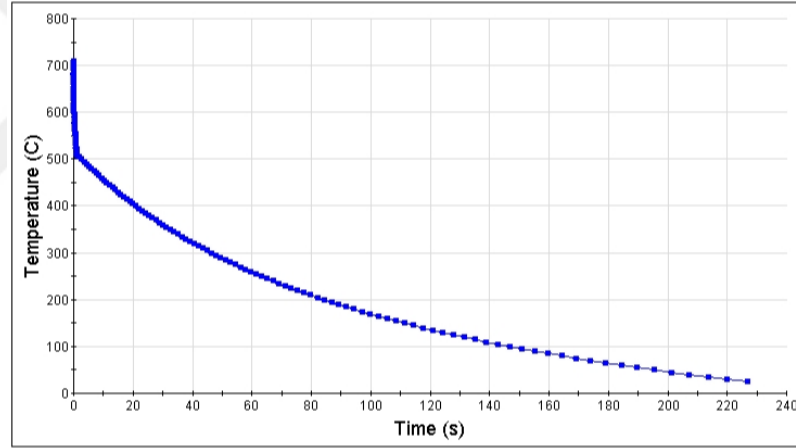
Start calculation Help

Şekil 4.21. Jmat Pro analiz parametreleri

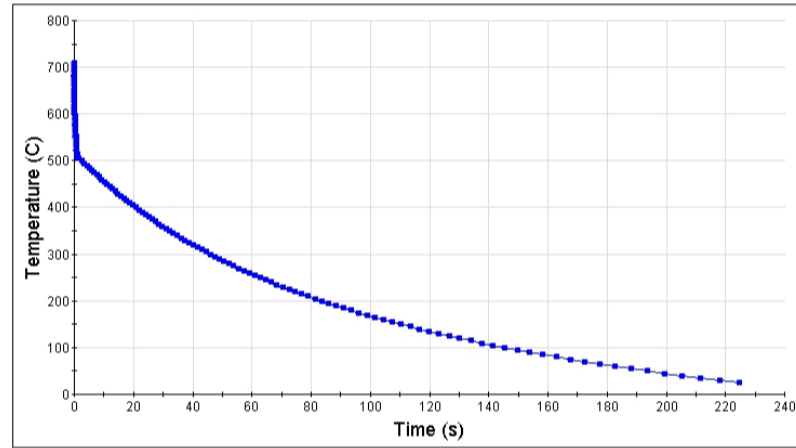
Döküm parçaların soğuma hızları 710 °C döküm sıcaklığı için 11,2 °C/s, 715 °C döküm sıcaklığı için 11,3 °C/s, 720 °C döküm sıcaklığı için 11,4 °C/s olarak hesaplanmıştır. Soğuma eğrileri Şekil 4.22, 4.23. ve 4.24.' te verilmiştir.



Şekil 4.22. 710 °C döküm sıcaklığı için analiz edilen soğuma eğrisi

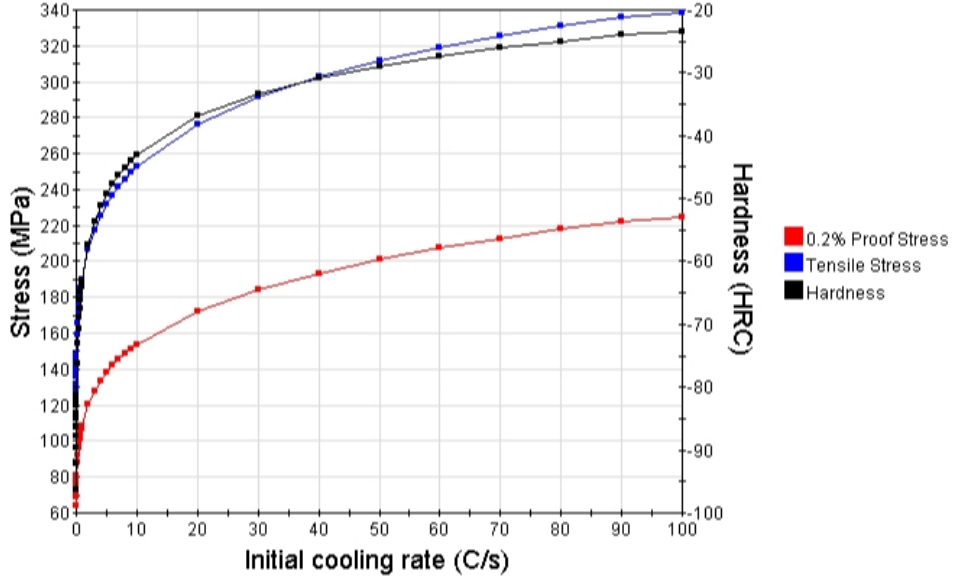


Şekil 4.23. 715 °C döküm sıcaklığı için analiz edilen soğuma eğrisi



Şekil 4.24. 720 °C döküm sıcaklığı için analiz edilen soğuma eğrisi

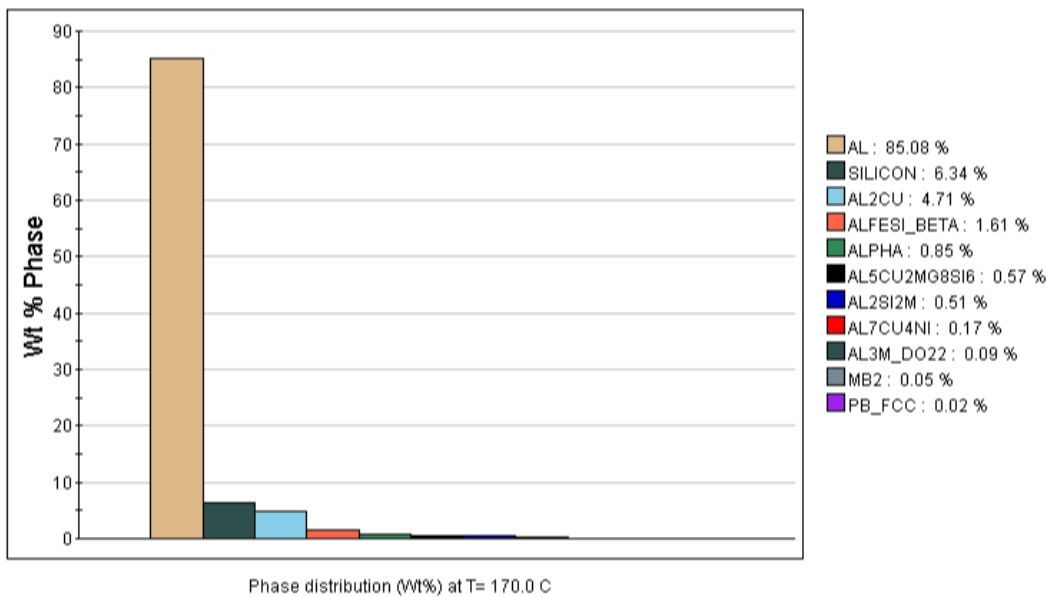
Analiz sonucunda soğuma hızına bağlı olarak hesaplanan döküm sonrası mekanik özellikler (dayanım ve sertlik) Şekil 4.25’ te verilmiştir. Şekil 4.25.’ te görüldüğü gibi soğuma hızı arttıkça genel mukavemet değerleri artmaktadır.



Şekil 4.25. Soğuma oranına bağlı döküm sonrası mekanik özellikler grafiği

### 4.5.3 Isıl İşlem Sonrası Simülasyon İnceleme Sonuçları

JmatPro ile 170 °C yaşlandırma sıcaklığında fazların analizi yapıldığında elde edilen ağırlıkça % faz dağılım grafiği Şekil 4.26.’ da, bu sıcaklıkta fazların kimyasal içerikleri Şekil 4.27.’ de verilmiştir.

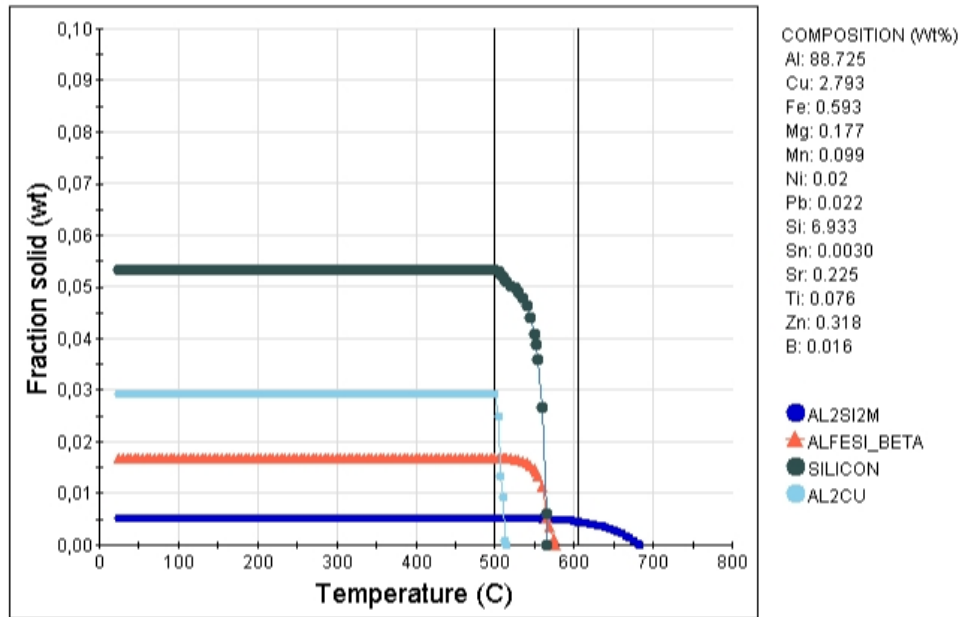


Şekil 4.26. 170 °C’ de % faz dağılımı

Summary of data at T= 170.0 C													
Weight %	AL	CU	FE	MG	MN	NI	PB	SI	SN	SR	TI	ZN	B
AL	99.56	0.0577	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.37	<0.01
SILICON	-	-	-	-	-	-	-	100.0	-	-	-	-	-
AL2CU	45.99	53.97	-	-	-	-	-	<0.01	-	-	-	0.0335	-
AL3M_DQ22	82.84	-	-	-	<0.01	-	-	-	-	-	37.16	-	-
MB2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	68.88	-	31.12
AL7CU4NI	37.64	50.66	-	-	-	11.7	-	-	-	-	-	-	-
ALPHA	61.4	0.2	18.31	-	11.63	-	-	8.47	-	-	-	-	-
ALFESI_BETA	59.13	-	27.2	-	-	-	-	13.68	-	-	-	-	-
AL2SI2M	27.29	-	-	-	-	-	-	28.4	-	44.31	-	-	-
AL5CU2MG8SI6	21.59	20.34	-	31.11	-	-	-	26.96	-	-	-	-	-
PB_FCC	-	-	-	-	-	-	91.7	-	8.3	-	-	-	-
Values have been rounded ... to see more digits mouse over the values													
Mu	-6.83	-44451.84	-115509.87	-33312.05	-116174.76	-180984.0	-540.64	-8980.9	-5485.83	-177491.83	-142572.04	-11183.16	-94252.51
Activity	1.0	5.76E-6	2.43E-14	1.18E-4	2.03E-14	4.65E-22	0.86	0.0874	0.23	1.2E-21	1.57E-17	0.0481	7.77E-12
Enthalpy H: 83.84240 J/g						Entropy S: 1.35558 J/(g K)							
Total Gibb's Energy G: -516.88316 J/g						Heat Capacity Cp: 0.95436 J/(g K)							

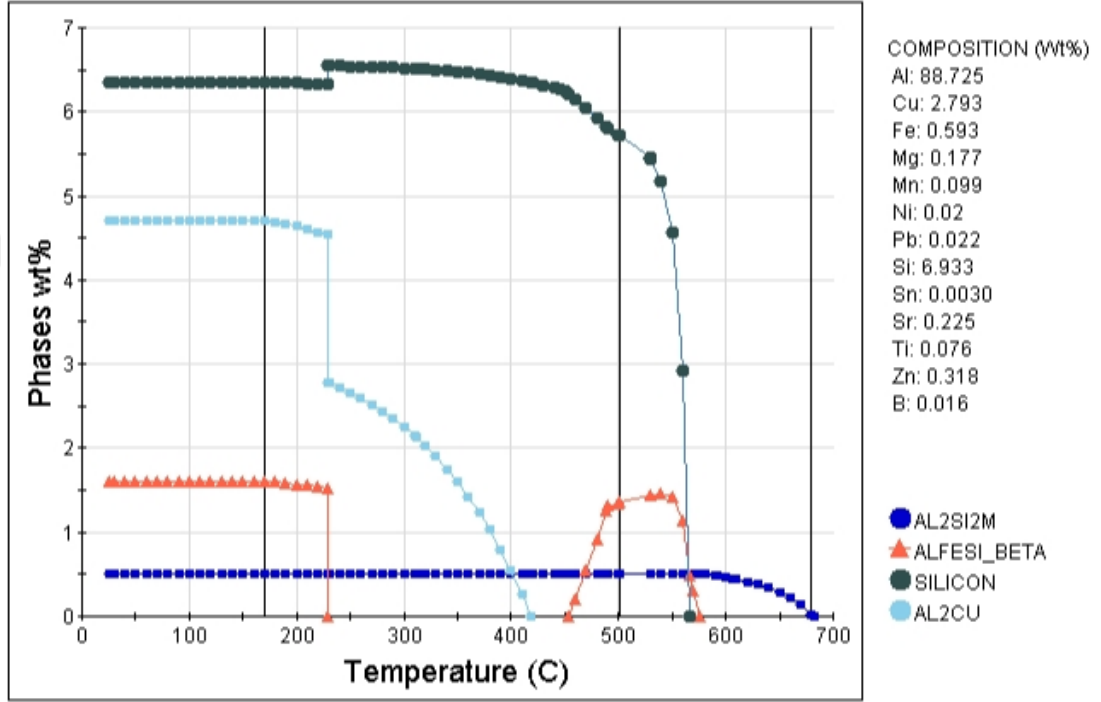
Şekil 4.27. 170 °C' de bulunan fazların kimyasal içerikleri

Şekil 4.21.' de verilen parametreler ile yapılan analizlerde Si, Al<sub>2</sub>Cu, AlFeSi, Al<sub>2</sub>Si<sub>2</sub> fazlarının ağırlıkça yüksek miktarda ortaya çıkabilecek fazlar olduğu tespit edilmiştir. Şekil 4.28' de JmatPro analizi sonrası sıcaklığa bağlı fazların katı fraksiyonları gösterilmektedir. Buna göre α-Al fazı sonrası ikinci faz partiküllerinde en yüksek miktarda Si partikülü yer almaktadır. Silisyumu miktarca Al<sub>2</sub>Cu ve AlFeSi fazları izlemektedir. Bu fazlara OM mikroyapılarında rastlanmış ve eşleştirilmiştir, aynı zamanda literatürdeki benzer alaşım elementlerini içeren yayınlarla da karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.28. Fazların sıcaklığa bağlı katı fraksiyonları

Fazların ağırlıkça oluşum ve çözünme sıcaklıklarını gösteren grafik Şekil 4.29.' da verilmiştir. Buna göre, tüm fazların oluşum sıcaklığı 25°C' dir. Si fazı 560°C sıcaklığında tamamen çözünmektedir. Al<sub>2</sub>Cu fazı, 230°C sıcaklığında miktarca azalmakta ve 420°C sıcaklıkta tamamen çözünmektedir. AlFeSi fazı, 230°C sıcaklıkta çözünmekte ve 450°C sıcaklıkta tekrar oluşum göstererek 575°C sıcaklıkta tamamen çözünmektedir. Al<sub>2</sub>Si<sub>2</sub> fazı ise 680°C sıcaklıkta tamamen çözünmektedir.



Şekil 4.29. Sıcaklığa bağlı % faz dağılım grafiği

#### 4.6 Mikroyapı Analiz Sonuçları

36 parametre için hazırlanan mikroyapı numuneleri üzerinden yapılan mikroyapı analiz görüntüleri aşağıda verilmiştir.



Şekil 4.30. 1-1 Numaralı numune grubuna ait mikroyapı görüntüleri

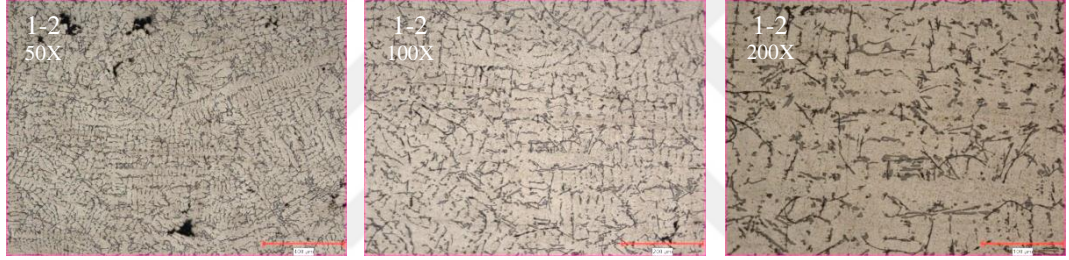




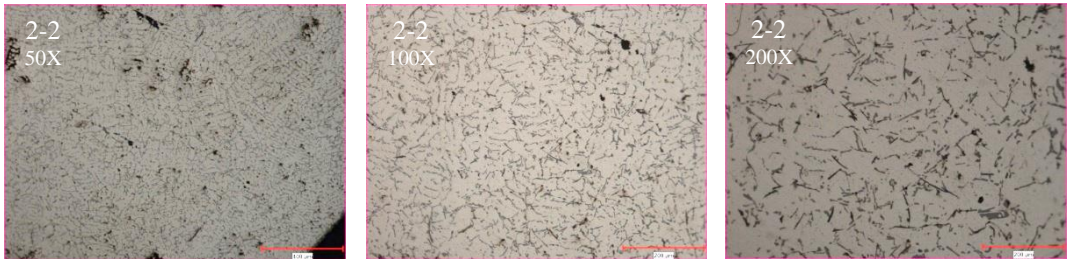
**Şekil 4.31.** 2-1 Numaralı numune grubuna ait mikroyapı görüntüleri



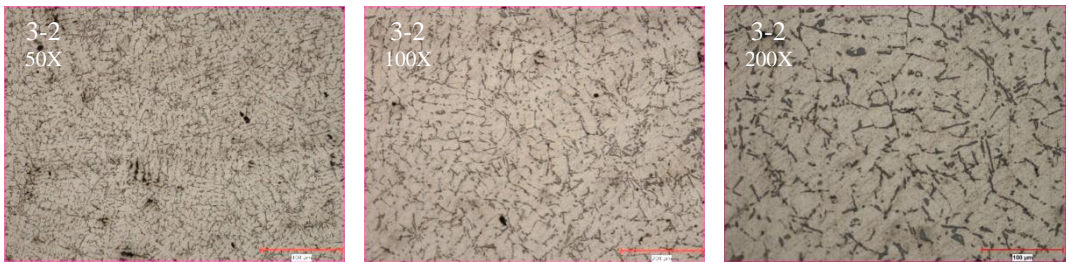
**Şekil 4.32.** 3-1 Numaralı numune grubuna ait mikroyapı görüntüleri



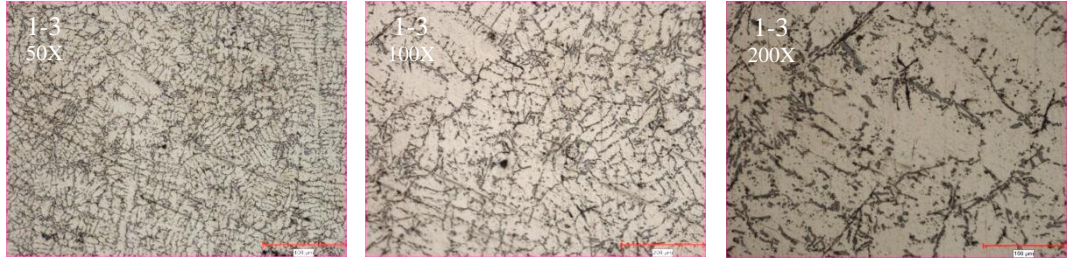
**Şekil 4.33.** 1-2 Numaralı numune grubuna ait mikroyapı görüntüleri



**Şekil 4.34.** 2-2 Numaralı numune grubuna ait mikroyapı görüntüleri



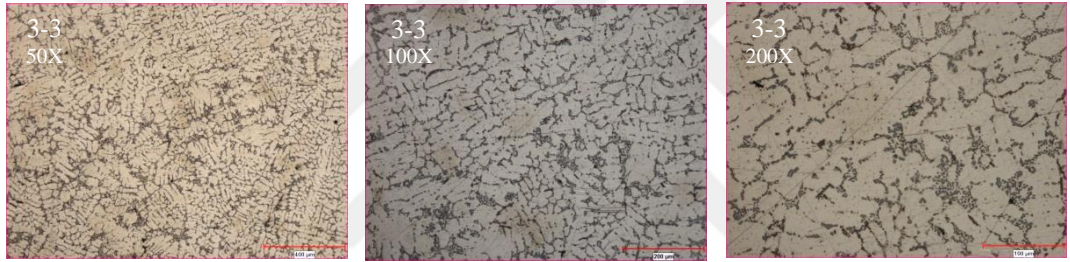
**Şekil 4.35.** 3-2 Numaralı numune grubuna ait mikroyapı görüntüleri



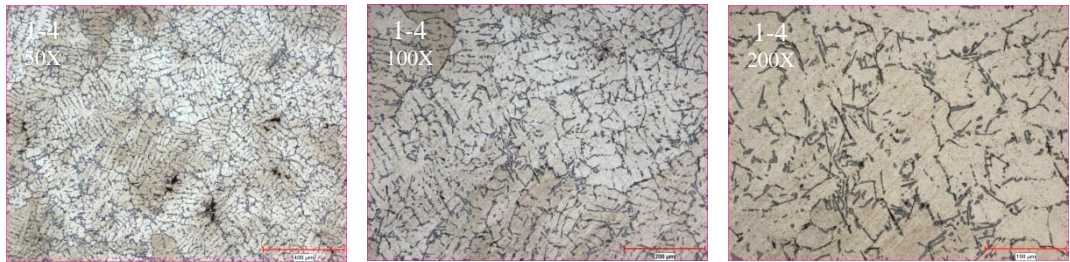
**Şekil 4.36.** 1-3 Numaralı numune grubuna ait mikroyapı görüntüleri



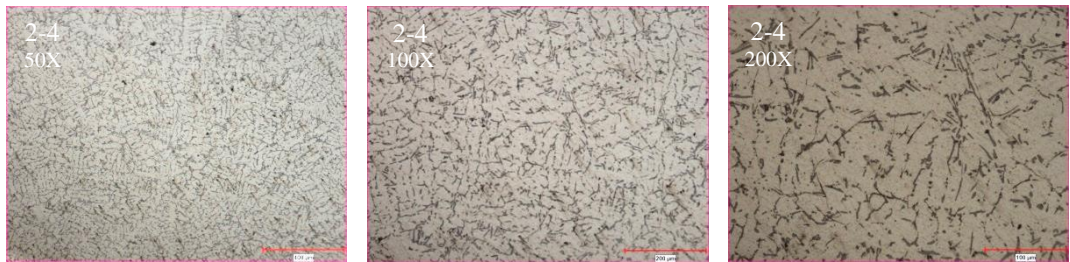
**Şekil 4.37.** 2-3 Numaralı numune grubuna ait mikroyapı görüntüleri



**Şekil 4.38.** 3-3 Numaralı numune grubuna ait mikroyapı görüntüleri



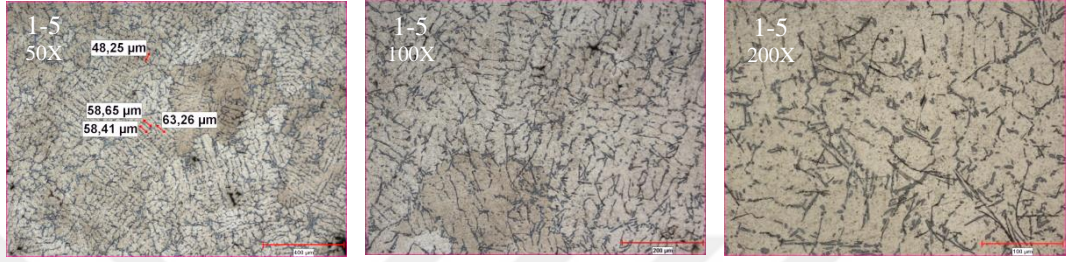
**Şekil 4.39.** 1-4 Numaralı numune grubuna ait mikroyapı görüntüleri



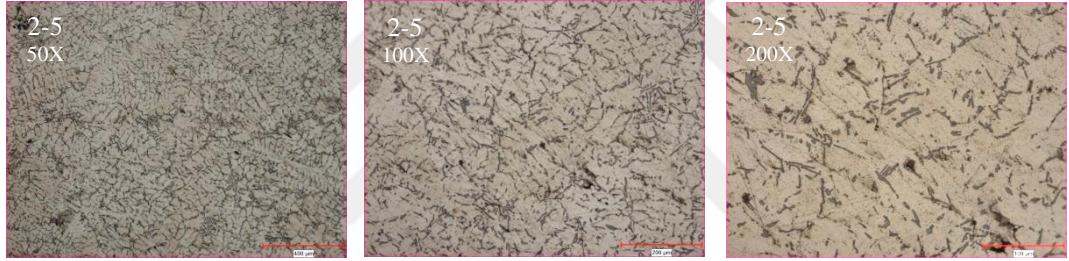
**Şekil 4.40.** 2-4 Numaralı numune grubuna ait mikroyapı görüntüleri



**Şekil 4.41.** 3-4 Numaralı numune grubuna ait mikroyapı görüntüleri



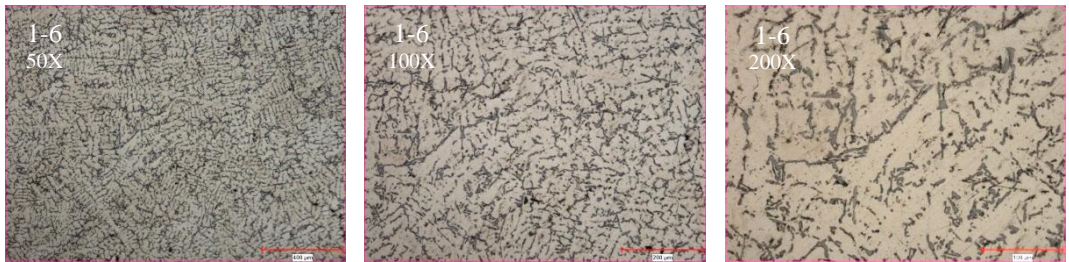
**Şekil 4.42.** 1-5 Numaralı numune grubuna ait mikroyapı görüntüleri



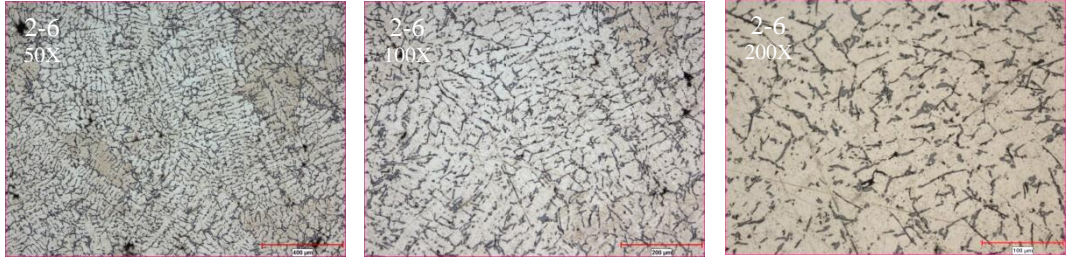
**Şekil 4.43.** 2-5 Numaralı numune grubuna ait mikroyapı görüntüleri



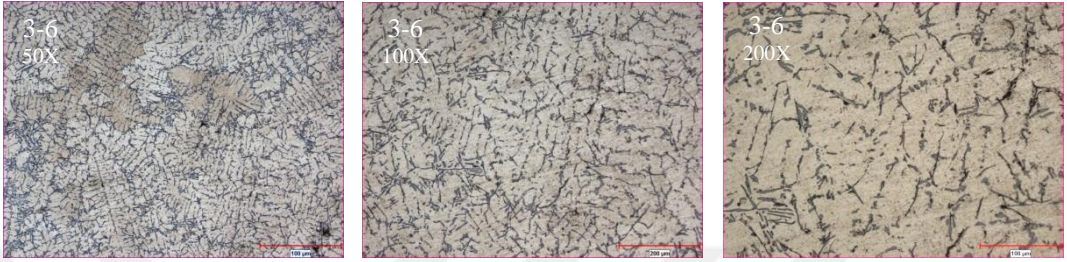
**Şekil 4.44.** 3-5 Numaralı numune grubuna ait mikroyapı görüntüleri



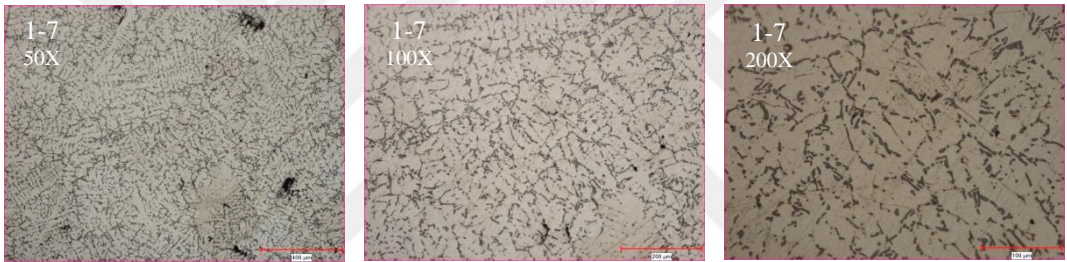
**Şekil 4.45.** 1-6 Numaralı numune grubuna ait mikroyapı görüntüleri



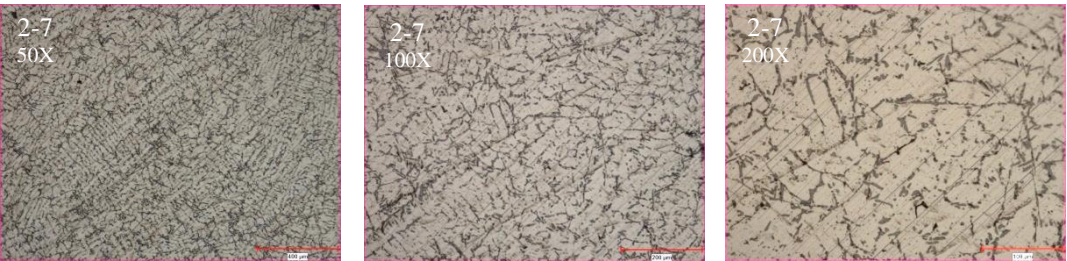
**Şekil 4.46.** 2-6 Numaralı numune grubuna ait mikroyapı görüntüleri



**Şekil 4.47.** 3-6 Numaralı numune grubuna ait mikroyapı görüntüleri



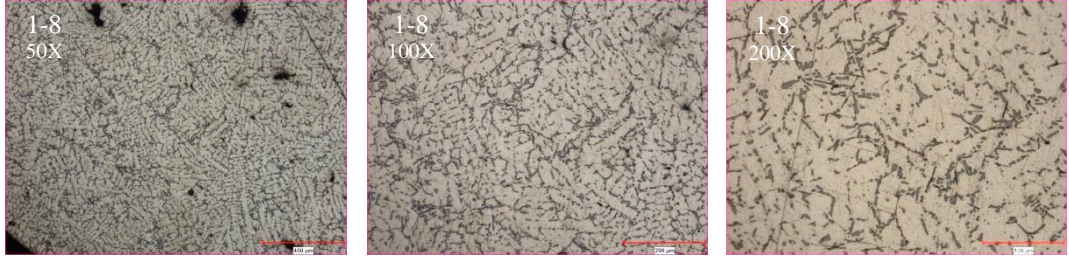
**Şekil 4.48.** 1-7 Numaralı numune grubuna ait mikroyapı görüntüleri



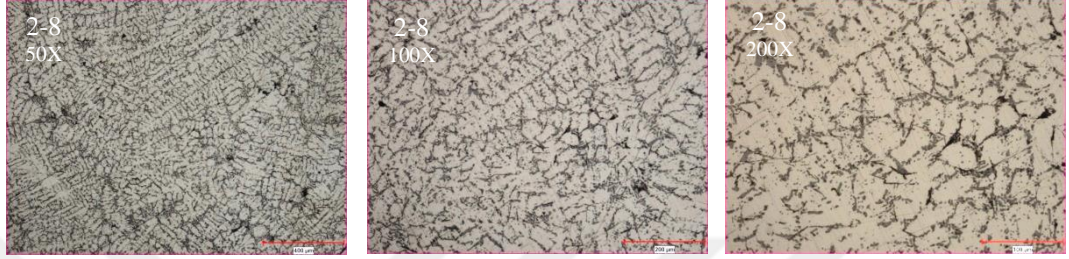
**Şekil 4.49.** 2-7 Numaralı numune grubuna ait mikroyapı görüntüleri



**Şekil 4.50.** 3-7 Numaralı numune grubuna ait mikroyapı görüntüleri



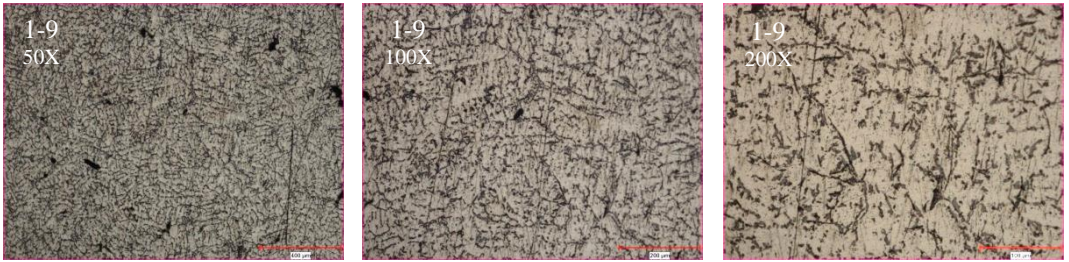
**Şekil 4.51.** 1-8 Numaralı numune grubuna ait mikroyapı görüntüleri



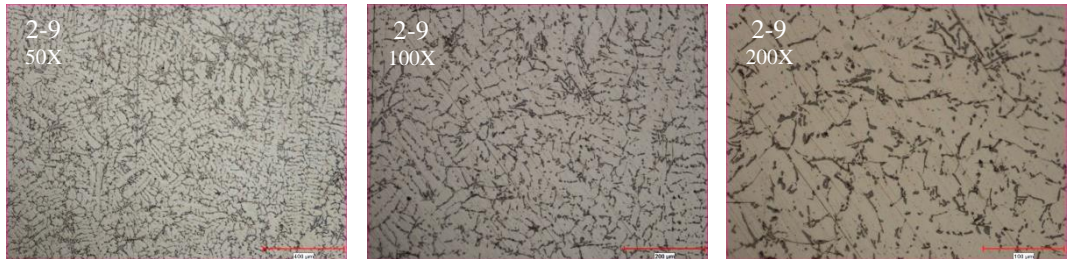
**Şekil 4.52.** 2-8 Numaralı numune grubuna ait mikroyapı görüntüleri



**Şekil 4.53.** 3-8 Numaralı numune grubuna ait mikroyapı görüntüleri



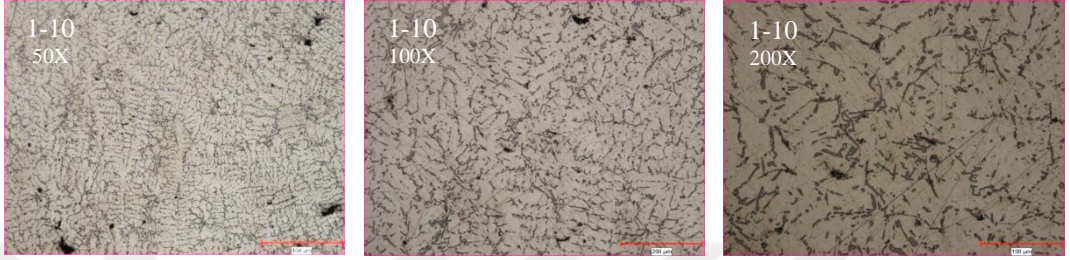
**Şekil 4.54.** 1-9 Numaralı numune grubuna ait mikroyapı görüntüleri



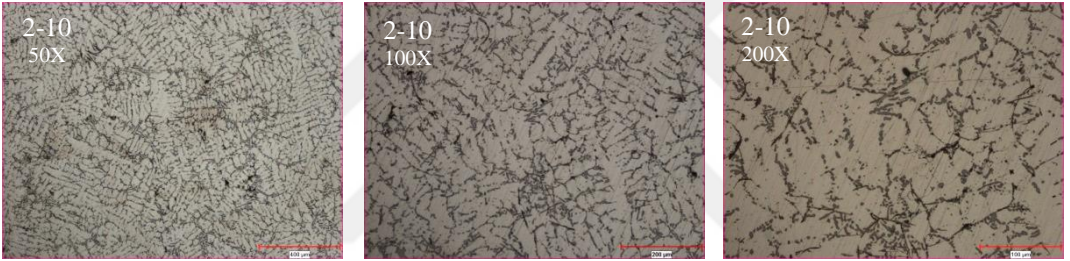
**Şekil 4.55.** 2-9 Numaralı numune grubuna ait mikroyapı görüntüleri



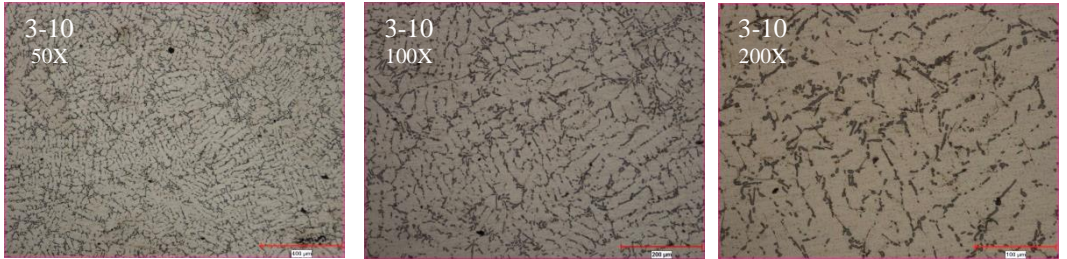
**Şekil 4.56.** 3-9 Numaralı numune grubuna ait mikroyapı görüntüleri



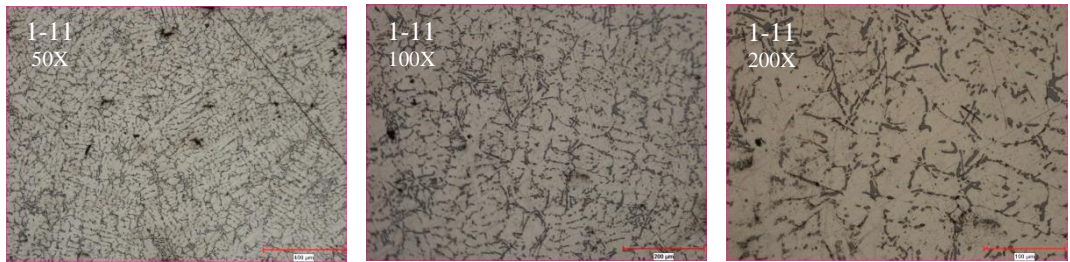
**Şekil 4.57.** 1-10 Numaralı numune grubuna ait mikroyapı görüntüleri



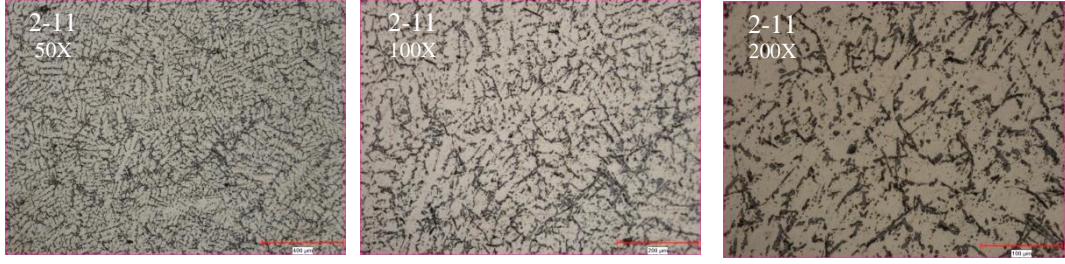
**Şekil 4.58.** 2-10 Numaralı numune grubuna ait mikroyapı görüntüleri



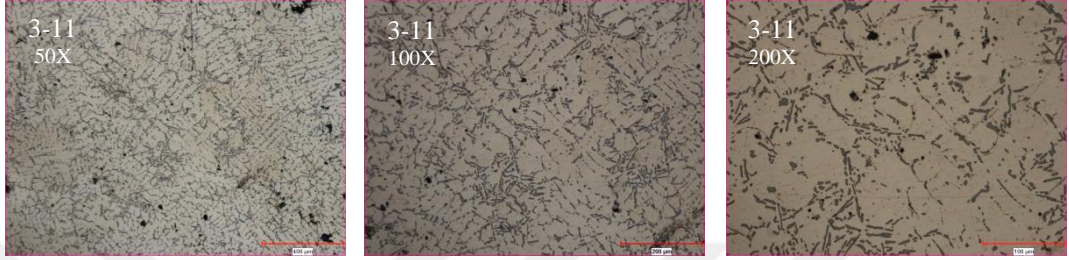
**Şekil 4.59.** 3-10 Numaralı numune grubuna ait mikroyapı görüntüleri



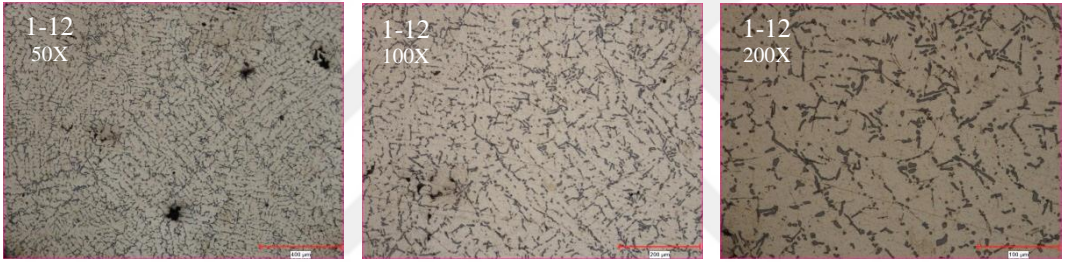
**Şekil 4.60.** 1-11 Numaralı numune grubuna ait mikroyapı görüntüleri



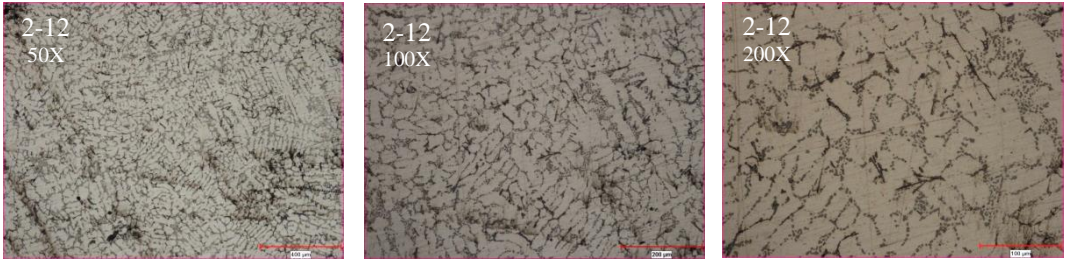
**Şekil 4.61.** 2-11 Numaralı numune grubuna ait mikroyapı görüntüleri



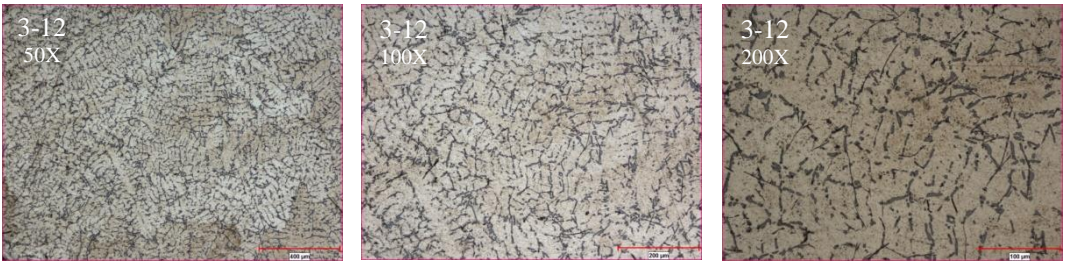
**Şekil 4.62.** 3-11 Numaralı numune grubuna ait mikroyapı görüntüleri



**Şekil 4.63.** 1-12 Numaralı numune grubuna ait mikroyapı görüntüleri



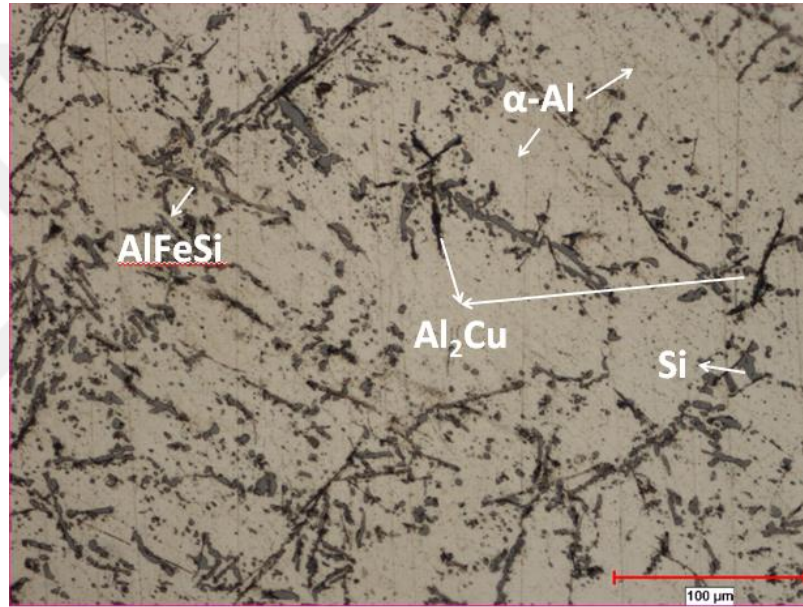
**Şekil 4.64.** 2-12 Numaralı numune grubuna ait mikroyapı görüntüleri



**Şekil 4.65.** 3-12 Numaralı numune grubuna ait mikroyapı görüntüleri

Mikroyapı analizinde elde edilen bulgular şu şekildedir;

JmatPro ile 170 °C yaşlandırma sıcaklığında yapılan faz analizi sonucunda yapı içerisinde  $\alpha$ -Al, Si,  $Al_2Cu$ , AlFeSi fazlarının yapı içerisinde ortaya çıkabileceği görülmüştür. (Bkz Şekil 4.26.) Literatüre bakıldığında SEM analizlerinde  $\alpha$ -Al fazının siyah renkte, Si fazının yumru şeklinde ve açık gri renkte,  $Al_2Cu$  fazının iğnemsî şekilde ve beyaz renkte, AlFeSi fazının iğnemsî şekilde ve koyu gri renkte görünmektedir [21]. Bilindiği üzere SEM ve OM görüntülerinde renkler birbirinin zıttı olarak görünmektedir. Bu bilgilerden yola çıkılarak mikroyapı analizlerinde görünen fazlar Şekil 4.66.' da gösterilmiştir.

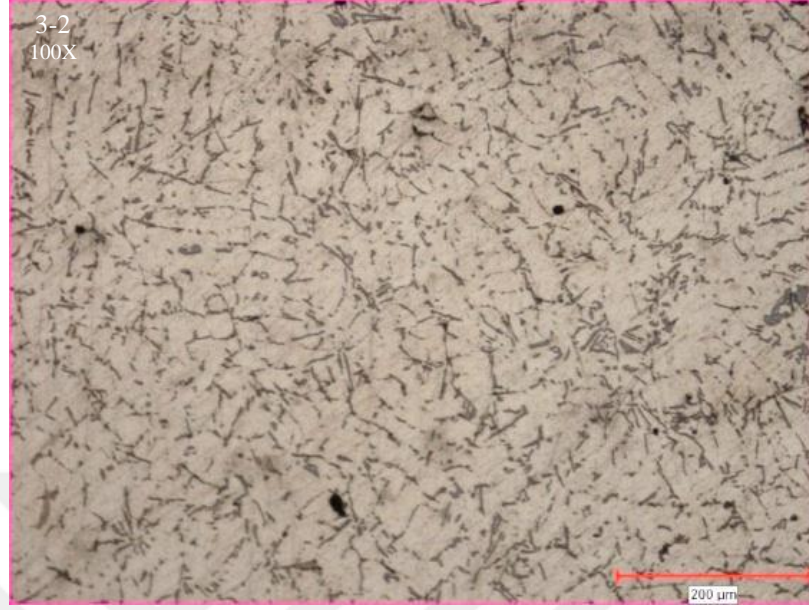


**Şekil 4.66.** Yapı içerisinde  $\alpha$ -Al, Si,  $Al_2Cu$ , AlFeSi fazlarının gösterimi

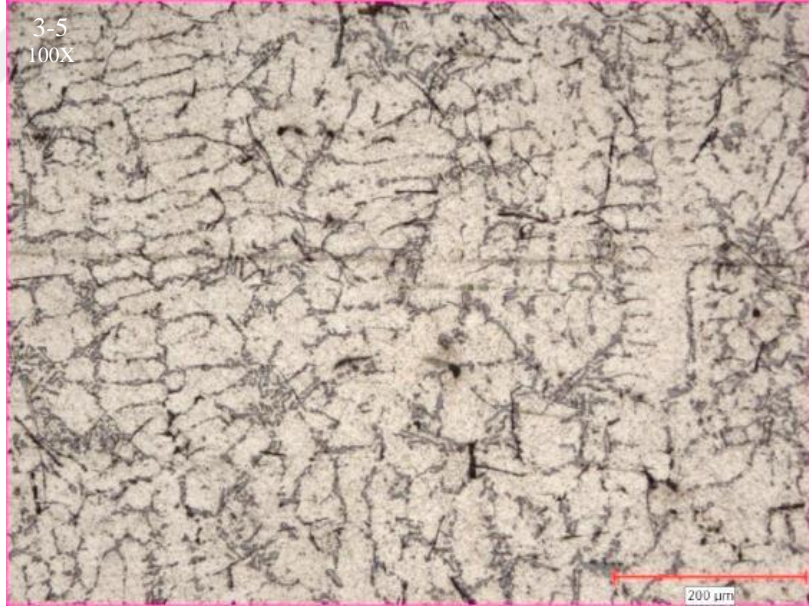
720°C' de dökülmüş, 4 saat solüsyona alma işlemine tabi tutulmuş 3-2 nolu numune (6 saat yaşlandırılmış) ile 3-5 nolu numune (9 saat yaşlandırılmış) karşılaştırıldığında, 3-2 nolu numunenin mikroyapı incelemesinde  $\alpha$ -Al dentritleri daha küçük mesafeye sahip iken, 3-5 nolu numunede  $\alpha$ -Al dentritlerinin uzadığı görülmüştür. Bunun yanı sıra intermetalik partiküller incelendiğinde 3-2 nolu numunede 6 saat yaşlandırma neticesinde  $\alpha$ -Al' nin tane sınırlarında daha homojen olarak dağıldığı göze çarparken 3-5 nolu numunede 9 saat yaşlandırma neticesinde intermetalik partiküllerin tane sınırlarında lokal olarak bir araya gelme eğilimi gösterdiği dikkat çekmiştir. 3-2 nolu numuneye göre 3-5 nolu numunenin çekme mukavemetinin %25,91 ve uzama değerinin %48,08 azaldığı görülmüştür.



İntermetalik partiküllerin belli konumlarda topaklanmak yerine homojen dağılım eğilimi göstermesi mekanik dayanımın artmasında etkili olmuştur.



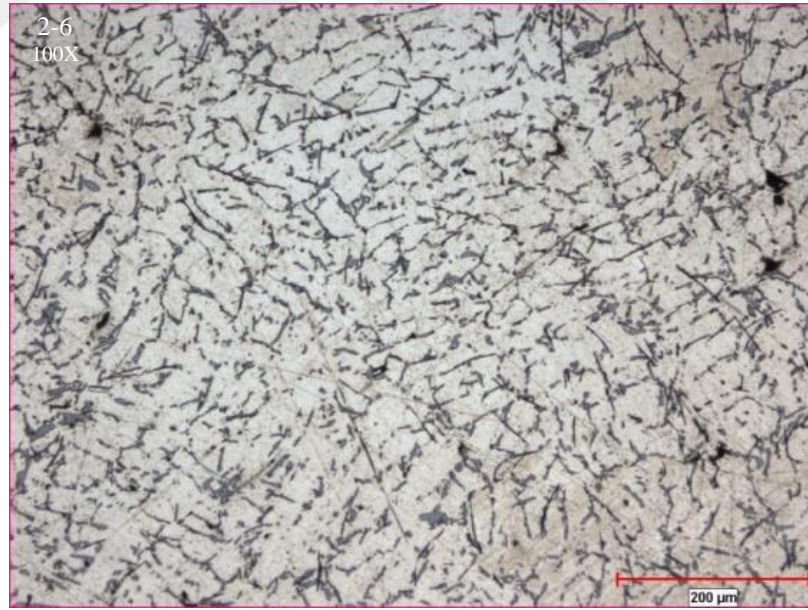
**Şekil 4.67.** 3-2 nolu numunenin 100X büyütme ile çekilmiş mikroyapı görüntüsü



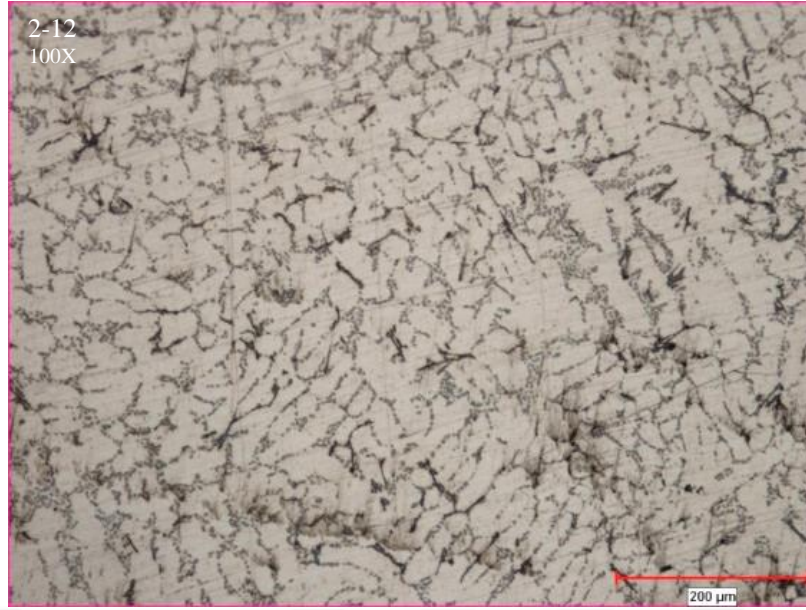
**Şekil 4.68.** 3-5 nolu numunenin 100X büyütme ile çekilmiş mikroyapı görüntüsü

715°C’ de dökülen 2-6 nolu numune (4 saat solüsyona alma, 10 saat yaşlandırma uygulanmış) 285,34 MPa ve 2-12 nolu numune (8 saat solüsyona alma, 10 saat yaşlandırma uygulanmış) 284,30 MPa çekme mukavemeti ile en büyük dayanıma sahip numunelerdir. Aynı numunelerin mikroyapı görüntüleri incelendiğinde hem intermetaliklerin morfolojileri ve dağılımlarında hem de  $\alpha$ -Al

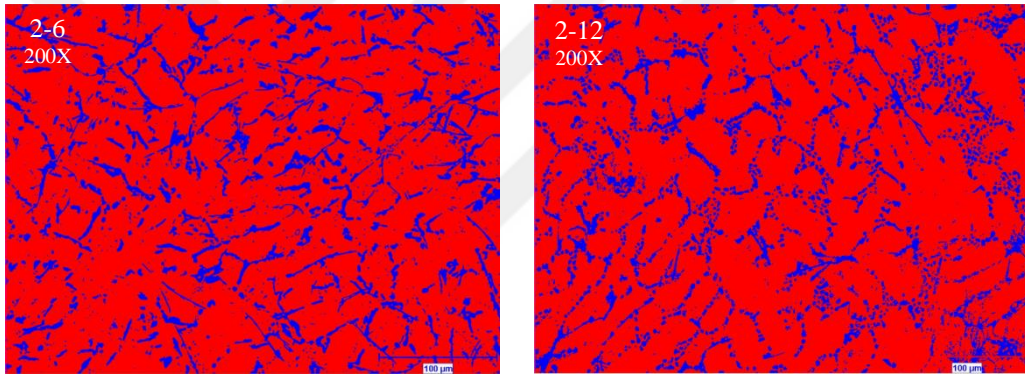
tanelerinin dağılım ve boyutlarında farklılıklar dikkat çekmiştir. Özellikle yer yer daha ince  $\alpha$ -Al dentritlerinin 8 saat solüsyona alma işlemi ile oluştuğu fark edilmektedir. Bilindiği üzere solüsyona alma işleminin amacı, yapı içerisinde bulunan ikinci fazları çözerek aşırı doymuş  $\alpha$  fazı elde etmektir. AlSi5Cu3Mg malzemesinin 495 °C’ de 8 saat solüsyona alma süresi uzun bir süre olduğu, 495 °C’ de geçirmiş olduğu sürenin artması ile  $\alpha$ -Al tanelerinin bir araya gelerek büyüme eğilimi gösterdiği ortadadır. Öte yandan intermetalik partikül morfolojisi incelendiğinde 10 saat yaşlandırma işlemi sonrasında 2-12 nolu numune çok daha ince ve küresel forma yakın Si fazının yapıya hakim olduğu, yine bu numunelerde açık renkli AlFeSi fazının yapı içinde neredeyse tamamının çözüldüğü gözlemlenmektedir 2-12 nolu numunenin yapısında bulunan intermetalik partikül formu Şekil 4.71.’ te verilen mikroyapı faz analizinde daha net görülmektedir. Bu durum dayanımın diğer numunelere göre artmasına, 2-6 nolu numuneye göre ise uzama miktarında %87,3 artışa neden olmaktadır. İki numunenin yüzde faz dağılımları incelendiğinde 2-6 nolu numunenin  $\alpha$  faz miktarı %84,43 iken 2-12 nolu numunenin  $\alpha$  faz miktarı %85,32’ dir.



**Şekil 4.69.** 2-6 nolu numunenin 100X büyütme ile çekilmiş mikroyapı görüntüsü

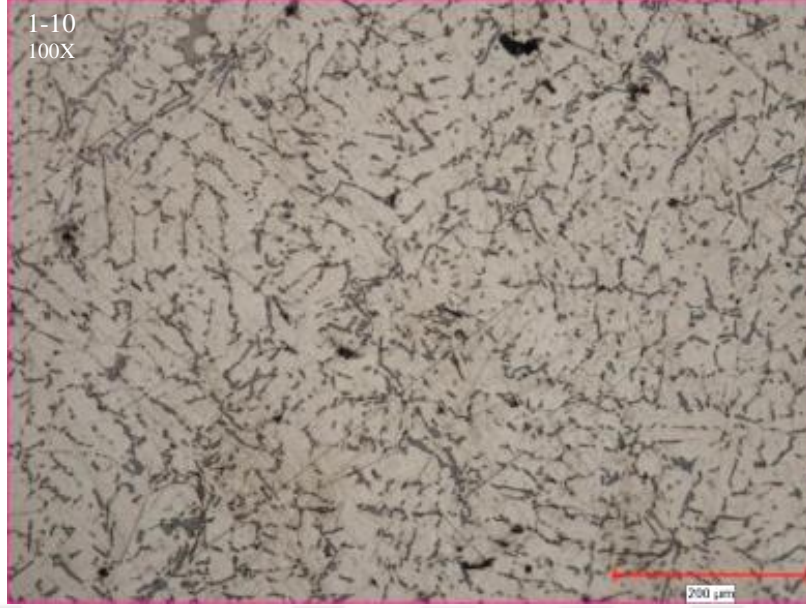


**Şekil 4.70.** 2-12 nolu numunenin 100X büyütme ile çekilmiş mikroyapı görüntüsü

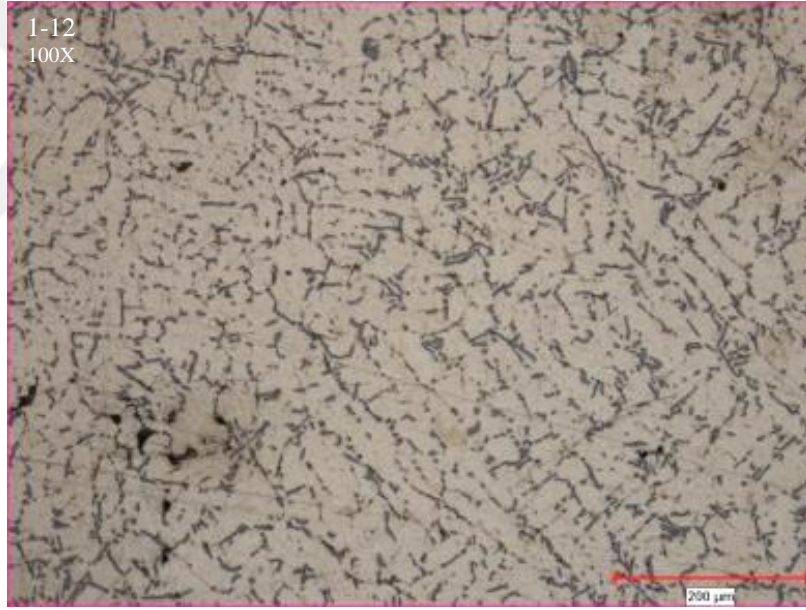


**Şekil 4.71.** 2-6 ve 2-12 nolu numunelerin mikroyapı faz analiz görüntüleri (200X)

Yaşlandırma süresi arttıkça çökelti boyutu ve/veya miktarı değişmektedir. Örneğin, 710°C’ de dökülmüş, 8 saat solüsyona alma işlemi uygulanmış ve sırasıyla 8 ve 10 saat yaşlandırılmış 1-10 ve 1-12 nolu numuneler incelendiğinde, ilk gözlemlerde 1-12’ de intermetalik partikül miktarının daha az olduğu düşünülmektedir. Ancak dikkatle incelendiğinde yaşlandırma süresinin artmasıyla 1-12’ de çökeltilen yapı içinde hem boyut hem de dağılım anlamında daha homojen olarak bulunduğu fark edilmektedir.

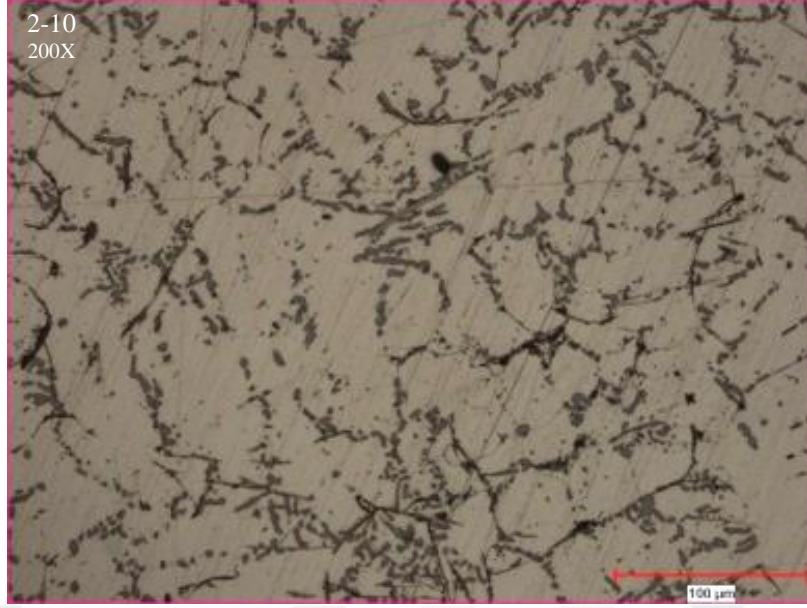


**Şekil 4.72.** 1-10 nolu numunenin 100X büyütme ile çekilmiş mikroyapı görüntüsü

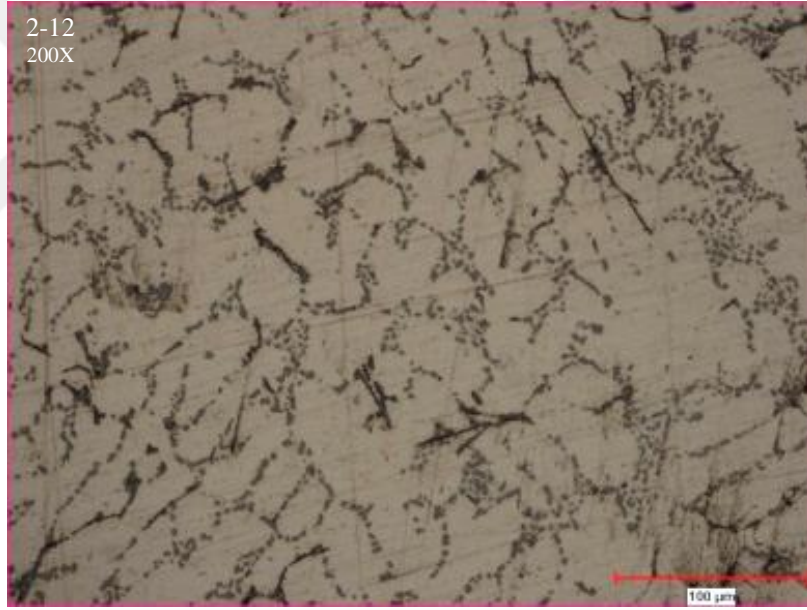


**Şekil 4.73.** 1-12 nolu numunenin 100X büyütme ile çekilmiş mikroyapı görüntüsü

715 °C’ de dökülüp, 8 saat solüsyona alınarak sırasıyla 8 ve 10 saat yaşlandırma işlemi uygulanmış, 2-10 ve 2-12 nolu numuneler arasında yaşlandırma süresine bağlı boyut farkı nettir. 8 saat yaşlandırma işlemi uygulanmış 2-10 nolu numune göre 10 saat yaşlandırma işlemi uygulanmış 2-12 nolu numunenin intermetalik partikül boyutu azalmıştır. Yapılan faz analiz değerlendirmesinde de bu durum  $\alpha$  fazının yüzde değerinin artmasıyla görülmektedir. 2-10 nolu numunenin  $\alpha$  faz yüzdesi %82,25, 2-12 nolu numunenin  $\alpha$  faz yüzdesi %85,32’ dir.



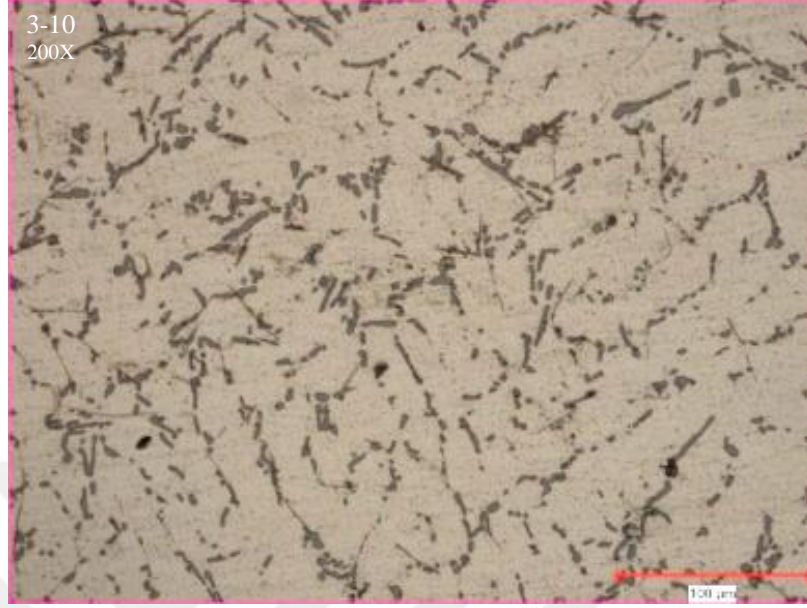
**Şekil 4.74.** 2-10 nolu numunenin 200X büyütme ile çekilmiş mikroyapı görüntüsü



**Şekil 4.75.** 2-12 nolu numunenin 200X büyütme ile çekilmiş mikroyapı görüntüsü

Yaşlandırma süresine bağlı boyut ve/veya miktar değişimi 720°C’ de dökülmüş 3-10 ve 3-12 nolu numuneler arasında da gözlemlenmektedir. 495°C’ de 8 saat solüsyona alma süresi sonrası 3-10 nolu numuneye 8 saat, 3-12 nolu numuneye 10 saat yaşlandırma işlemi uygulanmıştır. 8 saat yaşlandırılmış 3-12 nolu numunede intermetalik partikül miktarı, 10 saat yaşlandırılmış 3-10 nolu numuneye göre artmıştır. Yapılan faz analiz değerlendirmesinde de bu durum  $\alpha$  fazının yüzde

değerinin azalmasıyla görülmektedir. 3-10 nolu numunenin  $\alpha$  faz yüzdesi %85,39, 3-12 nolu numunenin  $\alpha$  faz yüzdesi %81,92' dir.



**Şekil 4.76.** 3-10 nolu numunenin 200X büyütme ile çekilmiş mikroyapı görüntüsü

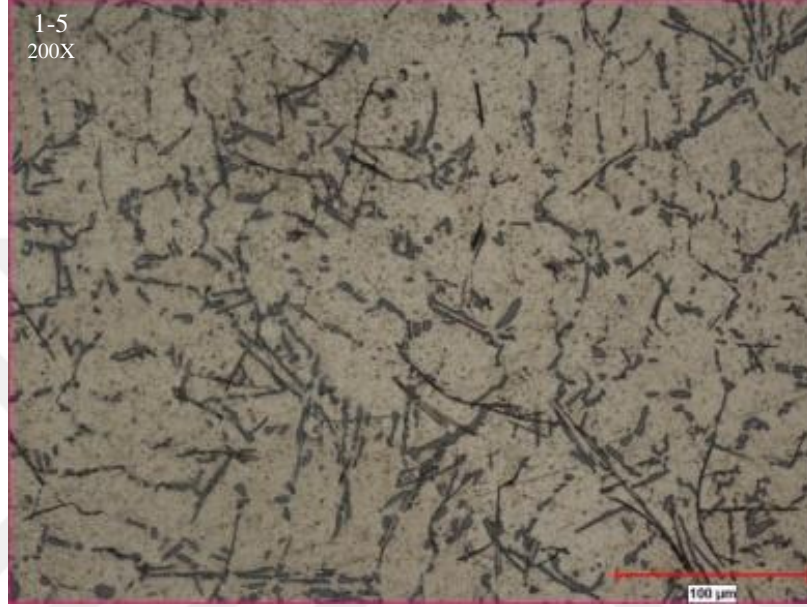


**Şekil 4.77.** 3-12 nolu numunenin 200X büyütme ile çekilmiş mikroyapı görüntüsü

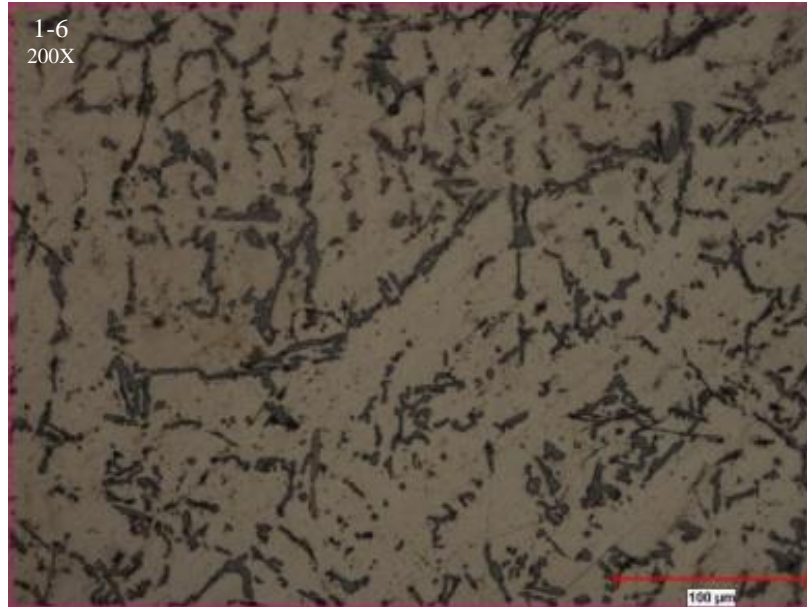
Tüm parametreler incelendiğinde (döküm sıcaklığı, solüsyona alma ve yaşlandırma süreleri) en uzun yaşlandırma süresi olan 10 saatte en büyük dayanım elde edilmiştir.

Ancak 710°C de dökülüp, 4 saat solüsyona alınan 1-5 (9 saat yaşlandırılmış) nolu numune ile 1-6 (10 saat yaşlandırılmış) nolu numune arasındaki dayanım

düşüşü dikkat çekicidir. 1-5 ve 1-6 nolu numunelerin çekme testi sonuçlarına bakıldığında 1-5 numunesinde maksimum dayanım elde edildiği görülmüştür. Bu numunelerin mikro yapıları incelendiğinde en dikkat çeken 1-5 numunesindeki  $Al_2Cu$  fazının yoğunluğudur. İlave Si partiküllerinin de daha küçük olduğu fark edilmektedir. 710°C’ de dökümün ardından 4 saat solüsyona alınan numunelerde 9 saatin ardından aşırı yaşlanma davranışı başlamıştır denebilir.

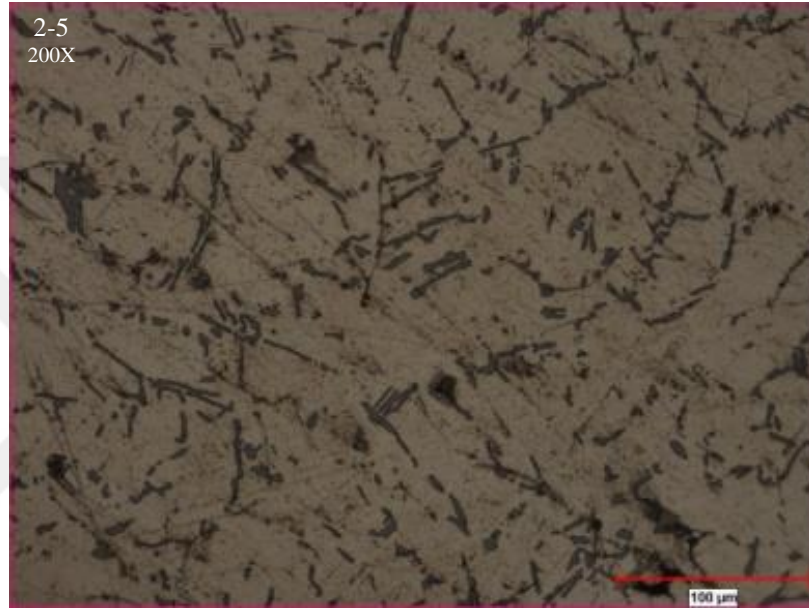


**Şekil 4.78.** 1-5 nolu numunenin 200X büyütme ile çekilmiş mikroyapı görüntüsü

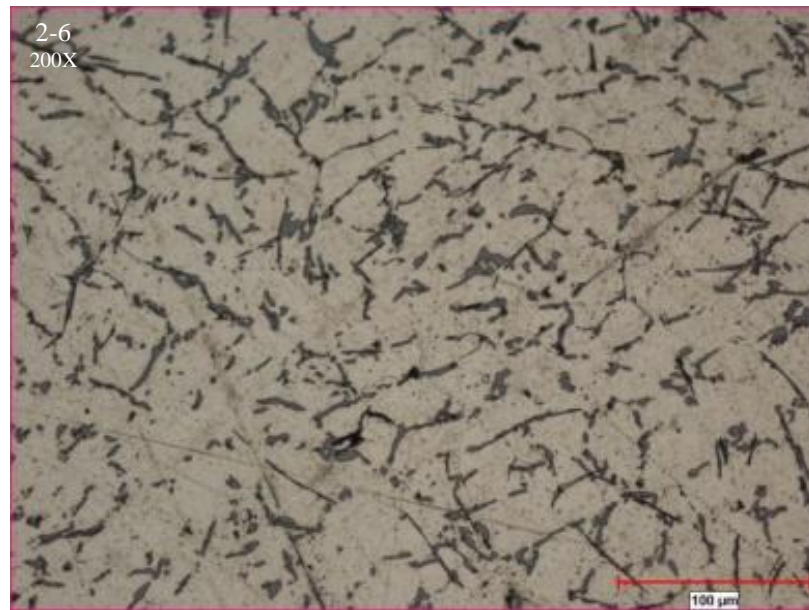


**Şekil 4.79.** 1-6 nolu numunenin 200X büyütme ile çekilmiş mikroyapı görüntüsü

715°C’ de dökülen ve 4 saat solüsyona alma işlemi uygulanan 2-5 ve 2-6 nolu numunelere ait mikroyapı görüntüleri incelendiğinde 10. saat itibariyle Si partikül boyutunun iyice küçüldüğü ve Al<sub>2</sub>Cu faz miktarının da gözle görünür biçimde arttığı fark edilmektedir. Tüm parametreler arasında en büyük dayanıma sahip olan bu numunelerin mikroyapısında dikkat çeken Si partiküllerinin yapı içinde son derece küçülmüş ve α-Al fazında homojen dağılmasının yanı sıra AlFeSi fazına yapı içerisinde neredeyse hiç rastlamayarak Al<sub>2</sub>Cu fazının Si’ den sonra yapı içinde baskın gelmesidir.



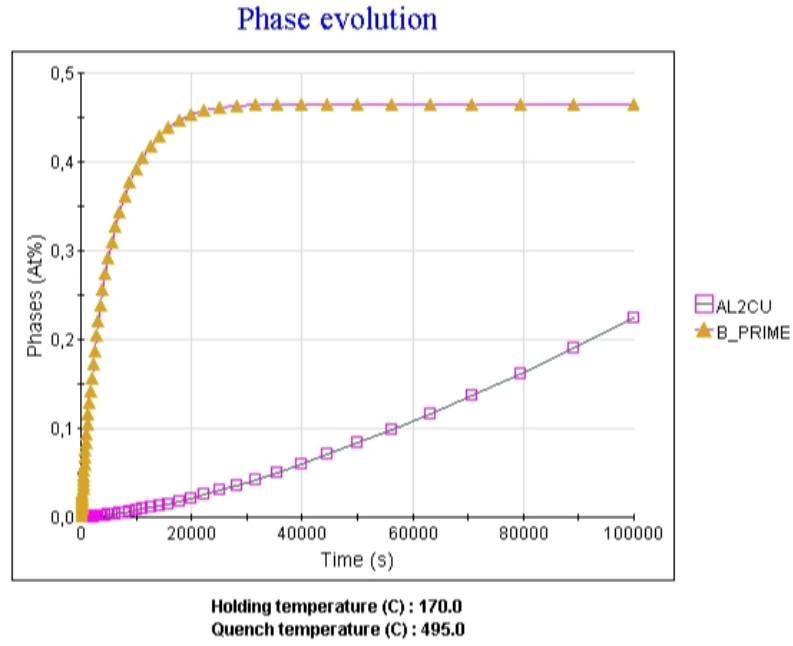
**Şekil 4.80.** 2-5 nolu numunenin 200X büyütme ile çekilmiş mikroyapı görüntüsü



**Şekil 4.81.** 2-6 nolu numunenin 200X büyütme ile çekilmiş mikroyapı görüntüsü



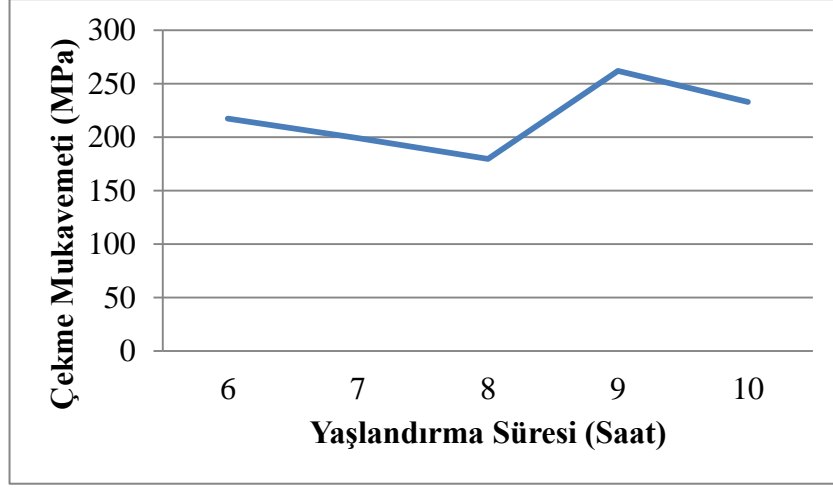
Literatüre bakıldığında Al alaşımlarında Fe içeren plaka şeklindeki partiküllerin çoğunlukla dayanımı düşürücü negatif etkileri olduğu bilinmektedir [29, 30, 31, 32, 33]. Bu çalışmada sunulmuştur ki yaşlandırma süresinin 10. saatlerine gelindiğinde AlFeSi fazı yapı içinde OM ' da görüntülenemeyecek kadar küçülmekte veya çözünmektedir. Çalışmanın ilerleyen aşamalarında daha detaylı büyük büyütmelelerdeki görüntüleme teknolojilerine sahip mikroskoplarda bu faz araştırılacaktır.



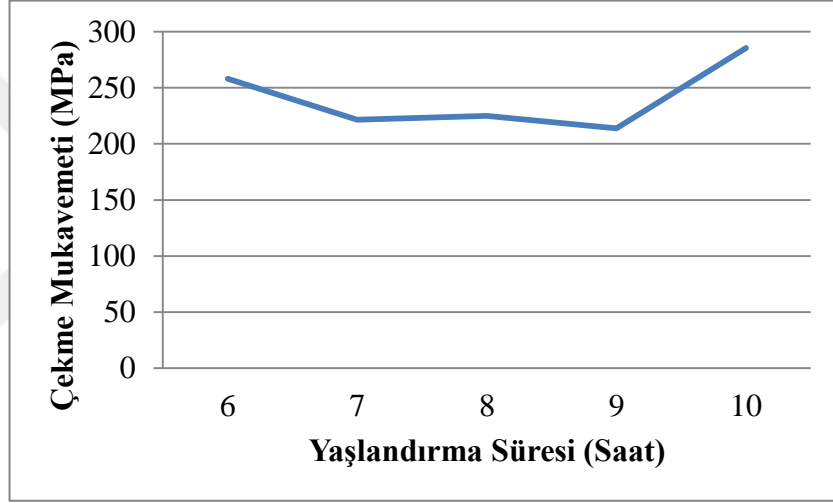
**Şekil 4.82.** JmatPro T6 ısı işlem grafiği

Ancak JmatPro simülasyon yazılımından elde edilen T6 ısı işlem grafiğine bakıldığında, yaşlandırma süresinin artmasıyla AlFeSi fazının miktarı önce artıp sonra tutma süresi artsa dahi stabil kaldığı anlaşılmaktadır. Ve atomik yüzdece doyum noktasına gelen bir faz, sürenin artmasıyla difüzyona devam edeceğinden yapı içinde çok küçük hale gelecektir. Bu da dayanım artışına katkı sağlayacaktır.

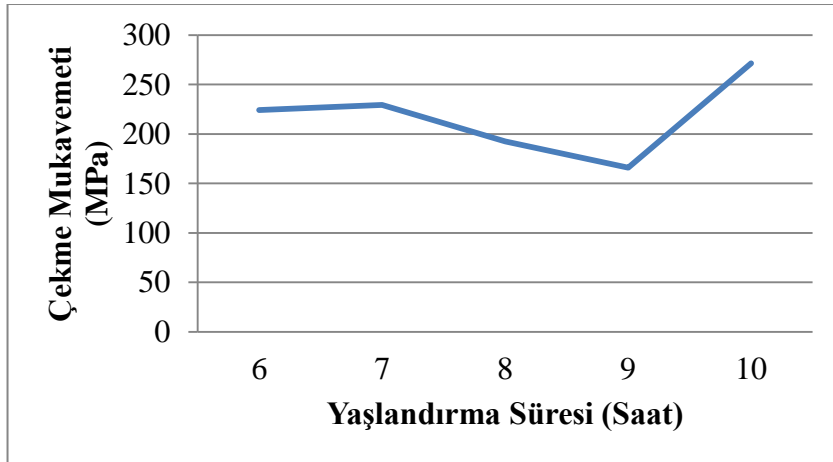
Sabit döküm sıcaklığı ve solüsyona alma süreleri ele alınarak yaşlandırma süresinin çekme mukavemetine etkisini gösteren grafikler aşağıda verilmiştir.



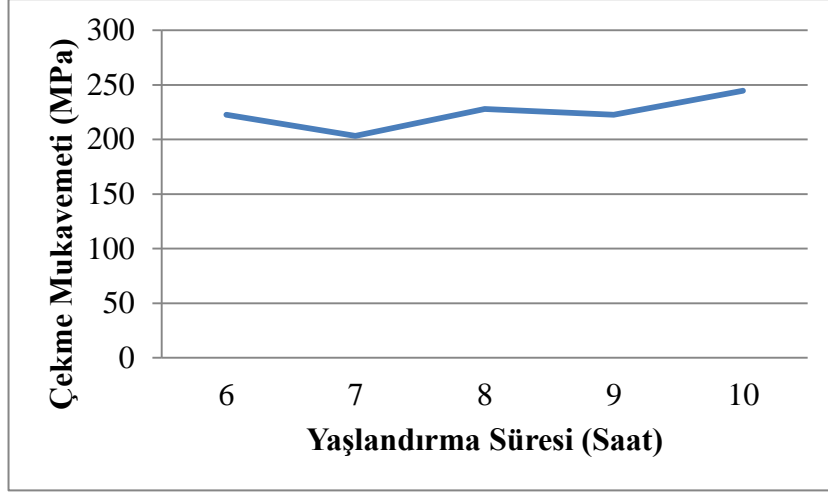
**Şekil 4.83.** 710°C’ de dökülüp, 4 saat solüsyona alma işlemi uygulanan numuneler için yaşlandırma işleminin çekme mukavemetine etkisi



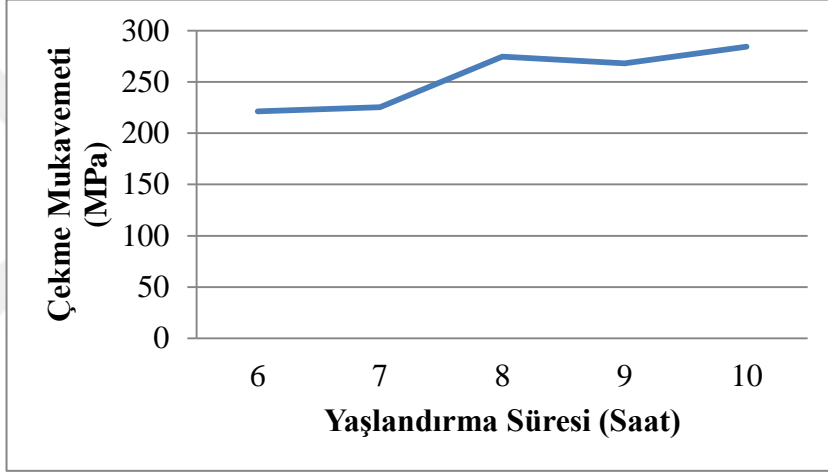
**Şekil 4.84.** 715°C’ de dökülüp, 4 saat solüsyona alma işlemi uygulanan numuneler için yaşlandırma işleminin çekme mukavemetine etkisi



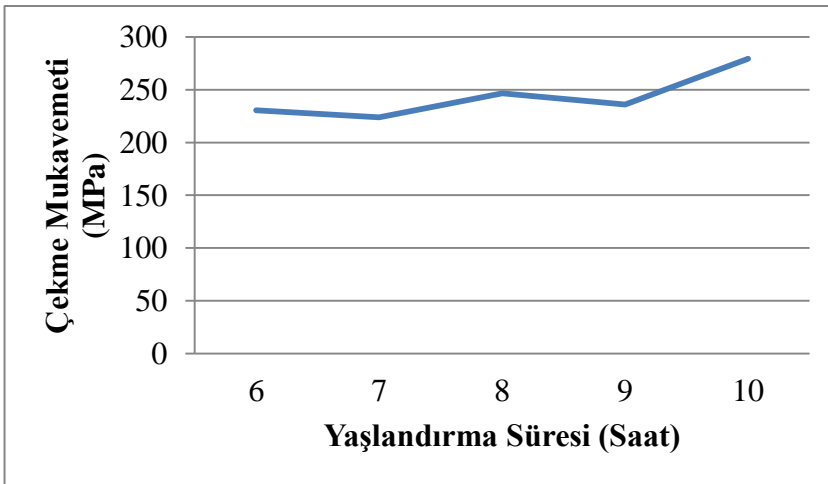
**Şekil 4.85.** 720°C’ de dökülüp, 4 saat solüsyona alma işlemi uygulanan numuneler için yaşlandırma işleminin çekme mukavemetine etkisi



**Şekil 4.86.** 710°C’ de dökülüp, 8 saat solüsyona alma işlemi uygulanan numuneler için yaşlandırma işleminin çekme mukavemetine etkisi



**Şekil 4.87.** 715°C’ de dökülüp, 8 saat solüsyona alma işlemi uygulanan numuneler için yaşlandırma işleminin çekme mukavemetine etkisi

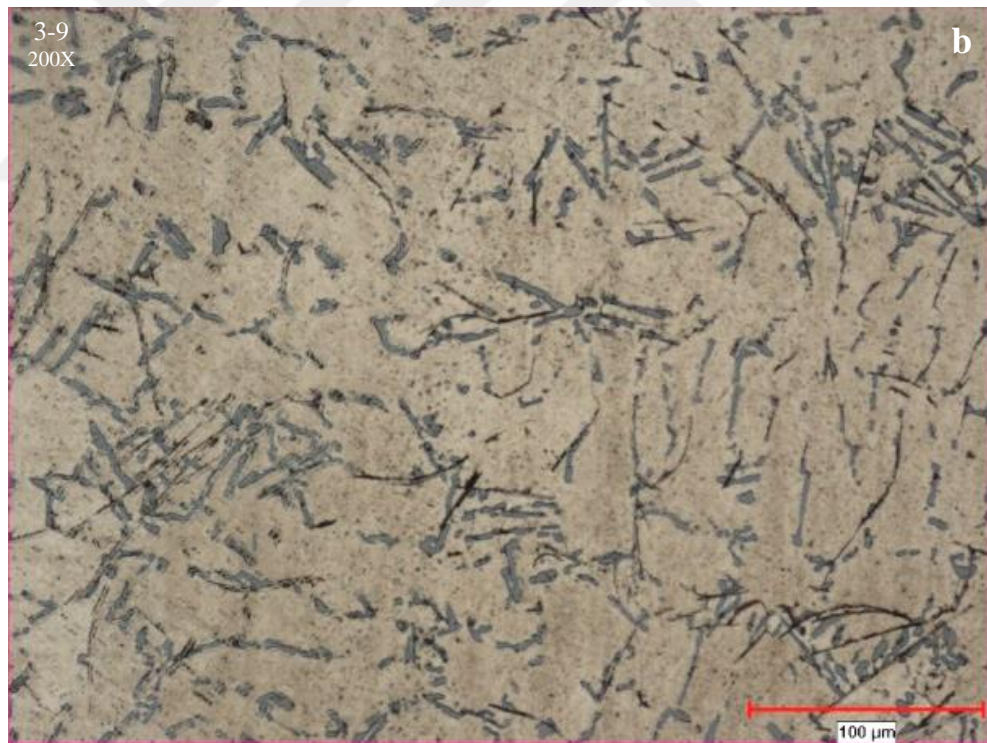
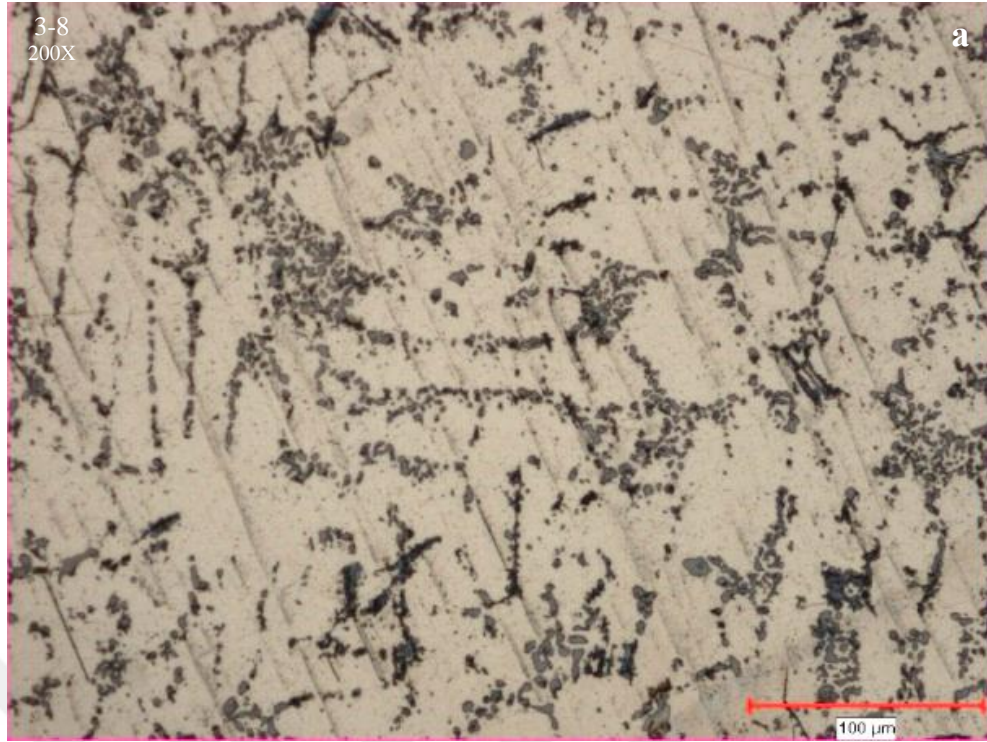


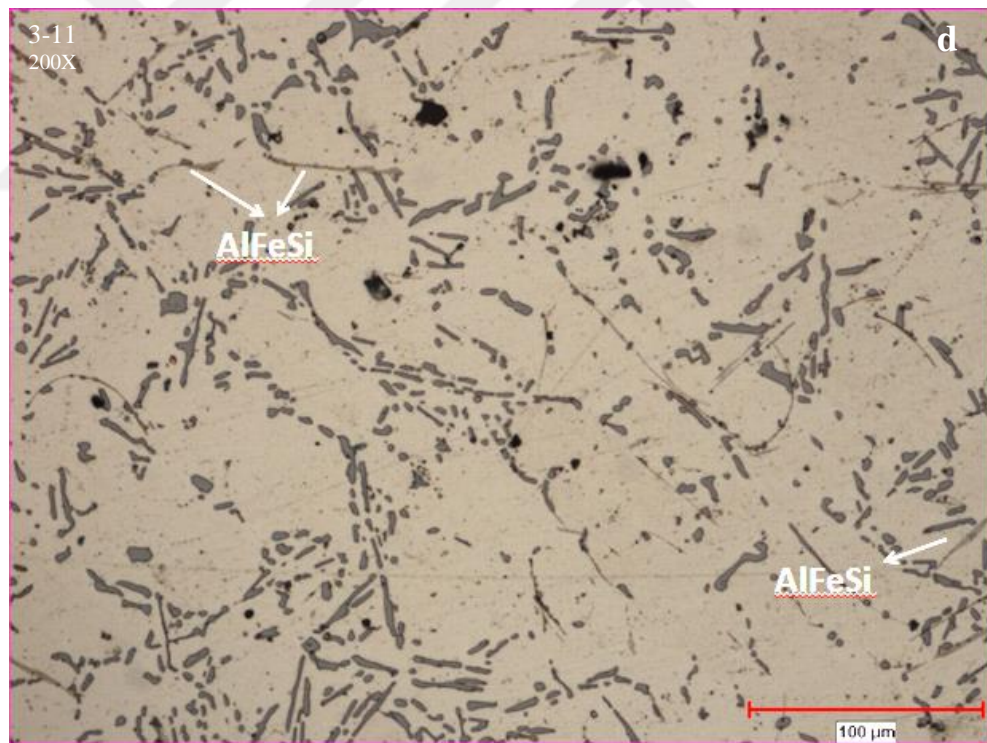
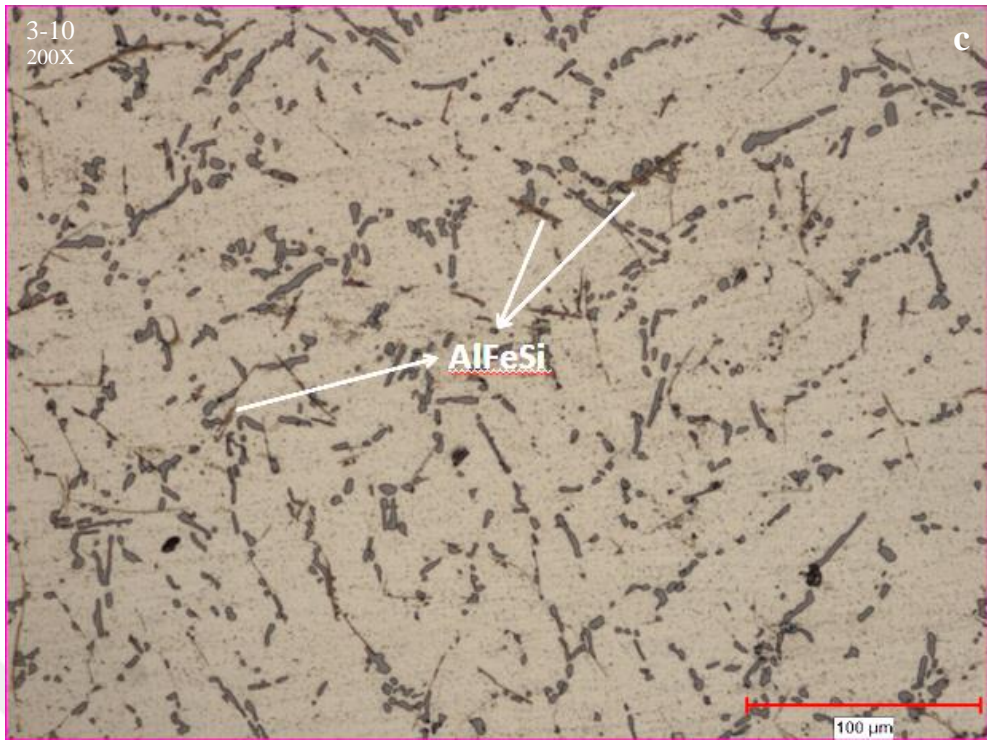
**Şekil 4.88.** 720°C’ de dökülüp, 8 saat solüsyona alma işlemi uygulanan numuneler için yaşlandırma işleminin çekme mukavemetine etkisi

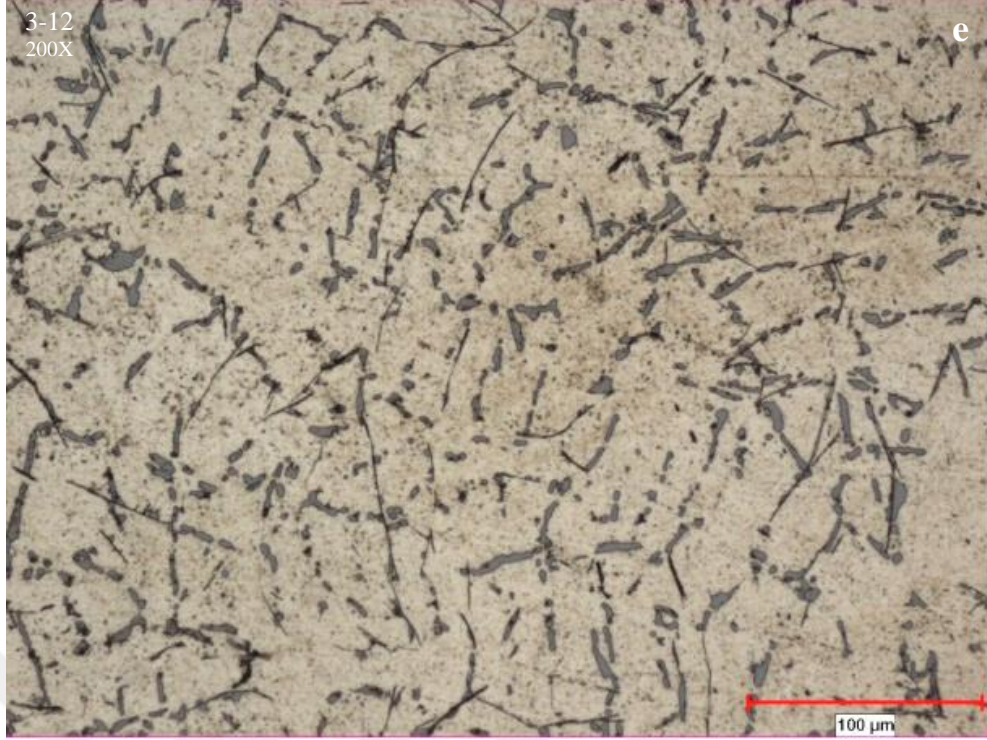
Yaşlanma eğrilerine bakıldığında dayanımın önce bir miktar artış gösterirken 8 veya 9. saatlerde düşüş gösterebildiği fark edilmiştir. Bu durumu açıklamak için mikroyapılar incelendiğinde en başta yapı içinde bulunan AlFeSi miktarının yaşlandırma süresinin artmasıyla biraz fazlalaştığını ve büyüdüğünü ancak optimum yaşlanmanın meydana geldiği ve GP2 bölgesinde  $\theta'$  yapısına geldiği tahmin edilen 10. saatte AlFeSi'nin optik mikroskoptaki görüntülerde rastlanmaması dikkat çekicidir.

Yaşlandırma süresinin bir miktar artmasıyla  $\theta'$  yapısına geçen çökeltilerde AlFeSi' nin bulk yapı içinde varlığı bilinmektedir. (Şekil 4.82.) Ancak Fe içeren alüminyum alaşımları için bu dayanım düşürücü faz iyice küçülerek optik mikroskopta görüntülenemeyecek hale gelmiştir. Ve görüntülenemeyecek kadar küçülen bu faz artık plaka formda değildir ve zarar verici etkisi azalmıştır. Dahası bu faz dışındaki diğer intermetalik partiküller de yaşlandırma süresinin artmasına rağmen optik mikroskopta hala net şekilde bulunmaktadır ancak boyutça küçülmüşlerdir bu durum sonunda dayanım maksimuma ulaşmıştır.  $Al_2Cu$  fazı ise yapı içerisinde lineer olarak devamlı artmıştır tıpkı JMatPro analizinde elde edilen Şekil 4.82.' de verilmiş olan grafikte görüldüğü gibi. 6. ve bazen de 7. saatlerde çoğunlukla AlFeSi fazına rastlanmaktadır ancak bu sürelerde diğer fazlarda henüz yeterince küçülmediği ve homojen dağılmadığından maksimum dayanım elde edilememektedir.

Bu durum Şekil 4.89. ve Şekil 4.90.'da verilen örneklerle gösterilebilir. Şekil 4.89.' da 720°C döküm sıcaklığında dökülüp, 8 saat solüsyona alma işlemi uygulanan numune grubuna ait 200X mikroskop görüntüleri verilmiştir. 6 ve 7 saat yaşlandırılmış 3-8 ve 3-9 nolu numunelerde AlFeSi fazı bulunmamaktadır.(Şekil 4.89.-a ve Şekil 4.89.-b) Yaşlandırma süresi 8 ve 9 saate çıkarılan 3-10 ve 3-11 nolu numunelerde AlFeSi fazının büyüüp, fazlalaştığı gözlemlenmiştir. (Şekil 4.89.-c ve Şekil 4.89.-d) 10 saat yaşlandırılmış 3-12 nolu numunede ise bu faz iyice küçülmüş ve optik mikroskopta görülemez. (Şekil 4.89.-e)

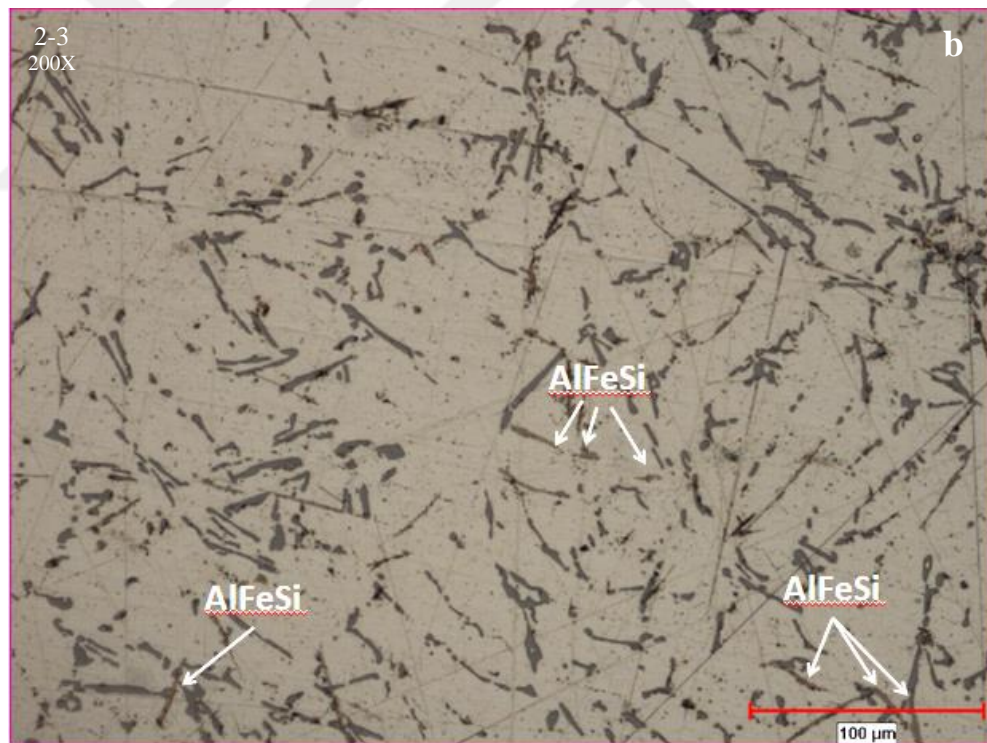
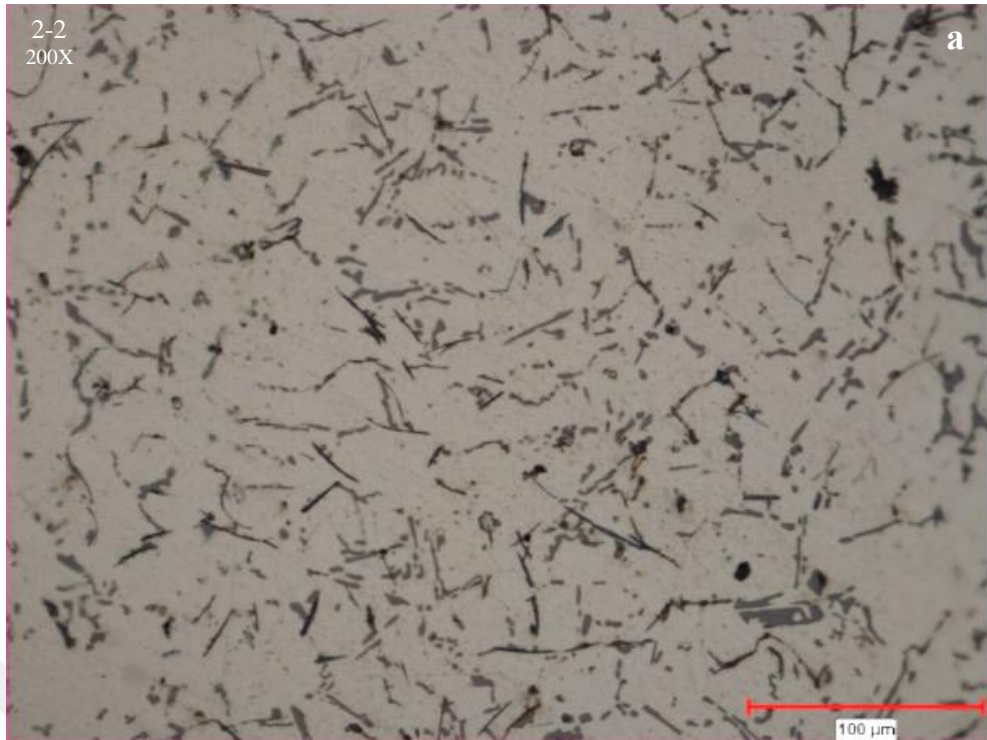




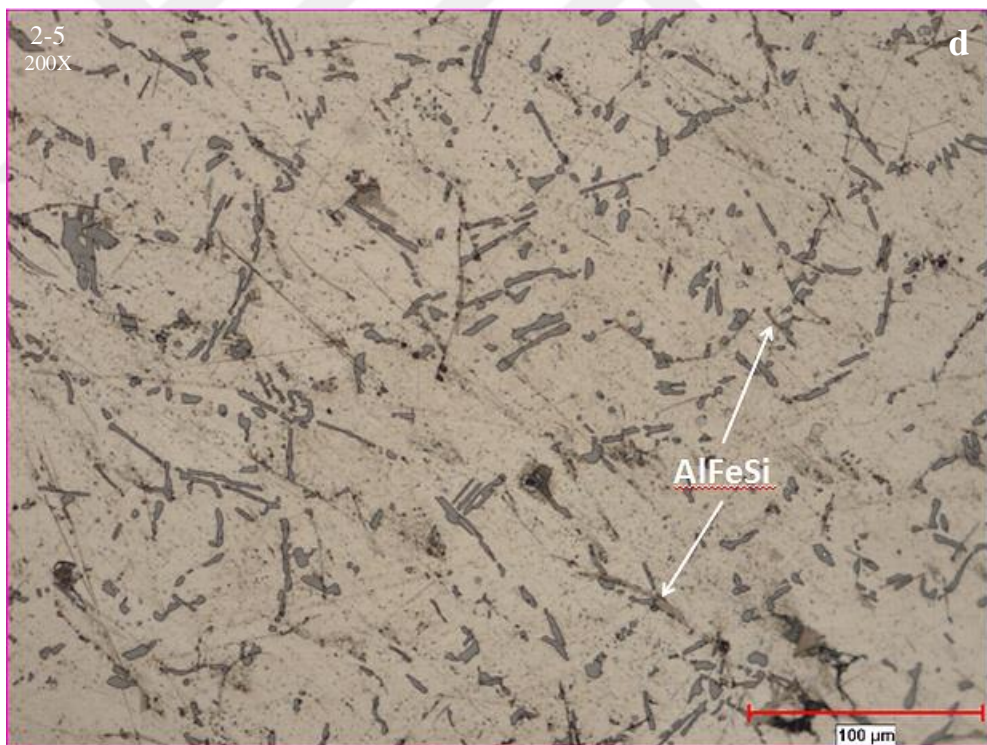
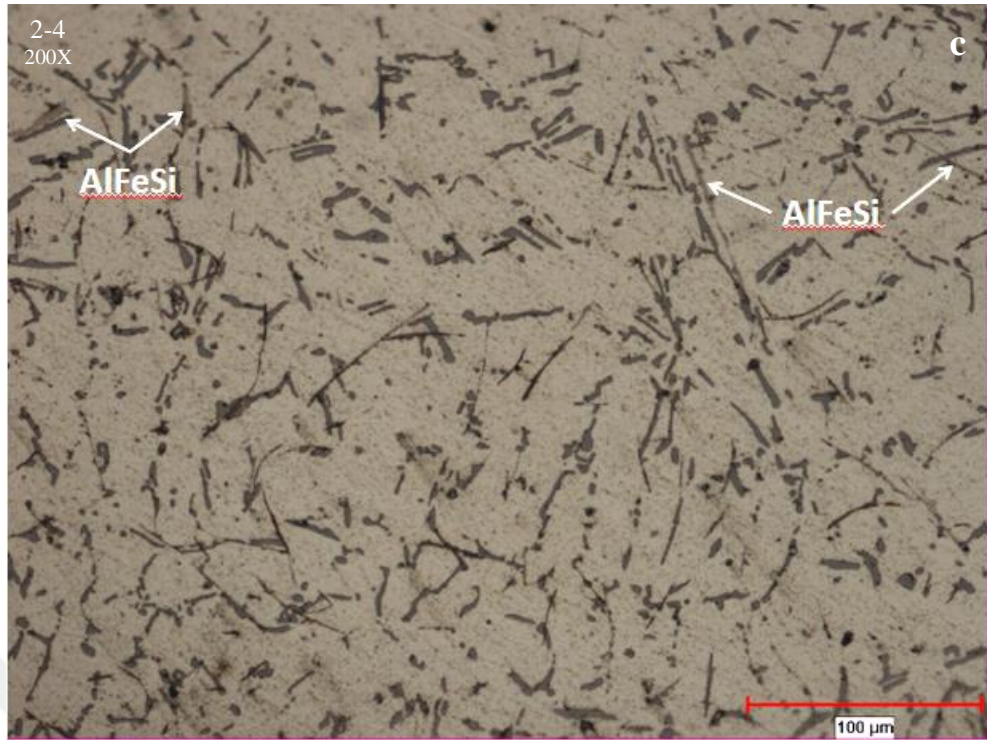


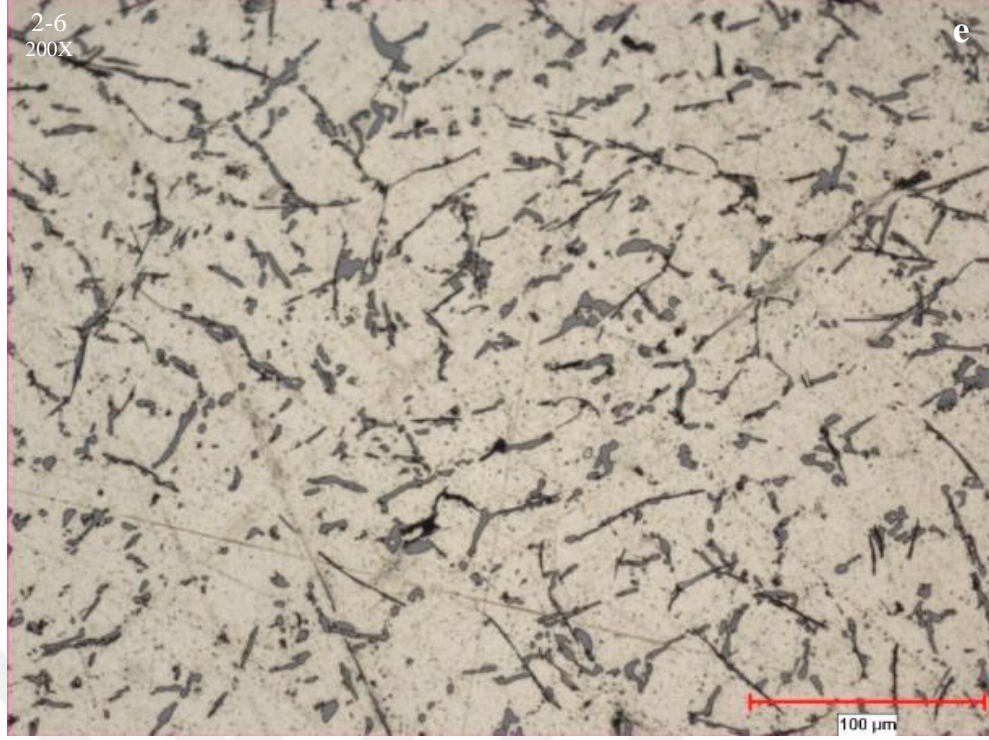
**Şekil 4.89.** 3 numaralı numune grubunda yaşlanma süresine bağlı AlFeSi fazının değişimi

Şekil 4.90.' da da 715°C döküm sıcaklığında dökülüp, 4 saat solüsyona alma işlemi uygulanan numune grubuna ait 200X mikroskop görüntüleri verilmiştir. 6 saat yaşlandırılmış 2-2 nolu numunede AlFeSi fazı bulunmamaktadır. (Şekil 4.90.-a) Yaşlandırma süresi 7, 8 ve 9 saate çıkarılan 2-3, 2-4, 2-5 nolu numunelerde AlFeSi fazının büyüyüp, fazlaştığı gözlemlenmiştir. (Şekil 4.90.-b, Şekil 4.90.-c ve Şekil 4.90.-d) 10 saat yaşlandırılmış 2-6 nolu numunede ise bu faz iyice küçülmüş ve optik mikroskopta görülememiştir. (Şekil 4.90.-e)



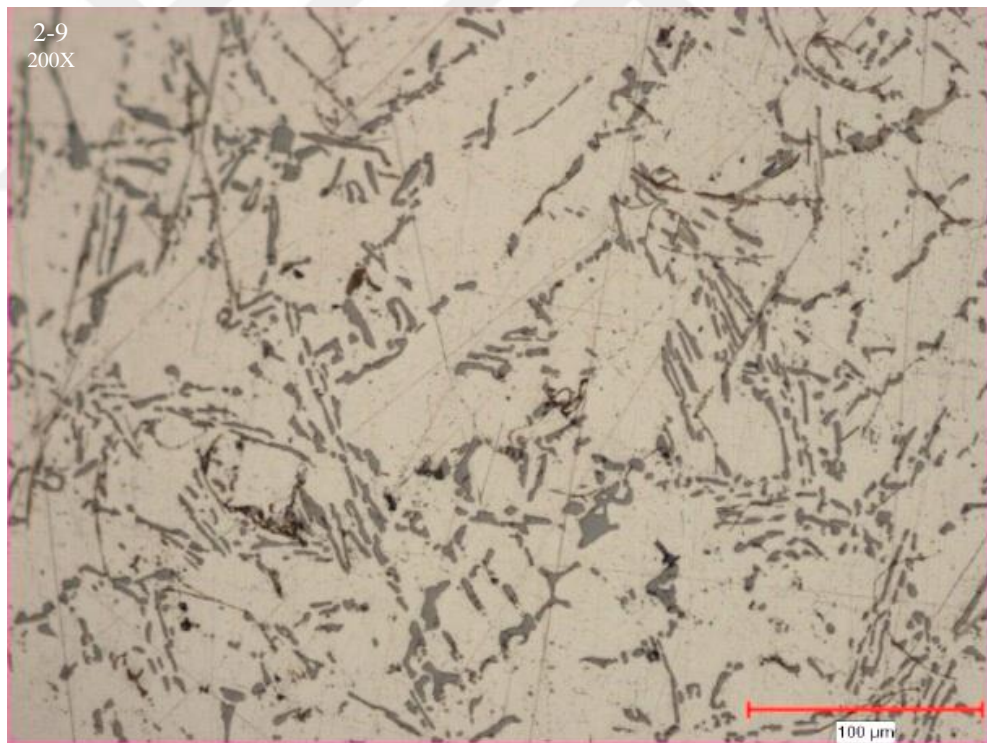
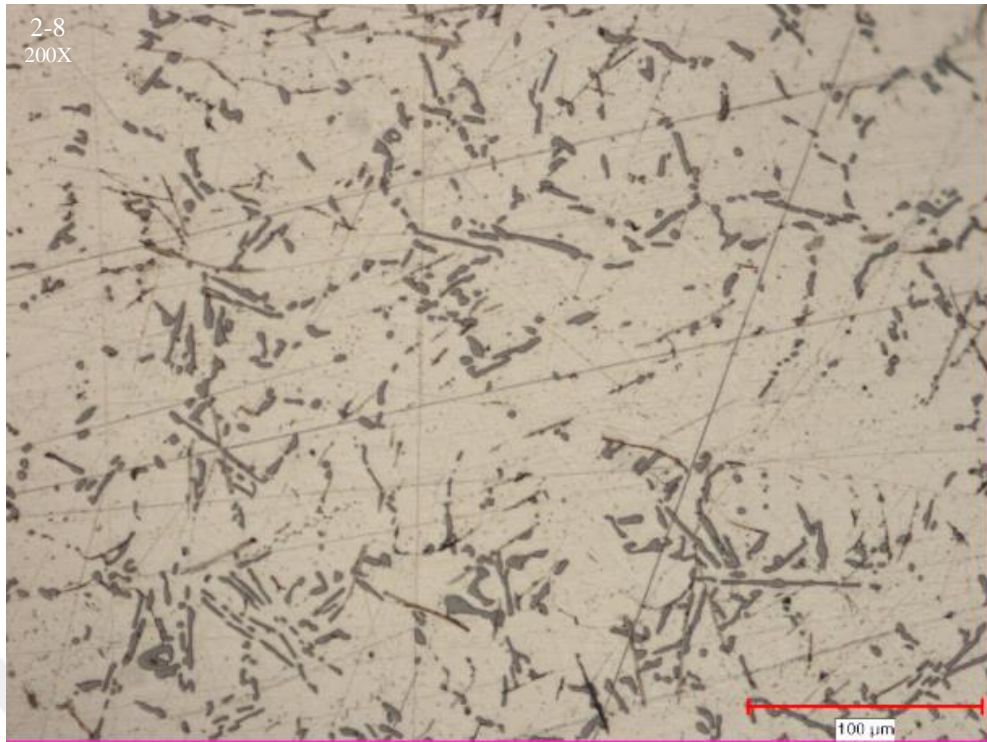


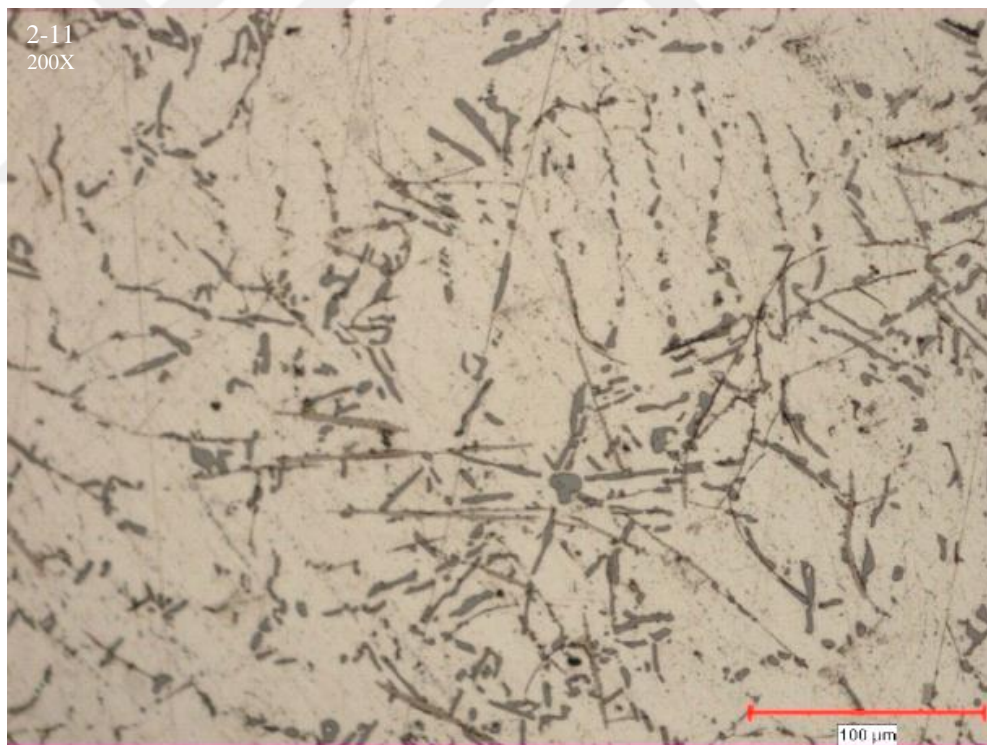
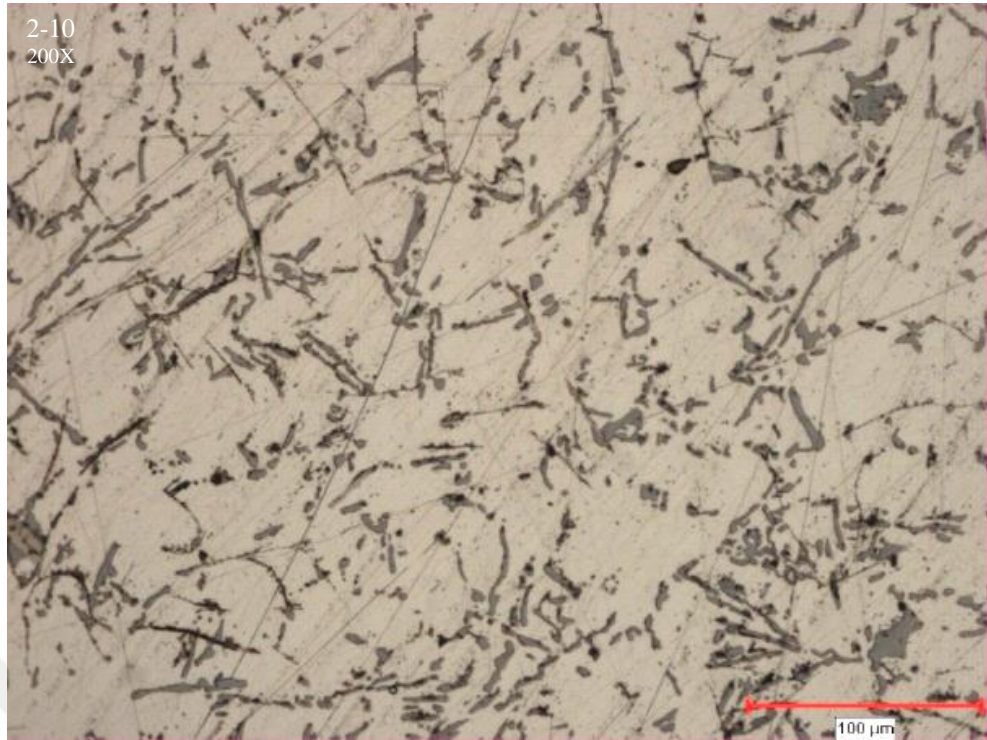


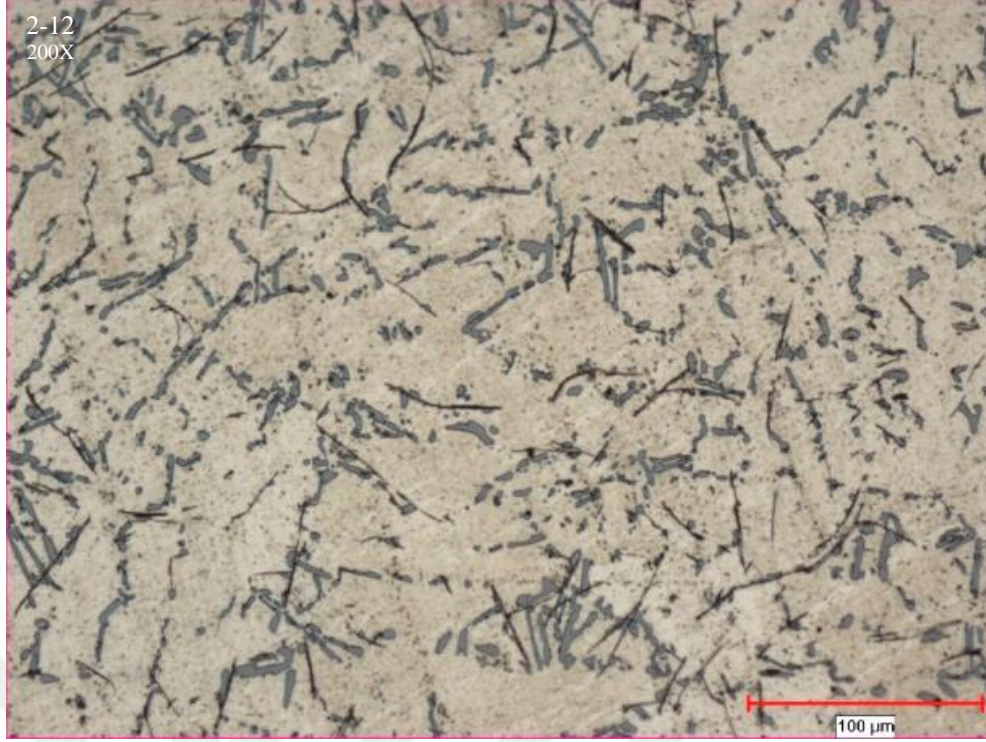


**Şekil 4.90.** 2 numaralı numune grubunda yaşlanma süresine bağlı AlFeSi fazının değişimi

715°C’ de dökülen 2 nolu numune grubuna ait 8 saat solüsyona alma işlemi uygulanan numunelerin mikroyapıları intermetalik partiküller açısından incelendiğinde; 6 ve 7 saat yaşlandırılan 2-8 ve 2-9 nolu numunelerde AlFeSi fazının olduğu bunun yanında Al<sub>2</sub>Cu fazının az miktarda olduğu, 8 saat yaşlandırılan 2-10 nolu numunede AlFeSi fazının azalması ile Al<sub>2</sub>Cu fazının epeyce arttığı, 9. ve 10. saatlere gelindiğinde ise AlFeSi fazının optik mikroskopta artık görüntülenemediği ancak Al<sub>2</sub>Cu fazının miktarca arttığı tespit edilmiştir. Bunun yanında Si partikülleri de oldukça küçülmüştür. Bu durum, 10 saat yaşlandırma uygulanan 2-12 nolu numunede iyi çekme dayanımı yanında iyi bir plastik deformasyon kabiliyetine sahip olmasını yani üstün mekanik özellik elde edilmiş olmasını açıklamaktadır.







**Şekil 4.91.** 2 numaralı numune grubunda yaşlanma süresine bağlı AlFeSi ve Al<sub>2</sub>Cu fazının değişimi

Bu tez kapsamında döküm sonrası mikroyapı incelenmemiştir ancak 495°C solüsyona alma ve 170 °C yaşlandırma koşulları için 3 farklı döküm sıcaklığında elde edilen mikroyapılar karşılaştırıldığında döküm sıcaklığı yükseldikçe çekirdeklenme miktarının arttığı görülmektedir. Yüksek döküm sıcaklığı daha büyük soğuma hızı getirir. Soğuma hızı arttıkça çekirdeklenme hızı artmış, büyüme hızı düşmüştür. Yaşlandırma prosesleri sonucunda intermetalik partiküllerin boyutları küçülmüş ve yüzdece miktarı artmış olup aynı anda dendrit tanelerinin de boyutlarının küçüldüğü görülmüştür.

T4 işlemi uygulanmış numunelerin mikroyapıları incelendiğinde ikinci faz ve intermetaliklerin mikroyapı içerisinde bazı bölgelerde bir araya gelme özelliği gösterdiği, T4 işlemi sonrasında intermetalik partiküllerin yapı içerisinde homojen dağıtılamadığı gözlemlenmektedir. T6 işlemi ile birlikte yapı içerisinde homojen olarak dağıtılan intermetalik partiküller dislokasyon hareketine hem daha fazla engel oluşturmakta hem de dislokasyonların bir araya gelme eğilimini azalttığı için diğerlerine göre sünekliliği artırmaktadır [34]. Çünkü bilindiği gibi dislokasyonların bir araya gelmesiyle pekleşme davranışının etkisi yani dayanım artarken sünekliliğinde azalması söz konusu olmaktadır. Ancak bu çalışmada özellikle dikkat

eken kısım maksimum dayanımın elde edildiği intermetalik faz erikleri, yapısı ve dağılımlı senekliği de arttırmıştır. Mukavemet artışındaki temel prensip yaşlanma ile gelişen çeşitli kararlı ve yarı kararlı yapıların dislokasyon hareketine karşı farklı direnç seviyeleri oluşturmasından kaynaklanmaktadır. Çözeltiye alma esnasında yüksek sıcaklık uygulanması, matris içinde kalıntı fazların çözünmesini hızlandırmaktadır. Özellikle T6 işleminden sonra intermetalik partiküllerin matris fazı içinde düzgün şekilde dağılması, dolayısıyla ikinci faz partiküllerinin kmelenmemesi malzemenin senekliğinde iyileşme ile sonuçlanmaktadır. Ayrıca bu çalışma kapsamında ilave edilen tane incelticiler daha ince  $\alpha$ -Al taneleri oluşturmuş ve bunun da yapay yaşlandırma esnasında yeniden kristallenme derecesini engellediği düşünülmektedir, bu durum da malzemenin hem dayanımına hem de senekliğine pozitif etki oluşturmaktadır [35, 36, 37]

## 5 SONUÇ VE ÖNERİLER

Çalışma kapsamında 3 farklı döküm sıcaklığı, 2 farklı solüsyona alma süresi, 5 farklı yaşlandırma süresi ile oluşturulmuş 30 parametreye ek 3 farklı döküm sıcaklığı ve 2 farklı solüsyona alma süresi ile T4 işlemini içeren 6 parametre ile birlikte toplam 36 parametre üzerinden numune üretilmiş ve 36 parametre için kimyasal analiz, X-Ray analizi, çekme testi, Brinell sertlik testi, Vickers mikrosertlik testi, döküm ve ısıl işlem sonrasının simülasyonu ve mikroyapı incelemeleri gerçekleştirilmiştir.

Çalışma kapsamında kullanılan AlSi5Cu3Mg alaşımının kimyasal kompozisyonunda Si bileşimi 4,5-7 arasında tutulmuştur.

Hedeflenen mukavemet değeri 270 MPa' dır. Hedeflenen mukavemet değeri 2-6, 2-10, 2-12, 3-6 ve 3-12 nolu numunelerde elde edilmiştir.

Mekanik sonuçlar karşılaştırıldığında T4 ısıl işleminin mukavemete katkısı, T6 ısıl işleme göre daha azdır. T6 yaşlandırma ısıl işlemi ile mukavemette bir artış olduğu görülmektedir. Elde edilen test sonuçlarına göre T6 işlemi uygulanan numunelerin çekme dayanımı, T4 işlemi uygulanan numunelere göre yaklaşık %14 daha fazladır.

Yaşlandırma süreleri açısından bir değerlendirme yapıldığında ise genel eğilim düşük yaşlandırma sürelerinde bir miktar artış ardından dayanımda bir miktar düşüş ve daha sonra tekrar yükseliş söz konusudur. Bu durum literatürle de desteklenen genelde dayanım düşürücü intermetalik partikülü olan AlFeSi' nin çözünmesi ve yapıya mukavemet artışı getiren Al<sub>2</sub>Cu miktarının oldukça artması ile ilişkilidir.

Aşırı yaşlanma davranışı genel olarak 10 saat sonunda görülmemiş sadece 1-6 nolu numunede aşırı yaşlanma evresine geçildiği saptanmıştır. Aşırı yaşlanma durumunun tespit edilebilmesi için numunelerin 170°C' de daha uzun süre tutularak veya yaşlandırma sıcaklığının artırılarak analizlerin tekrarlanması gerekmektedir.

Çekme testi sonuçlarındaki durum, uzama davranışı (süneklik) açısından da benzer niteliktedir. T6 işlemi uygulanan numunelerin % uzama miktarları, T4 işlemi uygulanan numunelere göre daha fazladır.

Yaşlandırma uygulanan numunelerin başlangıçta nispeten yüksek olan uzama miktarları yaşlandırma süresinin artmasıyla azalmış, en büyük dayanımın elde edildiği 9 ve 10. saatlerde en büyük uzama değerlerine ulaşılmıştır. Bu durum malzemenin dayanım-süneklik ilişkisi açısından değerlendirildiğinde ilginçtir. T6 işlemi ile birlikte yapı içerisinde homojen olarak dağıtılan intermetalik partiküller dislokasyon hareketine daha fazla engel oluştururken, dislokasyonların bir araya gelme eğilimi de ikinci faz partiküllerinin kümelenmemesi yani matris içinde düzgün dağılması süneklik artışı getirmiştir.

Döküm sonrası ve ısı işlem sonrası simülasyon uygulamalarında elde edilen sonuçlar ile test sonuçları tutarlıdır. Bundan sonra yapılacak olan geliştirme çalışmalarında simülasyon ile güvenilirlik payı yüksek sonuçlar elde edilebilir.

Mikroyapı görüntüleri karşılaştırıldığında T4 işlemi sonrasında intermetalik partiküllerin yapı içerisinde homojen dağıtılamadığı, T6 işlemi sonrasında ise intermetalik partiküllerin homojen olarak dağıtıldığı görülmüştür. Bu da T6 ile daha büyük mukavemetin yanında daha büyük sünekliği de getirmiştir.

En yüksek mukavemet değeri 715°C döküm sıcaklığı, 495 °C' de 4 saat solüsyona alma ve 170°C' de 10 saat yaşlandırma süresi ile elde edilmiştir.

En yüksek mukavemet değerine sahip 2-6 nolu numunenin mikroyapı incelemelerinde dendrit boylarının diğer numunelere ~%80 oranla daha büyük olduğu ve dendritik kol boşluğu mesafelerinin diğer numunelere oranla daha kısa olduğu görülmüştür.

Bu çalışma kapsamında tespit edilen intermetalik partiküllerin daha büyük büyütmeleme sahip SEM, TEM gibi ileri teknoloji mikroskoplar aracılığıyla yapılması çökeltilerin tespiti için gereklidir.



Soğuma hızındaki artışın mekanik değerler üzerindeki olumlu etkisi göz önünde bulundurularak döküm sıcaklığı artırılarak mekanik değerlerde iyileşme sağlanabilir. AlSr15 ilavesi sonrası Sr, silisyum ile ötektik modifikasyon yaparak silisyum partiküllerini köşeli ve sivri kenarlardan arındırır. Silisyum partikülleri de soğuma hızı arttığı zaman incelmeye başlar ve bu durumda da mukavemet artar.

Döküm prosesinde kullanılan AlTi5B1 içeriğinde bulunan yüksek ergime dereceli TiB<sub>2</sub>, TiAl<sub>3</sub> ve AlB<sub>2</sub> partikülleri matris içinde homojen olarak çözünerek çekirdeklenme için birer yüzey görevi görmektedir. Bu durumun farklı noktalarda başlaması nedeniyle tane sayısının artmasına neden olduğu bilinmektedir. Yani tane boyutunun küçülmesiyle de mukavemet artışı sağlanabilir. Ancak AlTi5B1 içeriğinde bulunan yüksek ergime dereceli bu partiküllerin, belirli bir süre sonunda topaklanma ve dibe çökme eğilimi göstermesi nedeniyle tane incelticilerin etkisi zamanla azalmaktadır. Kullanılan tane incelticilerin miktarının artırılması ve tane incelticinin ekleme periyodlarının kontrol altında tutulması ile de mukavemet artışı sağlanabilir.

Aynı bakış açısıyla döküm sonrasında kalıptan çıkarılan parçaların hızlı soğuması için havada soğutma yerine fan ile soğutma yapılarak mekanik değerlerde iyileşme sağlanabilir.

## KAYNAKLAR

- European Aluminum Association, <https://www.european-aluminium.eu/>
- Eperjesi, S., Matvija, M., Eperjesi, L., Vojtko, M. Evaluation of Cracking Causes of AlSi5Cu3 Alloy. Archives of Metalurgy and Materials. 2014, 59(3), 1-3.
- Shabestari, S.G., Moemeni H. Effect of copper and solidification conditions on the microstructure and mechanical properties of Al–Si–Mg alloys. Journal of Materials Processing Technology. 2004, 153-154, 193-198.
- Sjölander, E., Seifeddine, S. Artificial ageing of Al–Si–Cu–Mg casting alloys. Materials Science and Engineering. 2011, A 528, 7402-7409.
- ASM International Handbook Committee. ASM Handbook Vol 2 Properties and selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials. USA, 1992, 484-528 s. <http://www.world-aluminium.org>
- Aluminum Content in Cars, <https://www.european-aluminium.eu>
- Aluminum in cars, [www.european-aluminium.eu](http://www.european-aluminium.eu)
- Chen, C.J. Optimization of Mechanical Properties in A356 Via Simulation and Permanent Mold Test-Bars, Case Western Reserve University, Department of Materials Science and Engineering, Ohio, 2014, 1-2 s. (Doctor of Philosophy)
- Güven, Ş., Delikanlı, Y. AA 2024 Alüminyum Alaşımında Çökeltme Sertleşmesinin Mekanik Özelliklere Etkisi. SDU Teknik Bilimler Dergisi. 2012, 2(4), 13-20.
- Geçkinli, A.E. Alüminyum Alaşımının Isıl İşlemi, 2. Isıl İşlem Sempozyumu CD'si, Maçka, İstanbul, 2002.
- Özkan, G. Alüminyum Dökümünde, Kokil Döküm Yöntemiyle Üretilen Parçaların Alçak Basınç Döküm Yöntemiyle Üretilmesi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, İzmir, 2018, 3 s. (Yüksek Lisans Tezi)
- ASM International Handbook Committee. ASM Handbook Vol 4 Heat Treating. USA, 1991, 1861-1960 s.
- Makhlouf, M., Guthy, H.V. The Aluminum–Silicon Eutectic Reaction: Mechanisms and Crystallography, Journal of Light Metals. 2001, 1, 199–218.
- ASM International Handbook Committee. ASM Handbook Vol 3 Alloy Phase Diagrams. USA, 1992, 321 s.
- Biol, Y. Alüminyum Alaşımında Tane İnceltme. 6. Uluslararası Ankiros Döküm kongresi. 13 Eylül, 2012, İstanbul
- Jones, G. P., Pearson, J. Factors Affecting the Grain-Refinement of Aluminum Using Titanium and Boron Additives. Metallurgical and Materials Transactions B. 1976, 7, 223-225.
- Çolak, M. Alüminyum Döküm Alaşımının Katılaşması Sırasında Yarı Katı Bölge Sıvı Geçirgenliğinin Modellenmesi. Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metal Eğitimi Anabilim Dalı, Sakarya, 2015, 39-41 s. (Doktora Tezi)
- Meyers, M., Chawla, K.K. Mechanical Behavior of Materials, New York, United States of America, 2009, 571-581 s.
- Çetin, A. Alüminyum Döküm Alaşımları, 4, 2017, 53-54.
- Irızalp, S.G, Saklakoğlu, N., Effect of Fe-rich intermetallics on the microstructure and mechanical properties of thixoformed A380 aluminum alloy. Engineering Science and Technology, an International Journal. 2014, 17, 58-62 s.
- Çiğdem, M. İmal Usulleri, Çağlayan Kitabevi, İstanbul, 2006, 54-55 s.
- Malhotra, V. Kumar, Y. Study of Process Parameters of Gravity Die Casting Defects. International Journal of Mechanical Engineering and Technology, 2016, 7(2), 208-211.

ASM International Handbook Committee. ASM Handbook Vol 15 Casting. USA, 1988, 1622-1692 s.

ASTM E155 - 15, Standard Reference Radiographs for Inspection of Aluminum and Magnesium Castings

TS EN 1706 Alüminyum ve alüminyum alaşımları- Dökümler- Kimyasal bileşim ve mekanik özellikler, 2010

DIN 50125, Testing of metallic materials - Tensile test pieces, 2016  
<https://www.sentessoftware.co.uk/>

Engineering Science and Technology, an International Journal, no. 7, 2014

Dinnis, K. As-cast Morphology of Iron-Intermetallics in Al-Si Foundry Alloys, Scripta materialia. 2005, 53(8), 955-958.

Bonsack, W. Effects of minor alloying elements on aluminum casting alloys:Part II. Aluminum-Silicon Alloys ASTM Bull. 1943, 124, 41-51.

Couture, A. Iron in Aluminum Casting Alloys a Literature Survey. International Journal of Cast Metals. 1981, 6 (4) , 9-17.

Crepeau, P. Effect of Iron in Al-Si Casting Alloys: a Critical Review AFS Transactions. 1995, 103, 361-366.

Irizalp, S. G., & Saklakoglu, N. High strength and high ductility behavior of 6061-T6 alloy after laser shock processing. Optics and Lasers in Engineering, 77, 2016, 183-190

Ghosh, A., Ghosh, M., & Shankar, G. On the role of precipitates in controlling microstructure and mechanical properties of Ag and Sn added 7075 alloys during artificial ageing. Materials Science and Engineering: A, 738, 2018, 399-411.

Lin, L., Liu, Z., Bai, S., Zhou, Y., Liu, W., Lv, Q. Effects of Ge and Ag additions on quench sensitivity and mechanical properties of an Al-Zn-Mg-Cu alloy, Mater. Sci. Eng. A 682, 2017, 640-647.

Ghosh, R., Venugopal, A., Sankaravelayudham, P., Panda, R., Sharma, S.C., George, K.M., Raja, V.S. Effect of thermomechanical treatment on the environmentally induced cracking behavior of AA7075 Alloy, J. Mater. Eng. Perform. 24, 2015, 545-555.

Saunders, N. The Modelling of Stable and Metastable Phase Formation in Multi-Component Al-Alloys. 9th International Conference on Aluminium Alloys, 2-5 August, 2004, Brisbane, Australia

## ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : İpek ERTEM DİVRİK

Doğum Yeri ve Yılı : Turgutlu, 1988

Medeni Hali : Evli

Yabancı Dili : İngilizce

E-posta : ipekertem@hotmail.com

### Eğitim Durumu

Lise : Cumhuriyet Lisesi, 2006

Lisans : Sakarya Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği  
Bölümü, 2010

### Mesleki Deneyim

Çertürkler Mak. Müh. Ltd. Şti 2011-2012

Ege Üniversitesi Ege Meslek Yüksekokulu 2011-2012

Elit Metalurji San ve Tic Ltd. Şti 2012

Özay Döküm İmalat San ve Tic A.Ş 2013-...