

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

6061 ALÜMİNYUM ALAŞIMLARINDA ARA VERİLEREK YAPILAN  
YAŞLANDIRMA İŞLEMİNİN MALZEME MEKANİK ÖZELLİKLERİNE  
ETKİSİNİN İNCELENMESİ

HASAN DEMİRTAŞ

Temmuz 2009



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

6061 ALÜMİNYUM ALAŞIMLARINDA ARA VERİLEREK YAPILAN  
YAŞLANDIRMA İŞLEMİNİN MALZEME MEKANİK ÖZELLİKLERİNE  
ETKİSİNİN İNCELENMESİ

HASAN DEMİRTAŞ

Yüksek Lisans Tezi

Danışman

Yrd. Doç. Dr. Mahmut ALKAN

Temmuz 2009

**Yrd. Doç. Dr. Mahmut ALKAN** danışmanlığında **Hasan DEMİRTAŞ** tarafından hazırlanan “**6061 Alüminyum Alaşımlarında Ara Verilerek Yapılan Yaşlandırma İşleminin Malzeme Mekanik Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi**” adlı bu çalışma jürimiz tarafından Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Makine Mühendisliği** Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan :

Üye :

Üye :

Üye :

Üye :

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.

...../...../200..

Doç. Dr. Nurettin ACIR

Enstitü Müdürü V.

## ÖZET

### 6061 ALÜMİNYUM ALAŞIMLARINDA ARA VERİLEREK YAPILAN YAŞLANDIRMA İŞLEMİNİN MALZEME MEKANİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

DEMİRTAŞ, Hasan  
Niğde Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman :Yrd. Doç. Dr. Mahmut ALKAN

Temmuz 2009, 35 sayfa

Alüminyum-Magnezyum-Silisyum (Al-Mg-Si) alaşımları 6XXX serisi alaşımlar olarak da adlandırılmakta olup orta mukavemetli ısıl işlemle mukavemet kazanan malzemelerdir. Şekillendirme kabiliyetleri ve korozyona karşı dayanımları iyidir. Yaygın olarak ekstrüzyon ürünlerinde kullanılırlar. Bu seri içerisinde en yaygın kullanım alanına sahip alaşım ise 6061 alüminyum alaşımıdır.

Bu çalışmada, 6061 alüminyum alaşımının ara verilerek yaşlandırma uygulanarak mekanik özelliklerindeki değişim gözlemlenmiş ve bu değerler normal yaşlandırma değerleri ile karşılaştırılmıştır.

90 dk. deney şartlarında malzemenin mekanik özelliklerinde önemli ölçüde bir değişim gözlemlenmemiştir. Elde edilen değerler doğrultusunda 20 dk. deney şartlarında toplam uzama miktarlarında % 100'e yakın artışlar elde edilmiştir.

Anahtar sözcükler: 6061 alüminyum alaşımı, yaşlandırma, ara verilerek yaşlandırma

## SUMMARY

### INVESTIGATION OF INTERRUPTED AGINGS EFFECT IN MECHANICAL PROPERTIES OF 6061 ALUMINIUM ALLOYS

DEMİRTAŞ, Hasan

Nigde University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering

Supervisor : Assistant Professor Dr. Mahmut ALKAN

July 2009, 35 pages

Aluminum-Magnesium-Silicon (Al-Mg-Si) alloys are also called as a 6XXX series alloys which are medium strength heat-treatable materials. Their formability and corrosion resistance are good. They are widely used in extruded products. 6061 alloy is one of the most widely used alloys of these series.

In this study, an interrupted aging process was applied for 6061 aluminum alloy in order to investigate the changes in mechanical properties. These results were compared with normal aging data.

There were no significant changes in mechanical behavior of the material for 90min aging condition. Based on determined data, an increase in total tensile elongation was determined about 100% for 20min aging condition.

Keywords: 6061 aluminum alloy, aging, interrupted aging

## TEŞEKKÜR

Bu tez alıőması sűresince katkılarından dolayı danıőmanım Yrd. Doç. Dr. Mahmut ALKAN ve çalıőmanın yűnlendirilmesinde 2. danıőman gibi destek olan ve laboratuvar çalıőmalarında çok bűyűk emeėi geçen Makine Műhendisliėi űėretim űyelerinden Yrd. Doç. Dr. Fahrettin ŐZTŪRK'e, ihtiyaç duyduėumda çalıőmalarıma destek veren ve yardımlarını esirgemeyen Arő. Gűr. Serkan TOROS, ve yűksek lisans űėrencilerinden Sűleyman KILIÇ'A en içten teőekkűrlerimi sunarım.

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

## İÇİNDEKİLER

ÖZET .....	iii
SUMMARY .....	iv
TEŞEKKÜR .....	v
İÇİNDEKİLER DİZİNİ .....	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	ix
FOTOĞRAFLAR DİZİNİ .....	xi
KISALTMA VE SİMGELER .....	xii
BÖLÜM I. GİRİŞ .....	1
1.1 Amaç ve Kapsam .....	1
1.2 Alüminyum ve Alaşımları .....	2
BÖLÜM II. ALÜMİNYUM ALAŞIMLARIN SERTLEŞTİRİLMESİ .....	5
2.1 Yaşlandırma .....	5
2.1.1 Solüsyona alma .....	5
2.1.2 Dinlendirme .....	6
2.1.3 Yaşlandırma .....	7
2.2 Ara Verilerek Yaşlandırma ( 2. Çökeltme Sertleşmesi ) .....	10
BÖLÜM III. MALZEME VE YÖNTEM .....	15
3.1 Malzeme .....	15
3.2 Deneysel Numunelerinin Hazırlanması .....	16
3.3 Isıl İşlem Karakteristikleri .....	17
3.4 Sertlik .....	19
3.5 Çekme Deneyi .....	20
BÖLÜM IV. BULGULAR .....	21
4.1 Sertlik Değişimi .....	21
4.2 Gerçek Gerilme-Gerçek Birim Deformasyon Eğrisi Değişimi .....	22
4.2.1 Gerçek birim deformasyon değişimi .....	25
4.2.2 Gerçek maksimum gerilme değişimi .....	26
4.2.3 Gerçek akma gerilmesi değişimi .....	26
4.2.4 Mukavemet katsayısı değişimi .....	27
4.2.5 Pekleşme katsayısı değişimi .....	28
4.2.6 Deformasyon pekleşmesi hızı – gerilme değişimi .....	29



BÖLÜM V. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME .....	33
KAYNAKLAR .....	34

## ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1	Saf alüminyumun fiziksel özellikleri.....	3
Çizelge 2.1	Soğutma hızının malzeme özellikleri üzerindeki etkisi.....	6
Çizelge 2.2	Alüminyum ve alüminyum alaşımlarının yaşlandırma simgeleri ...	9
Çizelge 2.3	T6, T6I6/177 ve T6I6/150 şartları için mekanik özelliklerin karşılaştırılması.....	14
Çizelge 3.1	6061 alüminyumun kimyasal bileşenleri .....	15
Çizelge 3.2	6061 Alüminyum alaşımının farklı yaşlandırma karakteristiklerinde mekanik özelliklerinin karşılaştırılması .....	15
Çizelge 3.3	Deney numunesi spektral analiz sonuçları .....	16

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1	Denge diyagramında solüsyona alma sıcaklığının belirlenmesi .....	5
Şekil 2.2	Yaşlanma aşamalarının gösterimi.....	7
Şekil 2.3	Malzeme yapısının değişimi.....	8
Şekil 2.4	Ara verilerek yaşlandırma işleminin grafiksel gösterimi.....	10
Şekil 2.5	Al-4Cu alaşımına ait T6(a) ve T6I6(b) mikro yapıları.....	11
Şekil 2.6	Havada soğutma işlemi yapılarak yaşlandırma işlemi sertlik değerleri.....	11
Şekil 2.7	Soğutma şekilleri ve sertlik değerleri.....	12
Şekil 2.8	Farklı yaşlandırma safhalarında fırınlama işleminden sonra 356 alüminyum alaşımın sertlik değerleri.....	13
Şekil 3.1	Çekme deney numune ölçüleri.....	17
Şekil 3.2	Ara verilerek yaşlandırma safhaları.....	18
Şekil 3.3	6061 alüminyum alaşımı denge diyagramı.....	18
Şekil 4.1	Sertlik değerlerinin karşılaştırılması.....	21
Şekil 4.2	1 gün ara verilerek yapılan yaşlandırma işlemi için gerilme-birim deformasyon eğrisi.....	22
Şekil 4.3	3 gün ara verilerek yapılan yaşlandırma işlemi için gerilme-birim deformasyon eğrisi.....	23
Şekil 4.4	5 gün ara verilerek yapılan yaşlandırma işlemi için gerilme-birim deformasyon eğrisi.....	23
Şekil 4.5	7 gün ara verilerek yapılan yaşlandırma işlemi için gerilme-birim deformasyon eğrisi.....	24
Şekil 4.6	12 gün 15 saat ara verilerek yapılan yaşlandırma işlemi için gerilme-birim deformasyon eğrisi.....	24
Şekil 4.7	Gerçek birim deformasyon değişimi.....	25
Şekil 4.8	Gerçek maksimum gerilme değişimi.....	26
Şekil 4.9	Gerçek akma gerilmesi değişimi.....	27
Şekil 4.10	Mukavemet katsayısı değişimi.....	28
Şekil 4.11	Pekleşme katsayısı değişimi.....	29
Şekil 4.12	1 gün ara verilerek yapılan yaşlandırma işlemi için deformasyon pekleşmesi hızı-gerilme değişimi.....	30

Şekil 4.13	3 gün ara verilerek yapılan yaşlandırma işlemi için deformasyon pekleşmesi hızı-gerilme değişimi.....	30
Şekil 4.14	5 gün ara verilerek yapılan yaşlandırma işlemi için deformasyon pekleşmesi hızı-gerilme değişimi.....	31
Şekil 4.15	7 gün ara verilerek yapılan yaşlandırma işlemi için deformasyon pekleşmesi hızı-gerilme değişimi.....	31
Şekil 4.16	12 gün 15 saat ara verilerek yapılan yaşlandırma işlemi için deformasyon pekleşmesi hızı-gerilme değişimi.....	32

## FOTOĞRAFLAR DİZİNİ

Fotoğraf 3.1	6061-T6 alüminyum alaşımı.....	16
Fotoğraf 3.2	Deney numuneleri.....	17
Fotoğraf 3.3	Vickers sertlik ölçüm cihazı.....	19
Fotoğraf 3.4	Çekme deney cihazının genel görünümü.....	20

## KISALTMA 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
NY	: Normal yaşlandırma
AVY	: Ara verilerek yaşlandırılma

# BÖLÜM I

## GİRİŞ

### 1.1 Amaç ve Kapsam

Alüminyum hammaddesi olan boksitin bilinen rezervleri, tüketim hızına göre 3000 yıl yetecek miktardadır. Tüketim hızının çok üstünde yeni boksit rezervleri de bulunmaktadır. Ülkemizde, 1960'lardan itibaren, özellikle dayanıklı tüketim mallarının üretimine başlanması ve otomotiv sektöründeki gelişmeler, alüminyuma olan talebi arttırmıştır. Bugün dünyada; 730.000.000 ton/yıl ile ilk sırada yer alan demir-çelikten sonra 22.000.000 ton/yıl ile alüminyum, en çok üretilen ikinci metal konumundadır. Yarattığı katma değer açısından ise, 150.000.000 ton demir-çeliğe eşdeğerdir [1].

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 güvenlik 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 kullanılacak 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].

## 1.2 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/mm<sup>2</sup> (MPa) ortalama mukavemeti ile bir çok kullanım alanı için optimum çözümler sunmaktadır [3].

Alüminyum kullanımındaki ekonomik ve ekolojik ağırlıklı nedenleri şu şekilde sıralayabiliriz [3].

- Alüminyum üretmek için gerekli enerjinin üçte ikisi sudan elde edildiğinden diğer alternatif malzemelere göre daha az enerji harcayarak hafif yapılar üretilebilir.
- 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.
- 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.



- Boksit hammaddesinin tüketim ve geri kazanım çemberi içerisinde insanoğlunun mevcudiyeti boyunca var olacağı düşünülmektedir.
- Kullandığımız eşyalardan aldığımız gıdalara kadar alüminyum insan hayatıyla iç içedir. Bu insan sağlığına olumlu bir etki taşımaktadır.
- Alüminyum oksit (Alumina) üretiminde bir atık olarak ortaya çıkan kırmızı çamur, yeniden değerlendirilerek portlant çimentosu yapımında ve plastik endüstrisinde pigment olarak kullanılmaktadır.

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

- Uygun mekanik özelliklerle birlikte düşük ağırlık,
- Koku ve kimyasallara karşı dayanım ve sağlıklı koşullar,
- Yüksek ısı iletkenliği,
- Parlama ve alev almazlık,
- Manyetik nötralite,
- Kolay şekillendirilebilme kabiliyeti,
- Farklı yöntemlerle yüzey işlenebilmesi

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 <sup>3</sup>
Yoğunluğu (660°C'de sıvı)	2,37 g/cm <sup>3</sup>
Elastik modül, E.	7,2x10 <sup>3</sup> kg/mm <sup>2</sup>
Kayma modülü, g	2,7x10 <sup>3</sup> kg/mm <sup>2</sup>
Ergime sıcaklığı, T	660,24 °C
Ergime ısısı, Q	94,6 cal/g
Elektrik iletkenliği	37,74 m/Ohm.mm <sup>2</sup>
Isı iletkenliği, λ	0,55 cal/cm.s.°C

Alüminyum alaşımları içinde bulundurdukları element miktarına göre isimlendirilir. Amerikan alüminyum birliğine göre, alüminyum dövme alaşımları dört harfle sınıflandırılmaktadır. Bu sınıflandırma şu şekildedir:

- 1XXX (Saf) alüminyum: Genellikle elektrik ve kimya endüstrisinde kullanılırlar.
- 2XXX (Al-Cu) alaşımları: Esas alaşım elementi bakırdır. Başta magnezyum olmak üzere diğer alaşım elementleri de bulunabilir, yüksek mukavemet istenen havacılık sektöründe yaygın bir şekilde kullanılırlar.
- 3XXX (Al-Mn) alaşımları: Esas alaşım elementi mangandır. Boru, sıvı tankları ve mimari uygulamalarda kullanılırlar.
- 4XXX (Al-Si) alaşımları: Esas alaşım elementi silisyumdur. Termal genleşme katsayısı düşük, aşınma direnci ve korozyon dayanımı yüksek alaşımlardır. Kaynaklı yapılarda, levha üretiminde, otomobil parçaları üretiminde kullanılırlar.
- 5XXX (Al-Mg) alaşımları: Esas alaşım elementi magnezyumdur. Magnezyum oranı arttıkça sertlik ve mukavemet artar fakat süneklik azalır. Korozyona karşı direnci yüksek olduğundan, bu ortamda çalışacak yapıların imalatında kullanılırlar.
- 6XXX (Al-Mg-Si) alaşımları: Esas alaşım elementleri magnezyum ve silisyumdur. Şekillendirilme kabiliyeti yüksek olan bu alaşımlar özellikle ekstrüzyon ile üretilen parçaların imalatında sıklıkla kullanılırlar.
- 7XXX (Al-Zn) alaşımları: Bakır esas alaşım elementi olup, magnezyum, krom ve zirkonyum ilave alaşım elementleridir. 7XXX serisi, alüminyum alaşımlarının en yüksek mukavemete sahip olanıdır. Uçak parçaları yapımı ve diğer yüksek dayanım istenen yerlerde kullanılırlar.
- 8XXX (Al-Li) alaşımları: Esas alaşım elementi lityum olup, kalay eklentisinde yapılabilmektedir. Özellikle uçak ve uzay yapılarında kullanılmaya başlanan bu malzeme, iyi yorulma direnci ve iyi tokluk özelliklerine sahiptir. Fakat diğer Al alaşımları ile karşılaştırıldığında üretim maliyetleri yüksektir.

## BÖLÜM II

### ALÜMİNYUM ALAŞIMLARIN SERTLEŞTİRİLMESİ

#### 2.1 Yaşlandırma

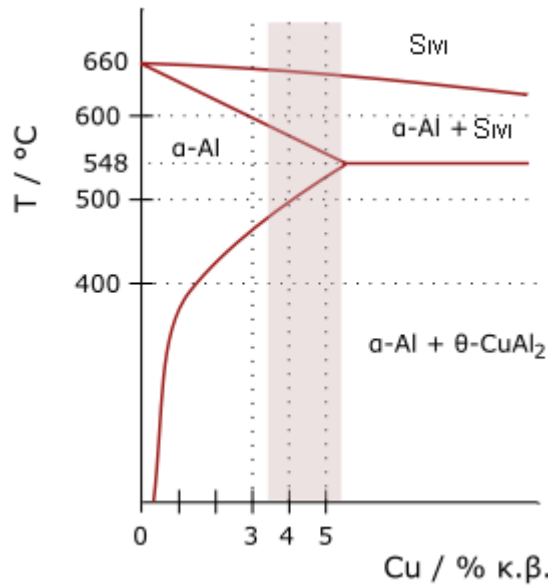
Alüminyum alaşımlarının yaşlandırılmasının temel amacı mekanik özellikleri iyileştirmek için malzemenin içyapısında ince sert ve uyumlu çökeltinin oluşmasını ve dağılımını sağlamaktır.

Yaşlandırma genel olarak kullanım sıcaklığında termodinamik denge halinde bünyesinde en az iki faz ihtiva eden malzemeyi hızlı soğutmak suretiyle denge yapısı fazlarının oluşumuna fırsat vermeden tek fazlı kararsız dengeli yapıya dönüştürülebilen alaşımlara uygulanabilir.

Yaşlandırma işlemi üç aşamadan oluşur.

##### 2.1.1 Solüsyona alma

Malzemenin faz diyagramında solvüs sıcaklığının üstünde bir sıcaklıkta bekletilmesi işlemidir.



Şekil 2.1 Denge diyagramında solüsyona alma sıcaklığının belirlenmesi [4]

Yukarıdaki şekilden de anlaşılacağı gibi bünyesinde yaklaşık olarak %5 bakır içeren bir alüminyum alaşımı için malzemenin solüsyona alma noktasıdır sıcaklığı yaklaşık olarak 548 °C' dir. Bu sıcaklıkta malzeme bünyesindeki  $\Theta$  tanecikleri eriyerek %100  $\alpha$  tanecikleri bulunduracaktır. Bu durum malzemenin yüksek sıcaklıklarda belirli bir süre bekletilerek elde edilir.

### 2.1.2. Dinlendirme

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

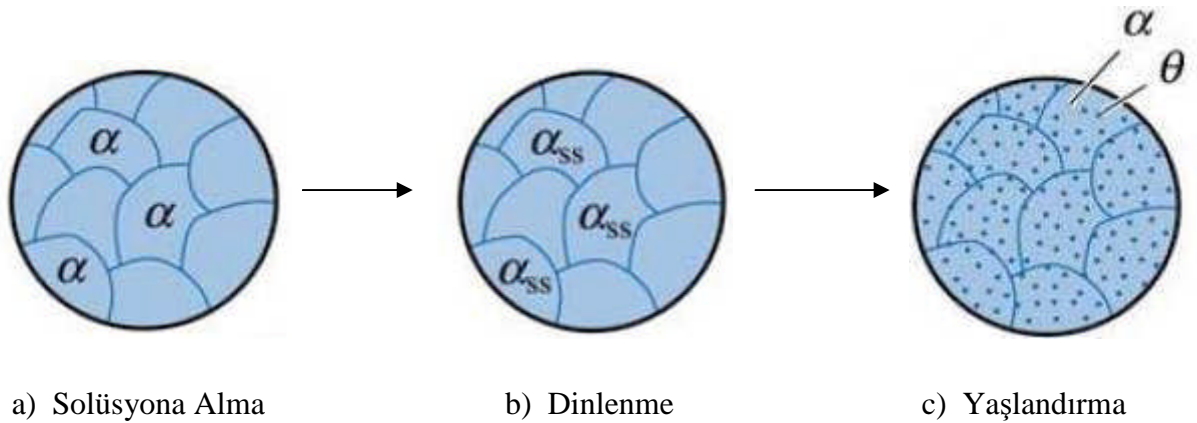
Malzemenin korozyon direnci ve mekanik özelliklerinin istenen seviyelerde olabilmesi için malzemenin aşırı doymuş  $\alpha$  yapılarından oluşması dolayısıyla solüsyona alma işleminden sonra malzemenin hızlı bir şekilde soğutulması gerekmektedir. Soğutma işlemi soğuk su, kaynar su, polyalkylene glikol,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

Çizelge 2.1 Soğutma hızının malzeme özellikleri üzerindeki etkisi [5]

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

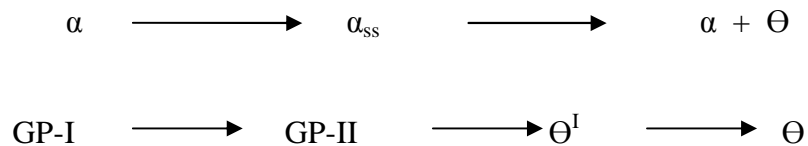
### 2.1.3 Yaşlandırma

Solüsyona alma ve dinlendirme işleminden sonra aşırı doymuş olan  $\alpha$  tanecikleri solvüs sıcaklığının altında ısıtılarak atomların kısa mesafelerde nüfuz etmeleri sağlanır. Aşırı doymuş  $\alpha$  tanecikleri dengede olmadığı için atomlar çekirdeklenme bölgelerine nüfuz ederler daha sonra çökeltiler oluşur ve büyümeler meydana gelir. Alaşımdaki ince çökeltiler, biçim değiştirme sırasında aykırı yerleşimlerin hareketini kısıtlayarak, alaşımın dayanımını artırır.



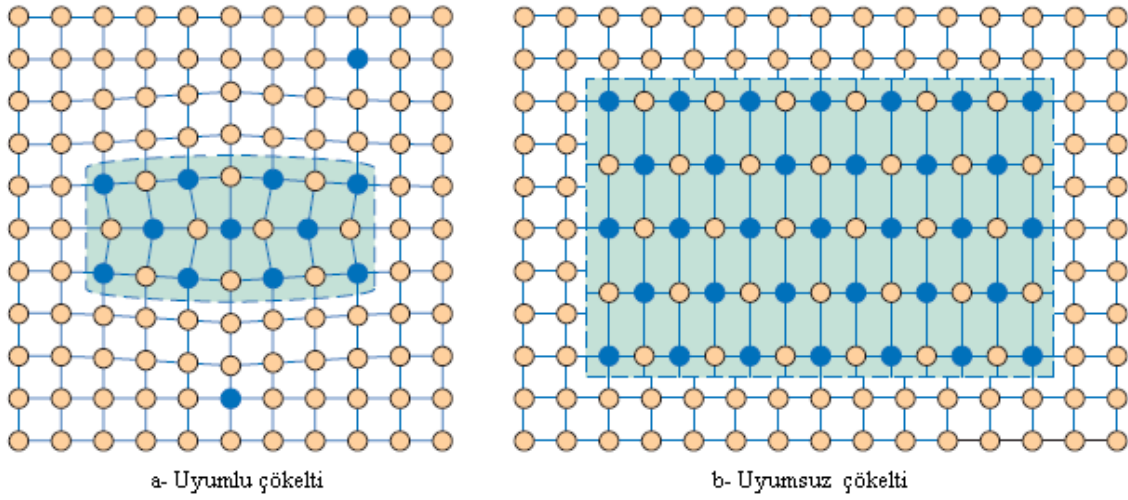
Şekil 2.2 Yaşlanma aşamalarının gösterimi [6]

Yaşlandırma safhasında malzeme yapısındaki  $\Theta$  oluşumu bir dizi safhadan geçerek meydana gelir. Yaşlanma başlangıcında atomlar matris düzlemlerinde yoğunlaşırlar ve GP-1 bölgelerini oluştururlar. Yaşlanma devam ettikçe daha çok atom düzleme nüfuz ederek daha kalın GP-II ( $\Theta^{II}$ ) yapısını oluştururlar. Daha sonra GP-II çözünerek  $\Theta^I$  ve daha sonra da  $\Theta$  yapısına dönüşürler.  $\Theta$  yapısı dengeli ve uyumlu bir formdadır [6].



Dengesiz fakat uyumlu olan GP-I, GP-II ve  $\Theta^I$  çökeltilerinin boyutu büyüdüğünde, alaşımın dayanımı yaşlandırma zamanı ile artar. Bu uyumlu çökeltiler varlıklarını korudukları sürece alaşım yaşlandırma sınırları içindedir. Dengeli fakat uyumsuz  $\Theta$  fazı

oluşmaya başladığında alaşımın dayanımı düşmeye başlar. Bu durumda alaşım aşırı yaşlandırılmış olup, yaşlanma sıcaklığı ve zamanın artırılması ile elde edilir [6].



Şekil 2.3 Malzeme yapısının değişimi [7]

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. Bu uluslararası standartlarda T harfi ve bunu takip eden rakamlarla ifade edilir. Bu simgeleme sistemi Çizelge 2.2 de verilmiştir.

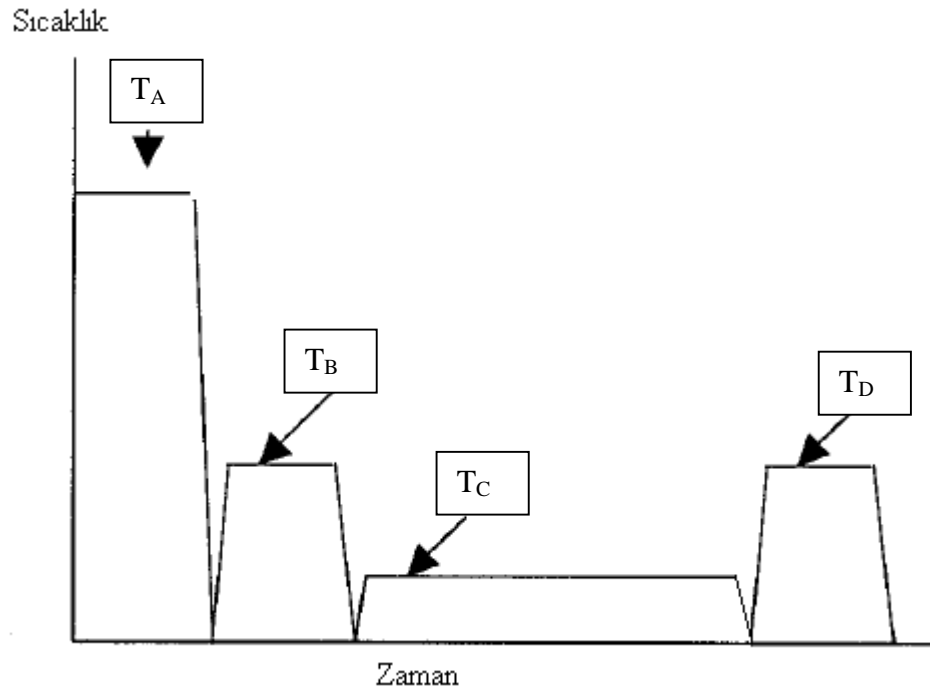
Çizelge 2.2 Alüminyum ve alüminyum alaşımlarının yaşlandırma simgeleri [8]

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

## 2.2 Ara Verilerek Yaşlandırma (2. Çökeltme Sertleşmesi)

Ara verilerek yaşlandırma; kısa süreli yapay yaşlandırılmış bir malzemenin düşük sıcaklıklarda bekletildikten sonra tekrar yaşlandırılması olayıdır. Isıl işlem uygulanabilen alaşımların mekanik özellikleri bu çalışmalarla daha da iyileştirebilmiştir [9].

Bu yaşlandırma türü  $TX_1IX_2$  şeklinde gösterilmektedir.  $TX_1$  normal yaşlandırma şeklini, I ara verilerek yaşlandırma yapıldığını,  $X_2$  ara verilerek yaşlandırmadan sonraki yaşlandırma şeklini göstermektedir [10].



Şekil 2.4 Ara verilerek yaşlandırmanın işleminin grafiksel gösterimi [10]

Grafikte;

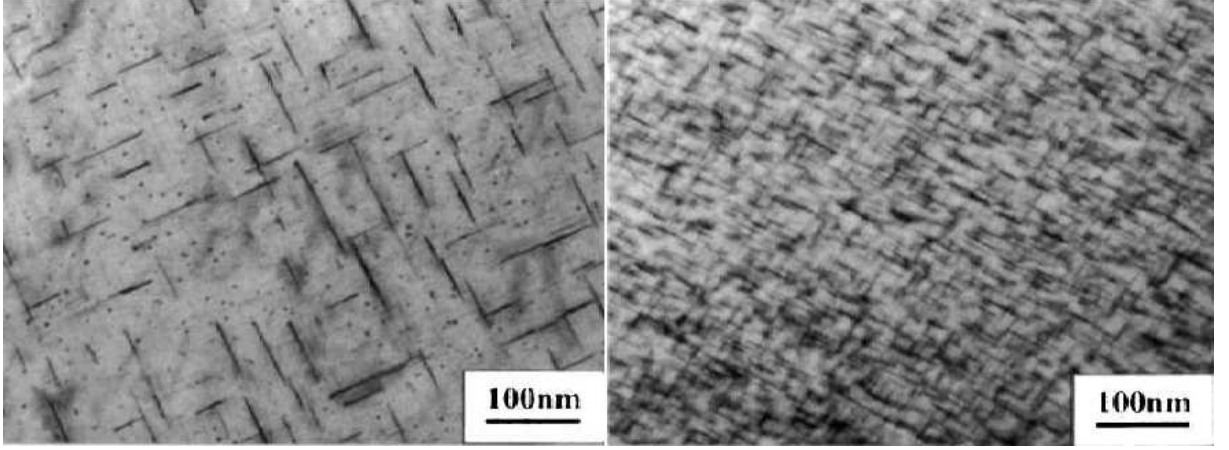
$T_A$ ; Solüsyona alma işlemini,

$T_B$ ; Yapay yaşlandırma işlemini,

$T_C$ ; Ara verilerek yaşlandırma işlemini,

$T_D$ ; Ara verilerek yaşlandırma işleminden sonraki yaşlandırma işlemini göstermektedir.





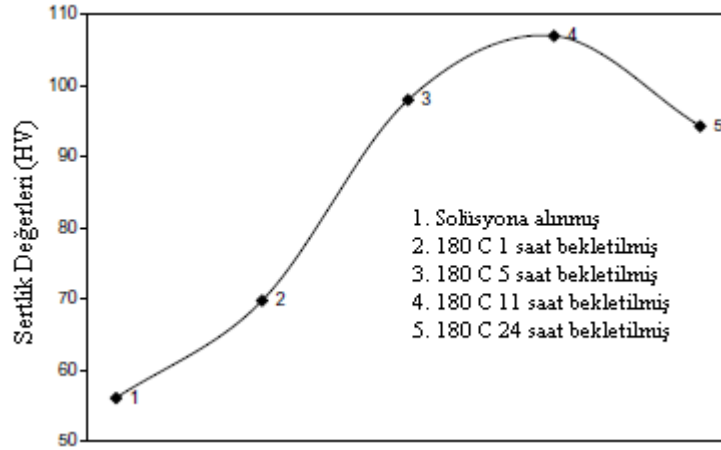
(a)

(b)

Şekil 2.5 Al-4Cu alaşımına ait T6 (a) ve T6I6 (b) mikro yapıları [11]

Şekil 2.5’de görüldüğü üzere T6I6 yapısında bulunan  $\alpha$  ve  $\Theta$  taneleri T6 yapısına göre daha sık ve düzenlidir. Bu yüzden mekanik özelliklerdeki iyileşmenin çökelti boyutlarına, dağılımına ve oranına bağlı olarak değiştiği düşünülmektedir [9,11-15].

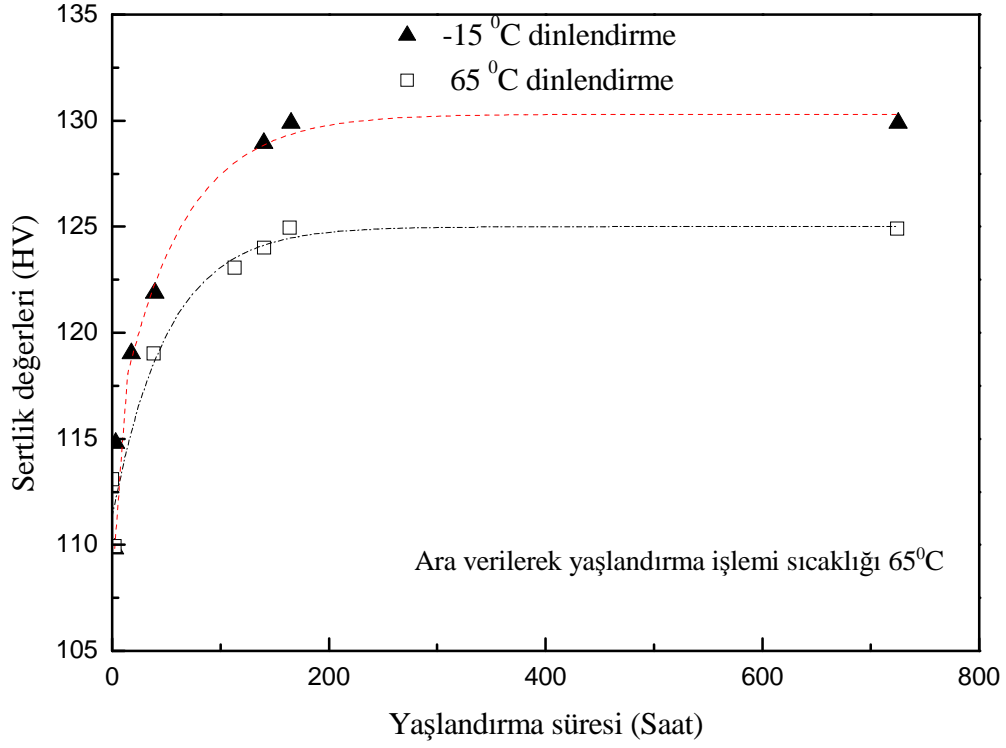
6061 alüminyum alaşımlarıyla yapılmış bir çalışmada malzemeler uzun süreli yaşlandırmalarına rağmen soğutma işlemi hava ile yapıldığında sertlik değerleri standart değerlere göre daha düşük çıkmıştır. Aşağıdaki grafikte bu değerler verilmiştir [16].



Şekil 2.6 Havada soğutma işlemi yapılarak yaşlandırma işlemi sertlik değerleri [16]

Daha önce yapılan çalışmalarda ara verilerek yaşlandırma yapılmadan önce malzemenin soğutma şeklinin mekanik özelliklere etkisinin çok fazla olduğu gözlenmiştir. Al-Cu-Mg-Ag alaşımlarında yapılan çalışmalarda yavaş soğutmanın ara verilerek

yaşandırmayı olumsuz yönde etkilediği görülmüştür [9]. Aşağıdaki grafikte farklı sıcaklıklarda soğutma işleminin ara verilerek yaşlandırma işlemi için sertlik değerlerindeki değişimini göstermektedir [11].



Şekil 2.7 Soğutma şekilleri ve sertlik değerleri [11]

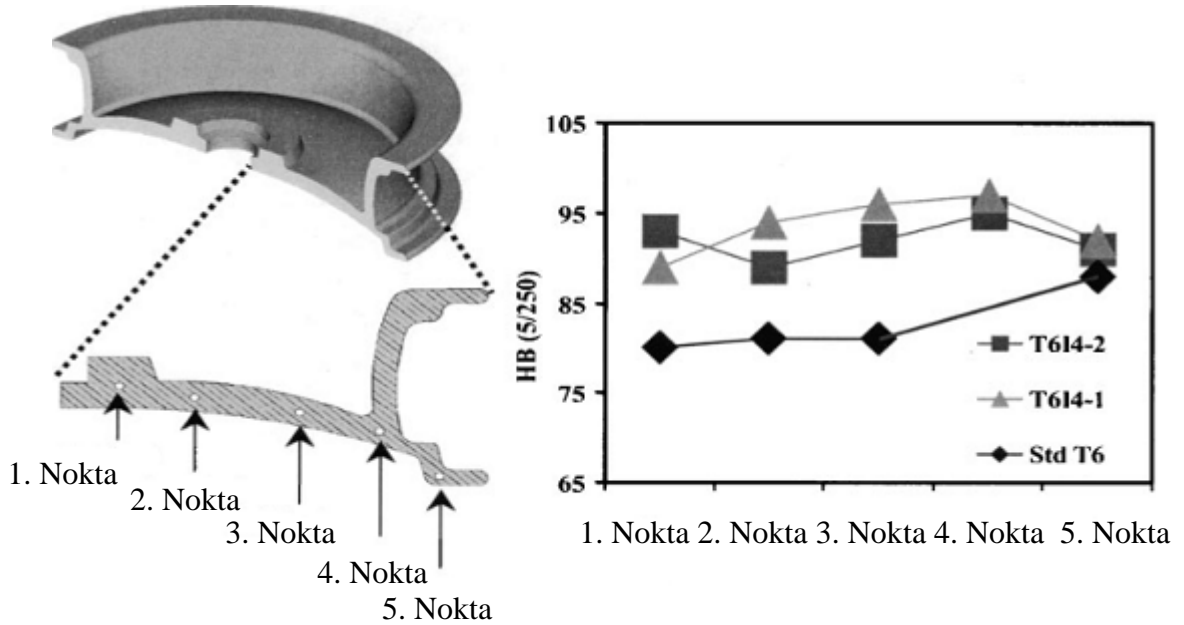
Ara verilerek yaşlandırmadan önceki  $T_B$  işlemi kısa bir sürede yapılmalı böylece ara verilerek yaşlandırma sırasında yeni uyumlu yapıların oluşması sağlanmalıdır. Bu durum malzemenin dayanımı arttırılabilmektedir [10].

Ara verilerek yaşlandırılan bir malzeme;  $T_C$  işleminden sonra yaşlandırma işlemine maruz kalmıyorsa malzeme T6I4 olarak gösterilir [9].

Farklı alüminyum alaşımları için yapılan çalışmalarda T6I4 yaşlandırma safhasında malzemenin mekanik özelliklerinin T6'ya göre iyileştirildiği gözlemlenmiştir. 2001 alaşımları için gerilme direnci %12, kopma uzaması ise %63, 357 döküm alaşımları için ise kırılma dayanımında %41 oranında artış gözlemlenmiştir [17]. 7050 alaşımlarda yapılan deneylerde ise T6 ve T6I4 ait sertlik değerleri karşılaştırıldığında sertlik değerleri birbirine yakın çıkmakta fakat ara verilerek yaşlandırma işlemi için sertlik değerlerinin zamanla değişimi daha az meydana gelmektedir [18].

Otomotiv endüstrisinde alüminyum kullanım alanları gün geçtikçe artmaktadır. Fakat üretim ve çalışma sırasında değişen sıcaklık şartları yaşlandırılabilir alüminyumlar için dezavantaj oluşturmaktadır. Özellikle boyanma işleminden sonra parçaların fırınlanması yaşlandırılabilir malzemeler için tamamıyla olumsuz etki yapmaktadır. Lumley ve diğ. [17] yapmış olduğu bir çalışmada bir jantta 356 döküm alüminyum alaşım için farklı şartlarda yaşlandırılmış ve boyanıp fırınlanmış malzemenin sertlik değerleri değerlendirilmiştir. Aşağıdaki şekilde “▲” ile gösterilen eğri 65<sup>0</sup>C’de “■” ile gösterilen eğri 25<sup>0</sup>C’de ara verilerek yaşlandırma yapıldığını, “◆” standart T6 ısıl işlemini göstermektedir.

1. Nokta: Jantın merkezine yakın
2. ve 3. Nokta: Jant telinin iç kısmında
4. ve 5. Nokta: Jantın kenarını ifade etmektedir.



Şekil 2.8 Farklı yaşlandırma safhalarında fırınlama işleminden sonra 356 alüminyum alaşımın sertlik değerleri [17]

Buradan da anlaşılacağı gibi ara verilerek yaşlandırma fırında boyama işlemleri için iyi bir potansiyel içermektedir.

Bahrami ve diğ. [19] yapmış oldukları çalışmada ara verilerek yaşlandırma sırasında uygulanan sıcaklığın 50<sup>0</sup>C’nin altında olması durumunda malzemenin mekanik

özelliklerinde fazla bir değişiklik meydana gelmediği gözlemlenmiştir. Bu yüzden bu çalışmada ara verilerek yaşlandırma sıcaklığı 65<sup>0</sup>C olarak seçilmiştir.

Bu yeni yaşlandırma şekli; sıcaklık ve zamanın değişimi ile malzemenin mekanik özelliklerinin değiştirilebildiğini göstermektedir. J. Buha ve diğ. [20] yapmış oldukları çalışmada ara verilerek yaşlandırmadan sonra yapılan farklı yaşlandırma sıcaklıklarında malzemenin mekanik özelliklerinin değiştiği belirlenmiştir.

6061 alüminyum alaşımlar için yapılan bir çalışmada ara verilerek yaşlandırma işleminden sonra yaşlandırma sıcaklığı olarak 177 ve 150<sup>0</sup>C gibi farklı sıcaklıklar kullanılmış ve standart T6 yaşlandırma için mekanik özellikleri karşılaştırılmıştır [21].

Çizelge 2.3 T6, T6I6/177 ve T6I6/150 şartları için mekanik özelliklerin karşılaştırılması [21]

Yaşlandırma Şekli	Akma Gerilmesi (MPa)	Maksimum Gerilme (MPa)	Birim Deformasyon(%)	Sertlik (HV)
T6	311	352	8,2	136
T6I6/177	335	368	7,3	146
T6I6/150	302	369	11,6	144

Yukarıdaki çizelgeden de anlaşılacağı gibi ara verilerek yaşlandırma işleminde yaşlandırma süresi ve sıcaklık değişiminin büyük etkileri bulunmaktadır. Fakat bu işlemlerde ara verilerek yaşlandırma işleminden sonra yaşlandırma işlemi 15 saat gibi uzun süreli bir işleme tabii tutulmuştur. Bu çalışmada ise hem ara verilerek yaşlandırma süreleri değiştirilmiş hem de ara verilerek yaşlandırma işleminden sonra iki farklı süre incelenmiştir.

## BÖLÜM III

### MALZEME VE YÖNTEM

#### 3.1 Malzeme

AA 6XXX serisi alaşımlar, magnezyum (Mg) ve silisyum (Si) ihtiva ederler. Bu elementlerin ve içindeki diğer bileşenleri (Fe, Cu, Mn, Zn, gibi) belirli sınırlar içinde farklı değerlerde olmaları, alaşımların kullanılma yerine göre farklı özelliklerde profil üretimini sağlarlar.

Bu alaşımlarda ısıtıl işlemler uygulanarak mekanik özelliklerinde iyileştirmeler sağlanabilmektedir. Literatürde yaşlandırma olarak da bilinen bu prosesin belirli sürelerde ve sıcaklıklarda uygulanmasıyla mukavemet özelliklerinde büyük iyileştirmeler sağlanmaktadır.

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

Çizelge 3.2 6061 Alüminyum alaşımının farklı yaşlandırma karakteristiklerinde mekanik özelliklerinin karşılaştırılması [22]

Aşım	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

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

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

Mg ve Si miktarlarının, profilin yapay yaşlandırma ısıl 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.

### 3.2. Deney Numunelerinin Hazırlanması

Malzemenin spectral analiz sonuçları alınarak bünyesinde bulunan elementler tespit edilmiş ve çizelge 3.3’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.3 Deney numunesi spektral analiz sonuçları

Spektral Analiz Sonucu									
Element	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Cr	Pb	Ti
Ölçülen Değerler	0,8	0,456	0,32	0,212	0,91	0,178	0,021	0,012	0,0087

Yapılan deneysel çalışmalarda Fotoğraf 3.1 de gösterilen 25 mm çapındaki 6061-T6 alüminyum alaşımının belirli koşullar altında yaşlandırma işlemleri neticesinde kazandığı mekanik özellikleri incelenmiştir.



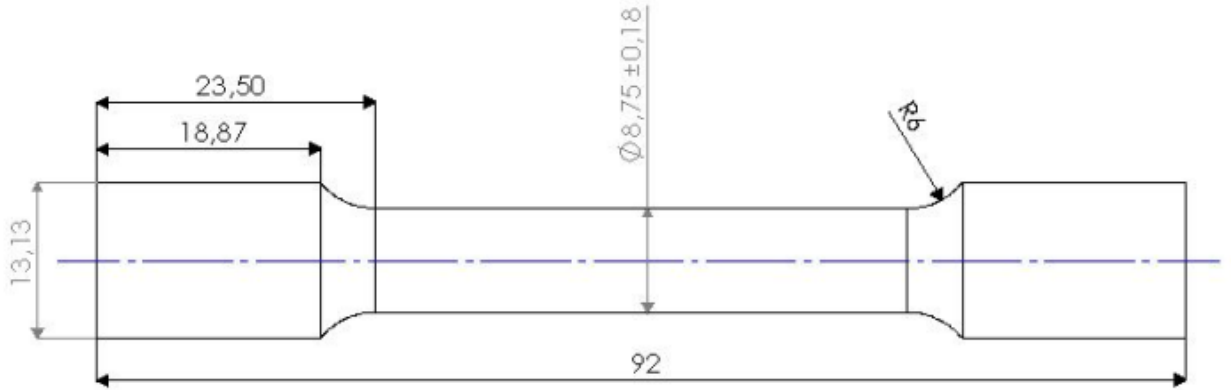
Fotoğraf 3.1 6061-T6 alüminyum alaşımı

Çalışmada öncelikle Fotoğraf 3.1 deki malzemeler CNC torna tezgahında işlenerek 39 adet deney numunesi hazırlanmıştır. Her deney için 3’er numune kullanılacak şekilde toplam 13 deney şartı belirlenmiştir. Malzemelerin birbirine karışmaması için numaratorler ile sırayla numaralandırılmışlardır.



Fotoğraf 3.2 Deney numuneleri

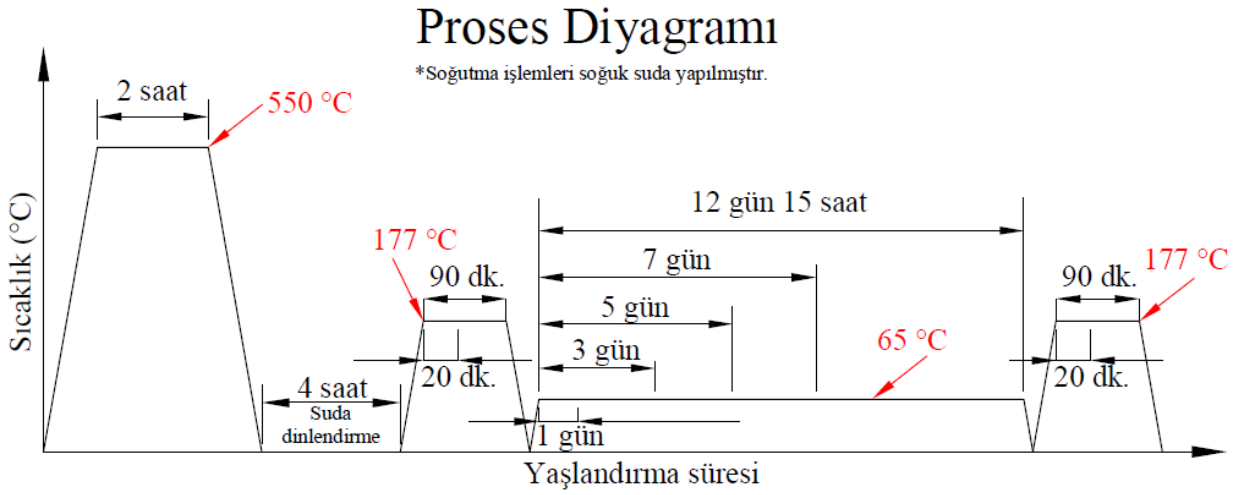
Numuneler ASTM E8M standardına göre üretilmiş olup ölçüleri aşağıdaki şekilde verilmiştir.



Şekil 3.1 Çekme deney numune ölçüleri (mm)

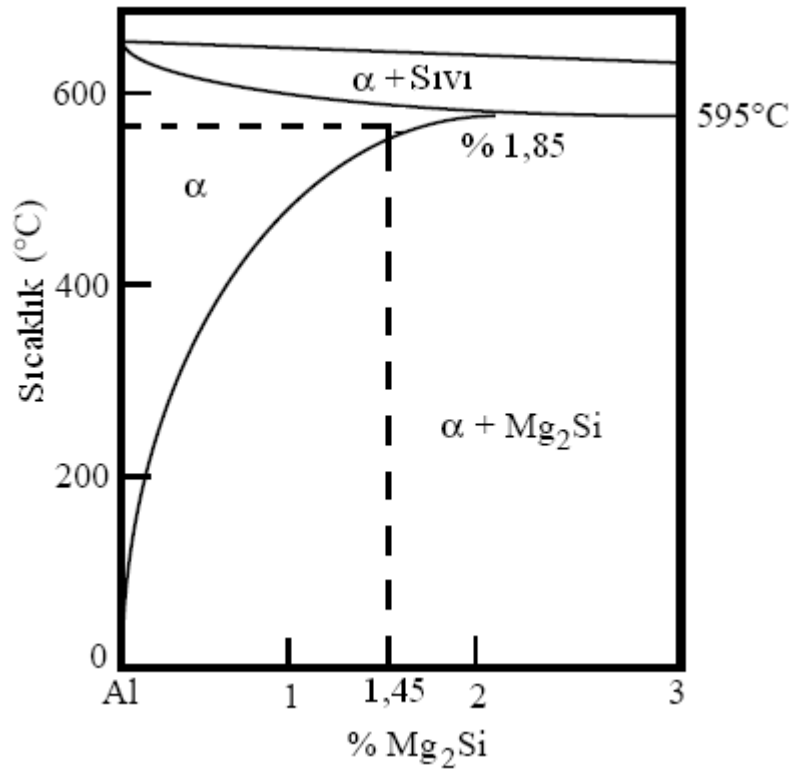
### 3.3. Isıl İşlem Karakteristikleri

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



Şekil 3.2 Ara verilerek yaşlandırma safhaları

Yaşlandırmanın ilk basamağı olan solüsyona alma işlemi için denge diyagramında gerekli olan sıcaklık değerleri seçilmiştir [23]. 6061 alüminyum alaşımı için denge diyagramını aşağıdaki gibidir.



Şekil 3.3 6061 alüminyum alaşımı denge diyagramı [23]

Bünyesinde %1,45 Mg<sub>2</sub>Si içeren bu alaşım için yukarıdaki grafikten de anlaşılacağı gibi 550°C sıcaklık ve 2 saat süre seçilmiştir.



Yaşlandırma sıcaklıkları ise daha önceden bu konuda yapılmış olan diğer literatür çalışmaları değerlendirilerek seçilmiştir [13,18,20].

Dinlendirme ise soğutma işlemi en hızlı olacak şekilde soğuk su ile yapılmıştır. Solüsyona alma işleminden sonra suda dinlendirme işlemi 4 saat yapılmış ve malzeme yapısındaki aşırı doymuş  $\alpha$  yapılarının istenen düzeyde olması sağlanmıştır. Diğer dinlendirme aşamalarında ise malzeme soğutulduktan sonra sudan alınmıştır.

### 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 12 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 kg.'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 referans değeri olarak; solüsyona alma işleminden sonra ara verilerek yaşlandırma işlemi yapılmamış numune deney sonuçları alınmıştır.

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.

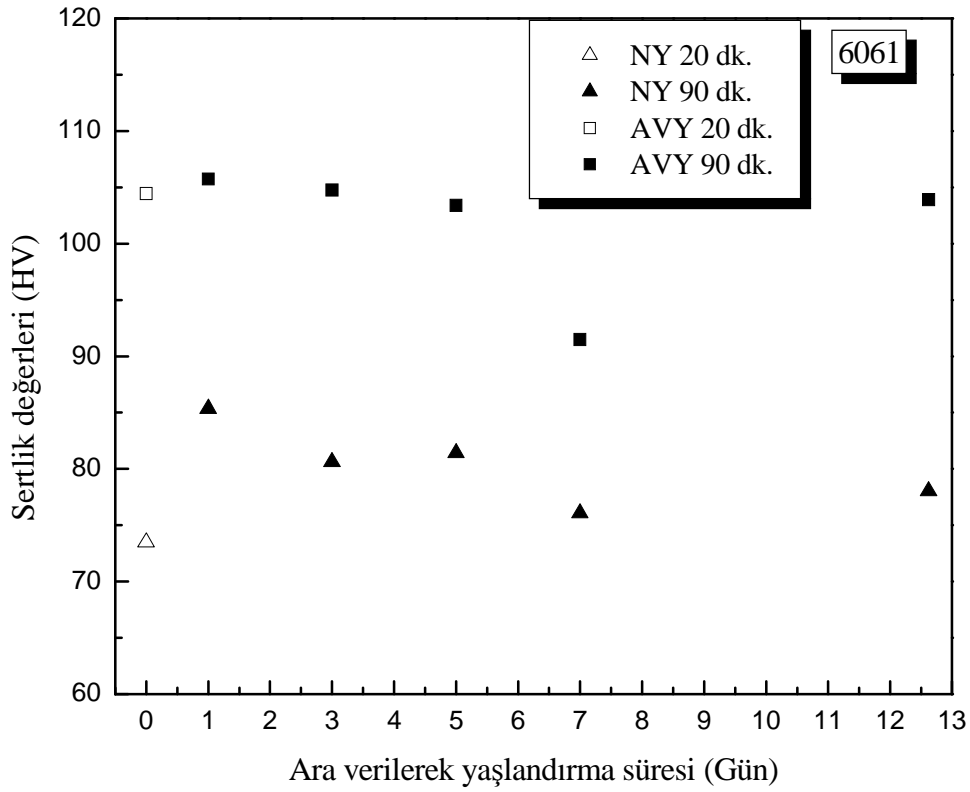
Cihaz o anki kuvveti “N” cinsinden, stroğu (iki çene arası mesafe) “mm” cinsinden ve ilk boya göre uzamayı “mm” cinsinden olmak üzere 3 veri sütunu aktarır. Bu veriler programdan “export” yapılarak(dışarı alınarak) “.txt” uzantılı dosya olarak kaydedilir, oradan MS Excel ve ORIGINPRO programlarından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

## BÖLÜM IV

### BULGULAR

#### 4.1 Sertlik Değişimi

Her deney şartı için alınan sertlik değerlerinin ortalaması alınarak aşağıdaki grafik oluşturulmuştur. Referans değerleri 20 dk. deney şartları için 73,5 HV, 90 dk. deney şartları için yaklaşık olarak 104 HV bulunmuştur.



Şekil 4.1 Sertlik değerlerinin karşılaştırılması

20 dk. deney şartlarında ise; 1. gündeki artış diğer artışlara göre daha fazla olmuş, 3. ve 7. günlerde sertliklerde düşüşler meydana gelmesine rağmen sertlik değerleri referans değerlerine göre artış göstermiştir. En iyi artış 1. gün için %16 ve sertlik değeri 85,35 HV iken en düşük artış 7. gün için %3 ve sertlik değeri 76,1 HV olarak tespit edilmiştir.

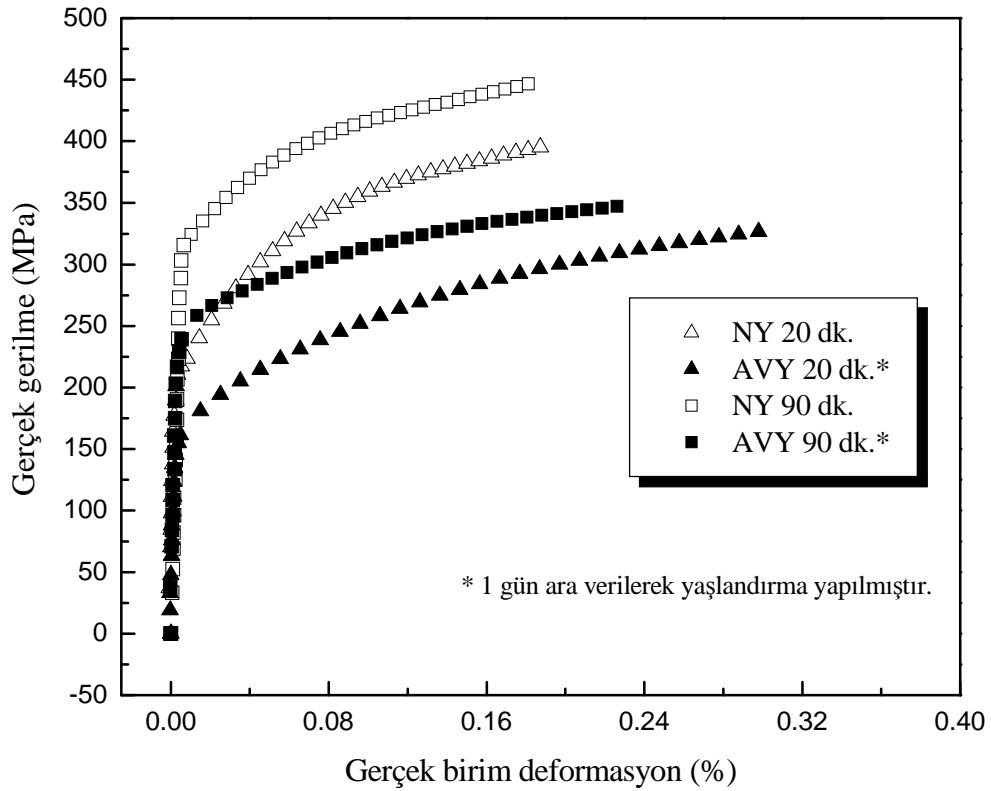
90 dk. deney şartı için 7. gün şartı hariç, sertlik değerleri referans değerine göre yaklaşık olarak aynı çıkmış olup, 7. gün için düşüş yaklaşık olarak %14 oranındadır. 7. gün

değerleri hariç elde edilen sertlik değerleri yaklaşık olarak 104 HV bulunmasına rağmen 7. günde elde edilen sertlik değeri ise yaklaşık olarak 91,5 HV bulunmuştur.

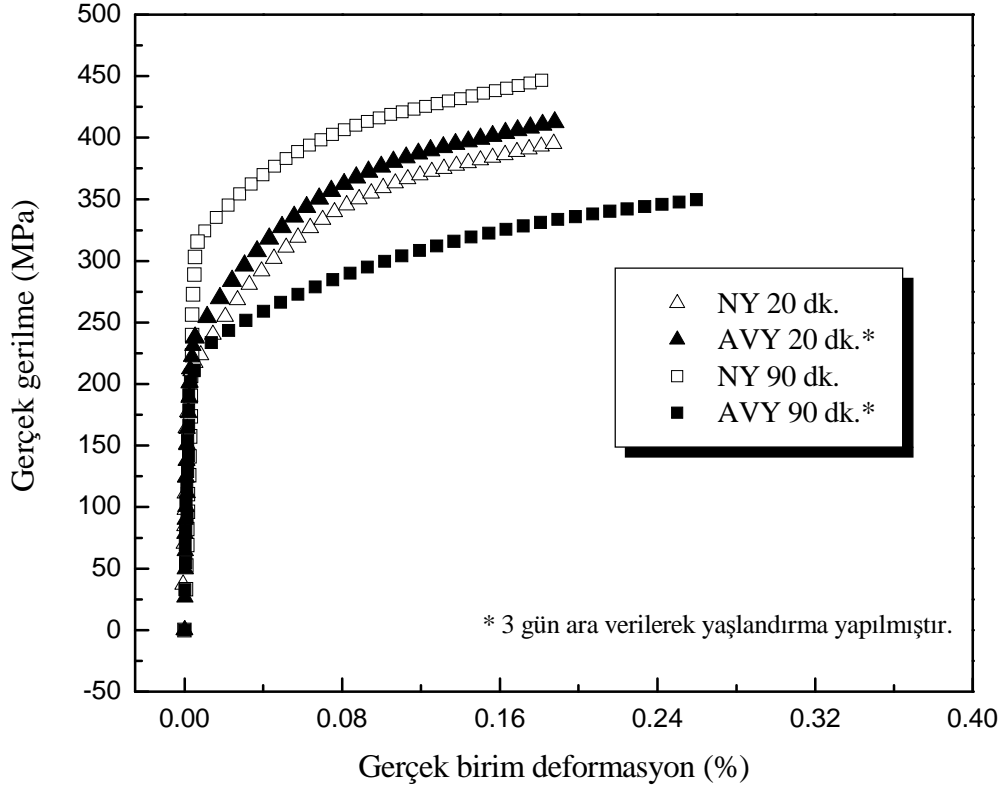
#### 4.2 Gerilme-Birim Deformasyon Eğrileri

5, 7 ve 12 gün 15 saat ara verilerek yaşlandırma yapılmış 20 dk. ve 90 dk. deney şartları için malzemenin gerilme değerleri başlangıç değerlerine göre düşmesine rağmen birim deformasyon değerlerinde artışlar meydana gelmiştir. Fakat 12 gün 15 saat ara verilerek yaşlandırma yapılmış 90 dk. deney şartlarında birim deformasyon değeri diğer ara verilerek yaşlandırma verilerine göre düşük çıkmıştır.

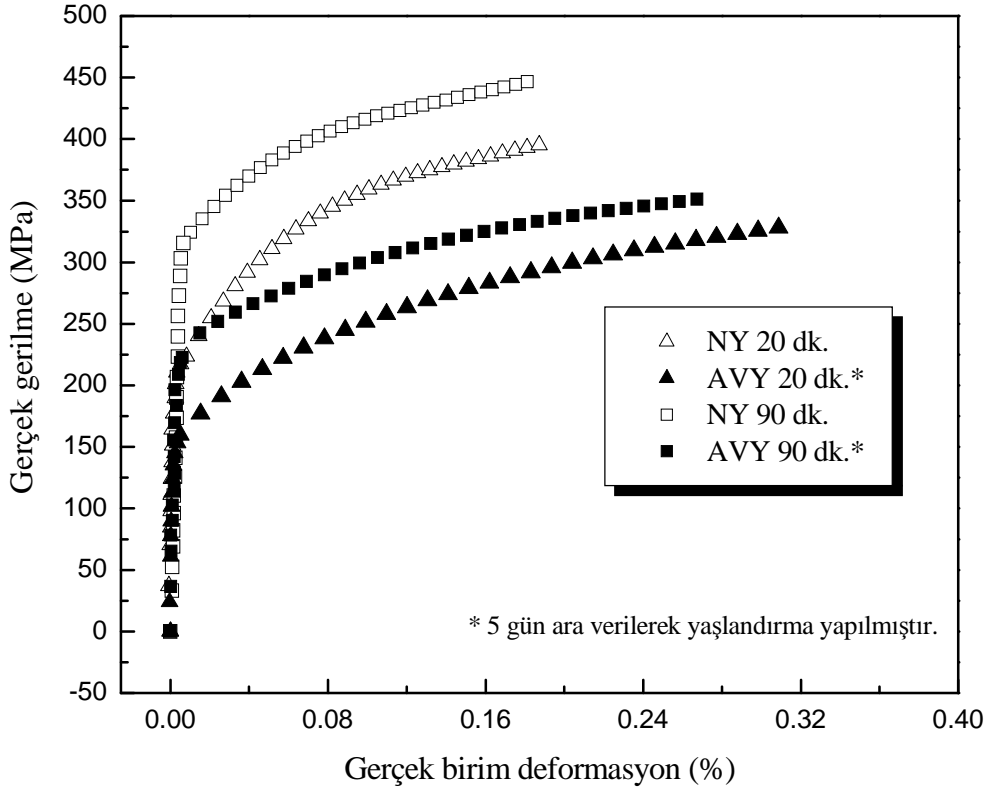
3 gün ara verilerek yaşlandırma yapılmış 20 dk. deney şartları için maksimum gerilme değerinde bir artış meydana gelmiş, fakat birim deformasyon değişimi başlangıç şartlarında göre önemli bir şekilde değişmemiştir. 90 dk. deney şartları için malzemenin gerilme değerleri düşmesine rağmen birim deformasyon değerlerinde önemli bir artış meydana gelmiştir. Aşağıda bu deney şartları için grafikler verilmiştir.



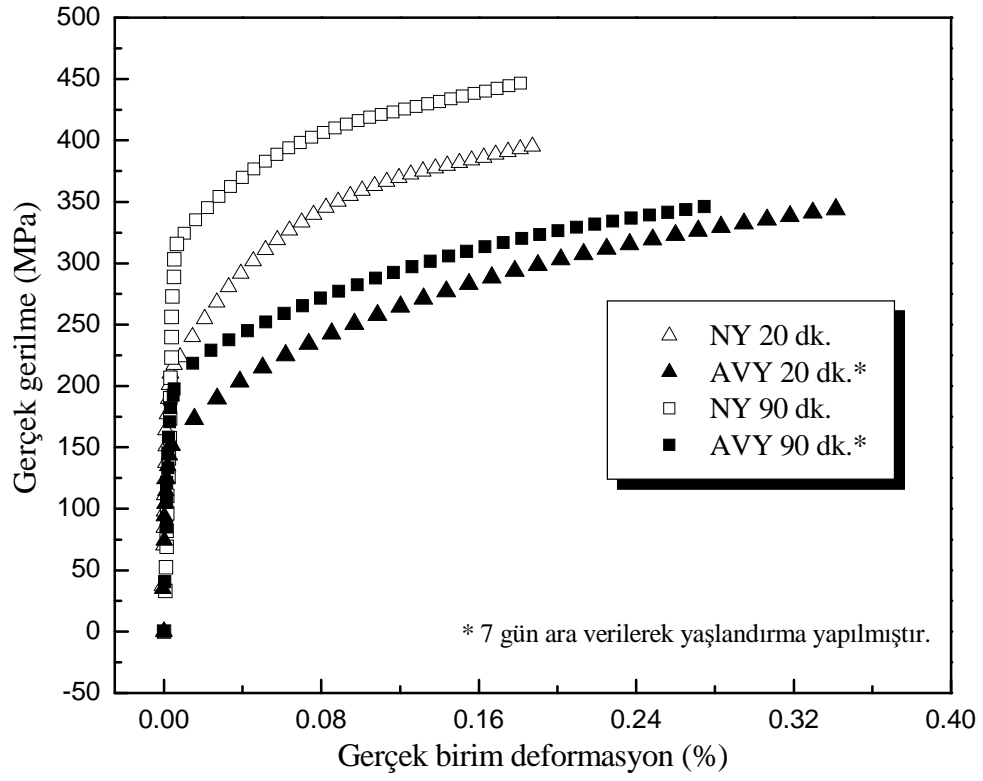
Şekil 4.2 1 gün ara verilerek yapılan yaşlandırma işlemi için gerilme-birim deformasyon eğrileri



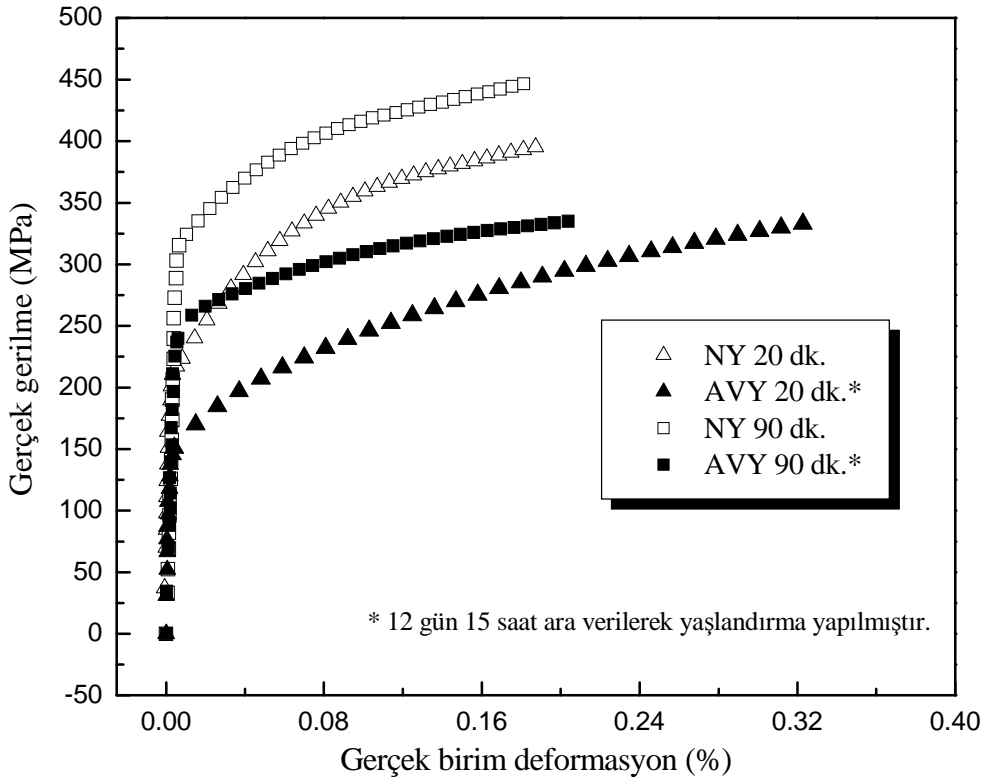
Şekil 4.3 3 gün ara verilerek yapılan yaşlandırma işlemi için gerilme-birim deformasyon eğrileri



Şekil 4.4 5 gün ara verilerek yapılan yaşlandırma işlemi için gerilme-birim deformasyon eğrileri



Şekil 4.5 7 gün ara verilerek yapılan yaşlandırma işlemi için gerilme-birim deformasyon eğrileri

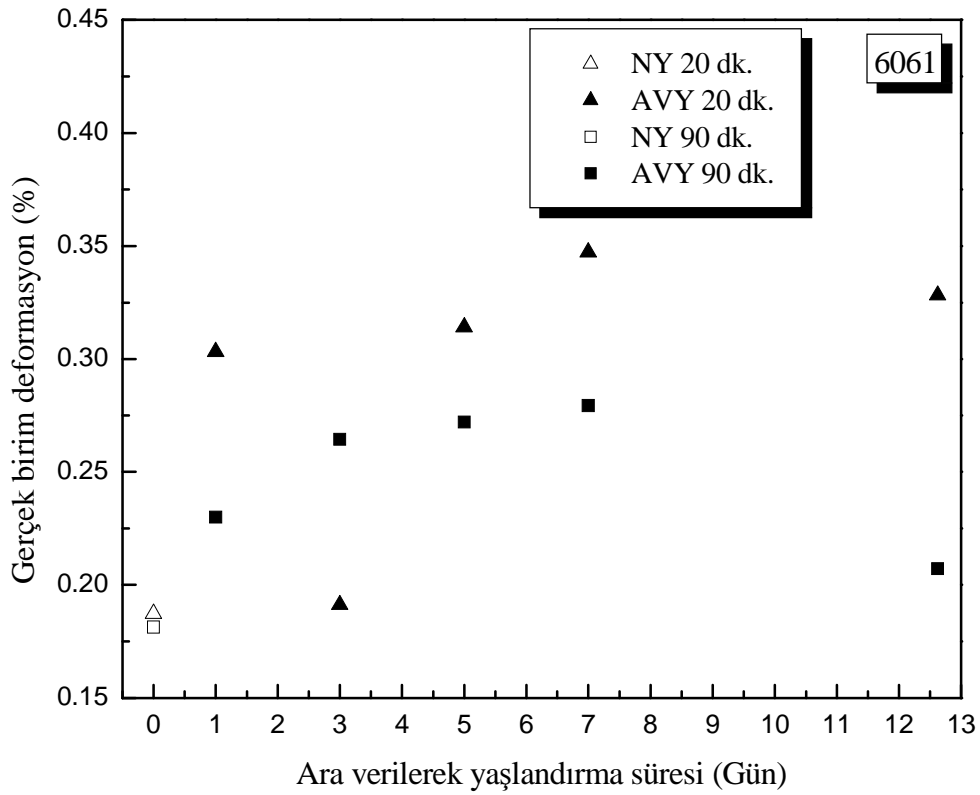


Şekil 4.6 12 gün 15 saat ara verilerek yapılan yaşlandırma işlemi için gerilme-birim deformasyon eğrileri

#### 4.2.1 Gerçek birim deformasyon değişimi

Elde edilen birim deformasyon değerleri 30 mm aralıklar için tespit edilmiştir. Elde edilen referans değerleri 20 dk. deney şartları için yaklaşık olarak % 13,856, 90 dk. deney şartları için % 11,681 olarak tespit edilmiştir.

20 dk. deney şartlarında için; 3 ve 12 gün 15 saat deney şartı hariç diğer tüm deneylerde bir artış gözlemlenmiş olup artış %119 olup elde edilen değer %30,32 dir. Ara verilerek yapılan yaşlandırmada elde edilen en düşük değer ise 3. gün için elde edilmiş olup değerler referans değerlerine yaklaşık olarak aynıdır.



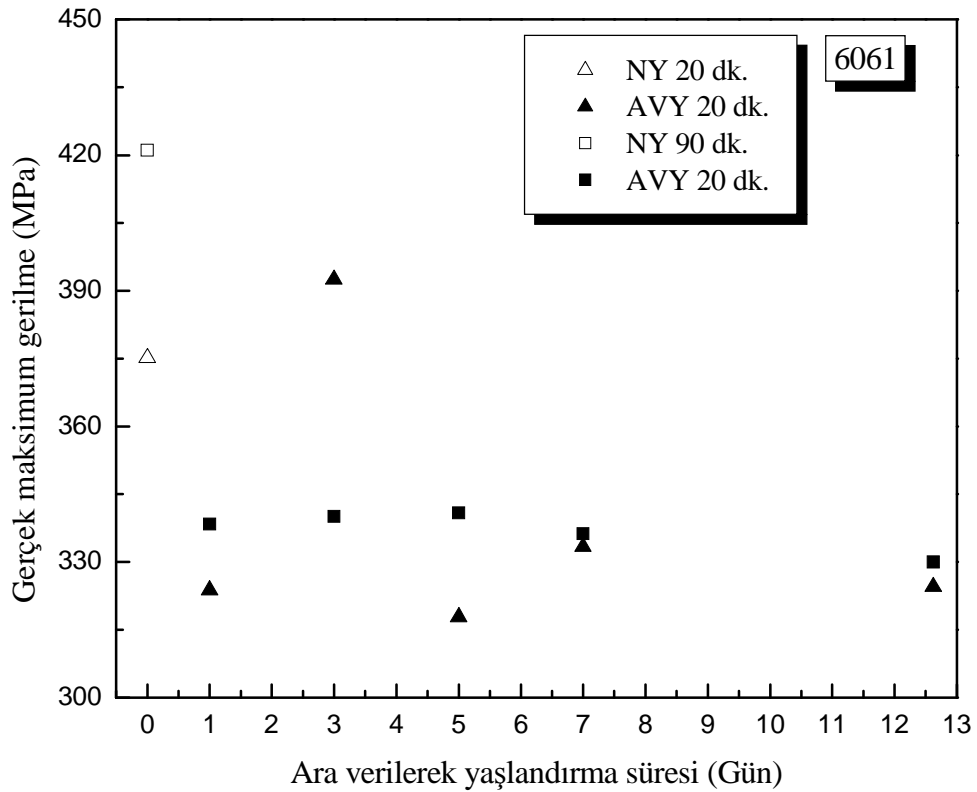
Şekil 4.7 Gerçek birim deformasyon değişimi

90 dk. deney şartı için; 12 gün 15 saat şartı hariç, diğer deney şartlarında artışlar meydana gelmiştir. Birim deformasyondaki en büyük artış 7. gün için elde edilmiş olup artış yaklaşık olarak %109 oranında ve bulunan değer %24,44 dür. Elde edilen en düşük değer ise %58 oranında artış ve bulunan değer %18,478 ile 12 gün 15 saat şartı için elde edilmiştir.

#### 4.2.2 Gerçek maksimum gerilme değişimi

Elde edilen referans değerleri 20 dk. deney şartları için yaklaşık olarak 375,1 MPa, 90 dk. deney şartları için yaklaşık olarak 421,1 MPa olarak tespit edilmiştir.

20 dk. deney şartı için; 3. gün şartı hariç tüm deney şartlarında bir düşüş meydana gelmiştir. Elde edilen en düşük sonuç 5. gün için 317,8 MPa (%15 azalma), elde edilen en yüksek sonuç ise 3. gün için 392,5 MPa (%5 artış) olarak elde edilmiştir.



şekil 4.8 Gerçek maksimum gerilme değişimi

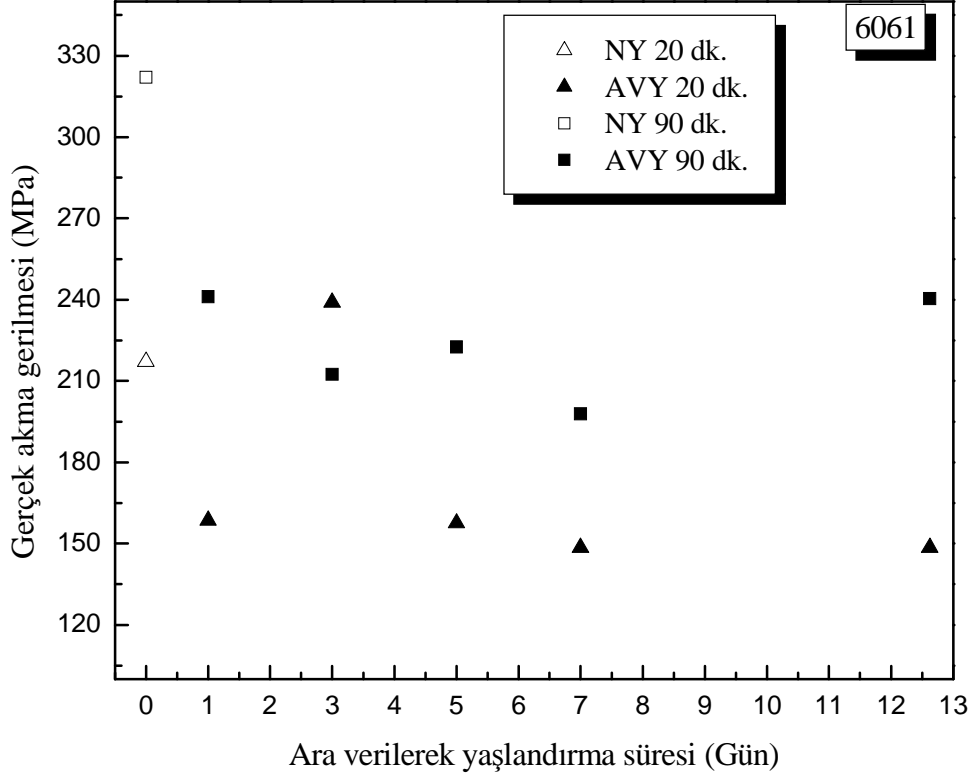
90 dk. deney şartı için; ara verilerek yaşlandırma işlemi maksimum gerilme değerleri birbirine yakın bulunmuş fakat referans değerine göre gözle görülür bir düşüş meydana gelmiştir. Düşüş oranı yaklaşık olarak %20 oranında meydana gelmiştir. Elde edilen bu değer yaklaşık olarak 335 MPa tespit edilmiştir.

#### 4.2.3 Gerçek akma gerilmesi değişimi

Elde edilen referans değerleri 20 dk. deney şartları için yaklaşık olarak 217,1 MPa, 90 dk. deney şartları için yaklaşık olarak 322 MPa olarak tespit edilmiştir.



20 dk. deney şartı için; 3. gün yaşlandırma için referans değerine göre bir artış meydana gelmiş, diğer şartlar için düşüşler meydana gelmiştir. Elde edilen en yüksek sonuç 239 MPa, en düşük değer ise 7. gün için 148,51 MPa (%31 azalma)'dır.



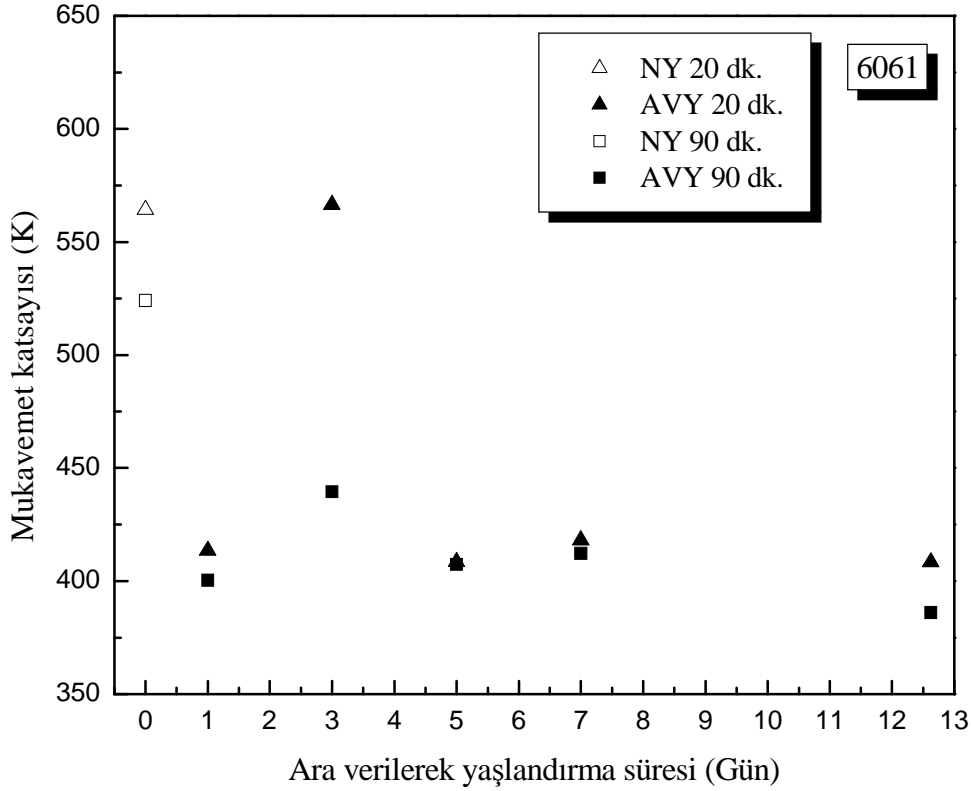
Şekil 4.9 Gerçek akma gerilmesi değişimi

90 dk. deney şartı için; 5. gün ve 12. gün 15. saat şartları hariç tüm deney şartlarında bir düşüş meydana gelmiş ve ara verilerek yaşlandırma işlemi yapılmış tüm deneyler referans değerlerine göre düşük çıkmaktadır. Elde edilen en yüksek sonuç 1. gün için 241,1 MPa (%25 azalma), en düşük sonuç 7. gün için yaklaşık olarak 198 MPa (%39 azalma)'dır.

#### 4.2.4 Mukavemet katsayısı değişimi

Elde edilen referans değerleri 20 dk. deney şartları için yaklaşık olarak 564, 90 dk. deney şartları için yaklaşık olarak 524,1 olarak tespit edilmiştir.

20 dk. deney şartı için; 3. gün şartı hariç tüm deney koşullarında bir azalma meydana gelmiş ve elde edilen en düşük sonuç 408,4 (%18 azalma) ile 12 gün 15 saat şartına aittir. 3. gün sonuçları (566,4) ise referans değerleri ile yaklaşık olarak aynı kalmıştır.



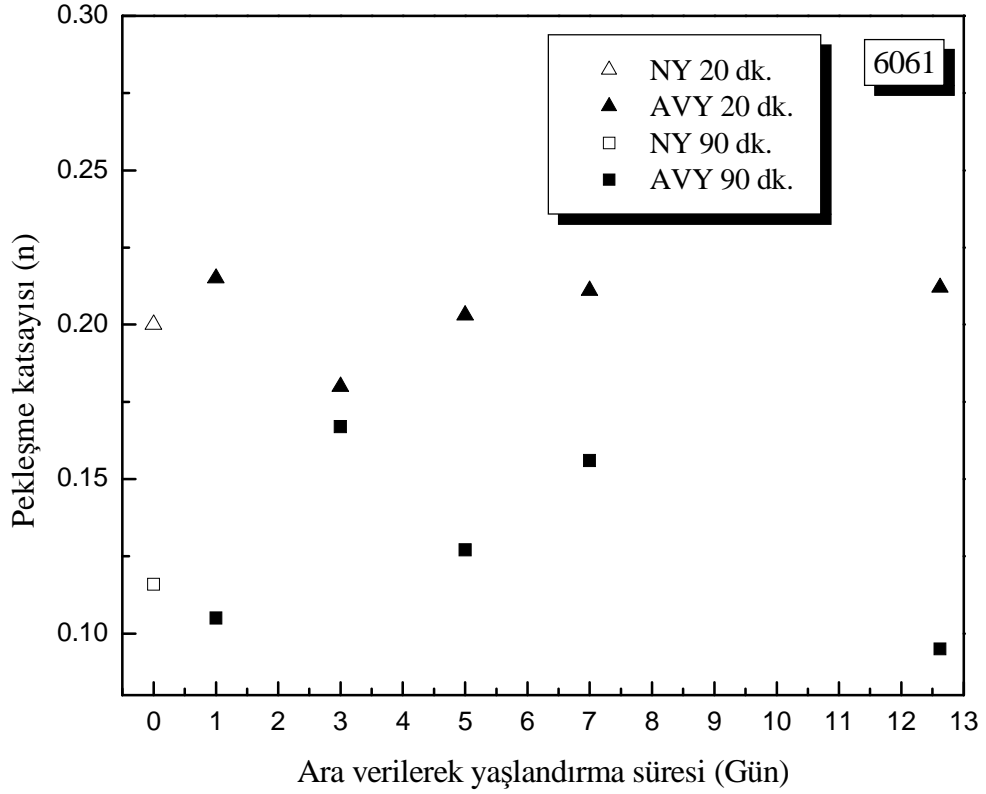
Şekil 4.10 Mukavemet katsayısı değişimi

90 dk. deney şartı için; mukavemet katsayılarında gözle görülür bir düşme meydana gelmektedir. Elde edilen en yüksek değer 439,5 (%16 azalma) ile 3. gün, en düşük değer 386 (%26 azalma) ile 12. gün 15 saatlik yaşlandırmada elde edilmiştir.

#### 4.2.5 Pekleşme katsayısı değişimi

Elde edilen referans değerleri 20 dk. deney şartları için yaklaşık olarak 0,2, 90 dk. deney şartları için yaklaşık olarak 0,116 olarak tespit edilmiştir.

20 dk. deney şartı için; 3. gün deney şartı hariç tüm deney şartlarında bir artış meydana gelmiş, 1. , 7. ve 12. gün 15 saatlik değerleri birbirine yakın çıkmıştır. Artış miktarı %5 oranındadır. 5. gün değeri referans değerine yaklaşık olarak eşit çıkmış, azalmanın meydana geldiği tek şart olan 3. günde ise değer 0,18 (%10 azalma) olarak tespit edilmiştir.



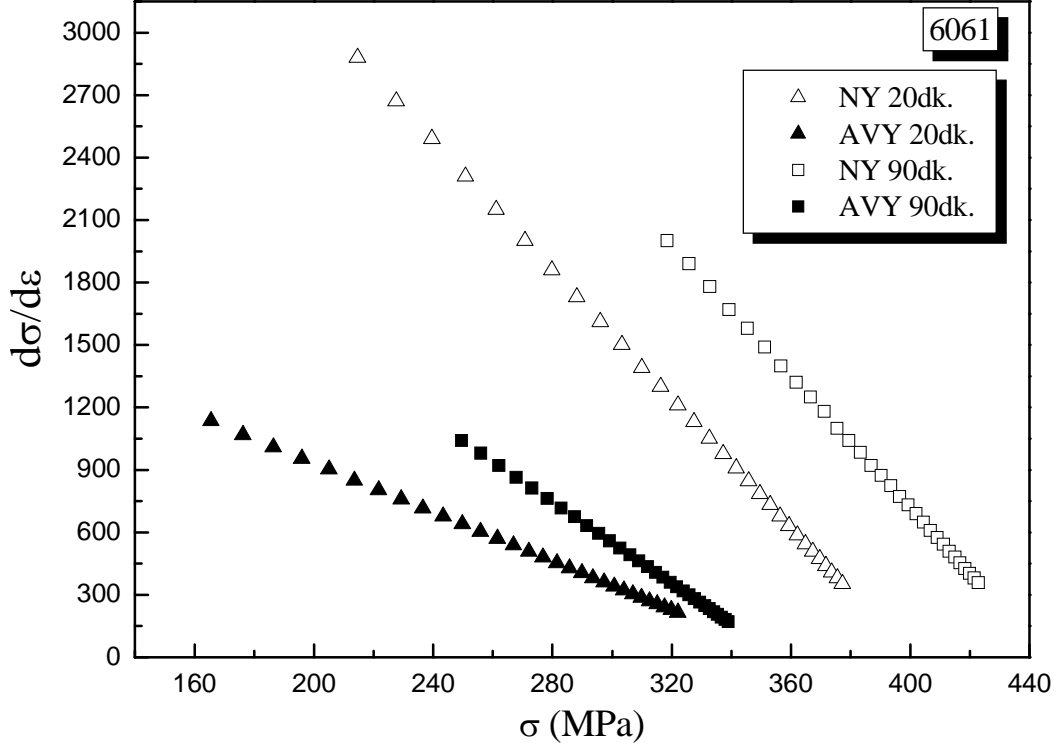
Şekil 4.11 Pekleşme katsayısı değişimi

90 dk. deney şartı için; 1. gün ve 12. gün 15 saatlik yaşlandırma değerleri hariç referans değerlerine göre yüksek çıkmıştır. En yüksek sonuç 3. gün için 0,167 (%44 artış), en düşük sonuç ise 12. gün 15 saatlik yaşlandırma için 0,095 (%18 azalama) ile elde edilmiştir.

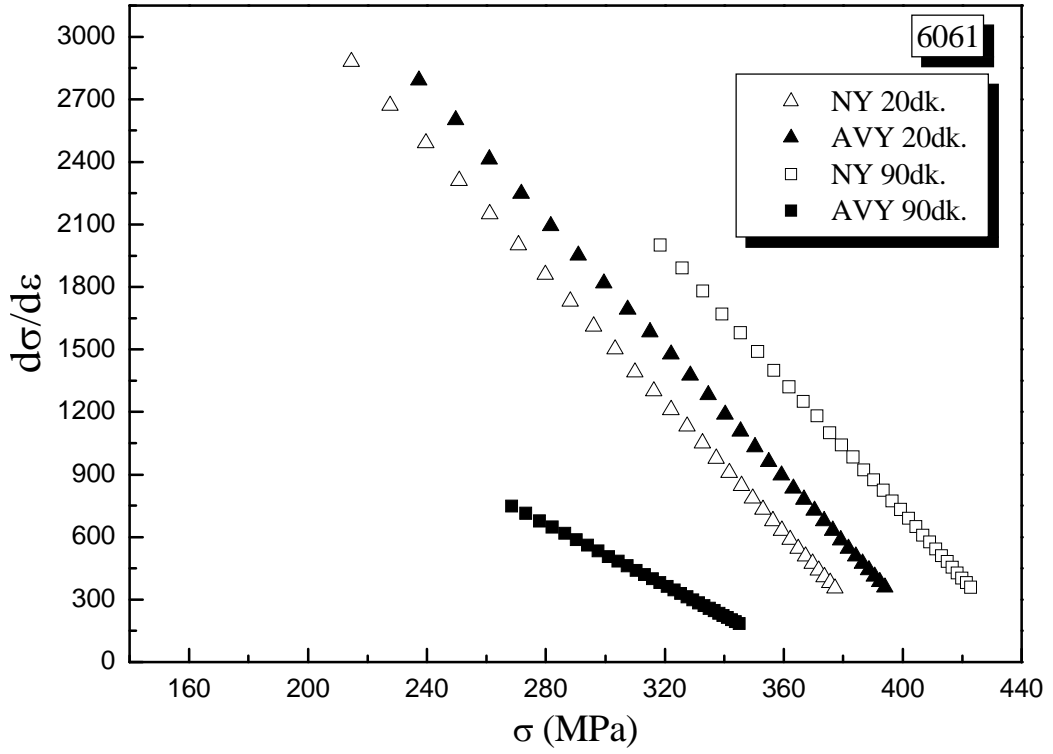
#### 4.2.6 Deformasyon pekleşmesi hızı-gerilme değişimi

20 dk. deney şartı için; 3 gün yaşlandırma hariç tüm deney şartlarında referans deformasyon pekleşme hızlarına göre düşüşler meydana gelmiştir.

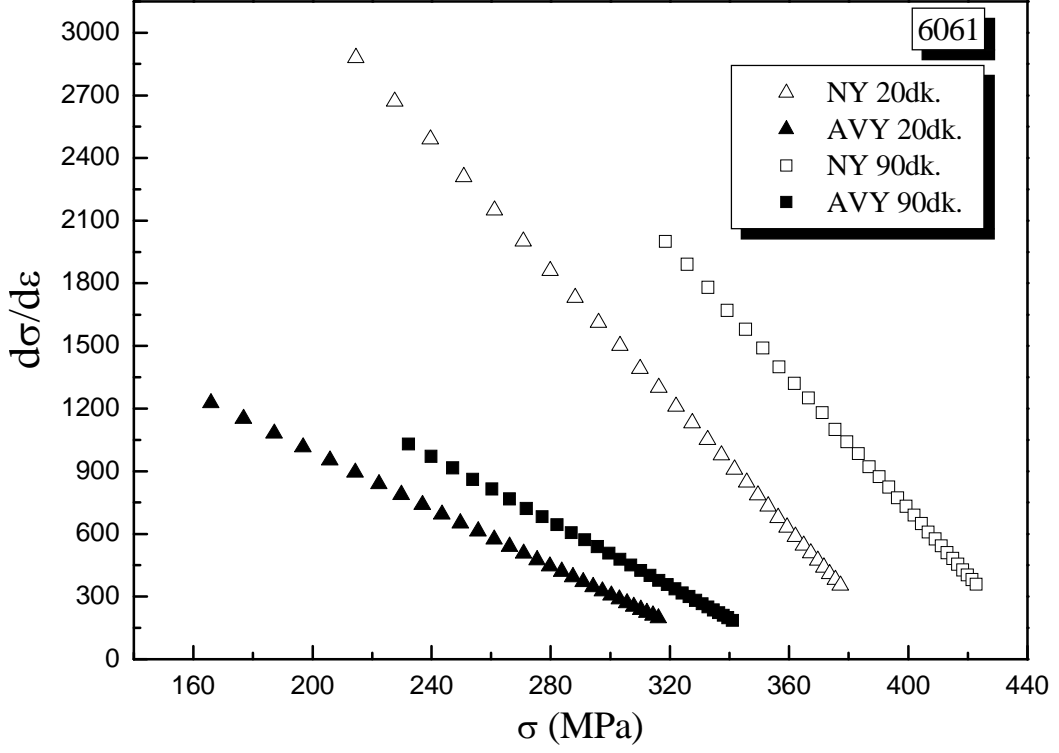
Elde edilen değerler doğrultusunda en yüksek deformasyon pekleşme hızı değerleri 20 dk. deney şartları için 3 gün ara verilerek yaşlandırmada 90dk. deney şartları için 5 gün yaşlandırmada elde edilmiştir.



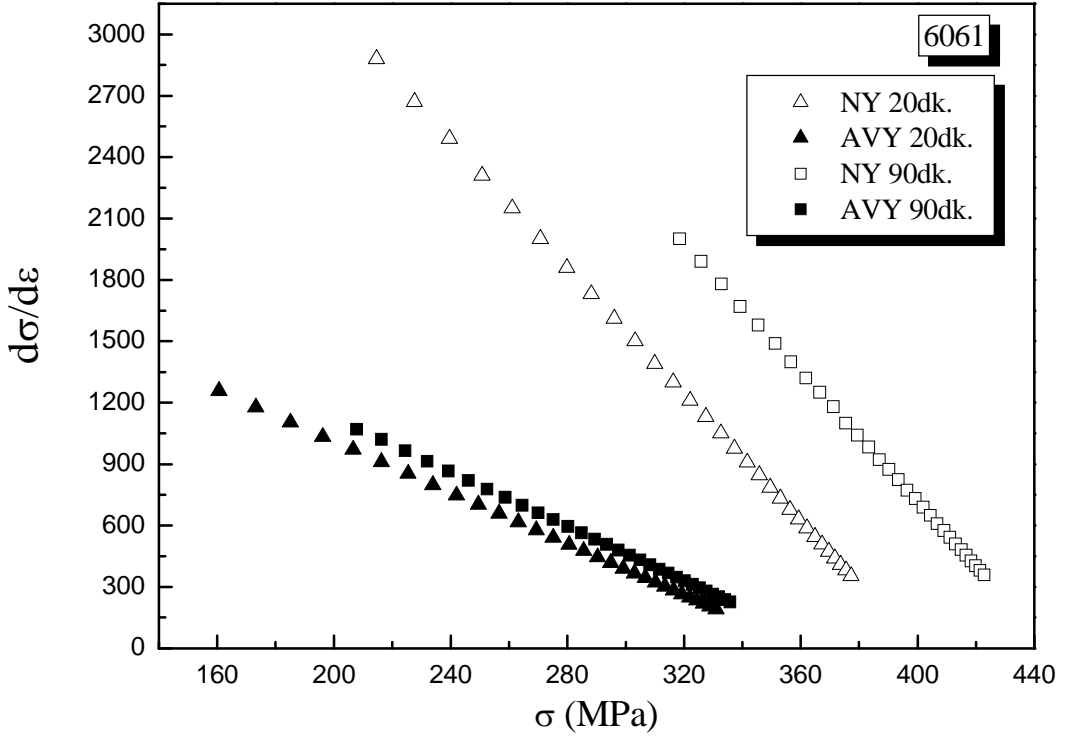
Şekil 4.12 1 gün ara verilerek yapılan yaşlandırma işlemi için deformasyon pekleşmesi hızı-gerilme değişimi



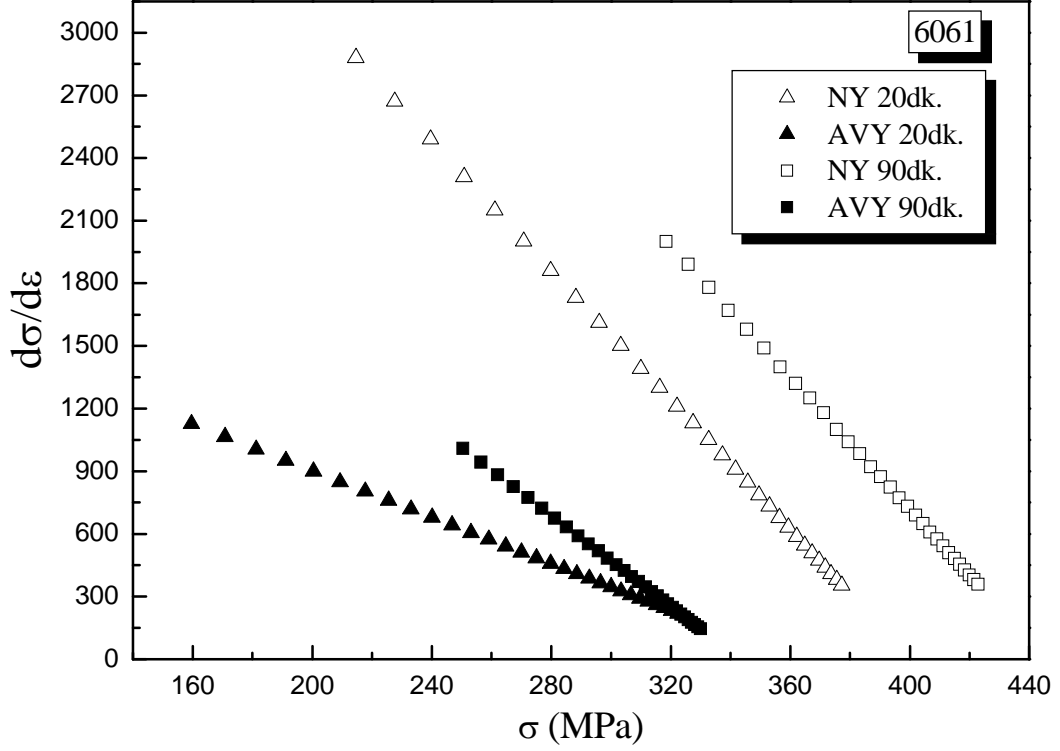
Şekil 4.13 3 gün ara verilerek yapılan yaşlandırma işlemi için deformasyon pekleşmesi hızı-gerilme değişimi



Şekil 4.14 5 gün ara verilerek yapılan yaşlandırma işlemi için deformasyon pekleşmesi hızı-gerilme değişimi



Şekil 4.15 7 gün ara verilerek yapılan yaşlandırma işlemi için deformasyon pekleşmesi hızı-gerilme değişimi



Şekil 4.16 12 gün 15 saat ara verilerek yapılan yaşlandırma işlemi için deformasyon pekleşmesi hızı-gerilme değişimi

Grafiklerden de anlaşılacağı üzere artan birim deformasyon değerleri ve azalan gerilme değerleri pekleşme hızını referans değerlerine göre düşük çıkarmıştır. Fakat 20 dk. deney şartı 3 günlük yaşlandırmada gerilme ve birim deformasyon değerlerinin başlangıç şartlarına göre yüksek çıkması pekleşme hızı doğrusunun başlangıç şartına göre yüksek çıkmasına sebep olmuştur.

## BÖLÜM V

### SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada 6061 alüminyum alaşımı için ara verilerek yapılan yaşlandırmanın malzemenin mekanik özelliklerine etkisi incelenmiş ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

1. Malzeme yapısında bulunan Mg ve Si değerlerindeki değişimin, malzemenin yaşlandırma sıcaklığında ve mekanik özelliklerinde değişimler meydana getirdiği gözlemlenmiştir.
2. 20 dk. deney şartlarında numune sertlik değerlerinin sürekli değişmesi, malzeme bünyesindeki  $\Theta^{II}$  yapılarının henüz istenen boyutlarda olmadığını göstermektedir.
3. 90 dk. deney şartlarında ara verilerek yaşlandırma işlemi sonucunda elde edilen  $\Theta^{II}$  yapılarının uzunluk ve sıklıkları, normal yaşlandırma şartlarındakine göre daha düşük olduğu düşünülmektedir.
4. 20 dk. deney şartlarında mekanik özelliklerde değişimler gözlemlenmiştir. 90 dk. deney şartlarında birim deformasyon hariç diğer mekanik özelliklerinde önemli bir azalma meydana gelmiştir. Bu da  $T_B$  süresinin mümkün olduğunca kısa tutulması gerektiğini göstermektedir.
5. 20 dk. deney şartları için sertlik değerlerinin sürekli arttığı, 90 dk. deney şartlarında ise 7. gün hariç sertlik değerlerinin yaklaşık olarak aynı kaldığı gözlemlenmiştir.  $T_D$  süresinin uzun tutulması halinde sertliğin arttırılabileceği görülmektedir.
6. 20 dk. yaşlandırılmış numunelere ara verilerek yapılan yaşlandırmada birim deformasyon değerlerinde önemli bir artış meydana gelmiş, dolayısıyla malzemenin şekillendirilebilme kabiliyeti iyileşmiştir.
7. 20 dk. deney şartları için 7. günden sonra malzemenin mekanik özelliklerinde önemli bir değişim meydana gelmemiştir.
8. 90 dk. için tüm ara verilerek yaşlandırma sürelerinde maksimum gerilme değeri yaklaşık olarak aynı kalmasına rağmen referans değerlerine göre önemli ölçüde azalma görülmüştür.

## KAYNAKLAR

- [1][http://www.izto.org.tr/nr/rdonlyres/7475bda1-95b7-4855-b351-9adce4362afe/4474/nurel\\_aluminyum.pdf](http://www.izto.org.tr/nr/rdonlyres/7475bda1-95b7-4855-b351-9adce4362afe/4474/nurel_aluminyum.pdf), 2003.
- [2]Zeytin, H. K., Magnezyum Alaşımları: Otomotiv Endüstrisinde Kullanımı ve Geleceği. TÜBİTAK-OSD, 1999.
- [3]Zeytin, H. K., Teymur, B., Arısoy, O., Alüminyum Alaşımları Otomotiv Endüstrisinde Uygulamaları ve Geleceği, MAM-MKTAE/OSD, 2000.
- [4]<http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Al-Cu-phase-diagram-partial-greek.svg>.
- [5]ASM Handbook, Volume IV Heat Treating, 1991.
- [6]Smith, F., W., Principles of Materials Science and Engineering, McGraw-Hill Inc., USA, 1996.
- [7]Callister, W., D., Materials Science and Engineering An Introduction, John Wiley & Sons, Inc., USA, 2007.
- [8] [http://www.altekmatal.com.tr/fotolar/file/aluminium\\_ozellik.pdf](http://www.altekmatal.com.tr/fotolar/file/aluminium_ozellik.pdf)
- [9]Lumley, R.N. Polmear, I.J. Morton, A.J. Mater. Sci. Forum, 893, 396-402, 2002.
- [10]Lumley, R.N. Polmear, I.J. Morton, A.J. International Patent Application PCT/AU00/01601, 2000.
- [11]Lumley, R.N., Polmear, I.J., and Morton, A.J., Interrupted aging and secondary precipitation in aluminium alloys, Materials Science and Technology, 19, 1483-1490, 2003.
- [12]Buha, J., Lumley, R.N., Crosky, A.G., Hono, K., Secondary precipitation in an Al–Mg–Si–Cu alloy, Acta Materialia, 55, 3015-3024, 2007.
- [13]Lumley, R.N., Polmear, I.J., and Morton, A.J., Proceedings of the Ninth International Conference on Aluminium Alloys, Brisbane, Australia 85, 2004.
- [14]O’Donnel, R.G., Lumley, R.N., Polmear, I.J., Proceedings of the Ninth International Conference on Aluminium Alloys, Brisbane, Australia 975, 2004.
- [15]Lumley, R.N. Polmear, I.J. Morton, A.J. Mater. Sci. Tech., 19, 1483, 2003.
- [16]Demir, H., Gündüz, S., The effects of aging on machinability of 6061 aluminium alloy, Materials and Design, 10, 1-4, 2008.
- [17]Lumley, R.N., Polmear, I.J., and Morton, A.J., Development of mechanical properties during secondary aging in aluminium alloys, Materials Science and Technology, 21, 1025-1032, 2005.



[18]Buha, J., Lumley, R.N., Crosky, A.G., Secondary ageing in an aluminium alloy 7050, Materials Science and Engineering, A492, 1-10, 2008.

[19]Bahrami, A., Miroux, A., Kestens, L., An age hardening model for interrupted ageing of the alloy AA6061, Metal Forming, 2, 2008.

[20] 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.

[21]Buha, J., Lumley, R.N., Crosky, A.G., Microstructural Development and Mechanical Properties of Interrupted Aged Al-Mg-Si-Cu Alloy, Metallurgical and Materials Transactions, 37A, 3119-3130, 2006.

[22][http://www.alcoa.com/gcfp/catalog/pdf/alcoa\\_alloy\\_6061.pdf](http://www.alcoa.com/gcfp/catalog/pdf/alcoa_alloy_6061.pdf).

[23]<http://www.me.uh.edu/ceramics/3445LabManual/2.AGEHARDENING.pdf>.