

**YAŞLANDIRMA ISIL İŞLEMİNİN AA 7075 MALZEMELİ DİK DÖRTGEN
PLAĞIN BURKULMA YÜKÜ ÜZERİNE ETKİSİ**

Özkan ÖZ

**Zonguldak Karaelmas Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makina Mühendisliği Anabilim Dalında
Yüksek Mühendislik Tezi
Olarak Hazırlanmıştır**

ZONGULDAK

Mayıs 2007

KABUL:

Özkan ÖZ tarafından hazırlanan “YAŞLANDIRMA ISIL İŞLEMİNİN AA 7075 MALZEMELİ DİKDÖRTGEN PLAĞIN BURKULMA YÜKÜ ÜZERİNE ETKİSİ” başlıklı bu çalışma jürimiz tarafından değerlendirilerek, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Mühendislik Tezi olarak oybirliğiyle kabul edilmiştir. 02/05/2007

Başkan: Yrd. Doç. Dr. Halil ÖZER (ZKÜ)

...Halil Özer

Üye : Prof. Dr. Durmuş GÜNAY (ZKÜ)

...Durmuş Günay

Üye : Yrd. Doç. Dr. Mehmet Fatih ALTAN (ZKÜ)

...Mehmet Fatih Altan

ONAY:

Yukarıdaki imzaların, adı geçen öğretim üyelerine ait olduğunu onaylarım.

...M. Sözen

Doç. Dr. Mustafa SÖZEN 4.

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ÖZET

Yüksek Mühendislik Tezi

YAŞLANDIRMA ISIL İŞLEMİNİN AA 7075 MALZEMELİ DİKDÖRTGEN PLAĞIN BURKULMA YÜKÜ ÜZERİNE ETKİSİ

Özkan ÖZ

Zonguldak Karaelmas Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Yrd.Doç.Dr. Halil ÖZER

Mayıs 2007, 54 sayfa

Bu çalışmada, yaşlandırma ısıl işleminin, dikdörtgen alüminyum plakların burkulma gerilmesi ve yükü üzerine etkisi incelenmiştir. Plak sınır şartı olarak, yüklemenin yapıldığı iki kısa kenar basit mesnetli, diğer iki uzun kenar serbesttir. Plak malzemesi AA 7075 (alüminyum alaşım 7075) olarak seçilmiştir. Önce, incelenen problemin kesin çözümü Lëvy metodu ile elde edilmiştir. Aynı problem, Ansys paket programı kullanılarak modellenmiştir. Kesin çözüm ile Ansys sonucu karşılaştırılmıştır. Kesin çözüm, yaşlandırma ısıl işlemi uygulanmamış dikdörtgen plağın burkulma gerilmesi ve yükü için referans olarak alınmıştır. Deneyde, yaşlandırma ısıl işlemi uygulanmamış plak, basma yüküne maruz bırakılarak kritik burkulma gerilmesi ve yükü belirlenmiştir. Kesin çözüm ve Ansys paket programı kullanılarak elde edilen sonuç, deneyden elde edilen burkulma gerilmesi ve yükü ile karşılaştırıldığında, çok yakın sonuçlar elde edildiği görülmüştür. Daha sonra sabit sıcaklık (130°C) ve 8 farklı zaman aralığında (1, 2, 4, 8, 15, 30, 48 ve 60) yaşlandırma ısıl işlemi uygulanmıştır. Yaşlandırma ısıl işlemi uygulanmış numuneler için

ÖZET (devam ediyor)

deneysel olarak belirlenen kritik burkulma gerilmeleri ve yükleri, yaşlandırma ısıl işlemi uygulanmamış plağın kritik burkulma gerilmesi ve yükü ile kıyaslandığında belirgin bir mukavemet artışı gözlemlenmiştir.

Anahtar Sözcükler: Burkulma, Yaşlandırma Isıl İşlemi

Bilim Kodu : 625.03.02

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

EFFECT OF THE AGEING HEAT TREATMENT ON BUCKLING LOAD OF AA 7075 RECTANGULAR PLATE

Özkan ÖZ

**Zonguldak Karaelmas University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering**

Thesis Advisor: Assist. Prof. Dr. Halil ÖZER

May 2007, 54 pages

In this study, the effect of an ageing heat treatment on the buckling load and stress of rectangular plate is studied. The boundary conditions of the plate are that the loaded edges (short sides) are simply supported and the unloaded edges (long sides) are free. AA 7075 is selected as a plate material. Exact solution of problem is obtained by using Lévy Method. The finite element model of the problem is obtained by the use of ANSYS Linear Finite Element Code. An ageing heat treatment is performed for eight time intervals (1, 2, 4, 8, 15, 30, 48 and 60) at constant temperature (130°C). Based on this studies it is concluded that the buckling load and stress of plate is increasing with an ageing heat treatment.

Key Words : Buckling, Ageing Heat Treatment

Science Code: 625.03.02

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans tezi olarak yapılmıştır.

Yaşlandırma ısı işleminin AA 7075 malzemeli dikdörtgen plağın burkulma yükü üzerine etkisini konu alan bu çalışmayı bana önererek, yoğun çalışmalarına rağmen tez çalışmamın başlangıcından sonuna kadar devamlı destek veren ve tezin her aşamasında tecrübe ve bilgilerinden yararlanmaya çalıştığım hocam, sayın Yrd. Doç. Dr. Halil Özer' e şükran ve saygılarımı sunmayı bir borç bilirim.

Öğrenim hayatım boyunca bana desteklerini esirgemeyen değerli hocalarıma minnettarlığımı belirtmek isterim.

Çalışmalarımın belirli aşamalarında bana yardımlarını esirgemeyen Öğr. Gör. Fatih YAPICI' ya teşekkür ederim. Ayrıca bilgi ve yardımlarını benden esirgemeyen Yrd. Doç. Dr. Dursun ÖZYÜREK'e teşekkürü bir borç bilirim.

Hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen annem Gönül İMECE'ye ve babam Etem Sait ÖZ'e teşekkürü bir borç bilirim.

Çalışmalarım süresince, beni sabır ve şefkatle destekleyen, eşim Serpil ÖZ'e teşekkür etmeyi bir borç bilirim. Bu çalışmamın öncelikle ülkeme ve bu konuyla ilgilenenlere yararlı olmasını temenni ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL	ii
ÖZET	iii
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ	xi
SİMGELER DİZİNİ	xii
BÖLÜM 1 GİRİŞ	1
1.1 LİTERATÜR ÇALIŞMASI.....	1
1.2 AMAÇ VE KAPSAM	4
BÖLÜM 2 PLAK STABİLİTESİ	6
2.1 PLAK STABİLİTE TEOREMİ	6
2.2 PLAK SINIR ŞARTLARI	9
BÖLÜM 3 PROBLEMİN TANITILMASI	10
BÖLÜM 4 PROBLEMİN LÉVY METODU İLE ÇÖZÜMÜ VE SONLU ELEMEN MODELİ	12
4.1 PROBLEMİN LÉVY METODU İLE ÇÖZÜMÜ.....	12
4.2 SONLU ELEMEN MODELİ	20
BÖLÜM 5 ALÜMİNYUM ALAŞIMLARI	22

İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

5.1 ALÜMİNYUM VE ALÜMİNYUM ALAŞIMLARI	22
5.2 ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ SINIFLANDIRILMASI.....	23
5.3 ALAŞIM ELEMENTLERİNİN ALÜMİNYUMA ETKİSİ.....	25
BÖLÜM 6 YAŞLANDIRMA ISIL İŞLEMİ	28
6.1 ALÜMİNYUM ALAŞIMLARINA UYGULANAN YAŞLANDIRMA ISIL İŞLEMİ.....	28
6.2 YAŞLANDIRMA ISIL İŞLEMİ AŞAMALARI.....	28
BÖLÜM 7 DENEYSEL ÇALIŞMA VE SONUÇLARI	32
7.1 GİRİŞ.....	32
7.2 SPEKTRAL ANALİZ	32
7.3 YAŞLANDIRMA ISIL İŞLEMİ	33
7.4 SERTLİK ÖLÇÜMLERİ.....	34
7.5 SERTLİK ÖLÇÜM SONUÇLARI	35
7.6 ÇEKME DENEYİ	36
7.7 ÇEKME DENEY SONUÇLARI.....	38
7.8 BURKULMA DENEYİ.....	39
7.9 BURKULMA DENEY SONUÇLARI.....	41
BÖLÜM 8 GENEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	43
KAYNAKLAR.....	45
EK AÇIKLAMALAR A. AA 7075 SPEKTRAL ANALİZ SONUCU	48
EK AÇIKLAMALAR B. YAŞLANDIRMA ISIL İŞLEMİ UYGULANMAMIŞ PLAKLARIN YÜK-DEPLASMAN EĞRİLERİ	50
ÖZGEÇMİŞ.....	54

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
1.1 Magnezyum alaşımında basma deneyi sırasında meydana gelen burkulma deformasyonu.....	1
2.1 Plak elemanına uygulanan düzlem içi yükler ve momentler.....	7
2.2 Çatallanma noktası ve kritik yük	8
3.1 İki kenarı basit mesnetli diğer iki kenarı serbest dikdörtgen plak.....	11
4.1 K'nın a/b oranına bağlı olarak değişimi	19
4.2 K katsayısının a/b oranına göre değişimi	20
4.3 Sonlu eleman modeli	21
4.4 Burkulma analizi yapılmış plağın deforme olmuş durumu.....	21
6.1 Çözündürme ve yaşlandırma aşamalarını içeren çökelme sertleşmesini gösteren şekil	29
6.2 Çözünen atomun çözen atom içerisindeki dağılımı	29
6.3 Kendisini çevreleyen matris ile uyumlu çökelti	30
6.4 Kendisini çevreleyen matris ile uyumsuz çökelti	31
6.5 Çökelti arasında oluşan yarım halka şeklindeki dislokasyonlar.....	31
6.6 Aşırı büyük çökelti dislokasyonlar tarafından kesilmesi	31
7.1 Yaşlandırma işlemlerinin yapıldığı fırın.....	33
7.2 Sertlik ölçüm cihazı	34
7.3 130°C'de 1, 2, 4, 8, 15, 30, 48 ve 60 saat yaşlandırılan numunelerin sertlik değişimi	35
7.4 Çekme numunesi boyutları.....	36
7.5 Çekme numunesi	36
7.6 Çekme ve burkulma deneylerinin yapıldığı cihaz	37
7.7 Çekme deneyi sonucu numunede oluşan deformasyon	37
7.8 130°C'de 1, 2, 4, 8, 15, 30, 48 ve 60 saat yaşlandırılan numuneler için çekme gerilmesi değişimi	38
7.9 130°C'de 1, 2, 4, 8, 15, 30, 48 ve 60 saat yaşlandırılan numuneler için akma gerilmesi değişimi	39
7.10 Plak boyutları	39
7.11 Burkulma deneyinde kullanılan üst ve alt basma aparatları	40
7.12 Burkulma deneyi sonucu plakta oluşan deformasyon	40

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

7.13	130°C’de 1, 2, 4, 8, 15, 30, 48 ve 60 saat yaşlandırılan numuneler için kritik burkulma gerilmesi değişimi	41
7.14	130°C’de 1, 2, 4, 8, 15, 30, 48 ve 60 saat yaşlandırılan numuneler için kritik burkulma yükü değişimi	42

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>No</u>		<u>Sayfa</u>
5.1	Saf alüminyumun özellikleri	22
5.2	Dövme alaşımları simgeleri ve özellikleri	23
7.1	AA 7075 kimyasal analiz sonuçları	33
7.2	Deneyde kullanılan ısıl işlem parametreleri.....	34

SİMGELER DİZİNİ

x, y, z	: Kartezyen koordinat takımı
a	: Plak boyu
b	: Plak genişliği
D	: Plak eğilme rijitliği (Nmm)
E	: Elastisite modülü (MPa)
K	: Burkulma katsayısı
m, n	: Plakta oluşan yarım dalgaların sayısı
N_{kr}	: Kritik burkulma yükü (N/m)
N_x	: x yönünde uygulanan düzgün yayılı yük
N_y	: y yönünde uygulanan düzgün yayılı yük
N_{xy}	: xy düzlemindeki kesme kuvveti
t	: Kalınlık
σ_{xz}	: xz düzlemindeki gerilme
σ_{yz}	: yz düzlemindeki gerilme
σ_{zz}	: z yönündeki normal gerilme
w	: Plak çökmesi
M_x, M_y, M_{xy}	: Momentler
γ_{xz}	: xz düzlemindeki kayma zorlanması
γ_{yz}	: yz düzlemindeki kayma zorlanması
ε_{zz}	: z yönündeki normal zorlanma
ν	: Poisson oran

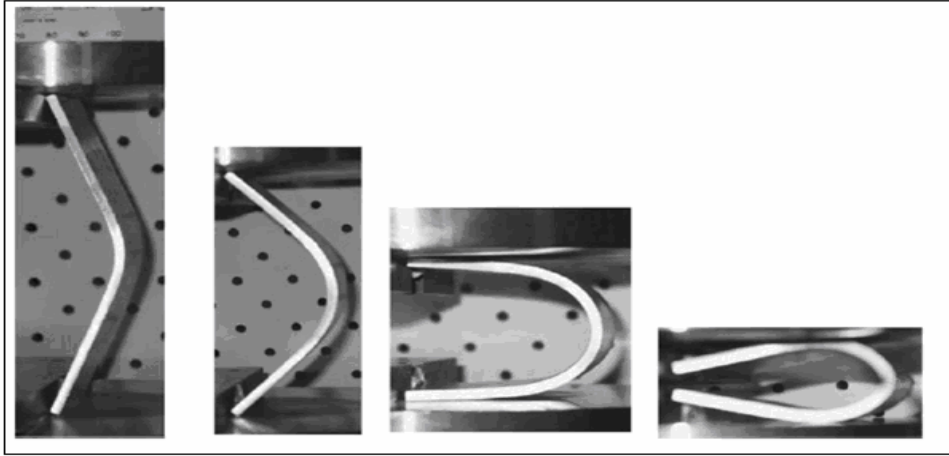
BÖLÜM 1

GİRİŞ

1.1 LİTERATÜR TARAMASI

(Timoshenko and Gere, 1961), ince plakların burkulmasını, denge denklemlerini ve enerji metotlarını kullanarak, plak geometrisi ve sınır şartlarına bağlı olarak, ince plakların burkulma yüklerini veren formülasyonları elde etmişlerdir.

(Easton et al., 2006), alüminyum alaşımları, magnezyum alaşımları (Şekil 1.1) ve düşük karbonlu çeliklerin burkulma davranışını, enerji absorbe etme durumlarını gözönünde bulundurarak incelemiştir. Magnezyum alaşımlarının, enerji absorbe etme açısından, alüminyum alaşımlarına göre % 50 ve düşük karbonlu çeliklerden ise 10 kat daha fazla enerji absorbe ettiklerini gözlemlemiştir. Her ne kadar, magnezyum alaşımları enerji absorbe etme açısından diğer iki malzemeye göre avantajlı olmakla birlikte, alüminyum alaşımlarına ve düşük karbonlu çeliklere göre daha kalın boyutlarda olması gerektiği sonucuna varmışlardır.



Şekil 1.1 Magnezyum alaşımında basma deneyi sırasında meydana gelen burkulma deformasyonu (Easton et al., 2006).

(El-Sawy and Nazmy, 2001), dikdörtgen plaklarda; kare, dikdörtgen ve dairesel delik bulunmasının burkulma yükü üzerine etkisini incelediler. Daha sonra, bu deliklerin plaklardaki yerlerini değiştirerek, delik konumlarının burkulma yüküne etkisini araştırdılar. Delik boyutlarının ve konumlarının burkulma yükünü büyük ölçüde etkilediği sonucuna vardılar. Sonlu elemanlar metodundan elde ettikleri sonuçları kullanarak **burkulma katsayısını** belirleyip, grafikler halinde verdiler.

(Shakerley and Brown, 1996), çalışmalarında, bünyesinde kare delik bulunan, kare plakların burkulma analizini **Eşlenik Yük/Yerdeğiştirme Metodunu** (conjugate load/displacement method) kullanarak yapmışlardır. Kare deliğin, plak merkezinde ve merkezi dışında bulunması durumlarını, delik boyutlarında değişken olarak incelediler. Yaptıkları analiz sonucunda, delik konumunun burkulma yükü üzerinde büyük etkisi olduğunu gözlemlediler.

(Swartz and O'Neill, 1995), çeşitli yükleme ve sınır koşulları için kritik burkulma yükünü veren bir bilgisayar programı geliştirdiler. Geliştirdikleri program, burkulma katsayısını ve burkulma yükünü vermekte, ayrıca, burkulma plağın, iki ve üç boyutlu grafiksel animasyonunu da vermektedir.

(Brighenti, 2005), yapısında çatlak bulunan dikdörtgen plakların burkulma analizini yaptı. Çatlak konumunun burkulma yükü üzerine etkisini, sonlu elemanlar metodunu kullanarak analiz etti. Çatlak konumunun, poisson oranı ile birlikte, burkulma yükü üzerine büyük ölçüde etkidiğini gözlemledi.

(Çevik ve Güzelbey, 2007), plak mukavemet formülasyonlarını, yapay sinir ağları ve genetik algoritma tekniklerini kullanarak elde ettiler. Önerdikleri formüller, Ramberg-Osgood parametreleri cinsinden dikdörtgen plakların burkulma mukavemetini belirlemeye imkan vermektedir. Önerdikleri formülasyon sonuçlarının, literatürde verilen sonuçlar ile uyumlu olduğunu gözlemlediler.

(Aydoğdu ve Ece, 2006), üç kenarı basit mesnetli, bir kenarı standart basit mesnet olmayan (çökme ve momenti, ilgili kenarda bir fonksiyon ile tarif edilen) dikdörtgen plakların burkulma ve titreşim analizini yapmışlardır. Standart olmayan basit mesnetli kenarın, sıfırdan farklı çökme ve momente izin verdiği kabulünü yaptılar. Yaptıkları analiz

sonucunda, ideal olmayan basit mesnetli kenar için seçilen fonksiyonun, burkulma yükünü azaltabileceği veya arttırabileceği sonucuna varmışlardır.

(Bradford and Azhari, 1995), iki tip seri fonksiyon kullanarak dikdörtgen plakların burkulma yükünü, sonlu fark metodu ile analiz etmişlerdir.

(Sabir and Chow, 1986), kare bir plağın bünyesinde, plağın merkezinde bulunan ve bulunmayan dairesel deliğin, burkulma yükü üzerine etkisini incelemişlerdir. Dairesel delik, plağın basma bölgesi içerisinde bulunduğu, hem basit hem de ankastre sınır koşulları için, burkulma yükünü azaltacak şekilde etki ettiği sonucuna varmışlardır.

(Yazıcı vd., 2003), cam-epoksi malzemenin, iki uzun kenarında U-şeklinde çentik bulunan, çok katmanlı dikdörtgen plağın burkulma analizini, fiberlerin farklı yönelme açlarına bağlı olarak incelemişlerdir. Farklı yönelme açıları için delik şeklinin burkulma kararlılığı üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. U-şekilli çentiğin, derinlik ve yarıçapının burkulma yükü üzerine etkilerinin incelenmesi sonucunda, çentik derinliğinin, çentik yarıçapından daha etkili olduğunu gözlemlemişlerdir.

(Civalek, 2004), plak ve kolonların, burkulma ve serbest titreşim analizini, **Diferansiyel Kuadrate** (DG) ve **Harmonik Diferansiyel Kuadrate** (HDG) **Metotlarını** kullanarak yaptı. Farklı sınır ve yükleme koşulları için, bu metotların, burkulma analizine uygulanabilirliğini araştırdı. Kesin çözümü bilinen problem sonuçları ile, bu iki metoddan elde ettiği sonuçları karşılaştırdı ve sonuçların uyumlu olduğunu gözlemledi.

(Eisenberger and Alexandrov, 2003), değişken kalınlıklı, iki eksenli basmaya maruz dikdörtgen plağın burkulma yüklerini **Kantorovich Metodu**nu kullanarak analiz ettiler.

(Nerantzaki and Katsikadelis, 1996) çalışmalarında, **Analog Eşitlik Metodu**nu (The analog equation method) kullanarak burkulma analizi yaptılar. Bu metodu kullanarak, burkulma yükünü belirlemede kullanılan standart diferansiyel denklemi, lineer diferansiyel denkleme dönüştürdüler. Elde ettikleri denklemin geçerliliğini, çözümü bilinen problemlere uyguladılar ve sonuçların kabul edilebilir doğrultuda olduğunu gözlemlediler.

(Luong and Tri, 2005), kalınlığı sinüzoidal olarak değişen dikdörtgen plakların burkulma analizini, farklı sınır koşulları için, **Ağırlıklı Kalan Yaklaşımı** (weighted residual) ile

yaptılar. Değişken kalınlıklı plakların kritik burkulma yükleri ile sabit kalınlıklı dikdörtgen plakların burkulma yüklerini karşılaştırdılar.

(Supasak and Singhatanadgid, 2004) yaptıkları çalışmada, alüminyum dikdörtgen plağın burkulma yükünü, dört farklı deney metodu kullanarak belirlediler. En iyi sonucu **Ortalama Düzlem-İçi Zorlanma Metodunun** (a plot of applied load vs. average in-plane strain) verdiğini gözlemlediler.

(Soh et al., 2000), basit mesnetli, anizotropik dikdörtgen plağın, elasto-plastik burkulma davranışını teorik olarak incelediler. Üç farklı kompozit plağın (karbon-epoksi, cam-epoksi, boron-alüminyum), kritik burkulma gerilmelerini belirlediler. Elde ettikleri sonuçları, diğer yazarların deneysel sonuçları ile kıyasladıklarında kabul edilebilir bir doğrulukta olduğunu gördüler.

(Clark et al., 2005), çalışmalarında, yaşlandırma ısı işlem parametrelerindeki değişimin, alüminyum 7075 T6 alaşımının, fiziksel ve mekanik özelliklerindeki etkisini araştırmışlardır. Solusyona alma sıcaklıklarını, soğutma ortamını ve yaşlandırma koşullarını değişken olarak almışlardır. Bu parametrelerdeki değişimin, çekme gerilmesine, elektrik iletkenliğine ve alaşımın sertliği üzerine etkisini incelemişlerdir. Çekme gerilmesi ile sertlik arasında mükemmel bir karşılıklı ilişki olduğu göstermişlerdir.

Yaşlandırma ısı işleminin, burkulma yükü üzerine etkisini inceleyen, açık literatürde herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır.

1.2 AMAÇ VE KAPSAM

Bu çalışmada, yaşlandırma ısı işleminin, dikdörtgen plakların burkulma gerilmesi ve yükü üzerine etkisinin incelenmesi amaçlanmaktadır. Plak sınır şartı olarak, yüklemenin yapıldığı iki kısa kenar basit mesnetli, diğer iki uzun kenar serbesttir. Plak malzemesi, AA 7075 olarak seçilmiştir. Önce, incelenen problemin kesin çözümü elde edilecektir. Aynı problem, **Ansys** paket programı kullanılarak modellenecektir. Kesin çözüm ile **Ansys** sonucu karşılaştırılacaktır. Kesin çözüm, **yaşlandırma ısı işlemi uygulanmamış** dikdörtgen plağın burkulma gerilmesi ve yükü için referans olarak alınacaktır. Deneyde, **yaşlandırma ısı işlemi uygulanmamış** plak, basma yüküne maruz bırakılarak kritik burkulma gerilmesi ve yükü belirlenecektir. Kesin çözüm ile deneyden elde edilen

burkulma yükü karılatırılarak, deney düzeneğinin uygunluğu doğrulanacaktır. Daha sonra, sabit sıcaklık (130°C) ve 8 farklı zaman aralığında (1, 2, 4, 8, 15, 30, 48 ve 60) yaşlandırma ısıl işlemi uygulanacaktır. **Yaşlandırma ısıl işlemi uygulanmış** numuneler için deneysel olarak belirlenen kritik burkulma gerilmeleri ve yükleri, **yaşlandırma ısıl işlemi uygulanmamış** plağın burkulma değerleri ile kıyaslanacaktır. Böylece, yalandırmanın kritik burkulma gerilmesi ve yükü üzerine etkisi belirlenmiş olacaktır.

BÖLÜM 2

PLAK STABİLİTESİ

2.1 PLAK STABİLİTE TEOREMİ

Plağın, dengenin kararlı durumundan kararsız durumuna geçişi, burkulma veya yapısal kararsızlık olarak tanımlanır. Burkulmaya sebep olan en küçük yük değeri, kritik burkulma yükü olarak adlandırılır. Uygulanan yükler, bu kritik değerin üzerinde artmaya devam ederse, ani ve büyük yanal yerdeğiştirmelere neden olur. Bu durumu, büyük eğilme gerilmeleri izler ve plakta tamamen hasar meydana gelir.

Plak, dengenin kararlı durumundan kararsız durumuna geçerken, daima dengenin nötr durumundan geçer. Bu durum kararlı ve kararsız halin arasında, sınır durumu olarak göz önünde bulundurulur.

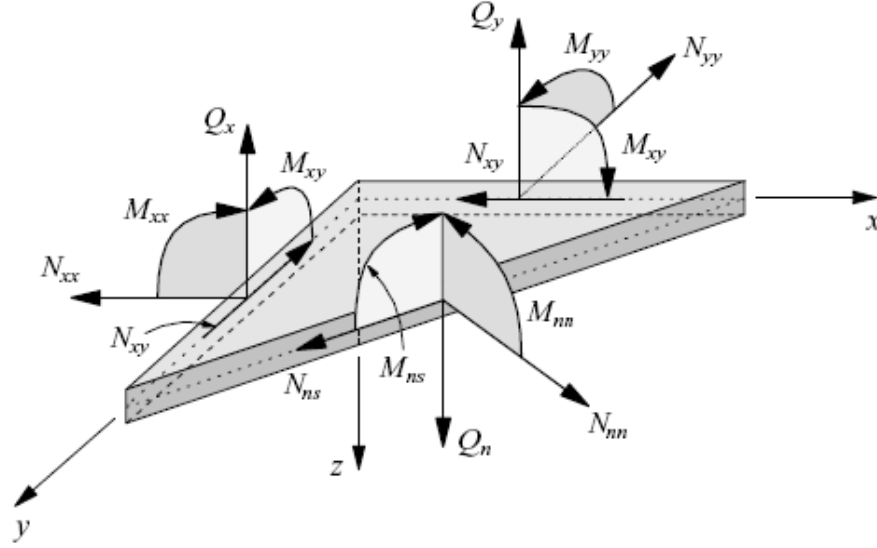
Plaklarda burkulma analizinin ana amacı, kritik burkulma yükünü, gerilmesini ve şekil değiştirirken meydana gelen burkulma modlarını belirlemektir. İnce plakların burkulma analizi, **Kirchhoff Plak Teorisine** dayanmaktadır. Klasik plak teorisi olarak da bilinen **Kirchhoff Plak Teorisi** şu temel kabulleri yapmaktadır;

(a) Orta düzlemin çökmesi, plak kalınlığı yanında küçüktür. Sehim yapmış yüzeyin eğimi çok küçüktür, dolayısıyla, eğimin karesi ihmal edilebilir bir büyüklüktür.

(b) Orta düzlem, eğilme sırasında şekil değiştirmemektedir.

(c) Başlangıçta, orta düzleme dik olan düzlem kesitler, eğilmeden sonra da orta düzleme normal kalırlar. Bu, düşey kayma zorlanmaları olan γ_{xz} ve γ_{yz} 'lerin ihmal edilebilir olduğu anlamına gelmektedir. Dolayısıyla, plak çökmesi, esas olarak eğilme zorlanmaları ile ilgilidir. Bu ise, düşey yükleme nedeni ile oluşan ϵ_{zz} normal zorlanmasının ihmal edilebilir olması anlamını taşımaktadır.

(d) Orta düzleme normal olan σ_{zz} gerilmesi, diğer gerilme bileşenleri ile kıyaslandığında oldukça küçüktür ve ihmal edilebilir.



Şekil 2.1 Plak elemanına uygulanan düzlem içi yükler ve momentler (Wang et al. 2005).

Basma ve kesme yükleri ile ve momentlere maruz plağa (Şekil 2.1), statik denge denklemleri ($\sum F_x = 0, \sum F_y = 0, \sum F_z = 0$) uygulandığında, plakların burkulmasını tarif eden

$$\frac{\partial^2 M_x}{\partial x^2} + 2 \frac{\partial^2 M_{xy}}{\partial y \partial x} + \frac{\partial^2 M_y}{\partial y^2} = \frac{\partial}{\partial x} \left(N_x \frac{\partial w}{\partial x} + N_{xy} \frac{\partial w}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(N_{xy} \frac{\partial w}{\partial x} + N_y \frac{\partial w}{\partial y} \right) \quad (2.1)$$

denklemini elde edilecektir (Timoshenko and Gere, 1961). Burada N_x ve N_y düzlem içi kuvvetini, N_{xy} ise kesme kuvvetini tarif etmektedir. M_x ve M_y eğilme momentleri, M_{xy} ise burulma momentidir ve aşağıda tarif edilmiştir (Wang et al. 2005):

$$M_x = -D \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) \quad (2.2)$$

$$M_y = -D \left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) \quad (2.3)$$

$$M_{xy} = -D(1-\nu) \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \quad (2.4)$$

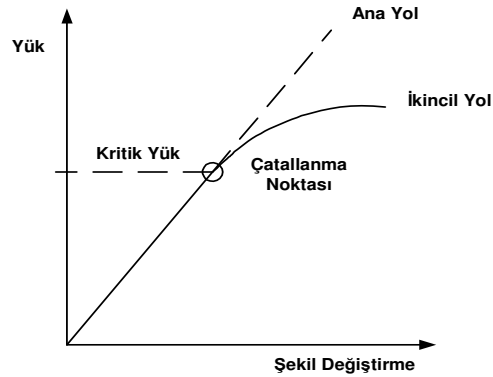
(2.2), (2.3), (2.4) denklemleri (2.1)'de yerine yazıldığında

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = \frac{1}{D} \left(q - N_x \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + N_y \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + 2N_{xy} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right) \quad (2.5)$$

elde edilir. Bu denklem düzlem-içi yüklere maruz ince plakların denge denklemdir. Burada D eğilme rijitliği olup

$$D = \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)} \quad (2.6)$$

şeklinde tarif edilmektedir. Kritik burkulma yükü, (2.5) ifadesini sağlayan minimum yüküdür (N_x, N_y, N_{xy}). Bu yük, Şekil 2.2'de görüldüğü gibi,



Şekil 2.2 Çatallanma noktası ve kritik yük.

çatallanmanın başladığı noktadaki yüküdür.

2.2 PLAK SINIR ŞARTLARI

Dikdörtgen plağın sınır şartları aşağıda tarif edilmektedir

(a) Serbest kenar

$$v_y = 0; \quad M_y = 0 \quad (2.7)$$

(b) Ankastre kenar

$$w = 0, \quad \frac{\partial w}{\partial y} = 0 \quad (2.8)$$

(c) Basit mesnetli kenar

$$w = 0, \quad M_y = 0 \quad (2.9)$$

(2.5)'de verilen denklem, (2.7), (2.8) ve (2.9) sınır şartları kullanılarak çözülmektedir.

BÖLÜM 3

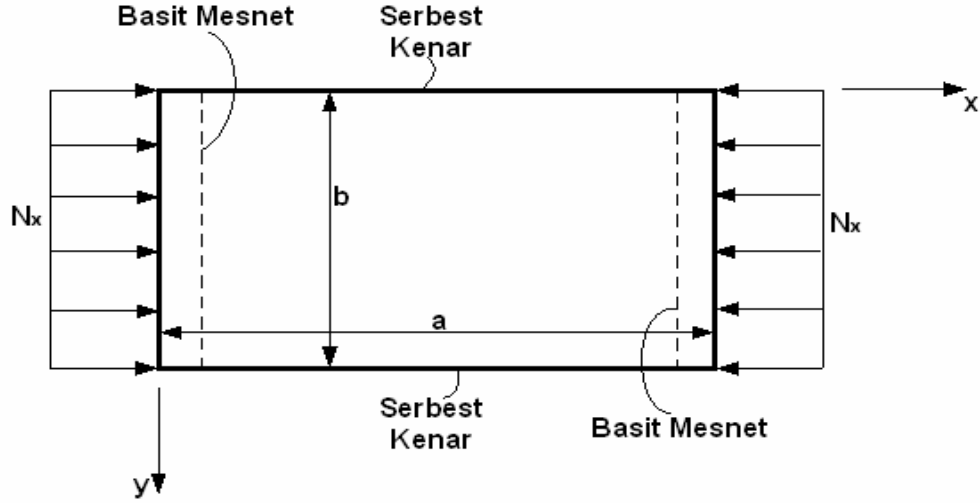
PROBLEMİN TANITILMASI

Bu çalışmada incelediğimiz problem, 45x180 mm boyutlarında, 6 mm kalınlığında, yük uygulanan iki kısa kenarı basit mesnetli ve diğer iki uzun kenarı serbest olan dikdörtgen alüminyum plakdır ($E= 71700$ MPa, $\nu=0.33$).

İncelenen problemin kesin çözümü **Lêvy metodu** ile elde edilecektir. Aynı problem, **Ansys** paket programı kullanılarak modellenecektir. Kesin çözüm ile Ansys sonucu karşılaştırılacaktır. Kesin çözüm, **yaşlandırma ısı işleminin uygulanmamış** dikdörtgen plağın kritik burkulma gerilmesi ve yükü için referans olarak alınacaktır. Deneysel çalışmada, yaşlandırma ısı işleminin, kritik burkulma gerilmesi ve yükü üzerine etkisi araştırılacaktır. Hem yaşlandırma yapılmadan önce ve hem de yaşlandırma yapıldıktan sonra, numunelerin sertlikleri ölçülecek, çekme deneyi ile, çekme gerilmesi ve akma gerilmesi davranışı incelenecektir. Daha sonra, dikdörtgen plağa yaşlandırma ısı işleminin uygulanarak, yaşlandırma işleminin kritik burkulma gerilmesi ve yükü üzerine etkisi araştırılacaktır.

(a) Problemin kesin çözümü

Problemin kesin çözümünde, yük uygulanan iki kısa kenarı basit mesnetli diğer iki kenarı serbest, dikdörtgen plağın (Şekil 3.1), kritik burkulma yükü, **lêvy metodu** ile belirlenecektir.



Şekil 3.1 İki kenarı basit mesnetli diğer iki kenarı serbest dikdörtgen plak.

(b) Problemin ANSYS çözümü

Dikdörtgen plağın burkulma modeli, ANSYS 9.1 paket programı kullanılarak elde edilecektir. Kullanılacak eleman tipi SHELL 93 dür. SHELL 93, her bir düğümü iki serbestlikli, toplam 8 düğümlü bir dörtgen elemandır.

(c) Deneysel çalışmalar

Sabit sıcaklık (130°C) ve 8 farklı zaman aralığında (1, 2, 4, 8, 15, 30, 48 ve 60) yaşlandırma ısıl işlemi uygulanacaktır. **Yaşlandırma ısıl işlemi uygulanmış** numuneler için deneysel olarak belirlenen kritik burkulma gerilmeleri ve yükleri, **yaşlandırma ısıl işlemi uygulanmamış** plağın kritik burkulma gerilmesi ve yükü ile kıyaslanacaktır. Ayrıca, aynı ısıl işlem parametreleri kullanılarak, AA 7075 malzemenin, sertlik, çekme gerilmesi ve akma gerilmesi değerlerinde meydana gelen değişim araştırılacaktır.

BÖLÜM 4

PROBLEMİN LÊVY METODU İLE ÇÖZÜMÜ VE SONLU ELEMAN MODELİ

Burada, yük uygulanan iki kısa kenarı basit mesnetli diğer iki kenarı serbest, dikdörtgen plağın (Şekil 3.1), kritik burkulma yükü, **lêvy metodu** ile belirlenecektir. Ayrıca sonlu eleman ANSYS paket programı kullanılarak sonlu eleman modeli kurulacaktır.

4.1 PROBLEMİN LÊVY METODU İLE ÇÖZÜMÜ

Burada inceleyeceğimiz problemin boyutları ve sınır koşulları Şekil 3.1’de verilmiştir. Plağın sınır koşulları;

$$y = 0, b \text{ de } v_y = 0; \quad M_y = 0 \quad (4.1.a)$$

$$x = 0, a \text{ da } w = 0; \quad M_x = 0 \quad (4.1.b)$$

dır. (4.1)’de verilen sınır koşulları, çökme için seçilen

$$w(x, y) = \sum_{m=1}^{\infty} f_m(y) \sin \frac{m\pi x}{a} \quad (4.2)$$

denkleminde parametrelerin belirlenmesinde kullanılacaktır.

(2.5)’de $N_y = 0$, $N_{xy} = 0$, $q = 0$ alındığında, denklem

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = \frac{1}{D} N_x \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \quad (4.3)$$

haline indirgenmektedir. Denklem (4.3)'de kullanılacak türevleri içeren ifadeler, denklem (4.2) kullanılarak elde edilecektir. Birinci olarak, x 'e göre kısmi türevler

$$\frac{\partial w}{\partial x} = f_m \left(\frac{m\pi}{a} \right) \cos \frac{m\pi x}{a} \quad (4.4.a)$$

$$\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = -f_m \left(\frac{m\pi}{a} \right)^2 \sin \frac{m\pi x}{a} \quad (4.4.b)$$

$$\frac{\partial^3 w}{\partial x^3} = -f_m \left(\frac{m\pi}{a} \right)^3 \cos \frac{m\pi x}{a} \quad (4.4.c)$$

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} = f_m \left(\frac{m\pi}{a} \right)^4 \sin \frac{m\pi x}{a} \quad (4.4.d)$$

şeklinde elde edilmiştir. İkinci olarak, y 'ye göre kısmi türevler, (4.2) kullanılarak

$$\frac{\partial w}{\partial y} = \sin \frac{m\pi x}{a} \frac{\partial f_m}{\partial y} \quad (4.5.a)$$

$$\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} = \sin \frac{m\pi x}{a} \frac{\partial^2 f_m}{\partial y^2} \quad (4.5.b)$$

$$\frac{\partial^3 w}{\partial y^3} = \sin \frac{m\pi x}{a} \frac{\partial^3 f_m}{\partial y^3} \quad (4.5.c)$$

$$\frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = \sin \frac{m\pi x}{a} \frac{\partial^4 f_m}{\partial y^4} \quad (4.5.d)$$

şeklinde elde edilmiştir. Diğer kısmi türevler ise

$$\frac{\partial^3 w}{\partial x^2 \partial y} = -\frac{\partial f_m}{\partial y} \left(\frac{m\pi}{a} \right)^2 \sin \frac{m\pi x}{a} \quad (4.6.a)$$

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} = -\frac{\partial^2 f_m}{\partial y^2} \left(\frac{m\pi}{a} \right)^2 \sin \frac{m\pi x}{a} \quad (4.6.b)$$

şeklinde elde edilmiştir. (4.4.d), (4.6.b), (4.5.d), (4.4.b) denklemleri, (4.3)'de yerine yazıldığında

$$\begin{aligned} f_m \left(\frac{m\pi}{a} \right)^4 \sin \frac{m\pi x}{a} + 2 \left[-\frac{\partial^2 f_m}{\partial y^2} \left(\frac{m\pi}{a} \right)^2 \sin \frac{m\pi x}{a} \right] \\ + \sin \frac{m\pi x}{a} \frac{\partial^4 f_m}{\partial y^4} = -\frac{N_x}{D} \left[-f_m \left(\frac{m\pi}{a} \right)^2 \sin \frac{m\pi x}{a} \right] \end{aligned} \quad (4.7)$$

ifadesi elde edilmiştir. Denklem (4.7) düzenlendiğinde

$$\frac{\partial^4 f_m}{\partial y^4} - 2 \left(\frac{m\pi}{a} \right)^2 \frac{\partial^2 f_m}{\partial y^2} + \left[\left(\frac{m\pi}{a} \right)^4 - \frac{N_x}{D} \left(\frac{m\pi}{a} \right)^2 \right] f_m = 0 \quad (4.8)$$

elde edilir. Denklem (4.8)'in çözümü

$$f_m(y) = c_1 e^{-\alpha y} + c_2 e^{\alpha y} + c_3 e^{-\beta y} + c_4 e^{\beta y} \quad (4.9.a)$$

dir. veya, daha kompakt formda

$$f_m(y) = c_1 e^{-\alpha y} + c_2 e^{\alpha y} + c_3 \cos(\beta y) + c_4 \sin(\beta y) \quad (4.9.b)$$

şeklinde yazılacaktır. Böylece w'yi tarif eden (4.2) ifadesindeki, yalnızca y'nin fonksiyonu olan $f_m(y)$ ifadesinin genel çözümü elde edilmiştir. (4.1)'de verilen sınır şartları kullanılarak, (4.9) ifadesindeki bilinmeyen katsayılar bulunacaktır. (4.1.b) sınır şartları, (4.2) denkleminde görüleceği üzere sağlanmaktadır. Dolayısıyla, burada yalnızca uzun kenar sınır şartları kullanılacaktır.

Yüklemenin olmadığı uzun kenar için sınır koşulları (4.1.a)'da verilmiştir. Bu sınır şartları, daha açık bir şekilde

$$M_y|_{y=0,b} = -D \left(v \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right)_{y=0,b} = 0 \quad (4.10.a)$$

$$V_y|_{y=0,b} = -D \left(\frac{\partial^3 w}{\partial y^3} + (2-v) \frac{\partial^3 w}{\partial x^2 \partial y} \right)_{y=0,b} = 0 \quad (4.10.b)$$

olarak yazılabilir. Şimdi sırasıyla, (4.10)'da verilen sınır şartlarını uygulayalım.

(a) (4.10.a) sınır şartından $(M_y|_{y=0} = 0)$;

$$M_y = -D \left\{ \begin{array}{l} v \left[- \left(\frac{m\pi}{a} \right)^2 \sin \frac{m\pi x}{a} (c_1 + c_2 + c_3) \right] \\ + \sin \frac{m\pi x}{a} [\alpha^2 c_1 + \alpha^2 c_2 - \beta^2 c_3] \end{array} \right\} = 0 \quad (4.11)$$

elde edilir. (4.11) sadeleştirildiğinde

$$M_y = v \left(\frac{m\pi}{a} \right)^2 c_1 + v \left(\frac{m\pi}{a} \right)^2 c_2 + v \left(\frac{m\pi}{a} \right)^2 c_3 - \alpha^2 c_1 - \alpha^2 c_2 + \beta^2 c_3 = 0 \quad (4.12)$$

elde edilir. (4.12)'de katsayılar ortak paranteze alındığında

$$M_y = \left(v \left(\frac{m\pi}{a} \right)^2 - \alpha^2 \right) c_1 + \left(v \left(\frac{m\pi}{a} \right)^2 - \alpha^2 \right) c_2 + \left(v \left(\frac{m\pi}{a} \right)^2 + \beta^2 \right) c_3 = 0 \quad (4.13)$$

elde edilir.

(b) (4.10.b) sınır şartından $(V_y|_{y=0} = 0)$;

$$V_y = -D \left\{ \begin{array}{l} \sin \frac{m\pi x}{a} [-\alpha^3 c_1 + \alpha^3 c_2 - \beta^3 c_4] + \\ - (2 - \nu) \left(\frac{m\pi}{a} \right)^2 \sin \frac{m\pi x}{a} [-\alpha c_1 + \alpha c_2 + \beta c_4] \end{array} \right\} = 0 \quad (4.14)$$

elde edilir.(4.14) ifadesi sadeleştirilerek, katsayılar ortak paranteze alınır

$$\begin{aligned} V_y &= \left(\alpha^3 - (2 - \nu) \left(\frac{m\pi}{a} \right)^2 \alpha \right) c_1 + \left(-\alpha^3 + (2 - \nu) \left(\frac{m\pi}{a} \right)^2 \alpha \right) c_2 \\ &+ 0 + \left(\beta^3 + (2 - \nu) \left(\frac{m\pi}{a} \right)^2 \beta \right) c_4 = 0 \end{aligned} \quad (4.15)$$

elde edilir.

(c) (4.10.a) sınır şartından $(M_y|_{y=b} = 0)$;

$$M_y = -D \left\{ \begin{array}{l} \nu \left[- \left(\frac{m\pi}{a} \right)^2 \sin \frac{m\pi x}{a} (c_1 e^{-ab} + c_2 e^{ab} + c_3 \cos(\beta b) + c_4 \sin(\beta b)) \right] \\ + \sin \frac{m\pi x}{a} [\alpha^2 c_1 e^{-ab} + \alpha^2 c_2 e^{ab} - \beta^2 c_3 \cos(\beta b) - c_4 \beta^2 \sin(\beta b)] \end{array} \right\} = 0 \quad (4.16)$$

elde edilir. Düzenlendiğinde

$$\begin{aligned} M_y &= +\nu \left(\frac{m\pi}{a} \right)^2 e^{-ab} c_1 + \nu \left(\frac{m\pi}{a} \right)^2 e^{ab} c_2 + \nu \left(\frac{m\pi}{a} \right)^2 \cos(\beta b) c_3 + \nu \left(\frac{m\pi}{a} \right)^2 \sin(\beta b) c_4 \\ &- \alpha^2 c_1 e^{-ab} - \alpha^2 c_2 e^{ab} + \beta^2 c_3 \cos(\beta b) + \beta^2 \sin(\beta b) c_4 = 0 \end{aligned} \quad (4.17)$$

elde edilir. Katsayıları ortak paranteze alırsak

$$\left(\nu \left(\frac{m\pi}{a} \right)^2 - \alpha^2 \right) e^{-ab} c_1 + \left(\nu \left(\frac{m\pi}{a} \right)^2 - \alpha^2 \right) e^{ab} c_2 + \left(\nu \left(\frac{m\pi}{a} \right)^2 + \beta^2 \right) \cos(\beta b) c_3 + \left(\nu \left(\frac{m\pi}{a} \right)^2 + \beta^2 \right) \sin(\beta b) c_4 = 0 \quad (4.18)$$

elde edilir.

(d) Son sınır şartı olan (4.10.b) kullanıldığında $\left(v_y \Big|_{y=b} = 0 \right)$

$$V_y = -D \left\{ \begin{array}{l} \sin \frac{m\pi x}{a} \left[-\alpha^3 c_1 e^{-\alpha b} + \alpha^3 c_2 e^{\alpha b} + \beta^3 c_3 \sin(\beta b) - \beta^3 c_4 \cos(\beta b) \right] + \\ - (2 - \nu) \left(\frac{m\pi}{a} \right)^2 \sin \frac{m\pi x}{a} \left[-\alpha c_1 e^{-\alpha b} + \alpha c_2 e^{\alpha b} - \beta c_3 \sin(\beta b) + \beta c_4 \cos(\beta b) \right] \end{array} \right\} = 0 \quad (4.19)$$

bulunur. (4.19) denklemi sadeleştirilerek, katsayıları ortak paranteze alındığında

$$\begin{aligned} V_y = & \left(\alpha^3 - (2 - \nu) \left(\frac{m\pi}{a} \right)^2 \alpha \right) e^{-\alpha b} c_1 + \left(-\alpha^3 + (2 - \nu) \left(\frac{m\pi}{a} \right)^2 \alpha \right) e^{\alpha b} c_2 \\ & + \left(-\beta^3 - (2 - \nu) \left(\frac{m\pi}{a} \right)^2 \beta \right) \sin(\beta b) c_3 + \left(\beta^3 + (2 - \nu) \left(\frac{m\pi}{a} \right)^2 \beta \right) \cos(\beta b) c_4 = 0 \end{aligned} \quad (4.20)$$

elde edilir.

Böylece, tüm sınır koşulları kullanılarak, (4.13), (4.15), (4.18) ve (4.20) denklemleri elde edilmiştir. Burada, w çökmesini tarif eden (4.2) ifadesindeki $f_m(y)$ 'nin genel çözümü olan denklem (4.9)'dan görüleceği üzere, dört adet bilinmeyen vardır. Sınır şartlarını kullanarak dört adet denklem elde ettik. Bu dört denklemi

$$[\xi] \begin{Bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \\ c_4 \end{Bmatrix} = 0 \quad (4.21)$$

şeklinde düzenlediğimizde, problemin çözümünün olabilmesi için, ξ matrisin determinantının sıfıra eşit olması gerekmektedir. (4.13), (4.15), (4.18) ve (4.20) denklemleri şeklinde düzenlendiğinde, ξ matrisi

$$\xi = \begin{bmatrix} V1 & V1 & V3 & 0 \\ V2 & -V2 & 0 & V4 \\ V1.e^{-ab} & V1.e^{ab} & V3.\cos(\beta b) & V3.\sin(\beta b) \\ V2.e^{-ab} & -V2.e^{ab} & -V4.\sin(\beta b) & V4.\cos(\beta b) \end{bmatrix} \quad (4.22)$$

şeklinde elde edilecektir. Burada

$$V1 = v \left(\frac{m\pi}{a} \right)^2 - \alpha^2 \quad (4.23.a)$$

$$V2 = \alpha^3 - (2 - v) \left(\frac{m\pi}{a} \right)^2 \alpha \quad (4.23.b)$$

$$V3 = v \left(\frac{m\pi}{a} \right)^2 + \beta^2 \quad (4.23.c)$$

$$V4 = \beta^3 + (2 - v) \left(\frac{m\pi}{a} \right)^2 \beta \quad (4.23.d)$$

$|\xi| = 0$ ifadesi düzenlendiğinde

$$\begin{aligned} \xi = & -2.V1.V2.V3.\cos(\beta b)^2.V4 - 2V1.V2.V3.\sin(\beta b)^2.V4 - V1^2.e^{ab}.V4^2.\sin(\beta b) \\ & + 2.V1.V2.e^{ab}.V4.V3.\cos(\beta b) + V2^2.e^{ab}.V3^2.\sin(\beta b) + V1^2.e^{-ab}.V4^2.\sin(\beta b) \end{aligned} \quad (4.24)$$

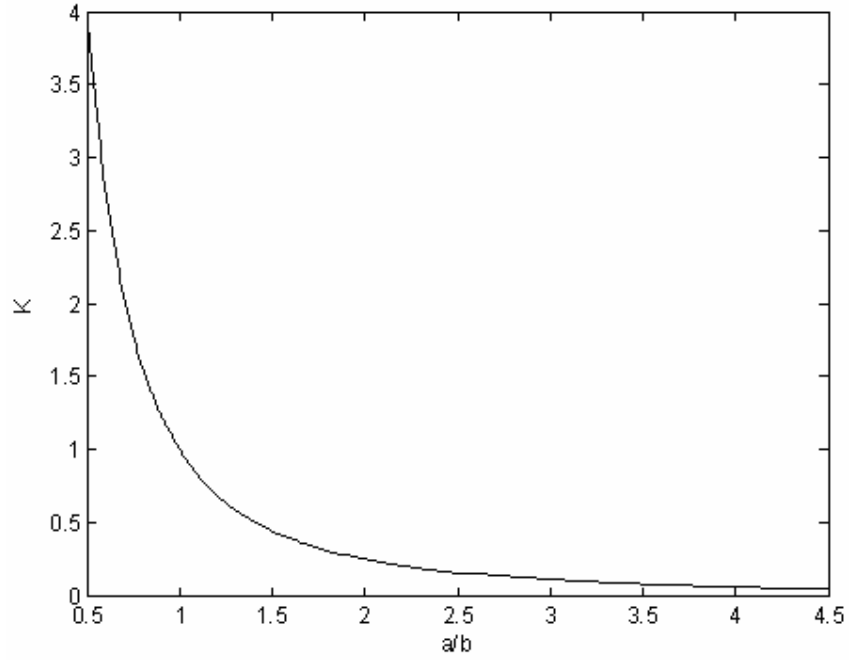
$$+ 2.V1.V2.e^{-ab}.V4.V3.\cos(\beta b) - 2V1.e^{-ab}.V2.e^{ab}.V3.V4 - V2^2.e^{-ab}.V3^2.\sin(\beta b) = 0$$

elde edilir.

Buradan, birinci mod için kritik burkulma yükü

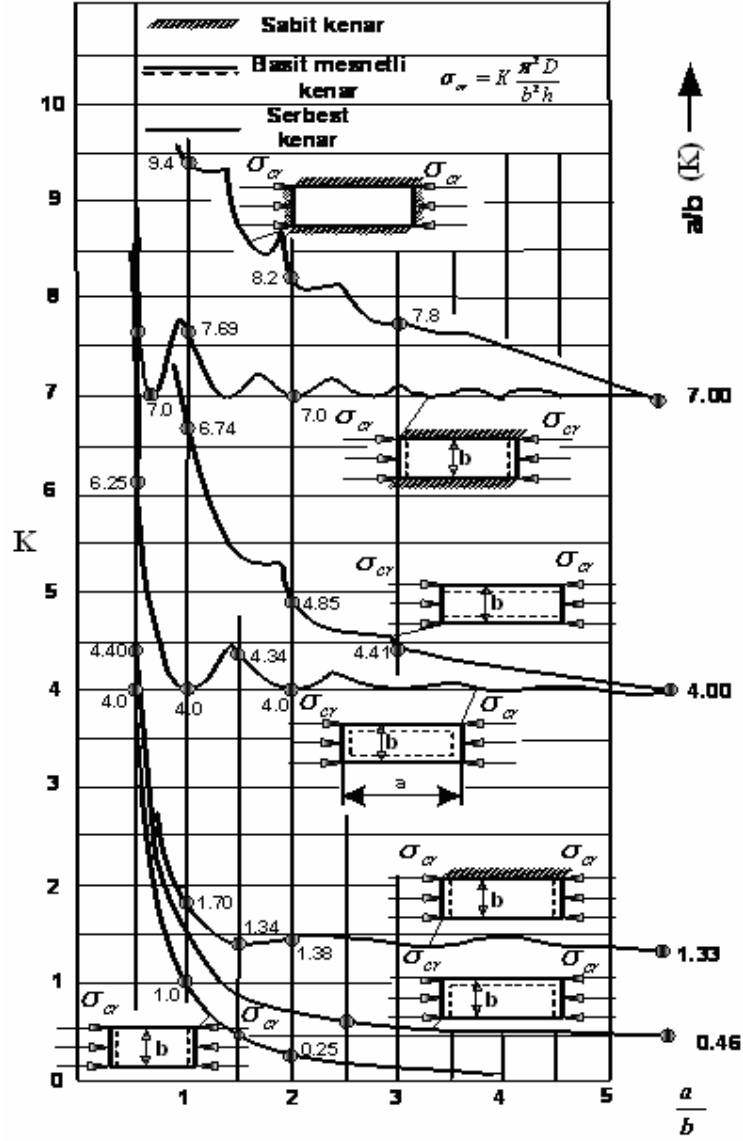
$$N_{kr} = K \frac{\pi^2 D}{b^2} \quad (4.25)$$

şeklinde bulunur. Elde edilen N_{kr} ifadesinin, (Yazıcı vd., 2003) çalışmalarında elde ettikleri ifade ile aynı olduğu görülmüştür. Burkulma katsayısı K 'nın, a/b oranına bağlı olarak değişimi şekil 4.1'de verilmiştir.



Şekil 4.1 K nın a/b oranına bağlı olarak değişimi.

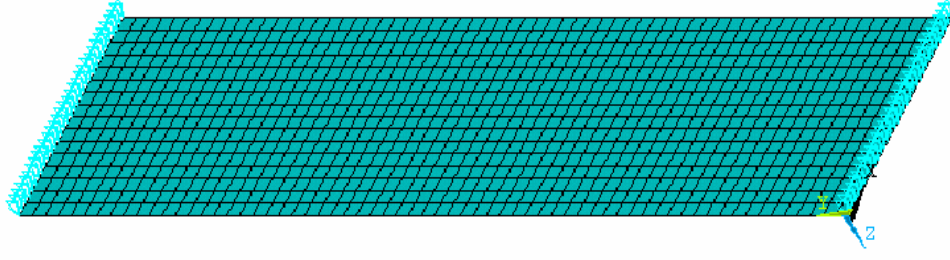
Ayrıca, (Ventsel and Krauthammer, 2001), bizim problemimize de içeren, değişik sınır şartı ve a/b oranına bağlı olarak, burkulma katsayısı K 'nın değişimini grafik olarak vermişlerdir (Şekil 4.2). Bizim burada **lêvy metodu** ile elde ettiğimiz ve Şekil 4.1'de gösterdiğimiz K değişiminin, Ventsel and Krauthammer in elde ettiği K değişimi ile aynı karakterde olduğu görülmektedir.



Şekil 4.2 K katsayısının a/b oranına göre değişimi (Ventsel and Krauthammer, 2001).

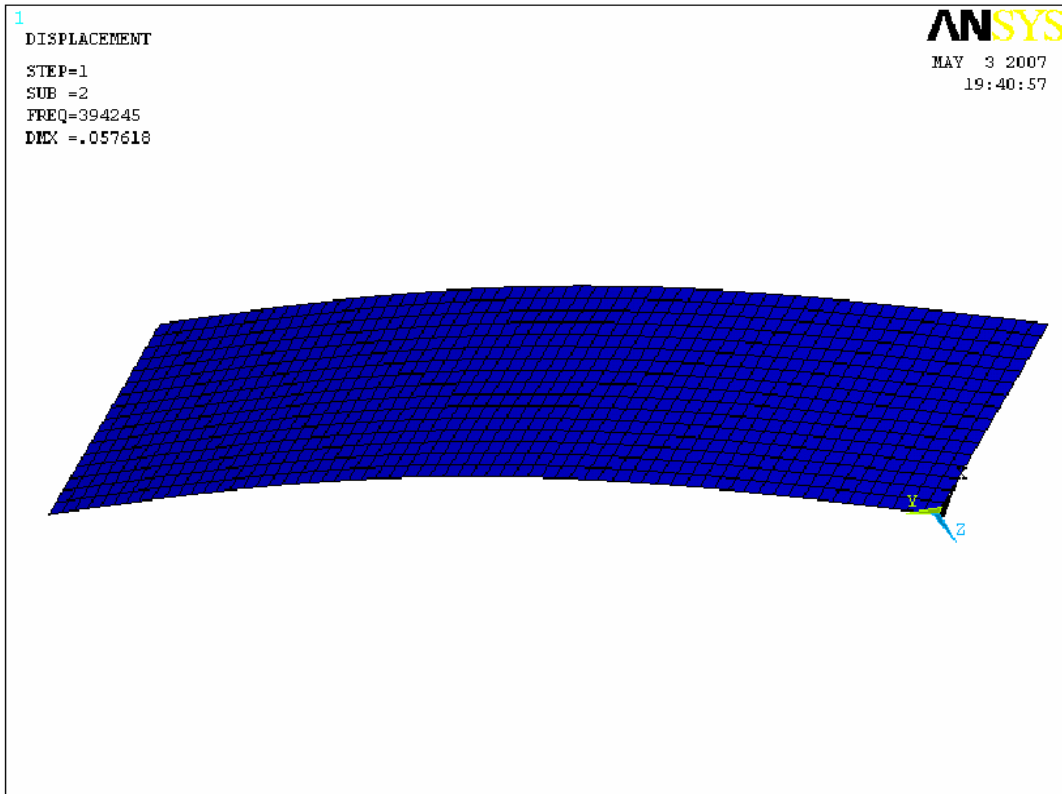
4.2 SONLU ELEMEN MODELİ

Dikdörtgen plağın burkulma modeli, ANSYS 9.1 paket programı kullanılarak elde edilmiştir. Kullanılan eleman tipi SHELL 93 dür. SHELL 93, her bir düğümü iki serbestlikli, 8 düğümlü bir dörtgen elemandır. Modelde, toplam 1024 eleman ve 3233 düğüm kullanılmıştır (Şekil 4.3).



Şekil 4.3 Sonlu eleman modeli.

Burada incelediğimiz problem, 45x180 mm boyutlarında, 6 mm kalınlığında, yük uygulanan iki kısa kenarı basit mesnetli ve diğer iki uzun kenarı serbest olan dikdörtgen plakdır ($E= 71700$ MPa, $\nu=0.33$). ANSYS paket programı ile yapılan burkulma analizi sonucunda, Şekil 4.4'de görüldüğü gibi, kritik burkulma yükü $N_{kr} = 394,245$ kN/m olarak elde edilmiştir.



Şekil 4.4 Burkulma analizi yapılmış plağın deforme olmuş durumu (şekilde FREQ, burkulma yükünü göstermektedir).

BÖLÜM 5

ALÜMİNYUM ALAŞIMLARI

5.1 ALÜMİNYUM VE ALÜMİNYUM ALAŞIMLARI

Alüminyum, uygulama alanı oldukça geniş bir mühendislik malzemesidir. Çizelge 5.1’de görüldüğü gibi, saf alüminyumun yoğunluğu, yaklaşık olarak çeliğin üçte biri kadardır. Magnezyumdan sonra, en hafif metaldir. Ayrıca, mukavemeti 700 MPa’a kadar ulaşabilen alüminyum alaşımları, düşük karbonlu çeliklerle rekabet edebilecek düzeydedir. Alüminyum, yüksek dayanım özelliğinin yanında, iyi elektrik ve ısı iletkenliğine sahiptir. Alüminyumun dayanım/yoğunluk oranının yüksek olması, ayrıca, alüminyum alaşımlarının yapı çeliklerinden daha iyi ısıl işlem kabiliyetine sahip olması, alüminyumu önemli bir endüstriyel malzeme haline getirmiştir. Günümüzde, alüminyum alaşımları marina, uzay ve havacılık, otomotiv ve savunma sanayi alanlarında yoğun olarak kullanılmaktadır (Wessel, 2004).

Çizelge 5.1 Saf alüminyumun özellikleri (Sun, 1998).

Atom numarası	13
Atom ağırlığı	26,97 gr/mol
Kristal yapısı	Yüzey Merkezli Kübik (ymk)
Yoğunluğu	2,7gr/cm ³
Ergime noktası	660°C
Yeniden kristalleşme sıcaklığı	150-300 °C
Buharlaşma noktası	2450 °C
Özgül ısı	0,224 cal/gr (100 °C)
Elastisite modülü	72x10 ³ MPa
Poisson oranı	0.33
Kayma modülü	27x10 ³ MPa
Çekme mukavemeti	40-90 MPa
Akma mukavemeti	10-30 MPa
Kopma uzaması	% 30-40

5.2 ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ SINIFLANDIRILMASI

Dövme işlemi uygulanmış alüminyum alaşımları, dört rakamlı sayısal simgeler kullanılarak gösterilmektedir. İlk rakam, aynı alaşım gurubunun, bileşimindeki **en önemli alaşım elementini** belirtir. Çizelge 5.2’de, dövme işlemi (mekanik işlem) uygulanmış alaşımların simgeleme düzeni, **en önemli alaşım elementlerini** ve alaşım gruplarının sahip olduğu özellikleri, karşılaştırmalı olarak verilmektedir.

Çizelge 5.2 Dövme alaşımları simgeleri ve özellikleri (Wessel, 2004).

Simge	En önemli alaşım elementi	Korozyon direnci	Dayanımı	Isıl işlem
1xxx	-	Mükemmel	Oldukça iyi	Isıl işlem uygulanamaz
2xxx	Bakır	Oldukça iyi	Mükemmel	Isıl işlem uygulanabilir
3xxx	Manganez	İyi	Oldukça iyi	Isıl işlem uygulanamaz
4xxx	Silisyum	-		Isıl işlem uygulanamaz
5xxx	Magnezyum	İyi	İyi	Isıl işlem uygulanamaz
6xxx	Magnezyum ve Silisyum	İyi	İyi	Isıl işlem uygulanabilir
7xxx	Çinko	Oldukça iyi	Mükemmel	Isıl işlem uygulanabilir

Alüminyum alaşım grupları ve kullanım alanları şu şekilde açıklanabilir (Wessel, 2004);

(a) 1xxx serisi;

Ticari olarak saf alüminyumu ifade eder ve en az %99 alüminyum içerir. Bu serideki malzemelerin, elektrik iletkenlikleri ve korozyon dirençleri yüksektir. Son iki rakam ise, %99 değerinden sonraki kısmı belirlemede kullanılır. Örneğin 1060 malzemesinin %99.60 oranında saf alüminyum olduğunu belirtir.

(b) 2xxx serisi;

Bu grubun **en önemli alaşım elementi**, yüksek dayanım ve düşük korozyon direncine sebep olan bakırdır. 2024 alaşımı bu grupta en çok bilinen, havacılık ve otomotiv sektöründe yaygın olarak kullanılan alüminyum alaşımıdır.

(c) 3xxx serisi;

Bu serinin **en önemli alaşım elementi** manganezdır. Alaşımında, düşük oranlarda (%1,2) manganez dayanımı arttırmaktadır. Bu serideki, 3003, 3004 ve 3105 alaşımlarının, korozyon direnci ve işlenebilirliği yüksektir. 3xxx serisi alaşımlar, yaygın olarak konstrüksiyon ve mimari (çatı sistemleri ve kaplamalar gibi) alanlarda kullanılır.

(d) 4xxx serisi;

Bu serideki alaşımlara, silisyum ilave edilerek, kaynak ve lehimleme işlemlerinde ergime noktası düşürülmekte, böylece, alaşımın kaynak ve lehimleme kabiliyeti iyileştirilmektedir. Silisyum, alaşımın akıcılık özelliğini artırması nedeni ile, döküm teknolojisinde, geometrisi karmaşık şekillerin üretilmesine imkan vermektedir. 4043 alaşımı, yaygın olarak kaynak dolgu teli olarak kullanılmaktadır.

(e) 5xxx serisi;

Bu seri, 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.

(f) 6xxx serisi;

Bu alaşımlar, belirli oranlarda magnezyum ve silisyum içermesi nedeni ile, Mg₂Si çökelti oluşturur. İyi derecede dayanım ve korozyon direncine sahiptir. 6061 alaşımı ise, düşük karbon çelikleri ile kıyaslanabilecek akma dayanımına sahip, en yaygın kullanılan alaşımlardan biridir.

(g) 7xxx serisi;

Bu serinin **en önemli alaşım elementi** çinkodur. 7xxx serisi, alüminyum–çinko–magnezyum alaşımları (örneğin 7005) ve alüminyum–çinko–magnezyum –bakır alaşımları (örneğin 7075 ve 7178) olmak üzere iki alt gruba ayrılmaktadır. Minimum çekme dayanımı 580 MPa olan 7178 alaşımı, uçak yapı malzemesi olarak kullanılmaktadır. Bakır ile desteklenen 7xxx serisi alüminyum alaşımlarının korozyon direnci, 1xxx, 3xxx, 5xxx veya 6xxx serisi alüminyum alaşımlarından daha düşüktür.

5.3 ALAŞIM ELEMENTLERİNİN ALÜMİNYUMA ETKİSİ

Alüminyum alaşımlarında kullanılan alaşım elementleri, bakır, silisyum, magnezyum, demir, çinko, manganez, nikel, titanyum ve lityumdur.

(a) Bakırın etkisi

Genel olarak bakır, alüminyumun dayanımını, işlenebilirliğini ve sertliğini artırır. Bakır alaşımlarına %4-6 oranlarında ilave edilen Cu, alaşımın ısıtılma kabiliyetini artırır. Bakır, korozyon direnci ile birlikte, dökülebilme ve sıcak yırtılma direncini azaltır (Brown, 1999).

(b) Silisyumun etkisi

Silisyum ilavesi, alaşımın, akıcılık, korozyon direnci, kaynak kabiliyeti özelliklerini iyileştirmektedir. Ayrıca, tane boyutu küçültme ve modifikasyon işlemleri ile, iyi işlenebilme özelliği sağlanır. Silisyumun mekanik özelliklere katkısı, alaşımın bileşimine ve mikroyapısına bağlıdır. Küçük ve yuvarlak şekilli α -Al tanecikleri ve Al-Si ötektiği mukavemet artışı sağlar. İğnecik şeklindeki Al-Si ötektiği ise çekme mukavemetini arttırmakla beraber, sünekliğini, darbe ve yorulma mukavemetini düşürür (Turhan, 2002).

(c) Magnezyumun etkisi

Al-Si alaşımlarına, % 0.25-0.5 gibi küçük miktarlarda magnezyum ilave edilmesi, alaşımın ısıtılma kabiliyeti kazanmasına neden olmaktadır. Magnezyum, alaşıma yüksek

mukavemet ve korozyon direnci kazandırır. Kaynak kabiliyetini artırır. Düşük silisyum alaşımlarında, %3-6 gibi yüksek oranlarda magnezyum kullanımı, oksitlenmeyi azaltan yönde etki yapar. Alaşımda yüksek oranda demirin bulunması, sünekliği, işlenebilirliği, ani yük değişimlerine direnci azaltır. Magnezyum, ötektik altı Al-Si alaşımlarında, demirin mekanik özelliklere yaptığı olumsuz etkiyi giderir ve mukavemet, korozyon direnci ve aşınma direncini artırır (Brown, 1999; Turhan, 2002).

(d) Manganezin etkisi

Alaşıma, ağırlık olarak %1,2 oranında manganez katılması, alaşımın yapısında oluşan **katı eriyik mukavemetlenmesi** nedeni ile, alaşımın mekanik özelliklerini artırır. Ayrıca, yeniden kristalleşme sıcaklığını, korozyon direncine zarar vermeksizin 50- 60 °C kadar yükseltir. Manganez, Al-Si alaşımlarında, demirin mekanik ve fiziksel özelliklere yaptığı olumsuz etkiyi giderir. Böylece mukavemet ve korozyon direnci artar. Alaşımda manganez bulunması, ince dağılımlı (Mn, Fe) Al₆ intermetaliklerini oluşturarak, demirin kaba olarak çökmesini önler (Brown, 1999; Turhan, 2002).

(e) Çinkonun etkisi

Çinko, bakır ve magnezyumla beraber alaşımın ısı işlem kabiliyetini artırır. Alüminyum Alaşımlarına çinko ilavesi, alaşımın, çekme mukavemeti, haddelenebilme, işlenebilme özelliklerini ve darbe mukavemeti artırır. Çinko, Al-Si alaşımlarında çökeltme sertleşmesine neden olduğu için, alaşımın aşınma direncini iyileştirecek şekilde etki yapar (Brown, 1999; Turhan, 2002).

(f) Titanyumun etkisi

Titanyum, bor ile birlikte kullanıldığında, alaşımın tane yapılarını küçültür. Alüminyum alaşımlarında titanyum bulunması, alaşımın çekme mukavemeti ve sünekliğini artırır, ısı iletkenliğini düşürür (Brown, 1999; Turhan, 2002).

(g) Demirin etkisi

Demir, alüminyum alaşımlarında tane küçültücü etki yapar. Ayrıca bazı alüminyum alaşımlarında termal mukavemeti artırır. Demir, Al-Si alaşımlarının mekanik özelliklerine olumsuz etkisi yapar. Demir, yüksek silisyum içeren alaşımlarda, kaba ve gevrek yapının ortaya çıkmasına neden olur. Bu nedenle bu tip alaşımlarda demir oranının minimum değerinde olması istenir.

(h) Nikelin etkisi

Alaşımlarda bakır ile beraber kullanıldığında, yüksek sıcaklıklarda dayanımı ve sertliği artırıcı yönde etki yapar (Brown, 1999).

BÖLÜM 6

YAŞLANDIRMA ISIL İŞLEMİ

6.1 ALÜMİNYUM ALAŞIMLARINA UYGULANAN YAŞLANDIRMA ISIL İŞLEMİ

Yaşlandırma ısıl işlemi, yumuşak ve sünek matriste; ince, sert ve matrisle uyumlu çökeltilerin oluşumunu sağlamak için uygulanır (Askeland, 1998). Matris içinde uygun şekilde dağılan çökeltiler, dislokasyon hareketlerini engelleyerek, alaşımların mukavemet değerlerinde artışa neden olurlar. Yaşlandırma ısıl işlemi ile, bakır alaşımlarının, martenzitik paslanmaz çeliklerin ve ısıl işlem uygulanabilen alüminyum alaşımlarının, sertleşmesi sağlanır ve dayanımları attırılır. Yaşlandırma ısıl işlemi, üç aşamadan meydana gelmektedir;

6.2 YAŞLANDIRMA ISIL İŞLEMİ AŞAMALARI

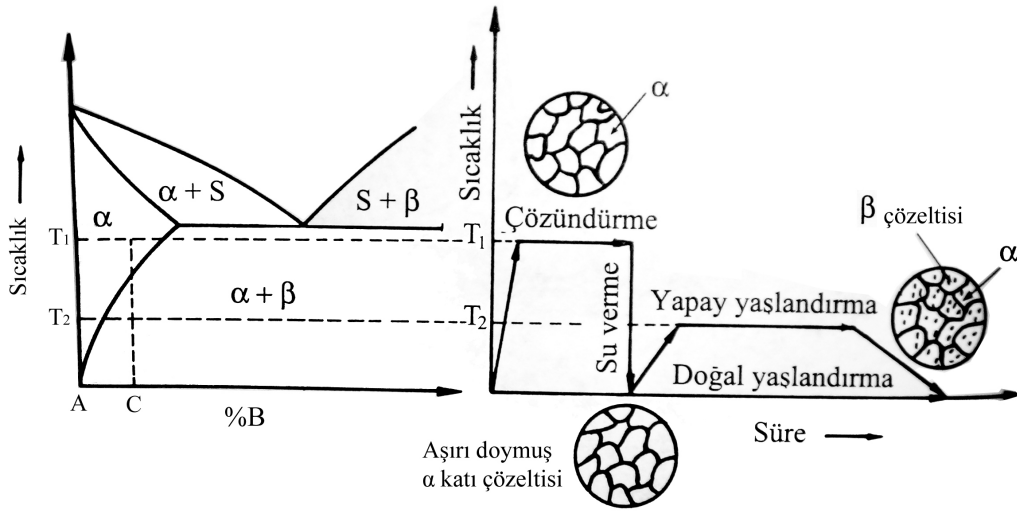
(a) Solüsyona alma ısıl işlemi (solution heat treatment)

Sıvı durumda her oranda, katı durumda ise kısmen çözünen yapıya sahip bir alaşım (Şekil 6.1), tek fazlı bir yapı (α) elde etmek amacıyla, alaşımın faz diyagramında belirtilen, **solvüs sıcaklığının** üzerinde, T1 sıcaklığına kadar (Şekil 6.1) ısıtılır ve bu sıcaklıkta alaşımdaki bütün fazların (α ve β) tek faz içinde çözünmesi sağlanıncaya kadar bekletilir. Bekleme süresi, alaşımların yapısına göre değişiklik gösterir. Alaşımlara uygulanan bu işleme **çözündürme uygulaması** veya **solüsyona alma ısıl işlemi** (solution heat treatment) denir (Savaşkan, 1999).

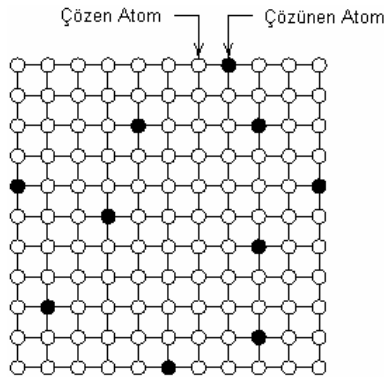
(b) Su verme

Su verme işlemi, solüsyona alma ısıl işlemi ile elde edilen tek fazlı (α) katı çözeltisini, çökeltilerin oluşmasına izin vermeyecek şekilde, T1 sıcaklığından süratle soğutmaktan

ibarettir (Şekil 6.1). T1 sıcaklığındaki malzemenin, ani olarak bir akışkan içerisinde soğutulması nedeni ile, aşırı doymuş (supersaturated) bir yapı elde edilir. Aşırı doymuş yapı, malzeme içinde bulunan çözenin (Şekil 6.2) (örneğin alüminyum alaşımlarında alüminyum, magnezyum alaşımlarında magnezyum), denge koşullarında, alaşım elementinin çözebileceği miktardan daha fazla madde çözmesi anlamına gelir ve kararsız bir durumdur. Kararlı bir yapının oluşması, orta dereceli dayanıma ve önemli oranda süneklığe sahip bu yapının yaşlandırılması ile mümkündür. Su verme işleminden sonra ısıtılarak gerçekleştirilen yaşlandırmaya **yapay yaşlandırma**, oda sıcaklığında kendiliğinden olan yaşlandırmaya ise **doğal yaşlandırma** adı verilir (Savaşkan, 1999).



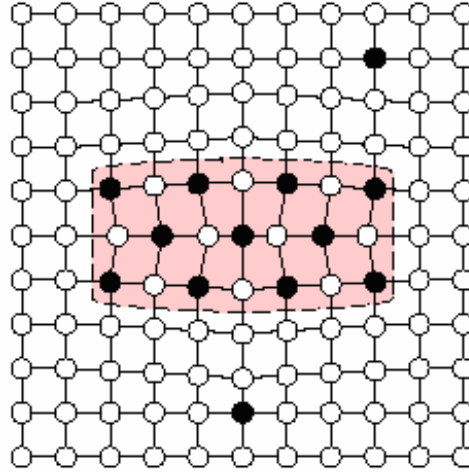
Şekil 6.1 Çözündürme ve yaşlandırma aşamalarını içeren çökeltme sertleşmesini gösteren şekil (Savaşkan, 1999).



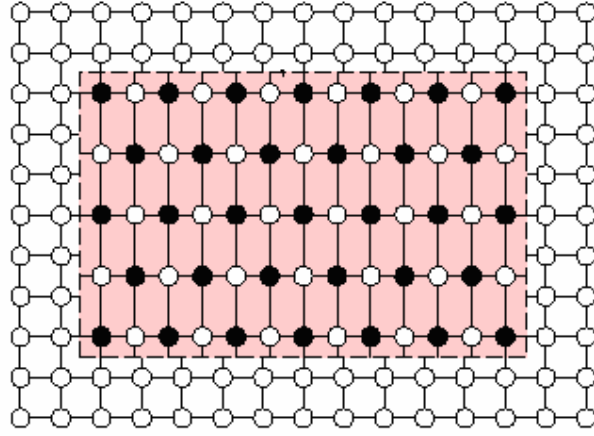
Şekil 6.2 Çözünen atomun çözen atom içerisindeki dağılımı.

(c) Çökeltme sertleşmesi (Precipitation hardening)

Solüsyona alma ısıl işleminde elde edilen, orta dereceli dayanıma ve önemli oranda sünekliğe sahip aşırı doymuş yapının mukavemet değerleri, çökeltme sertleşmesi ile daha da arttırılabilir. Yaşlandırmanın ilk aşamasında, aşırı doymuş yapı içerisindeki fazlalık atomları kümeleşir ve ilerleyen aşamalarda, çekirdeklenme mekanizmasının etkin hale gelmesiyle, β fazının (çökelti) çekirdeklerini oluşturur (Şekil 6.1) (Savaşkan, 1999). Çökeltme sertleşmesinin oluşumu, matris içinde, çözünen atomların meydana getirdiği **uyumlu çökelti**lerin (coherent precipitate) oluşmasına bağlıdır (Şekil 6.3). Uyumlu bir çökelti oluştuğunda, çökelti kafesinin atom düzlemleri ile matris kafesinin düzlemleri arasında süreklilik oluşur. Süreklilik oluşumu, çökelti etrafında geniş bir gerilme alanı oluşturur ve bu alan içerisinde geçen dislokasyonların hareketleri zorlaşır (Askeland, 1998). Alaşımın matris yapısı ile uyumlu çökelti, dislokasyon hareketlerine engel olarak, alaşımın sertliğini ve mukavemetini önemli ölçüde arttırırlar. Ancak, aşırı yaşlandırma durumunda, çökelti daha da büyüyerek, matristen bağımsız olarak kendi kristal yapılarını oluşturur ve kendisini çevreleyen matris ile uyumsuz bir yapı meydana getirirler (Şekil 6.4). Bu durumda malzemenin mukavemet değerlerinde düşüş görülür.

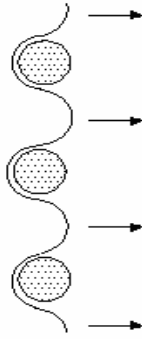


Şekil 6.3 Kendisini çevreleyen matris ile uyumlu çökelti.

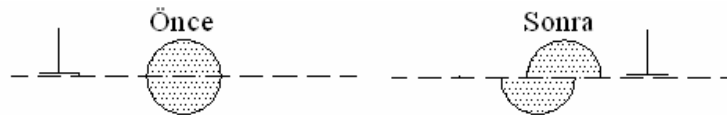


Şekil 6.4 Kendisini çevreleyen matris ile uyumsuz çökelti.

Buna ilave olarak, çökeltme sertleşmesinde, alaşımın sertliğini ve dayanımı arttıran bir diğer etken ise, çökelti boyutlarıdır. Yaşlandırma zamanı arttırıldığında, çökelti büyüyerek aralarındaki mesafe azalır ve bu ise dislokasyon hareketlerini engelleyerek sertlikte artışa neden olurlar (Şekil 6.5). Çökelti boyutları aşırı derecede artar ise, dislokasyonlar çökeltiyi kesebilir (Şekil 6.6) ve bu durumda sertlikte düşüşe neden olur.



Şekil 6.5 Çökelti arasında oluşan yarım halka şeklindeki dislokasyonlar (Ashby and Jones, 1994).



Şekil 6.6 Aşırı büyük çökeltilerin dislokasyonlar tarafından kesilmesi (Ashby and Jones, 1994).

BÖLÜM 7

DENEYSEL ÇALIŞMA VE SONUÇLARI

7.1 GİRİŞ

Bu çalışmada, yaşlandırma ısıl işleminin, kritik burkulma gerilmesi ve yükü üzerine etkisi araştırılmaktadır. Hem yaşlandırma yapılmadan önce ve hem de yaşlandırma yapıldıktan sonra, numunelerin sertlikleri ölçülmüş, çekme deneyi ile de çekme gerilmesi ve akma gerilmesi davranışı incelenmiştir. Daha sonra, sırasıyla, yaşlandırma yapılmamış ve yaşlandırma yapılmış numunelerin kritik burkulma gerilmesi ve yükü deneysel olarak belirlenmiştir.

Bu bölüm şu şekilde düzenlenmiştir. Sırasıyla, malzemenin kimyasal kompozisyonunu gösteren ve tarafımızdan özel bir firmaya yaptırılmış olan **spektral analiz** sonuçları verilecektir. Daha sonra, numunelere uygulanan yaşlandırma ısıl işlem aşamaları detaylı olarak verilecektir. Sertlik ölçümü ve çekme deneyi, sonuçları ile birlikte anlatılacaktır. Son olarak ise, burkulma deneyi detaylı olarak anlatılacak, sonuçların değerlendirilmesi yapılacaktır.

7.2 SPEKTRAL ANALİZ

Deneyselerde kullanılan AA 7075 malzemenin kimyasal analizi, tarafımızdan, Alkor Döküm Alaşımları Ve Mak. San. Ve Tic. Ltd. Şti.'ye yaptırılmıştır. Spektral analiz, adı geçen firmanın malzeme laboratuvarında WAS (FOUNDRY MASTER) cihazı kullanılarak yapılmış ve sonuçlar Çizelge 7.1'de gösterilmiştir. Firmanın tarafımıza verdiği kimyasal analiz sonuçları ayrıca **EK AÇIKLAMALAR A**'da verilmiştir.

Çizelge 7.1 AA 7075 kimyasal analiz sonuçları.

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Cr	Ti	V	Zr	B	Al
0.0117	0.196	1.561	0.0687	2,734	5.9	0.2	0.0343	0.0066	0.0091	0.0025	89.27

7.3 YAŞLANDIRMA ISIL İŞLEMİ

Yaşlandırma ısıl işlemlerinde kullanılan fırın Şekil 7.1’de gösterilmiştir. Protherm marka bu fırın 1600 °C maksimum sıcaklığa çıkabilmektedir.



Şekil 7.1 Yaşlandırma işlemlerinin yapıldığı fırın.

Çizelge 7.2’de yaşlandırma ısıl işlem parametreleri verilmektedir. Yaşlandırma ısıl işlemi, 130°C sabit sıcaklıkta ve 1, 2, 4, 8, 15, 30, 48, 60 saat olmak üzere sekiz farklı zaman aralığında yapılmıştır. Her bir zaman aralığı için 3 numune olmak üzere toplam 72 numune kullanılmıştır. Yaşlandırma ısıl işleminin ilk aşamasında numune, 480 °C sıcaklıkta solüsyona alınmıştır. Numuneler bu sıcaklıkta, 1 saat bekletildikten sonra, suda soğutularak (su verilerek), hızlı bir şekilde sıcaklıklarının oda sıcaklığına düşmesi sağlanmıştır. Yaşlandırma ısıl işlemi tamamlandıktan sonra, numuneler dış ortamda bekletilerek, sıcaklıklarının oda sıcaklığına düşmesi sağlanmıştır.

Çizelge 7.2 Deneyde kullanılan ısıtma işlem parametreleri.

Solüsyona alma	Soğutma ortamı	Yaşlandırma ısıtma işlemi
480 °C/1saat	Su	130°C/1saat
		130°C/2 saat
		130°C/4 saat
		130°C/8 saat
		130°C/15 saat
		130°C/30 saat
		130°C/48 saat
		130°C/60 saat

7.4 SERTLİK ÖLÇÜMLERİ

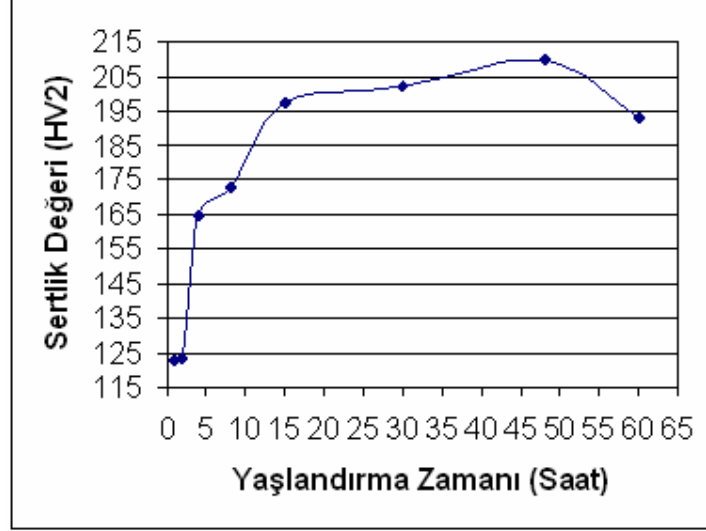
Yaşlandırma ısıtma işlemi uygulanmamış ve uygulanmış numunelerin, HV 2 Vickers sertlik değerleri, şekil 7.2’de görülen AFFRI SYSTEM sertlik ölçüm cihazı ile ölçülmüştür.



Şekil 7.2 Sertlik ölçüm cihazı.

7.5 SERTLİK ÖLÇÜM SONUÇLARI

AA 7075 numunelerin, yaşlandırma zamanına bağlı olarak sertlik değerlerindeki değişim Şekil 7.3'de verilmiştir.

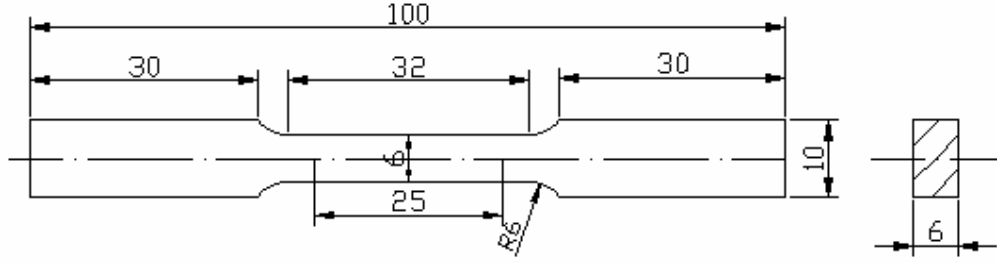


Şekil 7.3 130°C'de 1, 2, 4, 8, 15, 30, 48 ve 60 saat yaşlandırılan numunelerin sertlik değişimi.

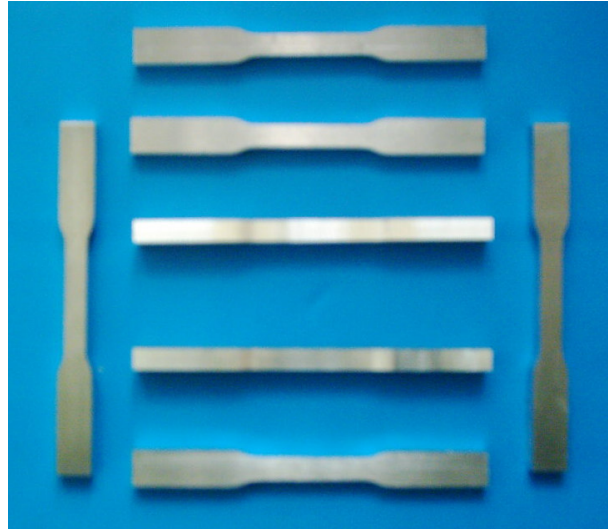
480 °C sıcaklıkta 1 saat süreyle solüsyona alınarak, **yaşlandırma ısıl işlemi uygulanmamış** numunenin, sertlik değeri 73 HV2 olarak ölçülmüştür. Uygulanan yaşlandırma zamanlarına bağlı olarak yapılan sertlik ölçümlerinde, yaşlandırma zamanının artması ile birlikte sertlik değerleri artmıştır, 48 saatlik yaşlandırma zamanında sertlik en yüksek değerine ulaşmıştır. Bu saatten (48 saatten) daha uzun yaşlandırma ısıl işlemlerinde, aşırı yaşlanma gerçekleşerek, sertlik değerlerinde azalma görülmüştür. AA 7075 malzemenin uygulanan 48 saatlik yaşlandırma zamanı için ölçülen sertlik değeri (209.8 HV2), 480 °C sıcaklıkta 1 saat süreyle solüsyona alınarak **yaşlandırma ısıl işlemi uygulanmamış** numunenin sertlik değeri (73 HV2) ile karşılaştırıldığında, 48 saatlik yaşlandırma ısıl işlemi ile sertlik değerinin %187 arttığı gözlemlenmiştir. Yaşlandırma ısıl işlemi sonucu oluşan bu sertlik artışı, alüminyumun matrisinde oluşan çökeltilerden kaynaklanmaktadır.

7.6 ÇEKME DENEYİ

Burada, AA 7075 alaşım plakdan mekanik deneylerde kullanılmak üzere ASTM E 8M standardına uygun, çekme numuneleri hazırlanmıştır. Hazırlanan çekme numunelerinin boyutları, Şekil 7.4’de gösterildiği gibi 6 mm kalınlığında 100 mm uzunluğunda olup ASTM E 8M standardında verilen ölçülerde işlenmiştir (Şekil 7.5).

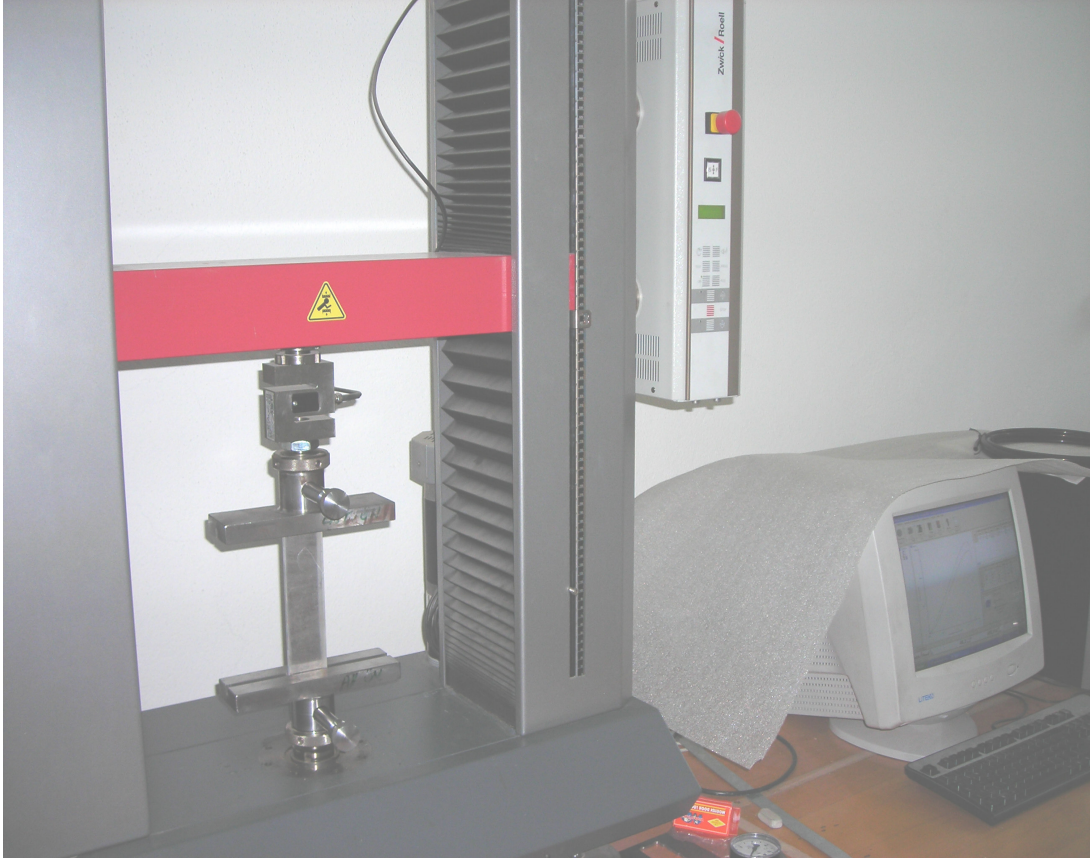


Şekil 7.4 Çekme numunesi boyutları.



Şekil 7.5 Çekme numunesi.

Çekme deneyleri, ASTM E 8M standartlarına uygun olarak yapılmıştır. Çekme deneylerinde Zwick/Roell Z050 50 kN’luk (Şekil 7.6) çekme cihazı kullanılmıştır. Deneyler, 0.5 mm/dakika çekme hızında gerçekleştirilmiştir. Çekme deneyi sonucunda, malzemede oluşan deformasyon Şekil 7.7’de görülmektedir.



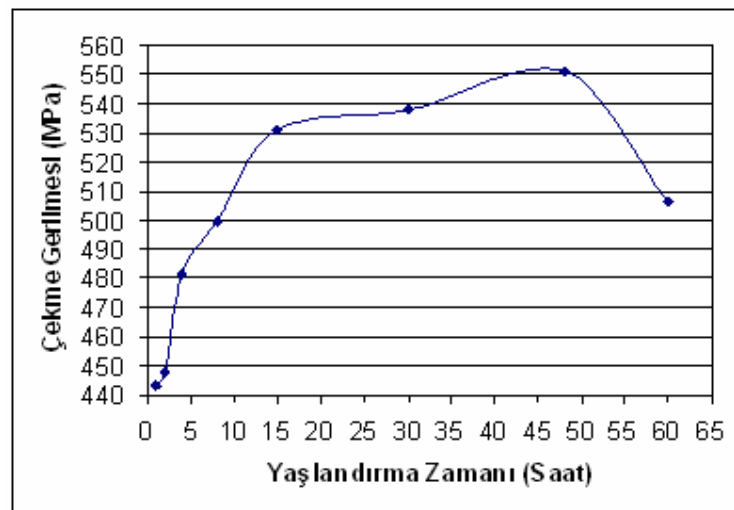
Şekil 7.6 Çekme ve burkulma deneylerinin yapıldığı cihaz.



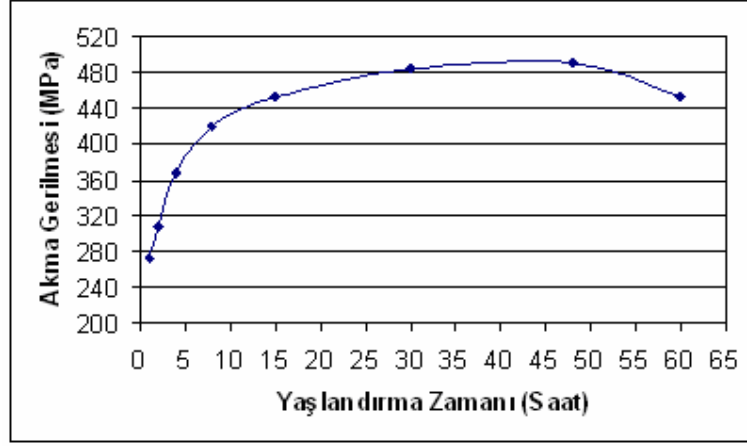
Şekil 7.7 Çekme deneyi sonucu numunede oluşan deformasyon.

7.7 ÇEKME DENEY SONUÇLARI

AA 7075 numunelerin, yaşlandırma zamanına bağlı olarak çekme ve akma gerilmesinde meydana gelen değişim Şekil 7.8 ve Şekil 7.9'da verilmiştir. 480 °C sıcaklıkta 1 saat süreyle solüsyona alınarak **yaşlandırma ısıl işlemi uygulanmamış** numunenin, çekme ve akma gerilmesi değerleri sırasıyla, 231 MPa ve 157 MPa olarak ölçülmüştür ($\sigma_c = 231\text{MPa}$, $\sigma_{ak} = 157\text{MPa}$). Uygulanan yaşlandırma zamanlarına bağlı olarak yapılan ölçümlerde, 48 saatlik yaşlandırma zamanında en yüksek çekme ve akma gerilmesi değerlerine ulaşılmıştır ($\sigma_c = 551\text{MPa}$, $\sigma_{ak} = 491\text{MPa}$). 48 saatten daha uzun yaşlandırma ısıl işlem süresinde ise, aşırı yaşlanma gerçekleşerek, her iki gerilme değerinde azalma görülmüştür. AA 7075 malzemeye uygulanan 48 saatlik yaşlandırma zamanı için edilen gerilme değerleri, 480 °C sıcaklıkta 1 saat süreyle solüsyona alınmış **yaşlandırma ısıl işlemi uygulanmamış** numunenin gerilme değerleri ile karşılaştırıldığında, çekme gerilmesi değerinde %138,5'lik, akma gerilmesi değerinde ise %212,7'lik bir artış elde edilmiştir. Gerek akma gerekse çekme gerilmelerinin yaşlandırma zamanına bağlı olarak değişimi, Şekil 7.3'de verilen sertlik değişim davranışı ile uyumludur. Yaşlandırma ısıl işlemi sonucu oluşan mukavemet artışları, alümiyumun matrisinde oluşan çökeltilerden kaynaklanmaktadır. Bu çökeltiler, yapılan deneyler sırasında, deformasyon nedeni ile oluşan dislokasyon hareketlerine engel olarak, çekme akma ve gerilmesinde artışa sebebiyet vermişlerdir.



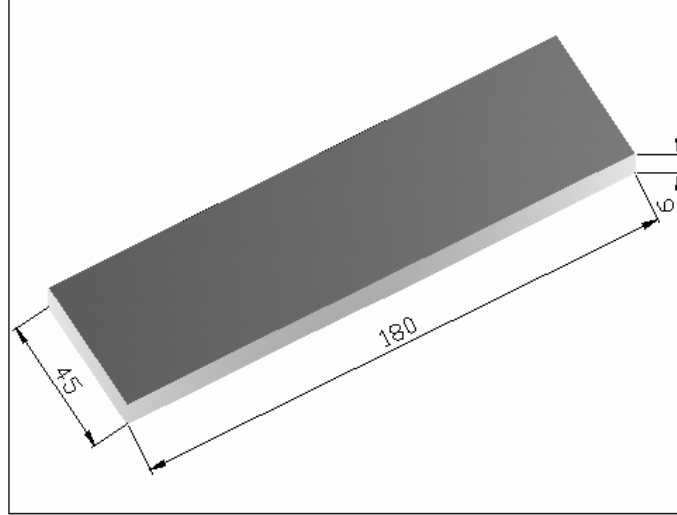
Şekil 7.8 130°'de 1, 2, 4, 8, 15, 30, 48 ve 60 saat yaşlandırılan numuneler için çekme gerilmesi değişimi.



Şekil 7.9 130°C'de 1, 2, 4, 8, 15, 30, 48 ve 60 saat yaşlandırılan numuneler için akma gerilmesi değişimi.

7.8 BURKULMA DENEYİ

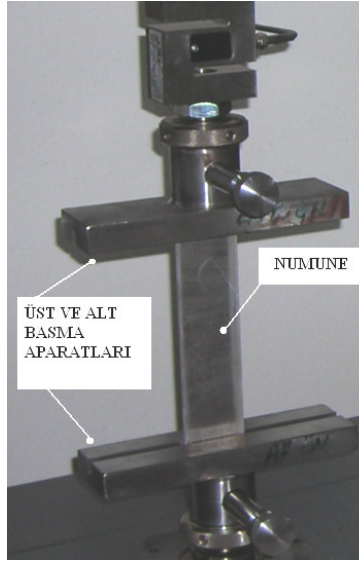
Burkulma analizinin yapılacağı dikdörtgen plaklar, Şekil 7.10'da görüldüğü gibi 45x180 mm boyutlarında ve 6 mm kalınlığındadır.



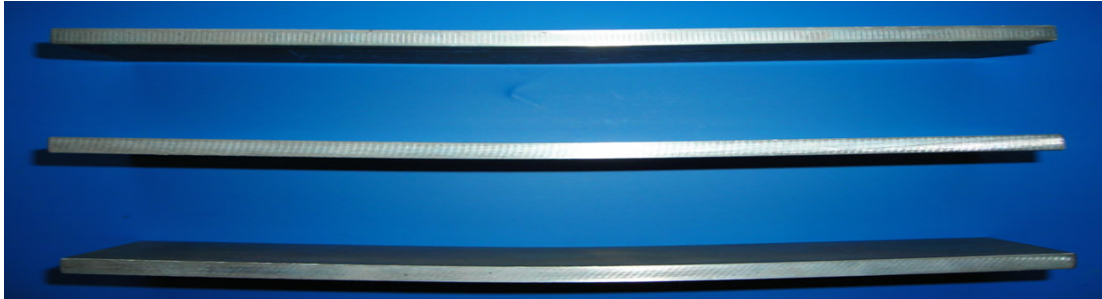
Şekil 7.10 Plak boyutları.

Burkulma deneyi, oda sıcaklığında, tek eksenli Zwick/Roell Z050 50 kN luk (Şekil 7.6) cihazında, tarafımızdan yaptırılan basma testi aparatları kullanılarak (Şekil 7.11), 0.5 mm/dak. basma hızında gerçekleştirilmiştir. Burkulma deneyi yapılmadan önce, basma aparatlarının numunelere temas eden yüzeyleri, sürtünmeyi en aza indirmek amacı ile

temizlenerek yağlanmıştır. Kritik burkulma yükleri, yüklemenin yapıldığı iki kısa kenar basit mesnetli, diğer uzun iki kenar serbest yapılmak sureti ile test edilmiştir. Kritik burkulma yükü olarak, deney sırasında elde edilen yük-deplasman eğrisinin tepe noktasındaki değeri alınmaktadır. Yük düştüğü veya değişmediği halde, numunede meydana gelen deplasman artışı burkulmanın olduğunu göstermektedir. **Yaşlandırma ısı işlemi uygulanmamış** plakların, yük-deplasman eğrileri, **EK AÇIKLAMALAR B**'de gösterilmektedir. Yaşlandırma işlemi, önceki bölümde anlatıldığı gibi, sekiz farklı zaman aralığı (1, 2, 4, 8, 15, 30, 48, 60) için uygulanmıştır. Burada, her bir zaman aralığı için 3 numune ve **yaşlandırma işlemi uygulanmamış** durum için 3 numune olmak üzere toplam 27 numune kullanılmıştır. Burkulma deneyi sonucu plakta oluşan deformasyon Şekil 7.12'de görülmektedir.



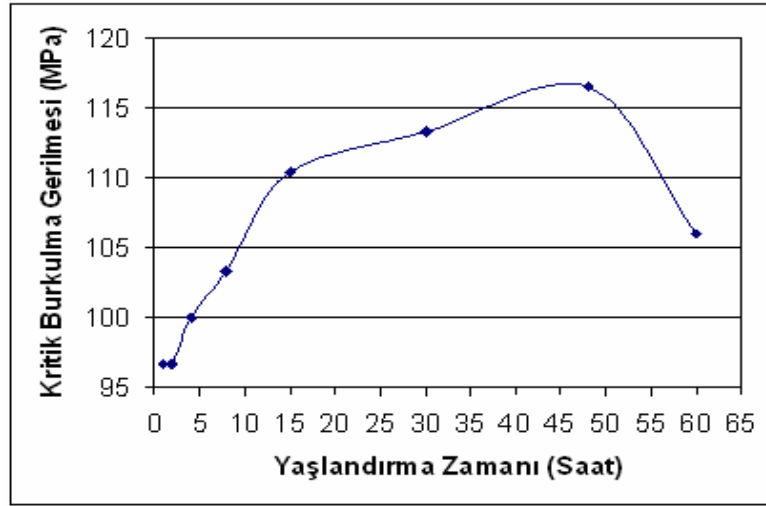
Şekil 7.11 Burkulma deneyinde kullanılan üst ve alt basma aparatları.



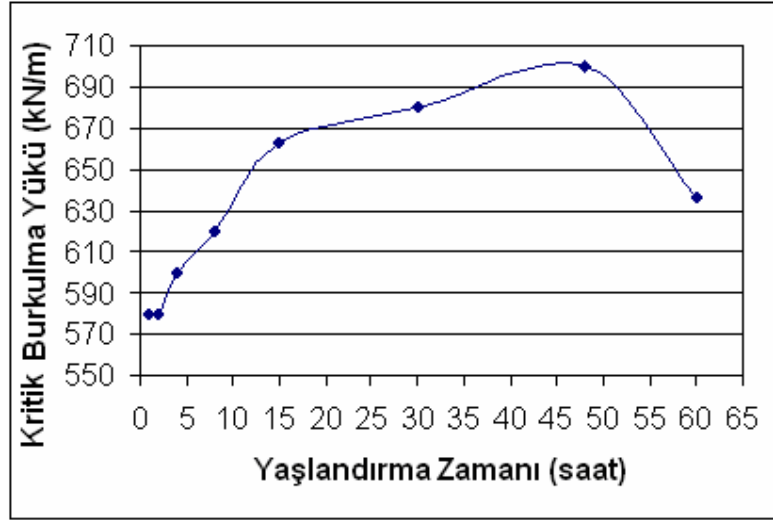
Şekil 7.12 Burkulma deneyi sonucu plakta oluşan deformasyon.

7.9 BURKULMA DENEY SONUÇLARI

Yaşlandırma zamanına bağlı olarak, kritik burkulma gerilmesinde ve yükünde meydana gelen değişim, sırasıyla, Şekil 7.13 ve Şekil 7.14'de gösterilmiştir. 480 °C sıcaklıkta 1 saat süreyle solüsyona alınmış, **yaşlandırma ısı işlemi uygulanmamış** numunenin, kritik burkulma gerilmesi 75 MPa ve kritik burkulma yükü 450 kN/m olarak ölçülmüştür. Uygulanan yaşlandırma zamanına bağlı olarak, kritik burkulma gerilmesi ve yükü artarak, 48 saatlik yaşlandırma zamanında en yüksek değerine ulaşmıştır, 48 saatten daha uzun yaşlandırma ısı işlem süresinde ise, aşırı yaşlanma gerçekleşerek, kritik burkulma gerilmesi ve yükü azalma göstermiştir. Uygulanan 48 saatlik yaşlandırma zamanında elde edilen kritik burkulma gerilmesi (ve yükü) değerleri (116.6 MPa, 699,6 kN/m), 480 °C sıcaklıkta 1 saat süreyle solüsyona alınmış, **yaşlandırma ısı işlemi uygulanmamış** numunenin, kritik burkulma gerilmesi (ve yükü) değeri ile karşılaştırıldığında, kritik burkulma gerilmesi (ve yükü) değerinde %55'lik bir artış görülmüştür. Kritik Burkulma gerilmesinin (ve yükünün), yaşlandırma ısı işlem zamanına bağlı olarak değişimi, Şekil 7.3'de verilen sertlik değişim davranışı ile uyumludur. Yaşlandırma ısı işlemi sonucu oluşan mukavemet artışları, alüminyumun matrisinde oluşan çökeltilerden kaynaklanmaktadır. Bu çökeltiler, yapılan deneyler sırasında, deformasyon nedeni ile oluşan dislokasyon hareketlerine engel olarak, burkulma gerilmesi ve yükünde artışa sebebiyet vermiştir.



Şekil 7.13 130°C'de 1, 2, 4, 8, 15, 30, 48 ve 60 saat yaşlandırılan numuneler için kritik burkulma gerilmesi değişimi.



Şekil 7.14 130°C’de 1, 2, 4, 8, 15, 30, 48 ve 60 saat yaşlandırılan numuneler için kritik burkulma yükü değişimi.

BÖLÜM 8

GENEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Yapılan çalışmada, yaşlandırma ısıl işleminin alüminyum 7075 alaşımının burkulma yüküne etkisi incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir:

(a) AA 7075 malzemeye uygulanan yaşlandırma ısıl işlemi, sertlik, çekme gerilmesi, akma gerilmesi ve kritik burkulma değerlerinde artışa neden olmuştur.

(b) Yaşlandırma ısıl işlemi uygulanmamış plak için, Lêvy metodundan, deneyden ve ANSYS çözümünden elde edilen N_{kr} değerleri sırasıyla, 441,184 kN/m, 450 kN/m ve 394,245 kN/m olarak bulunmuştur. Lêvy metodu ve deneyden elde edilen kritik burkulma yükleri arasındaki fark %2 mertebesinde dir.

(c) Deneysel çalışmalar sonucunda, yaşlandırma ısıl işlem süresinin arttırılması ile alaşımın, sertlik, burkulma gerilmesi ve yükü, çekme ve akma gerilmeleri değerlerinde artış gözlemlenmiştir. Burada, 48 saatlik yaşlandırma süresinde, mukavemet değerlerinde maksimum artış elde edilmiştir (Şekil 7.3-7.8-7.9-7.13-7.14). Bununla beraber, 48 saatin üzerindeki yaşlandırma süresinde, alaşımın aşırı yaşlanması (over-aged) nedeni ile, mukavemet değerlerindeki artış yerine azalmaya bırakmıştır (Şekil 7.3-7.8-7.9-7.13-7.14).

(d) Yapılan deneysel çalışmalarda, yaşlandırma zamanının arttırılması ile birlikte her ne kadar burkulma gerilmesi ve yükünde artış meydana gelse de, alaşımın sertliğindeki artış, daha gevrek bir yapı oluşmasına neden olarak, malzemenin kırılma dayanımını arttırmaktadır. Dolayısıyla, bu iki parametre (sertlik ve burkulma yükü) birlikte gözönüne alınarak, malzemenin yapısına uygun yaşlandırma sıcaklığı ve zamanı tespit edilmelidir.

Bu çalışmada, solusyona alma sıcaklığı 480 °C seçilerek, numuneler bu sıcaklıkta 1 saat süreyle bekletilmiştir. Yaşlandırma ısıl işlemi, sabit sıcaklık (130°C) ve 8 farklı zaman aralığında (1, 2, 4, 8, 15, 30, 48 ve 60) yapılmıştır. İleride yapılacak çalışmalar da,

solusyona alma sıcaklığı ve solusyona alma süreleri değiştirilebilir. Yaşlandırma ısıl işlemi için, farklı sabit sıcaklık değerleri ve zaman aralıkları kullanılarak, deneyler tekrar edilebilir.

KAYNAKLAR

- Ashby, M.F. and Jones, D.R.H** (1994) *Engineering Materials 2*, Pergamon, Great Britain, 369 s.
- Askeland, D.R.** (1998) *Malzeme Bilimi ve Mühendislik Malzemeleri*, Nobel Yayın Dağıtım Ankara, 364 s.
- Aydoğdu, M. and Ece, M. C.** (2006) Buckling and vibration of non-ideal simply supported rectangular isotropic plates, *Mechanics Research Communications*, Vol. 33, pp. 532–540.
- Bradford, M. A. and Azhari, M.** (1995) Buckling of plates with different end conditions using the finite strip method, *computers & structures*, Vol.56., pp. 75-83.
- Brighenti, R.** (2005) Buckling of cracked thin-plates under tension or compression, *Thin Walled Structures*, Vol.43, pp. 209–224.
- Brown, J.R.** (1999) *Foseco Non-Ferrous Foundryman's Handbook*, Eleventh Edition, Butterworth-Heinemann, Oxford, 304 pp.
- Civalek, Ö.** (2004) Application of differential quadrature (DQ) and harmonic differential quadrature (HDQ) for buckling analysis of thin isotropic plates and elastic columns, *Engineering Structures*, Vol.26, pp. 171–186.
- Clark Jr, R., Coughran, B., Traina, I., Hernandez, A., Scheck, T., Etuk, C., Peters, J., Lee, E.W., Ogren, J. and Es-Said, O.S.** (2005) On the correlation of mechanical and physical properties of 7075-T6 Al alloy, *Engineering Failure Analysis*, Vol.12, pp. 520–526.
- Çevik, A. and Güzelbey, İ.H.** (2007) A soft computing based approach for the prediction of ultimate strength of metal plates in compression, *Engineering Structures*, Vol.29, pp. 383–394.
- Easton, M., Song, W. Q. and Abbott, T.** (2006) A comparison of the deformation of magnesium alloys with aluminium and steel in tension, bending and buckling, *Materials and Design*, Vol.27, pp. 935–946.
- Eisenberger, M. and Alexandrov, A.** (2003) Buckling loads of variable thickness thin isotropic plates, *Thin-Walled Structures*, Vol.41, pp. 871–889.
- El-Sawy, K. M. and Nazmy, A. S.** (2001) Effect of aspect ratio on the elastic buckling of uniaxially loaded plates with eccentric holes, *Thin-Walled Structures*, Vol.39, pp. 983–998.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Erdoğan, M.** (2001) *Mühendislik Alaşımalarının Yapı ve Özellikleri demir dışı alaşımlar cilt 2*, Nobel Yayın Dağıtım, Ankara, 378 s.
- Luong, N. T. H. and Tri, T. H.** (2005) Influence of variable thickness on stability of rectangular plate under compression, *Mechanics Research Communications*, Vol.32, pp.139–146.
- Nerantzaki, M. S. and Katsikadelis, J. T.** (1996) Buckling of plates with variable thickness-an analog equation solution, *Engineering Analysis with Boundary Elements*, Vol.18, pp. 149-154.
- Sabir, A. B. and Chow, F. Y.** (1986) Elastic Buckling of Plates Containing Eccentrically Located Circular Holes, *Thin-Walled Structures*, Vol.4, pp. 135-149.
- Savaşkan, T.** (1999) *Malzeme Bilgisi ve Muayenesi*, Derya Kitabevi, Trabzon, 285 s.
- Shakerley, T. M. and Brown, C. J.** (1996) Elastic buckling of plates with eccentrically positioned rectangular perforations, *Int. J. Mech. Sci.*, Vol.38, pp. 825-838.
- Soh, A. K., Bian, L. C. and Chakrabarty, J.** (2000) Elastic/plastic buckling of a flat plate subjected to uniform edge compression, *Thin-Walled Structures*, Vol.38, pp. 247–265.
- Supasak, C. and Singhatanadgid, P.** (2004) A comparison of experimental buckling load of rectangular plates determined from various measurement methods, *Proceedings of the 18th Conference of the Mechanical Engineering Network of Thailand (ME-NETT 18)*. Sofitel Raja Orchid Hotel, Khon Kaen, Thailand.18-20 October 2004, code AMM43.
- Sun, Y.** (1998) Yaşlanabilir Alüminyum Alaşımlarının Aşınma Davranışları, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, 89 s.
- Swartza, S. E. and O'Neillb, R. J.** (1995) Linear Elastic Buckling of Plates Subjected to Combined Loads, *Thin-Walled Structures*, Vol.21, pp. 1-15.
- Timoshenko, S.P. and Gere, J.M.** (1961) *Theory of Elastic Stability*, McGRAW-HILL KOGAKUSHA, Tokyo, 541 pp.
- Turhan, S.** (2002) Alüminyumun Mekanik Özelliklerine ve Aşınma Davranışlarına Magnezyumun ve Silisyumun Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, 64 s.
- Ventsel, E. and Krauthammer, T.** (2001) *Thin Plates and Shells Theory, Analysis, and Applications*, Marcel Dekker, USA, 666 pp.
- Wang, C. M., Wang, C. Y. and Reddy, J. N.** (2005) *Exact Solutions For Buckling Of Structural Members*, CRC press, USA, 207 pp.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

Wessel, J. K. (2004) *Handbook of advanced materials*, Wiley-Interscience Publication, USA, 656 pp.

Yazıcı, M., Özcan, R., Ülkü S. and Okur, İ. (2003) Buckling of Composite Plates With U-shaped Cutouts, *Journal of Composite Materials*, Vol.37, No. 24/2003.

EK AÇIKLAMALAR A

AA 7075 SPEKTRAL ANALİZ SONUCU



ALKOR DOKUM ALASIMLARI VE MAK.SAN. VE TIC.LTD.STL
ANADOLU TEKNİK SANAYİ BURAK SOK. NO:5 KONYA
TEL: (0332) 249 67 07
FAX: (0332) 248 15 18

SPEKTROMETRE ANALİZ SONUÇLARI (%)

Müsteri : OZGAYD TARIH : 01.03.2007
Sarj No: SAAT : 11:34:05
Parça : NO 7
Program : AL_OR
Kalite : ETIAL 44

Analiz Cihazı: WAS (FOUNDRY MASTER)

Ort	Al 89,2	Si 0,0117	Fe 0,196	Cu 1,561	Mn 0,0687	Mg 2,734	Zn 5,90	Cr 0,200	Ni < 0,0008
Ort	Ti 0,0343	Be 0,0006	Ca < 0,0005	Li < 0,0001	Pb < 0,0050	Sn < 0,0040	Sr < 0,0001	V 0,0066	Na < 0,0005
Ort	Bi < 0,0050	Zr 0,0091	B 0,0025	Ga 0,0115	Cd < 0,0010	Co < 0,0050	Sb < 0,0060		

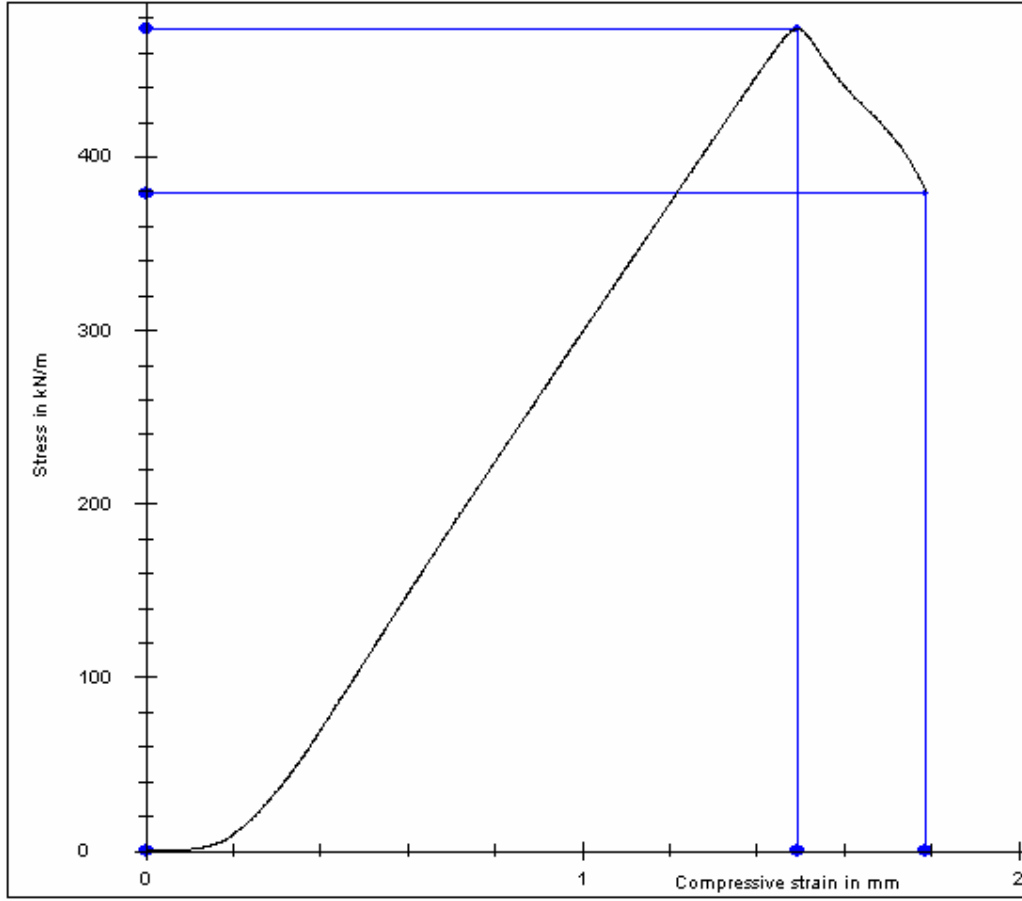
İMALAT MÜDÜRÜ



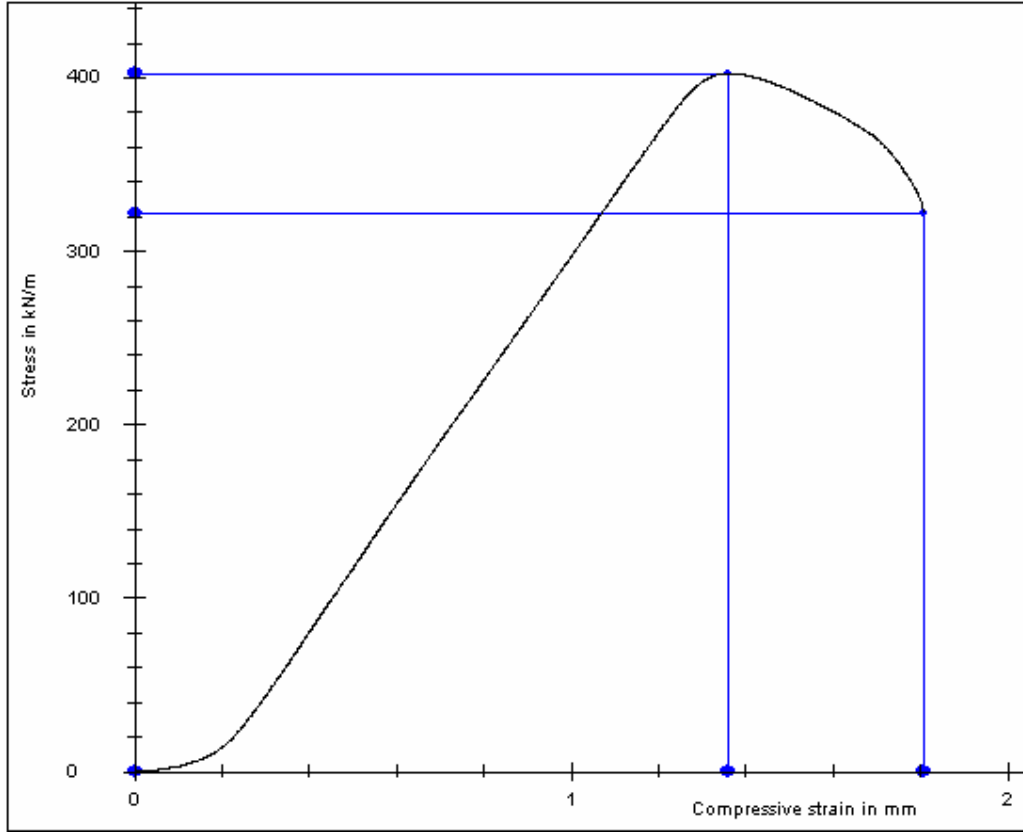
Şekil A.1 AA 7075 kimyasal kompozisyonu.

EK AÇIKLAMALAR B

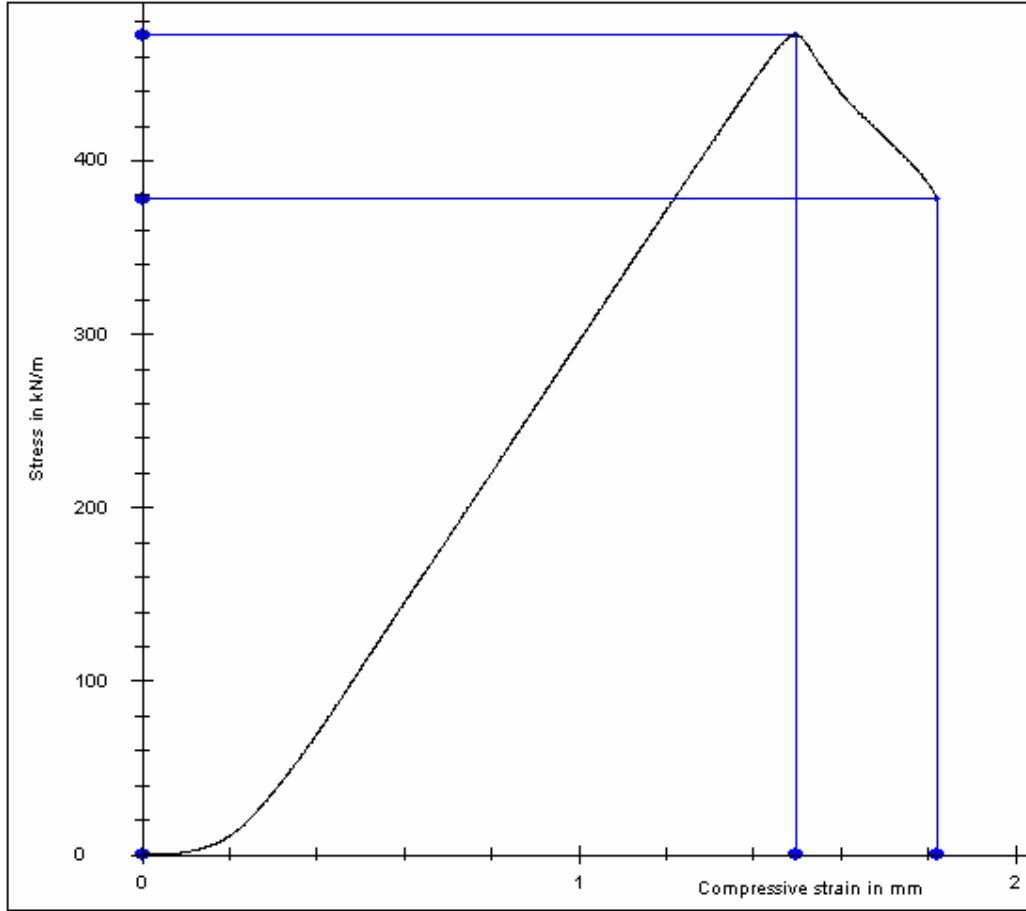
**YAŞLANDIRMA ISIL İŞLEMİ UYGULANMAMIŞ PLAKLARIN YÜK-
DEPLASMAN EĞRİLERİ**



Şekil B.1 Yaşlandırma ısı işlemi uygulanmamış 1 nolu numunenin yük-deplasman eğrisi.



Şekil B.2 Yaşlandırma ısı işlemi uygulanmamış 2 nolu numunenin yük-deplasman eğrisi.



Şekil B.3 Yaşlandırma ısı işlemi uygulanmamış 3 nolu numunenin yük-deplasman eğrisi.

ÖZGEÇMİŞ

Özkan ÖZ, 1980'de Ankara'da doğdu; ilköğrenimini Gazi mahallesi Gazi İlkokulu'nda, orta öğrenimine Yıldırım Beyazıt Anadolu Lisesinde başlayıp Yenimahalle Mustafa Kemal Lisesinde tamamladı.

Yenimahalle Mustafa Kemal Lisesi'nden mezun olduktan sonra 1999 yılında Kırıkkale Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümüne girdi; 2004'de adı geçen mühendislik programından mezun oldu.

2004 yılında, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans Programına başladı. Aynı zamanda, 3 Ocak 2005 tarihinde, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Karabük Teknik Eğitim Fakültesi, Makina Eğitimi Bölümü, Mekanik ve Makina Elemanları Anabilim Dalında başladığı Araştırma Görevlisi görevini devam ettirmektedir.

Adres Bilgileri

Zonguldak Karaelmas Üniversitesi
Karabük Teknik Eğitim Fakültesi
Makina Eğitimi Bölümü
100.Yıl Mah. KARABÜK

Tel: 0370 433 82 00 /1288

e_mail: ozkanoz@karaelmas.edu.tr