



T.C.
Niğde Üniversitesi
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YAŞLANDIRMA PARAMETRELERİNİN
AA6061 ALÜMİNYUM ALAŞIMININ MEKANİKSEL
ÖZELLİKLERİNE VE ŞEKİLENDİRMEYE
OLAN ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Mustafa AVŞAR

Haziran 2011

T.C.
NİĞDE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YAŞLANDIRMA PARAMETRELERİNİN
AA6061 ALÜMİNYUM ALAŞIMININ MEKANİKSEL
ÖZELLİKLERİNE VE ŞEKİLENDİRMEYE
OLAN ETKİSİNİN İNCELENMESİ

MUSTAFA AVŞAR

Yüksek Lisans Tezi

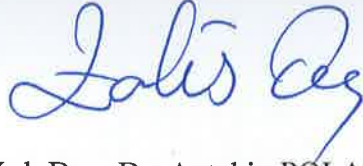
Danışman

Yrd. Doç. Dr. Aytekin POLAT

Haziran 2011

Yrd. Doç. Dr. Aytekin POLAT danışmanlığında **Mustafa AVŞAR** tarafından hazırlanan “**Yaşlandırma Parametrelerinin AA6061 Alüminyum Alaşımının Mekaniksel Özelliklerine ve Şekillendirmeye Olan Etkisinin İncelenmesi**” adlı bu çalışma jürimiz tarafından Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Makine Mühendisliği** Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Yrd.Doç.Dr .Zakir TAŞ (Bozok Üniversitesi)



Üye : Yrd. Doç. Dr. Aytekin POLAT (Niğde Üniversitesi)



Üye : Yrd.Doç.Dr. Yusuf CUNEDİOĞLU (Niğde Üniversitesi)



ONAY:

Bu tez, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca belirlenmiş olan yukarıdaki jüri üyeleri tarafından/...../20.... tarihinde uygun görülmüş ve Enstitü Yönetim Kurulu'nun/...../20.... tarih ve sayılı kararıyla kabul edilmiştir.

...../...../201..

Doç. Dr. Nurettin ACIR

Enstitü Müdür

ÖZET

YAŞLANDIRMA PARAMETRELERİNİN AA6061 ALÜMİNYUM ALAŞIMININ MEKANİKSEL ÖZELLİKLERİNE VE ŞEKİLENDİRMEYE OLAN ETKİSİNİN İNCELENMESİ

AVŞAR Mustafa
Niğde Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman : Yrd. Doç. Dr. Aytakin POLAT

Haziran 2011, 63 sayfa

Bu çalışmada otomotiv ve birçok endüstride yaygın olarak kullanılan AA 6061 alüminyum alaşımının mukavemet özelliklerini artırmak için yaşlandırma işlemi yapılarak yaşlandırma parametrelerinin AA 6061 alaşımın mekanik özelliklerine ve şekillendirmeye olan etkisi incelenmiştir.

Yaşlandırma üç ayrı sıcaklıkta ve farklı yaşlandırma süreleri kullanılarak yapılmıştır. Yaşlandırma işleminin alaşımın mekanik özelliklerine olan etkisi, çekme testi ve sertlik testleri ile, şekillendirilebilirliğe olan etkisi ise Erichsen ve geri yaylanma testleri ile belirlenmiştir.

Elde edilen sonuçlar kullanılarak AA 6061 alaşımının mekanik özellikleri ve şekillendirilebilirliği farklı koşullar için irdelenmiştir.

Anahtar sözcükler: AA6061Al alaşımı, yaşlandırma işlemi, mekanik özellikler, şekillendirilebilirlik

SUMMARY

THE EFFECTS OF AGING PARAMETERS ON THE MECHANICAL PROPERTIES AND FORMABILITY OF AA6061 AL ALLOY

AVSAR, Mustafa
Nigde University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering

Supervisor : Ass. Prof. Dr. Aytekin POLAT

June 2011, 63 pages

In this study, an aging process was performed to improve the strength of AA 6061 aluminum alloy which is widely used in the automotive and many industries. The effects of aging parameters on the mechanical properties and forming of the alloy AA 6061 were investigated.

The aging process was performed at three different temperature and various aging times. The effects of aging parameters on the mechanical properties and formability of the alloys were determined by tensile and hardness tests, and spring back and Erichsen tests, respectively.

By using the obtained results, the mechanical properties and formability of the AA 6061 alloys were discussed for different conditions.

Key Words: AA6061 Al alloy, Aging process, Mechanical properties, Formability

TEŞEKKÜR

Bu tez alıőmasının baőarılı bir Şekilde tamamlanmasında katkıları bulunan danıőmanım Yrd. Do. Dr. Aytekin POLAT ve alıőmanın ynlendirilmesinde 2. danışman gibi destek olan ve laboratuvar çalıőmalarında yardımlarını esirgemeyen Makine Mühendisliği Arő. Gör. Serkan TOROS' a en içten teőekkürlerimi sunarım.

Hiçbir zaman maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen aileme teőekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iii
SUMMARY	iv
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	ix
FOTOGRAFLAR DİZİNİ	xi
KISALTMA VE SİMGELER	xii
BÖLÜM I. GİRİŞ	1
1.1 Amaç	1
1.2 Alüminyum Üretimi	2
1.3 Alüminyum ve Alaşımları	4
1.4 Alüminyum Alaşımlarının Sınıflandırılması	6
1.4.1 Döküm alaşımlar	6
1.4.2 Hadde alaşımlar	6
1.4.2.1 Alüminyum 1XXX serisi	7
1.4.2.2 Alüminyum 2XXX serisi	8
1.4.2.3 Alüminyum 3XXX serisi	8
1.4.2.4 Alüminyum 4XXX serisi	8
1.4.2.5 Alüminyum 5XXX serisi	8
1.4.2.6 Alüminyum 6XXX serisi	9
1.5 Alüminyum ve Alaşımların Tarihçesi	9
1.6 Alüminyumun Kullanım Alanları	10
1.6.1 İnşaat sektöründe	10
1.6.2 Kimya ve gıda sanayiinde	10
1.6.3 Ulaştırma sektöründe	10
1.6.4 Elektrik ve elektronik sektöründe	11
1.6.5 Makine ve ekipman imalat sektöründe	11
1.6.6 Metal sanayiinde	11
1.6.7 Diğer yerlerde kullanım alanları	11
1.7 Alüminyum ve Araçlar	12

BÖLÜM II. ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ SERTLEŞTİRİLMESİ	13
2.1 Yaşlandırma	13
2.1.1 Çözeltiliye alma işlemi	13
2.1.2 Çökelme işlemi	14
2.2 Yaşlanma Sonucu Mekanik Özelliklerde Meydana Gelen Değişim	17
2.3 Alüminyum Alaşımları İçin Temper (Isıl İşlem) Göstergeleri	18
2.4 Soğutma Hızının Önemi	22
2.5 Alüminyum Alaşımlarında Yaslandırılabilir Alaşımların Yeri	23
2.6 Yaşlandırılabilir Alüminyum Alaşımları	24
BÖLÜM III. MALZEME VE YÖNTEM	25
3.1 Malzeme	25
3.2 Deney Numunelerinin Hazırlanması	26
3.3 Isıl İşlem Karakteristikleri	29
3.4 Sertlik	30
3.5 Çekme Deneyi	31
3.5.1 Anizotropi katsayısı	32
3.6 Geri Yaylanma Deneyi	35
3.6.1 Geri yaylanma	36
3.6.2 Geri yaylanma etki eden faktörler	38
3.7 Erichsen Deneyi	40
BÖLÜM IV BULGULAR	41
4.1 Sertlik Değişimi	41
4.2 Gerilme-Birim Deformasyon Eğrileri	42
4.2.1 Toplam uzama değişimi	45
4.2.2 Gerçek maksimum gerilme değişimi	47
4.2.3 Gerçek akma gerilmesi değişimi	48
4.2.4 Mukavemet katsayısı değişimi	49
4.2.5 Pekleşme katsayısı değişimi	50
3 Anizotropi Ölçümleri	53
4.4 Geri Yaylanma Ölçümleri	54
4.5 Erichsen Numaraları	56
BÖLÜM IV DEĞERLENDİRME	60
KAYNAKLAR	62

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1. 1	Saf alüminyumun fiziksel özellikleri	5
Çizelge 1. 2	Mekanik işlem (dövme) alaşımlarının kodlama sistemi	7
Çizelge 2. 1	Alüminyum ve alüminyum alaşımlarının yaşlandırma simgeleri	21
Çizelge 2. 2	Soğutma hızının malzeme özellikleri üzerindeki etkisi	22
Çizelge 3. 1	6061 alüminyumun kimyasal özellikleri	25
Çizelge 3. 2	6061 Alüminyum alaşımının farklı yaşlanma karakteristiklerinde mekanik özelliklerinin karşılaştırılması	26
Çizelge 4. 1	6061 Alüminyum alaşımının farklı yaşlandırma sıcaklıkları ve sürelerinde mekanik özellikleri	52
Çizelge 4. 2	6061 Alüminyum alaşımının farklı yaşlandırma sıcaklıkları ve sürelerinde anizotropi değerler	53
Çizelge 4. 3	25mm/dk ve 1000 mm/dk'lık erkek kalıp hızlarına göre geri yaylanma açıları	56
Çizelge 4. 4	270 mm/dk'lık hız için Erichsen numaraları	58
Çizelge 4. 5	540 mm/dk'lık hız için Erichsen numaralar	59
Çizelge 4. 6	810 mm/dk'lık hız için Erichsen numaraları	59
Çizelge 5. 1	İstenilen mekanik özellikler ve şekillendirilebilirlik için en uygun yaşlandırma işlem parametreleri	61

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. 1	Alümina üretim prosesi	3
Şekil 1. 2	Alüminyum üretim prosesi	3
Şekil 2. 1	Doğal ve yapay yaşlandırma kademelerini gösteren ısıl işlem diyagramları	14
Şekil 2. 2	Al-Cu alaşımında yaşlanma esnasında oluşan çökelti fazının kademeleri	15
Şekil 2. 3	Yarı kararlı GP zon alanını gösteren Al-Cu faz diyagramının bir kısmı	17
Şekil 2. 4	Al-Cu alaşımında yaşlanma esnasında oluşan çökelti fazının kademeleri	18
Şekil 2. 5	Başlıca alüminyum alaşımları	23
Şekil 3. 1	Çekme deney numune ölçüleri	27
Şekil 3. 2	Geri yaylanma ve derin Erichsen testi deneyleri numune ölçüleri ..	28
Şekil 3. 3	6061 Alüminyum alaşımı denge diyagramı	29
Şekil 3. 4	Yaşlandırma safhaları	30
Şekil 3. 5	Anizotropi katsayısının çekme deneyi ile ölçümü	33
Şekil 3. 6	Anizotropi değerinin test yönüne göre değişimi	34
Şekil 3. 7	Geri yaylanmayı olayı	35
Şekil 3. 8	Geri yaylanma davranışı	37
Şekil 3. 9	Gerilme-Gerininim diyagramı	37
Şekil 3. 10	Bükmenin sebep olduğu molekül hareketleri	38
Şekil 4. 1	Malzeme yüzey sertliğinin yaşlandırma sıcaklığı ve süresi ile değişimi	42
Şekil 4. 2	160°C’ de yaşlandırma işlemi yapılmış numunelerin gerçek gerilme birim deformasyon eğrilerinin yaşlandırma süresi ile değişimi..	43
Şekil 4. 3	180°C’ de yaşlandırma işlemi yapılmış numunelerin gerçek gerilme birim deformasyon eğrilerinin yaşlandırma süresi ile değişimi.	44

Şekil 4. 4	200°C’ de yaşlandırma işlemi yapılmış numunelerin gerçek gerilme birim deformasyon eğrilerinin yaşlandırma süresi ile değişimi.	45
Şekil 4. 5	Gerçek akma gerilmesi yaşlandırma zamanı değişimi	46
Şekil 4. 6	Gerçek maksimum gerilmenin yaşlandırma sıcaklığı ve süresi ile değişimi	49
Şekil 4. 7	Gerçek maksimum gerilmenin yaşlandırma sıcaklığı ve süresi ile değişimi	55
Şekil 4. 8	Mukavemet katsayısının yaşlandırma sıcaklığı ve süresi ile değişimi	50
Şekil 4. 9	Pekleşme katsayısının yaşlandırma sıcaklığı ve süresi ile değişimi	51
Şekil 4. 10	Geri yaylanma yük-ilerleme (160 °C)	54
Şekil 4. 11	Geri yaylanma yük-ilerleme (180 °C)	55
Şekil 4. 12	Geri yaylanma yük-ilerleme (200 °C)	55
Şekil 4. 13	Farklı ilerleme hızlarına bağlı yük-ilerleme grafiği (160 °C)	57
Şekil 4. 14	Farklı ilerleme hızlarına bağlı yük-ilerleme grafiği (180 °C)	57
Şekil 4. 15	Farklı ilerleme hızlarına bağlı yük-ilerleme grafiği (200 °C)	58

FOTOGRAFLAR DİZİNİ

Fotoğraf 3. 1	Çekme deney numunesi AA6061	26
Fotoğraf 3. 2	Geri esneme ve Erichsen deney numuneleri AA6061	28
Fotoğraf 3. 3	Vickers sertlik ölçüm cihazı	31
Fotoğraf 3. 4	Çekme deney cihazının genel görünümü	32
Fotoğraf 3. 5	Geri yaylanma düzeneği	36
Fotoğraf 3. 6	Erichsen deney cihazının görünümü	40

KISALTMALAR VE SİMGELER

MPa	Mega Pascal
HV	Vickers sertlik değeri
Mg	Magnezyum
Si	Silisyum
Fe	Demir
Cu	Bakır
Mn	Manganez
Zn	Çinko
K	Mukavemet katsayısı
n	Pekleşme katsayısı
YMK	Yüzey merkezli kübik
N	Newton
t	Kalınlık
l	Boy
w	En
F	Kuvvet
R	Geri yaylanma yarıçapı

BÖLÜM I

GİRİŞ

1.1 Amaç

Dünya çapındaki rekabet ve çevrenin korunmasına yönelik standartlar özellikle otomobil üreticilerini yeni arayışlara ve araştırmalara yönlendirmiştir. Bu arayışlar ekolojik dengeyi bozan atık gazların miktarını azaltmak için daha düşük yakıt tüketimi sağlayacak teknolojileri üretmek ve geliştirmenin yanı sıra, yakıtı çevreye daha az zarar verecek şekilde kullanmaktır. Otomobil endüstrisinde hafif malzeme kullanımı yakıt tüketimini azaltmak için kullanılabilir en kolay yöntemdir. Kullanılabilir malzemelerin aynı zamanda geri dönüşümünün olması ekonomik açıdan oldukça önemlidir. Bu durumda alüminyum, saf ve bileşik halde doğada en fazla miktarda bulunan 3. element olup geri dönüşebilir ve bu özelliği ile de hammaddesi tükenmeyen eşsiz bir malzeme olarak ortaya çıkmaktadır [1].

Alüminyum, magnezyum, titanyum gibi hafif yapı metalleri, otomotiv endüstrisinde yakıt tasarrufu için gerekli hafif malzeme seçiminde önemli bir kullanım alanına sahiptirler. Otomotiv üreticileri bir yandan çevrenin korunmasını düşünürken, diğer yandan da bu amaçla ürettikleri malzemelerin ekonomik olmalarını düşünmektedirler. Otomotiv endüstrisinde güvenlikten ve konfordan ödün vermeden, büyük ve az yakıt tüketen otomobiller için hafif, fakat mukavemeti yüksek malzemelerin geliştirilmesi, otomobil üreticileri için önemlidir [1].

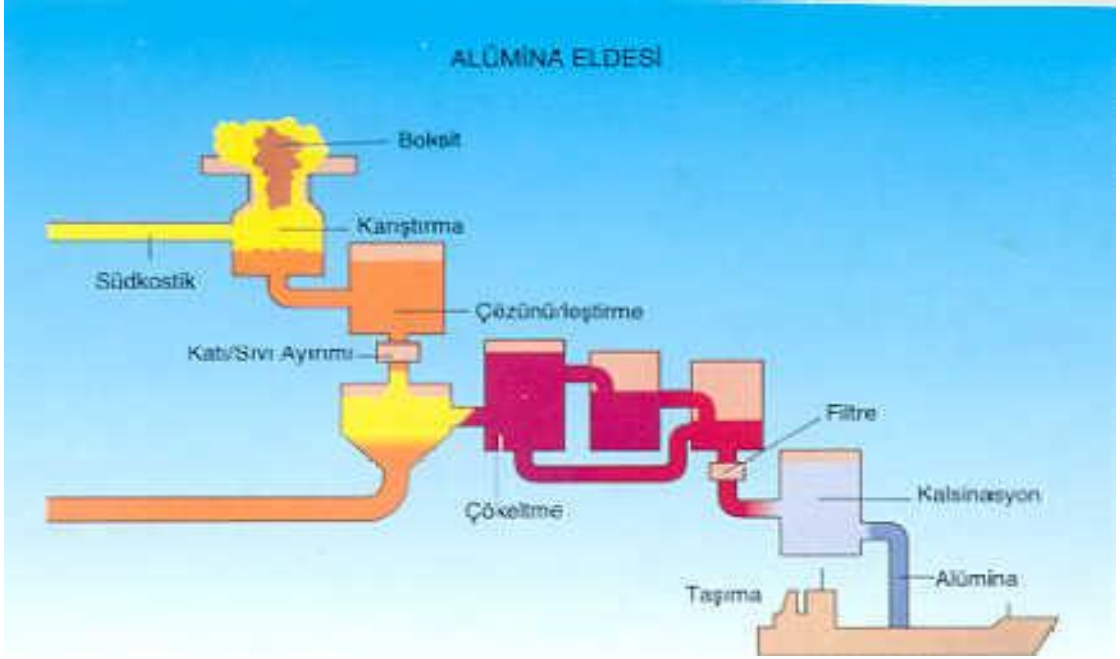
Düşük yakıt tüketimi ve düşük emisyon limitleri ancak hafif konstrüksiyonlarla sağlanabilir. Alüminyum, mukavemet, güvenlik ve konfordan vazgeçmeden, boyutları küçültmeden bir otomobilin tasarım edilmesinde kullanılabilir en önemli yapı malzemelerindendir. Kişisel taşıma araçlarında alüminyum kullanımı en önemli pazarı oluştururken, üreticiler hangi parçaların yerine alüminyum kullanabileceklerini incelemektedirler. İlginç olan alüminyumun spesifik dayanımının yerine geçeceği malzemelerle çok az farklılık göstermesidir. Çelik yerine alüminyum kullanımı ile kasa yapımında ağırlıktan 150 kg kadar tasarruf sağlanabilir. 100 kg ağırlık azaltılması 0,6–0,7 litre/100 km yakıt tasarrufu sağlamaktadır [2].

Endüstride alüminyum kullanımının gün geçtikçe artmakta olduğu ve giderek artacağı görülmektedir. Kullanım alanlarına göre alüminyum alaşımlarından farklı mekanik özellikleri beklenmektedir. Bu özelliklerin başında yüksek mukavemet ve şekillendirilebilirlik gelmektedir.

Alüminyum alaşımlarına mukavemet kazandırma yöntemlerinden biri yaşlandırma işlemidir. Bu işlemde alüminyum alaşımlarına ısı işlem uygulanmaktadır. Yaşlandırma işleminde, işlem parametreleri yaşlandırma sıcaklığı ve zamanıdır. Yaşlandırma işlemi ile alüminyum alaşımlarının mekanik özellikleri ve şekillendirilebilirlik özellikleri değişmektedir. Değişen bu özelliklerin kullanım alanlarına göre optimum değerleri belirlenmelidir. Bu çalışmada alüminyum alaşımlarından biri olan AA6061 serisi için optimum yaşlandırma parametrelerinin belirlenmesi ve bu parametrelerdeki mekanik özelliklerin değişimi ve şekillendirilebilirliğe olan etkisi incelenmiştir.

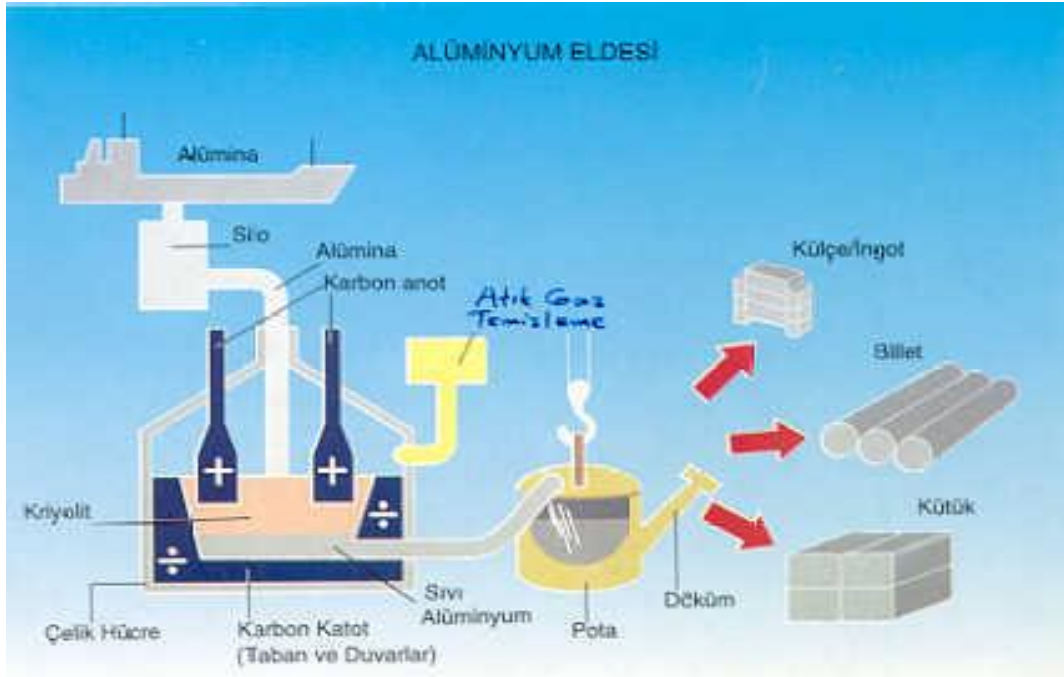
1.2 Alüminyum Üretimi

Alüminyum, yüzyıldan beri, tüm dünyada aynı yöntemle elde edilmektedir. Alüminyum üretimi, iki aşamada gerçekleşir. Birinci aşamada, Bayer metodu ile boksit cevherinden alümina elde edilir. İkinci aşamada ise, elektroliz ile alümina'dan alüminyum elde edilir. Alümina tesisleri, genellikle boksit cevherlerinin yanına kurulur. Madenden çıkarılan boksit cevheri, sudkostik eriyiği ile muamele edilerek alüminyum hidroksit eldesi gerçekleşir. Bu işlem sonucunda oluşan erimeyen kalıntılar (kırmızı çamur) ayrılır ve alüminyum hidroksitin kalsinasyonu ile "alümina" (alüminyum oksit) elde edilir[3].



Şekil 1. 1 Alümina üretim prosesi [3]

Bundan sonraki aşama, “alümina”nın “alüminyum”a dönüştürülmesidir. Beyaz bir toz görünümündeki alümina, elektroliz işleminin yapılacağı hücre adı verilen özel yerlere alınır [3].



Şekil 1. 2 Alüminyum üretim prosesi [3]

Burada amaç, alüminyum oksijenden ayırmaktır. Elektroliz işlemi için 4-5 volt gerilimde doğru akım uygulanır. Dipte biriken alüminyumun alınması ile işlem tamamlanır [3].

Genel olarak, ağırlıkça 4 birim boksitten 2 birim alümina ve 2 birim alüminadan da 1 birim alüminyum elde edilir[3].

İlk zamanlarda üretilen birincil alüminyumun her tonu için 42.000 kwh olan enerji sarfiyatı, günümüzde ortalama 16.500 kwh değerine düşmüştür. Bu değer, en yeni teknoloji ile çalışıldığında 13.000 kwh/t olmaktadır[3].

Yukarıda söz edilen işlemler ile elde edilen alüminyum “birincil alüminyum” (primary aluminium) olarak tanımlanır [3].

1.3 Alüminyum ve Alaşımları

Alüminyum boksit yataklarından çıkarıldıktan sonra işlenerek saf olarak üretilir. Hafif metaller sınıfından olan alüminyum, yumuşak ve demirden 3 kat daha hafif bir metaldir. Diğer metallerin katılması ile yoğunluğu önemli ölçüde değişmemekle birlikte, mukavemeti önemli ölçüde artmaktadır. Bu özelliklerinden dolayı alüminyum mukavemetinin ağırlığına oranı çok yüksektir ve bu onun en önemli özelliğidir. Alüminyum 40–540 N/mm² (MPa) ortalama mukavemeti ile bir çok kullanım alanı için optimum çözümler sunmaktadır [4].

Alüminyum kullanımındaki ekonomik ve ekolojik ağırlıklı nedenleri şu şekilde sıralayabiliriz [4].

1. Alüminyum üretmek için gerekli enerjinin üçte ikisi sudan elde edildiğinden diğer alternatif malzemelere göre daha az enerji harcayarak hafif yapılar üretilebilir.
2. Geri dönüşüm hızlıdır. Alüminyum doğal, yenilenebilir enerji ile üretilebilirken, aynı zamanda geri dönüşüm çemberi ile tekrar geri kazanılır. Alüminyum, hammaddeden üretim için gerekli enerjinin sadece %5'i kadar bir enerji ile tekrar ergitilebilir ve yepyeni ürünler için kullanılabilir. Bu sonsuz bir çevrimdir.

Konstrüksiyon parçalarının %70'i, işlem ve işleme hurdalarının %100'ü tekrar geri kazanılabilir.

3. Alüminyum hammaddesi olan boksit madenciliğinin %12'si bugün yağmur ormanlarında yapılmakta, madencilik sonrası bu alanların %80'i doğal ormanlara dönüşmektedir. Bu da ekolojik dengeyi desteklemektedir.
4. Boksit hammaddesinin tüketim ve geri kazanım çemberi içerisinde insanoğlunun mevcudiyeti boyunca var olacağı düşünülmektedir.
5. Kullandığımız eşyalardan aldığımız gıdalara kadar alüminyum insan hayatıyla iç içedir. Bu insan sağlığına olumlu bir etki taşımaktadır.
6. Alüminyum oksit (Alumina) üretiminde bir atık olarak ortaya çıkan kırmızı çamur, yeniden değerlendirilerek portlant çimentosu yapımında ve plastik endüstrisinde pigment olarak kullanılmaktadır.

Çizelge 1. 1 Saf alüminyumun fiziksel özellikleri

Kimyasal sembol	Al
Atom numarası	13
Atom Ağırlığı	26,98 g/mol
Kafes Yapısı	YMK
Yoğunluğu (20°C'de)	2,6989 g/cm ³
Yoğunluğu (660°C'de sıvı)	2,37 g/cm ³
Elastik modül, E.	7,2x10 ³ kg/mm ²
Kayma modülü, g	2,7x10 ³ kg/mm ²
Ergime sıcaklığı, T	660,24 °C
Ergime ısısı, Q	94,6 cal/g
Elektrik iletkenliği	37,74 m/Ohm.mm ²
Isı iletkenliği, λ	0,55 cal/cm.s.°C

Alüminyumun metal olarak özellikleri birçok durumda onun ideal ve ekonomik bir malzeme olmasını sağlar. Bu özellikler şunlardır:

1. Uygun mekanik özelliklerle birlikte düşük ağırlık,
2. Koku ve kimyasallara karşı dayanım ve sağlıklı koşullar,
3. Yüksek ısı iletkenliği,

4. Parlama ve alev almazlık,
5. Manyetik nötrallite,
6. Kolay şekillendirilebilme kabiliyeti,
7. Farklı yöntemlerle yüzey işlenebilmesi

1.4 Alüminyum Alaşımlarının Sınıflandırılması

Alüminyum katılan alaşım elemanları, mukavemet özelliklerini yükseltir. Özellikle mukavemet artar. Başlıca alaşım elemanları: Magnezyum, manganez, silisyum, bakır, çinko ve bazen de kurşun, nikel ve titandan ibarettir.

Alaşım elemanları alaşım için üç farklı halde bulunur:

- 1) Alüminyum içinde katı halde eriyebilirler (katı eriyik)
- 2) Karı halde alüminyumda erimeyip veya sınırlı eriyip mekanik bir karışım teşkil ederler.
- 3) Alüminyumla veya birbirleriyle metallere arası veya kimyasal bileşik teşkil ederler.

Alüminyum alaşımları imal tarzına göre iki ana gruba ayrılabilir:

- 1) Döküm alaşımlar
- 2) Hadde alaşımları (dövülmüş alaşımlar)

1.4.1 Döküm Alaşımlar

Başlıca döküm alaşımları şunlardır.

AlCu, AlZnCu, AlCuNi, AlSi, AlSiNi, AlSiMg, AlMg, AlMgmm, AlMgSi.

1.4.2 Hadde Alaşımlar

Bu alaşımlar da ısı işlem neticesinde sertleşen ve tabii sert alaşımlar olmak üzere ikiye ayrılır. Dökme dövme, haddeleme, çekme ve ekstrüzyon gibi mekanik operasyonlar istenilen harici şekilleri elde etmek için kullanıldığı gibi, ısı işlemler de, iç yapıyı

değiştirerek sertlik, mukavemet süreklilik v.s. içyapıyı mekanik özelliklere tesir etmek üzere kullanılır.

Çizelge 1. 2 Mekanik işlem (dövme) alaşımlarının kodlama sistemi

Seri Adı	Alaşım Bilgileri	Yaşlandırma Kabiliyeti
1XXX	%99.0 veya daha fazla Al içerir	Yaşlandırılmaz
2XXX	Cu ana alaşım elementidir	Yaşlandırılabilir
3XXX	Mn ana alaşım elementidir	Yaşlandırılmaz
4XXX	Si ve Cu veya Mg ana alaşım elementidir	Eğer Mg varsa yaşlandırılabilir
5XXX	Mg ana alaşım elementidir	Yaşlandırılmaz
6XXX	Mg ve Si ana alaşım elementidir	Yaşlandırılabilir
7XXX	Zn ana alaşım elementidir	Yaşlandırılabilir
8XXX	Diğer elementler	-----
9XXX	Yaygın olarak kullanılmayan seri	-----

Alüminyum alaşımları içinde bulundukları element miktarına göre isimlendirilir. Amerikan alüminyum birliğine göre, alüminyum dövme alaşımları dört harfle sınıflandırılmaktadır. Bu sınıflandırma Çizelge 1. 2' de verilmiştir.

1.4.2. 1 Alüminyum 1XXX Serisi.

1XXX Serisi ticari olarak saf alüminyumu ifade eder ve en az % 99 alüminyum içerir. Bu malzemelerin, şekillendirilmesi, elektrik iletkenlikleri ve korozyon dirençleri oldukça yüksektir. 1XXX serisinin son iki rakam ise, % 99 değerinden sonraki kısmı belirlemede kullanılır. Örneğin 1100 malzemesinin % 99.00 oranında, 1050 malzemesinin % 99.50 oranında ve 1060 malzemesinin ise % 99.60 oranında saf alüminyum içerdiğini belirtir [5].

1.4.2. 2 Alüminyum 2XXX Serisi

Alüminyum-bakır-magnezyum alaşımları, ilk olarak çökelme sertleştirilmesi yapılabilen alaşımlardır. Çökelme sertleştirilmesi yapılan ilk alaşım 2017 alaşımıdır. Bu alaşımlar yapı içerisinde özellikle % 4 Cu, % 0,6 Mg ve % 0,7 Mn bulunmaktadır. Yapı içerisinde ağırlıkça bulunan % 4,4 Cu, % 0,5 Mg, % 0,8 Mn ve % 0,8 Si'lu 2014 alaşımı yapay yaşlandırmaya 2017 alaşımından daha fazla tepki vermesi için daha sonra geliştirilmiştir. Bugün en çok kullanılan Al-Cu-Mg alaşımlarından biridir. Yüksek dayanım, magnezyum içeriğini % 0,5'den % 1,5'e çıkarmakla elde edilmiştir. Magnezyumun, alüminyum-bakır alaşımlarına ilavesi alüminyum bakır alaşımlarında çökelti sertleşmesini oldukça hızlandırır ve yoğunlaştırır[5].

1.4. 2. 3 Alüminyum 3XXX Serisi

Alüminyum 3XXX serinin en önemli alaşım elementi manganezdır. Alaşımında, düşük oranlarda yani % 1,2 oranında manganez dayanımı arttırmaktadır. Bu serideki, 3003, 3004 ve 3105 alaşımlarının, korozyon direnci ve işlenebilirliği yüksektir. 3XXX serisi alaşımlar, yaygın olarak çeşitli konstrüksiyonlar, çatı sistemleri ve çatı kaplamaları gibi mimari alanlarda kullanılır [5].

1.4.2.4 Alüminyum 4XXX Serisi

Alüminyum 4XXX serisindeki alaşımlara, silisyum ilave edilerek, kaynak ve lehimleme işlemlerinde ergime noktası düşürülmekte, böylece alaşımın kaynak ve lehimleme kabiliyeti iyileştirilmektedir. Silisyumun alaşımın akıcılık özelliğini artırması nedeni ile özellikle döküm teknolojisinde, geometrisi karmaşık şekillerin üretilmesine imkan vermektedir. Alüminyum 4043 alaşımı, yaygın olarak kaynak dolgu teli olarak kullanılmaktadır [5].

1.4.2.5 Alüminyum 5XXX Serisi

Alüminyum 5XXX serisi, yüksek dayanım ve korozyon direnci sağlayan magnezyum elementini içermektedir. Gemi iskeletleri ve diğer denizcilik uygulamalarında, kaynak

tellerinde kullanılır. Bu serideki alaşımların dayanımı, magnezyum miktarının oranına bağlı olarak değişir [5].

1.4.2.6 Alüminyum 6XXX Serisi

Alüminyum 6XXX alaşımlar, belirli oranlarda magnezyum ve silisyum içermesi nedeni ile Mg_2Si çökeltisi oluşturur. İyi derecede dayanım ve korozyon direncine sahiptir. AA 6061 alaşımı ise, düşük karbon çelikleri ile kıyaslanabilecek akma dayanımına sahip, en yaygın kullanılan alaşımlardan biridir [5].

1.5 Alüminyum ve Alaşımların Tarihçesi

- 8.** 1911 yılında Alman metalurjisti ALFRED WILM uçak endüstrisinde kullanılabilecek çok hafif ve sağlam bir alüminyum alaşımını geliştirmeye çalıştı.
- 9.** 1919 yılında NERİCA-WALTENBERG-SCOTT yaşlanmış olabilmesi için alaşımının nasıl bir faz diyagramına sahip olması gerektiğini buldular.
- 10.** 1920’de FRAENKEL ve SENG yaşlanma sırasında elektrik iletkenliği değişimini tespit ettiler.
- 11.** 1926da SCHMIDT ve WASSERMAMN yaşlanma esnasında castis parametresinin değişimini tespit ettiler.
- 12.** 1930’da FRAENKEL aşırı yaşlanmayı gözledi ve açıkladı.
- 13.** 1935’de WASSERMANN ve WEENT alüminyum bakır alaşımlarında X- ışınları ile inceleme yaparak alüminyum bakır denge diyagramında görülen 0 fazına benzer fakat aynı olmayana bir faz gördüler ve 0 ile gösterip “trancition lattice” (geçiş latisi) adını verip aynı isimli teoriyi ortaya attılar.
- 14.** 1936 FINK ve SMITH yaşlanma sertleşmesinin ilk kademelerinde meydana gelen çökeltileri duraluminde metolografik olarak tesbit ettiler.
- 15.** 1938’de GUINIER ve PRESTON yaşlanma sertleşmesinin kaynağını teşkil eden “GP” zonlarını buldular.
- 16.** Günümüzde yaşlanma teorisi MEHL ve JEFFER tarafından ortaya atıldı [6].

1.6 Alüminyumun Kullanım Alanları

Alüminyum aşağıda açıklanan birçok özelliği ve ürün çeşidi çokluğu nedeniyle yaygın bir kullanım alanına sahiptir. Bu açıdan genel ekonomi içinde önemli bir yeri vardır.

1.6.1 İnşaat sektöründe [7]:

- Konut yapımında
- Konut dışı yapılarda
- Karayollarında
- Diğer yapısal kullanımlarda.

1.6. 2 Kimya ve gıda sanayiinde [7]:

- Organik bileşikler üretiminde
- Plastik ve sentetik fiber sanayiinde
- Kağıt sanayiinde
- Gübre sanayiinde
- Patlayıcı maddeler üretiminde
- Mineral asit üretiminde
- Karbonat ve kükürt üretiminde
- Saf su ve buhar üretiminde
- Elektro kimyasal sanayiinde
- Petrol rafinerilerinde
- Gıda, ilaç ve meşrubat sanayiinde
- Atom enerjisi sanayiinde
- Boya maddesi ve boya üretiminde
- Ambalaj sanayiinde.

1.6. 3 Ulaştırma sektöründe [7]:

- Karayolu taşıtlarında
- Demiryolu taşıtlarında
- Denizyolu taşıtlarında
- Havayolu taşıtlarında

1.6. 4 Elektrik ve elektronik sektöründe [7]:

- Tel ve kablo üretiminde
- Enerji dağıtım cihazlarında
- Güç üretim ve düzeltme araçlarında
- Haberleşme ve elektronik cihazlarda
- İç dağıtım ve aydınlatma gereçlerinde

1.6.5 Makine ve Ekipman İmalat Sektöründe [7]:

- Makine yatakları imalinde
- Pompa, kompresör, far vs. imalinde
- Endüstri makineleri imalinde
- Tarım alet ve makineleri imalinde
- İş makineleri imalinde
- Isıtma, havalandırma ve soğutma sistemlerinde
- Malzeme taşıma ekipmanları imalinde
- Maden ve petrol ürünleri araçları imalinde
- Tekstil ve matbaa makineleri imalinde
- Elektrik sistemlerinde
- Askeri araç-gereç ve silahların yapımında

1.4. 6 Metal Sanayiinde [7]:

- Alaşım metali
- Çelik deoksidasyonu
- Alüminyum kaplamalı çelik
- Alüminotermik reaksiyonlar

1.6. 7 Diğer Yerlerde Kullanım Alanları [7]:

- Dayanıklı tüketim mallarında
- Muhtelif ev eşyalarında
- Mutfak eşyası yapımında

- Mobilya yapımında
- Dekorasyon ürünlerinde
- Takım ve el aletleri yapımında
- Diğer uygulamalarda

1.7 Alüminyum ve Araçlar

Alüminyum, ulaşım sektöründe taşıt araçlarının üretiminde kullanılan en önemli malzemelerden birisidir. Alüminyum kullanımının yaklaşık % 25'i taşıt araçlarının üretimine aittir. Taşıt araçları ne kadar hafif olursa, hareket etmeleri için daha az enerjiye gerek duyulur. Günümüzde bir otomobilde 50 kg alüminyum kullanılmaktadır. Bu sayede, yaklaşık 100 kg demir, çelik ve bakır malzeme tasarrufu yapılmaktadır. Yapılan hesaplar ve deneyimler sonucunda, alüminyum kullanılan bir otomobilin, yeterince alüminyum kullanılmamış bir otomobile kıyasla, ekonomik ömrü boyunca 1.500 litre daha az yakıt harcadığı anlaşılmıştır. Bu durumun gerek sürücülerin akaryakıt masraflarına sağlayacağı ekonomi ve çevre sağlığı açısından atmosfere yayılan atık egzoz gazının düşürülmesi yönünden çok büyük faydası bulunmaktadır [6].

Otobüs ve tren gibi sık sık hareket eden ve duran araçlarda, aracın hafif olması daha da fazla önem kazanmaktadır. Günümüzde otobüs, tren, kamyon gibi büyük kara araçlarında alüminyum kullanımı ile önemli yakıt tasarrufu sağlanmaktadır. Ayrıca karayolları trafik işaretleme sistemlerinde, otoyol parafet ve köprülerinde alüminyum kullanımı artmaktadır. Deniz araçlarında, özellikle teknelerde alüminyum süper-yapı sistemleri ile ağırlık merkezi daha aşağıya çekilmekte ve böylece teknenin dengesi artırılmakta ve daha çok kullanım hacmi sağlanmaktadır. Küçük teknelerin ve yatların yelken direkleri alüminyumdan yapılmaktadır. Bir uçağın ağırlıkça %70'i alüminyumdan oluşmaktadır. Alüminyum alaşımlarının hafifliği yanı sıra sağlamlığı, uçakların ve dolayısı ile havacılık sektörünün gelişmesine en büyük katkıyı yapmıştır. Duralüminyum (alüminyumbakır) alaşımlarından sonra gelecekte en önemli uçak malzemesi alüminyum-lityum alaşımları olacaktır. Alüminyum-lityum alaşımları ile, uçakların %15 hafiflemesi mümkündür [7].

BÖLÜM II

ALÜMİNYUM ALAŞIMLARIN SERTLEŞTİRİLMESİ

2.1 Yaşlandırma

Yaşlanma, genel olarak demir dışı metallerin mukavemetini artırmada kullanılan en önemli yöntemlerden biridir. Örneğin, uçak endüstrisinde kullanılan hafif alüminyum alaşımları yaşlanma ile sertleştirilmektedir. Ayrıca, ultra-yüksek mukavemetteki çeliklerde bu yöntemle sertleştirilmektedir. Buna tipik bir örnek olarak *Maraging* çelikleri gösterilebilir. Maraging çelikleri, martanzitik dönüşüm sonrası uygulanan yaşlanma sonrası çok yüksek mukavemet ile tokluğa bir arada sahiptirler.

Yaşlanma sadece malzemenin mekanik özelliklerini etkilemez aynı zamanda manyetik ve iletkenlik özelliklerine de etki eder. Bu nedenle yaşlanma elektronik malzemelerin özelliklerini geliştirmek amacıyla da kullanılır.

Yaşlanma, aşırı doymuş katı fazdan, zaman ve sıcaklık etkisi ile yeni bir fazın çökmesi sonucu malzemenin fiziksel ve mekaniksel özelliklerinin gelişmesidir.

Yaşlanma İşlemi: Yaşlanma, ancak denge diyagramlarında solvüs eğrisi bulunan alaşımlarda ve sadece solvüs eğrisinin sınırladığı katı eriyik bileşimlerinde meydana gelebilir. Yani, alaşım elementinin çözünme miktarı sıcaklıkla artmalıdır.

Yaşlanma meydana gelebilmesi için başlıca iki kademe mevcuttur. Bunlar sırasıyla; *çözeltiye alma* ve *çökeltme* işlemidir [8].

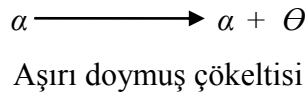
2.1.1 Çözeltiye alma işlemi

Bu işlemin amacı, çökecek fazı içeren aşırı doymuş tek fazlı bir katı eriyik elde etmektir. Bunu için Şekil 2. 1 deki C bileşimindeki yaşlanabilir alaşım önce solvüs eğrisinin üzerinde T_1 gibi bir sıcaklığa ısıtılır ve bu sıcaklıkta II' ci faz (Θ fazı), α - katı eriyiği içinde tamamen çözülünceye kadar tutulur. T_1 sıcaklığında yapı tamamen α ya dönüştükten sonra alaşım aniden soğutulur. Aniden soğutma Θ fazının çökmesine

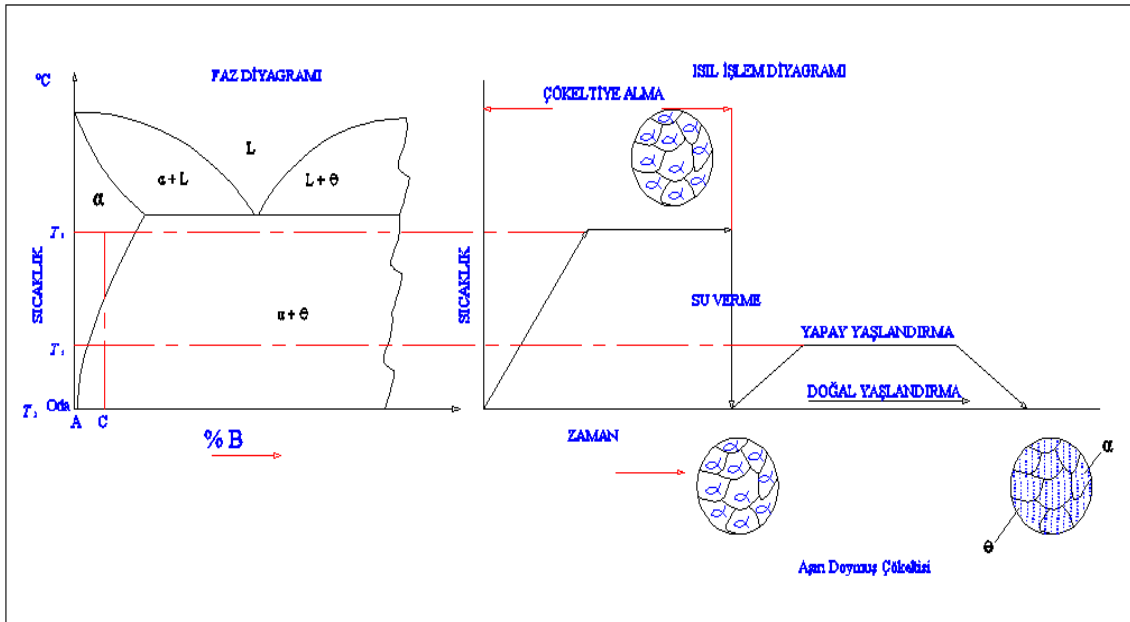
imkan vermez ve aşırı doymuş α katı eriği elde edilir. Bu hali ile α katı eriği kararsızdır. Ayrıca, ani soğuma sonucu yapıda bol miktarda atom boşlukları da mevcuttur [8].

2.1.2 Çökeltme işlemi

Aşırı doymuş katı eriyik içerisinde erimiş halde bulunan ikinci faz, sıcaklık ve zaman etkisiyle kararlı bir faz olarak çökeltir, yani,



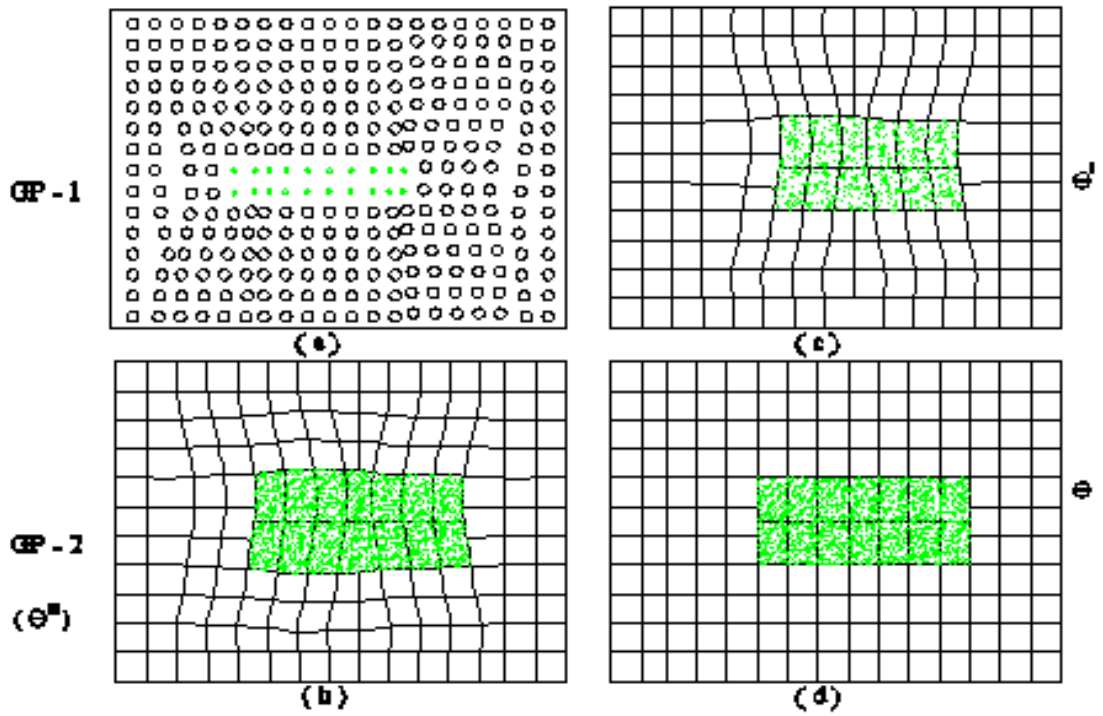
dir. Bu dönüşüm için önce Θ fazının çekirdeklenmesi ve sonra yayınma (difüzyon) ile büyümesi gerekir. Alaşım eğer ani soğutmadan sonra oda sıcaklığında tutulursa yayınma hızı çok yavaş olduğundan Θ çökelti fazı genellikle oluşmaz veya oluşması çok zaman alır. Çökeltme oda sıcaklığında meydana gelebiliyorsa bu alaşımlara 'doğal' olarak yaşlanan malzeme adı verilir. Yayınma hızını artırmak amacıyla, ani soğutulmuş alaşım eğer T_3 gibi yüksekçe bir sıcaklıkta yeterince tutulursa, çökeltme daha kısa bir zamanda meydana gelir ki bu işlem 'yapay yaşlanma' olarak tanımlanır [8].



Şekil 2. 1 Doğal ve yapay yaşlandırma kademelerini gösteren ısı işlem diyagramları.

Çökelti Fazının Oluşumu: Çökelti fazının etüdü, X-ışınlarının keşfinden sonra gelişme göstermiştir. İlk çalışma ticari önemleri nedeni ile genellikle Al alaşımlarında yapılmıştır. Cu, Zn, Ag, alaşım elementlerinin atom No' ları Al' dan daha büyük olduğu için çökeltilerin, X-ışınları veya elektron mikroskobu ile izlenmesi oldukça kolaydır. İlk defa 1938 'de Guinier ve Preston adlı iki araştırmacı , % 4.5 Cu içeren Al alaşımında X-ışınları ile çökeltilerin etüdünü yapmışlardır. Bu nedenle literatürde ön kademe çökeltileri bu iki araştırmacının isimlerine izafeten GP zonları olarak tanımlanır.

Şekil 2. 2' de Al - Cu alaşımlarında çökelti fazının oluşumu görülmektedir. Çökelti fazının çekirdeklenmesi Şekil 2. 2. (a) da görüldüğü gibi Cu atomlarının yerini alarak gerçekleşmişse, latisde çökelen atomlarla matris atomlar arasında yatay ve düşey yönde uyum mevcuttur. Disk şeklindeki bu çözelti tamamen uyumlu olup, çökelti ile matris arasında uyumsuzluk, sadece atom çapları arasındaki farktır. Çekirdeklenme kademesindeki bu çökelti GP-1 zonu olarak tanınır ve boyutları yaklaşık olarak 100 Å çapında ve 10-15 Å yüksekliğindedir. GP-1 zonunun Al-Cu alaşımında, Al matrisin 100 düzlemlerine çöktüğü saptanmıştır [8].



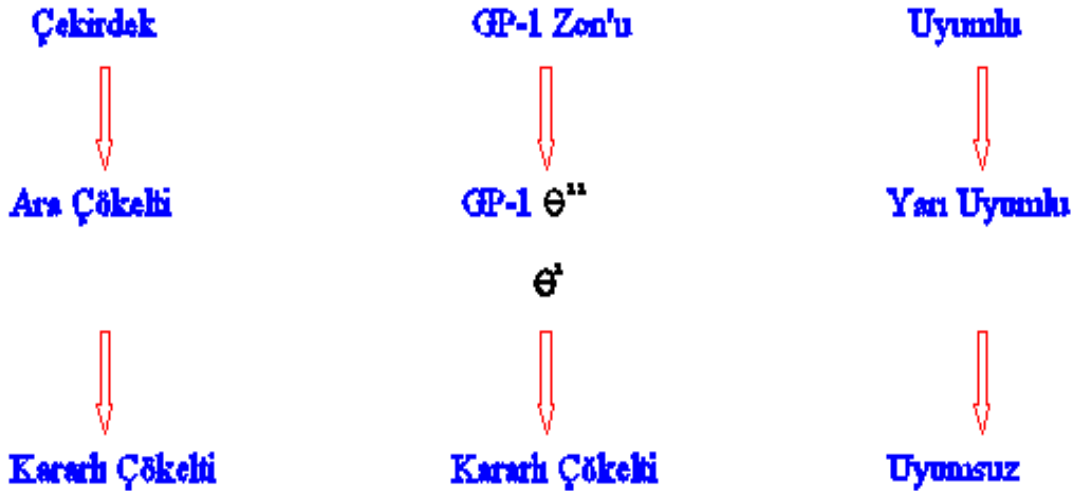
(a) GP-1 zonu (b) GP-2 zonu (c) θ^I yapısı (d) θ yapısı

Şekil 2. 2 Al-Cu alaşımında yaşlanma esnasında oluşan çökelti fazının kademeleri [8]

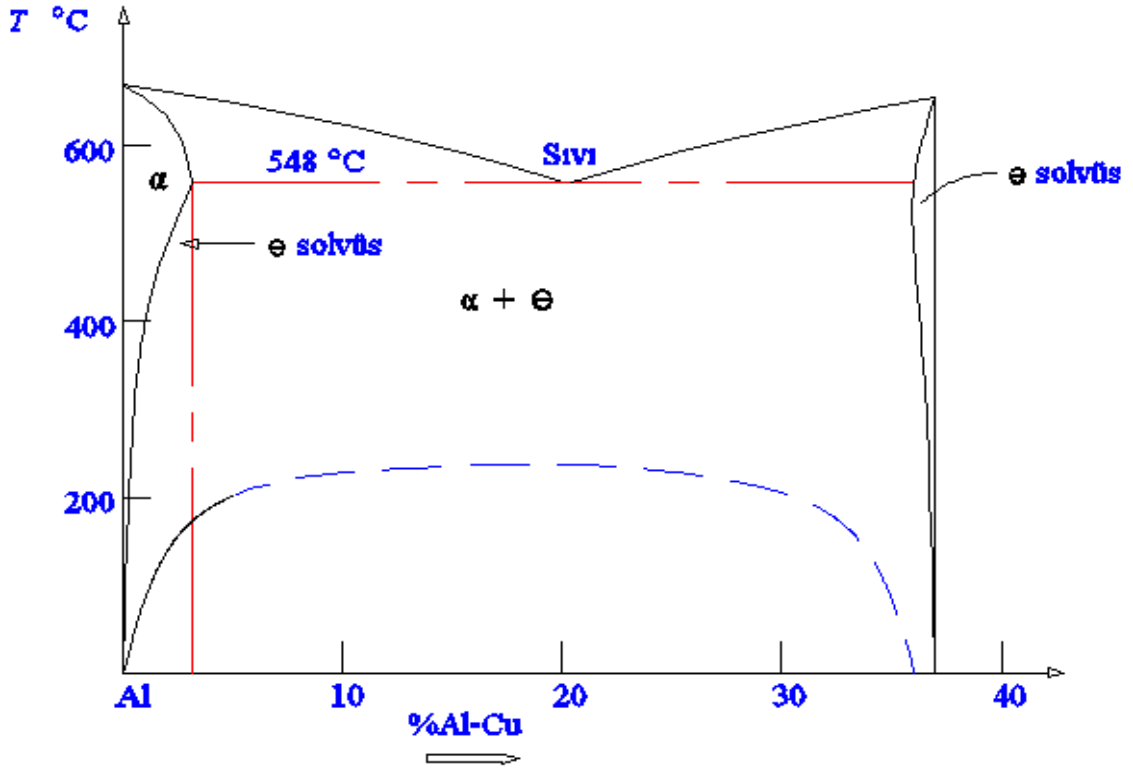
GP-1 zonu, yaşlanma süresi arttıkça büyüme fırsatı bularak GP-2 zonuna dönüşür. Bu durumda çökeltinin boyutu 1500 Å çapında ve 150 Å yüksekliğindedir. Bu çökelti Al-Cu sisteminde tetragonal yapıdadır ve bu nedenle bazen GP-2 zonu yerine 'ara çökelti' kabul edilir ve Θ^{II} ile simgelenir. Çökelti, matris ile Şekil 2. 2. (b)' deki gibi uyumludur.

GP-2 veya Θ^{II} zonu eğer uzun süre yaşlanmaya tabi tutulursa, çökelti Al-Cu alaşımında tetragonal yapıdaki sırasıyla Θ^{II} ve Θ yapılarına dönüşür ki bunlar $CuAl_2$ ara fazıdır. Bu kademe çözeltinin boyutları çok büyüdüğünden optik mikroskopla kolayca gözlenebilir. Oysa GP-1 ve GP-2 zonları ancak elektron mikroskobu(TEM) ile ayırt edilebilmektedir. Θ^I yapısı Şekil 2. 2. (c) gibi kısmen uyumludur, buna karşılık, Θ yapısı tamamen uyumsuzdur. Yani, çökelti ile matris atomları arasında yatay ve dikey doğrultuda uyumsuzluk vardır. Şekil 2. 2. (d)

Yaşlanma olayı da çökelti fazının oluşum kademeleri özetlenecek olursa sırasıyla;



şeklindedir. Uyumlu GP-zonları kararsız olduklarından her sıcaklıkta teşekkül etmeyebilir. Bu durum Şekil 2. 3' de Al-Cu sisteminde gösterilmiştir. Al-Cu denge diyagramındaki kesikli çizgi 'uyumlu faz diyagramı' olarak tanınır. Bu diyagrama göre Al-Cu sisteminde kararlı GP-zonlarının teşekkül edeceği maksimum sıcaklık oldukça düşüktür [8].

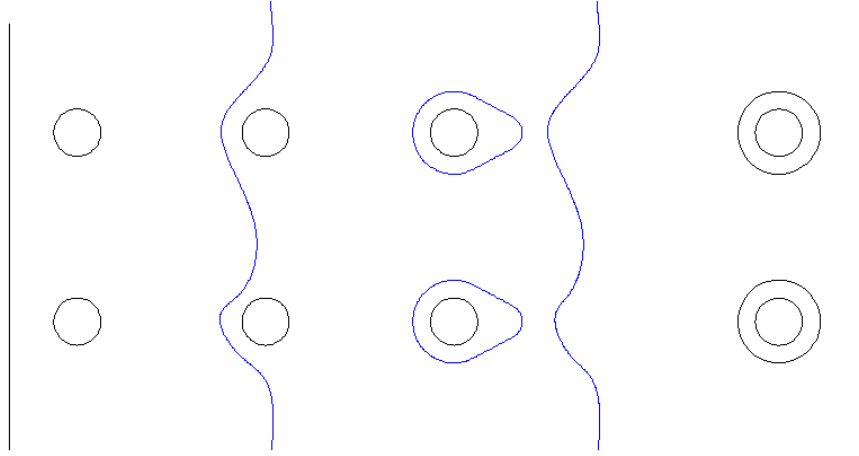


Şekil 2. 3 Yarı kararlı GP alanını gösteren Al-Cu faz diyagramının bir kısmı [8]

Bunun sebebi; Cu ve Al atom çapları arasındaki farkın büyük olmasıdır. Bu durum, çökelti etrafındaki latis distorsiyon enerjisinin büyük olmasına neden olur. Al-Cu sisteminde GP-zonu içeren alaşım, eğer 190°C' nin üzerinde ısıtılırsa GP-zonları kaybolur, 190°C' nin altında soğutulduğunda ise GP-zonları yeniden teşekkül eder [8].

2.2 Yaşlanma Sonucu Mekanik Özelliklerde Meydana Gelen Değişim

Dislokasyon teorisinden çok iyi bilinmektedir ki, dislokasyon hareketine her hangi bir şekilde engel olduğunda malzemenin mukavemeti artar. Tane içerisindeki ince çökelti, genellikle matristen daha sert oldukları için deformasyon esnasında dislokasyon hareketine birer engel teşkil eder. Öyleki, çökelti arasında kalan dislokasyon parçası Şekil 2. 4 de görüldüğü gibi kıvrımlaşır ve neticede çökelti etrafında dislokasyon halkası teşekkül eder [8].



Şekil 2. 4 Al-Cu alaşımında yaşlanma esnasında oluşan çökelti fazının kademeleri [8]

Dislokasyonlar her yönde hareket ettiğinden, çökelti etrafındaki halka sayısı da o kadar artar ve çökelti fazı etrafında genellikle bir *dislokasyon yumağı* oluşur. Böylece, malzemede dislokasyon yoğunluğu artar. Dolayısıyla, ince çökelti fazı içeren bir malzemede mukavemetin veya sertliğin artmasının başlıca nedeni;

1. Dislokasyon yoğunluğunun artması
2. Dislokasyon halkalarının oluşumu nedeniyle dislokasyon engelleri arasındaki mesafenin azalması sonucu dislokasyonların gittikçe daha zorlanarak hareket etme durumunda kalmasıdır [8].

Alüminyum alaşımların kompozisyonlarına, çözündürme ısı işlem sıcaklıklarının ve sürelerinin farklılığına, soğutma hızlarındaki farklılıklara ve yaşlandırma ısı işlem sıcaklık ve sürelerinin farklılıklarına göre çok değişik özellikler elde edilebilir.

2.3 Alüminyum Alaşımları İçin Temper (Isıl İşlem) Göstergeleri

Döküm veya biçimlendirilmek suretiyle elde edilen, Alüminyum ve alüminyum alaşımlarının ısı işlem durumları, ilave edilen bir veya birkaç harf ile tanımlanır.

Esasen 4 tür ısı işlem göstergesi kullanılmaktadır. Bunlardan (O) tavlı ; (F) fabrikasyondan sonraki hali ; (H) sıcaklıklarda yapılan plastik şekillendirme sonucu sertlik ve mukavemetin artışı (T) ısı işlem halini göstermektedir. (W) çözeltiye alma

ısl ısıl işleminden sonraki kalıcı olmayan yapıyı göstermekle beraber, şayet zamanı verilmiş ise o takdirde belirli bir ısıl işlem ifade edilmiş olmaktadır [9].

Çeşitli ısıl işlemlerin niteliklerine ait açıklamalar aşağıda verilmiştir.

F : Fabrikasyondan sonraki hali (üretildiği gibi)

Bu hal; Mukavemet veya sertliğini değiştirmek amacıyla hiçbir ilave işlem yapılmaksızın, imâl edildikten sonraki fiziksel yapısını belirtmektedir. Biçimlendirilen alüminyum alaşımlarının mekanik özelliklerinin hiçbir garantisi yoktur. Döküm hali için, örneğin 43-F işareti kullanılmaktadır [10].

O: Tavlı, rekristallize olmuş hali :

Biçimlendirilebilen alüminyum alaşımlarının en yumuşak halidir.

H: Genellikle, yassı ürünler (levha/sac) için kullanılan bir notasyondur. Soğuk biçimlendirme (Rekristalizasyon sıcaklığının altında yapılan plastik şekillendirme) sonucu ve kısmi bir yumuşama elde etmek üzere ilave ısıl işlemin yapıp yapılmamasına rağmen biçimlendirilebilen alüminyum alaşımlarında elde edilen mukavemet ve sertlik artışını ifade eder [10].

(H) ‘dan sonra genellikle iki veya daha fazla rakam vardır. İlk rakam, esas işlemleri ifade eder. Daha sonraki rakamlar, plastik şekillendirme sınırları içindeki nihai fiziksel özelliklerini belirtir.

Bu rakamların ifade ettiği özellikler aşağıda belirtilmiştir:

H 1: Plastik şekillendirme sınırları içinde sadece şekil verilmiştir. İkinci rakam, yapılan soğuk işlemi ifade etmektedir. Şöyle ki; 8 rakamı erişilebilen en sert hali ifade eder. Böylece (H18) Bu sonucu gösterir. En sert ile yumuşak arasındaki orta sertlik (H14) şeklinde ifade edilir. Aynı şekilde dörtte bir sertlik ise (H12) şeklinde belirtilir.

Üçüncü rakam, harici özellikleri belirtmek için kullanılır.

Şöyle ki; (H141), (H14) sağladığı aynı minimum özellikleri vermekle beraber maksimum değerler standart değerlere daha çok yakındır. Üçüncü rakam, (H14) den daha farklı değerleri ifade etmekle beraber (H13) veya (H15) in yerine geçecek ölçüde değildir. Çok sert özellikler, üçüncü rakam olsun veya olmasın, ikinci rakam olarak (9)

kullanıldığı zamanı belirtilirler. (H112) işareti "kontrollü" olarak, F-ısıtım işlem halinin garanti edilmiş mekanik özelliklerini gösterir [10].

H 2 : Plastik şekillendirmeden sonra kısmi tav halini ifade eder. Alaşımın plastik şekil alma sonucu belirli bir mukavemet ve sertlik sağladıktan sonra kısmen tav yapılarak bu değerlerin istenen sınırlar içine indirilmesi demektir. Bu durum, ilk rakamın 2 olarak yazılması ile belirtilir. İstenen kalıcı mukavemet ve sertlik (H1) de olduğu gibi ikinci rakam ile belirtilir. Örneğin: H28 tam sert, H24 yarı sert'i ifade eder. Oda sıcaklığında yaşlanma yumuşaması sağlayan alaşımların H2 hali H3 ün fiziksel özelliğine eşit olmaktadır. Diğer alaşımlar bahis konusu olduğunda, H2 hali yaklaşık olarak H1'in fiziksel özelliklerine eşit olmakla beraber, uzama kat sayısı biraz daha fazladır.

H 3: Plastik şekillendirme ve bilâhre stabilizasyon hali. Magnezyum ihtiva eden alüminyum alaşımları düşük temperatürlerde ısıtılmak suretiyle stabilize edilerek mukavemetleri biraz azaltılırken onların şekil alma özellikleri artırılmaktadır. Bu işlem yapılmaz ise, bahis konusu değişiklik oda sıcaklığında çok uzun sürede meydana gelir. Bu işlem (H) dan sonraki üçüncü rakam ile ifade edilmektedir. Plastik şekillendirme işlemi de (H) dan sonraki iki veya ilk rakam ile ifade edilir [10].

W: Çözeltiye alma ısıtım işleminden sonraki kalıcı olmayan yapıyı ifade eder. Bu hal doğal yaşlanmadan ötürü, yaşlanma süresinin verilmesi ile belirtilmiş olur. Örneğin 2024 W (1/2 saat), 7075 W (2 ay) vb.

I: F,O,H halleri dışında, yapıda stabilizasyon sağlanması amacıyla uygulanan ısıtım işlemleri belirtmektedir. Bu harf plastik şekillendirme yapılsın veya yapılsın yapının stabil hale gelmesi için uygulanacak ısıtım işlemi ifade eder. T harfinden sonra 2'den 9'a kadar rakam eklenebilir. Bu rakamlar uygulanacak belli başlı işlemleri gösterirler. 6061-T6 rumuzu alındığında, bahis konusu alaşım için esas işlem'e ilave olarak değişik özellikleri sağlayacak şekilde ayrı işlemlerin uygulanması istendiğinde bu esas rumuza ilaveler yapılmaktadır. Şöyle ki; 6061-T62'de olduğu gibi.

Oda sıcaklığında tabii yaşlanma, esas ısıtım işlemler yapılırken veya yapıldıktan sonra uygulanabilmektedir. Süre, metalürjik açıdan önem taşıyorsa o zaman kontrol edilir. Fakat aksi halde belirtilmemiş olur [10].

T: T notasyonu, ısıtma işlemi yapılarak elde edilen sıcaklıkları ifade eder. Isıtma işlemlerinin değişik türleri, Çizelge 2.1 de verilmiştir.

Çizelge 2. 1 Alüminyum ve alüminyum alaşımlarının yaşlandırma simgeleri [11]

Simge	Açıklama
T1	<p>Yüksek bir mekanik şekillendirme sıcaklığından soğutulup, doğal yaşlandırma ile kararlı duruma getirilmesi.</p> <p>Bu gösterim mekanik şekillendirme sıcaklığından soğutulduktan sonra tekrar soğuk olarak şekillendirme işlemi görmeyen veya soğuk düzleme işlemlerinin mekanik özellikleri etkilemediği ürünlerde kullanılır.</p>
T2	<p>Yüksek bir mekanik şekillendirme sıcaklığından soğutulup, soğuk şekillendirildikten sonra doğal yaşlandırma ile kararlı duruma getirilmesi.</p> <p>Bu gösterim yüksek mekanik şekillendirme sıcaklığından soğutulduktan sonra malzemenin dayanımını artırmak için soğuk olarak tekrar şekillendirilen veya soğuk düzleme işlemlerinin mekanik özellikleri etkilediği ürünlerde kullanılır.</p>
T3	<p>Çözündürme işleminden sonra soğuk şekillendirilmesi ve doğal yaşlandırma ile kararlı duruma getirilmesi.</p> <p>Bu gösterim çözündürme ısıtma işleminden sonra malzemenin dayanımını artırmak için soğuk olarak tekrar şekillendirilen veya soğuk düzleme işlemlerinin mekanik özellikleri etkilediği ürünlerde kullanılır.</p>
T4	<p>Çözündürme işleminden sonra doğal yaşlandırma ile kararlı duruma getirilmesi.</p> <p>Bu gösterim çözündürme ısıtma işleminden sonra malzemenin dayanımını artırmak için soğuk olarak tekrar şekillendirilen veya soğuk düzleme işlemlerinin mekanik özellikleri etkilemediği ürünlerde kullanılır.</p>
T5	<p>Yüksek bir mekanik şekillendirme sıcaklığından soğutulup, oda sıcaklığından daha yüksek bir sıcaklıkta yaşlandırılarak kararlı duruma getirilmesi.</p> <p>Bu gösterim, mekanik şekillendirme sıcaklığından soğutulduktan sonra tekrar soğuk olarak şekillendirme işlemi görmeyen veya soğuk düzleme işlemlerinin mekanik özellikleri etkilemediği ürünlerde kullanılır</p>
T6	<p>Çözündürme işleminden sonra soğutulup, oda sıcaklığından daha yüksek bir sıcaklıkta yaşlandırılarak kararlı duruma getirilmesi.</p> <p>Bu gösterim, çözündürme ısıtma işlemi sıcaklığından soğutulduktan sonra tekrar soğuk olarak şekillendirme işlemi görmeyen veya soğuk düzleme işlemlerinin mekanik özellikleri etkilemediği ürünlerde kullanılır.</p>
T7	<p>Solüsyona alma işleminden sonra soğutulup, oda sıcaklığından daha yüksek bir sıcaklıkta aşırı yaşlandırılarak kararlı duruma getirilmesi.</p> <p>Bu gösterim, çözündürme ısıtma işlemi sıcaklığından soğutulduktan oda sıcaklığından daha yüksek bir sıcaklıkta maksimum mukavemet değerinin ötesindeki değerlere aşırı yaşlandırılarak mekanik özellikler dışında bazı belirgin karakteristikleri kazanmakta kullanılır.</p>

2.4 Soğutma Hızının Önemi

Solüsyona alma safhasından sonra yapısında α tanecikleri içeren alaşımın hızlıca soğutulması önemlidir. Bu aşamada temel amaç katı eriyikte oluşan malzeme yapısını hızlı bir şekilde soğutarak korumak, kafesler arası boşlukların mesafesini en azda tutmaktır.

Malzemenin korozyon direnci ve mekanik özelliklerinin istenen seviyelerde olabilmesi için malzemenin aşırı doymuş α yapılarından oluşması dolayısıyla solüsyona alma işleminden sonra malzemenin hızlı bir şekilde soğutulması gerekmektedir. Soğutma işlemi soğuk su, kaynar su, poliyalkylene glikol, hava vb. akışkanlar ile sağlanabilmektedir.

Çizelge 2. 2 Soğutma hızının malzeme özellikleri üzerindeki etkisi [12]

Alaşım	Soğutma Şekli	Gerinme (%)	Yaşlanma Şekli	Akma Gerilmesi (Mpa)	Çekme Gerilmesi (Mpa)	50 mm'de uzama miktarı (%)
Al-2.28Li-0.86Cu-0.9Mg0.13Zr-0.13Fe-0.06Si	Hava (~ 0.25 °C/s)	2	190 °C/16 saat	380	446	7,70
		4	170 °C/24 saat	401	465	6
	Polimer (~ 15 °C/s)	2	190 °C/16 saat	415	481	8
		4	170 °C/24 saat	415	481	7,2
	Soğuk Su(~ 120 °C/s)	2	190 °C/16 saat	428	492	8,1
		4	170 °C/24 saat	417	483	7,5
Al-2.58Li-1.36Cu-0.89Mg0.13Zr-0.17Fe-0.04Si	Hava (~ 0.25 °C/s)	2	190 °C/16 saat	417	485	6,5
		4	170 °C/24 saat	442	503	4,5
	Polimer (~ 15 °C/s)	2	190 °C/16 saat	448	524	6,8
		4	170 °C/24 saat	448	519	5
	Soğuk Su(~ 120 °C/s)	2	190 °C/16 saat	464	535	8,2
		4	170 °C/24 saat	448	517	6,3

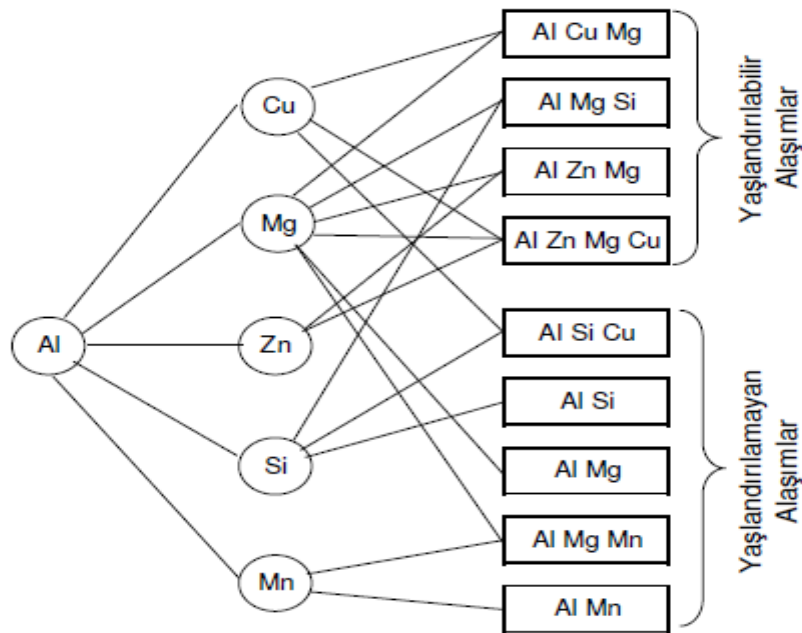
2.5 Alüminyum Alaşımlarında Yaslandırılabilir Alaşımların Yeri

Alüminyum düşük yoğunluk, yüksek korozyon direnci gibi üstün özelliklerinden dolayı makine, taşıt ve yapı endüstrisinde geniş olarak yararlanılmaktadır. Alüminyumun diğer metallere göre daha hafif olması ve aynı hacme sahip çelik, bakır ve pirincin yaklaşık 1/3 katı ağırlığındadır. Aynı ağırlıktaki malzemeler esas alındığında bir çeliğe göre 8 kat daha rijit, 3 kat daha mukavemetli olmuş olur. Saf halde çok yumuşak olan alüminyum, alaşımlandırma, soğuk haddeleme ve ısıl işlem gibi yöntemlerle mukavim hale getirilir. Alaşım elementleri alüminyumun mekanik özelliklerinin geliştirilmesinde çok önemli rol oynamalarına rağmen, çoğu kere sadece mukavemet arttırmak için alüminyuma ilave edilirler [13].

Alüminyum alaşımlarının mukavemetini arttırmada genel olarak iki metot kullanılır.

- 1- Katı eriyik içerisinde alaşım elementlerini çözmek ve uyumlu küçük partiküller olarak çöktürmek,
- 2- Katı eriyik içerisinde alaşım elementlerini disperse etmek ve alaşıma soğuk işlem uygulamak.

Genel olarak alüminyum alaşımları ve bu alaşımlara uygulanan işlemler Şekil 2. 2 de görülmektedir.



Şekil 2. 5 Başlıca alüminyum alaşımları [13]

Bu alaşım sistemlerine ilaveten alüminyum alaşımlarının mekanik ve fiziksel özelliklerini geliştirmek için antimon, arsenik, berilyum, bor, indiyum, kadmiyum, kalsiyum, krom, nikel, seryum ve titanyum gibi elementlerle alaşımlandırılabilir [13].

2.6 Yaşlandırılabilir Alüminyum Alaşımları

Alüminyumda sekiz elementin katı eriyebilirliği % 1 den fazladır. Fakat bu elementlerin düşük sıcaklıklarda katı eriyebilirlikleri çok düşüktür. Bu özelliklerden dolayı yaşlandırma ile çökelti partikülü oluşturarak alüminyum alaşımlarının mekanik özelliklerinin iyileştirmesine fırsat verilir. [13] Bu alaşım elementlerinden gümüş, galyum ve germanyumun çok pahalı olması ve lityum'un proses (işlem) güçlüğü nedeniyle özel alaşımlarda kullanılır. Diğer dört element çinko, magnezyum, bakır ve silisyum yaşlandırılabilir ticari alüminyum alaşımlarını oluşturulmasında kullanılır [13].

BÖLÜM III

MALZEME VE YÖNTEM

3.1 Malzeme

6000 (6XXX) seri alüminyum alaşımları (Al-Mg-Si) orta mukavemetli alaşımlar olup ekstürüzyon ürünlerinde ve otomobil kaportalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Çok iyi şekillendirme ve korozyon direncine sahiptirler. 6061 alaşımı ise bu seri içerisinde en yaygın kullanım alanına sahip alaşımdır.

Bu alaşımlara ısıtıl işlemler uygulanarak mekanik özelliklerinde iyileştirmeler sağlanabilmektedir. Literatürde yaşlandırma olarak bilinen bu prosesin belirli sürelerde ve sıcaklıklarda uygulanmasıyla mukavemet özelliklerinde büyük iyileştirmeler sağlanmaktadır. Bu çalışmada kullanılan 6061 alüminyum alaşımının kimyasal kompozisyonu Çizelge 3. 1’ de verilmiştir.

Çizelge 3. 1 6061 alüminyumun kimyasal özellikleri

Element	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Cr	Ti	Diğer
Miktar (Ağırlık %)	0,4-0,8	Maks. 0,7	0,15-0,4	Maks. 0,15	0,8-1,2	Maks. 0,25	0,04-0,35	Maks. 0,15	0,05

Mg ve Si miktarlarının, yapay yaşlandırma ısıtıl işlemi (termik) sonrası sertliğinde büyük önemi vardır. 6061 alüminyum alaşımı 6XXX serisi alaşımlar içinde en yaygın olanıdır. Isıl işlem uygulanarak farklı mekanik özellikler kazandırılabilmesinden dolayı yaygın kullanım alanına sahiptir.

Çizelge 3. 2 6061 Alüminyum alaşımının farklı yaşlandırma karakteristiklerinde mekanik özelliklerinin karşılaştırılması [14]

Al 6061	Et Kalınlığı(mm)	Gerilme Mukavemeti				Uzama(%)	Brinell Sertliği (500 kg yük ve 10mm çapında bilye)
		Maksimum Gerilme (MPa)		Akma Gerilmesi(MPa)			
		min.	max.	min.	max.		
0	-----	-----	151,8	-----	110,4	16	30
T1	Max 15,875	179,4	-----	96,6	-----	16	-----
T4,T4511	-----	179,4	-----	110,4	-----	16	65
T51	Max 15,875	241,5	-----	207	-----	8	-----
T6,T6511	Max 6,3246	262,2	-----	241,5	-----	8	95
	Min 6,35	262,2	-----	241,5	-----	10	95

Alaşım	Isıl İşlem	Şekillendirilebilme		İşlenebilirlik				Korozyona Karşı Dayanıklılık				Kaynak Kabiliyeti				Lehim Kabiliyeti				Anotlamaya Karşı Direnç			
		Düşük	Yüksek	D	C	B	A	D	C	B	A	D	C	B	A	D	C	B	A	D	C	B	A
6061	-O	██████████	██████████	█				██████████	██████████	██████████	██████████	██████████	██████████	██████████	██████████	██████████	██████████	██████████	██████████	██████████	██████████	██████████	N/A
6061	-T1, -T4, -T4511	██████████	██████████	██				██████████	██████████	██████████	██████████	██████████	██████████	██████████	██████████	██████████	██████████	██████████	██████████	██████████	██████████	██████████	██████████
6061	-T6, -T6511,	██████████	██████████	██				██████████	██████████	██████████	██████████	██████████	██████████	██████████	██████████	██████████	██████████	██████████	██████████	██████████	██████████	██████████	██████████
6061	-T51	██████████	██████████	██				██████████	██████████	██████████	██████████	██████████	██████████	██████████	██████████	██████████	██████████	██████████	██████████	██████████	██████████	██████████	N/A

Değerlendirme: A:Mükemmel B:iyi C:Orta D:Zayıf

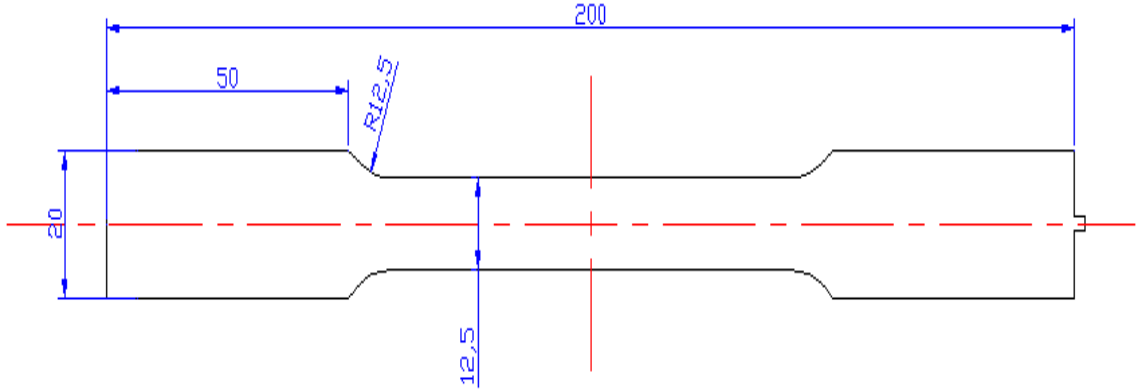
3.2 Deney Numunelerinin Hazırlanması

Yaşlandırma parametrelerinin 6061 alüminyum alaşımının mekaniksel özelliklerine etkisinin incelenmesi için 1 mm kalınlığındaki alüminyum sac levhadan farklı yönlerde haddelene yönü, haddelene yönüne dik ve kırk beş derece açı yapacak şekilde Fotoğraf 3. 1’de gösterilen çekme testi numuneleri hazırlanmıştır. Numunelerin hazırlanmasında CNC su jeti kullanılmıştır.



Fotoğraf 3. 1 Çekme deney numunesi AA6061

42 Çekme deney numunesi hazırlanmıştır. Her deney için 2'er numune kullanılacak şekilde toplam 21 deney şartı belirlenmiştir. Malzemelerin birbirine karışmaması için numaratorler ile sırayla numaralandırılmışlardır.

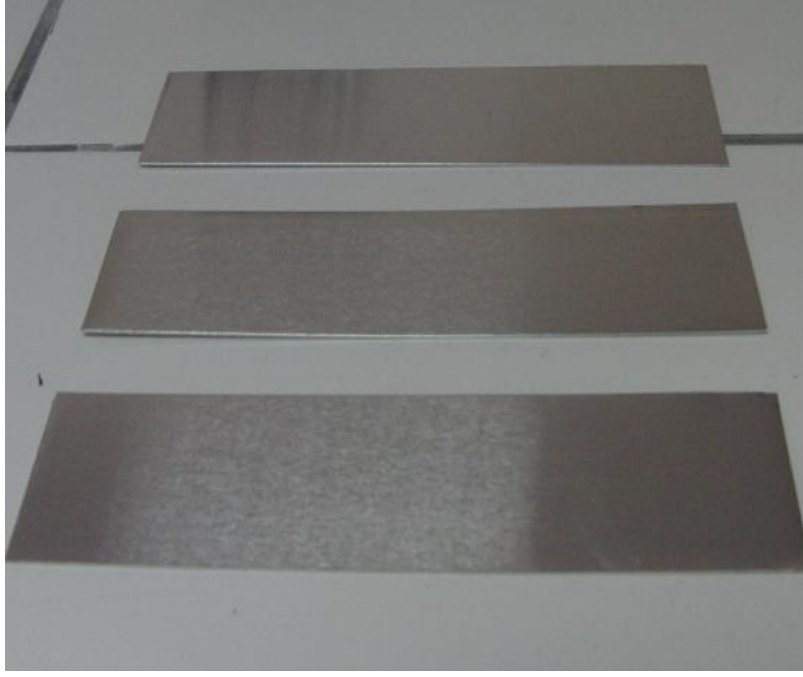


Şekil 3. 1 Çekme deney numune ölçüleri (t = 1 mm)

Çekme testi deney numuneleri ASTM E8M standardına göre üretilmiş olup ölçüleri Şekil 3. 1' de verilmiştir.

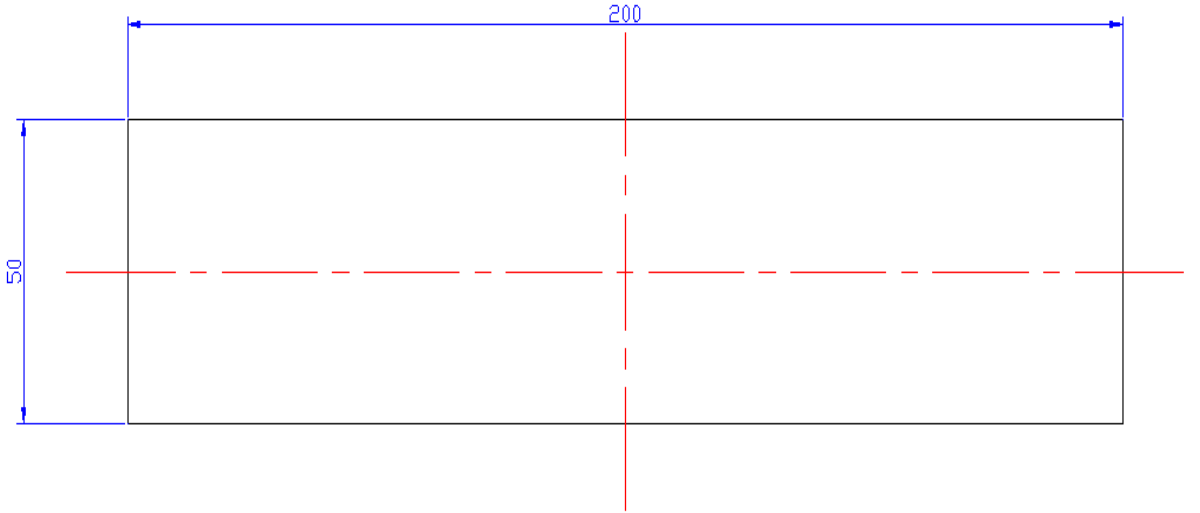
Çekme deneyleri sonuçlarına göre uygun olan 3 yaşlandırma zamanına göre anizotropi, geri esneme ve derin çekme numuneleri hazırlanmıştır. Anizotropi numuneleri, ölçü olarak çekme numuneleri ile aynıdır sadece hadde yönüne dik ve hadde yönüne 45°'lik numuneler hazırlanmıştır. Her şart için 2 adet olmak üzere toplam 18 adet numune hazırlanmıştır.

Geri esneme ve derin çekme numuneleri yine aynı şartlarda yaşlandırma işlemi uygulanmıştır, fakat deneyler uygulamaları farklı olduğu için boyutlar değişmiştir. Bu deneyler içinde 18 adet numune hazırlanmıştır.



Fotoğraf 3. 2 Geri esneme ve Erichsen deney numuneleri AA6061

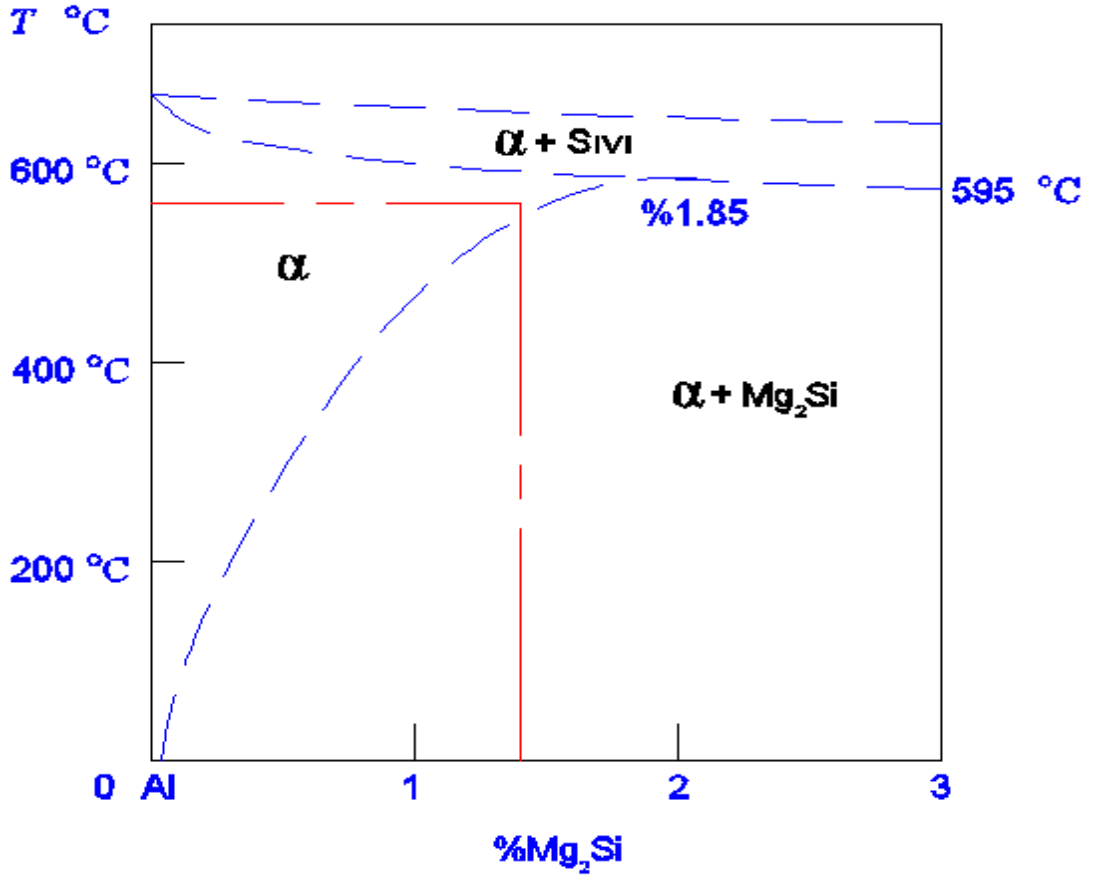
Geri esneme ve Erichsen testi deney numunesi için ölçüler Şekil 3. 2' de verilmiştir. Testler için numune ölçülerinin aynı olmasının sebebi yaşlandırma işlemlerini aynı şartlarda uygulamak içindir.



Şekil 3. 2 Geri yaylanma ve Erichsen tesiti numune ölçüleri (t = 1 mm)

3.3 Isıl İşlem Karakteristikleri

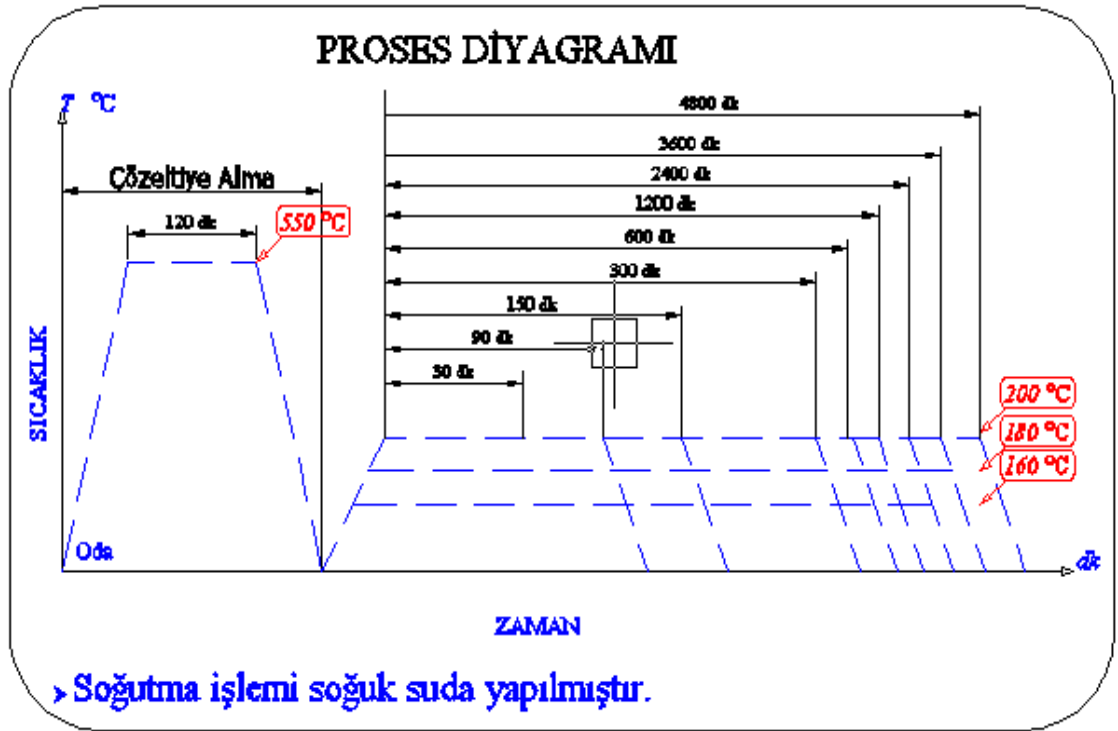
Bu çalışmada yaşlandırmada zamanın ve sıcaklığının mekanik özelliklere etkisi inceleneceğinden her yaşlandırma safhasında farklı zaman aralıkları kullanılmıştır. Aşağıdaki grafikte zaman aralıkları ve sıcaklıklar gösterilmektedir.



Şekil 3. 3 6061 Alüminyum alaşımı denge diyagramı [15]

Yaşlandırma işleminin ilk aşaması olan çözeltiye alma işlemi için, gerekli olan çözeltiye alma sıcaklık değeri Şekil 3. 3' de gösterilen Al-Mg₂Si denge diyagramı kullanılarak belirlenmiştir.

6061 alüminyum alaşımımızın bünyesinde %1,45 Mg₂Si bileşiği bulunduğundan bu miktara karşılık gelen çözeltiye alma sıcaklığı 550⁰C olarak seçilmiştir. Θ fazının (Mg₂Si) α katı eriği içerisinde tamamen çözülmesi için bu sıcaklıkta bekletilme süresi 2 saat seçilmiştir.



Şekil 3. 4 Yaşlandırma safhaları [15]

Yaşlandırma sıcaklıkları ise daha önceden bu konuda yapılmış olan diğer literatür çalışmaları değerlendirilerek seçilmiştir [16, 17, 18].

Dinlendirme ise soğutma işlemi en hızlı olacak şekilde soğuk su ile yapılmıştır. Çözeltiyeye alma işleminden sonra suda malzemenin istenen düzeyde soğutulması sağlanmıştır.

3.4 Sertlik

Yaşlandırma işleminden sonra malzemelerin sertlik değerleri ölçülmüş ve karşılaştırmalar yapılmıştır.

Deneylerin ilk aşamasında numunelerin her birinden; iki adet bir ucundan, iki adet de diğer ucundan olmak üzere toplam 4 adet ölçüm alınmıştır. Böylece her yaşlandırma aşaması için 8 sonuç elde edilmiş ve ortalaması alınarak karşılaştırma yapılmıştır.

Sertlik ölçümleri fotoğrafı verilen (Fotoğraf 3. 3) Mitutoyo HV-100 model Vickers sertlik ölçüm cihazı ile yapılmıştır. 10 kilogram'lık yük uygulanmıştır.



Fotoğraf 3. 3 Vickers sertlik ölçüm cihazı

3.5 Çekme Deneyi

Yaşlandırma işlemi yapılmış olan numuneler çekme deneyi yapılarak maksimum gerilme, akma gerilmesi, birim deformasyon, mukavemet katsayısı ve pekleşme katsayısı gibi mekanik özellikleri incelenmiş olup, her deney şartı için karşılaştırmalar yapılmıştır.

Grafiklerde karşılaştırmalar yaşlandırma sıcaklıklar ve zaman parametreleri şeklinde değerlendirilmiştir.

Deneyler Fotoğraf 3. 4' de görülen Shimadzu AGS100kN çekme deney cihazında yapılmıştır. Cihaz bir video ekstensometre ve bir de fırın ile beraber çalışmaktadır.



Fotoğraf 3. 4 Çekme deney cihazının genel görünümü

Malzemede oluşan uzamayı temassız ölçebilmek için video ekstensometre cihazı kullanılmaktadır.

Cihaz o anki kuvveti “N” cinsinden, stroğu (iki çene arası mesafe) “mm” cinsinden ve ilk boya göre uzamayı “mm” cinsinden olmak üzere 3 veri sütunu aktarır. Bu veriler programdan “export” yapılarak(dışarı alınarak) “.txt” uzantılı dosya olarak kaydedilir, oradan MS Excel ve ORIGINPRO programlarından faydalanılarak veriler üzerinde işlem yapılabilir hale getirilir.

3.5.1 Anizotropi katsayısı

Sac şekillendirme işlemleri sırasında malzemenin incelmeye karşı gösterdiği direnç, plastik birim şekil değiştirme değerlerinin oranı olan dikey anizotropi değeri (r) ile ölçülür. r değeri, çekme testindeki genişlik yönündeki gerçek uzama (ϵ_w) ile kalınlık yönündeki gerçek uzama (ϵ_t) oranıdır (Şekil 3.5). Derin çekmede kullanılan en önemli parametre r değeridir. r değeri malzemenin akma veya derin çekilme kabiliyetini etkiler. r değeri ne kadar büyükse şekillendirme o oranda kolaylaşır [19].

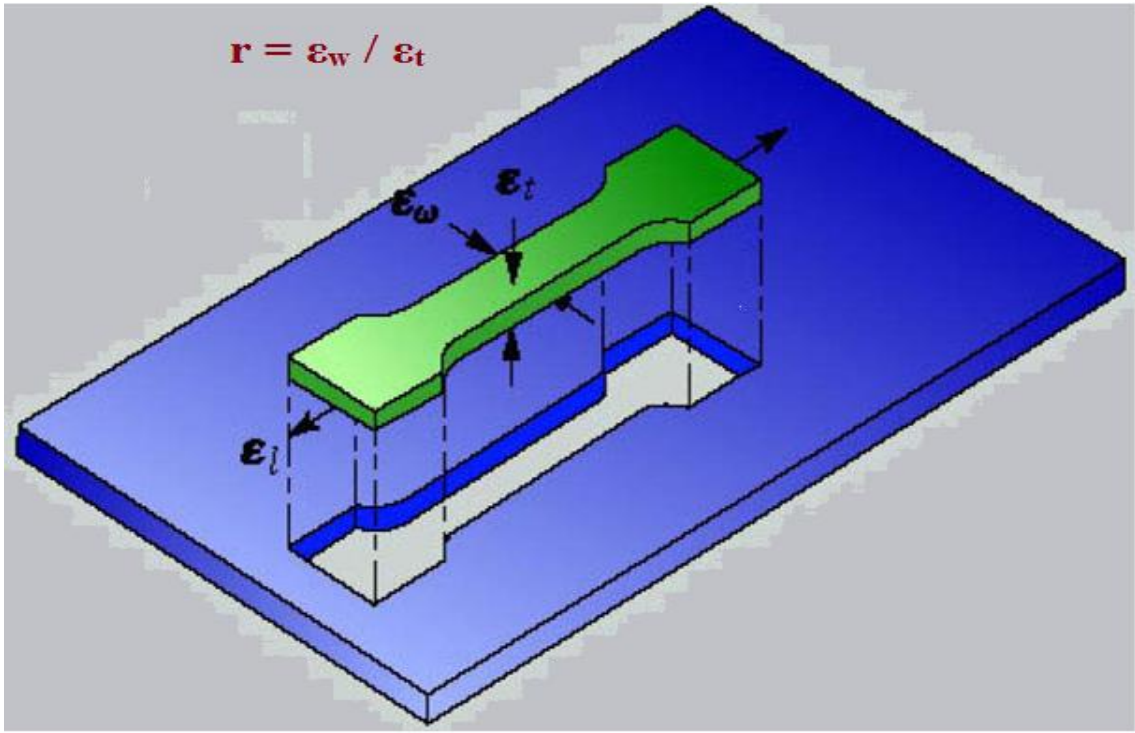
Saclarda normal anizotropi (r);

$$r = \varepsilon_w / \varepsilon_t \quad (3.1)$$

olarak tanımlanır. Burada;

ε_w = Genişlikteki birim şekil değişimi

ε_t = Kalınlıktaki birim şekil değişimi



Şekil 3.5 Anizotropi katsayısının çekme deneyi ile ölçümü [19]

Haddelenmiş sacların mekanik özellikleri sac düzlemindeki yönlere bağlı olduğundan (Şekil 3.5), farklı yönlerde ölçülen r değerlerinin ortalaması, ortalama anizotropi katsayısı olarak tanımlanır [19].

Hacim sabitliğinden

$$W_0 \cdot l_0 \cdot t_0 = W \cdot l \cdot t \quad (3.2)$$

$$t/t_0 = (W_0 \cdot l_0) / (W \cdot l) \quad (3.3)$$

$$r = \varepsilon_w / \varepsilon_t = \ln (W / W_0) / \ln (W_0 \cdot l_0 / W \cdot l) \quad (3.4)$$

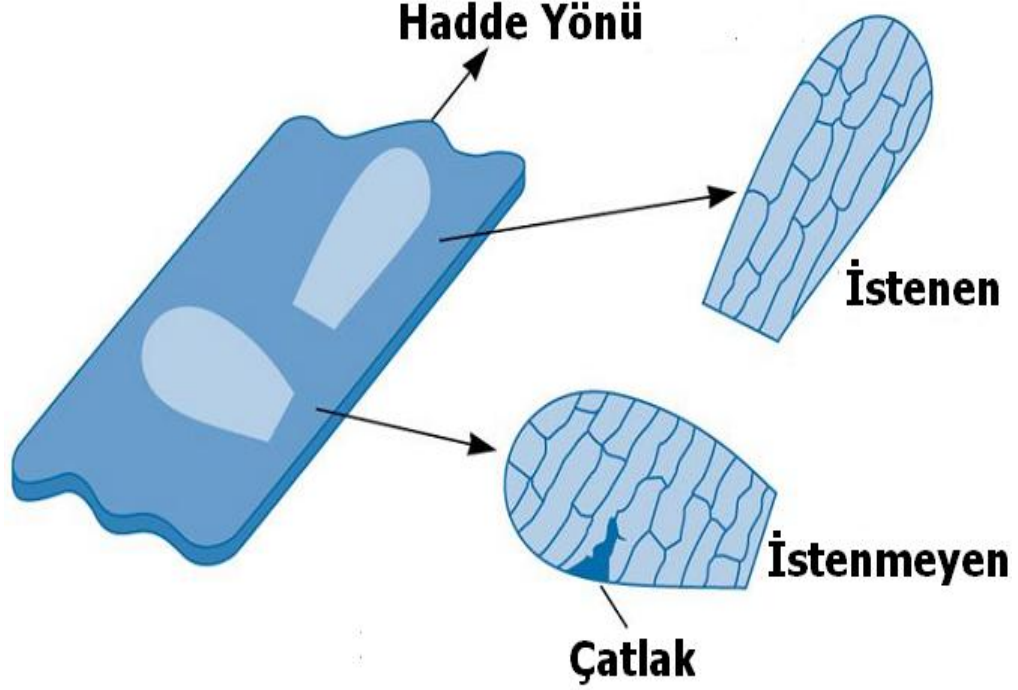
$$r_n = (r_0 + r_{90} + 2 r_{45}) / 4 \quad (3.5)$$

Burada

r_0 = Hadde yönündeki anizotropi katsayısı

r_{90} = Haddeye dik yöndeki anizotropi katsayısı

r_{45} = Hadde yönüyle 45° açı yapan anizotropi katsayısıdır.



Şekil 3.6 Anizotropi değerinin test yönüne göre değişimi [19]

Ortalama anizotropi katsayısı değeri arttıkça sacların derin çekilebilirliği de artar. Derin çekme işlemlerinde dikey anizotropi özelliği istenmesine rağmen, düzlemsel anizotropi özelliği istenmez. Düzlemsel anizotropiye sahip parçalar hadde yönünde, haddeye dik yönde veya bu iki yön arasındaki herhangi bir açıya sahip yönde (örneğin 45° açılı yönde) farklı plastik şekil değiştirme özelliği gösterirler. Bu tür malzeme ile üretilen kabın yüksekliğinde “kulaklanma” adı verilen dalgalanmalar olur. Biçimlendirme sonrasında parçada oluşan kulaklar, parçanın çevresi boyunca kesilir ve metal kaybına neden olur.

Kulaklanma olayının görülmemesi için;

$$\Delta r = (r_0 + r_{90} - 2 r_{45}) / 2$$

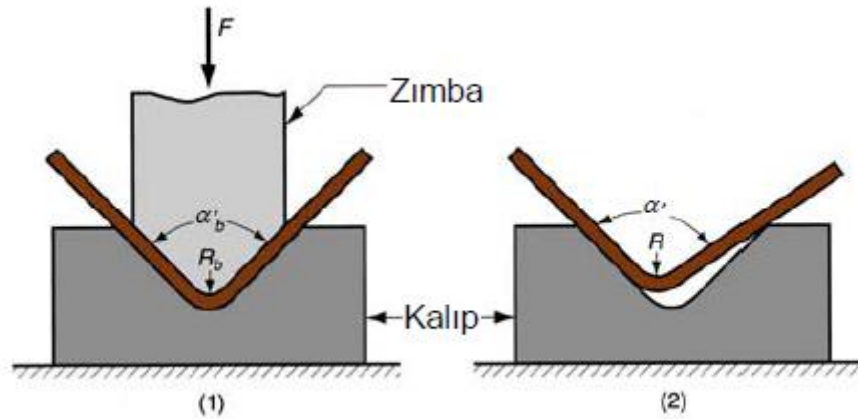
(3. 6)

bağıntısı ile hesaplanan düzlemsel anizotropi katsayısının (Δr) değerinin sıfır olması istenir. Kulaklanma oluşumu Δr değerine bağlı olup, en büyük r değeri yönündedir [20].

Sıcak haddelenmiş düşük karbonlu çelikler 0,8-1,0 arasında, soğuk haddelenmiş çemberli çelikler 1,0-1,4 arasında, soğuk haddelenmiş alüminyum ile söndürülmüş çelikler 1,4-2,0 arasında ortalama anizotropi katsayısı değerlerine sahiptirler. Arayer atomu içermeyen IF çeliklerinde bu değer 1,8-2,5 arasına ulaşır. Ferritik çelikler için maksimum teorik ortalama dikey anizotropi katsayısı değeri 3,0 olmasına karşın, belirlenen en yüksek 2,8'dir. Ortalama anizotropi katsayısının çekme-çekme bölgesinde olan etkisi, çekme-basma bölgesine nazaran daha fazladır ve ortalama anizotropi katsayısında olan bir artış şekillenebilme kabiliyetini negatif yönde etkiler. Uzama sac, malzemelerdeki kristalografik tekstür ile ilgilidir ve anizotropik malzemelerde test yönüyle değişebilir. Haddelenmiş saclar anizotropiktir.

3.6 Geri Yaylanma Deneyi

Yaşlandırma parametrelerinin 6061 alüminyum alaşımının geri yaylanmaya olan etkisini belirlemek için geri yaylanma numuneleri uygun ölçülerde kesilerek 160, 180 ve 200 °C sıcaklıklarda ve 5, 20 ve 40 saat süreli yaşlandırma işlemine tabi tutulmuştur. Daha sonra yaşlandırılmamış ve yaşlandırılmış olan bu numuneler bir "V" bükme kalıbı yardımı ile hızı ve kuvveti ayarlanabilen çekme tezgahında farklı hızlarda bükülmüş ve bükülen her bir parça optik açı ölçerle hassas olarak ölçülmüştür. Bu sayede, ölçmedeki hata en aza indirilmeye çalışılmıştır. Daha sonra geri yaylanma miktarı her bir durum için irdelenmiştir.



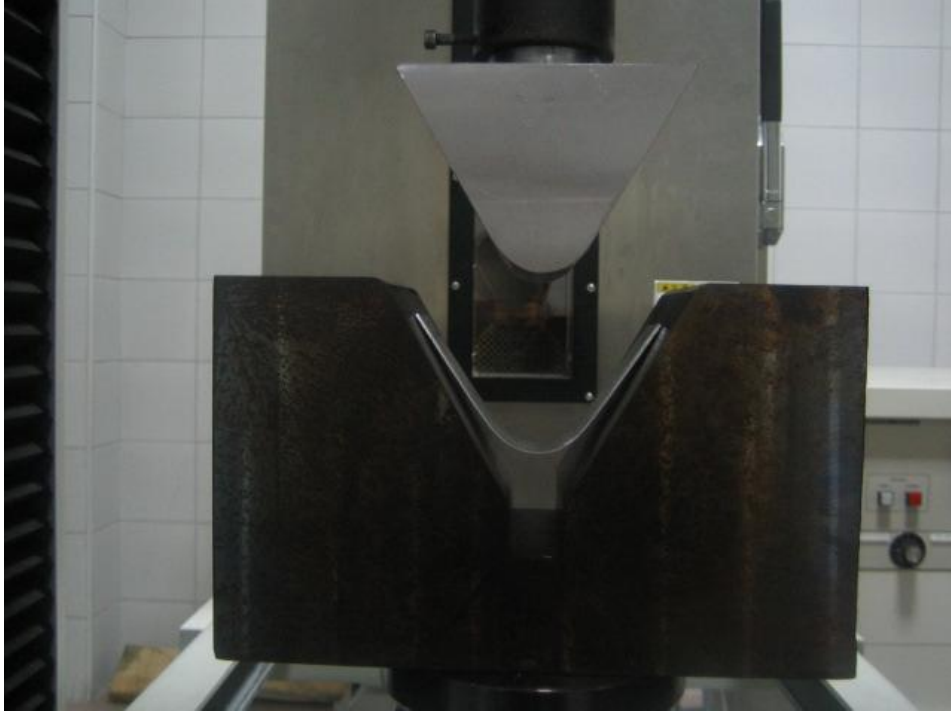
Şekil 3. 7 Geri yaylanmayı olayı

Deneyler Fotoğraf 3. 4’de görülen Shimadzu AGS100kN çekme deney cihazında yapılmıştır.

Cihaz üzerindeki tutturma çeneleri çıkarılarak V dişi ve erkek kalıplar takılarak yapılmıştır. Deneyler için 60° V dişi ve erkek kalıplar kullanılmıştır. 1000 mm/dk’lık ve 25mm/dk’lık erkek kalıp hızları kullanılmıştır.

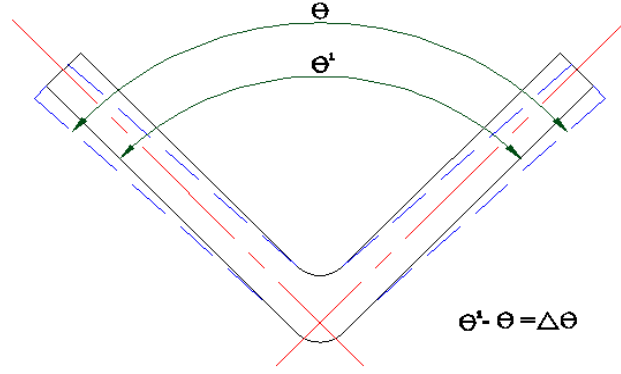
3.6.1 Geri yaylanma

Sac metal levhaların şekillendirilmesinde istenilen form uygun bir şekillendirme operasyonunda ve yeterli kuvvetler altında malzemeye uygulanır. Elde edilen parça elastik ve plastik deformasyonun karışımı ile oluşur. Parça üzerinden kuvvetler kaldırıldığında bir miktar eski haline dönme eğilimi gösterir ki bu davranışa “geri yaylanma” denir. Bükme operasyonunda geri yaylanma malzemenin cinsine, malzeme kalınlığına, bükme açısına, bükme yarıçapına, dişi ve erkek kalıp arasındaki kalıp boşluğuna, yağlama koşulları gibi birçok etkene bağlıdır [21].



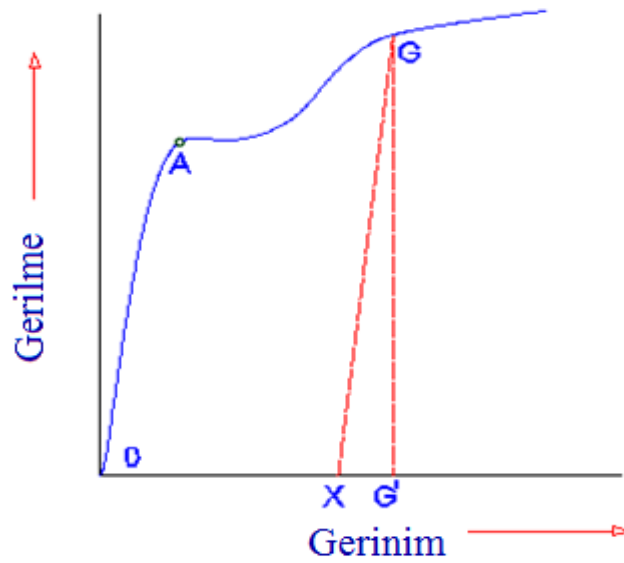
Fotoğraf 3. 5 Geri yaylanma düzeneği

Sekil 3.8' de geri yaylanma davranışının gözlemlendiği V bükme operasyonunda parçada elde edilmek istenen bükme acısı θ ve bükme operasyonu sonunda (kesik çizgili) oluşan bükme acısı θ' olarak gösterilmiştir. V bükme işleminin dar acıda, dik acıda (90°) veya geniş acıda olması durumlarında değer olarak farklı olmakla birlikte geri yaylanma meydana gelmektedir [21].



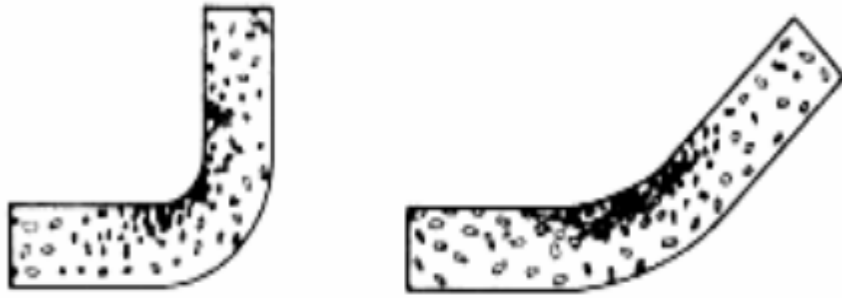
Sekil 3. 8 Geri yaylanma davranışı

Geri yaylanmanın sebeplerinden birisi olan malzeme özellikleri, malzemenin gerilme-gerinim ilişkisiyle açıklanabilir. Diğer önemli sebep ise malzemenin bükülen bölgelerindeki moleküllerin hareketleridir. [21]



Sekil 3. 9 Gerilme-Gerinim diyagramı [22]

Sekil 3. 9' daki gerilme-gerinim(deformasyon) eğrisinde G noktası, sac metal levha formlanırken uygulanan kuvvete ait gerilmeyi göstermektedir. O-A doğrusu ise gerilme-gerinim ilişkisinin orantılı olarak değiştiği elastik bölgedir. Form verme işlemi tamamlanıp, parça üzerinden kuvvet kaldırıldığında gerinim X değerini alır. Bu malzemenin plastik bölgedeki elastikiyetini belirtir. X-G', parçanın eski haline dönmeye çalışan miktarını belirtir, O-X ise kalıcı deformasyon değerini belirtir. Şekillendirme sırasında akma bölgesini aşan gerilmenin olduğu durumda geri yaylanma etkisi gözlenecektir [22].



Sekil 3.10 Bükmenin sebep olduğu molekül hareketleri [3]

Sekil 3.10'da 90° ve geniş açı ile bükülmüş düz levha resim edilmiştir. Şekilde parçanın iç kısımlarında basma, dış kısımlarında ise çekmenin meydana geldiği gözükmektedir. Sekil 3.10'da gösterildiği gibi parçanın ortasında ise, bası veya çeki gerilmelerinin oluşmadığı bir tabaka vardır ki “tarafsız eksen” olarak adlandırılır. Şekil 3.10 Bükmede oluşan gerilmeler Parça büküldüğünde, iç ve dış yüzeyine sırayla bası ve çeki gerilmelerine maruz kalır. Genelde malzemedeki bası yönündeki gerinim, çeki yönündeki gerinimden daha büyüktür. Uygulanan kuvvet ile parçanın dış kısmı deforme olur fakat iç kısmı henüz akma noktasına ulaşmamıştır. Parçanın iç kısmı eski haline geri dönme eğilimi gösterir. Parçayı eski konumuna getirmeye çalışan bası gerilmesi geri yaylanmayı meydana getirir [23].

3.6.2 Geri yaylanma etki eden faktörler

Bütün malzemeler sınırlı bir elastikiyet modülüne sahip olduğundan, plastik deformasyon, uygulanan yük kaldırıldığı zaman, bir miktar elastik geri dönüş ile takip

edilmektedir. Uygulanan yük geri çekildiği zaman, basılmaya çalışan taraftaki malzeme genişlemeye, çekilmeye çalışan taraftaki malzeme de basılmaya çalışmaktadır. Sonuç olarak malzeme ilk halini almaya çalışmakta ve bükülen malzeme küçük bir miktar esneyerek açılmaya sebep olmaktadır [24].

Geri esneme;

- Malzemenin kalınlığına,
- Malzemenin kimyasal yapısı ve işlem parametrelerine (sıcaklık vb.),
- Malzemenin cinsine (elastikiyet modülü, akma dayanımı, pekleşme üsteli, vb.),
- Zımba yükünün malzeme üzerinde kalma süresine,
- Kalıp ölçülerine,
- Uygulanan kuvvete,

bağlı olarak değişmektedir.

Bunun yanı sıra;

- Bükme yarı çapı/malzeme kalınlığı (R/t) oranı büyükse, geri esneme değerinin buna bağlı olarak daha büyük olduğu,
- Daha geniş kalıp boşluğu daha büyük bir geri esnemeye neden olduğu,
- Geri esnemenin bükme yarıçapıyla doğru orantılı olarak değiştiği,
- Bükme yarıçapı büyüdükçe geri esneme miktarının arttığı, bilinmektedir

İstenilen bir açıda bükme işlemi yapabilmek için, geri esneme miktarlarının giderilmesi gerekir. Geri esneme miktarlarını giderebilmek için aşağıda sıralanan yöntemler, yaygın olarak başvurulan yöntemlerdir [24].

- Bükme açısı, geri esnemeye bağlı olarak, artırılır,
- Bükme bölgesi geri esnemeyecek şekilde ezilir,
- Parça gerdirilerek bükme işlemi yapılır,
- Malzeme üzerindeki kuvvetin bekleme süresi artırılır.

İstenilen açıdaki bükmenin elde edilebilmesi için bükme açısı geri esneme miktarı kadar artırılır. Buna, aşırı bükme de denilmektedir. Aşırı bükme, geri esnemeyi etkili bir şekilde azaltmaktadır. Bu havada bükme de, zımbanın vuruşunu ayarlamak suretiyle yapılabilir. “V” bükme kalıplarında yapılan havada bükme işlemlerinde, geri esnemeyi engellemek için, aşırı bükme yöntemi uygulanmaktadır [24].

3.5 Erichsen Deneyi

Bu testin amacı, levha halindeki (sac) malzemelerin deformasyon kapasitelerini belirlemektir. Analitik bir sonuç vermez, karşılaştırmalı bir yöntemdir.

Erichsen testi deneyinde bir zımba ile levha şeklindeki numuneye çökertme uygulanır. Malzemede ilk hatanın meydana geldiği anda test durdurulur.

Zımbanın saca değdiği ilk andan sacın çatladığı ana kadar aldığı yol derinliktir. Bu derinlik ölçülür, bu bize “Erichsen numarasını” verir



Fotoğraf 3. 6 Erichsen deney cihazının görünümü

Deneyler fotoğraf 3. 5’ deki cihaz ile yapılmıştır. Her numune için 3 farklı hızda Erichsen testi deneyi yapılmıştır. Yapılan deneyler için karşılaştırma için 3 farklı hız seçilmiştir. 270 mm/dk, 540 mm/dk ve 810 mm/dk’ lık deney hızları için Erichsen numarası belirlenmiş ve çizelgeler hazırlanmıştır. Ayrıca bu cihazda derin çekme deneyleri de farklı hız ve yük parametreleri ile yapılabilmektedir.

BÖLÜM IV

BULGULAR

4.1 Sertlik Değişimi

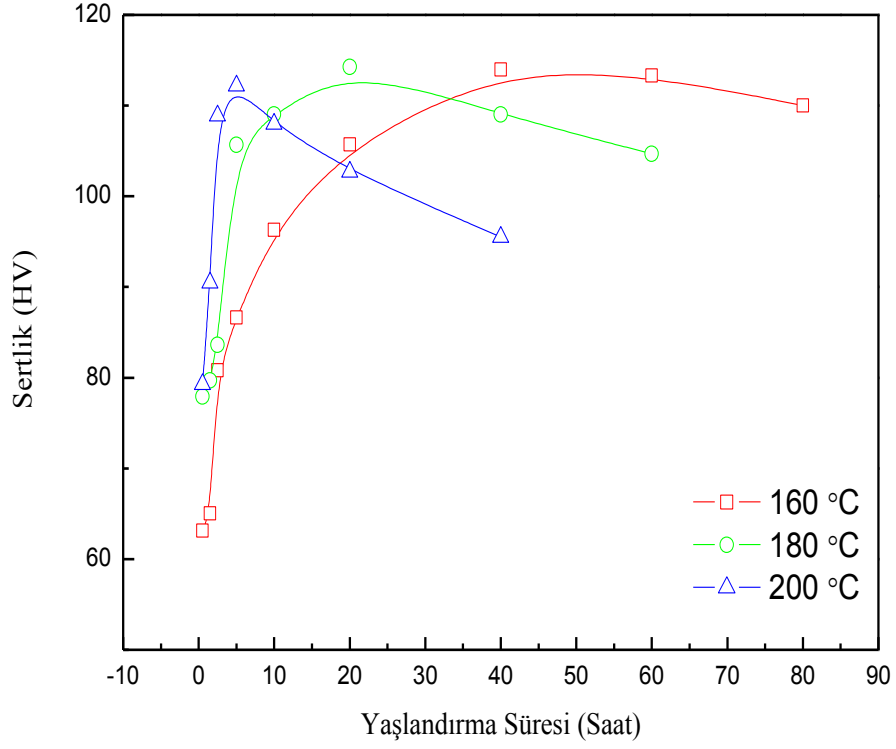
Her bir yaşlandırma parametresi için numune üzerinden farklı dört noktadan sertlik ölçümleri yapılarak belirlenen sertlik değerlerinin ortalaması alınmıştır.

160°C, 180°C ve 200°C' de yapılan yaşlandırma işlemlerinde ulaşılan maksimum sertlik değeri birbirlerine yakın(105-115HV) olduğu görülmüştür.

Şekil 4. 1 Farklı sıcaklıklarda yapılan yaşlandırma işleminde malzeme yüzey sertliğinin yaşlandırma süresi ile değişimini gösterir. Şekilde görüldüğü gibi yüksek sıcaklıklarda yapılan yaşlandırma işleminde maksimum sertliğe kısa bir zamanda ulaşıırken yaşlandırma sıcaklığı düştükçe bu süre uzamaktadır. Ayrıca yüksek sıcaklıklarda yapılan yaşlandırma işleminde maksimum sertlikten sonraki sertlik düşüşü çok hızlı ve kısa bir sürede olurken düşük sıcaklıklarda yapılan yaşlandırma işleminde ise yavaş ve daha uzun süren yaşlandırma sürelerinde olmaktadır.

Sertlik değişimindeki bu eğilim aşırı doymuş katı eriyik içerisindeki erimiş halde bulunan Θ (Mg_2Si) fazı yüksek sıcaklıklarda atomların yayınma hızı daha fazla olduğundan, daha kısa sürede çökecektir. Dolayısıyla maksimum sertliğe daha kısa sürede ulaşacaktır ve bu sertlik değerinden daha hızlı ve kısa sürede düşecektir.

Yaşlandırma zamanı arttıkça çökelme bölgeleri meydana gelir ve boyutları büyür, alaşım daha sert olur. Örneğin 180°C' de oluşan GP 1 bölgeleri dislokasyon hareketlerini zorlaştırarak alaşımın sertliğini artırır. 180°C' de uzun süreli yaşlandırma işleminde dislokasyon hareketlerini daha fazla güçleştiren GP2 bölgelerini oluşturarak sertliği daha da artırır. 180°C' de daha uzun süren yapılan yaşlandırma işleminde Θ' oluşur ve en yüksek sertliğe ulaşır. Sertlik tepesini geçen yaşlandırma süresi, GP2 bölgelerinin çözünmesine ve Θ' fazının irileşmesine, buda alaşımın sertliğinin düşmesine yol açar.

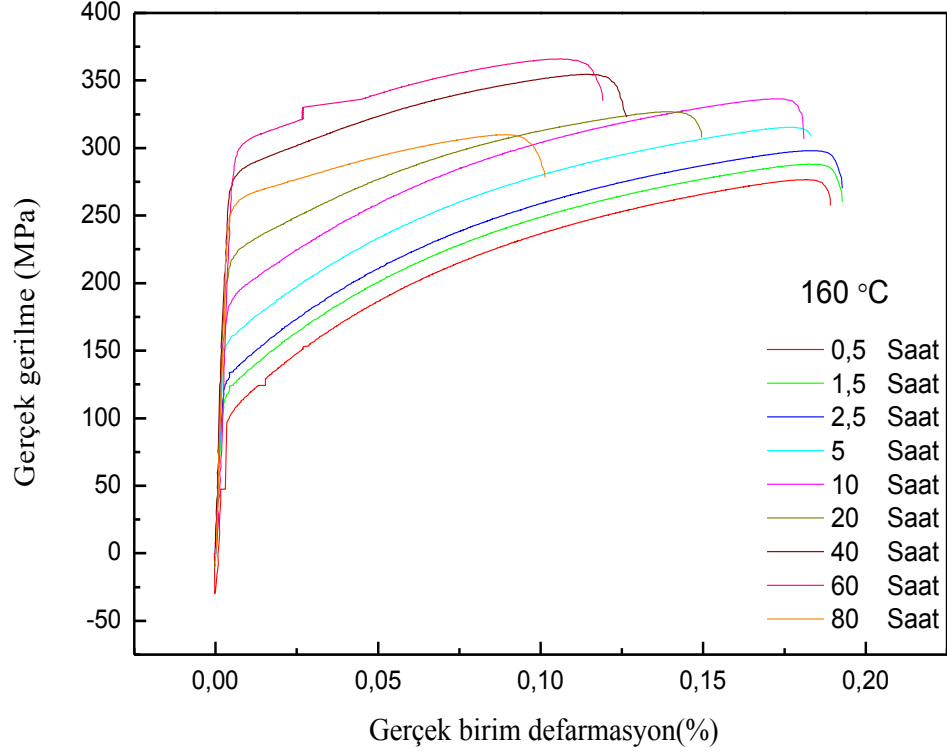


Şekil 4.1 Malzeme yüzey sertliğinin yaşlandırma sıcaklığı ve süresi ile değişimi

160°C, 180°C ve 200°C’ de yapılan yaşlandırma işlemlerinde maksimum sertlik değeri sırasıyla 114HV, 114HV ve 109 HV bu sertlik değerlerine 60, 20 ve 5 saat süren yaşlandırma işlemlerinde ulaşılmıştır.

4.2 Gerilme-Birim Deformasyon Eğrileri

Şekil 4. 2, Şekil 4. 3, Şekil 4. 4 sırayla 160°C, 180°C ve 200°C sıcaklıklarında yapılan yaşlandırma işleminde gerçek gerilme birim deformasyon değişiminin yaşlandırma süresi ile değişimini gösterir. Şekillerde görüldüğü gibi alaşımın mekanik özellikleri yaşlandırma sıcaklığı ve zamana bağlıdır.

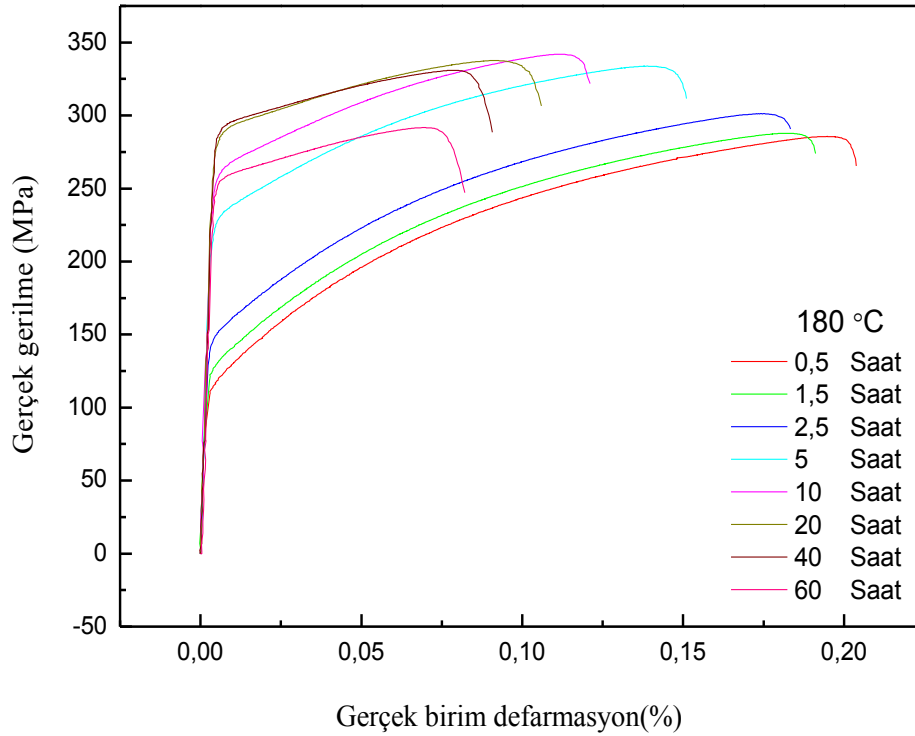


Şekil 4. 2 160°C’ de yaşlandırma işlemi yapılmış numunelerin gerçek gerilme birim defarmasyon eğrilerinin yaşlandırma süresi ile değişimi.

160°C, 180°C ve 200°C sıcaklıklarda yapılan yaşlandırma işleminde, yaşlandırma zamanı arttıkça daha dayanımlı ve daha sünek hale gelmiştir. 160°C sıcaklıkta yapılan yaşlandırma işleminde en yüksek gerilme değeri 60 saat süreli yaşlandırma işleminde, 180°C sıcaklıkta yapılan yaşlandırma işleminde en yüksek gerilme değeri 10 saat süreli yaşlandırma işleminde, 200°C sıcaklıkta yapılan yaşlandırma işleminde en yüksek gerilme değeri 2.5 saat süren yaşlandırma işleminde elde edilmiştir. Gerilme değeri maksimum gerilme değerinin elde edildiği yaşlandırma zamanına kadar sürekli artmasının nedeni yaşlanma zamanının artması ile çökeltilerin meydana gelmesi ve boyutlarının büyümesidir. GP1- GP2 ve Θ' çökelti uyumlu çökelti olup, ısıl işlemin başlangıç sırasında bu uyumlu fazların boyutu büyüdüğünde alaşımın dayanımı yaşlandırma zamanı ile artar.

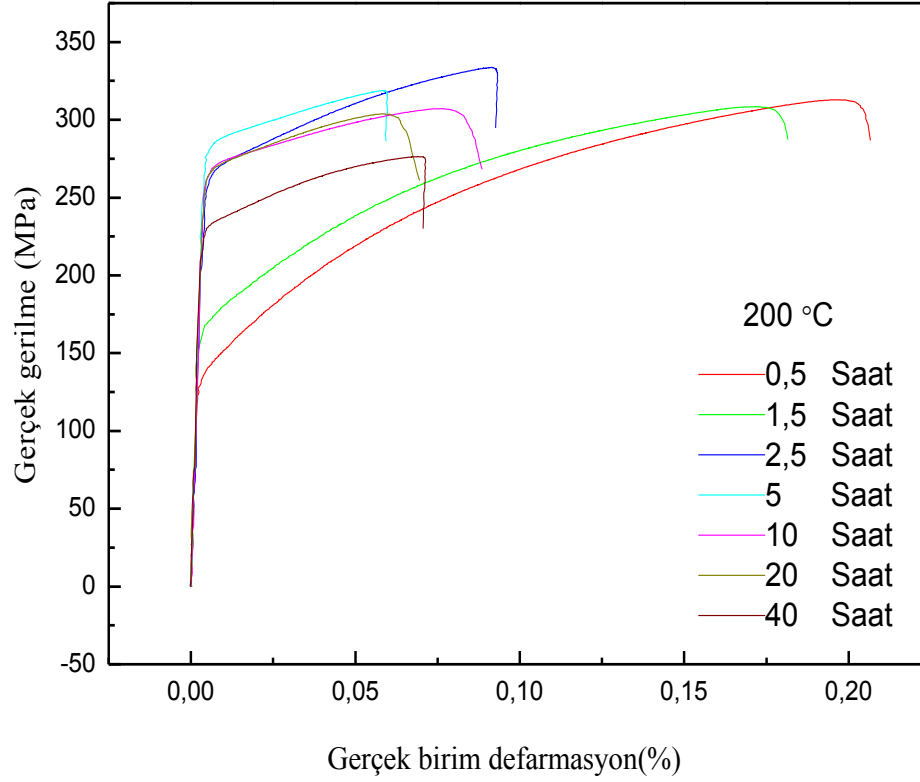
160°C’ de uygulanan yaşlandırma işlemi için, 0.5, 1.5 ve 2.5 saat süren yaşlandırma işlemlerinde birim defarmasyon değeri ve gerilme değeri artmaktadır. 5 ve 10 saat süren yaşlandırma işlemlerinde ise gerilme değeri artarken birim defarmasyon değeri

düşmektedir. 20 saat süren yaşlandırma işleminde ise gerilme değeri ve birim deformasyon değerinde düşme görülmektedir. 40 saat süren yaşlandırma işleminde gerilme değeri yükselirken birim deformasyon değeri düşmüştür. 60 saat süren yaşlandırma işleminde maksimum gerilme değerine ulaşılmış ve yine birim deformasyon değeri düşmüştür. Maksimum gerilme değerinden sonraki yaşlandırma işlemi olan 80 saat süreli yaşlandırma işleminde, gerilme değerinin ve birim deformasyonunun değerinin azaldığı görülmüştür.



Şekil 4. 3 180°C' de yaşlandırma işlemi yapılmış numunelerin gerçek gerilme birim deformasyon eğrilerinin yaşlandırma süresi ile değişimi.

180°C' de yapılan yaşlandırma işleminde gerilme değeri ve birim deformasyon değeri maksimum gerilme noktasına kadar gerilme değerlerinin arttığı, birim deformasyon değerinin ise azaldığı görülmüştür. Maksimum gerilme değerine 10 saat süren yaşlandırma işleminde ulaşılmıştır. 20, 40 ve 60 saat süren yaşlandırma işlemlerinde gerilme ve birim deformasyon değerinde azalmalar görülmektedir.

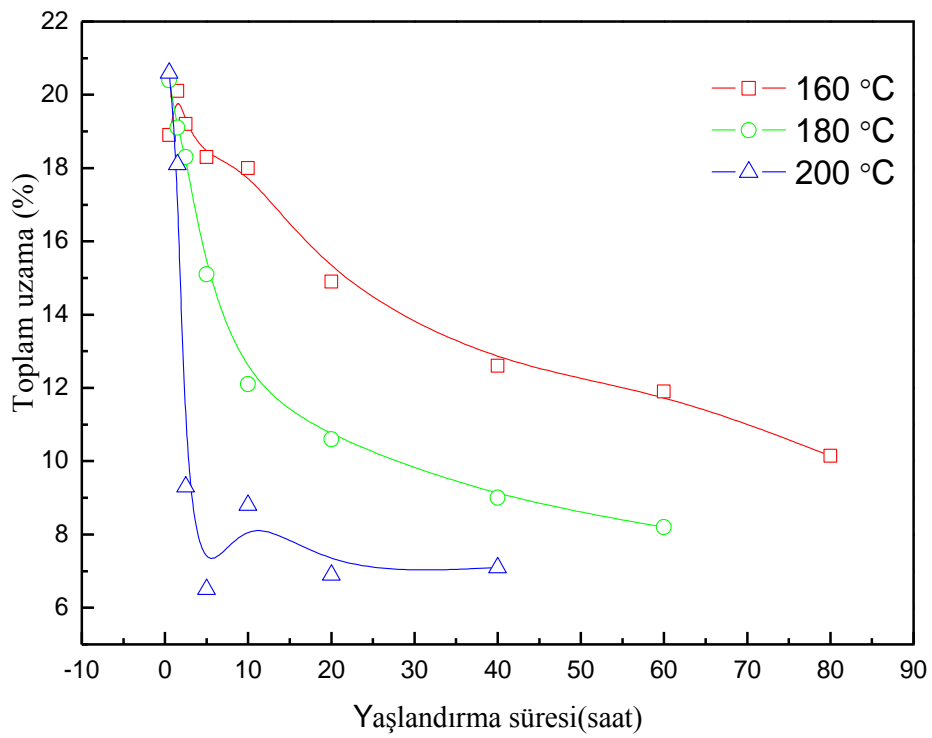


Şekil 4. 4 200°C’ de yaşlandırma işlemi yapılmış numunelerin gerçek gerilme birim defarmasyon eğrilerinin yaşlandırma süresi ile değişimi.

200°C’ de maksimum gerilme değerine 2.5 saat süren yaşlandırma işleminde ulaşılmıştır. 1.5 ve 5 saat süren yaşlandırma işlemlerinde bir önceki yaşlandırma işlemlerine göre gerilme ve birim defarmasyonda azalma görülmektedir. Ancak 1.5 ve 5 saat süren yaşlandırma işlemlerini karşılaştırıldığında 5 saat süren yaşlandırma işleminde gerilme artarken, birim defarmasyonda azalma görülmektedir. Maksimum gerilme değerine ulaşılan 2.5 saat süren yaşlandırma işleminden sonra yapılan yaşlandırma işlemlerinde gerilme değerleri sürekli düşerken birim defarmasyon değerleri değişkenlik göstermiştir. Bir önceki yapılan yaşlandırma işlemine göre birim defarmasyon değerlerinde karşılaştırılma yapılırsa, 5 saat süren yaşlandırma işleminde azalama, 10 saat süren yaşlandırma işleminde artma, 20 saat süren yaşlandırma işleminde azalama ve 40 saat süren yaşlandırma işleminde artma görülmektedir.

4.2.1 Toplam uzama değişimi

160°C, 180°C ve 200°C sıcaklıklarda yapılan yaşlandırma işlemi için yaşlandırma süresi ile toplam uzamadaki değişim Şekil 4.5’ de gösterilmiştir. Şekil 4.5’den görüldüğü gibi toplam uzama yaşlandırma zamanı ve yaşlandırma sıcaklığının artması ile azalmaktadır.

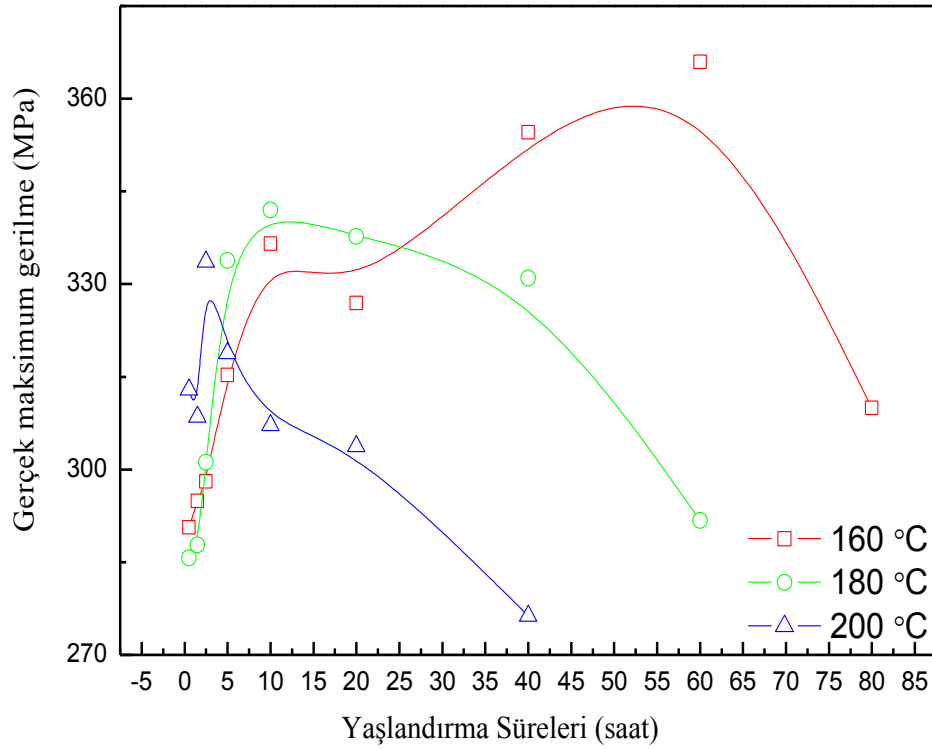


Şekil 4. 5 Toplam uzamanın yaşlandırma sıcaklığı ve süresi ile değişimi

 yaşlandırma sıcaklığı için aynı yaşlandırma sürelerinde farklı toplam uzama değerleri elde edilmiştir. 20 saat süren yaşlandırma işlemlerine bakıldığında 160 °C’ de % 15, 180°C’ de %11 ve 200°C’ de % 7 olduğu görülmektedir. 180°C’ de 5 saat süren yaşlandırma işlemi ile 160°C’ de 20 saat süren yaşlandırma işlemlerinde aynı için aynı toplam uzama değerlerine (% 15) ulaşılmıştır.

4.2.2 Gerçek maksimum gerilme değişimi

160°C, 180°C ve 200°C sıcaklıklarında uygulanan yaşlandırma işlemleri için yaşlandırma süreleri ile gerilme değerlerindeki değişim Şekil 4.6' de gösterilmiştir.



Şekil 4.6 Gerçek maksimum gerilmenin yaşlandırma sıcaklığı ve süresi ile değişimi

Uygulanan üç yaşlandırma sıcaklığı için maksimum gerilme 160 °C' de 60 saat süren yaşlandırma işleminde 365,97 MPa olarak bulunmuştur. Diğer iki sıcaklıklar için ulaşılan maksimum gerilme değerleri ise 180 °C 'için 341,97 MPa ve 200 °C 'için 333,64 MPa olduğu grlmştir. 160 °C 'de 40 saat süren yaşlandırma işleminde elde edilen 354,56 MPa' lık gerilme değeri 180 °C ve 200 °C ' de yapılan yaşlandırma işlemlerinde ulaşılan maksimum gerilme değerlerinden daha yüksek olduğu gözlenmiştir. Ayrıca 180 °C 'de 5 saat süre ile uygulanan yaşlandırma işleminde ulaşılan gerilme değeri 200 °C 'de ulaşılan maksimum gerilme değeriyle yaklaşık olarak aynıdır.

Düşük sıcaklıklarda uygulanan yaşlandırma işleminde yüksek gerilme değerlerine ulaşılmıştır. Bunun sebebi yaşlandırma işlemi sırasında oluşan bölgelerin yüksek sıcaklıkta tam olarak oluşmamasından kaynaklanmaktadır. Düşük sıcaklıklarda sürekli uygulanan yaşlandırma işleminde, yaşlanma bölgelerinin tam olarak idealliğe yaklaştığı görülmüştür.

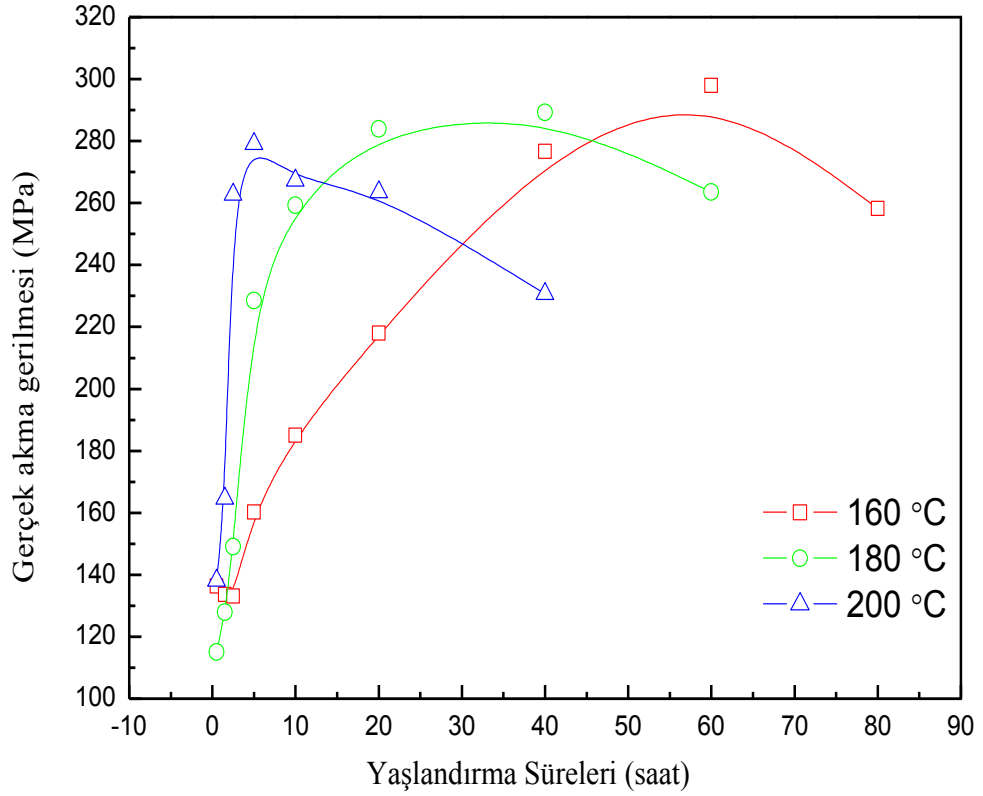
Düşük sıcaklıklarda oluşan GP-1 bölgesindeki gerilme değeri yüksek sıcaklıkta oluşan GP-2 bölgesindeki gerilme değerinden daha yüksektir. Aynı sıcaklıktaki yaşlandırma işlemlerinde GP-2 bölgelerinin oluşması ile elde edilen gerilme değerleri GP-1 bölgesinin oluşmasıyla elde edilen gerilme değerinden daha yüksek olmaktadır.

4.2.3 Gerçek akma gerilmesi değişimi

160°C, 180°C ve 200°C sıcaklıklarında yapılan yaşlandırma işlemi için akma gerilmelerinin yaşlandırma süreleri ile değişimi Şekil 4. 7' de verilmiştir. 160 °C' de 60 saat uygulanan yaşlandırma işleminde maksimum akma gerilmesi 297,42 MPa olarak bulunmuştur. 180 °C ve 200 °C' lerde yapılan yaşlandırma işlemlerinde ulaşılan maksimum akma gerilmesi sırası ile 289,25 MPa ve 267,337 MPa olduğu görülmüştür. Bu değerler sıra ile 40 ve 5 saat süren yaşlandırma işlemlerinde ulaşılmıştır. 180 °C' de uygulanan yaşlandırma işleminde ulaşılabilecek maksimum akma gerilmesi 20 ve 40 saat süren yaşlandırma işlemleri arasında uygun bir yaşlandırma süresi ile yükselebileceği görülmektedir.

200 °C' de yapılan yaşlandırma işleminde akma gerilmesi eğrisindeki dalgalanmalar göze çarpmaktadır. Bunu sebebi yüksek sıcaklıklarda yapılan yaşlandırma işleminde yaşlanma bölgelerinin hızlı oluşmasıdır.

200 °C' de yapılan yaşlandırma işleminde ulaşılan maksimum akma gerilmesi 267,337 MPa 5 saat süren yaşlandırma işleminde elde edilmiştir. 160 °C' de 40 ve 200 °C' de 20 saat süren yaşlandırma işlemlerinde 180 °C' de bulunan maksimum akma gerilmesinden daha yüksek akma gerilme değeri elde edildiği görülmüştür. Yüksek sıcaklıklarda yapılan yaşlandırma işlemlerinde oluşan GP1- GP2 ve Θ^1 bölgeleri ile düşük sıcaklıklarda yapılan yaşlandırma işleminde oluşan GP1- GP2 ve Θ^1 bölgelerindeki farklılık göstermektedir. Bu farklılıkta akma gerilmelerine yansımaktadır. Düşük sıcaklıklarda uygulanan yaşlandırma işlemlerinde oluşan GP1- GP2 ve Θ^1 bölgeleri daha ideal bir yapıdadır.



Şekil 4. 7 Gerçek maksimum gerilmenin yaşlandırma sıcaklığı ve süresi ile değişimi

4.2.4 Mukavemet katsayısı değişimi

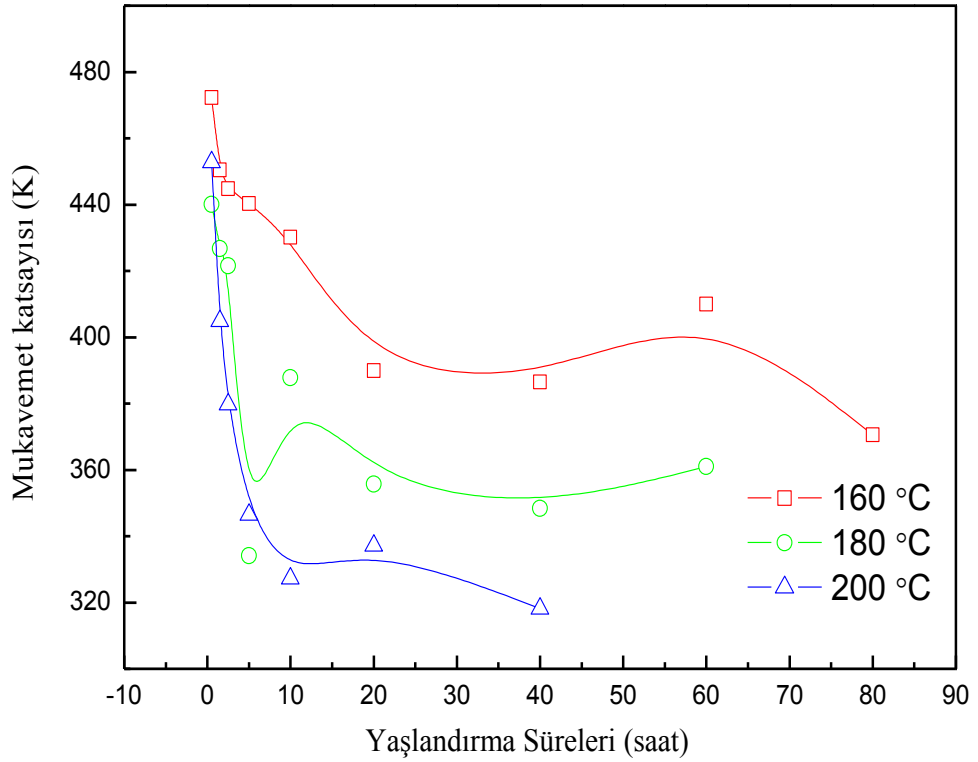
160°C, 180°C ve 200°C sıcaklıklarında yapılan yaşlandırma işlemi için mukavemet katsayısı değeri yaşlandırma süreleri ile değişim Şekil 4. 8' de verildiği gibidir.

En yüksek mukavemet katsayısı 160 °C' de 0. 5 saat süren yaşlandırma işleminde elde edilmiştir.

160 °C' de 40 saat süren yaşlandırma işlemine kadar mukavemet katsayısı değerleri bir önceki değere göre azalma göstermiştir. 60 saat süren yaşlandırma işlemine bakıldığında mukavemet katsayısı değeri 20 ve 40 saat süren yaşlandırma işlemlerinde elde edilen mukavemet katsayı değerlerinden yüksek, 10 saat süren yaşlandırma işlemlerinden düşük bir değerde olduğu görülmektedir. 80 saat süren yaşlandırma işleminde mukavemet katsayısı önceki yaşlandırma sürelerine göre azalma göstermiştir.

180 °C' de 5 saat süren yaşlandırma işlemine kadar mukavemet katsayısı değerleri bir önceki değere göre azalma göstermiştir. 10 saat süren yaşlandırma işlemine bakıldığında mukavemet katsayısı 5 ve 20 saat süren yaşlandırma işlemlerinde elde edilen mukavemet katsayı değerlerinden yüksek, 3 saat süren yaşlandırma işleminden düşük bir değerde olduğu görülmektedir. 20 saat süren yaşlandırma işleminden sonra mukavemet katsayısı değeri bir önceki yaşlandırma süresine göre azalmaktadır.

200 °C' de 10 saat süren yaşlandırma işlemine kadar mukavemet katsayısı değerleri bir önceki yaşlandırma sürelerine göre azalma göstermiştir. 20 saat süren yaşlandırma işlemi incelendiğinde mukavemet katsayısı değeri 10 ve 40 saat süren yaşlandırma işlemlerinde elde edilen mukavemet katsayılarından yüksek, 5 saat süren yaşlandırma işleminden düşük bir değerde olduğu görülmektedir.



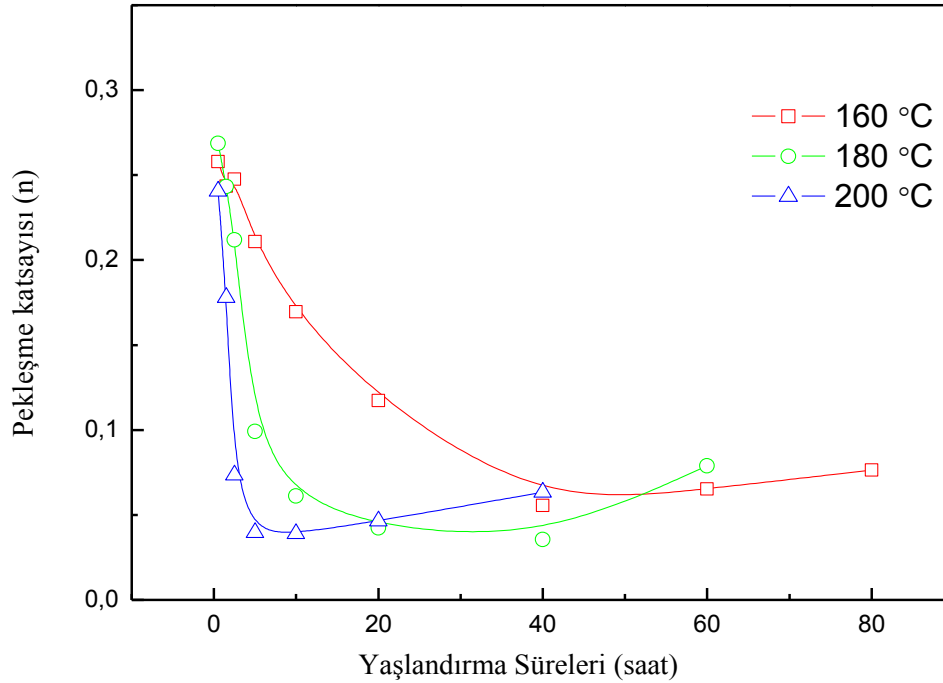
Şekil 4. 8 Mukavemet katsayısının yaşlandırma sıcaklığı ve süresi ile değişimi

4.2.5 Pekleşme katsayısı değişimi

160°C, 180°C ve 200°C sıcaklıklarında yapılan yaşlandırma işlemi için pekleşme katsayısı değerinin yaşlandırma süreleri ile değişimi Şekil 4.8' de verildiği gibidir.

Yaşlandırma işlemlerinin yapıldığı üç sıcaklık değeri içinde pekleşme katsayısı değeri bir noktaya kadar sürekli azalma göstermektedir, bu noktadan sonra ise azalma oranına göre daha düşük bir artış göstermektedir.

160 °C' de yapılan yaşlandırma işlemlerinde 40 saat süren yaşlandırma işlemine kadar pekleşme katsayısı değeri azalma göstermiştir. 40 saat süren yaşlandırma işleminden sonraki artış gösteren 60 ve 80 saat süreli yaşlandırma işlemlerindeki pekleşme katsayısı değeri yükselme göstermektedir. Bu yükselme ile ulaşılan pekleşme katsayı değeri 20 saat süren yaşlandırma işleminde ulaşılan pekleşme katsayısı değerinden düşüktür.



Şekil 4. 9 Pekleşme katsayısının yaşlandırma sıcaklığı ve süresi ile değişimi

180 °C' de yapılan yaşlandırma işlemlerinde 10 saat süreyle yapılan yaşlandırma işlemine kadar pekleşme katsayısı değeri azalma göstermiş, 10 saat süren yaşlandırma işleminden sonra yükselme göstermiştir. 60 saat süren yaşlandırma işleminde pekleşme katsayısı değeri 20 ve 40 saat süren yaşlandırma işlemlerinde ulaşılan pekleşme katsayısı değerinden büyük olduğu görülmüştür.

200 °C’ de yapılan yaşlandırma işlemlerinde, 40 saat süren yaşlandırma işlemine kadar pekleşme katsayısı değeri azalma göstermiş, 40 saat süren yaşlandırma işleminden sonra artış göstermiştir. 60 saat süren yaşlandırma işleminde pekleşme katsayısı değeri 5, 10 ve 20 saat süren yaşlandırma işlemlerinde bulunan pekleşme katsayısı değerinden büyük olduğu görülmüştür.

Çizelge 4. 1 6061 Alüminyum alaşımının farklı yaşlandırma sıcaklıkları ve sürelerinde mekanik özellikleri

	Yaş. Sic.	0,5 Saat	1,5 Saat	2,5 Saat	5 Saat	10 Saat	20 Saat	40 Saat	60 Saat	80 Saat
Akma Mukavemeti (MPa)	160°C	136,39	133,6	133,04	160,197	185,067	217,925	276,59	297,942	258,159
	180°C	115,092	127,931	149,033	228,433	259,287	283,938	289,25	263,53	
	200°C	138,115	164,694	262,793	279,156	267,337	263,575	230,639		
Çekme Mukavemeti (MPa)	160°C	256,70	253,53	249,08	265,14	284,39	285,53	317,73	331,00	331,00
	180°C	236,012	240,788	253,975	253,975	306,75	306,75	306,788	272,737	
	200°C	258,25	261,138	304,75	300,862	285,487	286,85	258,288		
Uzama (%)	160°C	18,9	20,1	19,2	18,3	18	14,9	12,6	11,9	10,15
	180°C	20,4	19,1	18,3	15,1	12,1	10,6	9	8,2	
	200°C	20,6	18,1	9,3	6,5	8,8	6,9	7,1		
Mukavemet Katsayısı (K)	160°C	472,22	450,39	444,72	440,29	430,12	389,86	386,47	410	370,51
	180°C	440,084	426,71	421,55	334,13	387,83	355,75	348,32	361,04	
	200°C	452,86	404,94	379,76	346,47	327,29	337,21	318,14		
Pekleşme Üsteli (n)	160°C	0,2579	0,2435	0,2475	0,2108	0,1696	0,1173	0,0555	0,0652	0,0763
	180°C	0,2686	0,2433	0,2118	0,0992	0,0612	0,0424	0,0356	0,0789	
	200°C	0,2406	0,178	0,0736	0,0397	0,0391	0,0464	0,0634		

4.3 Anizotropi Ölçümleri

Yaşlandırma parametreleri için buluna anizotropi değerleri Çizelge 4. 2' de verilmiştir. Normal anizotropi (r_n) değeri 200 °C' de 40 saat süren yaşlandırma işlemi dışındaki yaşlandırma parametrelerinde, yaşlandırma işlemi uygulanmamış numuneye göre düşmüştür. Normal anizotropi değeri yükseldikçe şekillendirme kabiliyeti artar. Şekillendirme kabiliyeti bir parametrenin dışında azaldığı görülmüştür. 200 °C' de 40 saat süren yaşlandırma işleminde r_n değerinin yükselmesi aşırı yaşlanma sonucu olmuştur.

Çizelge 4. 2 6061 Alüminyum alaşımının farklı yaşlandırma sıcaklıkları ve sürelerinde anizotropi değerleri.

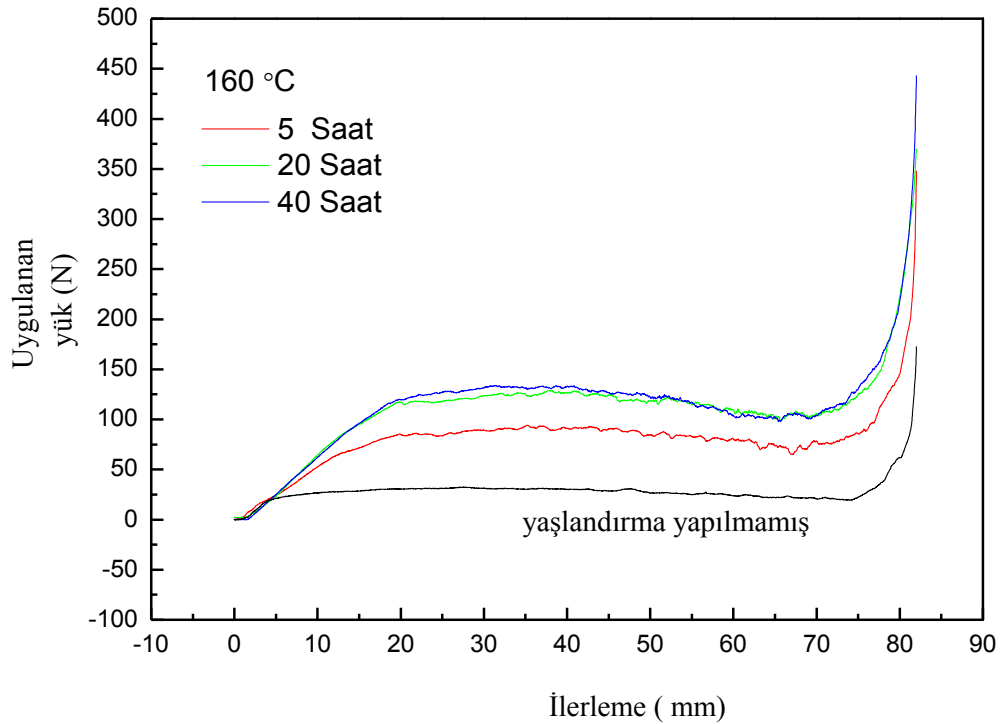
Yaşlandırma Sıcaklığı	r_0			r_{45}			r_{90}		
	5 Saat	20 Saat	40 Saat	5 Saat	20 Saat	40 Saat	5 Saat	20 Saat	40 Saat
160°C	0,4987815	0,6670054	0,6889311	0,708626	0,6339899	0,6729988	0,584701361	0,619112866	0,628862897
180°C	0,6560358	0,4299267	0,552505	0,6349571	0,7014859	0,6751636	0,594180474	0,62638599	0,586459069
200°C	0,7329342	0,6387914	0,6842555	0,6787438	0,6485524	0,7302213	0,590382764	0,604973934	0,679559038
Yaşlandırma Sıcaklığı	Δr			r_n			Yaşlandırma	Yapılmamış	Numune
	5 Saat	20 Saat	40 Saat	5 Saat	20 Saat	40 Saat	r_0	r_{45}	r_{90}
160°C	-0,1668846	0,0090692	-0,0141018	0,6251837	0,6385245	0,6659479	0,699295248	0,70377197	0,616709062
180°C	-0,009849	-0,1733295	-0,1056816	0,6300326	0,6148211	0,6223228	Δr	r_n	
200°C	-0,0170853	-0,0266697	-0,0483141	0,6702011	0,6352175	0,7060643	-0,045769815	0,680887062	

Düzlemsel anizotropi değerinin (Δr) kulaklanma oluşmaması için 0 değerine yaklaşması istenir, sıfıra yaklaştıkça kulaklanma riski azalır. Düzlemsel anizotropi değerlerinde karşılaştırma yapılırsa sıfıra en yakın değer 160 °C' de 40 saat süren yaşlandırma

işleminde olduğu görülmektedir. Sıfır değerinden en uzak değerde 180 °C’ de 20 saat süren yaşlandırma işleminde olduğu görülmüştür.

4.4 Geri Yaylanma Ölçümleri

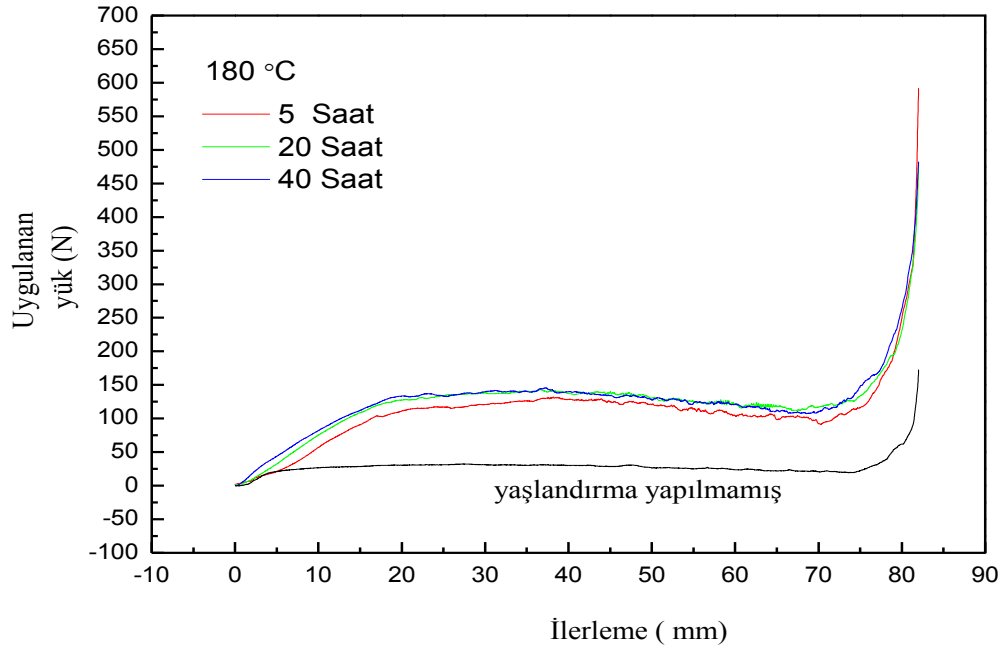
Geri yaylanma deneyinde erkek zımbanın numuneyi bükmek için uyguladığı yük ve erkek zımbanın ilerlemesinin değişim grafiği Şekil 4.10, Şekil 4.11 ve Şekil 4.12’ de görülmektedir. Grafiklerdeki yük-ilerleme değerlerindeki değişim, erkek zımbanın ilerlemesinin 82 mm’ ye ulaştığı noktaya kadar olan kısım değerlendirilmelidir. Çünkü bu noktadan sonra deney numunesi erkek zımba ile dişi kalıp arasında baskıya maruz kalmaktadır, bu da uygulanan kuvvetin yükselmesine neden olmaktadır.



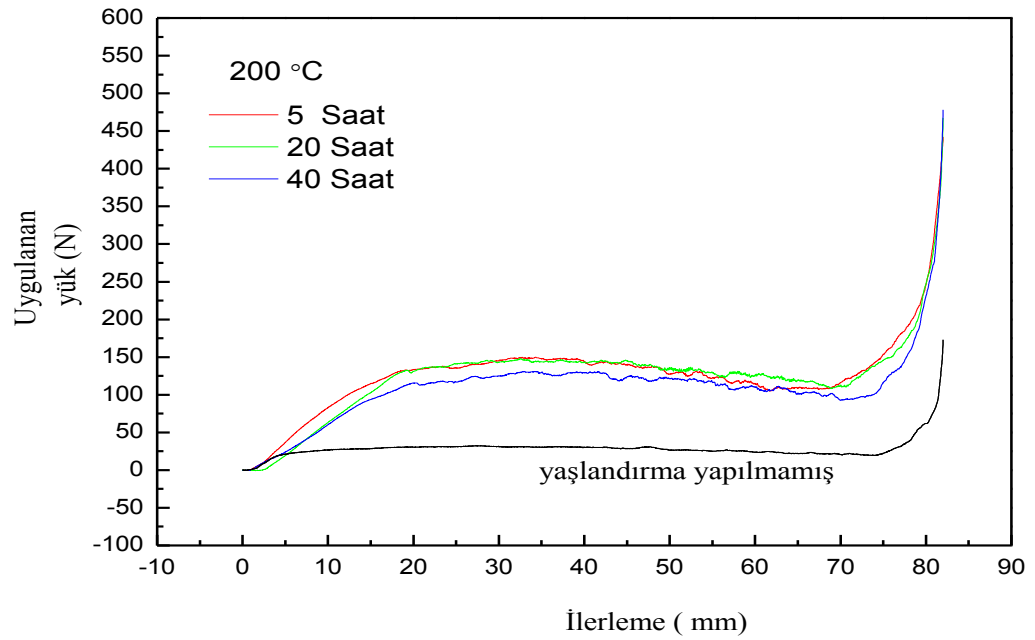
Şekil 4.10 Geri yaylanma yük-ilerleme (160 °C)

Maksimum yük 160 °C’ de 40 saat süren yaşlandırma işlemi yapılmış numuneye uygulanmıştır. Bunu sebebi 160 °C’ de 40 saat süren yaşlandırma işleminde maksimum gerime değerine ulaşılmamış olmasındandır, yani yaşlandırma süresi arttıkça uygulanan kuvvet artacaktır. Ancak maksimum gerilme şartları aşıldıktan sonra bu ifade doğru

olmayacaktır. Grafiklerde de görüldüğü gibi yük 40 mm' lik ilerlemeye kadar artmaktadır, daha sonrada düşmektedir.



Şekil 4.11 Geri yaylanma yük-ilerleme (180 °C)



Şekil 4.12 Geri yaylanma yük-ilerleme (200 °C)

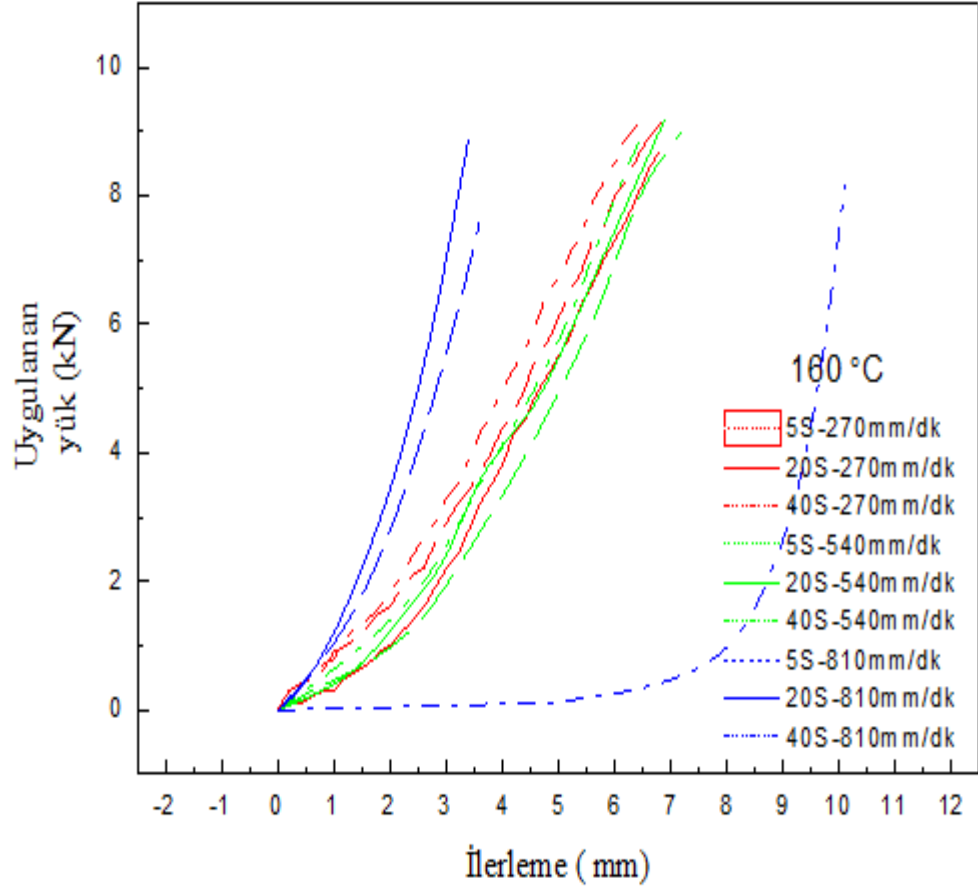
Çizelge 4. 3 25 mm/dk ve 1000 mm/dk'lık erkek kalıp hızlarına göre geri yaylanma açıları

25 Erkek kalıp hızı (mm/dk)				1000 Erkek kalıp hızı (mm/dk)			
Yaşlandırma işlemi yapılmamış				Yaşlandırma işlemi yapılmamış			
67°				64°			
Sıcaklık	5 Saat	20 Saat	40 Saat	Sıcaklık	5 Saat	20 Saat	40 Saat
160°	88°	97°	102°	160°	86°	94°	99°
180°	95°	103°	101°	180°	91	96°	94°
200°	103°	103,5°	98°	200°	96°	95,5°	89°

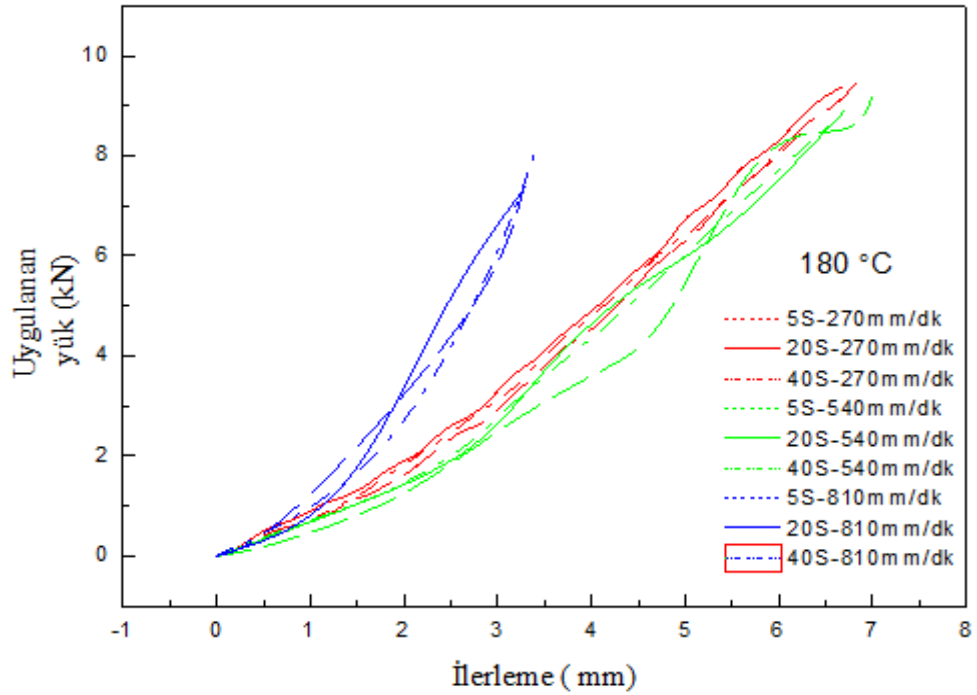
Tüm yaşlandırma şartlarında geri yaylanma miktarı yaşlandırma işlemi uygulanmamış numuneye göre artmaktadır. Bunu sebebi yaşlandırma işlemiyle artan akma mukavemetidir. 160 °C' de sıra ile 5, 20 ve 40 saat süren yaşlandırma şartları için artmıştır. 180 °C' de 40 saatlik yaşlandırma sonrasındaki geri yaylanma miktarı 20 saat süren yaşlandırma işlemine göre düşmüştür. Bu durum 200 °C' deki yaşlandırma şartları içinde aynı olduğu görülmektedir. Bunun sebebi maksimum gerilme noktasından uzaklaşıldığı anlamına gelmektedir. 160 °C' de bu durum ise maksimum gerilme noktasına yaklaşıldığı anlamına gelmektedir. Şöyle ki 160 °C' de 80 saatten sonra yapılacak olan yaşlandırma işlemlerinden sonrada aynı 180 °C ve 200 °C deki geri yaylanma durumları ortaya çıkacaktır. Yani geri yaylanma miktarında azalma olacaktır.

4.5 Erichsen Numaraları

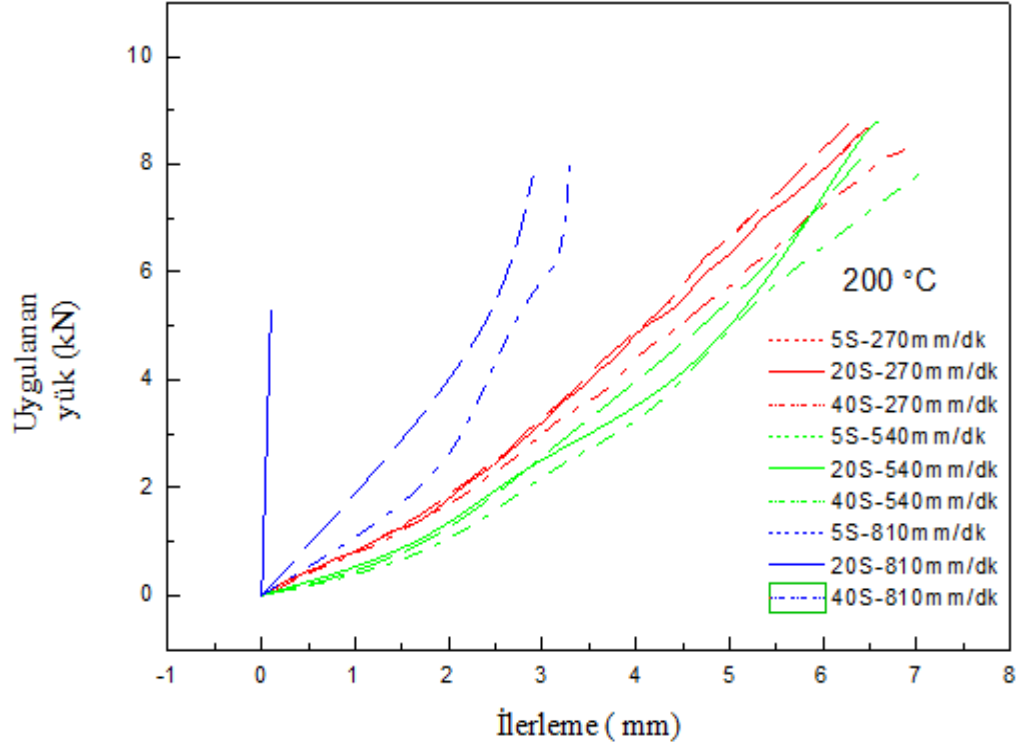
Erichsen testi deneyinde anlık kuvvet ve anlık ilerleme ölçümleri yapılmıştır. Zimba ilerlemesine göre uygulanan yük grafikleri üç yaşlandırma sıcaklıkları için Şekil 4. 13, Şekil 4. 14 ve Şekil 4. 15 deki grafiklerde gösterilmiştir.



Şekil 4. 13 Farklı ilerleme hızlarına bağlı yük-ilerleme grafiği (160 °C)



Şekil 4.14 Farklı ilerleme hızlarına bağlı yük-ilerleme grafiği (180 °C)



Şekil 4.15 Farklı ilerleme hızlarına bağlı yük-ilerleme grafiği (200 °C)

Zımba hızı artıkcça uygulanan yük ve ilerleme miktarı düşmüştür. Üç yaşlandırma sıcaklığı içinde bu durum değışmemiştir. Deney numuneleri üzerindeki şekil değışimleri tümsek şeklinde olmaktadır. Bu tümseklerin zirve noktaları ölçülmüş olup Çizelge 4. 4, Çizelge 4. 5 ve Çizelge 4. 6' da farklı yaşlandırma sıcaklıkları ve farklı zımba hızları için ölçülen değerler verilmiştir.

Çizelge 4. 4 270 mm/dk' lık hız için Erichsen numaraları

	Yük Uygulama hızı		
	270 mm/dk		
	5 saat	20saat	40saat
160°C	7,31	7,15	7,87
180°C	7,65	7,41	7,15
200°C	7,21	7,41	7,78
Yaşlandırma yapılmamış numune için			10,32

270 mm/dk, 540 mm/dk ve 810 mm/dk' lık deney hızları için; 160 °C ve 200 °C yaşlandırma sıcaklıklarında, yaşlandırma süresi artıkcça Erichsen ilerlemesi artmıştır.

180 °C’ de uygulanan yaşlandırma işlemi için, yaşlandırma süresi artıkça Erichsen ilerlemesi azalmıştır. Ayrıca yaşlandırma işlemi yapılmamış numunenin erichsen ilerlemesi daha yüksektir.

Çizelge 4. 5 540 mm/dk’ lık hız için Erichsen numaraları

Yük Uygulama hızı 540 mm/dk			
	5 saat	20saat	40saat
160°C	7,19	7,68	8,12
180°C	7,77	7,47	7,4
200°C	7,23	7,6	7,81
Yaşlandırma yapılmamış numune için			10,15

Çizelge 4. 5 810 mm/dk lık hız için Erichsen numaraları

Yük Uygulama hızı 810 mm/dk			
	5 saat	20saat	40saat
160°C	8,11	8,69	8,4
180°C	8,3	8,21	8,35
200°C	7,23	8,32	8,44
Yaşlandırma yapılmamış numune			12,13

BÖLÜM V

DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada 6061 alüminyum alaşımının yaşlandırması üç ayrı sıcaklıkta ve farklı yaşlandırma süreleri kullanılarak yapılmıştır. Yaşlandırma işleminin alaşımın mekanik özelliklerine olan etkisi, çekme testi ve sertlik testleri ile, şekillendirilebilirliğe olan etkisi ise Erichsen ve geri yaylanma testleri ile belirlenmiştir. Elde edilen genel sonuçlar aşağıda verilmiştir.

1. 160 °C, 180 °C ve 200 °C’ de yapılan yaşlandırma işlemlerinde, maksimum dayanıma düşük sıcaklıkta uzun süreli yaşlandırma işlemlerinde veya yüksek sıcaklıkta kısa süreli uygulanan yaşlandırma işlemlerinde ulaşılmaktadır.
2. Düşük sıcaklık ve kısa süreli yaşlandırma işleminde daha düşük çekme dayanımına ulaşılmıştır. Bu, GP-1, GP-2 ve Θ^1 yapılarının bu süre ve sıcaklıkta oluşmaması veya istenen boya ulaşmamasından dolayıdır. Düşük sıcaklıklarda, fazların oluşması veya yeterince büyüebilmesi için uzun süreli yaşlandırma işlemi uygulanmalıdır.
3. Yaşlandırma işleminde düşük sıcaklık kullanmanın bir çok faydası olabilir. İlk olarak maksimum dayanım, yaşlandırma sıcaklığı düştükçe yükselme eğilimi gösterir. İkinci olarak da elde edilen yüksek dayanım uzun bir süre korunabilir. Bu geniş doruk (pik) noktaları, ısıl işlemcilerin sıcaklık ve zamanda küçük hesaplama hatalarına izin verir, fakat istenen özellikler yine de ortaya çıkar.
4. 160 °C’ de yaşlandırma işleminde, düzlemsel anizotropi değeri sıfır değerine daha çok yaklaşmaktadır. Bu da kulaklanma riskinin bu yaşlandırma şartları altında daha az olduğunu göstermektedir.
5. 160 °C, 180 °C ve 200 °C’ de yapılan yaşlandırma işlemlerinde, yaşlandırma yapılmamış bir numunedeki normal anizotropi değerinden daha düşük anizotropi değerleri elde edilmiştir. Bu da malzemenin şekillendirilebilirliğinin düştüğü anlamına gelmektedir. Bura da dikkat edilmesi gerekli olan nokta, aşırı yaşlanmış numunelerde anizotropi değeri yükselir.

6. Yaşlandırma işlemiyle geri yaylanma artmaktadır. Üç farklı sıcaklık ve üç farklı zaman içinde geri yaylanma açısı akma gerilmesinin yüksek olduğu durumlarda artmıştır.
7. Yaşlandırma süresi arttıkça Erichsen numarası düşmektedir. Erichsen numarası (zımba ilerlemesi) akma gerilmesinin yüksek olduğu durumlarda daha düşüktür.
8. Yaşlandırma ile malzemenin pekleşme üsteli, mukavemet katsayısı azalmıştır.

Malzemeden beklenen en iyi mekanik özellikler ve ideal şekillendirilebilirlik şartları için en uygun yaşlandırma işlemi parametrelerini gösteren tablo Çizelge 4. 1 'de verilmiştir. Yaşlandırma işleminde malzemenin mekanik özellikleri ve şekillendirilebilirliğe etkisi incelenmiştir elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır.

Çizelge 5. 1 İstenilen mekanik özellikler ve şekillendirilebilirlik için en uygun yaşlandırma işlem parametreleri.

İstenilen mekanik veya şekillendirilebilirlik özelliği	Uygulanması gereken yaşlandırma sıcaklığı ve yaşlandırma süresi
Sertlik	180 °C' de 20 Saat
Çekme mukavemeti	160 °C' de 60 Saat
Toplam uzama	160 °C' de 10 Saat
Derin çekme	200 °C' de 5 Saat
Kulaklanma	160 °C' de 40 Saat
Erichsen numarası	160 °C' de 40 Saat
Geri yaylama	160 °C' de 5 Saat

KAYNAKLAR

- [1] Kılıç, N., II. Alüminyum Sempozyumu ve Sergisi ve Sonuç Bildirgesi, Araştırma ve Meslekleri Geliştirme Müdürlüğü, 22-24 Mayıs 2003
- [2] Zeytin, H. K., Magnezyum Alaşımları: Otomotiv Endüstrisinde Kullanımı ve Geleceği. TÜBİTAK-OSD, 1999.
- [3] Ulucak, T., Alüminyum - En Genç Metal , 20.yy'da Alüminyum-Çelik-Bakır üretim indeksi
- [4] Zeytin, H. K., Teymur, B., Arısoy, O., Alüminyum Alaşımları Otomotiv Endüstrisinde Uygulamaları ve Geleceği, MAM-MKTAE/OSD, 2000.
- [5] Within by J.G. Kaufman and Dietrich G. Altenpohl Aluminum: Technology, Applications, and Environment (1998, Hardcover)
- [6] Faydalı, C., Alüminyum ve özellikleri Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Döküm Öğretmenliği 2005
- [7] Alan, S., Alüminyum Raporu - Mayıs 2008
- [8] Callister, W., D., Materials Science and Engineering An Introduction, John Wiley & Sons, Inc., USA, 2007
- [9] Ersümer, A., Alüminyum Alaşımlarının Isıl ve Mekanik işlemleri, İstanbul 37 s., 1960
- [10] Kolonev, J., F., Heat Treatment of Aluminium Alloys. p 341-345., 1961
- [11] Alüminyum Levha ,Alüminyum Plaka , Alüminyum Profil , Alüminyum Hammadde alanları http://www.altekmetal.com.tr/fotolar/file/aluminium_ozellik.pdf
- [12] ASM Handbook,Volume IV Heat Treating, 1991.
- [13] HATCH , J.E. 1984. Aluminium. ASM. Ohio. p 134-136, 143-144, 200-201.
- [14] Alcoa Forging and Extrusions is the leading global supplier of hard alloy extruded aluminum products.http://www.alcoa.com/gcftp/catalog/pdf/alcoa_alloy_6061.pdf.
- [15] The strength of a material can be significantly improved by the precipitation of a finely dispersed second phase in the matrix. Dispersed second phase in the matrix. <http://www.me.uh.edu/ceramics/3445LabManual/2.AGEHARDENING.pdf>.
- [16] Lumley, R.N., Polmear, I.J., and Morton, A.J., Proceedings of the Ninth International Conference on Aluminium Alloys, Brisbane, Australia 85, 2004.
- [17] Buha, J., Lumley, R.N., Crosky, A.G., Secondary ageing in an aluminium alloy 7050, Materials Science and Engineering, A492, 1-10, 2008.
- [18] Buha, J., Lumley, R.N., Crosky, A.G., Precipitation and solute distribution in an interrupted-aged Al-Mg-Si-Cu alloy, Philosophical Magazine, 8, 373-390, 2008.

- [19] Aslanođlu, Z., Őekillenebilirliđe Malzeme zellikleri Etkisi, MűŐteri Eđitim Notları, AraŐtırma ve Teknoloji GeliŐtirme Műdűrlűđű, Kdz. Eređli, Haziran 2006
- [20] Dieter, G. E., Workability Testing Techniques, American Society for Metals, Ohio 1984.
- [21] M. Yang, K.-I. Manabe, H. Nishimura, Development of real-time process control system for precision and flexible V-bending with an on-line database,
- [22] M. Yang, K.-I. Manabe, H. Nishimura, Development of real-time process control system for precision and flexible V-bending with an on-line database, J. Mater. Process. Technol. 60 (1996) 249–254.
- [23] S.J. Thanki, H.K. Raval, A.K. Dave, Prediction of the punch reversal position under V-plate bending using real material (power-law) behavior, J. Mater. Process. Technol. 114 (2001) 227–232.
- [24] Kalpakjian, S. 2000. Manufacturing Engineering and Technology, Prentice Hall yay., USA.