

**T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**DÖVME ALÜMİNYUM PARÇALARININ ISIL İŞLEM
PRATIĞİNİN GELİŞTİRİLMESİ**

**ÖMER SÜRME
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MALZEME BİLİMİ VE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**GEBZE
2016**

**T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**DÖVME ALÜMİNYUM PARÇALARININ
ISIL İŞLEM PRATIĞİNİN GELİŞTİRİLMESİ**

ÖMER SÜR MEN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MALZEME BİLİMİ VE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

TEZ DANIŞMANI

DOÇ. DR. MEHMET TARAKÇI

GEBZE

2016

T.R.

GEBZE TECHNICAL UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

**IMPROVEMENT OF HEAT TREATMENT
APPLICATION OF ALUMINIUM FORGED
PARTS**

OMER SURMEN

A THESIS SUBMITTED FOR THE DEGREE OF

MASTER OF SCIENCE

DEPARTMENT OF MATERIALS SCIENCE AND

ENGINEERING

THESIS SUPERVISOR

ASSOC. PROF. DR. MEHMET TARAKCI

GEBZE

2016



YÜKSEK LİSANS JÜRİ ONAY FORMU

GTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 14/01/2016 tarih ve 2016/04 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 10/02/2016 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Ömer Sürmen'in tez çalışması Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) : DOÇ. DR. MEHMET TARAKÇI

ÜYE

: DOÇ. DR. YÜCEL GENCER

ÜYE

: PROF. DR. SAKİN ZEYTİN

ONAY

Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun

...../...../..... tarih ve/..... sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

ÖZET

Endüstriyel uygulamalarda, alüminyumun sıcak dövülmesi 480°C'ye ısıtılmış stoklar yardımıyla gerçekleştirilmektedir. Çubuk, çoğunlukla indüksiyon ısıtma sistemi ile bir kaç dakikada istenilen sıcaklığa ısıtılmakta, takiben dövülerek şekillendirilmektedir. Parça oda sıcaklığına soğutulduktan sonra olağan ısıl işlemler uygulanarak sertleştirilmektedir.

Bu çalışmada, çözeltiye almak için tekrar ısıtılmasına gerek duyulmadan sıcak dövülmüş parçaya doğrudan su verilmesi ve yaşlandırılması ile yapı ve mekanik özelliklerdeki değişimin incelenmesi, nihai olarak doğrudan ısıl işlem görmüş parçaların geleneksel ısıl işlem görmüş parçalarla karşılaştırılması amaçlanmıştır. Bunun ışığında AA 6082 alaşımının 3 farklı sıcaklık (480-510-540°C), 4 farklı sürede (7,5-15-30-60 dakika) ve bazılarında yük uygulamak kaydıyla, tüm numunelere su verme işlemi yapıp yaşlandırma işlemi uygulanması yapılmıştır.

Her bir işlem sonucunda malzemelerin sertlik değerleri ölçülmüş ve çekme testleri yapılarak mekanik özellikleri belirlenmiştir. Tüm malzemelerin mikroyapıları optik mikroskop kullanılarak incelenmiştir. Bu numuneler üzerinde Taramalı Elektron mikroskobu (SEM) ve enerji dağılımlı X-ışınları Spektrel analizleri (EDS) yapılmıştır.

Çalışmalar sonucunda, 480°C'de herhangi bir tavlama süresi ve yaşlandırma sonrası bu alaşım için verilen standart durum olan 90 HB sertlik değerini sağlamak için yeterli olmamıştır. Daha yüksek bir tavlama sıcaklığı olarak 510°C seçilmiş ve aynı süreler bu sıcaklıkta tavlanan malzemeler takiben 180°C'de 8 saat süreyle yaşlandırılmıştır. Bu durumda, minimum 90 HB sertlik değeri ancak 60 dakika süreyle çözeltiye alınan numunelerde elde edilmiştir. 540°C'de tavlanan ardından yaklaşık %10 deforme edilen malzemelerin yaşlandırma sonrası ölçülen sertlik değerleri minimum sertlik koşulunun 15-30 ve 60 dakika tavlanan numunelerde sağlandığını göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Alüminyum, Çözeltiye Alma, Dövme, Su Verme, Yaşlandırma.

SUMMARY

In industrial applications, aluminum hot forging is applied by heating billets at 480 C degree. The billets are usually heated up to required temperature by induction heating system in a couple of minutes and later is formed by forging. The forged part is cooled down to room temperature and then conventional heat treatment processes are applied.

In that study, the aim was to analyze the change in mechanical features by quenching just after forging of the part and aging without any necessary additional heating. And finally, make comparison between heat treatment direct after forging and conventional heat treatment of parts.

Respectively experiments were performed on AA6082 alloys at tree different temperatures (480-510-540 °C) along 4 different time period (7.5, 15, 30, 60 min) where some of which are upset forged and finally quenched and aged.

At the end of every experiment samples mechanical characterization is made by hardness inspection and tensile tests. All the samples are investigated under optical microscope besides SEM, EDS and XRD.

Required hardness of 90 HB on samples after aging could not be obtained at 480 °C for any time period of heating. At heating temperature of 510 °C, sample hardness of 90 HB could be obtained at only 60 min heating time period followed by the quenching and aging at 180 °C along 480 min. Higher hardness above 90 HB was obtained at 540°C for 15, 30 and 60 min. heating time period followed by the same quenching and aging process.

KeyWords: Aging, Aluminium, Forge, Heated Up, Quenching.

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam süresince tüm görüşlerini benimle paylaşan, bilgi ve deneyimleriyle karmaşık problemleri bile basite indirgeyerek kavramamı sağlayan Malzeme Bilimi ve Mühendisliği öğretim üyesi Sayın Doç. Dr. Mehmet Tarakçı'ya teşekkürü bir borç bilirim. Yine bu süreçte ihtiyacım olan her zaman benden yardımını esirgemeyen Sayın Doç. Dr. Yücel Genç'er'e saygılarımı sunarım.

Tez süresince bana kolaylıklar sağlayan ve desteğini esirgemeyen, Kanca AŞ. yöneticilerine ve iş arkadaşlarıma şükranlarımı sunarım.

Ayrıca benden bilgi ve deneyimlerini esirgemeyen her konuda destek olan hocam Prof. Dr. Sakin Zeytin'e de teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmam için gerekli olan deneysel çalışmalarım da bana yardımcı olan arkadaşlarım Arş. Gör. Sezgin Cengiz'e, Arş. Gör. Kerem Özgür Gündüz'e, Arş. Gör. Ali Emre Güleç'e, Arş. Gör. Yunus Azaklı'ya, Arş. Gör. Mehmet Yazıcı ve Arş. Gör. Zafer Çağatay Öter'e teşekkürü bir borç bilirim.

Neşemi ve üzüntülerimi paylaştıkları, yardıma ihtiyacım olduğunda her an yanımda olan sevgili eşim Müge Sürmen'e ve sevgilerini, desteklerini hiçbir zaman eksik etmedikleri ve her zaman bana inandıkları aileme çok teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	v
SUMMARY	vi
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	viii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
TABLolar DİZİNİ	xiv
1. GİRİŞ	1
1.1. Tezin İçeriği ve Amacı	1
2. ALÜMİNYUM ALAŞIMLARI VE ISIL İŞLEM UYGULAMALARI	2
2.1. Alüminyum Alaşımları	2
2.1.1. Döküm Alüminyum Alaşımlarının Sınıflandırılması	2
2.1.2. Dövme Alüminyum Alaşımları	4
2.2. Katkı Elementlerinin Alüminyuma Etkileri	6
2.3. Alüminyum Alaşımlarında Isıl İşlem Uygulamaları	11
2.3.1. Çökelti Sertleşmesi	11
2.3.1.1. Çözeltiye Alma	12
2.3.1.2. Su Verme	13
2.3.1.3. Yaşlandırma	13
2.4. Endüstriyel uygulamalar	15
2.5. AA6XXX Alaşımlarında Faz Dönüşümleri	16
2.6. Alüminyum Alaşımlarında Dövme	18
2.6.1. Dövme Stoklarının Hazırlanması	18
2.6.1.1. Kesme	18
2.6.1.2. Kırma	18
2.6.1.3. Dövme için Ön Isıtma	19
2.6.1.4. Kalıpların Isıtılması	20
2.6.1.5. Yağlama	21

2.6.2. Dövme Prosesi	21
2.6.2.1. Çapak kesme, şekil verme ve tamir	21
2.6.3. Isıl İşlem	23
2.6.4. Kontrol	24
3. DENEYSEL ÇALIŞMA	30
3.1. Numune Seçimi	32
3.2. Numunelerin Gruplandırılması	33
3.3. Deneysel Çalışmalar	34
3.3.1. Çözeltiyeye Alma İşlemi	35
3.3.2. Dövme	36
3.3.3. Su verme işlemi	36
3.3.4. Yaşlandırma İşlemi	37
3.3.5. Numunelerin Karakterizasyonu	37
3.3.5.1. OM İncelemesi	38
3.3.5.2. SEM İncelemesi	38
3.3.5.3. XRD	38
3.3.5.4. Sertlik İncelemesi	38
3.3.5.5. Çekme Mukavemeti Testi	39
4. BULGULAR VE İRDELEME	40
4.1. Mekanik Özellikler	40
4.1.1. Sertlik Ölçüm Sonuçları	40
4.1.2. Çekme Testi Sonuçları	45
4.2. Metalografik İnceleme	51
4.3 SEM incelemeleri	58
4.4 XRD incelemeleri	67
5.TARTIŞMA	69
6.GENEL SONUÇLAR	72
KAYNAKLAR	73
ÖZGEÇMİŞ	75

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler ve Açıklamalar

Kısaltmalar

Å	: Radyasyonun dalga boyu
λ	: Radyoaktif bozunum
σ	Akma mukavemeti
°C	: Santigrad derece
%	: Yüzde
ag.%	: Ağırlıkça yüzde
d	: Tane boyutu
HB	: Brinell cinsinden sertlik birimi
k_y	: Tane sınırlarının akma mukavemetini arttırma etkinliğini belirleyen sabit
kV	: Elektrikte kullanılan potansiyel farkı (gerilim) birimi
mA	: Elektrikte akım şiddeti birimi

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil No:</u>	<u>Sayfa</u>
2.1: Isıl işlem durumlarına göre döküm alaşımları.	4
2.2: Amerikan Alüminyum Birliğinin dövme alaşımları için isimlendirme kriterleri.	5
2.3: Ana alüminyum alaşımları.	6
2.4: Çökelti ile sertleştirme işleminin şematik sıcaklık – zaman diyagramı.	12
2.5: a) Çözeltiye alınmış Al-Mg atomik yapısı, b) θ geçiş çökelti fazı, c) Dengesel çökeltinin oluşması (aşırı yaşlanma).	13
2.6: Al-Mg ₂ Si'ye ait faz diyagramı.	16
2.7: Dövülmüş ve şekillendirilmiş alüminyum alaşım 6061-T6 kamyon tekerlekleri.	22
3.1: Alüminyum alaşımlarına uygulanan klasik T6 işlemi.	31
3.2: Bu tez çalışmasında takip edilen yeni tasarlanmış ısıl işlem.	31
3.3: Deneysel çalışmalarda takip edilen yol (iş akışı).	34
3.4: Malzeme dövme şekil değişimi şematik gösterimi.	36
3.5: Deforme edilmiş numune üzerinde alınan test numuneleri şematik görüntüsü.	37
3.6: Hazırlanan çekme test numunesi ölçüleri.	39
4.1: Farklı sıcaklıklarda ve sürelerde çözeltiye alınmış numunelerin su verme işleminden sonraki sertlik değişimi.	41
4.2: Farklı sıcaklıklarda ve sürelerde çözeltiye alınmış numunelerin (%10 deformasyon sonrasında) su verme işleminden sonraki sertlik değişimi.	41
4.3: Farklı sıcaklıklarda ve sürelerde çözeltiye alınmış, deforme edilmemiş su verilmiş numunelerin 180°C'de 8saat yaşlandırması sonrası çözeltiye alma sıcaklığına bağlı sertlik değişimleri.	43
4.4: Farklı sıcaklıklarda ve sürelerde çözeltiye alınmış, %10 deforme edilmiş su verilmiş numunelerin 180°C'de 8saat yaşlandırması sonrası çözeltiye alma sıcaklığına bağlı sertlik değişimleri.	43
4.5: 480°C de 30 dk tavllanmış ardından su verilmiş ve yaşlandırılmış malzeme gerilme-%uzama grafiği.	46

4.6:	540°C de 60 dk tavllanmış ardından su verilmiş ve yaşlandırılmış malzeme gerilme-%uzama test grafiği.	46
4.7:	Farklı sıcaklıklarda ve sürelerde çözeltiliye alınmış, deforme edilmemiş su verilmiş numunelerin 180°C'de 8saat yaşlandırması sonrası çözeltiliye alma sıcaklığına bağlı çekme mukavemeti değişimleri.	47
4.8:	Farklı sıcaklıklarda ve sürelerde çözeltiliye alınmış, %10 deforme edilmiş su verilmiş numunelerin 180°C'de 8saat yaşlandırması sonrası çözeltiliye alma sıcaklığına bağlı çekme mukavemeti değişimleri.	47
4.9:	Farklı sıcaklıklarda ve sürelerde çözeltiliye alınmış, deforme edilmemiş su verilmiş numunelerin 180°C'de 8saat yaşlandırması sonrası çözeltiliye alma sıcaklığına bağlı akma mukavemeti değişimleri.	48
4.10:	Farklı sıcaklıklarda ve sürelerde çözeltiliye alınmış, %10 deforme edilmiş su verilmiş numunelerin 180°C'de 8saat yaşlandırması sonrası çözeltiliye alma sıcaklığına bağlı akma mukavemeti değişimleri.	48
4.11:	Farklı sıcaklıklarda ve sürelerde çözeltiliye alınmış, deforme edilmemiş su verilmiş numunelerin 180°C'de 8saat yaşlandırması sonrası çözeltiliye alma sıcaklığına bağlı % uzama değişimleri.	49
4.12:	Farklı sıcaklıklarda ve sürelerde çözeltiliye alınmış, %10 deforme edilmiş su verilmiş numunelerin 180°C'de 8saat yaşlandırması sonrası çözeltiliye alma sıcaklığına bağlı % uzama değişimleri.	49
4.13:	480°C'de farklı sürelerde ısıtılmış ve su verilmiş malzemelerin optik mikrografları. a) X ₁ , b) Y ₁ , c) Z ₁ , d) T ₁ . Dağlama çözeltilisi: Doymuş NaOH.	52
4.14:	510°C'de farklı sürelerde ısıtılmış ve su verilmiş malzemelerin optik mikrografları. a) X ₃ , b) Y ₃ , c) Z ₃ , d) T ₃ . Dağlama çözeltilisi: Doymuş NaOH.	53
4.15:	540°C'de farklı sürelerde ısıtılmış ve su verilmiş malzemelerin optik mikrografları. a) X ₅ , b) Y ₅ , c) Z ₅ , d) T ₅ . Dağlama çözeltilisi: Doymuş NaOH.	54
4.16:	480°C'de farklı sürelerde tavllanmış - su verilmiş ve 180°C'de 8 saat yaşlandırılmış malzemelerin optik mikrografları. a) X ₁ , b) Y ₁ , c) Z ₁ , d) T ₁ . Dağlama çözeltilisi: Doymuş NaOH.	55

4.17:	510°C'de ısıtılmış - su verilmiş ve 180°C'de 8 saat yaşlandırılmış malzemelerin optik mikrografları. a)X ₃ , b)Y ₃ , c)Z ₃ , d)T ₃ . Dağlama çözeltisi: Doymuş NaOH, 1000X büyütme.	56
4.18:	540°C'de ısıtılmış - su verilmiş ve 180°C'de 8 saat yaşlandırılmış malzemelerin optik mikrografları. a) X ₅ , b) Y ₅ , c) Z ₅ , d) T ₅ . Dağlama çözeltisi: Doymuş NaOH, 1000X büyütme.	57
4.19:	510°C'de 60 dk çözeltiliye alınıp deformasyonu takiben su verilip 180°C'de 8 saat yaşlandırılmış numunenin (T ₃) optik mikrografı. Kaba ve ince tane geçiş bölgesi. Kaba tane yüzeyi, ince tane iç kısmı göstermektedir.	58
4.20:	Haddelenmiş haldeki AA6082 alaşımının SEM görüntüsü.	59
4.21:	480°C'de tavllanmış, ardından su verilmiş ve 180°C'de 8 saat yaşlandırılmış malzeme SEM görüntüleri. a) X ₁ (7,5 dk), b) T ₁ (60 dk).	60
4.22:	480°C'de 7,5 dakika ısıtılmış, su verilmiş numunenin (X ₁) SEM görüntüsü.	61
4.23:	480°C'de 60 dakika ısıtılmış, su verilmiş ve 180°C'de 8 saat yaşlandırılmış numunenin (T ₁) SEM görüntüsü.	62
4.24:	510°C'de 60 dk süreyle tavllanmış ve su verilmiş ve 180°C'de 8 saat yaşlandırılmış malzemelerin (T ₃) farklı büyütmelede alınan SEM görüntüleri. a) 500X, b) 5000X.	63
4.25:	510°C'de 60 dakika tavllanmış, su verilmiş ve 180°C'de 8 saat yaşlandırılmış numunenin (T ₃) SEM görüntüsü.	64
4.26:	540°C'de 60 dk süreyle tavllanmış ve su verilmiş ve 180°C'de 8 saat yaşlandırılmış malzemelerin (T ₅) farklı büyütmelede alınan SEM görüntüleri. a) 500X, b) 5000X.	65
4.27:	540°C'de 60 dakika tavllanmış, su verilmiş ve 180°C'de 8 saat yaşlandırılmış numunenin (T ₅) SEM görüntüsü.	66
4.28:	Ham malzeme XRD grafiği.	67
4.29:	480°C'de 7.5 dakika tavllanmış, su verilmiş ve 180°C'de 8 saat yaşlandırılmış numunenin (X ₁) XRD grafiği.	67
4.30:	510°C'de 60 dakika tavllanmış, su verilmiş ve 180°C'de 8 saat yaşlandırılmış numunenin (T ₃) XRD grafiği.	68
4.31:	540°C'de 60 dakika tavllanmış, su verilmiş ve 180°C'de 8 saat yaşlandırılmış numunenin (T ₅) XRD grafiği.	68

TABLolar DİZİNİ

<u>Tablo No:</u>	<u>Sayfa</u>
2.1: Alüminyum alaşım çeşitleri ve ısıtım işlem durumları.	3
2.2: AA6082 alaşımının çeşitli özellikleri.	25
3.1: AA 6082 alüminyum alaşımının nominal kimyasal bileşimi.	32
3.2: AA6082 alaşımına ait ısıtım işlem değişkenleri ve kodlama bilgileri.	33
4.1: Farklı sıcaklıklarda, farklı sürelerde çözeltiye alınıp (ısıtılıp) deforme edilmeden ve deforme edildikten sonra direkt su verilip yaşlandırılan numunelerin mekanik özellikleri.	51
4.2: Dövülmemiş haldeki malzemenin EDS analizi.	59
4.3: 480°C'de 7,5 dakika ısıtılmış, su verilmiş numunenin (X ₁) EDS analizi.	61
4.4: 480°C'de 60 dakika ısıtılmış, su verilmiş ve 180°C'de 8 saat yaşlandırılmış numunenin (T ₁) EDS analizi.	62
4.5: 510°C'de 60 dakika tavllanmış, su verilmiş ve 180°C'de 8 saat yaşlandırılmış numunenin (T ₃) EDS analizi.	64
4.6: 540°C'de 60 dakika tavllanmış, su verilmiş ve 180°C'de 8 saat yaşlandırılmış numunenin (T ₅) EDS analizi.	66

1. GİRİŞ

Alüminyum (simgesi Al)gümüş renkte sünek bir metaldir. Atom numarası 13 tür. Doğada genellikle boksit cevheri halinde bulunur ve oksidasyona karşı üstün direnci ile tanınır. Bu direncin temelinde pasivasyon özelliği yatar. Endüstrinin pek çok kolunda milyonlarca farklı ürünün yapımında kullanılmakta olup dünya ekonomisi içinde çok önemli bir yeri vardır. Alüminyumdan üretilmiş yapısal bileşenler uzay ve havacılık sanayi için vazgeçilmezdir. Hafiflik ve yüksek dayanım özellikleri gerektiren otomotiv, taşımacılık ve inşaat sanayinde geniş kullanım alanı bulur.

Endüstriyel uygulamalarda, alüminyumun sıcak dövülmesi 480°C'ye ısıtılmış çubuklar yardımıyla gerçekleştirilmektedir. Çubuk, çoğunlukla indüksiyon ısıtma sistemi ile bir kaç dakikada istenilen sıcaklığa ısıtılmakta, takiben dövülerek şekillendirilmektedir. Parça oda sıcaklığına soğutulduktan sonra olağan ısıl işlemler uygulanarak sertleştirilmektedir.

1.1. Tezin İçeriği ve Amacı

Bu tez çalışması, dövme takiben alüminyum parçalara doğrudan su verilmesi, takiben suda soğutulması ve yaşlandırılması yöntemini konu edinmiştir. Çözeltiye almak için tekrar ısıtılmasına gerek duyulmadan sıcak dövülmüş parçaya doğrudan su verilmesi ve yaşlandırılması ile yapı ve mekanik özelliklerdeki değişimin incelenmesi, nihai olarak doğrudan ısıl işlem görmüş parçaların geleneksel ısıl işlem görmüş parçalarla karşılaştırılması amaçlanmıştır. Bunun ışığında AA 6082 alaşımının 3 farklı sıcaklık (480-510-540°C), 4 farklı sürede (7,5-15-30-60 dakika) ve bazılarında yük uygulamak kaydıyla, tüm numunelere su verme işlemi yapıp yaşlandırma işlemi uygulanması yapılmıştır. İndüksiyon ısıtma koşullarına en yakın ısıtma kısa süreli ısıtma (7,5 dakika) olup bu çalışmada ısıtma süresi 7,5 dakikadan 60 dakikaya kadar bir aralıkta değiştirilmiştir. İlave olarak, çözeltiye alma için önemli olan doğru sıcaklık değerini yakalayabilmek için farklı dövme sıcaklıkları kullanılmıştır. Bu tez, hem alüminyum parçalarının ısıl işlem pratiği ile ilgili bir ufuk açmak, hem de dövme üretim süreçlerinde bir iyileştirme yapıp yapılamayacağını ortaya koyacaktır.

2. ALÜMİNYUM ALAŞIMLARI VE ISIL İŞLEM UYGULAMALARI

2.1. Alüminyum Alaşimleri

Ana metali alüminyum olan alaşımlara “Alüminyum Alaşimleri” denir. Bunlara hafif alaşımlar da denir. Alüminyum alaşımları bakır, çinko, silisyum, magnezyum, manganez, demir, nikel, titan vb. elementleri ilave edilerek oluşturulur. Özellikleri; hafif olmaları, ısı ve elektrik iletkenlikleri, ısıtıl işlemlere elverişli olmaları ve bazı kimyasal etkilere karşı dayanıklı olmalarıdır. Alüminyum alaşımları döküme elverişlidir. Aynı zamanda, dövme, çekme ve haddeleme ile biçimlendirilen alüminyum alaşımları da hazırlanmaktadır.

Alüminyum alaşımlarının mekanik, fiziksel ve kimyasal özellikleri alaşım elementlerine ve mikro yapısına bağlı olarak değişir. Alüminyuma katılan en önemli alaşım elementleri bakır, mangan, silisyum, magnezyum ve çinkodur.

Alüminyum alaşımları dövme ve döküm alaşımları olarak iki gruba ayrılır. Dövme alaşımlarının, plastik deformasyon kabiliyeti iyi olup kolayca şekillendirilebilirler. Alüminyum dövme ve döküm alaşımlarının büyük bir kısmına ısıtıl işlem uygulanabilmektedir [1].

2.1.1. Döküm Alüminyum Alaşımlarının Sınıflandırılması

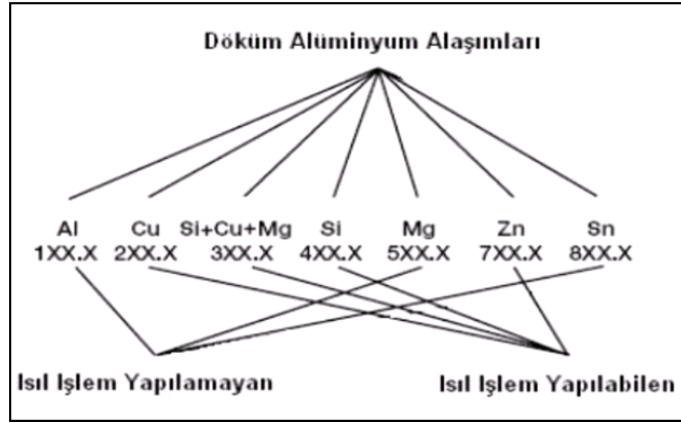
Döküm alaşımlarının sınıflandırılması ve isimlendirilmesi kimyasal kompozisyonlarına göre yapılmaktadır. Alüminyum alaşımların sınıflandırılmasında uluslararası olarak kabul edilen isimlendirme U.S. Aluminium Association (Amerika Alüminyum Derneği) tarafından 2 yöntemde kullanılarak yapıyor. Döküme göre isimlendirme, 3 tane rakam ve virgülden sonra 1 tane daha rakamla, işlenecek alüminyum külçesi için de 4 haneli rakam sistemi kullanılarak nümerik dizilim ile yapılmaktadır.

2xx.x, 3xx.x, 4xx.x ve 7xx.x serileri ısıtıl işleme tabi tutuluyor. Sınıflandırma sisteminde 1xx.x grubunda noktanın solundaki iki rakam alaşım içerisindeki en az alüminyum içeriğini belirtmektedir. 2xx.x'den 9xx.x grubuna kadar olan aralıkta noktanın solundaki iki rakam sadece grup içerisindeki alaşımları ayırt etmek için kullanılmakta olup özel bir anlam taşımamaktadır. Örneğin 190.x dizilimi %99.90 saflığındaki alüminyumunu ifade etmektedir. Aynı grupta noktadan sonraki hane ürün

şeklini nitelendirmektedir. Bu dizilimde 0 dökümler için 1.ve 2. külçeler içindir. Tablo 2.1’de alüminyum alaşım çeşitleri ve ısıtıl işlem durumları gösterilmiştir. Şekil 2.1’de ise ısıtıl işlem durumlarına göre döküm alaşımları gösterilmiştir [2].

Tablo 2.1: Alüminyum alaşım çeşitleri ve ısıtıl işlem durumları.

İşlem (Dövme) Alüminyum Alaşımları		
Ana Alaşım Elementleri	Alaşım Türü	Isıl İşlem Durumu
Arı Al (%99)	1XXX	Yaşlanmaz
Al - Bakır	2XXX	Yaşlanır
Al - Mangan	3XXX	Yaşlanmaz
Al - Silisyum	4XXX	Mg Eklenirse Yaşlanır
Al - Magnezyum	5XXX	Yaşlanmaz
Al - Magnezyum ve Silisyum	6XXX	%2 Mg içerirse Yaşlanır
Al - Çinko	7XXX	Yaşlanmaz
Al - Kalay	8XXX	Yaşlanmaz
Al - Diğer Elementler	9XXX	%2 Cu, Mg İçerirse Yaşlanır
Döküm Alüminyum Alaşımları		
Ana Alaşım Elementleri	Alaşım Türü	Isıl İşlem Durumu
Arı Al (%99)	1XXX	Yaşlanmaz
Al - Bakır	2XXX	Yaşlanır
Al - Mangan	3XXX	Yaşlanmaz
Al - Silisyum	4XXX	Yaşlanmaz
Al - Magnezyum	5XXX	Yaşlanmaz
Al - Magnezyum ve Silisyum	6XXX	Yaşlanır
Al - Çinko	7XXX	Yaşlanmaz
Al - Diğer Elementler (Sn-Li)	8XXX	Yaşlanır
Kullanılmamış seriler	9XXX	%2 Cu, Mg İçerirse Yaşlanır



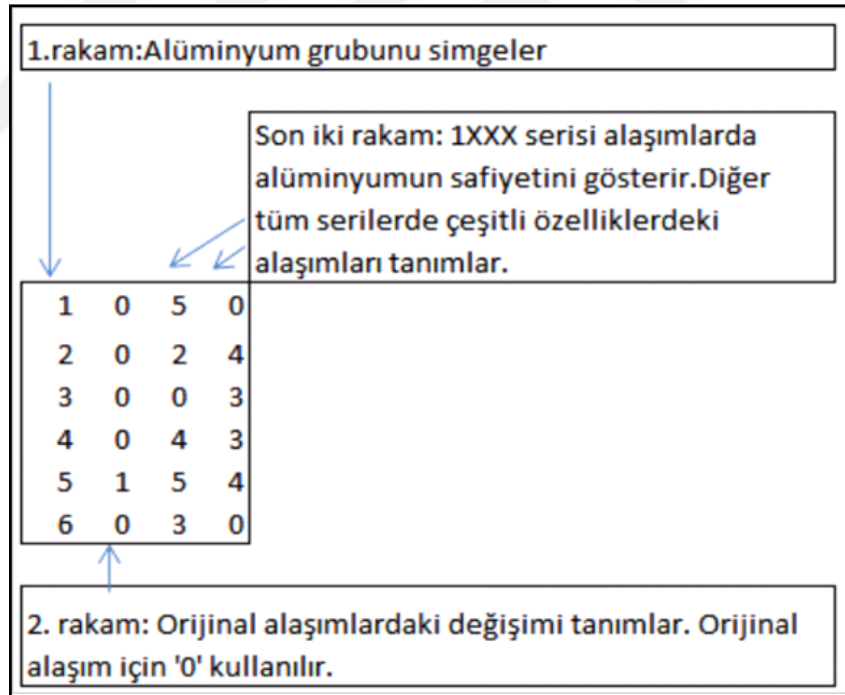
Şekil 2.1: Isıl işlem durumlarına göre döküm alaşımları.

2.1.2. Dövme Alüminyum Alaşımları

Amerikan alüminyum birliğine göre, alüminyum dövme alaşımları dört harfle sınıflandırılmaktadır. Bu sınıflandırma şu şekildedir:

- 1XXX: Saf alüminyum. Elektrik ve kimya endüstrisinde kullanılmaktadır.
- 2XXX: Al-Cu alaşımları. Esas alaşım elementi bakırdır. Başta magnezyum olmak üzere diğer alaşım elementleri de bulunabilir, yüksek mukavemet istenen havacılık sektöründe yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.
- 3XXX: Al-Mn alaşımları. Esas alaşım elementi mangandır. Boru, sıvı tankları ve mimari uygulamalarda kullanılmaktadır.
- 4XXX: Al-Si alaşımları. Esas alaşım elementi silisyumdur. Termal genleşme katsayısı düşük, aşınma direnci ve korozyon dayanımı yüksek alaşımlardır. Kaynaklı yapılarda, levha üretiminde, otomobil parçaları üretiminde kullanılmaktadır.
- 5XXX: Al-Mg alaşımları. Esas alaşım elementi magnezyumdur. Magnezyum oranı arttıkça sertlik ve mukavemet artar fakat süneklik azalır. Denizel korozyona karşı direnci yüksek olduğundan, bu ortamda çalışacak yapıların imalatında kullanılmaktadır.
- 6XXX: Al-Mg-Si alaşımları. Esas alaşım elementleri magnezyum ve silisyumdur. Şekillendirilme kabiliyeti yüksek olan bu alaşımlar özellikle ekstrüzyon ile üretilen parçaların imalatında sıklıkla kullanılır.

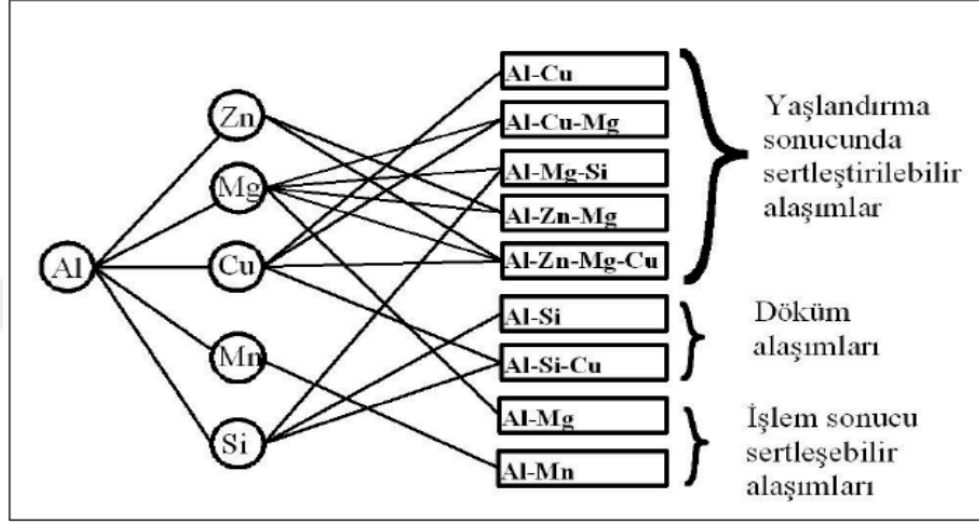
- 7XXX: Al-Zn alaşımlar. Çinko esas alaşım elementi olup, magnezyum, krom ve zirkonyum ilave alaşım elementleridir. 7XXX serisi, alüminyum alaşımlarının en yüksek mukavemete sahip olanıdır. Uçak parçaları yapımı ve diğer yüksek dayanım istenen yerlerde kullanılır.
- 8XXX: Al-Li alaşımları: Esas alaşım elementi lityum olup, kalay eklentisinde yapılabilmektedir. Özellikle uçak ve uzay yapılarında kullanılmaya başlanan bu malzeme, iyi yorulma direnci ve iyi tokluk özelliklerine sahiptir. Fakat diğer Al alaşımları ile karşılaştırıldığında üretim maliyetleri yüksektir.
- 1XXX, 3XXX, 4XXX ve 5XXX serisi dövme alüminyum alaşımları ısıtılma işlemi uygulanamayan alaşımlardır.
- Bu alaşımlar sadece şekil değiştirme yolu ile sertleştirilebilirler.
- 2XXX, 6XXX, 7XXX ve 8XXX serisi alaşımlar ise ısıtılma işlemi ile sertleştirilebilmektedirler. Şekil 1.2’de Amerikan Alüminyum Birliğinin dövme alaşımları için isimlendirme kriterleri gösterilmiştir.



Şekil 2.2: Amerikan Alüminyum Birliğinin dövme alaşımları için isimlendirme kriteri.

2.2. Katkı Elementlerinin Alüminyuma Etkileri

Alüminyuma katılan başlıca elementler çinko, bakır, silisyum olup, bunların birbirine olan etkileri Şekil 1.3'te [3] gösterilmiştir. Alüminyum alaşımlarının özelliklerini etkileyen önemli alaşım elementleri ve empüriteler (safsızlıklar) önemli etkileri göz önüne alınarak aşağıda sıralanmıştır:



Şekil 2.3: Ana alüminyum alaşımları.

Antimon; ticari kalite alüminyumlarda 0,01-0,1 ppm mertebesinde eser olarak bulunmaktadır. Antimon alüminyum ile çok küçük bir katı çözünürlük bölgesi oluşturur. Bazı yatak alaşımlarında %4-6 Sb bulunabilir. Antimon alüminyum-magnezyum alaşımlarında bizmutun yerine kullanılabilir. Antimon alüminyum-magnezyum alaşımlarında bizmutun yerine kullanılabilir.

Arsenik; Al ile bileşiği yariletgendir. Arsenik, AsO_3 formunda çok toksiktir ve gıda saklama için folyo olarak kullanılacak alüminyumlarda çok düşük miktarlarda kontrol altında tutulmalıdır.

Berilyum; yüksek sıcaklıklarda oksidasyonu azaltmak için magnezyum içeren alüminyum alaşımlarında kullanılmaktadır. %0,1'e kadar berilyum, alüminyum filmin adezyonunu geliştirmek/artırmak için ve zararlı demir-alüminyum komplekslerinin oluşumunu sınırlamak için çeliğin alüminyumlama banyolarında kullanılmaktadır.

Bizmut; kurşun, kalay ve kadmiyum gibi düşük ergime sıcaklıklı metaller alüminyuma talaş kaldırma kabiliyetini artırmak için katılmaktadır. Bu elementler

katı alüminyumda sınırlı bir çözünürlüğe sahiptir ve talaş kırılmasını teşvik eden yumuşak ve düşük ergimeli bir faz oluşturur ve kesici rakımın yağlanmasına yardımcı olur. Bizmutun bir avantajı şudur: katılaşma sırasında bizmutun genişmesi kurşunun büzülmesini karşılar. Alüminyum-bakır alaşımı 2011'de ve Al-Mg-Si alaşımı 6262'de 1:1 oranında kurşun/bizmut kullanılmaktadır. Bizmutun 20-200 ppm'lik küçük ilaveleri sodyumun sıcak çatlamaya zararlı etkisini karşılamak için alüminyum-magnezyum alaşımlarına katılmaktadır.

Bor; vanadyum, titanyum, krom ve molibdeni çöktürmek suretiyle bir tane inceltici ve iletkenliği iyileştirici olarak alüminyum ve alaşımlarında kullanılmaktadır. Bor yalnız başına katılaşma sırasında tane inceltici olarak kullanılmaktadır (%0,005-0,1 seviyelerinde) fakat titanyum ile kullanıldığı zaman daha etkili olmaktadır. Ticari tane incelticiler yaygın olarak 5/1 oranında titanyum ve bor içerirler.

Kadmiyum; alüminyumda sınırlı kullanımı olan nispeten düşük ergime sıcaklıklı bir metaldir. %0,3'e kadar Cd çökelti sertleştirme hızını artırmak, mukavemeti artırmak ve korozyon direncini artırmak için alüminyum-bakır alaşımlarına ilave edilebilmektedir. %0,005-0,5 seviyelerinde, alüminyum-çinko-magnezyum alaşımlarının yaşlanma süresini düşürmek için kullanılmaktadır.

Kalsiyum; alüminyumda çok düşük çözünürlüğü vardır ve $CaAl_4$ intermetalikliği oluşturur. %5 Ca ve %5 Zn içeren ilginç bir alaşım grubu süperplastik özellikler gösterir. Kalsiyum silisyum ile kombine olarak $CaSi_2$ oluşturur ve bu çökelti alüminyumda çözünmez, bu nedenle ticari kalite metalin iletkenliğini hafifçe artırır. Al-Mg-Si alaşımlarında, kalsiyum yaşlanma sertleşmesini azaltır. Al-Si alaşımlarında mukavemeti artırır ve uzamayı düşürür, fakat bu alaşımları ısıl işlenebilir hale getirmez.

Seryum; deneysel döküm alaşımlarına akışkanlığı artırmak ve kalıba yapışmayı azaltmak için mischmetal olarak (%50-60 Ce ve + nadir toprak elementleri) ilave edilmektedir.

Krom; ticari saflıktaki alüminyumda minör safsızlık olarak yer alır (5-50 ppm). Elektriksel iletkenliğe etkisi yüksektir. Al-Mg, Al-Mg-Si ve Al-Mg-Zn alaşım gruplarındaki birçok alaşımda yaygın ilavelerden biridir. Genel olarak ilave oranı %0,35'i aşmaz. Bu sınırlar aşıldığında, Mn, Fe ve Ti gibi katkılar veya diğer safsızlıklarla çok kaba bileşenler oluşturmaya meyleder. Krom düşük difüzyon hızına sahiptir ve dövme alaşımlarda ince disperse fazlar oluşturur. Bu disperse fazlar

çekirdekleşme ve tane büyümesini engeller. Krom, Al-Mg alaşımlarında tane büyümesini önleyerek tane yapısını kontrol için kullanılmaktadır. Al-Mg-Si veya Al-Mg-Zn alaşımlarında sıcak şekillendirme veya ısıl işlem sırasında yeniden kristalleşmeyi önlemektedir.

Bakır; alüminyumun içerisinde %2'den %10'a kadar bulunduğunda, alüminyum-bakır alaşımları önemli bir alaşım ailesi oluşturur. Döküm ve dövme alüminyum bakır alaşımları ısıl işleme cevap verir ve takiben yaşlandırma ile mukavemet ve sertlik artar, uzama düşer. Mukavemet artışı %4-6 Cu arasındaki alaşımlarda maksimum olur. Alüminyum-bakır alaşımlarına magnezyumun ilavesi çözeltiyeye alma ve su verme işlemini takiben mukavemeti artırır. Bazı alaşımlarda oda sıcaklığında yaşlandırma ile yüksek mukavemet ve yüksek süneklik birlikte yakalanır. Al-Cu-Mg alaşımına örneğin demirin ilavesi boyutsal stabiliteyi artırır. Ancak bu tür alaşımlarda (Al-%4Cu-%0,5Mg) demir konsantrasyonu %0,5 gibi düşük değerlerdedir, aksi halde ısıl işlemler halinde çekme özelliklerini düşürür. Bakır, alüminyuma; sertlik, dayanım, dökülebilme özelliği ve işlenebilme kolaylıkları sağlar. Bakır % 33 oranında alüminyumla ötektik bileşim verir.

Çinko; dökülebilirliği artırır, yüksek çinkolu alaşımlar sıcak çatlama ve soğuma çekmesi gösterirler. % 10'dan yüksek alaşımlar zayıf gerilmeli korozyon direnci gösterirler. Alüminyum-çinko alaşımları uzun yıllardır bilinmektedir; fakat döküm alaşımlarının sıcak yırtılma göstermesi ve dövme alaşımlarının gerilmeli korozyon çatlamasına hassasiyeti bu alaşımların kullanımını sınırlandırır. Diğer elementleri de içeren alüminyum-çinko alaşımları dövme alaşımlarındaki en yüksek çekme özellikleri kombinasyonu sunarlar.

Alüminyum-çinko alaşımlarına magnezyum katılması, özellikle %3-7,5 Zn aralığında, bu alaşımların mukavemet potansiyelini geliştirir. MgZn₂ içeriği %0,5'ten 12'ye arttıkça, 1,6 mm kalınlıklı levhanın çekme ve akma mukavemetleri artar. MgZn₂ oluşturmak için gerekli magnezyumdan fazlası çekme mukavemetini daha fazla artırır.

Alüminyum-çinko-magnezyum alaşımlarına bakır ilavesi, krom ve manganez miktarlarıyla, ticari olarak bulunan en yüksek mukavemetli alüminyum esaslı alaşımları verir. Bu alaşım sisteminde, çinko ve magnezyum yaşlanma prosesini kontrol eder. Bakırın etkisi, CuMgAl₂ fazının çekirdeklenmesini ve aşırı doymuşluk derecesini artırarak yaşlanma hızını artırmaktır. Genel olarak, bakır Al-Zn-Mg alaşımlarının korozyon direncini düşürür, fakat gerilmeli korozyona direnci artırır.

Hidrojen; sıvı metalde yüksek çözünürlüğü bulunmaktadır. Bu nedenle, katılaşma sırasında gaz porozitesi oluşabilir. Hidrojen ortamdaki su buharından veya hidrokarbonların ayrışmasından ileri gelir. Hidrojen döküm sırasında birincil porozitelere sebep olma yanında, ikincil porozitelere, birikmeye ve ısıl işlemlerde yüksek sıcaklık hasarına sebep olur. Muhtemelen gerilmeli korozyon çatlama sırasında tane sınırlarındaki zayıflamada önemli bir rol oynar. Sıvı metaldeki hidrojen seviyesi hidrojen içermeyen gazlarla fluks kullanılarak veya vakum gaz giderme yapılarak kontrol edilmektedir.

Demir; alüminyumda bulunan en yaygın empüritedir (safsızlık). Sıvı alüminyumda çözünürlüğü yüksektir ve bu nedenle tüm sıvı üretim aşamalarında kolaylıkla çözünmektedir. Katı halde demir çözünürlüğü çok düşüktür (yaklaşık 0,04%). Bunun sonucunda alüminyum da bulunan demirin çoğu alüminyum ve diğer elementlerin kombinasyonu olan intermetalik ikinci fazlar şeklinde bulunur. İğneli doku biçiminde kristalleşir. İğneli doku kristallerin oluşması tehlikeli olur. Mekanik dayanımları azaltır.

Kurşun; ticari saflıktaki alüminyum alaşımında normalde sadece eser element olarak bulunur. Ancak talaşlı işlenebilirliği artırmak için, 2011 ve 6262 alaşımlarına bizmut gibi %0,5 mertebesinde katılmaktadır.

Lityum; empürite seviyesi birkaç ppm mertebesinde, fakat 5 ppm'den düşük seviyelerde rutubetli koşullar altında alüminyum folyonun renksizleşmesini (mavi korozyon) teşvik eder. Eser lityum sıvı alüminyumun oksidasyon hızını çabucak artırır ve dövme ürünlerin yüzey karakteristiklerini değiştirir.

Manganez; alüminyumda yaygın kullanılan bir empüritedir ve konsantrasyonu normal olarak 5-50 ppm mertebesinde. İletkenliği düşürür. Ergime derecesini yükseltir. Dökülebilirliği arttırmak için demir ile birlikte kullanılır. Alaşımların tokluk ve süneklik özelliklerini artırır. Manganez katı çözümlerde veya ince çökelmiş intermetalikler faz olarak mukavemeti artırır. Korozyon direncini kötü yönde etkilemez. Manganez normal empüriteler bulunduğu alüminyumda çok küçük bir katı çözünürlüğe (%0,3). sahiptir

Magnezyum; % 33 oranında alüminyumla ötektik bileşim verir. Özgül ağırlığı az olduğu için girdiği alaşımın özgül ağırlığını düşürür. % 6'dan fazla Mg içeren alaşımlarda çökeltme sertleşmesi oluşur. Magnezyum 5xxx serisi alaşımların ana alaşım elementidir. Alüminyumda maksimum katı çözünürlüğü %17,4'tür; fakat magnezyum içeriği günümüz dövme alaşımlarında %5,5'i aşmaz. Magnezyum

ilavesi alüminyumun mukavemetini aşikâr bir şekilde artırır, bunun yanında süneklikte önemli bir kayıp olmaz. Korozyon direnci ve kaynaklanabilirliği iyidir.

Magnezyumla birlikte manganez ilavesi deforme edilmiş halde yüksek mukavemet sağlar; yüksek korozyon direnci ve iyi kaynak karakteristikleri vardır. Magnezyum ve manganezin miktarlarının aynı anda artırılması üretimi güçleştirir ve özellikle eser sodyum varsa, sıcak haddeleme esnasında çatlama eğilimini artırır.

Magnezyuma silisyum ilavesi halinde, 6xxx dövme alaşımları, %1,5'a kadar magnezyum ve silisyumun içerir, 1,73:1 oranında Mg_2Si fazı oluşur. Mg_2Si fazının maksimum çözünürlüğü %1,85 olup sıcaklıkla azalır. Yaşlandırma sertleştirilmesi ile G-P zonları ve çok ince çökelti oluşur. Bu alaşımlarda mukavemette artış olsa bile, 2xxx ve 7xxx alaşımlarındaki kadar yüksek olmaz.

Nikel; korozyon dayanımını iyileştirir, parçalara kalıcı parlaklık verir. Alüminyumda nikelin katı çözünürlüğü %0,04'ü aşmaz. Bu değerden fazlası çözünmez, genellikle demir ile kombine halde intermetalik olarak bulunur. %2'ye kadar nikel yüksek saflıktaki alüminyumun mukavemetini artırır, fakat sünekliğini düşürür. İkili alüminyum-nikel alaşımları kullanılmamaktadır, fakat alüminyum-bakır alaşımları ve alüminyum-silisyum alaşımlarına yüksek sıcaklıklarda sertliği ve mukavemeti artırmak ve genişleme katsayısını düşürmek için nikel ilave edilmektedir.

Niobyum; peritektik reaksiyon oluşturan bir element olarak niobyumun tane küçültücü etkisinin olması beklenmektedir. Dökümlere bu maksatla katılmakta fakat etkisi çok belirgin değildir.

Fosfor; ticari kalite alüminyumda çok az bulunan bir empüredir (1-10 ppm). Sıvı alüminyumdaki çözünürlüğü çok düşüktür ($660^{\circ}C$ 'de yaklaşık %0,01) ve katıda daha da düşüktür.

Silisyum; demirden sonra elektrolitik ticari alüminyum alaşımlarında en yüksek bulunan empüredir (%0,01-0,15). Dövme alaşımlarda Mg_2Si oluşturmak üzere magnezyumla %1,5'a kadar seviyelerde kullanılır (ısı işlenebilir 6xxx serisi). Alüminyumun içinde çok az erir (%1-1,5). Silisyum %12 oranında alüminyumla ötektik bileşim yapar ve ergime sıcaklığı $577^{\circ}C$ 'ye düşer. Kristalleri inceltir, iyi özellikler kazandırır. Mekanik özellikleri ve sıcak dayanımı yükselir, akıcılığı artar. Silisyum miktarı artınca işlenmeye karşı sertlik meydana gelir[4].

Titanyum; bor ile birlikte alüminyum alaşımlarında tane inceltici olarak kullanılır.

Zirkonyum; %0,1-0,3 arasında katılarak ince intermetalik çökelti oluşturmak için kullanılmaktadır. Bu çökelti toparlanma ve yeniden kristalleşmeyi zorlaştırır. Bu nedenle, özellikle Al-Zn-Mg alaşım ailesinde, dövme alaşımlarda çok alaşımda yeniden kristalleşme sıcaklığını artırmak ve tane yapısını kontrol etmek için zirkonyum katkısı yapılmaktadır.

2.3.Alüminyum Alaşımlarında Isıl İşlem Uygulamaları

Alüminyum alaşımlarına uygulanan başlıca ısıl işlem çökelti sertleştirilmesidir. Çökelti sertleştirilmesi çözeltiye alma, su verme ve yaşlandırma adımlarından oluşur. Bu nedenle bu ısıl işlem çoğunlukla yaşlandırma olarak da bilinir.

2.3.1. Çökelti Sertleştirilmesi

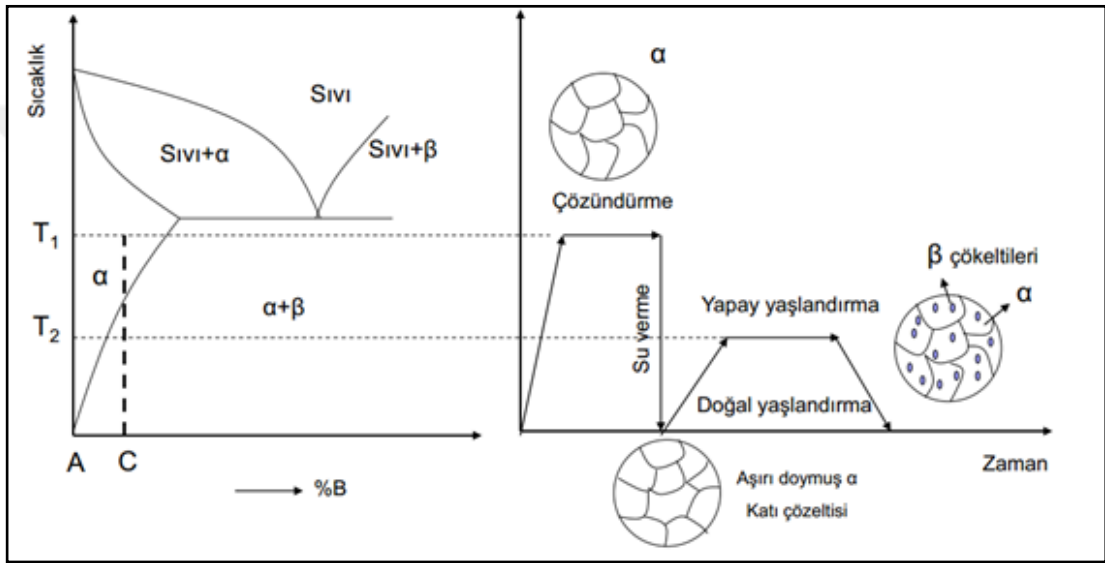
Bir saf metalin mukavemeti, dislokasyonların çoğalması ve hareketleri ile kontrol edilir. Yaşlanma ile sertleştirilen bir alaşımın yüksek mukavemeti, disperse olan çökelti fazlarının, dislokasyonlar ile etkileşimlerinden dolayıdır. Sonuç olarak, uyumlu bir ikinci faz çökmesi, malzeme bilimcilerle muhtemelen en mükemmel mukavemet artış mekanizmasını sağlamaktadır. Mukavemet artış mekanizmasının tabiatını anlamının en iyi yolu, dislokasyonları disperse olan ikinci faz ile etkileşimlerini incelemektir.

Metallerde dengeli soğuma süresinde oluşan yapılar kararlı olup belirli özelliklere sahiptirler. Denge diyagramları bileşim ve sıcaklığa bağlı olarak oluşan kararlı fazları ve faz dönüşüm sıcaklıklarını gösterirler. Bu durumda soğuma süresinde faz dönüşümleri zorlayıcı etki bulunmaksızın kendiliğinden tamamlanır. Ancak kontrollü ısıtma ve soğutma işlemleri ile sağlanan aşırı koşullar altında denge hali faz dönüşümleri kısmen veya tamamen önlenemez. Bu koşullarda elde edilecek bazı denge dışı kararlı fazlar üstün özelliklere sahip olabilirler. Bu ilkelere dayanarak endüstride çeşitli ısıl işlemler geliştirilmiştir. Çeliklere uygulanan su verme sertleşmesi ile bazı alüminyum alaşımlarına uygulanan çökelti veya yaşlanma sertleşmesi bunlara örnek olarak verilebilir. Şekil 2.4'te [5] çökelti ile sertleştirme işleminin şematik sıcaklık – zaman diyagramı gösterilmiştir.

Bir ana faz içerisinde çok küçük parçacıklar halinde çökelmiş ikinci bir faz şekil değiştirmeyi çok kısıtlar, dolayısıyla sertlik ve mukavemet artar. Bu ikinci faz genellikle aşırı doymuş bir fazdan kontrollü çökteltme yöntemi ile elde edilir.

Çökelme sertleşmesi üç temel aşamayı izleyen işlem gerektirir.

- i) Çözeltiye alma
- ii) Su verme (Hızlı soğutma)
- iii) Yaşlandırma



Şekil 2.4: Çöktelti ile sertleştirme işleminin şematik sıcaklık – zaman diyagramı. İşlem çözeltiye alma, su verme ve yaşlandırma adımlarından oluşur (Çoğu kere su verme çözeltiye alma işleminin bir parçası kabul edilir).

2.3.1.1. Çözeltiye Alma

Alaşım önce tek fazlı yapı elde etmek amacı ile T_1 sıcaklığına kadar ısıtılır. Bu sıcaklıkta β fazı tamamen çözününceye kadar tutulur. Isıtmada seçilen sıcaklık ve zaman alaşımın kompozisyonuna ve malzemenin kalınlığına bağlıdır. Fazla miktarda empürite ihtiva eden alaşımlarda sıcaklık düşük tutulabilir. Fakat düşük bir sıcaklıkta çalışıldığında tam bir homojen katı eriyik elde etmek için ısıtma müddetini arttırmak gerekir.

Alaşım söz konusu sıcaklık aralıkları dışındaki düşük bir sıcaklıkta ısıtılırsa tam bir homojenizasyon sağlanamaz. Bu durumda sertlik ve mukavemet beklenen değerden düşük çıkar. Benzer şekilde belirtilen sıcaklığın üstüne çıkılırsa malzemede

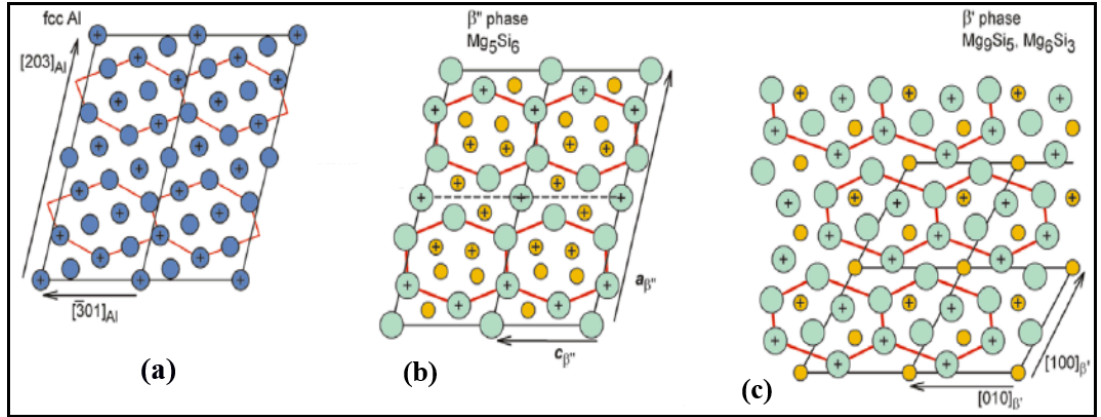
tane sınırlarında sıvı faz teşekkül edecektir. Bu fazın olması sebebiyle malzeme kırılgan olur.

2.3.1.2. Su Verme:

T₁ sıcaklığında yapı tamamen α 'ya dönüştükten sonra alaşım genellikle oda sıcaklığına ani soğutulur. Ani soğuma β fazının çökmesine imkân vermez ve aşırı doymuş α katı eriyiği elde edilir.

2.3.1.3. Yaşlandırma:

Çökeltme sonucu su verilmiş yapının sertliği artar. Oda sıcaklığında ya da biraz daha yüksek sıcaklıklarda sertliğin süreye bağlı olarak artmasına metalürjide yaşlanma ya da çökeltme sertleşmesi, bunu gerçekleştiren ısıl işleme de yaşlandırma denir. Su verilmiş numune doğal olarak oda sıcaklığında soğutulursa bu tür yaşlanmaya doğal yaşlanma denir (20°C ve 6 gün). Eğer su verilmiş parça 150-180°C arasında ısıtırsa yaşlanma prosesine hız kazandırılır ve buna suni yaşlanma denir. Şekil 2.5'te a) Çözeltiye alınmış Al-Mg atomik yapısı, b) θ'' geçiş çökelti fazı, c) Dengesel çökeltinin oluşması (aşırı yaşlanma) gösterilmiştir.



Şekil 2.5: a) Çözeltiye alınmış Al-Mg atomik yapısı, b) θ'' geçiş çökelti fazı, c) Dengesel çökeltinin oluşması (aşırı yaşlanma)

Alüminyum alaşımlarına yapılan ısıl işlemler değişik şekillerde uygulanabilir ve uygulanan işlem TX sembolleri ile alaşım numarasının yanına yazılır. Bu işlemler şu şekilde ifade edilmektedir:

O: Tavlanmış, F: Üretildiği gibi, H: Sertleştirilmiş, T: Isıl işleme tabi tutulmuş

- T1: Sıcak şekillendirme işleminden sonra soğutulmuş ve tabii yaşlanmaya bırakılmış.
- T2: Sıcak şekillendirme işleminden sonra soğutulmuş, soğuk şekillendirilmiş ve tabii yaşlanmaya bırakılmış.
- T3: Çözeltiyeye alma işlemi yapılmış, soğuk şekillendirilmiş ve tabii yaşlanmaya bırakılmış.
- T4: Çözeltiyeye alma işlemi yapılmış ve tabii yaşlanmaya bırakılmış.
- T5: Sıcak şekillendirme işleminden sonra soğutulmuş ve suni yaşlandırma yapılmış.
- T6: Çözeltiyeye alma işlemi yapılmış ve suni yaşlandırma yapılmış.
- T7: Çözeltiyeye alma işlemi yapılmış ve aşırı yaşlandırma yapılmış.
- T8: Çözeltiyeye alma işlemi yapılmış, soğuk şekillendirilmiş ve suni yaşlandırma yapılmış.
- T9: Çözeltiyeye alma işlemi yapılmış, suni yaşlandırma yapılmış ve soğuk şekillendirilmiş.
- T10: Sıcak şekillendirme işleminden sonra soğutulmuş, soğuk şekillendirilmiş ve suni yaşlandırma yapılmış.

2.4. Endüstriyel Uygulamalar

Yaşlanma sürecinde, matriste zorla hapsedilmiş olarak tutulan ikinci faz elemanları sıcaklığın ve zamanın etkisi ile yayılmaya başlarlar, matris elementi(veya başka katkı elementi) ile bir araya gelip önce öbekler (salkımlar) oluştururlar, boyutları büyüdükçe çok küçük fazlardan denge çökelti fazına dönüşür ve matrisle koheran olarak büyürler.

Çökelti fazları su verme aşamasında oluşan nokta hataları ve matristeki diğer hatalı bölgelerde (dislokasyon, tane sınırı vb.) çekirdekleşerek büyürler. Bu bakımdan, su verme aşaması çok önemlidir. Yaşlandırma sürecinde alaşımın sertliği artar. Ancak çökelti partiküllerinin aşırı büyümesi, matris ile çökelti partikülü arasındaki uyumun bozulmasına ve neticede sertlik düşmesine neden olur. Sertlik değişiminin (artıştan azalışa) başladığı nokta (sabit sıcaklıkta belirli bir zaman) önemlidir. Pratik olarak, çökelti sertleştirilmesi yolu ile mukavemetlendirilen alaşımların optimum yaşlandırma parametresi bu zirve değeridir. Sertliğin düşmesi (çökelti partikülünün büyümesi) durumu aşırı yaşlanma olarak bilinir ve istenen bir durum değildir. Yaşlanma sıcaklığının mümkün olduğunca düşük olması birkaç açıdan önemlidir:

- Yaşlanma sıcaklığı arttıkça, yaşlanma işlem süresi kısalır, ürün pazara daha erken çıkabilir.
- Yaşlanma sıcaklığı azaldıkça, zirve sertlik değerine ulaşmak daha uzun süre alır (ticari açıdan olumsuz).
- Düşük yaşlanma sıcaklıklarında elde edilen zirve sertlik değeri daha yüksektir.
- Düşük yaşlanma sıcaklıklarında elde edilen sertlik daha uzun süre yaşayabilir.

Bunlara karşın, endüstriyel uygulamada çok düşük yaşlandırma sıcaklıkları pek arzu edilmez.

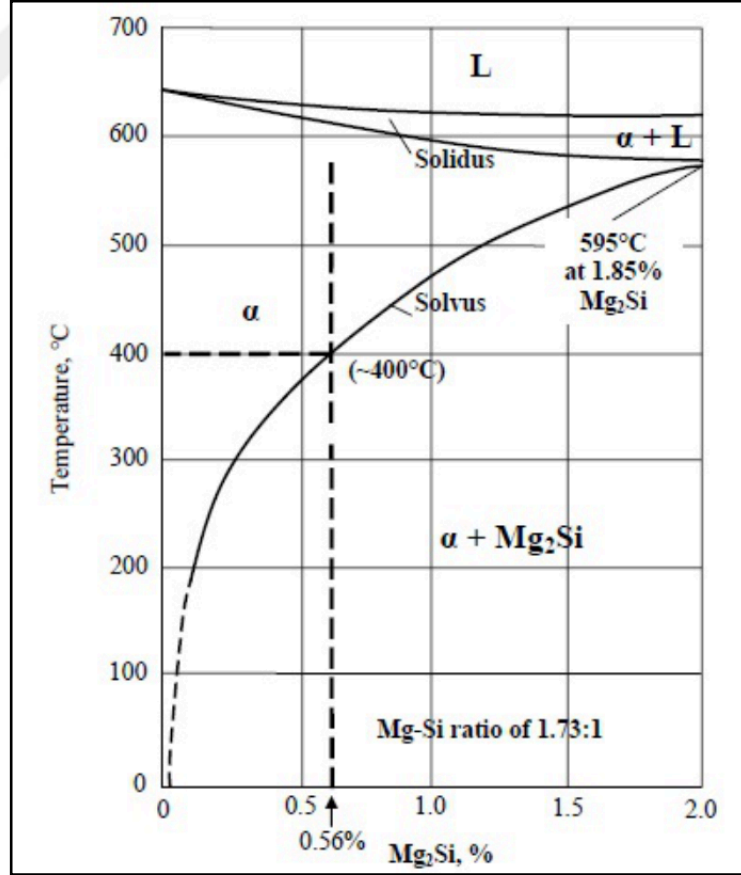
Çökelti sertleştirilmesi ile uygulanan ısıl işlem çözültüye alma, su verme ve yaşlandırma adımlarından ibaret olmakla birlikte, alaşıma su verme işlemi kombine soğuk deformasyon işlemi de uygulanabilir.

Bu uygulamadan maksat daha fazla hatalı bölge (dislokasyon gibi) oluşturmaktır. Hatta, kimi uygulamalarda yaşlandırma sonrasında da soğuk işlem uygulaması yapılabilmektedir.

Tüm bu işlemler bir seri olarak alüminyum alaşımlarının temper durumlarını belirler. Mesela, T4 temperi “çözeltiye alma işlemi yapılmış, su verilmiş ve doğal yaşlanma işlemi” kastedilmektedir. T6 temperi durumunda ise alaşım, çözeltiye alma işlemi görmüş, su verilmiş ve yapay yaşlandırılmış durumdadır. Temper gösterimlerinde yaşlanma sıcaklığı tanımlaması yoktur [6].

2.5. AA6XXX Alaşımlarında Faz Dönüşümleri

Şekil 2.6 Mg_2Si miktarına bağlı olarak Al alaşımları için solvüs (çözünürlük sınırı) eğrisini göstermektedir. Bu diyagramdaki dikey çizgiler, AA 6060 içindeki Mg_2Si miktarının sınırlarını vermektedir. Solvüs eğrisi ise, Mg_2Si 'nin alüminyum katı eriyiği içindeki çözünürlük limitlerini belirlemektedir. Solvüs eğrisi, alüminyum AA 6060 alaşımının ergimiş halinden, ısıl işlem görmüş profil kondisyonuna kadar, beş kez geçilir [7].



Şekil 2.6: Al-Mg₂Si'ye ait faz diyagramı.

Mg₂Si bileşiminin, 6060 alaşımı içindeki katı erirliği,474°C'de %0,71 ile 552°C'de %1,42 arasında değişir. Nominal bileşime sahip 6063 alaşımında, % 1,0 Mg₂Si bulunur ki,500°C'de alüminyum içinde çözünür. Bu orandan yüksek miktardaki Mg₂Si, fazla miktardaki magnezyuma bağlı olarak,solübilite özelliğini düşürür. Mg₂Si oluşturacak miktardan fazla miktardaki silisyum ve normal seviyedeki demir, Mg₂Si'nin erirliğini az miktarda düşürürler.

Alaşım,solvüs eğrisinin altındaki bir sıcaklığa düştüğünde, Mg₂Si çökeler. Çökelen partiküllerin miktar ve büyüklüğü zaman ve sıcaklığa bağlıdır. Üst sıcaklık derecelerinden yavaş soğuma yapılır ise, büyük partiküller çökeler. Solvüs sıcaklığının yukarısından oda sıcaklığına ani soğutma, magnezyum ve silisyumun çözelti içinde kalmasına ve aşırı doymuş bir katı çözelti oluşmasına neden olur.

Bu aşırı doymuş katı çözelti, 204°C'nin altındaki bir sıcaklığa çıkarılıp belli süre tutulursa, mikroskobik ölçülerdeki Mg₂Si partikülleri çökeler ve çökeme sertleşmesi etkisi ile malzeme sertleşir. AA 6060 alaşımının endüstrideki önemi, bu özelliğinden kaynaklanır.

Şekil 2.6'daki solvüs eğrisi, denge durumları için uygulanır. Bir başka deyişle, belirtilen sıcaklık derecesinde uygun süre beklenmelidir. Endüstri tesislerinde ise denge durumu nadiren oluşur. Mg₂Si'nin alüminyum içindeki çözünürlüğü, uygulanan sıcaklık sahasında alaşımın bileşimi ve ısıtma/soğutma işleminin hızına bağlı olarak değişir. Mg₂Si'in solvüs sıcaklığı üzerinde yeniden çözünürlüğü geciktiği gibi,solvüs altındaki çözünmesi de gecikebilir.

Demir, gerek alüminyum, gerekse de silisyum ile birleşerek, döküm işlemi sırasında göreceli olarak çözünmeyen çeşitli intermetalikötektik yapılar oluşturur. Bu yapılar, bir denge fazı olan α AlFeSi'ye dönüşmeye eğilimlidirler. Tipik bir 6060-T6 alüminyum ekstrüzyon ürünü, alüminyum katı çözeltisi (matris) α AlFeSi ve Mg₂Si çökelti partiküllerinden (mikroskobik ölçüde) oluşur. Mg₂Si çökelti partikülleri, normal mikroskop ile görülemeyecek kadar küçük olduklarından elektron-mikroskop ile görülebilirler.

2.6. Alüminyum Alaşımalarında Dövme

Herhangi bir alüminyum alaşım dövme ürününün üretiminde ortak unsurlar dövme stoklarının hazırlanması, kalıp ısıtılması, yağlama, dövme prosesi, çapak alma, şekil verme ve onarım, temizleme, ısıl işlem ve muayene adımlarını kapsar. Bu unsurların her biri için kritik noktalar aşağıda verilmiştir.

2.6.1. Dövme Stoklarının Hazırlanması

Alüminyum alaşım dövmeler tipik olarak döküm veya dövme stoktan yapılmaktadır: Dövülmüş veya haddelenmiş çubuk, ekstrüde edilmiş çubuk veya levha birincil örneklerdir. Verilen bir dövme şekli için dövme stok türünün seçimi gerekli dövme prosesine, dövme şekline (parçanın şekline), mekanik özellik gereklerine ve fiyata bağlıdır. Dövülecek parçaların stoktan istenilen boyda kesilmesi için çoğunlukla testere ile kesme ve kırma teknikleri kullanılmaktadır. Abrazif kesme diskleri de kullanılabilir, fakat testere ile kesmeden daha yavaştır.

2.6.1.1. Kesme

Karbür uçlu bıçaklara sahip bir dairesel veya band testere en hızlı ve genellikle en tatminkâr kesme metodudur. Ancak kesme işlemi keskin kenarlar veya çapaklar meydana getirir, bu noktalar stok kapalı kalıpta dövüldüğü zaman kusurları başlatabilir. Çapaklar ve keskin kenarlar pah kırılarak kaldırılmaktadır. Alüminyum alaşımalarını kesme için kullanılan testere yüksek oranda otomatize edilmiştir ve çoğu kere otomatik pah kırabilme kapasitesine ve stok boyut ve hacmini hassasiyetle kontrol eden kontrol sistemine sahiptirler.

2.6.1.2. Kırma

Alüminyum için çelikten daha az kullanılmaktadır, zira alüminyum alaşım biyetler daha yumuşaktır ve makaslama esnasında bozulması-hasarlanmış olması daha muhtemeldir, makasla kesilmiş uçlar dövme için istenmeyen yüzeylere sahip olabilir. Makaslama kesme genellikle 50 mm'den daha küçük çaplı dövme çubuk

stoklardan yapılan yüksek hacimli alüminyum dövme için başarıyla kullanılmaktadır.

2.6.1.3. Dövme için Ön Isıtma

Alüminyum dövme prosesinde metal sıcaklığı kritik bir elemandır. Alüminyum alaşımları ısıtma ile birçok oksit tabakası oluştururlar. Bu tabaka kendi kendini sınırlar, bu nedenle alüminyum alaşımları çelikte olduğu ölçüde bir tufal oluşturmaz. Ne var ki, çoğu alüminyum alaşımları tekrar ısıtma işlemlerinde hidrojen birikmesine duyarlıdır. Bu nedenle tekrar ısıtma donanım ve pratiği de dövme prosesini kontrol etme noktasında kritik elemanlardır.

- Isıtma donanımı

Alüminyum alaşım dövme geniş bir ısıtma donanım aralığındaki fırınlarla ısıtılmaktadır. Bu fırınlar elektrik fırınları, gaz fırınları, indüksiyon ısıtma üniteleri, akışkan yatak fırınları ve direnç ısıtma fırınlarını kapsar.

- Sıcaklık Kontrolü

Daha önce gösterildiği gibi, alüminyum alaşımları dövme için nispeten dar bir aralığa sahiptirler. Bu bakımdan, ön ısıtmada dikkatli sıcaklık kontrolü önemlidir. Sıcaklık değerleri $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 'de korunmalıdır. Alüminyum ön ısıtma için kullanılan sürekli fırınlar ön ısıtma, yüksek ısı ve deşarj olmak üzere tipik 3 bölüme ayrılır. Çoğu fırınlar kayıt/kontrol cihazları ile donatılmıştır ve çözeltiye alma ve yaşlandırma için kullanılan fırınlara benzer bir tarzda sıcaklık üniformluğu sık sık kontrol edilmektedir.

Isıtılmış alüminyum alaşım biyetlerinin sıcaklıkları temaslı veya temassız olarak kontrol edilmektedir. Dövme başladığı zaman sıcaklığın açık kalıpta dövmede, biyetlerin dövme sıcaklık aralığının yüksek yanına yakın olması istenmektedir. Sıcaklığın aşırı düşmesinden önce mümkün olduğunca hızlı bir dövmenin bitmesi istenir. Kritik metal sıcaklıkları tekrar ısıtma olmaksızın uzun süre korunabilen açık kalıpta dövme ve çoklu kalıp kapalı kalıp dövme sıklıkla uygulanmaktadır.

Isıtma süresi alüminyum alaşımları için stok kesit kalınlığı ve fırın niteliklerine bağlı olarak değişir. Genelde, alüminyum alaşımlarının termal iletkenliği yüksek olduğu için, gerekli ön ısıtma süresi dövülen diğer malzemelerden daha kısadır. Fırınlarda kayıt yapan pirometre donanımı metalin istenen dövme sıcaklığına erişip erişmediğini göstermek için kullanılabilir. Genellikle alüminyum alaşımlarının istenen sıcaklığa erişmesi açısından kesit kalınlığının inch başına 10-20 dakika yeterlidir.

Bazı diğer dövülen malzemeler için olduğu gibi, alüminyum alaşımları için bir sıcaklıktaki tutma süresi kritik değildir, ne var ki, yüksek magnezyumlu 5083 alaşımı hariç, uzun tutma sürelerinin bir avantajı yoktur ve hidrojen birikmesi anlamında zararlı olabilir. Genel olarak 1-2 saatlik bekleme süreleri yeterlidir; eğer kaçınılmaz gecikmeler olur ve bekleme süreleri 4-6 saati geçerse, genellikle metalin fırından alınması tavsiye edilmektedir [8].

2.6.1.4. Kalıpların Isıtılması

Daha önce anlatıldığı gibi, alüminyum dövme prosesinde kalıp sıcaklığı ikinci kritik elemandır. Alüminyum alaşımlarının dövülmesi için kalıplar her zaman ısıtılmaktadır, kapalı kalıpta dövmede kalıp sıcaklığı daha kritik olur. Alüminyum alaşımlarının kapalı kalıp dövmesinde kullanılan kalıp sıcaklığı kullanılan dövme donanımının türüne ve dövülen alaşım türüne göre değişir. Alüminyum alaşımlarının dövülmesinde hem uzak hem de pres başında kalıp ısıtma sistemleri kullanılmaktadır. Uzak kalıp ısıtma sistemleri çoğunlukla kalıp bloklarını yavaş ısıtma yeteneğine sahip gaz ateşli ısıtıcılardır. Bu sistemler dövme donanımına monte edilmeden önce kalıpları arzu edilen sıcaklığa ön ısıtma için kullanılmaktadır.

Pres başında kalıp ısıtma sistemleri nispeten ana sistemlerden çok dar bir kalıp sıcaklık toleransı sağlayacak şekilde tasarlanmış gelişmiş sistemlere kadar geniş bir aralıkta bulunurlar. Pres başında ısıtma sistemleri gaz ateşlemeli donanım, indüksiyon ısıtma sistemi ve/veya direnç ısıtma sistemini kapsar. Ayrıca, alüminyum alaşımlarının hassas dövülmesi için kullanılan presler çoğu kere desteklere sahiptir ki gerekli olduğunda ısınabilir veya soğutulabilir. Pres başı alüminyum kalıp ısıtma sistemi kalıp sıcaklığını $\pm 15^{\circ}\text{C}$ veya daha iyi toleranslar içinde tutabilir. Özel pres başı kalıp ısıtma sistemleri kullanılan dövme donanımına, kalıpların boyutuna, dövme prosesine ve üretilen dövme türüne göre değişir.

2.6.1.5. Yağlama

Kalıp yağlanması alüminyum dövme prosesinde üçüncü kritik elemandır ve bu konudaki gelişmeler hem yağlayıcıların sadece kendileri ile hem de yağlayıcı uygulama sistemi ile ilgilidir.

Yağlayıcılar; alüminyum alaşım dövmelerinde kullanılan yağlayıcılar şiddetli servis taleplerine maruzdurlar. Bunlar arzu edilen derecede düşük sürtünme vermek üzere kalıp yüzeyini modifiye etme yeteneğine sahip olmalı, yüksek kalıp ve metal sıcaklıklarına ve uygulanan basınçlara dayanıklı olmalı ve dövme ürün geometrisini ve yüzeyini etkilememelidir. Yağlayıcı bileşimi çok özeldir. Alüminyum alaşımlarının dövülmesinde kullanılan yağlayıcılardaki ana aktif eleman grafitir, fakat istenen sonuçları elde etmek için diğer organik ve inorganik bileşikler koloidal süspansiyona katılır. Yağlayıcıları taşıyıcılar ise mineral ispirto, mineral yağ veya su bazlı olabilir.

Yağlama uygulanması; yağlayıcı kalıplar üzerine tipik olarak püskürtülerek uygulanır; bazı hallerde yağlayıcılar ön ısıtmadan önce veya hemen dövmeden önce dövme stoklarına uygulanmaktadır. Çeşitli basınçlı hava veya havasız püskürtme sistemleri kullanılmaktadır ve yüksek miktarlı otomatik alüminyum dövme proseslerinde yağlayıcı uygulaması yek veya çok eksenli robotlarla yapılmaktadır. Yağlayıcı uygulaması ısıtarak veya ısıtmadan yapılabilir.

2.6.2. Dövme Prosesi

Alüminyum dövme prosesinin kritik elemanları, spesifik şekil değiştirme hızı, deformasyon modu ve dövme proses türü yukarıda incelenmiştir. Alüminyum dövme ürünleri yapımında ileri üretim ve bilgisayar destekli imalat konseptlerini kullanan gelişmiş dövme donanımları kullanılmaktadır.

2.6.2.1. Çapak kesme, şekil verme ve tamir

Alüminyum alaşım dövmelerin çapak kesme, şekillendirme ve tamiri arzu edilen son ürünü elde etmek ve maliyetleri kontrol etmek için gerekli ara proseslerdir.

Çapak kesme; çoğu kapalı kalıp dövme proseslerinde meydana gelen flanş üretilen parçanın boyut, şekil ve hacmine bağlı olarak, sıcak veya soğuk çapak kesme, delme veya talaşlı işleme ile kaldırılmaktadır. Sıcak veya soğuk çapak kesme takımları büyük miktarları düzeltmek için olağan olarak kullanılmaktadır, özellikle karmaşık şekilli ve çeşitli delikler içeren orta büyüklükteki dövmelelerde kullanılmaktadır.

Şekil verme; bazı alüminyum alaşım dövme ürünleri, istenen şekli elde etmek için sıcak, ılık veya soğuk şekillendirme ile sıcak dövmeyle kombine etmektedir. Bir örnek Şekil 2.7’de gösterilen dövülmüş ve şekillendirilmiş alüminyum kamyon tekerleğidir.



Şekil 2.7: Dövülmüş ve şekillendirilmiş alüminyum alaşım 6061-T6 kamyon tekerlekleri.

Tamir; alüminyum alaşımlarının dövme adımları arasında gerçekleştirilen bir ara operasyondur. Bu operasyon dövmelelerin ilk dövme pratiğinden kaynaklanan fakat son dövme ürün bütünlüğünü etkilemeyen yüzey süreksizliklerini tamir etmek için sıklıkla gereklidir. Tamir için gereklilik çoğunlukla parçayı üretmek için imal edilen takımın boyutunun ve parça kompleksliğinin bir fonksiyonudur.

Temizlik; alüminyum alaşım dövme ürünleri çoğunlukla dövmeden sonra mümkün olduğunca erken temizlenmektedir. Takip eden işlem standart bir temizleme prosesi olup parça üzerindeki atıkları-kalıntıları kaldırır ve doğal alüminyum rengine sahip güzel bir yüzey ortaya çıkar:

- 0,5-5 dakika için 70°C’de %4-8 sulu kostik soda çözeltisinde dağlanır.
- 0,5-5 dakika için 75°C’de veya daha yüksek sıcak suda derhal yıkanır.

- Minimum 88°C’de hacimce %10’luk sulu nitrik asit çözeltisine daldırmak suretiyle temizlenir.
- Sıcak suda yıkanır.

İlk iki adımda daldırma süresi kaldırılacak konsantrasyon miktarına ve dövme konfigürasyonuna bağlı olarak değişir. Temizleme frekansı da dövme konfigürasyonu ve onu üretmek için kullanılan prosesine bağlıdır. Bazı dövmeler son ürün muayenesinden hemen öncesine kadar temizlenmez.

2.6.3. Isıl İşlem

1XXX, 3XXX ve 5XXX serisi alaşımlar hariç tüm alüminyum alaşım dövmeler son mekanik özellikleri elde etmek için çözeltiye alma, su verme ve yapay yaşlandırma prosesleri ile ısıl işlenmektedir. Alüminyum alaşım dövmeleri ısıl işlemek ve yaşlandırmak için kullanılan fırınlar sürekli veya yığın tip fırınlardır (tamamen muffle gaz-ateşlemeli, elektrik, akışkan-yatak veya diğer özel tasarlanmış ekipmanlar). Alüminyum dövmelerin şekil kompleksliğinden dolayı su verme – yaşlandırma prosedürleri gerekli mekanik özellikleri elde etmek ve distorsiyonu minimize etmek için uniform ve tatminkâr su verme gereğini elde etmede özellikle kritiktir. Bundan dolayı, çözeltiye alma ve yaşlandırma sıcaklık ve süresini kontrol etmede, dövme ürünler için yaşlandırma teknikleri gerekli ısıl işlem kontrol proseslerinin de konusudur.

Bundan öte, alüminyum alaşım dövmeler için su verme teknikleri de kritiktir, zira konfigürasyon ve kesit kalınlıkları büyük ölçüde değişiklik gösterir. Proses edilen spesifik alüminyum alaşımına bağlı olarak, dövme ürünler için su verme teknikleri 20-100°C arasındaki kontrollü sıcaklıklı su ve sentetik su verme ortamları (polialkalin glikol ve diğerleri) kapsar, su verme işlemleri aşırı distorsiyon olmaksızın gerekli mekanik özellikleri sağlamak üzere tasarlanmıştır. Alüminyum alaşım dövmeleri çözeltiye alma ve yaşlandırma arasında sıklıkla doğrultulmaktadır. Doğrultma hem el hem de kalıp doğrultma teknikleri kullanılarak tipik olarak soğuktur.

2XXX ve 7XXX serilerinde birçok alüminyum alaşım dövme ürünler talaşlı işleme distorsiyonunu azaltmak için çözeltiye alma ve yaşlandırma arasında basınçlı olarak gerilim giderilmektedir. Parça konfigürasyonuna bağlı olarak, bu tür basma

gerilim giderme, %1-5'lik kalıcı bir set elde edecek şekilde açık veya kapalı kalıpla dövme ile sağlanabilmektedir. Kapalı kalıp basma gerilim gidermeyle, parça konfigürasyonuna bağlı olarak, soğuk dövme ya son dövme kalıplarında (temper durumu Txx54) veya ayrı bir soğuk iş kalıp setinde (temper gösterimi Txx52) sağlanmaktadır. Bazı yuvarlak ve diğer alüminyum alaşım dövme ürün şekilleri soğuk germe ile gerilim giderilmektedir (temper gösterimi Txx51).

2.6.4. Kontrol

Alüminyum alaşım dövmelerin muayenesi iki şekilde yapılır: Proses sırasında muayene ve son muayene. Proses muayenesi, istatistiksel proses kontrolü ve/veya istatistiksel kalite kontrolü gibi teknikler kullanılarak yapılır, kritik karakteristiklerin karşılanıp karşılanmadığı ve dövme prosesinin kontrol altında olup olmadığını belirlemek için kullanılmaktadır. Mekanik özellik testlerini de kapsayan son muayene tüm çizim ve spesifikasyon kriterleri ile tamamlanmış dövme ürününün uygunluğunu doğrulamak için kullanılmaktadır. Alüminyum alaşım dövmeler için kullanılan tipik son muayene prosedürleri boyutsal kontrolü, ısıtma işlem doğrulamasını ve tahribatsız değerlendirmeyi kapsar.

Boyut kontrolü;tüm son ürünler boyutsal kontrole tabi tutulur. Açık kalıp dövmeleri için, son boyutsal muayene her bir dövme ürününün veya istatistiksel numune alma yoluyla alınan numunelerin gerekli tüm boyutlarının doğrulanmasını kapsar. Kapalı kalıp dövmeler için, boyut kontrolünde kritik bir eleman olan kalıp kalitelerinin çizime uygunluğu kontrol edilir.

Isıtma işlem kontrolü;alüminyum alaşım dövmelerin doğru ısıtma işlemi sertlik ölçümleri yoluyla, 7XXX-T7XXX alaşımları durumunda ise eddy akım muayenesi ile kontrol edilmektedir. Bu muayenelere ilave olarak,spesifikasyon kontrolü için dövmelere değişik mekanik özellik testleri uygulanmaktadır. Bazı hallerde elektriksel iletkenlik muayenesi de gerekli olabilir.

Tahribatsız muayene; alüminyum alaşımı dövmeler yüzey ve iç kalitelerini kontrol etmek için sıklıkla tahribatsız değerlendirmelere maruz kalırlar. Dövme ve kostikle temizlemeden sonra alüminyum dövme ürünlerin yüzey kaliteleri genel olarak iyidir. Tahribatsız muayene ihtiyacının seçimi son dövme uygulanmasına bağlıdır. Gerekli zaman, istenilen yüzey kalitesi sıvı penetran,eddy akımı ve diğer teknikler kullanılarak doğrulanır. Havacılık uygulamalarında kullanılan alüminyum

alaşım dövmelemler sıklıkla ultrasonik muayene teknikleri kullanılarak iç kalite açısından muayene edilmektedir.

Alüminyum alaşımları endüstrinin birçok sahasında farklı uygulamalar için kullanılan ve geniş aralıklarda fiziksel ve mekanik özelliklere sahip bir malzeme grubudur (Tablo 2.2.) [9]. Isıl işlem ve soğuk işlem ile mekanik özellikleri geliştirmek mümkündür. Isıl işlem ile sertleştirilen alaşımlara en iyi örneklerden birisi AlMgSi (6XXX) alaşım grubudur. Bu alaşım grubu içerisinde en yüksek mekanik özelliklere sahip alaşım ise AA 6082 alaşımıdır. Ekstrüzyon endüstrisinde özellikle otomotiv sektörüne yönelik ürünlerde kullanılan bir alaşım olup mekanik özelliklerini geliştirme çalışmaları halen devam etmektedir. Bundan dolayı 6XXX alaşım grubu içerisinde en popüler AA 6082 alaşımı gösterilebilir.

Tablo 2.2: AA6082 alaşımının çeşitli özellikleri

6082 / ISO: Al Si1MgMn	
Uygulamalar	Demir yolu vagonlarında ağır hizmet elemanları olarak, kamyon çerçeveleri, gemi inşaatları, köprüler, bisikletler, soba, ocak ve kazan yapımlarında, platformlar, flanşlar, hidrolik sistemler, maden ekipmanları, direkler ve kuleler, deniz botları, nükleer teknoloji, gemi direkleri ve kirişleri, iskele malzemeleri, çadır ve büyük salonlar için iskelet yapılarında, perçinlerde.
Yapısal Özellikler	<ul style="list-style-type: none">• Çok iyi korozyon direnci• Çok iyi kaynak kabiliyeti (kaynak bölgesinde zayıf dayanım).• İyi işlenebilme kabiliyeti.• T4 temperinde soğuk şekillendirilme kabiliyeti.• Orta-yüksek arası derecede dayanım özelliği olup 6061 alaşımına göre dayanımı daha iyidir.• Karmaşık kesitler için uygun değildir.
Ürün Formu	<ul style="list-style-type: none">• Levha, çubuk, tel tüp, profil.

6XXX grubu alüminyum alaşımları uygulama alanları ve çökeltme sertleşmesi ile mukavemetlerin de sağlanacak yüksek artışlar nedeniyle geçtiğimiz yıllar içerisindeki araştırmalarda yoğun bir şekilde kullanılmıştır. Yüksek dayanımlı alüminyum alaşımlarında hedeflenen dayanım seviyesi esas olarak çökeltme

sertleşmesi ile sağlanmaktadır. Ancak, malzeme özelliklerinin optimize edilmesi, tane büyüklüğü kontrolü gibi diğer mekanizmalarında devreye alınmasını gerektirmektedir.

İnce tane yapısı son yıllarda malzeme biliminde geniş araştırmaların yapıldığı konulardan biri olmuştur. İnce taneli malzeme üretimi konusuna artan ilginin nedenini iki şekilde açıklayabiliriz. İlki oda sıcaklığında tane boyutu ve mukavemet arasındaki ilişkidir. Kristal yapılı malzemelerin fiziksel ve mekanik özelliklerini tanımlarken farklı parametreler kullanılmaktadır. Çok kristalli malzemede akmanın meydana gelebilmesi için plastik şekil değişimi bir taneden diğer taneye ilerlemelidir. Yani, kayma bandının sonunda oluşan gerilme yoğunlaşması, ikinci tanede akmayı başlatacak seviyede olmalıdır. Kayma bandı modeline göre, çok kristalli malzemelerde akma mukavemeti (σ_a) ile tane boyutu (d) arasında kantitatif bir bağıntı bulunmaktadır.

$$\sigma_a = \sigma_0 + k_y d^{-1/2} \quad (2.1)$$

Bu bağıntıda σ_0 iç gerilmeyi, k_y tane sınırlarının akma mukavemetini artırma etkinliğini belirleyen sabit olarak tanımlanır. Hall-Petch bağıntısı olarak bilinen bu bağıntıya göre çok kristalli malzemenin mekanik özellikleri tane boyutunun küçültülmesi ile artırılabilir.

Tareg ve arkadaşlarınca yapılan bu çalışmada araştırmacılar amaçlarını 6082 alüminyum alaşımının çoklu dövme operasyonlarında çekme davranışlarını ve malzeme yapı değişimlerini gözleme olarak belirlemişlerdir. Bu çalışmada her dövme aşamasından sonra çekme testleri yapılmış, sertlik dağılımı incelenmiştir. Sonuçlar çoklu dövme pesolarının artışı ile mukavemetin arttığını ve % uzamanın düştüğünü göstermiştir. Yapı homojendir ve halen malzeme sünektir [10].

Yine Tareg ve arkadaşları "finite element " yöntemlerini iki farklı formülle kullanarak 7075 alüminyum metalinin sıcak akış davranışını incelenmiştir. 250 - 450°C sıcaklık aralığında ve 0,002 – 2 sn⁻¹ şekil değişim hızlarında çalışmışlar ve yapının homojen olduğunu setlik ölçümleri ve optik mikroskop incelemeleriyle göstermişlerdir [11].

Perries ve arkadaşlarınca yapılan bu çalışmada araştırmacılar CobaPress adı verilen dövme yöntemiyle A356 alüminyum alaşımını dövmüş ve her dövülme evresinde özellikleri ölçülmüştür. Bu deneylerden biri çekirdek gerilimini tahmin

eden ABAQUS yazılımıyla yapılmıştır. Akma mukavemeti, çekme mukavemeti, uzama ve yorulma özelliklerinin, döküm sonrasında dövülmüş numunelerde sadece döküm numunelere nazaran daha yüksek olduğu görülmüştür. Dövme etkisi olarak porozitelerin kapandığı vs. tespitlerde bulunulmuştur [12].

Marin ve arkadaşlarınca yapılan bu çalışmada araştırmacılar AA 6082-T6 alaşımını kullanarak malzemenin çekme ölçülerinin malzemeyi sürekli sabit kuvvette dövmek ile arttırılan kuvvette dövmek arasındaki değişimini gözlemişlerdir. Gerilme – şekil değişimi eğrileri elde edilmiştir. Sonuçta gerilme - şekil değişimi değerlerinin sürekli yük artışı durumunda daha düşük olduğu, buna benzer olarak yüzey pürüzlüğünde sürekli yük artış prosesinde daha düşüktür. Bu, sürtünmenin minimize edilmesine bağlanmıştır [13].

Plonka ve arkadaşları döküm yöntemiyle üretilmiş EN AW 2618A alaşımı ile ekstrüzyon yöntemiyle üretilmiş EN AW 6082 alaşımından dövme yöntemiyle kulbütör parçası üretmeye çalışmışlardır. EN AW 2618A alaşımının iyi plastik özellikler gösterdiği, çok yüksek mekanik özelliklere sahip olduğu görülmüştür. Buna karşılık EN AW 6082 alaşımı hem daha iyi makro ve mikroyapı hem de daha düşük maliyet sunmuştur [14].

Biol ve arkadaşlarının 6082 alüminyum alaşımlar üzerine yapıları bir araştırmada, malzemenin döküm, döküm sonrası dövme, döküm sonrası dövme ardından T6 ısıtma işleminin uygulanması durumunda ki mekanik özellikleri incelenmiştir. Sonuçlar irdelendiğinde maksimum sertlik değerlerine ve mikroyapının en homojen olduğu yapıya dövme sonrası T6 ısıtma işleminin gerçekleştirildiği numunede görülmüştür [15].

Mrowka-Nowotnik ve arkadaşları yaptıkları bir çalışmada 6005 ve 6082 alaşımlarının mikroyapısına ısıtma işleminin etkisini incelemişlerdir. Bu çalışmada, 6082 alaşımı 500-550°C'de homojenize edildikten sonra 570°C'de 4 saat indüksiyon fırınında tavlama soğutulmuştur. Ayrıca, 510-580°C'de çözeltiye alınıp su verilen alaşıma 120 saat süre ile doğal yaşlandırma uygulanmıştır. Homojenleştirilmiş malzemede AlSiFe ve Mg₂Si fazlarına rastlanırken yaşlandırılmış malzemede çok ince Mg₂Si fazının çökeldiği görülmüştür. Bu fazın miktarı çözeltiye alma işlem sıcaklığına bağlı olarak artmıştır [16].

Zvinys ve arkadaşları, plastik şekil değiştirme proseslerinde yüzeyde gelişen yeniden kristalleşme zonuna atıfta bulunarak bu bölgelerin yeniden kristalleşmemiş kısımlara göre farklı mekanik özellikler gösterdiğini, örneğin yorulma özelliklerinde

zayıflıklar olduğunu, dolayısıyla imalat esnasında bu bölgelerden kaçınmak gerektiğini ifade etmişlerdir. Bu durumu referans alarak, plastik şekillendirme için ısıtmayı müteakiben alaşımın dövmeden önce sıcaklık 480-500°C'ye düşünceye kadar 10-12 sn beklenip çift darbe ile dövülür ve ardından su verilirse yeniden kristalleşmiş yüzey zonunun gelişmediği ve tüm malzemenin lifli yapıda olduğunu göstermişlerdir [17].

Plonka ve arkadaşları sürekli döküm ve ekstrüzyon ürünü iki farklı AA6082 takoz kullanarak dövülmüş parçaların mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Bu çalışmada, farklı mekanik işlem ve ısıtma işlem kombinasyonları takip edilmiştir. Takip edilen yollardan ikisi;

- 530°C'de dövme ve ardından derhal su verme ve nihayet 180°C'de yaşlandırma,
- 530°C'de dövme, oda sıcaklığına soğuma, 540°C'de çözeltiye alma, su verme ve 180°C'de yaşlandırma.

Bu yollardan birincisi, T5 olarak adlandırılan temper durumuna, ikincisi T6 olarak adlandırılan temper durumuna eşdeğerdir. Mekanik özellikler açısından, yaşlandırma sonrasında, T5 ve T6 temperleri arasında önemli bir fark görülemediği gibi T5 temperi gören alaşımların yapılarının daha ince olduğu da gözlenmiştir. T6 temperi gören parçalarda yeniden kristalleşmeye bağlı yüzey tane büyümesi gözlenirken T5 temperi halinde etkili bir yeniden kristalleşme etkisi gözlenmemiştir [18].

European Aluminum Association (Avrupa Alüminyum Birliği) tarafından hazırlanan TALAT proje/eğitim belgesinin 3401 nolu dersi dövme alaşımları ve bu kapsamda alüminyum alaşımları ilgilidir. Bu belgede, bu tez projesi kapsamında gerçekleştirilen deneysel yol tanımlanmış ancak bu yolla elde edilen bir sonuç veya bilgi paylaşılmamıştır [19].

Yapılan literatür incelemeleri, literatürde AA6082 alaşımı hakkında çok sayıda bilimsel çalışmanın olduğunu göstermektedir. Bu çalışmalardan bir kısmı doğrudan ısıtma işlem uygulamasının mikroyapı ve mekanik özelliklere etkilerini araştırırken bir kısmı da doğrudan dövülmüş haldeki malzemenin haddelenmiş/ekstrüde edilmiş malzeme yerine kullanılıp kullanılamayacağını incelemişlerdir. Benzer şekilde, döküm malzemenin doğrudan veya homojenizasyon sonrası kullanılabilirliği araştırılan konulardandır.

Alüminyum alaşımlarına uygulanan yaygın ısıtma işlemi prosedürü T6 temperi olarak adlandırılan çözeltiye alma + su verme + yaşlandırma işlem serisidir. Endüstriyel uygulamalar, zaman ve sıcaklık gibi proses parametrelerinde zaman zaman değişiklikler yapılmasını gerektirebilir. Küçük zaman tasarrufu veya daha düşük sıcaklıklarda çalışma çok önemli maliyet kazanımları sağlayabilmektedir. Ancak, tüm bu arayışlar kullanılan parçaların özelliklerinde bir kayba neden olmamalıdır.

Dövme işlemi, farklı alüminyum alaşımlarında farklı sıcaklıklarda uygulanır. AA 6082 alaşımı için 450-500°C'ler arası dövme sıcaklık aralığı [19] olarak tanımlanmıştır. Dövme öncesinde alüminyum takozlar yaygın olarak induksiyon fırınlarında tavlama ve ardından anılan sıcaklıklarda dövülür. Yaygın pratikte, dövme takiben parça oda sıcaklığına soğutulur. Bu parçalar daha sonra T6 işlemine tabi tutulur.

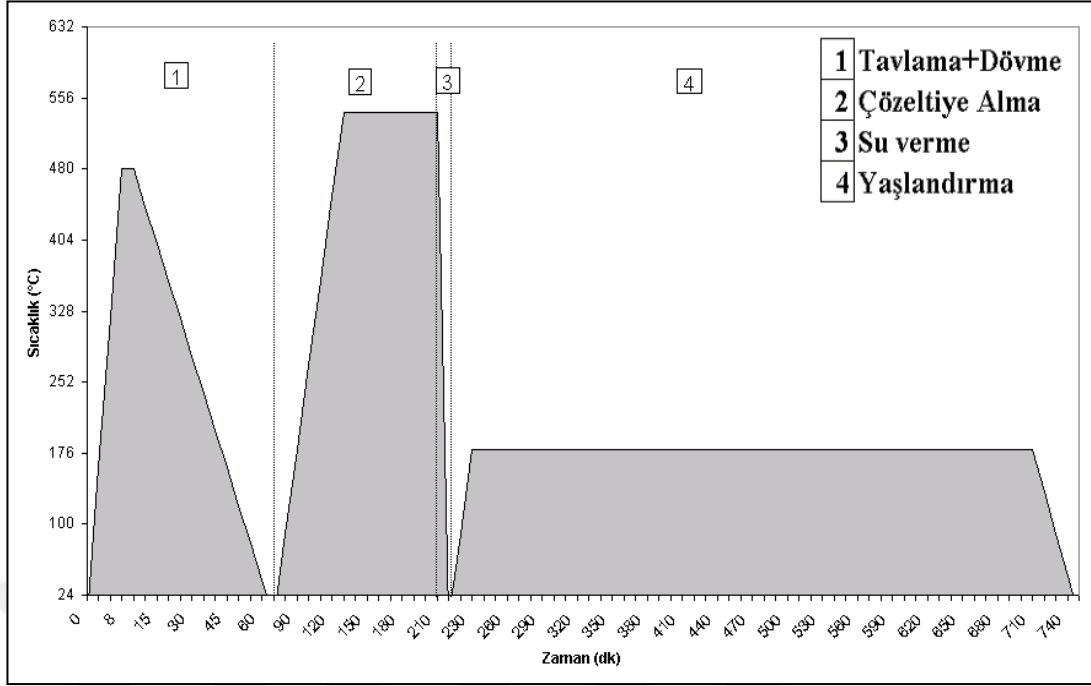
Bu tez çalışması, dövme takiben alüminyum parçalara doğrudan su verilmesi, takiben suda soğutulması ve yaşlandırılması yöntemini konu edinmiştir. Aslında, bu yöntem T5 temperi durumuna benzemektedir. Bu açıdan bakıldığında, konu hakkında literatürde çok az bilgi vardır ve yayınlanmış veriler çok kısıtlıdır. Üstelik bu çalışma kapsamında, Zvinys ve arkadaşlarının çalışmasına nazaran farklılıklar da vardır: İndüksiyon ısıtma koşullarına en yakın ısıtma kısa süreli ısıtma (7,5 dakika) olup bu çalışmada ısıtma süresi 7,5 dakikadan 60 dakikaya kadar bir aralıkta değiştirilmiştir. İlave olarak, çözeltiye alma için önemli olan doğru sıcaklık değerini yakalayabilmek için farklı dövme sıcaklıkları kullanılmıştır. TALAT kapsamında sunulan alüminyum ısıtma işlem programında ise hiçbir ayrıntılı bilgi sunulmamıştır.

Sonuç olarak, bu tez çalışması; hem literatürdeki dövme alüminyum parçaların ısıtma işlem pratiği ile ilgili önemli bir boşluğu dolduracak şekilde tasarlanmış olup, hem de elde edilen veriler ışığında dövme üretim süreçlerinde bir iyileşme yapılabileceğini ortaya koyacaktır.

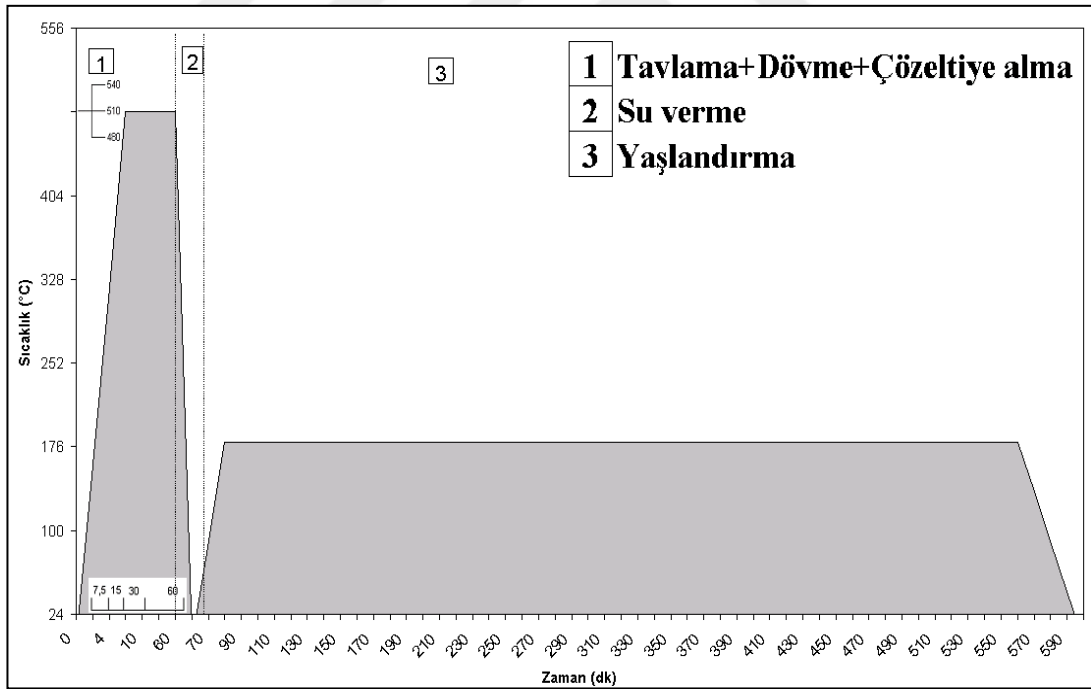
3. DENEYSEL ÇALIŞMA

Bu çalışmada AA 6082 alaşımına 3 farklı sıcaklık (480-510-540°C) ve 4 farklı sürede (7,5-15-30-60 dk) ısıl işlem uygulanmıştır. Bu amaçla, deney numunelerine elektrik direnç fırınında farklı sıcaklık ve sürelerde ısıtılıp hidrolik preste dövüldükten sonra su verilmiştir. Son olarak tüm numuneler 180°C'de 8 saat süreyle yaşlandırılmıştır. Numuneler sertlik ölçümleri, çekme özellikleri ve mikroyapı incelemeleri yoluyla karakterize edilmiştir.

Klasik T6 işleminde, parçalar dövüldükten sonra oda sıcaklığına soğutulmakta, takiben çözeltiye alma işlemi uygulanıp su verilmektedir. Son olarak yaşlandırma işlemi ile mukavemetlendirme/sertleştirme sağlanmaktadır (Şekil 3.1). Bu tez çalışmasında ise, Şekil 3.1'de görülen 2 numaralı adım atlanarak dövme sonrası su verme yoluna gidilmiş ve son olarak yaşlandırma işlemi uygulanmıştır (Şekil 3.2). Böylece proste zaman ve enerji tasarrufu sağlanabilmesi hedeflenmiştir. Bu şekilde en azından 2 saatlik bir zaman tasarrufu ve daha az fırın kullanmaktan kaynaklanan enerji tasarrufu mümkün olabilecektir.



Şekil 3.1: Alüminyum alaşımlarına uygulanan klasik T6 işleminin sıcaklık zaman grafiği.



Şekil 3.2: Bu tez çalışmasında takip edilen yeni tasarlanmış ısıtım işleminin sıcaklık zaman grafiği.

3.1. Numune Seçimi

Deneysel çalışmalarda ASASŞ alüminyum firmasından temin edilen haddelenmiş AA6082 alaşımından hazırlanmış 36 mm çapında ve 85 mm uzunluğunda silindirik parçalar kullanılmıştır. Kalite belgesinde belirtilmiş başlangıç sertliği 47-52 HB olan bu alaşıma ait nominal kimyasal kompozisyon değerleri ve kalite belgesindeki ölçülmüş değerleri Tablo 3.1 de verilmiştir. Alaşımın yapısal özellikleri ve uygulama alanları ile bilgiler de daha önce sunulmuştur. Tablo 3.1 de görüldüğü gibi, AA 6082 alaşımı Si, Mg, Mn ile az miktarda Fe içeren bir alaşımdır. Orta-yüksek mukavemetli bir alaşım olup ekstrüzyon ve özellikle dövme ile parça üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Alaşımın mukavemeti yaşlandırma işlemi ile Mg-Si-Mn intermetalik bileşiklerinin (özellikle Mg₂Si) çökeltilmesi ile artırılmaktadır. Endüstride genel olarak 90 HB üzerinde sertlikler kabul şartıdır.

Tablo 3.1: AA 6082 alüminyum alaşımının nominal kimyasal bileşimi.

Element	Nominal (ağ.%)	Ölçülen değerler (ağ.%)
Si	0,70 – 1,30	1,00
Mg	0,60 – 1,20	0,66
Mn	0,40 – 1,00	0,42
Fe	0,50 (maks)	0,23
Cr	0,25 (maks)	0,10
Zn	0,20 (maks)	0,01
Cu	0,10 (maks)	0,01
Ti	0,10 (maks)	0,02
Diğerleri	0,05 – 0,15	0,06

3.2. Numunelerin Gruplandırılması

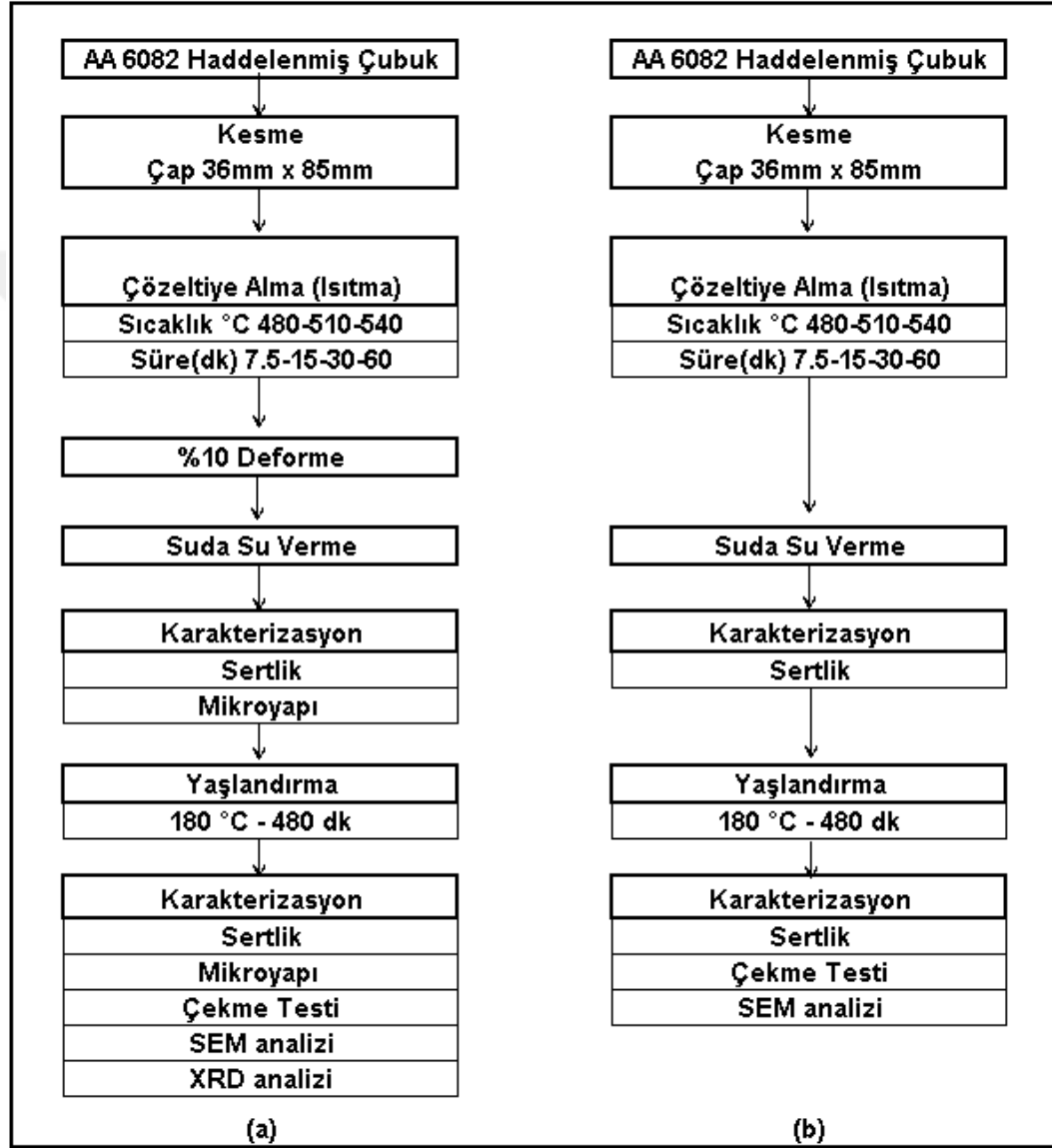
Deneyisel çalışmalarda kullanılacak olan numunelere ait kodlama işleminde AA 6082 alaşımından elde edilen silindirik numuneler X, Y,Z ve T harfleri şeklinde kodlanmıştır. 3 farklı çözeltiye alma sıcaklığında 4 farklı süre belirlenmiş olup bunların kodlaması X: 7,5 dk, Y: 15 dk, Z: 30 dk, T: 60 dk şeklindedir. Numunelerin kodlanması ile ilgili bilgiler Tablo 3.2 de görülmektedir.

Tablo 3.2: AA6082 alaşımına ait ısıl işlem değişkenleri ve kodlama bilgileri.

No	Kodu	Zaman (dk)	Sıcaklık(°C)	Deformasyon %
1	X ₁	7,5	480	10
2	X ₂	7,5	480	0
3	X ₃	7,5	510	10
4	X ₄	7,5	510	0
5	X ₅	7,5	540	10
6	X ₆	7,5	540	0
7	Y ₁	15	480	10
8	Y ₂	15	480	0
9	Y ₃	15	510	10
10	Y ₄	15	510	0
11	Y ₅	15	540	10
12	Y ₆	15	540	0
13	Z ₁	30	480	10
14	Z ₂	30	480	0
15	Z ₃	30	510	10
16	Z ₄	30	510	0
17	Z ₅	30	540	10
18	Z ₆	30	540	0
19	T ₁	60	480	10
20	T ₂	60	480	0
21	T ₃	60	510	10
22	T ₄	60	510	0
23	T ₅	60	540	10
24	T ₆	60	540	0

3.3. Deneysel Çalışmalar

Bu çalışmada takip edilen deneysel yol (akış şeması) Şekil 3.3.a ve 3.3.b de verilmiştir. Birinci grup numuneler tavlamaı takiben dövme ile şekillendirilmiş (Şekil 3.3.a). Diğer grup ise tavlamadan sonra dövme uygulanmamıştır (Şekil 3.3.b).



Şekil 3.3: Deneysel çalışma iş akış şeması. a) Çözeltili alındıktan sonra deforme edilmiş parçalar. b)Çözeltili alındıktan sonra deforme edilmemiş parçalar.

AA 6082 alaşımlı silindirik çubuklardan kesilerek hazırlanan 36 mm çapında 85 mm uzunluğundaki ilk grup numune elektrik direnç ısıtılmalı fırında 480°C'de 7,5 dakika süreyle ısıtılıp (dövme için ısıtma ve/veya çözeltiye alma) ardından dövme tezgâhında yaklaşık %10 oranında deforme edilmiştir. Takiben deforme edilen parçalar su dolu su havuza atılarak su verilmiştir (Şekil 3.3.a). İkinci grup malzemelere ise ısıtıldıktan sonra deforme edilmeden doğrudan suya atılarak su verilmiştir (Şekil 3.3.b). Bu işlemler 480°C'de sırasıyla 15-30 ve 60 dakika ısıtılarak da tekrarlanmıştır. Tavlama sıcaklığı olarak da 510°C ve 540°C'lerde tekrarlanarak uygulanmıştır. Gerek 1. grup malzemeler (%10 deforme edilmiş) gerekse 2. grup malzemeler (deforme edilmemiş) 180°C'de 8 saat süreyle yaşlandırılmıştır.

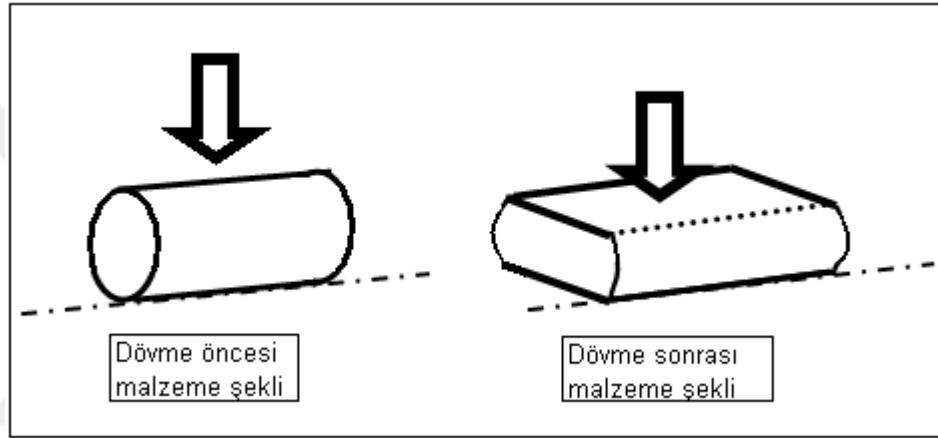
1. ve 2. grup malzemelerin yaşlandırma öncesi ve sonrası karakterizasyon işlemleri yapılmıştır. Sertlik kontrolleri ve çekme testleri yapılmıştır. Metalografik olarak; optik mikroskop (OM) altında mikro yapı, taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve enerji dağılımlı X-ışınları spektral analizleri (EDS) ile incelenmiştir. Seçilmiş numuneler üzerinde XRD çalışmaları yapılmıştır. Deneysel çalışmalar aşağıda ayrıntılı olarak anlatılmıştır.

3.3.1. Çözeltiye Alma İşlemi

Çözeltiye alma sıcaklığı seçiminde, sıcak dövme sıcaklığı referans alınmıştır. Bunu nedeni, ekstrüzyon, dövme gibi işlemlerde alüminyum biyetin veya parçanın mekanik işlem (ekstrüzyon veya dövme) öncesi ısıtıldığı sıcaklıkların nispeten düşük olmasıdır. Dövme işlemi yaygın olarak 480°C'de yapılmaktadır. Ancak dövme öncesi ısıtma işlemi indüksiyon ile kısa süreli olarak uygulanmaktadır. Standart çözeltiye alma işlemine göre (bu işlem 540°C civarında uygulanır), bu çalışmadaki sıcaklık ve tutma süresinin yetersiz olabileceği düşünülerek farklı sıcaklık ve sürelerde denemeler yapılma yoluna gidilmiştir. Tüm sıcaklıklar çözeltiye alma için kullanılacak α alüminyum bölgesine denk gelen sıcaklıklardır. 480°C'den itibaren 540°C'ye kadar değişen 3 farklı çözeltiye alma sıcaklığı ve 4 farklı tutma süresi seçilmiştir. 7,5 dakikalık kısa süreler indüksiyon ısıtma gibi kısa süreli ısıtmalar göz önüne alınarak belirlenmiştir. Kısa sürelerden 60 dakikaya ulaşan çözeltiye alma süreleri denemelerde kullanılmıştır. X, Y, Z ve T numunelerine Tablo 3.2'de belirtilen süre ve sıcaklıklarda çözeltiye alma işlemleri uygulanmıştır.

3.3.2. Dövme

Dövme işlemi ile malzemenin yapısında şekil değişimi meydana geldiğinden bunu bir ölçüde simüle etmek için 1. grup malzemeleri fırından çıkarıldıktan sonra 5 ton kapasiteli düşey eksenli dövme tezgâhı kullanılarak yaklaşık %10 mertebesinde deforme edilmiştir (Şekil 3.4). Tezgâh; otomatik ayarlanabilir özellikte olup, numune ilk yüksekliği olan 36 mm den %10 kadar ezildiğinde yükü kaldırarak işlem bitirmiştir. Bu şekilde bütün 1. grup malzemeleri su verme işlemi öncesinde tezgâhta dövülmüştür.



Şekil 3.4: Malzeme dövme şekil değişimi şematik gösterimi.

3.3.3. Su verme işlemi

Çözeltiye alma ısıl işleminde malzemenin solvüs eğrisi üzerindeki bir sıcaklığa ısıtıldıktan sonra, hızla bu sıcaklıktan soğutulması ile aşırı doymuş katı eriyik yapısı oluşturulur. Burada amaç çökeltme sertleştirilmesi yaratacak elementlerin çözünerek katı çözelti içinde hapsedilmesidir. Bu sayede matris α fazını sertleştirecek olan AlFeSi ve Mg₂Si gibi çökeltileri meydana getirecek elementler matriste dağıntık olarak tutulur. Su verme işlemi için iki farklı yol izlenmiştir,

- i) Tavlama sonrası dövme işlemi uygulanmış ve
- ii) Tavlama sonrası dövme işlemi uygulanmamış.

Çözeltiye alınmış 1. ve 2. grup malzemeler 10 litrelik su dolu havuzda soğutulmuştur.

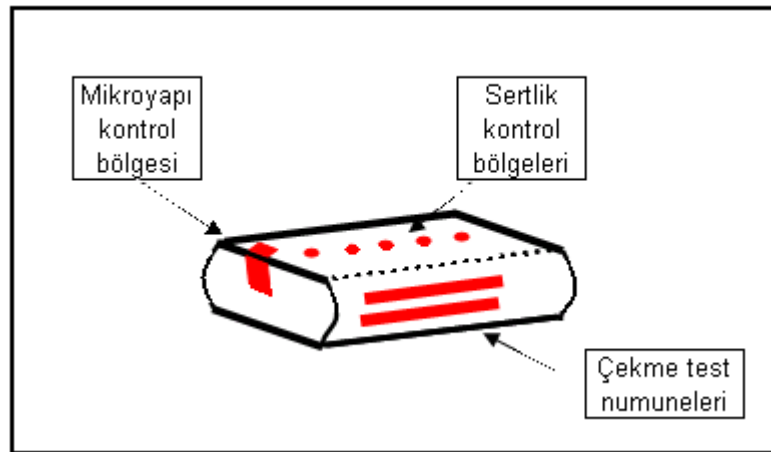
3.3.4. Yaşlandırma İşlemi

1. ve 2. grupta bulunan 24 adet numune, elektrikli direnç fırınında 180°C'de 8 saat boyunca yaşlandırma işlemine tabi tutulmuştur. Yaşlandırma işlemi yeni çökelti fazları oluşturarak matris sertliğini artırma amaçlı yapılmıştır. Sonrasında numuneler normal metalografik yöntemlerle hazırlanmış, doymuş NaOH çözeltisinde (50°C'deki suya çözünürlük sınırına kadar NaOH ilave edilmiştir.) dağlanmış ve optik mikroskopta incelenmiştir.

3.3.5. Numunelerin Karakterizasyonu

Yapılan çalışmalar sonucunda numuneler üzerinde optik mikroskop incelemesi, sertlik incelemesi, taramalı elektron mikroskop incelemesi, x-ışını difraksiyonu yöntemi ile inceleme ve çekme mukavemet testleri yapılmıştır.

Dövülmüş numunelerden (1.grup) inceleme numunelerinin alındığı yerler Şekil 3.5'te gösterilmiştir.



Şekil 3.5: Deforme edilmiş numune üzerinde alınan test numuneleri şematik görüntüsü.

3.3.5.1. OM İncelemesi

Bu çalışma AA6082 alaşımının dövülmesi ve ısıl işlem sürecini ilgilendirmektedir. Yapılan incelemelerde sertlik değerleri arasında kayda değer bir fark görülmediği için metalografik incelemeler sadece 1. grup malzemeler üzerinde gerçekleştirilmiştir.

1. grup malzemeler hem yaşlandırma öncesi hem de yaşlandırma sonrası optik mikroskop altında incelenmiştir. Metalografik inceleme yapılacak numune, deformasyona en fazla maruz kalan bölgeden, yüzeyden itibaren mikroyapı değişimi gösterecek şekilde seçilmiştir (Şekil 3.5.). Numune bakalite almaksızın, sadece 800 ve 1000 grid zımparalama işlemleri yapıldıktan sonra 1 mikron tane boyutlu elmas pasta ile parlatma yapılmış ve doymuş NaOH çözeltisinde dağladıktan mikroskobik incelemeler gerçekleştirilmiştir. İncelemeler NikonEclips optik mikroskop ile yapılmıştır.

3.3.5.2. SEM İncelemesi

OM için hazırlanan X₁ (480°C'de 7.5 dakika) ve T1-T₃-T₅ (480-510-540°C derecede 60 dakikada tavllanmış) numuneleri SEM ile incelenmiştir. SEM incelemeleri Philips XL 30 FEG model cihaz ile yapılmış olup hem matris hemde çökeltiler EDS ile analizleri yapılmıştır.

3.3.5.3. XRD

Gelen malzemedeki ve yaşlandırılmış numunelerdeki fazlar XRD analizi ile belirlenmiştir. Çalışmalarda RigakuDmax2200 x-ışınları difraktometresi kullanılmıştır. XRD incelemeleri Cu K α (λ)= 1.5418 Å radyasyonu kullanılarak 40 kV, 40mA, 2°/dk değerlerinde yapılmıştır. 2 θ tarama açısı 20° ile 100° aralığını kapsamaktadır.

3.3.5.4. Sertlik İncelemesi

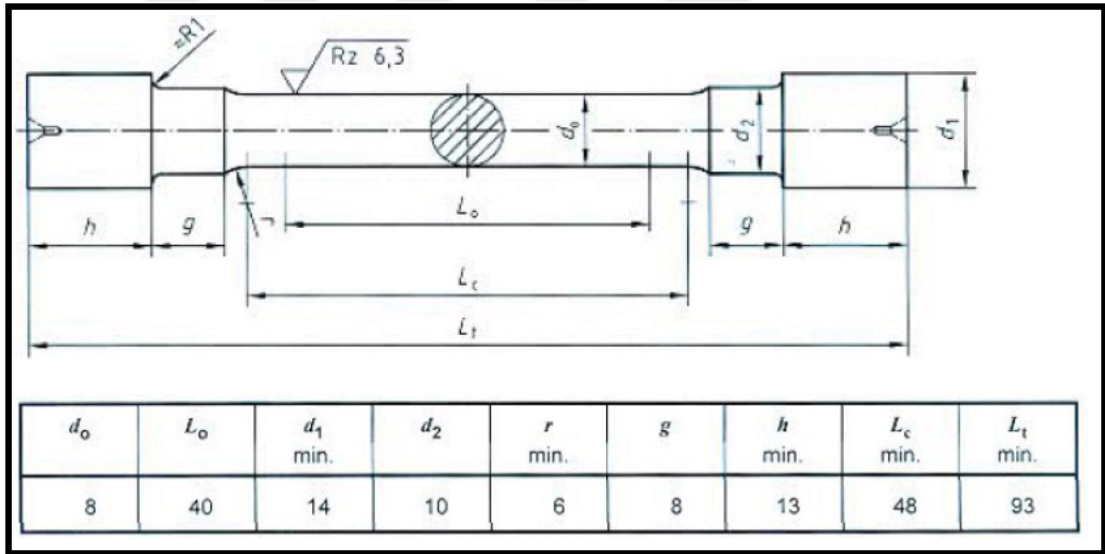
Gelen malzeme, su verilmiş malzemeler ve yaşlandırılmış malzemeler üzerinde 600 grid zımparadan geçirildikten sonra Emcotest M5C030G3 model universal sertlik ölçüm cihazı ile 5 mm çap uç ve 750 kg yük altında Brinell cinsinden sertlik

ölçümü yapılmıştır. Sertlik ölçümleri Şekil 3.5'de gösterilen bölgelerden alınmıştır. Sertlik değerleri bir numune üzerinde en az 5 ölçümün ortalaması olarak belirlenmiştir.

3.3.5.5. Çekme Mukavemeti Testi

1. ve 2. grup malzemelerinin yaşlandırma sonrasındaki akma, çekme mukavemetleri ve % uzama değerleri çekme testleri sonucunda belirlenmiştir. Çekme testinde kullanılan numuneler Şekil 3.5'de gösterilen bölgelerden alınmış ve DIN 50125 form C'ye göre hazırlanmış olup boyutları Şekil 3.6'da verilmiştir [20].

Testler 3mm/dk hızda 25 ton kapasiteli Shimadzu marka çekme deney cihazında gerçekleştirilmiştir. Veriler akma, çekme mukavemeti ve %uzama şeklinde kaydedilmiştir.



Şekil 3.6: Hazırlanan çekme test numunesi ölçüleri (DIN 50125 Form C).

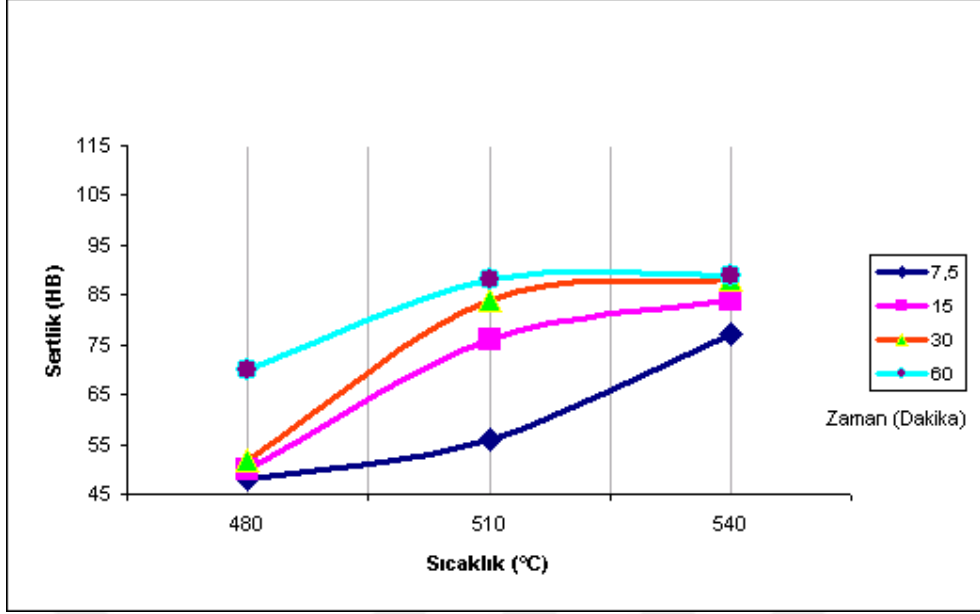
4. BULGULAR VE İRDELEME

4.1. Mekanik Özellikler

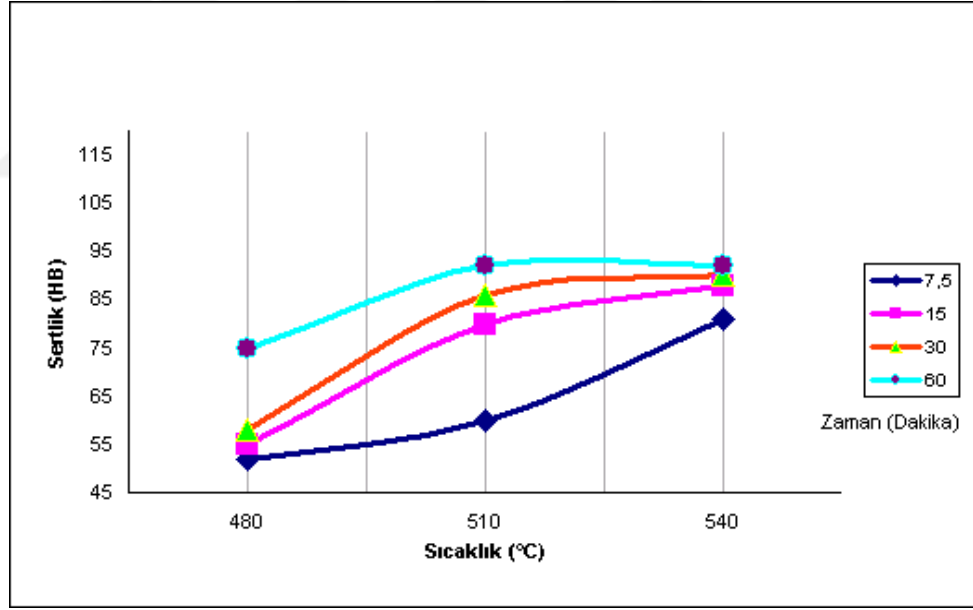
4.1.1. Sertlik Ölçüm Sonuçları

Su verilmiş halde ve yaşlandırılmış halde malzemeler üzerinde Brinell cinsinden sertlik ölçümü yapılmış ve tavlama sıcaklığı ve süresi, yaşlandırma durumu ve deforme edilme durumuna bağlı olarak sonuçlar Şekil 4.1-4.4'de gösterilmiştir. Sertlik değerleri bir numune üzerinde en az 5 ölçümün ortalaması olarak belirlenmiştir.

Şekil 4.1 de farklı sıcaklıklarda ve sürelerde çözeltiye alma işlemini takiben direkt su verilmiş numunelerin sertlik değerleri verilmektedir. Şekil 4.2 de ise farklı sıcaklıklarda ve sürelerde çözeltiye alma işlemini takiben %10 deforme edilmiş parçaların su verme sonrası sertlik değerleri verilmiştir. Düşük sıcaklıklarda ve kısa sürelerde çözeltiye alınmış numunelerde sertlik değerlerinin başlangıç malzemesinin sertlik değerine yakın olduğu gözlenirken çözeltiye alma sıcaklığı ve süresi arttıkça su verilmiş haldeki sertlik değerlerinde belirgin bir artış olduğu görülmüştür. Direkt su verilmiş ve deforme edildikten sonra su verilmiş numuneler arasında önemli bir fark tespit edilememiştir.

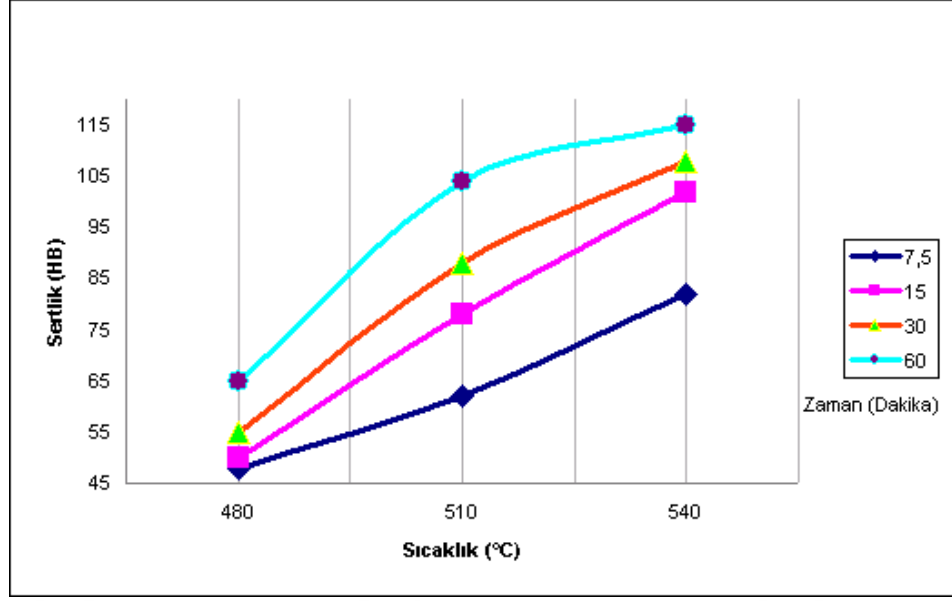


Şekil 4.1: Farklı sıcaklıklarda ve sürelerde çözeltilmiş numunelerin (deforme edilmeden) su verme işleminden sonraki sertlik değişimi.

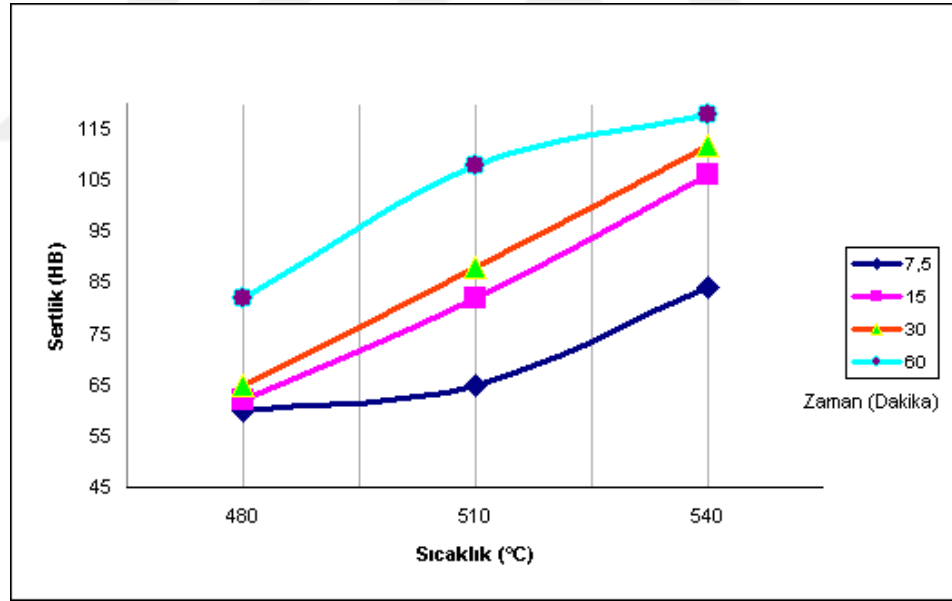


Şekil 4.2: Farklı sıcaklıklarda ve sürelerde çözeltilmiş numunelerin (%10 deformasyon sonrasında) su verme işleminden sonraki sertlik değişimi.

Şekil 4.3-4.4 arasında ise direkt su verilen ve deformasyon sonrasında su verilen numunelerin 180°C'de 8 saat yaşlandırıldıktan sonraki sertlik değerleri çözeltiyeye alma süresine göre verilmiştir. Çözeltiyeye alma süresi arttıkça yaşlandırma işlemi ile sertlik değerinin arttığı ve 120 HB mertebesine kadar yükseldiği görülmektedir. Bununla birlikte, yüksek çözeltiyeye alma sıcaklıklarında kısa sürelerde bile 100 HB mertebesinde sertlik değerleri elde edilirken, düşük çözeltiyeye alma sıcaklıklarında 60 dakika tutulan numunelerin sertlikleri 8 saat yaşlandırma neticesinde bile bu değerlere erişememiştir. Şekil 4.3 ve 4.4'de, 480°C'de 7,5-15-30 ve 60 dakika süreyle fırında tutulmuş, deforme edilmeden (direkt) ve deforme edilerek su verilmiş numunelerin 180°C'de 8 saat yaşlandırma sonrasındaki sertlik değerlerine bakıldığında, fırında tutma süresine bağlı olarak sertlik değerleri yaklaşık 45 HB'den 70 HB değerine yükseldiği görülmektedir. Tutma süresi arttıkça sertlik değerlerinde bir artış olmakla beraber en uzun tutma sürelerinde dahi elde edilen sertlik değerleri bu alaşımın standart sertlik değerinden (90 HB) oldukça düşüktür. Isıtma işleminden sonra deforme edilmeden ve deforme (%10) edildikten sonra su verilmiş numunelerin sertlik değerleri arasında önemli bir farklılık tespit edilmemiştir.



Şekil 4.3: Farklı sıcaklıklarda ve sürelerde çözeltilmiş, deforme edilmemiş su verilmiş numunelerin 180°C'de 8saat yaşlandırması sonrası çözeltilme alma sıcaklığına bağlı sertlik değişimleri.



Şekil 4.4: Farklı sıcaklıklarda ve sürelerde çözeltilmiş, %10 deforme edilmiş su verilmiş numunelerin 180°C'de 8saat yaşlandırması sonrası çözeltilme alma sıcaklığına bağlı sertlik değişimleri.

510°C'de belirli süreler fırında tutulup ardından deforme edilmeden ve deforme edildikten sonra suda soğutulan ve ardından 180°C'de 8 saat yaşlandırılan numunelerde elde edilen sertlik değerleri daha yüksektir (Şekil 4.3 ve 4.4). Bu numunelerde fırında 60 dakika tutulan numunelerde yaklaşık 100 HB sertlik değeri elde edilmiştir. Ancak kısa süreler tutulan numunelerde sertlik değerleri halen düşüktür. Buradan, sıcaklık ve süre arttıkça, çözünen faz miktarının arttığı ve yaşlandırma adımı daha fazla çökelti fazı (Mg₂Si) oluştuğu sonucuna ulaşabiliriz. Doğrudan su verilen numuneler ile deforme edildikten sonra su verilen numunelerin yaşlandırma sonrası sertlikleri arasında önemli bir farklılık bu sıcakta da görülmemiştir.

Benzer yaklaşımı, 510°C ve 540°C'de ısıtılan numuneler için de gösterebiliriz (Şekil 4.1-4.4). 540°C'de fırında 15 dakika tutulup direkt veya deforme edildikten sonra su verilen numunelerin yaşlandırma sonrası sertlikleri 100 HB değerine ulaşmıştır. 540°C'de tutulan numunelerde ise sertlik değerleri daha yüksek olarak belirlenmiştir.

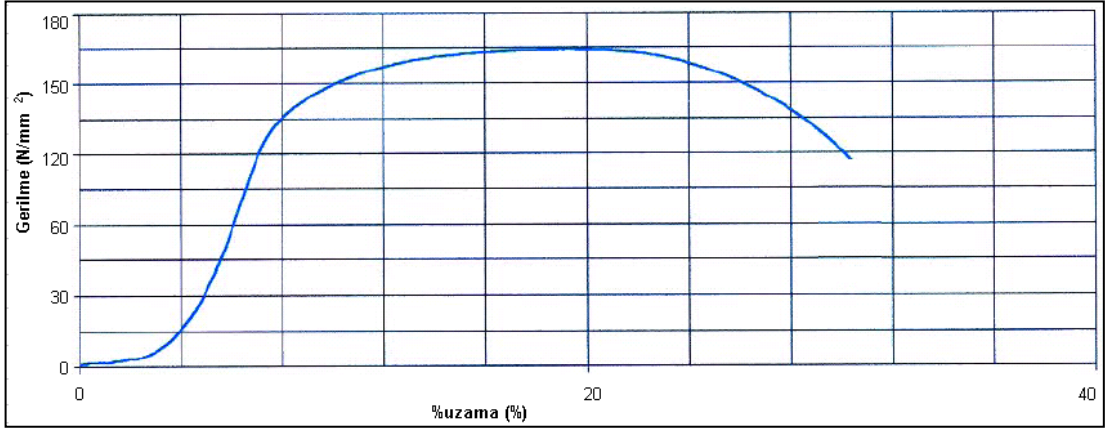
Bu sonuçlardan, endüstriyel uygulamalarda kullanılan sıcak dövme sıcaklığından yapılan su verme işlemlerinin, bu sıcaklıktaki tutma sürelerinin (indüksiyon ısıtma sistemi ile) yeterli miktarda ikinci fazı çözemeyeceği ve su verme ve yaşlandırma ile istenen (90 HB) sertlik değerinin elde edilmesinin mümkün olmadığı anlaşılmaktadır. 90 HB sertlik değerinin kısa tutma sürelerinde elde edilebilmesi için dövme sıcaklığının 510°C'nin de üzerine yükseltilmesi gereklidir.

4.1.2. Çekme Testi Sonuçları

Deforme edilmiş ve edilmemiş malzemelerin yaşlandırma sonrasındaki akma, çekme mukavemetleri ve % uzama değerleri çekme testleri sonucunda belirlenmiş olup sonuçlar Şekil 4.7-4.12'de gösterilmiştir. Çekme test sonuçları TS 953 EN 586-2 Çizelge-5 'e göre değerlendirilmiştir [21]. Bu standart, tüm dövme mamul parçalar için AA 6082 alaşımının T6 ısıtıl işlem sonrası mekanik özelliklerini vermektedir. Her gruptan 2 çekme testi yapılmış ve ortalamaları alınarak akma, çekme mukavemetleri ve % uzama değerleri belirlenmiştir.

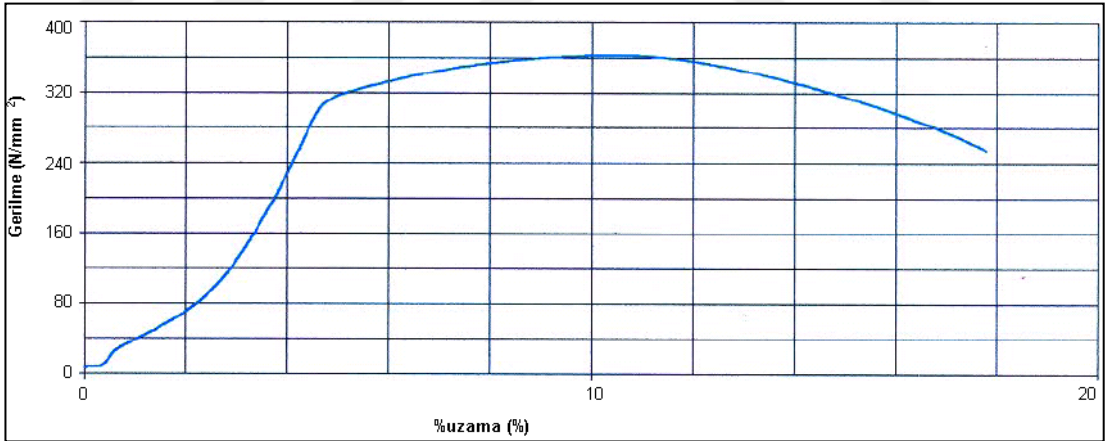
İki adet parçanın çekme test sonucu grafiği örnek olarak Şekil 4.5 ve Şekil 4.6 da görülmektedir. Grafiklerde 480°C de 30 dk tavllanmış ardından su verilmiş ve yaşlandırılmış malzeme ile 540°C de 60 dk tavllanmış ardından su verilmiş ve yaşlandırılmış malzemelerin gerilme-%uzama grafikleri verilmektedir.

Şekil 4.5'te gerilme- % uzama eğrisinin başlangıcında yükün parça tarafından tam olarak taşınmaya başlamasına müteakip, yaklaşık 135 N/mm²'ye kadar lineer uzama bölgesi görülmektedir. Eğride belirgin akma noktası mevcut değildir. Takiben 135 N/mm²'den 165 N/mm²'ye kadar homojen deformasyon bölgesi, bu noktadan itibaren parça boyun vermeye başlayarak yaklaşık 120 N/mm²'ye kadar homojen olmayan deformasyon bölgesi bulunmaktadır. Parça %22,45 uzama göstermiş olup sünek davranmıştır.

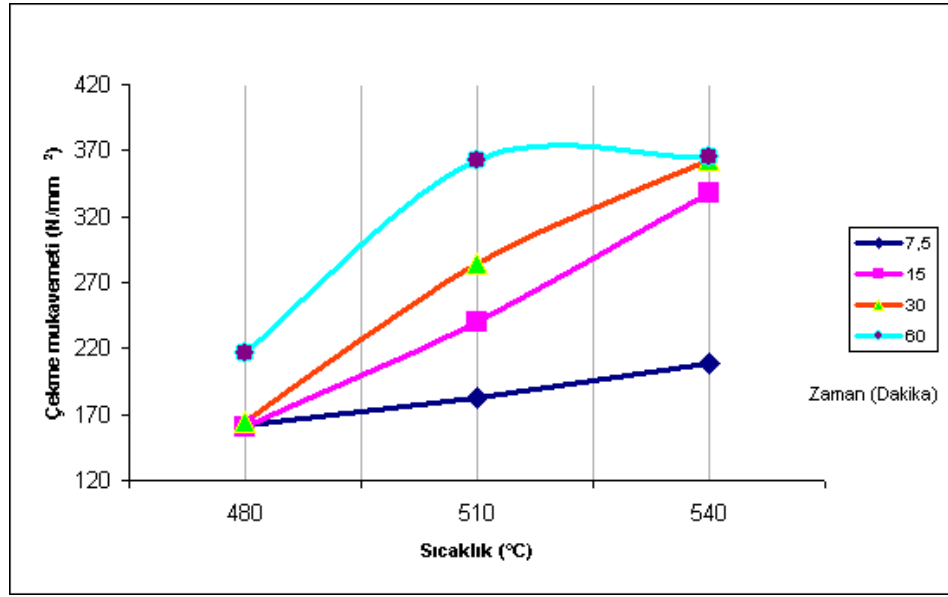


Şekil 4.5: 480°C de 30 dk tavllanmış ardından su verilmiş ve yaşlandırılmış malzeme gerilme-%uzama grafiği.

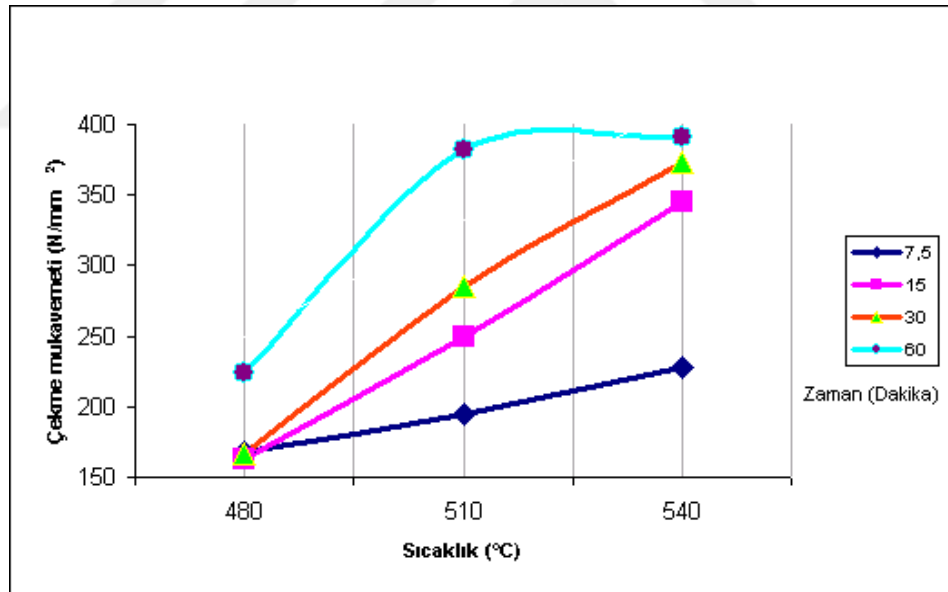
Şekil 4.6'da 540°C'de 60 dakika tavllanmış numuneye ait gerilme-%uzama eğrisi verilmiştir. Bu malzemenin akma mukavemeti yaklaşık 310 N/mm² çekme mukavemeti 365 N/mm² ve uzaması %15,35 dir. Buradan yüksek sıcaklık ve uzun tutma sürelerinde daha üstün mekanik özelliklerin sağlanmasının mümkün olduğu görülmektedir.



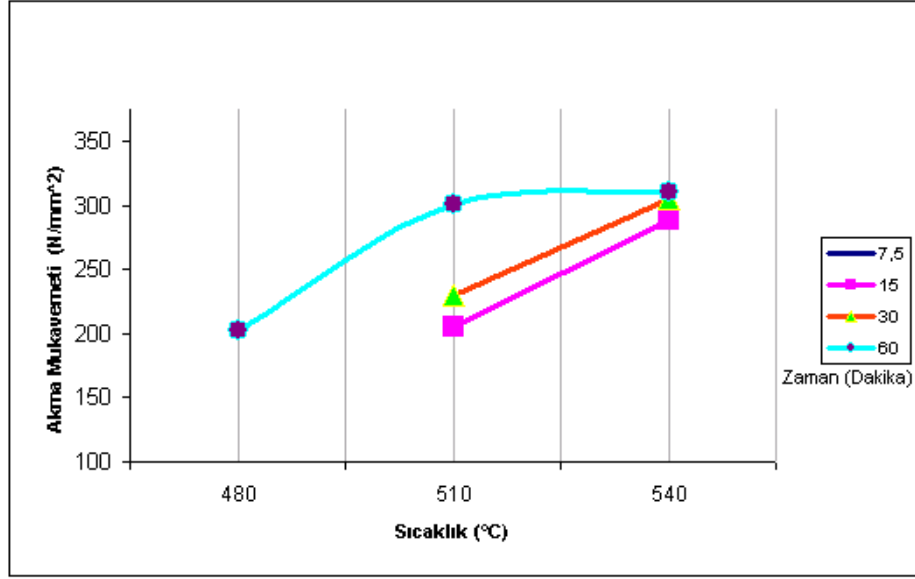
Şekil 4.6: 540°C de 60 dk tavllanmış ardından su verilmiş ve yaşlandırılmış malzemenin gerilme-%uzama test grafiği.



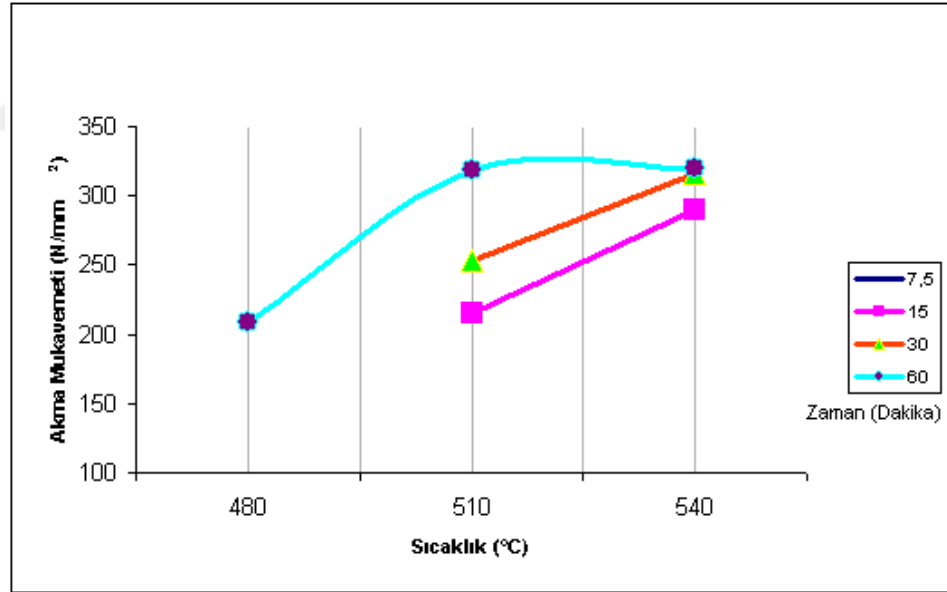
Şekil 4.7: Farklı sıcaklıklarda ve sürelerde çözeltiye alınmış, deforme edilmemiş su verilmiş numunelerin 180°C'de 8 saat yaşlandırması sonrası çözeltiye alma sıcaklığına bağlı çekme mukavemeti değişimleri.



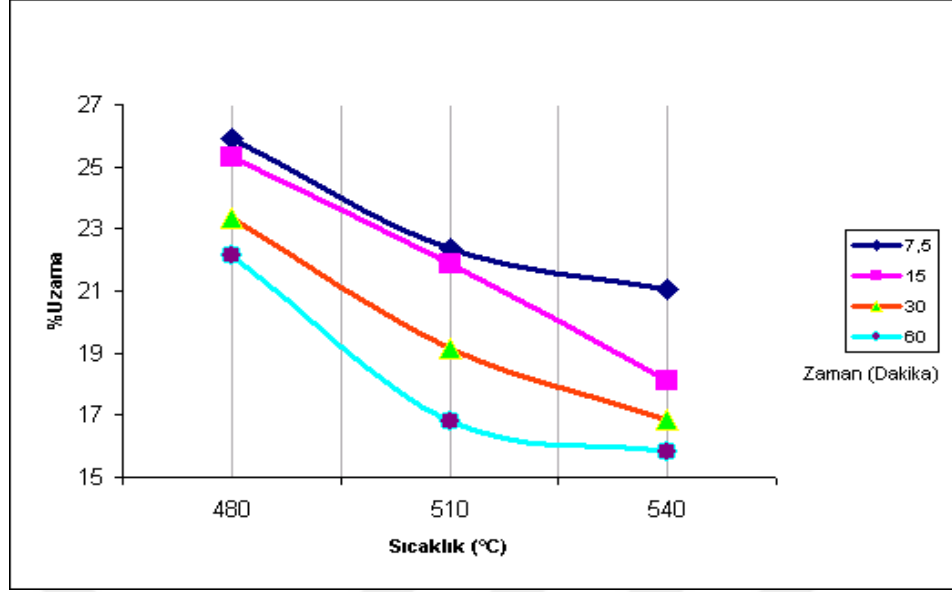
Şekil 4.8: Farklı sıcaklıklarda ve sürelerde çözeltiye alınmış, %10 deforme edilmiş su verilmiş numunelerin 180°C'de 8 saat yaşlandırması sonrası çözeltiye alma sıcaklığına bağlı çekme mukavemeti değişimleri.



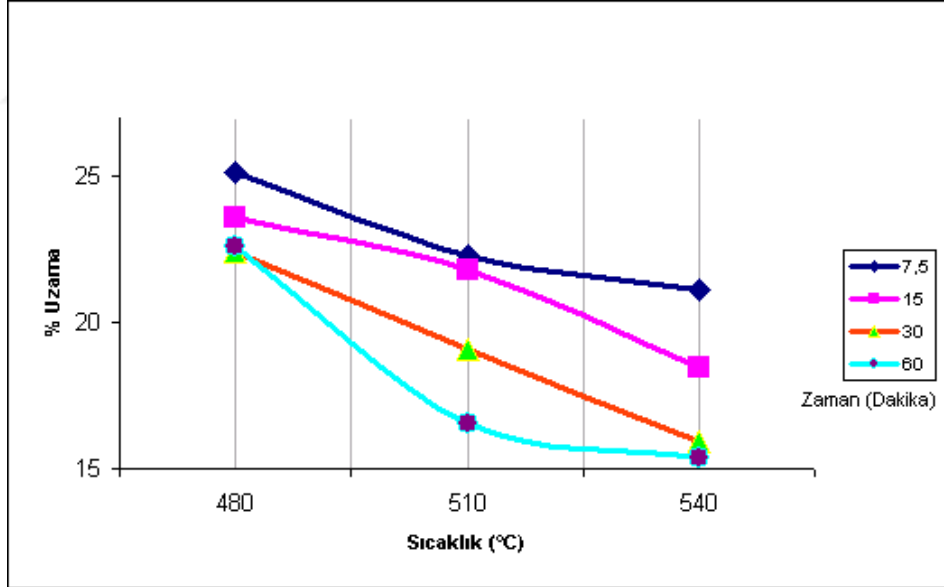
Şekil 4.9: Farklı sıcaklıklarda ve sürelerde çözeltiye alınmış, deforme edilmemiş su verilmiş numunelerin 180°C'de 8 saat yaşlandırması sonrası çözeltiye alma sıcaklığına bağlı akma mukavemeti değişimleri.



Şekil 4.10: Farklı sıcaklıklarda ve sürelerde çözeltiye alınmış, %10 deforme edilmiş su verilmiş numunelerin 180°C'de 8 saat yaşlandırması sonrası çözeltiye alma sıcaklığına bağlı akma mukavemeti değişimleri.



Şekil 4.11: Farklı sıcaklıklarda ve sürelerde çözeltiye alınmış, deforme edilmemiş su verilmiş numunelerin 180°C'de 8 saat yaşlandırması sonrası çözeltiye alma sıcaklığına bağlı % uzama değişimleri.



Şekil 4.12: Farklı sıcaklıklarda ve sürelerde çözeltiye alınmış, %10 deforme edilmiş su verilmiş numunelerin 180°C'de 8 saat yaşlandırması sonrası çözeltiye alma sıcaklığına bağlı % uzama değişimleri.

1. ve 2. grup malzemelerin yaşlandırma sonrası çekme testlerinin sonuçlarında da, çözeltiye alma sıcaklığı ve süresi arttıkça çekme ve akma mukavemetinin arttığı görülmüştür (Şekil 4.7 - 4.10) . %10 deformasyon etkisi sertlikte olduğu gibi, denge değiştirici bir etki göstermemiştir.

480°C çözeltiye alma sıcaklıklarında tutma süresi 60 dakikayı bulan numunelerde bile çekme ve akma mukavemetleri istenilen değerlere ulaşamamıştır. 510°C'de çözeltiye alınan parçalarda, tutma süresi 7,5-15 ve 30 dakika olanlar yaşlandırma sonrası istenilen çekme ve akma mukavemetlerini vermezken, 60 dakika tutulan parçalar 300 N/mm² civarlarında akma mukavemeti ve 360 N/mm² civarlarında çekme mukavemeti vermiştir. Bu durum sertlik sonucuyla da uyumludur.

540°C'de 15-30 ve 60 dakika çözeltiye alınan parçaların yaşlandırma sonrası çekme ve akma mukavemetleri istenen değerleri yakalamıştır. T5 ve T6 numuneleri 310 N/mm² akma mukavemeti ve 380 N/mm² çekme mukavemeti vererek, en yüksek mukavemet değerlerine erişmiştir.

% uzama değerleri de akma ve çekme mukavemetlerine ters orantılı olarak, çekme mukavemeti arttıkça düşme eğilimi, göstermiştir. En yüksek çekme mukavemeti veren T6 numunesinin %uzama değeri 15,35 olarak görülmüştür. Bütün bu sonuçlara bakarak yüksek sıcaklık ve uzun tutma sürelerinde mekanik özelliklerin arttığını söyleyebiliriz.

Şekil 4.7 - 4.12 de verilen mekanik özellik sonuçları sertlik sonuçlarıyla uyumludur. Endüstriyel uygulamalarda pratik olması ve malzeme kaybına neden olmaması açısından sertlik değerleri çekme değerlerinden çok daha fazla göz önünde bulundurulmaktadır. Bu nedenle mekanik özellikler ile ilgili tartışma sertlik değerleri bazında yürütülmektedir.

Akma mukavemeti, çekme mukavemeti, %uzama ve sertlik değerleri toplu halde Tablo 4.1'de gösterilmiştir. Şekil 4.1 – 4.12 de verilen bütün grafiklerin değerleri ilgili tabloda görülmektedir.

Tablo 4.1: Farklı sıcaklıklarda, farklı sürelerde çözeltiye alınıp (ısıtılıp) deforme edilmeden ve deforme edildikten sonra direk su verilip yaşlandırılan ve numunelerin mekanik özellikleri.

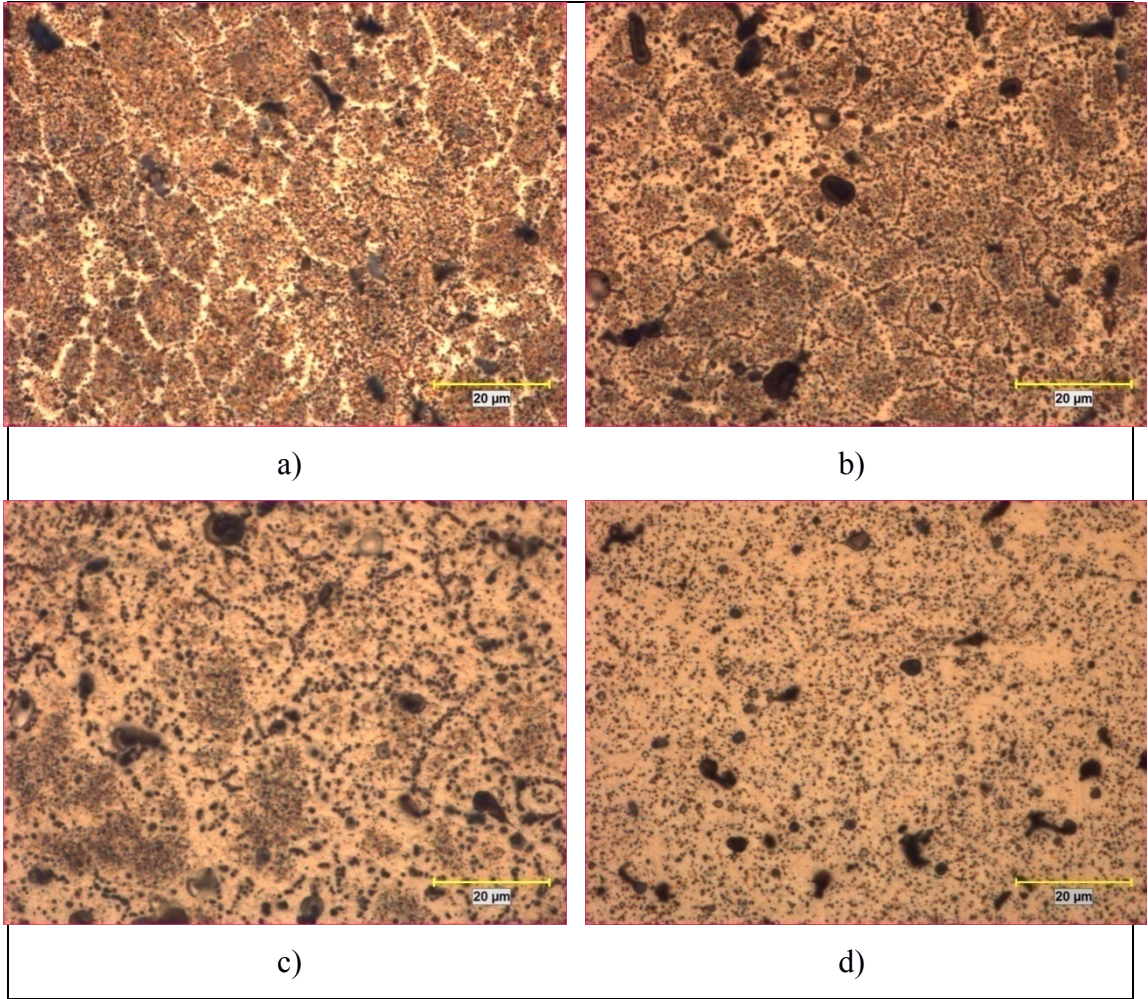
AL 6082			Yaşlandırma Sonrası Çekme Testi Sonuçları			Yaşlandırma öncesi sertlik HB	Yaşlandırma sonrası sertlik HB	
Sıcaklık °C	Zaman (dk)	Deformasyon %	Akma Muk. (N/mm ²) Min 260 N/mm ²	Çekme Muk. (N/mm ²) Min 310 N/mm ²	% Uzama Min. %6			
480	7,5	0	-	152,14	25,93	48	48	
		10	-	157,66	25,15	52	60	
	15	0	-	160,4	25,32	50	50	
		10	-	162,3	23,62	55	62	
	30	0	-	164,63	23,35	52	55	
		10	-	166,62	22,45	58	65	
	60	0	202,32	217,07	22,12	70	65	
		10	208,12	224,58	22,62	75	82	
	510	7,5	0	-	182,03	22,35	56	62
			10	-	195,04	22,32	60	65
		15	0	205,6	240,5	21,9	76	78
			10	215,02	249	21,82	80	82
30		0	230,39	283,78	19,15	84	88	
		10	252,7	285	19,08	86	88	
60		0	300,86	362,56	16,78	88	104	
		10	318,28	381,72	16,52	92	108	
540		7,5	0	-	208,13	21,05	77	82
			10	-	228,16	21,1	81	84
		15	0	288,34	338,51	18,12	84	102
			10	290,33	344,72	18,47	88	106
	30	0	305,83	362,02	16,85	88	108	
		10	315,38	372,63	15,95	90	112	
	60	0	310,16	365,82	15,82	89	115	
		10	320,46	390,68	15,35	92	118	

4.2. Metalografik İnceleme

Bu çalışma alüminyum alaşımlarının dövülmesi ve ısıl işlem sürecini ilgilendirmektedir. Bir seri numune deforme edilmeden diğer bir seri numune ise deforme edildikten (dövmeye muadil kabul edilerek) sonra ısıl işleme tabi tutulup sonuçlar incelenmiştir. Bu iki grup arasında sertlik bazında belirgin bir fark görülmediğinden metalografik incelemeler sadece deforme edilmiş (birinci grup) numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir.

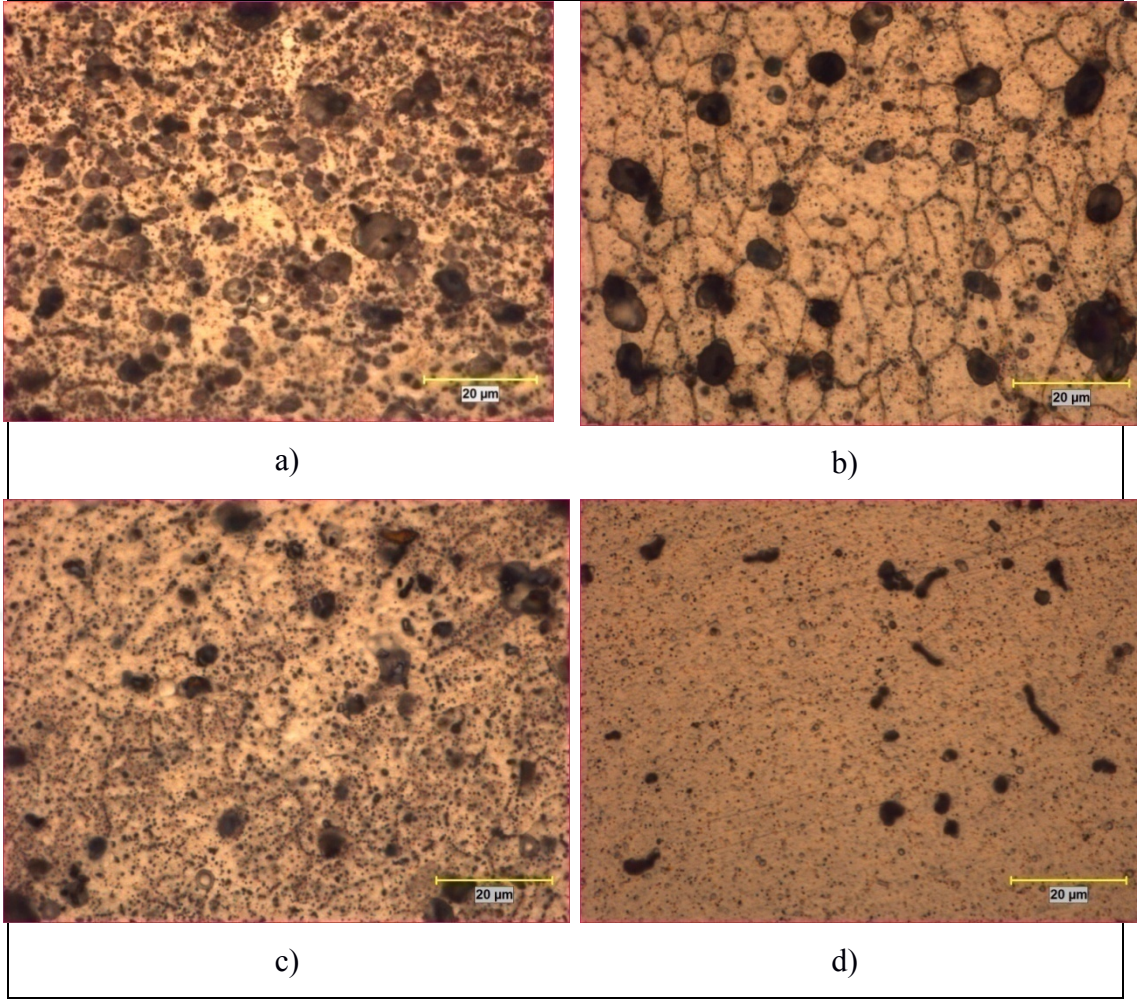
Birinci gruptaki tüm numunelerin yaşlandırma öncesi optik mikroskop görüntüleri Şekil 4.13-4.14 ve 4.15'de verilmiştir. Bu numunelerin yaşlandırma öncesi mikro yapıları kendi aralarında benzerlikler göstermektedir.

Şekil 4.16-4.17 ve 4.18'de ise birinci gruptaki numunelerin 180°C'de 8 saat yaşlandırma sonrasında optik mikrografları verilmiştir.



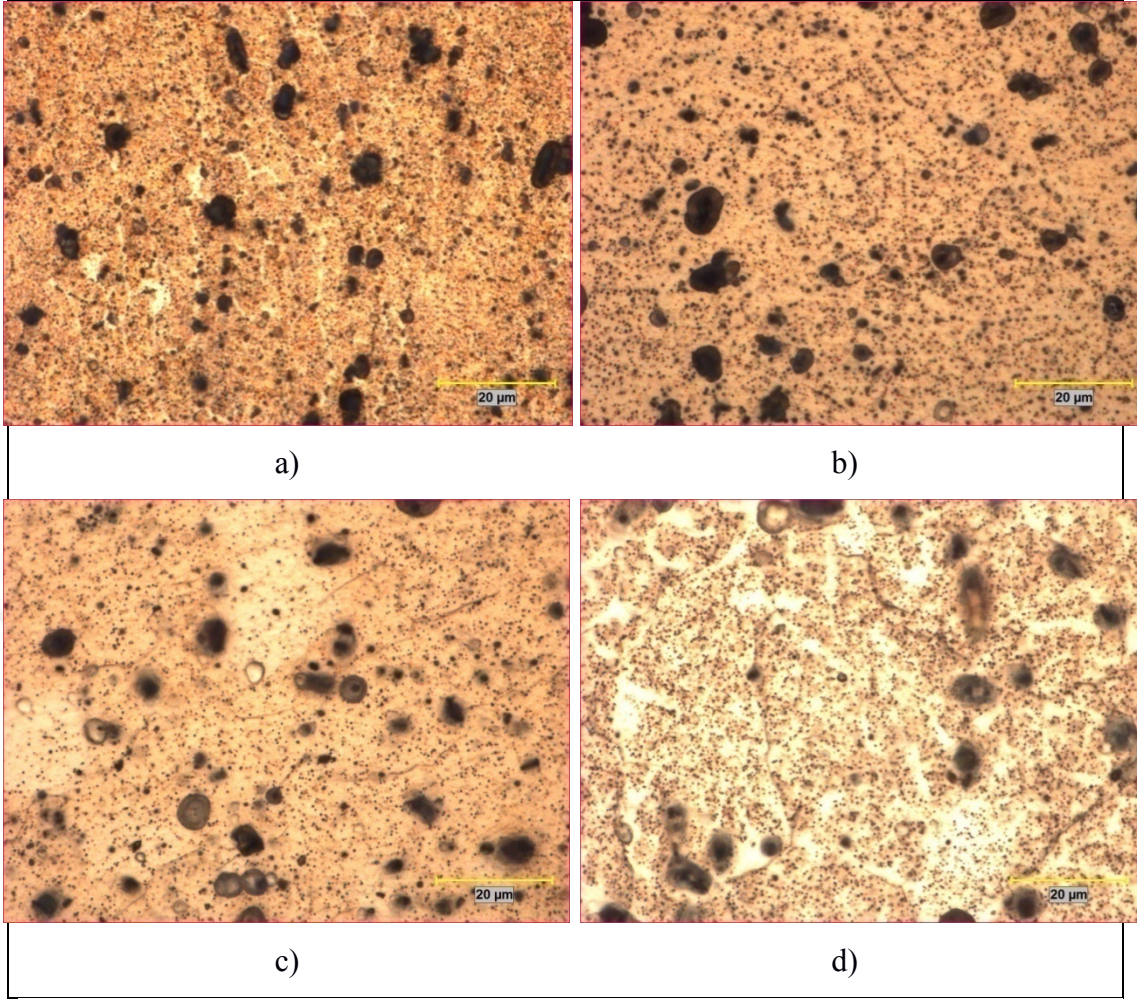
Şekil 4.13: 480 °C'de farklı sürelerde ısıtılmış ve su verilmiş malzemelerin optik mikrografları, a) X₁, b) Y₁, c) Z₁, d) T₁. Dağlama çözeltisi: Doymuş NaOH.

X₁ numunesi görüntüsünde (Şekil 4.13.a) alaşımın tane sınırlarında çok sayıda çökelti partikülü görünmektedir; yapı homojendir. Y₁ numunesi (Şekil 4.13.b) görüntüsü X₁ numunesi görüntüsüne çok benzerdir. Bu da 15 dakikalık tutma sürelerinde yapıda önemli bir değişiklik olmadığını göstermektedir. Z₁ (Şekil 4.13.c) ve T₁ (Şekil 4.13.d) numuneleri görüntülerinde kaba çökeltelerde önemli bir değişiklik olmadığı halde ince çökelti partiküllerinin nispeten azaldığı hissedilmektedir.



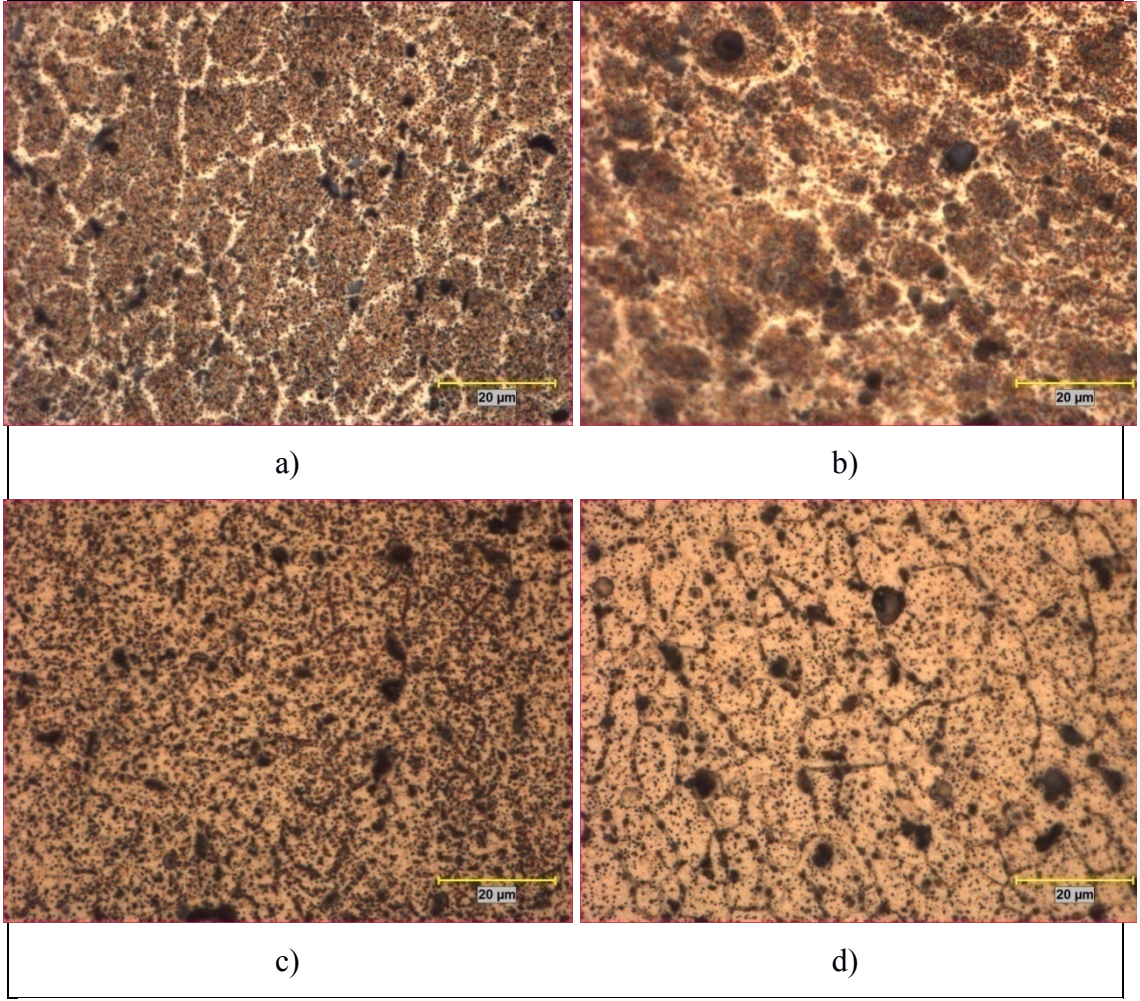
Şekil 4.14: 510°C'de farklı sürelerde ısıtılmış ve su verilmiş malzemelerin optik mikrografları. a) X₃, b) Y₃, c) Z₃, d) T₃. Dağlama çözeltisi: Doymuş NaOH.

Şekil 4.14 deki görüntülerden 510°C'de tutma süresinin artmasıyla kaba partiküllerde belirgin bir azalma olduğu (çözeltiye almanın gerçekleştiği) ve matriste de ince partiküllerin seyrekleştiği görülmektedir.



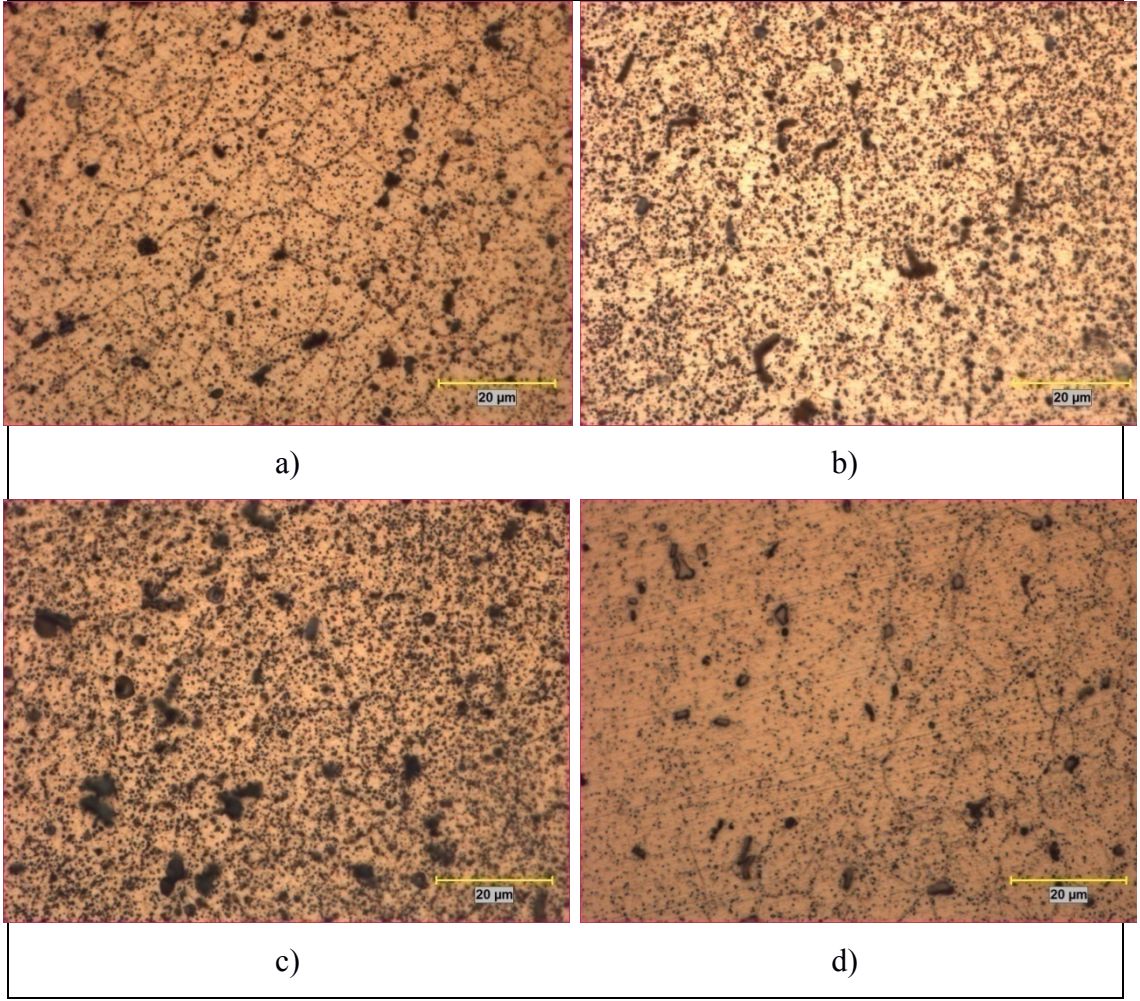
Şekil 4.15: 540°C'de farklı sürelerde ısıtılmış ve su verilmiş malzemelerin optik mikrografları. a) X₅, b) Y₅, c) Z₅, d) T₅. Dağlama çözeltisi: Doymuş NaOH.

Şekil 4.15. de görüldüğü gibi, 540°C'de yapılan ısıtma ve takiben su verme işlemleri sonucunda matristeki çökelti partiküllerinin 480°C'de çözeltilmeye alınmış numunelere (Şekil 4.13) göre belirgin bir şekilde azaldığı görülmektedir. Yani partiküller ayrılarak katı eriyiğe girmektedir.



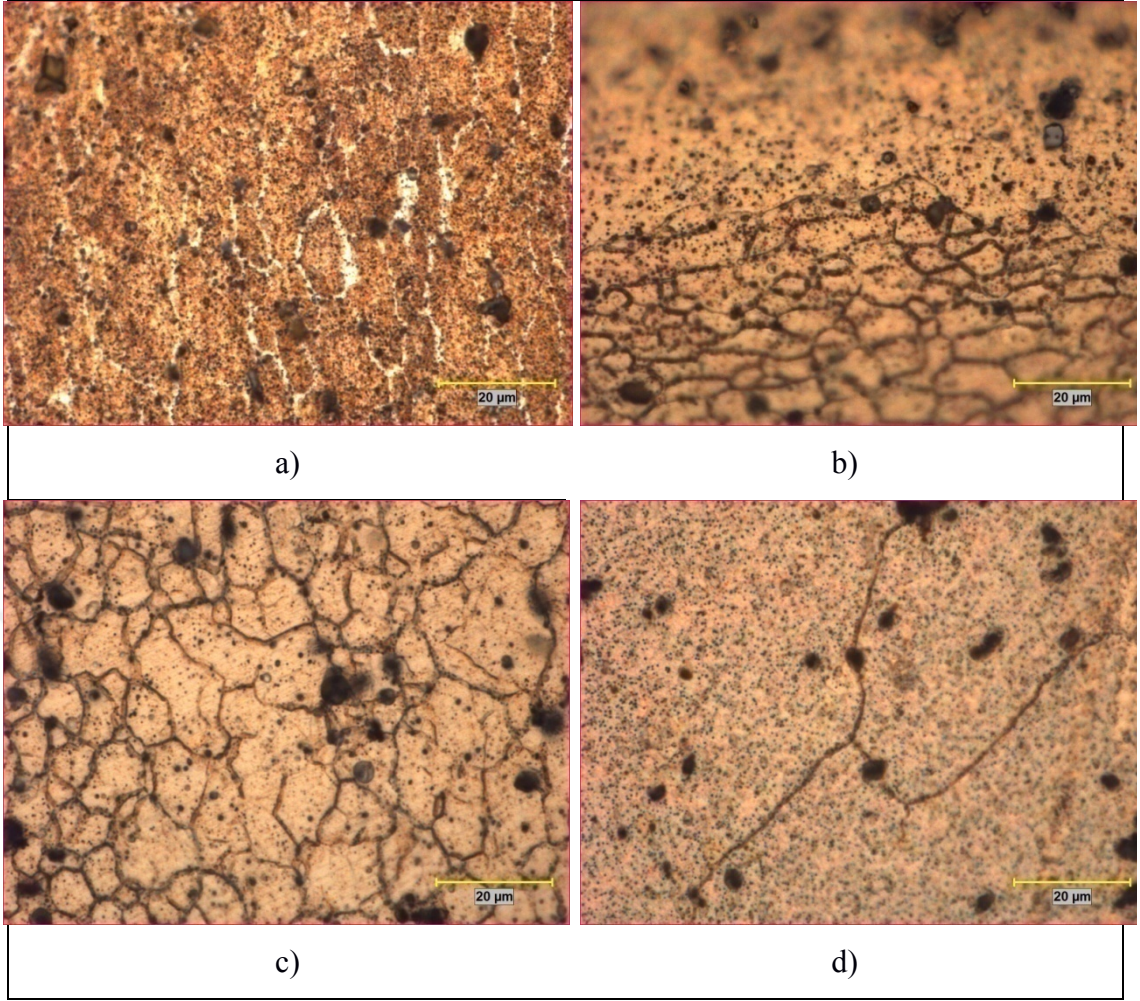
Şekil 4.16: 480°C'de farklı sürelerde tavllanmış - su verilmiş ve 180°C'de 8 saat yaşlandırılmış malzemelerin optik mikrografları. a) X₁, b) Y₁, c) Z₁, d) T₁. Dağlama çözeltisi: Doymuş NaOH.

480°C'de tavlamaı takiben su verilip 180°C'de 8 saat yaşlandırılmış numunelerin mikroyapıları (Şekil 4.16.) yaşlandırılmamış eşdeğerlerinden (Şekil 4.13.) farklı değildir. Bu durum yaşlanma sırasında oluşan çökelti partiküllerinin optik mikroskop kapasitesinin sınırları dışında olmasından dolayı görülememeleriyle ilişkilidir. Partiküllerin çökeliç çökemediği sertlik ölçümleriyle doğrulanmaktadır.



Şekil 4.17: 510°C'de farklı sürelerde ısıtılmış - su verilmiş ve 180°C'de 8 saat yaşlandırılmış malzemelerin optik mikrografları. a)X₃, b)Y₃, c)Z₃, d)T₃. Dağlama çözeltisi: Doymuş NaOH.

510°C'de tavlamaı takiben su verilip 180°C'de 8 saat yaşlandırılmış numunelerin mikroyapıları (Şekil 4.17.) yaşlandırılmamış eşdeğerlerine (Şekil 4.14.) benzemektedir. Yapıda ince çökelti partikülleri ve kaba intermetalik fazlar görülmektedir. Ayrıca tane sınırları da görünür durumdadır.



Şekil 4.18: 540°C'de farklı sürelerde ısıtılmış - su verilmiş ve 180°C'de 8 saat yaşlandırılmış malzemelerin optik mikrografları. a) X₅, b) Y₅, c) Z₅, d) T₅. Dağlama çözeltisi: Doymuş NaOH.

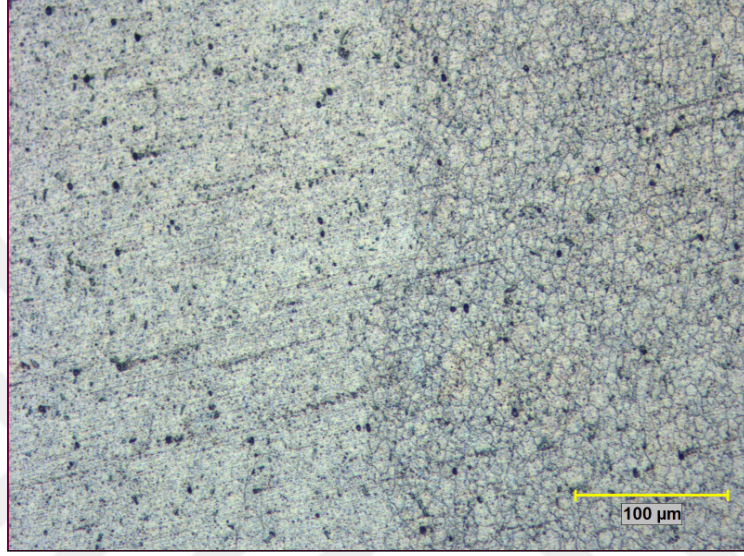
540°C'de tavlamaı takiben su verilip 180°C'de 8 saat yaşlandırılmış numunelerin mikroyapıları (Şekil 4.18.) yaşlandırılmamış olanlara (Şekil 4.15.) benzemektedir. Yapıda ince çökelti partikülleri ve kaba intermetalik fazlar görülmektedir. Ayrıca tane sınırları da görünür durumdadır.

T₁, T₃ ve T₅ numunelerinin yaşlandırma sonrası mikroyapıları kıyaslandığında; çözeltiliye alma sıcaklıkları arttıkça yapılar da çökeltilerin kabadan inceye doğru dağıldığı görülmektedir. Düşük sıcaklıklarda kaba görülen çökelti ler, yüksek sıcaklıkta çözülerek daha ince olarak matrise yayılmıştır.

Yaşlandırılmış numunelerin incelenmesinde ilgi çekici bir durumla karşılaşmıştır. Parçanın yüzeyinde kaba taneli bir yapı varken iç kısımları ince tanelidir ve kaba taneden ince taneye geçiş ani bir şekilde olmaktadır (Şekil 4.19).

Tavlama sıcaklığı ve süresine bağlı olarak kaba taneli yapı yüzeyden çekirdeğe doğru ilerlemektedir.

Endüstriyel uygulamalarda müşteri ürünü yaşlandırma sonrası kullandığı ve test ettiği için ince taneli yapıyı görmemekte ve ölçtüğü sertlik değeri kaba tane yapısına ait olmaktadır. Gerçekte ince ve kaba taneli bölgelerin sertlik değerleri sadece birkaç birim farklıdır.

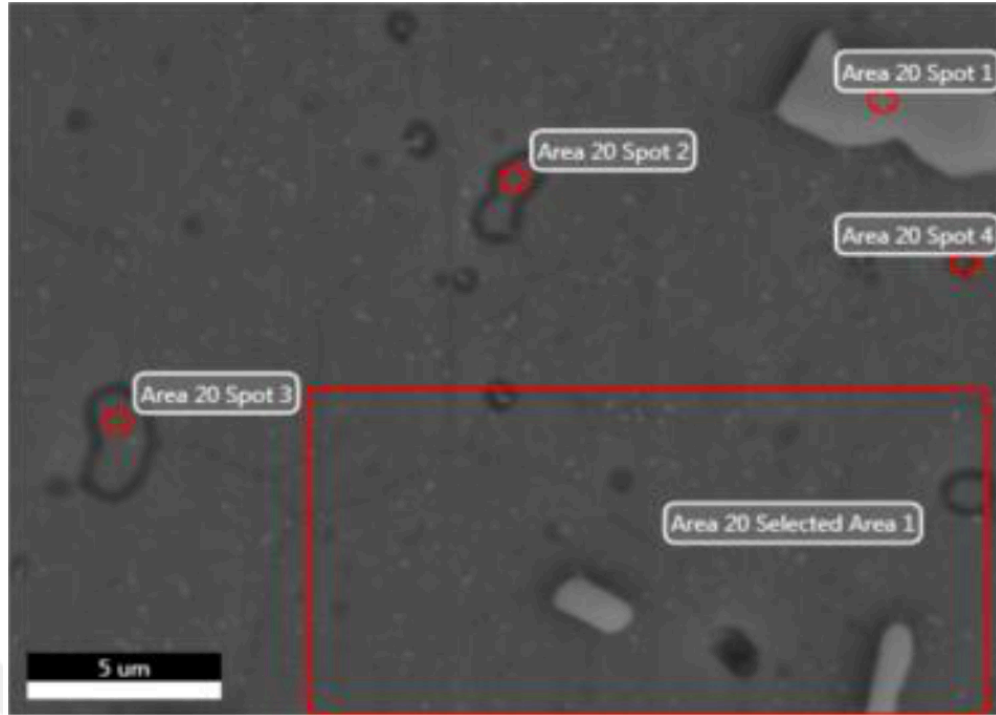


Şekil 4.19: 510°C'de 60 dk çözültüye alınıp deformasyonu takiben su verilip 180°C'de 8 saat yaşlandırılmış numunenin (T₃) optik mikrografi. Kaba ve ince tane geçiş bölgesi. Kaba tane yüzeyi, ince tane iç kısmı göstermektedir.

4.3 SEM incelemeleri

Metalografik olarak hazırlanan numuneler SEM altında incelenmiştir. İnceleme neticesinde Mg-Si esaslı çökelti partikülleri tespit edilmiştir; bu partiküller yaşlandırılmış AA6082 alaşımında sertlik artışının nedeni olarak düşünülmektedir. SEM incelemesi sonuçları Şekil 4.20 - 4.27 de sunulmuştur.

SEM incelemesi için 480°C'de 7.5 dakika tavllanmış (X₁) ve 480-510-540°C derecede 60 dakika tavllanmış (T₁,T₃,T₅) ardından su verilmiş akabinde de 180°C sıcaklıkta 8 saat yaşlandırılmış numuneler seçilmiştir.

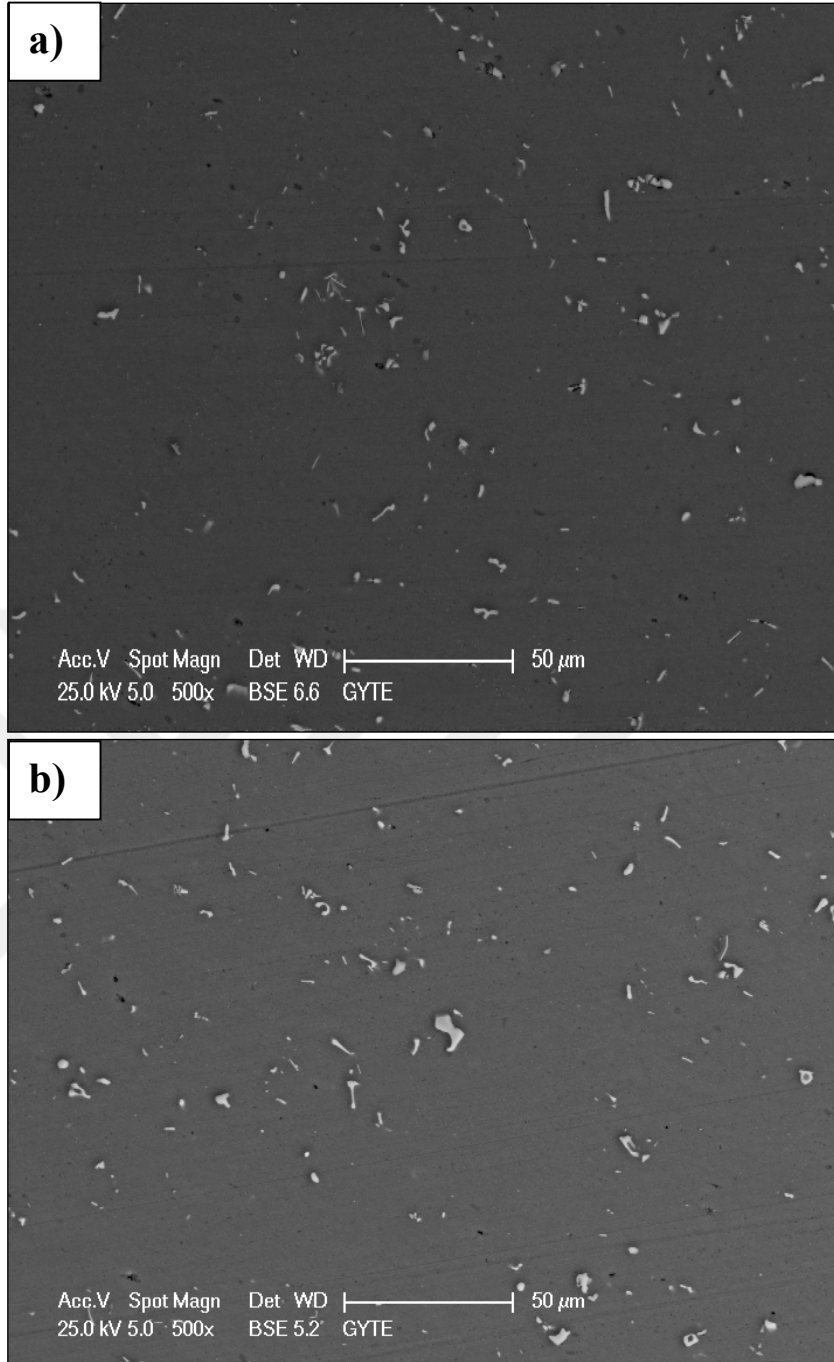


Şekil 4.20: Haddelenmiş haldeki AA6082 alaşımının SEM görüntüsü.

Tablo 4.2: Dövülmemiş haldeki malzemenin (Şekil 4.20) EDS analizi.

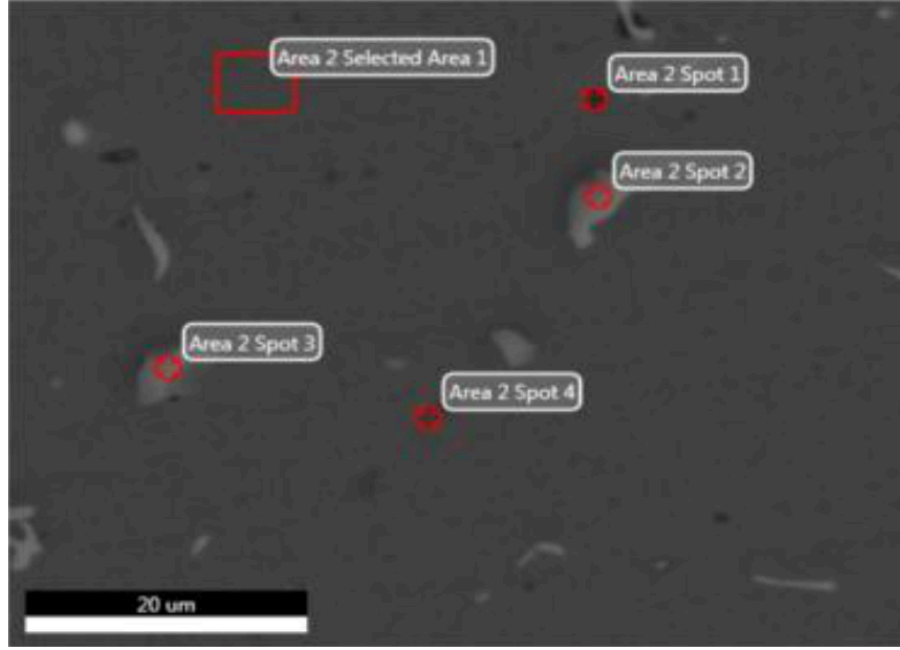
Analiz Noktası	O (ağ.%)	Mg (ağ.%)	Al (ağ.%)	Si (ağ.%)	Mn (ağ.%)
1	1,52	0,52	71,68	11,93	14,35
2	3,4	9,47	79,8	7,32	-
3	6,6	21,05	56,25	16,1	-
4	1,23	1,99	95,46	1,33	-
5 (Alan)	-	1,56	96,92	1,52	-

Burada 1 numaralı analiz noktasından alınan sonuçlar incelendiğinde Al-Mn ve Si elementlerince zengin bir nokta, yani çökelti parçacığı olduğu anlaşılmaktadır. 2 ve 3 numaralı analiz noktasından alınan sonuçlara bakıldığında ise Mg-Si elementlerince zengin bir nokta olduğu görülmektedir. 4 numaralı analiz noktası ve 5 numaralı analiz bölgesi ise malzemenin genel analizini yansıtmaktadır.



Şekil 4.21: 480°C'de farklı sürelerde tavllanmış, ardından su verilmiş ve 180°C'de 8 saat yaşlandırılmış malzemelerin SEM görüntüleri. a) X₁, b) T₁

Burada, X₁ numunesinin partiküllerinin T₁ numunesinin partiküllerine göre daha kaba olduğunu görebilmekteyiz. Her iki numune partikülleri de homojen olarak yapıya dağılmış halde görülmektedir.

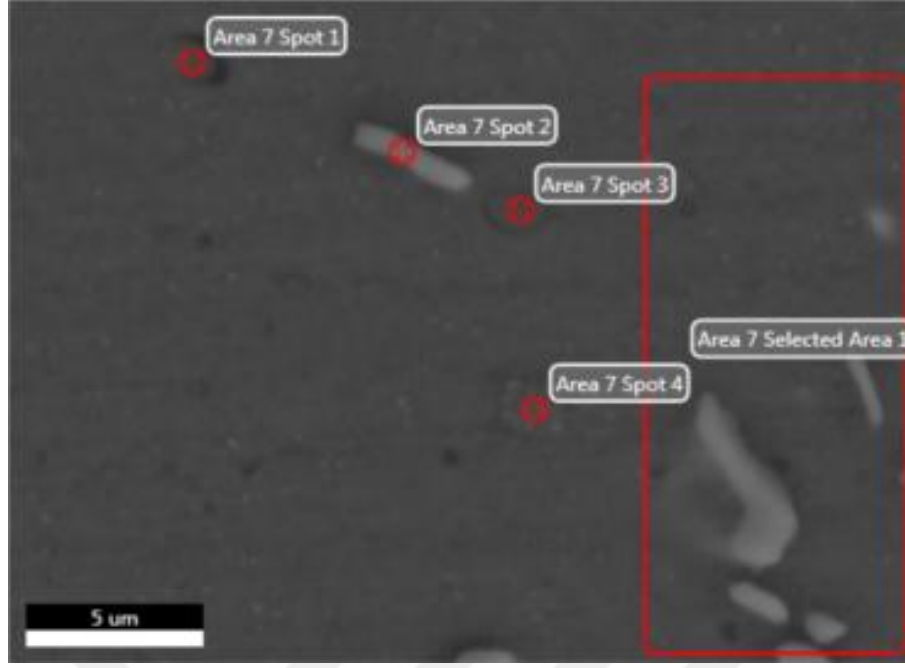


Şekil 4.22: 480°C'de 7,5 dakika ısıtılmış, su verilmiş numunenin (X₁) SEM görüntüsü.

Tablo 4.3: 480°C'de 7,5 dakika ısıtılmış, su verilmiş numunenin (Şekil 4.22) (X₁) EDS analizi.

Analiz Noktası	O (ağ.%)	Mg (ağ.%)	Al (ağ.%)	Si (ağ.%)	Mn (ağ.%)
1	-	1,35	93,21	5,44	-
2	0,93	1,14	83,19	8,13	6,62
3	2,1	0,97	78,14	8,42	10,37
4	6,83	12,89	67,21	13,07	-
5 (Alan)	-	1,37	97,21	1,42	-

Burada 1 numaralı analiz noktasından ve 5 numaralı analiz bölgesinden alınan sonuçlar alüminyumca çok zengin olup matrise aittir. 2 ve 3 numaralı analiz noktasından alınan sonuçlara bakıldığında ise Mn-Si elementlerince zengin olduğu görülmektedir. 4 numaralı analiz noktası ise Mgve Si elementlerince zengin noktadır.

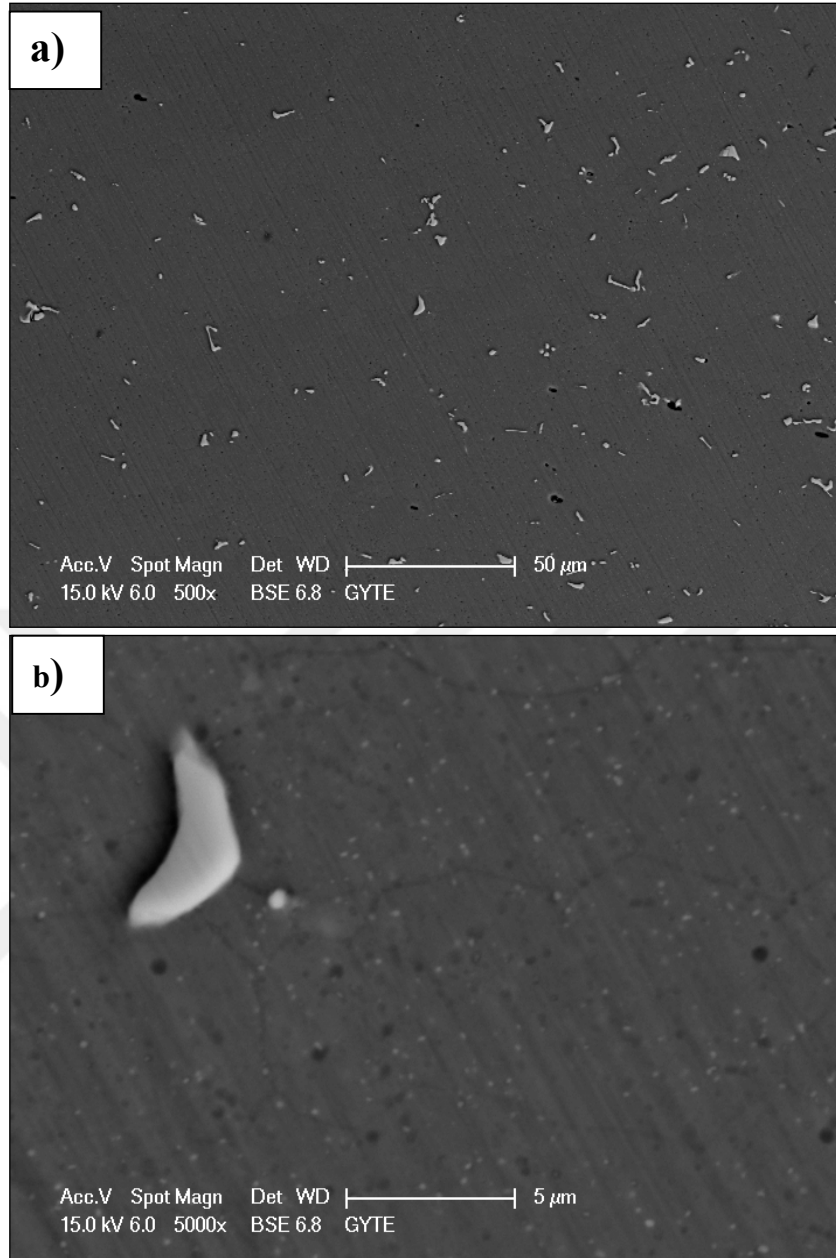


Şekil 4.23: 480°C'de 60 dakika ısıtılmış, su verilmiş ve 180°C'de 8 saat yaşlandırılmış numunenin (T₁) SEM görüntüsü.

Tablo 4.4: 480°C'de 60 dakika ısıtılmış, su verilmiş ve 180°C'de 8 saat yaşlandırılmış numunenin (Şekil 4.23) (T₁) EDS analizi.

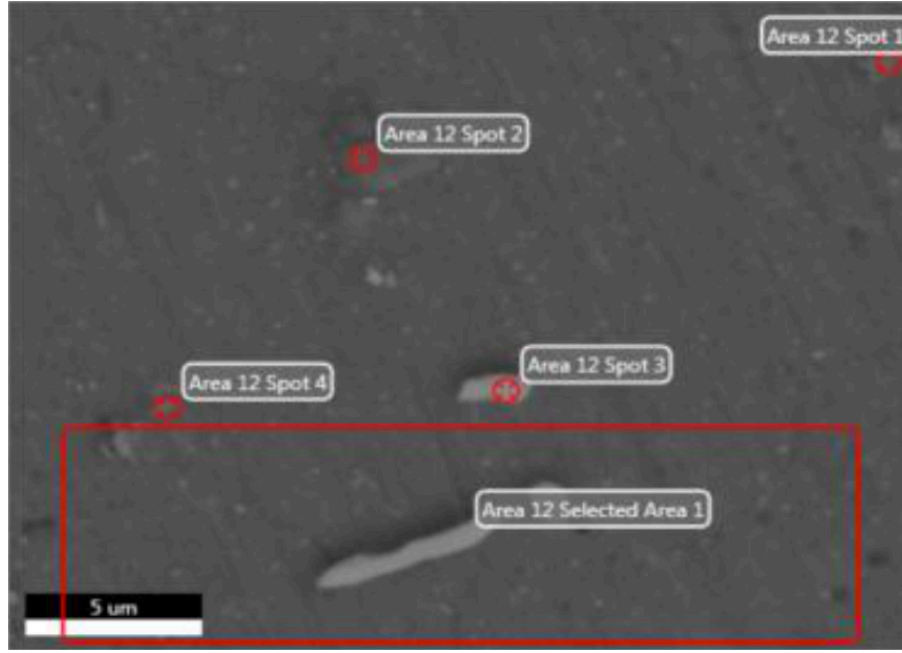
Analiz Noktası	O (ag.%)	Mg (ag.%)	Al (ag.%)	Si (ag.%)	Mn (ag.%)
1	3,35	22,51	57,83	16,3	-
2	2,42	1	79,72	8,09	8,77
3	2,17	28,26	51,5	18,07	-
4	2,62	28,02	49,96	19,4	-
5 (Alan)	-	1,24	96,66	2,01	-

1, 3 ve 4 numaralı analiz noktalarının Al-Mg-Si 'ca ve 2 numaralı analiz noktasında ise Al-Si-Mn 'ca zengin olduğu görülmektedir. 5 numaralı analizin genel malzeme (matris) analizi olduğu görülmektedir.



Şekil 4.24: 510°C'de 60 dk süreyle tavllanmış ve su verilmiş ve 180°C'de 8 saat yaşlandırılmış malzemelerin (T_3) farklı büyütmelemlerde alınan SEM görüntüleri. a) 500X, b) 5000X.

Düşük büyütmede sadece matris ve kaba partiküller görünürken, yüksek büyütmede tane sınırları ve muhtemelen yaşlanma esnasında çökelen ince partiküller de görünür olmaktadır.

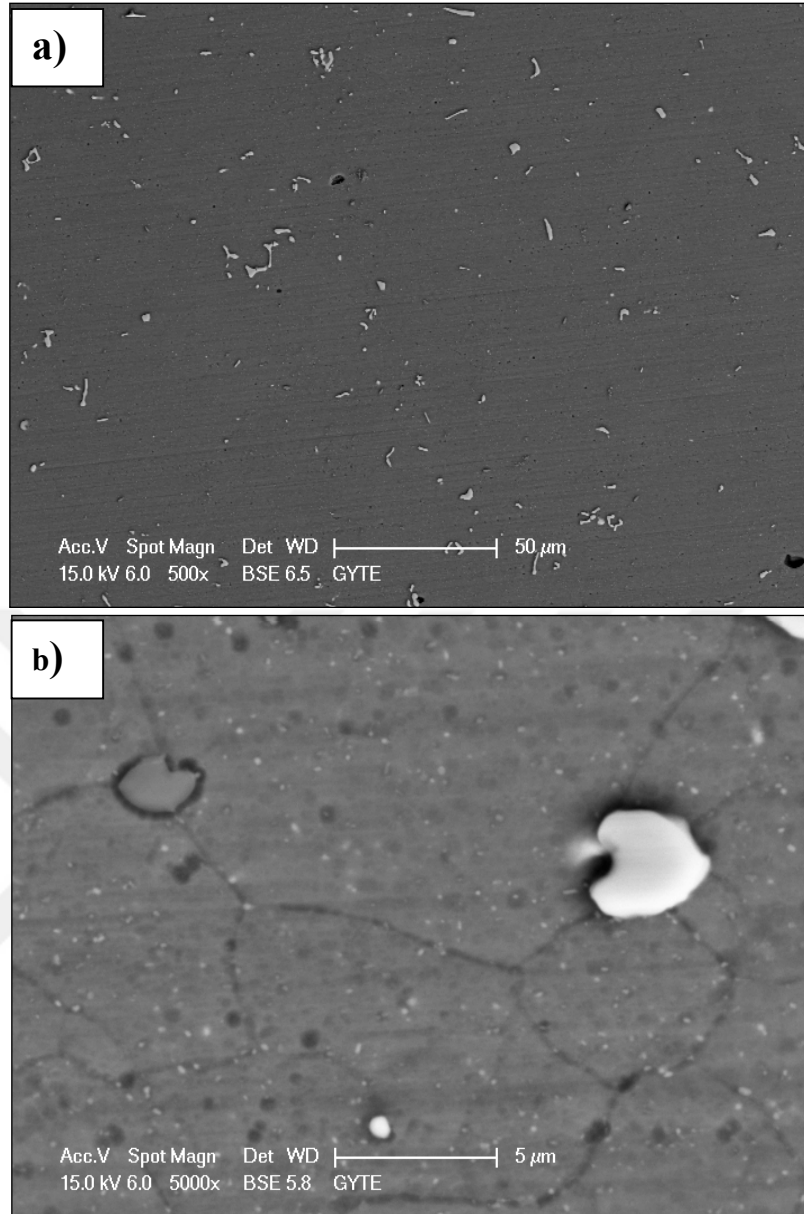


Şekil 4.25: 510°C'de 60 dakika tavllanmış, su verilmiş ve 180°C'de 8 saat yaşlandırılmış numunenin (T₃) (Şekil 4.25 SEM görüntüsü.

Tablo 4.5: 510°C'de 60 dakika tavllanmış, su verilmiş ve 180°C'de 8 saat yaşlandırılmış numunenin (T₃) EDS analizi.

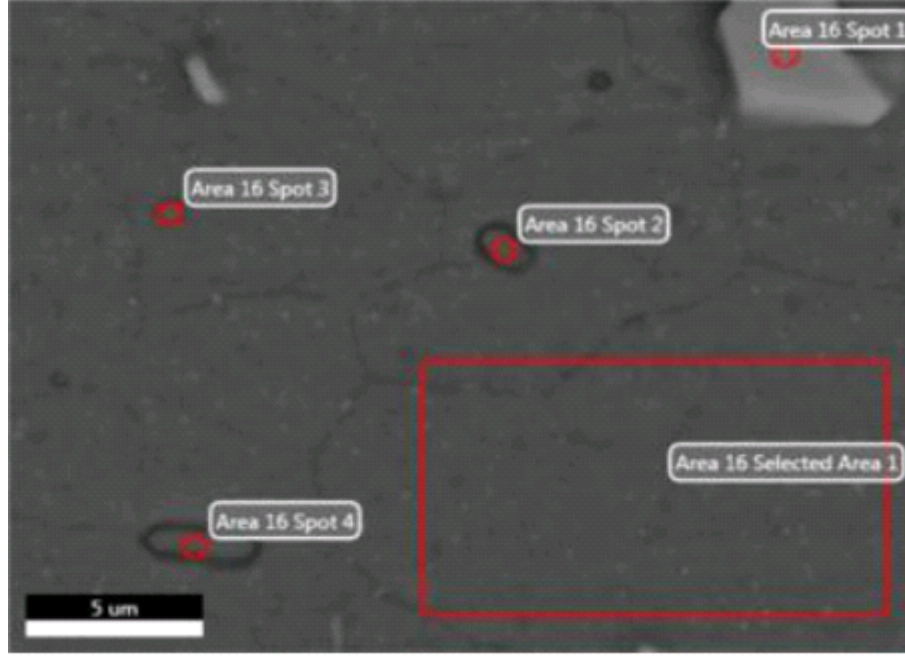
Analiz noktası	O (ag.%)	Mg (ag.%)	Al (ag.%)	Si (ag.%)	Mn (ag.%)
1	14,59	2,12	75,84	7,44	-
2	9,93	1,67	84,2	4,2	-
3	2,96	1,35	78,54	8,08	9,07
4	-	1,68	97,1	1,22	-
5(Alan)	-	1,56	96,93	1,51	-

Burada, 1 ve 2 numaralı analizler noktaları Al-Si esaslı oksitleri, 3 numaralı analiz noktası ise Al-Si-Mn elementlerinden oluşan çökeltisini göstermektedir. 4 ve 5 numaralı analizler ise malzemenin genel yapısını göstermektedir.



Şekil 4.26: 540°C'de 60 dk süreyle tavllanmış ve su verilmiş ve 180°C'de 8 saat yaşlandırılmış malzemelerin (T_5) farklı büyütmelerde alınan SEM görüntüleri. a) 500X, b) 5000X

Burada da düşük büyütmelerde sadece matris ve kaba partiküller dağılmış bir şekilde görünmektedir. Yüksek büyütmelerde ise tane sınırları ve muhtemelen yaşlanma esnasında çökelen ince partiküller de görünür olmaktadır.



Şekil 4.27: 540°C'de 60 dakika tavllanmış, su verilmiş ve 180°C'de 8 saat yaşlandırılmış numunenin (T₅) SEM görüntüsü.

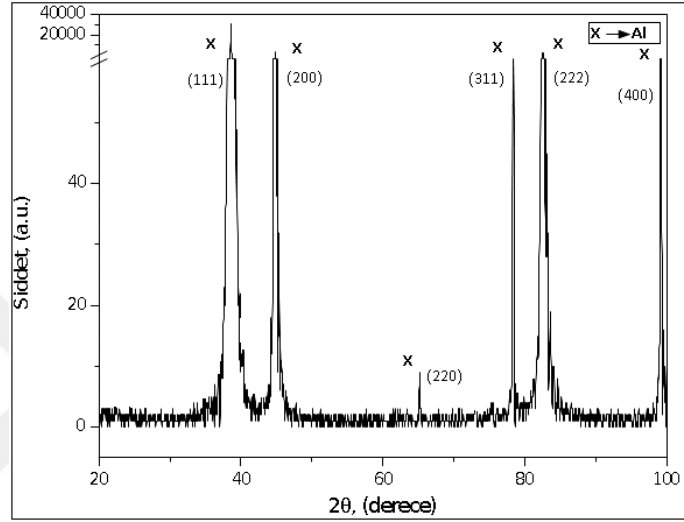
Tablo 4.6: 540°C'de 60 dakika tavllanmış, su verilmiş ve 180°C'de 8 saat yaşlandırılmış numunenin (T₅) (Şekil 4.27) EDS analizi.

Analiz Noktası	O (ag.%)	Mg (ag.%)	Al (ag.%)	Si (ag.%)	Mn (ag.%)
1	-	0,44	73,6	11,79	14,17
2	8,18	18,97	56,99	15,86	-
3	10,95	1,38	81,16	6,5	-
4	7,53	24,92	49,36	18,19	-
5 (Alan)	-	1,45	97,4	1,15	-

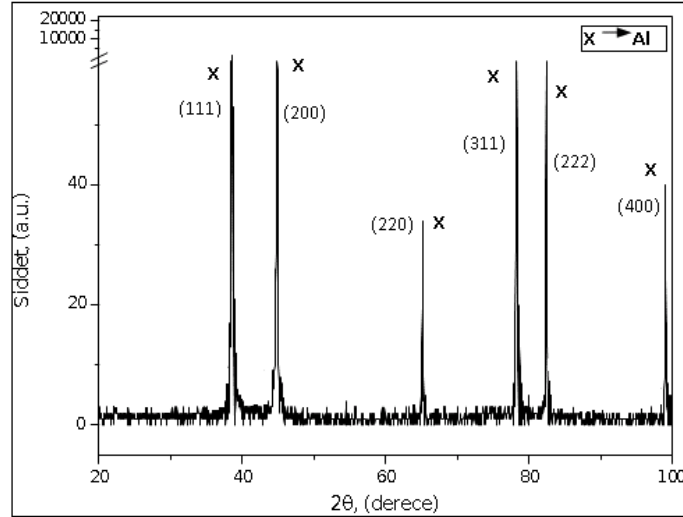
1 numaralı analiz Al-Si-Mn çökeltisini, 2 ve 4 numaralı analizler Mg-Si esaslı çökelti partiküllerini ve 5 numaralı analiz malzemenin genel yapısını göstermektedir. 2 ve 4 numaralı analizlerde muhtemelen Al-O kalıntıları da mevcuttur.

4.4 XRD incelemeleri

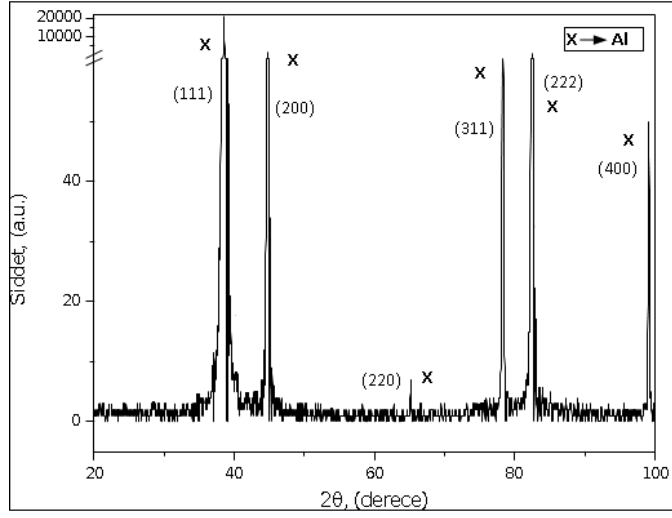
Metalografik olarak hazırlanan numuneler XRD incelemelerinde ham malzemenin ve diğer işlem görmüş tüm malzemelerin sadece Al fazının kırınım pikleri bulunmaktadır. Mikroyapılarda SEM ve optik mikroskopla görülen çökelti fazlarına ait herhangi bir kırınım piki gözlenmemiştir (Şekil 4.28 – 4.31).



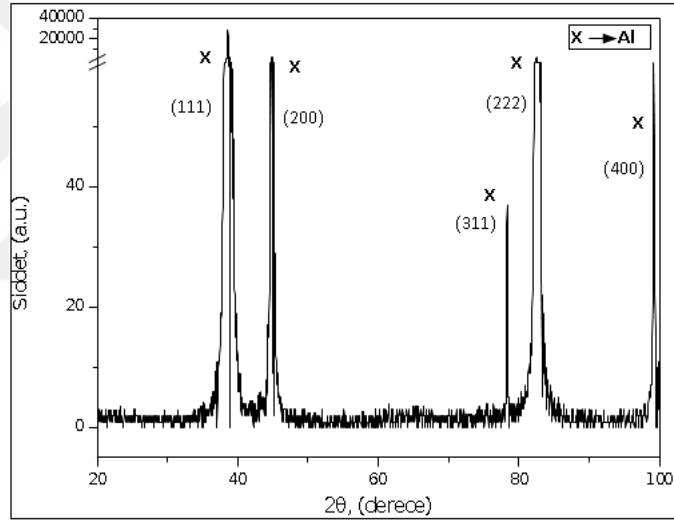
Şekil 4.28: Ham malzeme XRD grafiği.



Şekil 4.29: 480°C'de 7.5 dakika tavllanmış, su verilmiş ve 180°C'de 8 saat yaşlandırılmış numunenin (X_1) XRD grafiği.



Şekil 4.30: 510°C'de 60 dakika tavllanmış, su verilmiş ve 180°C'de 8 saat yaşlandırılmış numunenin (T_3) XRD grafiği.



Şekil 4.31: 540°C'de 60 dakika tavllanmış, su verilmiş ve 180°C'de 8 saat yaşlandırılmış numunenin (T_5) XRD grafiği.

5.TARTIŞMA

Metallerin ısıtılma işlemi, uygun yapı ve özellikleri elde edilebilmek açısından büyük önem taşımaktadır. Kaliteli ısıtılma işlem uygulamaları; uygun fırın atmosferi, hassas sıcaklık kontrolü, homojen sıcaklık dağılımı ve optimum zaman aralığında gerçekleştirilebilir. Çünkü bu parametrelerdeki çok küçük sapmalar malzemelerin nihai özelliklerini olumsuz yönde etkileyebilmektedir.

AA6082 alaşımında solvüs eğrisinin 400°C civarında olduğu ve alaşımın yapısındaki fazların çözünmesi için bu sıcaklığın üzerine çıkılması gerektiği bilinmektedir. Dövme işlem koşulları göz önüne alınarak yapılan bu çalışmada, en düşük tavlama (dövme ve çözüme alma) sıcaklığı olarak 480°C seçilmiştir. Yine indüksiyon ile ısıtılma koşullarına benzetmek üzere 7,5 dakikalık çözüme alma süresi referans alınmıştır. Daha yüksek sıcaklık ve süreler bu alaşımın bilinen ısıtılma işlem koşullarına ne kadar yaklaştığını belirlemek amacıyla yönelik olarak seçilmiştir.

Solvüs eğrisinin üzerine çıktıkça alaşımdaki Mg ve Si alüminyum katı eriyik fazı içerisinde çözünmeye başlamaktadır. Bu işlem kinetik bir reaksiyondur ve tam çözünme için zamana ihtiyaç vardır. Katı çözüme element konsantrasyonu arttıkça mukavemet (sertlik) değerinde de artış görülmektedir. Çözünen atomlar (Mg ve Si' ler) ev sahibi atomların (bu durumda alüminyum) kristal kafesini zorlarlar. Bununla beraber, yapıdaki dislokasyon hareketleri çözünen atomlar nedeniyle oluşan kristal kafes deformasyonu tarafından engellenir. Bunun sonucunda, katı eriyik içerisinde alaşım element konsantrasyonu arttıkça sertlik artar.

480°C'de 7,5 dakika tavlama dahil 15 dakika, 30 dakika ve hatta 60 dakikalık tavlama süreleri, yaşlandırma sonrası bu alaşım için verilen standart durum olan 90 HB sertlik değerini sağlamak için yeterli olmamıştır. Su verilmiş halde ve su verilip yaşlandırılmış haldeki alaşımların mikroyapılarında fark edilebilir bir değişim gözlenmemiştir. Bu durumda, alaşımda meydana gelen değişimler sertlik ölçümü ile gözlenmeye çalışılmıştır.

Daha yüksek bir tavlama sıcaklığı olarak 510°C seçilmiş ve aynı sürelerle bu sıcaklıkta tavlanan malzemeler takiben 180°C'de 8 saat süreyle yaşlandırılmıştır. Bu durumda, minimum 90 HB sertlik değeri ancak 60 dakika süreyle çözüme alınmış hallerde elde edilmiştir. Tavlama için seçilen diğer sıcaklık ise 540°C'dir ve bu sıcaklık AA6082 alaşımının olağan çözüme alma sıcaklığıdır. Bu sıcaklıkta

tavlanan ardından yaklaşık %10 deforme edilen malzemelerin yaşlandırma sonrası ölçülen sertlik değerleri minimum 90 HB sertlik koşulunu 15 dk, 30 dk ve 60 dakika sürelerde tavlanan numunelerde sağlandığını göstermiştir.

Plonka [18] T5 işlemini kullanarak AA6082 alaşımını 530°C'de dövmüş, ardından su verip 180°C'de yaşlandırmıştır. Bu çalışması sonucunda yeniden kristalleşme olmadığını rapor etmiştir. Plonka'nın bu çalışması, bu tez çalışmasının sadece bir parçası ile örtüşmektedir. Üstelik Plonka ve arkadaşlarının çalıştığı sıcaklıklar AA6082 alaşımının normal dövme sıcaklıklarının üzerindedir. Bu tez çalışması daha geniş bir sıcaklık aralığı ve tutma süresini kullanması açısından da üstünlük taşımaktadır.

Bu sonuçlar, AA6082 alüminyum alaşımının dövülmesi ve ardından soğutmadan direkt su verilmesi ve yaşlandırılması ile bu alaşımlar için tanımlanmış standart nihai ürün sertlik değeri olan min. 90 HB' nin yakalanamayacağını ortaya koymuştur. Anlaşıldığı gibi, ne dövme sıcaklığı olan 480°C'deki tavlama süreleri ne de dövme sıcaklığından daha yüksek bir sıcaklık olan 510°C'deki tavlama süreleri (60 dakika hariç) alaşımın bünyesindeki fazları yeterince dekompoze etmek, dolayısıyla çözeltilmeye almak için yeterli değildir. Bu alaşımın olağan çözeltilmeye alma sıcaklığında (540°C) ise tavlama süresi önem kazanmaktadır ve alaşımın en az 15 dakika süreyle tavllanması yeterli fazın çözeltilmeye alınması için gerekmektedir.

Tavlama sonrasında doğrudan su verilen numuneler ile %10 deforme edildikten sonra su verilen numunelerin yapı ve sertliklerinde önemli bir fark gözlenmemiştir. Bu durum, muhtemelen %10 deformasyon oranının sertlik değerinde bir fark oluşturmak için yeterli olmaması ile ilgili olabilir.

Sonuç olarak, olağan ısı işlem sıcaklığı dövme sıcaklığından daha düşük olduğundan çelik için rahatlıkla uygulanan dövme işlemini takiben direkt su verme işlemi, alüminyumun dövme sıcaklığı ısı işlem sıcaklığından düşük olduğu için endüstriyel üretim şartlarında uygulanabilir sonuçlar vermemiştir.

Bu çalışmada, deforme edilmiş malzemelerde özellikle 510°C ve 540°C'de gözlemlenen bir durum tane büyümesidir. Bu durumda, yaşlandırma esnasında yüzeyden başlayarak çekirdeğe doğru tane büyümesi olmaktadır. Ezme işlemi esnasında, deformasyon özellikle yüzeyde olmaktadır. Yaşlandırma esnasında yüzeyden başlayarak bir tür yeniden kristalleşme olmakta ve tane kabalaşması meydana gelmektedir. İnce ve kaba tane sınırı mikroyapılarda açık bir şekilde görülmektedir. Kaba tane yapısı tavlama sıcaklığı ve süresi arttıkça çekirdeğe doğru

ilerlemektedir. Buradan yaşlandırmanın bir tür yeniden kristalleştirme tavı görevi yaptığı anlaşılmaktadır. Deforme edilmemiş malzemelerde bu tür bir tane büyümesi durumu yoktur.

Taramalı elektron mikroskobu incelemelerinde yaşlandırılmış alaşımların yapısında Mg-Si ve Al-Mn-Si esaslı fazlar belirlenmiştir. Bunlardan Mg-Si esaslı fazın Mg_2Si ve diğer fazın ise AlMnSi olması muhtemeldir. EDS analizlerinde, ağırlık oranlandığında yaklaşık olarak Mg_2Si 'ye denk geldiği görülmektedir. Mg_2Si , AA6082 alaşımının yaşlanması esnasında sertlik artışını sağlayan fazdır.

XRD paternlerinde sadece Al piklerinin gözükmesi şaşırtıcı değildir. SEM ve optik mikroskop altında görülen çökeltilerin, XRD paternlerinde görülememesinin sebebi, XRD hassasiyeti %2-3 mertebesinde olmasıdır. Yani XRD paternlerinde, eğer bombardıman edilen bölgede bir faz birikmesi yoksa %2'den daha düşük yoğunluklu fazlar detekte edilemez. Isıl işlemin etkisi, bu bakımdan özellikle sertlik ölçümleriyle ortaya konulmuştur.

6.GENEL SONUÇLAR

AA 6082 alüminyum alaşımının dövme işlemini takiben doğrudan ısıtma işlemi alınabilirliğini (direkt ısıtma işlemi) değerlendirmek için yapılan bu çalışmada; örnekler sıcak deforme edildikten sonra 7,5-15-30 ve 60 dakika sürelerle 480-510-540°C'lerde tavlama su verilmiştir. Takiben tüm numuneler 180°C'de 8 saat süreyle yaşlandırılmıştır. Numuneler mikroskopik ve mekanik açıdan karakterize edilmiştir.

- Deforme edilmiş ve edilmemiş numunelerin mikroyapıları ve sertlikleri arasında dikkate değer bir farklılık gözlemlenmemiştir.
- 480°C'de yapılan tavlama işlemleri çalışılan tüm sürelerde yeterli nihai sertlik değerini sağlayamamıştır. 510°C'de 60 dakika ve 540°C'de 15 dakika ve 540°C'den daha uzun sürelerde beklenen numuneler yaşlandırma sonrası istenen sertlik değerini (Min. 90 HB) sağlamışlardır.
- Yaşlandırılmış numunelerde yüzeyde kaba taneli iç kısımda ise ince taneli bir yapının olduğu belirlenmiştir. Tavlama sıcaklığı ve süresine bağlı olarak kaba taneli yapı yüzeyden çekirdeğe doğru ilerlemektedir. Bu geçiş yapısı özellikle yüksek sıcaklık ve uzun sürelerde belirgindir ve yaşlanma ile görünür hale gelmiştir. Buradan yaşlandırmanın bir tür yeniden kristalleştirme tavı görevi yaptığı anlaşılmaktadır.
- Endüstriyel uygulamada dövme öncesi ısıtma işlemi indüksiyon ile yapılmaktadır. İndüksiyon ile ısıtma çok kısa sürelidir. İndüksiyonla ısıtmayı benzetmek maksadı ile seçilen kısa bekleme sürelerinin yaşlandırma sonrası istenen sertlik değerlerini sağlamayacağı anlaşılmıştır.
- Alüminyumun dövme sıcaklığı olan 480°C'de indüksiyon ısıtması ile yapılan bekleme sürelerinin hiçbir şekilde yaşlandırma sonrası arzu edilen sertlik değerlerini vermeyeceği anlaşılmıştır. İstenen sertlik değerlerinin eldesi için daha yüksek sıcaklıklara ihtiyaç vardır. Bu ise dövme işlem pratiğinin uygulaması ile sağlanamaz.

KAYNAKLAR

- [1] BGS, (2009), World Mineral Production 2003-2007, British Geological Survey.
- [2] Web 1, (2014), www.aec.org, (Erişim tarihi: 15.03.2014).
- [3] Arabacı, A., (1996), “Ekstrüzyon Matrislerinde Kanal Uzunluğu ve Ön Odanın Araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi.
- [4] Göymen, V. H., (1988), “Ekstrüzyonda Matris Dizaynı ve Őeklinin Malzeme Akışı, Ekstrüzyon Şekline ve Kuvvetine Etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi.
- [5] Demir E. (2008), “Alüminyum Alaşımlarında Isıl İşlem Etkilerinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi.
- [6] Callister, W.D., (2007), “Introduction to Materials Science & Engineering”, 7th Edition, John Wiley and Sons Inc.
- [7] Mrowka-Nowotnik G., (2010), “Influence of chemical composition variation and heat treatment on microstructure and mechanical properties of 6XXX alloys”, Archives of Materials science and Engineering, 46 (2), 98-107.
- [8] Sönmez, H., (1989), Metal Ekstrüzyonu, Eğitim Yayınları A.S., İstanbul.
- [9] Güngör B., Gültekin M.E. (2011), “Alüminyum Ekstrüzyonunda Biyet Sıcaklığının Mikroyapıya Etkisi”, Yayınlanmış Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi.
- [10] Tareg S. Ben Naser, Bobor K., Krallics G., (2014), “Tensile behavior of multiple forged 6082 Al alloy”. Periodica Polytechnica Mechanical Engineering, 58, 113-117.
- [11] Tareg S. Ben Naser, Bobor K., Krallics G., (2014), “Mechanical behavior of multiple forged Al 7075 Aluminum alloy”, Acta Polytechnica Hungarica, Vol. 11 (7), 103-117.
- [12] Perrier F., Desrayaud C., Bouvier V., (2012), “Microstructural and mechanical evolutions during the forging step of the cobapress, a casting/forging process”, The Minerals, Metals & Materials Society, 1691-1696.
- [13] Marin M., Garcia E., Nunez P., Camacho A., (2013), “Comparative of paramaters in the forging process by different application load”, Daam International Scientific, 1, 449-458.

- [14] Plonka B., Klyszewski A., Senderski J., Lech-Grega M., (2008), “Application of Al alloys, in the form of cast billet, as stock material for the die forging in automotive industry”, Archives of Civil And Mechanical Engineering, 8 (2), 150-156.
- [15] Birol Y., Aktı S., (2014), “Cooling slope casting to produce EN AW 6082 forging stock for manufacture of suspension components”, Trans. Nonferrous Met. Soc. China, 24, 1674–1682.
- [16] Mrowka-Nowotnik G., Sieniawski J., (2005), “Influence of heat treatment on the microstructure and mechanical properties of 6005 and 6082 aluminum alloys”, Journal of Materials Processing Technology, 1, 162–163, 367–372.
- [17] Zvinys J., Kandrotaitė Janutiene R., Dr. Meskys J., Juzenas K., (2014), “Investigation of thermo mechanical effect on structure and properties of aluminum alloy”, 59 (1), 3-9.
- [18] Plonka B., Korczak P., Remsak K., Lech-Grega M., (2014), “Comparison of structure, mechanical and electrical properties of Al alloy die forged parts made with use of different stock material”, Archives of Metallurgy and Materials, 59 (1), 4-8.
- [19] Siegert K., Möckel A., Neher R., (1994), “Forging Alloys”, Training in Aluminum Application Technologies Lecture 3401.
- [20] DIN, (2009), Testing of metallic materials-Tensile test pieces, DIN 50125.
- [21] TSE, (1995), “Aluminyum ve alüminyum alaşımları-Dövme mamül parçalar kısım 2: Mekanik özellikler ve diğer özellikler” , TS 953 EN 586-2 , Türk Standartları Enstitüsü.

ÖZGEÇMİŞ

Ömer Sürmen 1984 yılında Karabük'te doğdu. 2002 yılında başladığı Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümünü 2008 yılında tamamladı. Askerlik vazifesinin ardından 2009 yılında Kanca Dövme Çelik AŞ. firmasında Laboratuvar sorumlusu olarak işe başladı. Daha sonra Isıl İşlem Sorumluluğu, Yalın Üretim Sistemi sorumluluğu görevlerine getirildi. Kariyerinin 3. senesinde 2012 yılında Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisansa başladı.

