

1100-H14 ALÜMİNYUM ALAŞIMININ DÜZLEMSEL EĞME GERİLMELİ YORULMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

Raif SAKİN ve Muharrem ER*

Makina Böl., Edremit Meslek Yüksekokulu, Balıkesir Üniversitesi, 10300 Edremit/Balıkesir

* Mekatronik Grubu, K.K. Astsubay Meslek Yüksekokulu, 10110 Çayırhisar/Balıkesir

rsakin@balikesir.edu.tr, muarrem@yahoo.com

(Geliş/Received: 24.12.2008 ; Kabul/Accepted: 22.02.2010)

ÖZET

Bu çalışmada, 1100-H14 alüminyum alaşımı plakaların yüksek çevrimdeki yorulma davranışları incelenmiştir. Çalışmanın temel amacı, oda sıcaklığında haddeleme doğrultusunun çekme ve düzlemsel eğilmeli yorulma özelliklerine etkisini incelemektir. Bunun için özel olarak ankastre tip düzlemsel-eğme yapan test makinesi tasarlandı ve imal edildi. Yorulma testleri için, alüminyum plakalar haddeleme yönüne paralel ve dik olarak iki farklı yönde kesildiler. Farklı sehim genlikleri kullanılarak sehim-kontrollü ve tam değişken yüklemeli ($R=-1$) yorulma testi uygulanmıştır. Testlere 10^7 yük tekrar sayısına kadar devam edilerek alüminyum plakalar için S-N eğrileri elde edildi. Numunelerin mekanik özelliklerinin tespiti için yorulma testlerinin yanı sıra çekme testleri de gerçekleştirildi. Çalışma sonunda, çekme ve akma mukavemetinin oda sıcaklığında haddeleme yönünden ortalama %2 etkilendiği görülmüştür. Ancak haddeleme yönünün yorulma mukavemetine etkisi düşük çevrimli bölgede %30'dan daha büyük iken, yüksek çevrimli yorulma bölgesinde sıfıra kadar inmiştir. Özellikle yüksek çevrimli yorulma (YÇY, $\approx 10^7$) bölgedeki yorulma testleri sonucunda, farklı tekstür yapısına sahip numunelerde yorulma izlerinin azalması, mikro-yapının benzerliği ve istikrarlı çatlak büyümesi haddeleme yönünün yorulma mukavemetini etkilememesinin bir kanıtıdır. Sonuçlara göre, 1100-H14 alüminyumun düşük çevrimli bölgede ve yüksek yorulma mukavemeti gerektirmeyen tasarımlarda kullanılması tavsiye edilir. Ayrıca pratik uygulamalarda tasarımcıya yardımcı olmak için çekme ve yorulma mukavemetleri arasındaki ilişkiyi gösteren ampirik formüller verilmiştir.

Anahtar Kelimeler: 1100-H14 alüminyum alaşımı, düzlemsel-eğme yorulması, sehim kontrollü, düşük çevrimli yorulma (DÇY), yüksek çevrimli yorulma (YÇY), haddeleme yönü, S- N eğrileri.

INVESTIGATION OF PLANE-BENDING FATIGUE BEHAVIOR OF 1100-H14 ALUMINUM ALLOY

ABSTRACT

In this study, the high-cycle fatigue behavior of aluminum 1100-H14 alloy has been investigated. The main purpose of this study is the investigation of the effects of the rolling direction on tensile and plane-bending fatigue properties at room temperature. A cantilever plane-bending test machine was specially designed and manufactured for this purpose. Aluminum plates were cut in longitudinal and transverse orientations to the rolling direction. The fatigue tests using different deflection amplitudes were conducted under deflection-control and fully-reversed loading ($R=-1$). Tests were continued up to 10^7 cycles to obtain S-N curves for aluminum alloy plates. Besides the fatigue tests, in addition tensile tests were performed to determine the mechanical properties of the specimens. As a result, it was observed that tensile strength and yield strength are affected by rolling direction in 2% of average at the room temperature. However, the effect of rolling direction on fatigue strength is greater than 30% in low-cycle region, while decreased nearly zero in high-cycle fatigue region. With respect to the results of the fatigue tests in high-cycle region (HCF, $\approx 10^7$), the reduction of fatigue traces, similarity of the micro-structure and stable growth direction of the samples of the different texture structures show that the fatigue strength does not affected by the rolling direction. According to results, 1100-H14

aluminum is recommended for use in low cycle region and designs in which are not required to have high fatigue strength. Also, to help the designers of the practical applications, empirical formulas were given between the tensile and fatigue strengths.

Keywords: 1100-H14 aluminum alloy, plane-bending fatigue, deflection-controlled, low-cycle fatigue (LCF), high-cycle fatigue (HCF), rolling orientation, S-N curves.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Alüminyum (2.7 g/cm^3), demir, bakır ve pirinç gibi malzemelerden yaklaşık 3 kat daha düşük yoğunluğa sahip olan hafif bir malzemedir. Atmosfer, su, deniz ve farklı kimyasal ortam gibi çevre şartlarında bile mükemmel bir korozyon direncine sahiptir. Ayrıca, estetik görünümü, kolay işlenebilirliği, yüksek elektrik ve ısı iletkenliği gibi dikkat çekici karakteristik özellikleri vardır. İlave olarak, sahip olduğu fiziksel, mekanik ve tribolojik özelliklerinden dolayı otomotiv endüstrisinde ve uçaklarda oldukça yaygın kullanılmaktadır [1,2,3].

Yorulma, sabit veya değişken yük altında çalışan mekanik parçaların davranışlarına karar vermede çok önemli bir parametredir. Yapısal bir parçanın yorulma direnci mekanik, metalürjik ve çevresel değişkenlerden etkilenir. Yorulma bütün mühendislik hasarlarında %80-90 oranında öncelikli sebeptir. Alüminyum alaşımlarının çok sık kullanıldığı uygulamalarda, çalışan elemanın yorulma performansının ve çalışma parametrelerinin yorulmaya etkisinin bilinmesi zorunludur. Hatta, bu elemanın farklı çalışma şartlarından kaynaklanan yorulma özelliklerinin tam doğru değerlendirilebilmesi için gerilme-ömür (S-N) bilgilerini içeren geniş veritabanlarının oluşturulması çok önemlidir [1].

Yorulma ömrü tamamen malzemenin kendine özgü özelliklerinden değil numunenin özelliklerinden de etkilenmektedir. Numunenin işlenmesi esnasında oluşan mikro boşluklar, yüzey kusurlarının ve soğuk veya sıcak deformasyon ile tane yapısında meydana gelen değişiklikler deney numunesinin yorulma ömrünü etkiler [4,5]. Oda sıcaklığında alüminyumun haddeme yönüne paralel veya haddeme yönüne dik çekme mukavemeti ve yorulma ömrü az değişim göstermektedir. Ancak, ortam sıcaklığı arttığında, çekme mukavemeti ve aynı gerilme genliği için yorulma ömür değerleri haddeme yönüne göre belirgin olarak değişmektedir [6]. Srivatsan, T.S. ve arkadaşları bazı alüminyum alaşımları için yaptıkları çalışmalarda yüksek test sıcaklıklarında ve yüksek titreşim genliklerinde hadde yönüne dik kesilmiş numunelerin akma, çekme ve yorulma ömürlerinin hadde yönünde kesilmiş numunelere nazaran düştüğünü, ancak oda sıcaklığında hadde yönünün akma, çekme mukavemeti ve yorulma ömrü üzerindeki etkisinin az olduğunu tespit etmişlerdir. Sıcaklık artışı tane yapısını büyütürken (tane sınırlarını azaltır) çekme ve yorulma mukavemetlerinin düşmesine sebep olmaktadır [7,8]. Dolayısıyla, özellikle farklı

ortam şartlarında çalışacak elemanlar için haddeme yönüne göre belirlenecek yorulma özellikleri son derece önem kazanmaktadır. Genelde, hem haddeme yönüne paralel hem haddeme yönüne dik olarak test edilen alüminyum numunelerin “gerilme genliği-yorulma ömrü eğrisi” (S-N) azalan gerilme genliğine karşılık artan bir yorulma ömrü eğilimi gösterir. Genellikle test zamanı da dikkate alınarak isteğe göre 10^6 çevrimde kesilen değerler kullanılır. Ancak, düşük gerilme değerlerinde, malzemenin “ 10^6 çevrime ulaşan kırılma çevrimi” olarak tanımlanan yorulma ömrü belirsiz olabilmektedir. Nitekim, diğer metallere farklı olarak saf alüminyum ve alaşımlarının, S-N ilişkisinde belirgin bir yorulma dayanım sınırına sahip olmadığı ifade edilir. Ancak yine de kullanım yerine ve malzeme özelliklerine (şekil, boyut faktörü vs.) göre iyi tanımlanmış yorulma dayanım sınırına sahip yüzey merkezli kübik yapıli metallere vardır [6]. Bu sebeplerden dolayı bu çalışmada 1100-H14 alüminyum malzemenin yorulma dayanım sınırını daha doğru belirleyebilmek için 10^7 yük tekrar sayılarına (yüksek çevrim) kadar testlere devam edilmiştir. S-N eğrilerinde, farklı gerilme-oranı (R) ve ortalama-gerilme değerlerinin etkisini gösteren test verilerinin kullanılması arzu edilen bir durumdur. Ancak, ortalama gerilmenin sıfır olduğu, tam değişken (R=-1) yüklem modelinin uygulandığı test verileri en kritik veriler olduğundan tasarımda çoğu zaman bu değerler kullanılır. Bu veriler aynı zamanda, tasarımcıya ömür ile ilgili hızlı ve doğru karar vermesinde yardımcı olur [9,10,11,12].

1100-H14 alüminyum, başta otomobil endüstrisindeki plakalar ve apliklerde olmak üzere, yüksek mukavemet gerektirmeyen, ancak şekillenebilirlik ve korozyon direncinin yüksek olması istenen yerlerde daha sık kullanılmaktadır. Örneğin, kimyasal, yiyecek taşıma ve depolama ekipmanları, ince sac metal işleri, derin çekme veya sıvama ile imal edilen tüpler ve genel amaçlı kaplar, ısı değiştirgeçleri (eşanjörler), kaynaklı montajlar, araç plakaları, ışık reflektörleri gibi aydınlatmada işlerinde kullanılmaktadır [3,13].

Bu çalışmanın temel amacı, yukarıda bahsedilen alanlarda kullanılan 1100-H14 alüminyum plakaların oda sıcaklığında haddeme doğrultusunun çekme özelliklerine ve eğme yorulması davranışlarına etkisini incelemektir. Çalışmanın amacına uygun olarak düzlemsel eğme gerilmeli yorulma cihazı tasarlanmış ve imal edilmiştir. Tek numuneli bir yorulma test cihazı için toplam test zamanı da dikkate alınarak yüksek test frekansı (70 Hz) seçilmiştir. Yüksek frekanslı ve sehim ayarlı yorulma test cihazında 1100-

H14 alüminyum levhasından, haddeleme yönüne paralel ve dik kesilmiş numunelerin yorulma testleri yapılmıştır. Deneysel sonuçlara göre S-N diyagramları (Wöhler eğrileri) elde edilmiştir. Yorulma ömür sınırı (dayanım sınırı) olarak, 10^7 çevrime karşılık gelen gerilme değeri kabul edilmiştir. Sonuçlar kıyaslamalı olarak yorumlanmıştır.

2. MALZEME VE METOT (MATERIALS AND METHOD)

2.1. Malzeme (Material)

Bu çalışmada kimyasal içeriği Tablo 1’de verilen 1100-H14 alüminyum alaşımı numuneler kullanılmıştır.

Hadde yönüne paralel (HYP) ve dik (HYD) kesilerek hazırlanan alüminyum plakaların çekme özellikleri için TS-EN/485-2 standardına uygun olarak çekme testleri yapılmış ve sonuçlar Tablo 2’de verilmiştir [14,15]. Sonuçların literatür [3,16,19] ile uyum içerisinde olduğu görülmüştür.

2.2. Eğme Yorulması Testi (Bending Fatigue Test)

Kapalı döngü eğme yorulması testlerinde sabit gerilme kontrolü (stress-controlled) veya sabit şekil

değişim kontrolü (displacement-controlled) kolaylıkla uygulanabilir. Gerilme kontrolünde test numunesi belirtilen maksimum-minimum yükler arasında döndürülür ve sabit gerilme genliği sağlanır. Yorulma prosesi ilerledikçe numunede şekil değişimi artar ve rijitlik azalır. Şekil değişimi kontrolünde ise numune belirlenen maksimum-minimum şekil değişimi arasında çalışır ve sabit sehim genliği elde edilir [17]. Gerilme-kontrollü bir çok ticari servo-hidrolik test makineleri, komplike ve alım maliyetlerinin yanı sıra bakım, işletim ve servis maliyetleri de şekil değişim-kontrollü test cihazı ile kıyaslandığında oldukça yüksektir [18]. Bu nedenle, bu çalışmada Şekil-1’de şematik resmi verilen şekil değişim (sehim) kontrollü **ankastre tip düzlemsel eğme yorulması test cihazı** tasarlanmış ve imal edilmiştir [15].

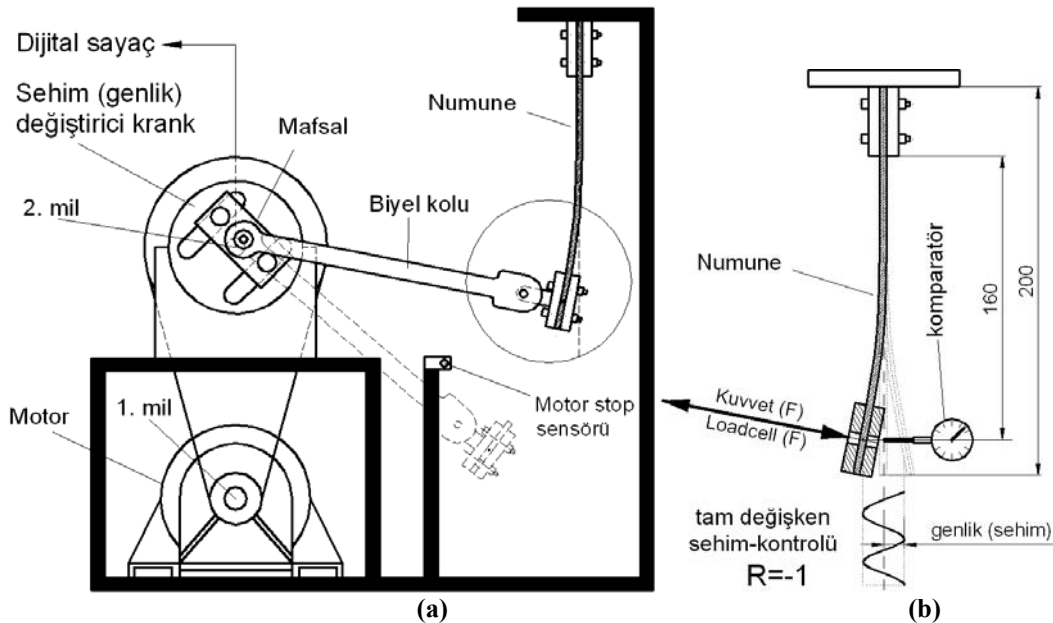
Yorulma test cihazında, çıkış devri 2850 dev/dak ve gücü 1 HP olan motor kullanılmıştır. Motordan triger kayış-kasnağı ile ikinci mile hareket verilmiş ve test frekansı 70 Hz elde edilmiştir. İkinci milin bir ucu sehim-değiştirici krank mekanizmasına diğer ucu çevrim sayıcı sensör tarafına yataklanmıştır. Çevrim sayıcı sensörden alınan veriler dijital sayaca iletilmektedir. Numune kırıldığında biyel kolu kendi ağırlığıyla aşağı düşer. Bu esnada biyel kolu motor stop sensörü tarafından algılanır ve motor durur. Testteki sabit sehimler krank üzerindeki ayar vidaları

Tablo 1. Alüminyum alaşımı plakaların kimyasal bileşimi (% ağırlık) (Chemical composition of aluminum alloys (wt.%))

Al	Cr	Cu	Fe	Mg	Mn	Ni	Si	Ti	Zn
99.4	0.002	0.001	0.494	0.005	0.001	0.001	0.098	0.014	0.008

Tablo 2. Çekme özellikleri (Tensile properties)

Numune Yönü	Çekme Mukavemeti	Akma Mukavemeti	Elastiklik Modülü	Uzama	Poisson Oranı
HYP	126 MPa	120 MPa	68.9 GPa	%9.0	0.33
HYD	124 MPa	118 MPa	68.9 GPa	%8.5	0.33



Şekil 1. (a) Ankastr tip düzlemsel-eğme yorulması test cihazının şematik gösterimi (b) Kuvvet ve sehim ölçümü ((a) Schematic of a cantilever plane-bending fatigue testing machine (b) Measurement of force and deflection)

ve numune tarafına yerleştirilen 0.01 hassasiyetli komparatör ile ölçülmüştür. Yorulma numunesinin haddeleme yönleri ve boyutları Şekil 2’de diğer test parametreleri ise Tablo 3’de verilmiştir. Yorulma testlerine başlamadan önce, belirlenen her sehim (genlik) değerlerine karşılık uygulanması gereken maksimum kuvvetin tespiti için Şekil 1b’de gösterilen kuvvet-sehim testleri yapılmıştır. Bu testlerde 500 kg kapasiteli SS300-S tipi loadcell ve kalibrasyon hassasiyeti 50 gr olan FS-800 tipi dijital indikatör kullanılmıştır. Yükleme anındaki sehimi ölçmek için ise yine 0.01 mm hassasiyetindeki komparatör kullanılmıştır. Belirlenen her sehim değerine karşılık HYP ve HYD numuneler için loadcell ile ölçülen ortalama kuvvet değerleri ihmal edilecek kadar birbirine yakındır.

Bu çalışmada farklı sehim miktarları kullanılarak sehim-kontrollü yorulma testi yapılmıştır. Bu testi karakterize etmek için gerilme oranına benzer ($R = \sigma_{\min}/\sigma_{\max}$) olan sehim (eğilme miktarı) oranı $R_d = U_{\min}/U_{\max}$ tanımlanmıştır. Burada, U_{\min} minimum sehim (negatif değerde), U_{\max} ise maksimum sehim miktarıdır. Bu değerler birbirine mutlak olarak eşittir ve $R_d = -1$ olarak tanımlanır. Ortalama gerilme ise sıfırdır.

Yorulma testi başlangıcında numuneye uygulanacak maksimum sehim değerinin hesaplanması gerek-

mektedir. Numunelerin 120 MPa’lık maksimum akma gerilmesi test başlangıç değeri olarak alınmıştır. Denklem (1)’den önce uygulanacak en büyük kuvvet 28.13 N olarak, sonra Denklem (2)’den her iki grup (HYP ve HYD) numune için ortalama 10 mm’lik başlangıç sehim değeri hesaplanmıştır.

$$S = \sigma = \frac{6FL}{BH^2} \quad (1)$$

Ankastre tipi yükleme durumunda kullanılan bu denklemde [15,16,17];

S : Gerilme genliği (MPa)

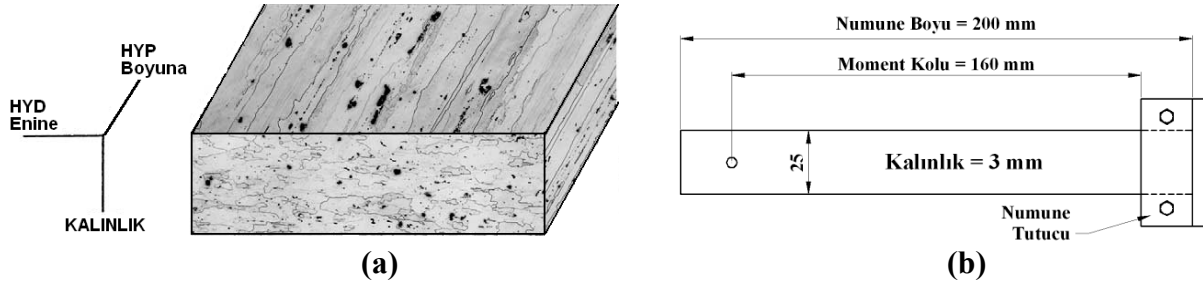
F : Eğme kuvveti (N)

L : Moment kolu (mm) (160 mm)

B : Numune genişliği (mm)

H : Numune kalınlığı (mm)

Elde edilen başlangıç sehim değerinden sırasıyla %20 oranlarında azaltılarak Tablo 4’deki on farklı sehim değeri bulunmuştur. Bulunan bu değerler önce Denklem (2)’deki yerine konularak eğme kuvvetleri hesaplanmıştır. Bu teorik kuvvet hesabı ile Şekil 1b’de bahsedildiği gibi deneysel olarak ölçülen kuvvet değerleri birbirlerine ihmal edilecek derecede yakındır.



Şekil 2. (a) Numunelerin haddeleme yönü ve şematik mikro yapısı (b) Yorulma numunesi boyutları ((a) Specimen orientation and micro structure (b) Specimen dimensions for fatigue test)

Tablo 3. Test parametreleri (Test parameters)

Test frekansı	:	70 Hz
Sıcaklık	:	Oda sıcaklığı
Kontrol	:	Sehim kontrollü (deflection-controlled)
Şekil değiştirme oranı	:	$R_d = -1$ (tam değişken)
Maksimum çevrim	:	10 milyon
Numune hazırlama yönü	:	Haddeleme yönüne paralel (HYP) ve dik (HYD)

Tablo 4. Alüminyum numunelerin S-N verileri (S-N data for aluminum specimens)

Sehim (f) (mm)	Maks. Eğme Kuvveti (F) (Newton)	Maks. Gerilme genliği (S) (MPa)	Kırılma çevrim sayısı (ort.), (N_f)	
			HYP	HYD
10.00	28.13	120.00	1083	668
8.00	22.70	96.85	1515	1200
6.40	18.16	77.48	1652	1762
5.12	14.53	61.99	4016	3701
4.00	11.35	48.42	7227	8134
3.20	9.08	38.74	63964	16298
2.56	7.09	30.25	105569	30773
2.00	5.68	24.23	546672	108576
1.60	4.54	19.37	1969457	1742086
1.30	3.69	15.74	11127328	9115186

Hem teorik hem deneysel hesaplanan ortalama kuvvet değerleri Tablo 4’de verilmiştir. Daha sonra Denklem (1) kullanılarak S-N eğrisini oluşturacak gerilme genliği değerleri (S) hesaplanmıştır.

$$f = \frac{FL^3}{3EI} \quad (2)$$

Bu formülde,

f : Sehim (mm)
E : Elastiklik modülü (MPa)
I : Atalet momenti (mm⁴)

Şekil 3’de verilen S-N eğrilerini elde edebilmek için Tablo 4’de verilen her bir sehim değeri için 5 adet (HYP ve HYD doğrultular için 50’şer adet) olmak üzere toplam 100 numune kırılmıştır. Deney verilerinin istatistiksel değerlendirilmesinde iki parametrelili Weibull dağılımı, S-N eğrilerinin elde edilmesinde ise regresyon analizi kullanılmıştır.

3. TEST SONUÇLARI VE TARTIŞMA (TEST RESULTS AND DISCUSSIONS)

3.1. S-N Eğrileri (S-N Curves)

Her sehim değeri için gerilme ve ortalama kırılma çevrimleri Tablo 4’de, elde edilen S-N eğrileri ise

Şekil 3’de kıyaslamalı olarak verilmiştir.

Kırılma çevriminin 10⁴ yük tekrar sayısından büyük olan yüksek çevrimli bölgede yorulma eğrilerini karakterize etmek için denklem (3) de verilen basitleştirilmiş Basquin üstel fonksiyonu kullanılmış ve elde edilen fonksiyon parametreleri ise Tablo 5’de verilmiştir.

$$S = a (N_f)^{-b} \quad (3)$$

Bu fonksiyonda ;

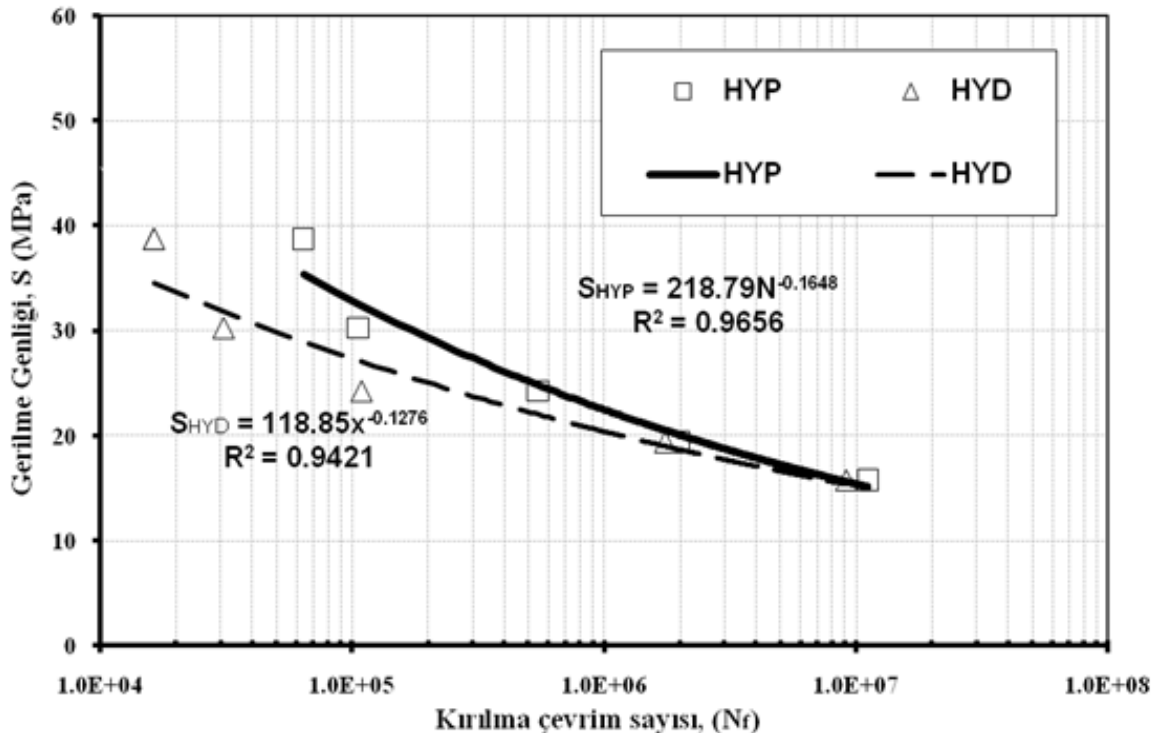
S : Gerilme genliği veya yorulma mukavemeti
N_f : Kırılma çevrim sayısı (yük tekrar sayısı)
a ve b : Malzeme sabitleridir (Tablo 5’de HYP ve HYD için verilmiştir)

Tablo 6’de ise kritik kırılma çevrim (yük tekrar) sayılarına karşılık gelen bazı yorulma mukavemet değerleri denklem (3)’de verilen fonksiyon yardımıyla hesaplanmıştır.

Dikdörtgen kesitli 1100-H14 alüminyum numunelerin farklı çevrimlerdeki çekme mukavemetleri (S_u) ile numune yönüne bağlı yorulma mukavemetleri (S_{HYP} ve S_{HYD}) arasındaki ilişkiyi gösteren ampirik formüller çıkarılmış ve Tablo 7’de sunulmuştur.

Tablo 5. S-N eğrileri için Basquin fonksiyonu parametreleri (Parameters of the Basquin Function)

Numune Yönü	a	b	R ²
HYP	218.79	-0.1648	0.9656
HYD	118.85	-0.1276	0.9421



Şekil 3. HYP ve HYD yönler için S-N eğrileri (S-N curves for RLD and RTD orientations)

Tablo 6. Bazı çevrim değerlerine karşılık yorulma mukavemetleri, MPa (Fatigue strength, MPa)

Numune Yönü	Kırılma çevrim sayıları (N_f)			
	10^4	10^5	10^6	10^7
HYP	48	33	22	15
HYD	37	27	20	15
Azalma (değişim) oranı	%30	%20	%10	yok

Tablo 7. Bazı çevrim değerlerine karşılık çekme ve yorulma mukavemetleri arasındaki ilişki (The relationship between tensile and fatigue strength correspond to some cycles)

Numune Yönü	Kırılma çevrim sayıları (N_f)			
	10^4	10^5	10^6	10^7
HYP	$S_{HYP}=0.38S_u$	$S_{HYP}=0.26S_u$	$S_{HYP}=0.18S_u$	$S_{HYP}=0.12S_u$
HYD	$S_{HYD}=0.30S_u$	$S_{HYD}=0.22S_u$	$S_{HYD}=0.16S_u$	$S_{HYD}=0.12S_u$

3.2. Kırılma Bölgesinin ve Yüzeyinin İncelenmesi (The Observation of Fracture Zone and Surface)

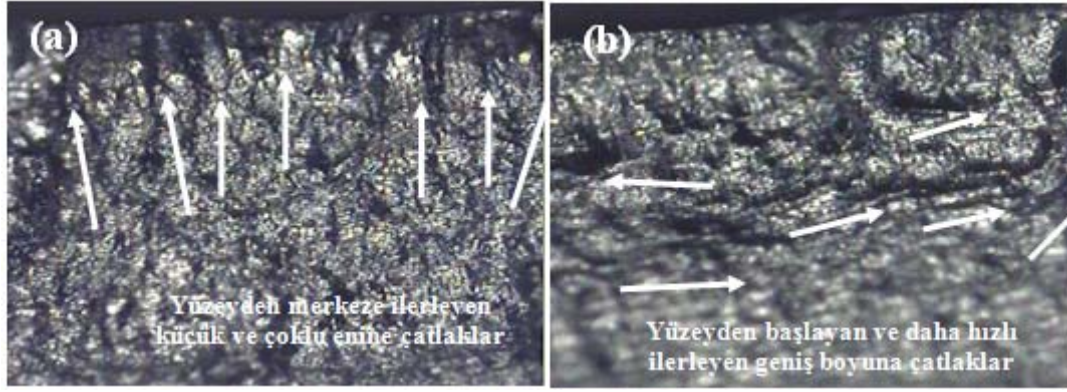
Uygulanan zıt yönlü eğme (çeki-bası) kuvvetlerinin yönüne bağlı olarak yüzeyden merkeze doğru yorulma bölgelerinin, kesit merkezine yakın kısımlarda ise ani kopma (zoraki kırılma) bölgesinin oluştuğu görülmüştür (Şekil 4). Ani kırılma her zaman tam orta şerit bölgede olmuştur. Bu durum şekil değiştirme oranının $R=-1$ (tam değişken) eğme yorulması olduğunun önemli bir göstergesidir.

Şekil 5’de HYD yönde test edilen bir alüminyum numunenin kırılma sonucu yüzey görüntüsü görülmektedir. Boyuna oluşan uzun ve derin makro çatlaklar göz ile rahatlıkla görülebilmektedir. Şekil 5 ve Şekil 6’da verilen numunelerin kırılma yüzeylerindeki çatlaklar incelendiğinde; çatlakların kırılan yüzeyin her iki tarafında da birden fazla noktadan başladığı ve enine çatlakların yüzeye dik, boyuna çatlakların yüzeye paralel ilerlediği görülmektedir. Çatlak oluşumuna (çekirdeklenme) müsait bölgelerdeki yerel gerilmeler arttıkça çatlakların başladığı nokta sayısı da artmıştır (Şekil 6). Kırılma yüzeyinde birden fazla

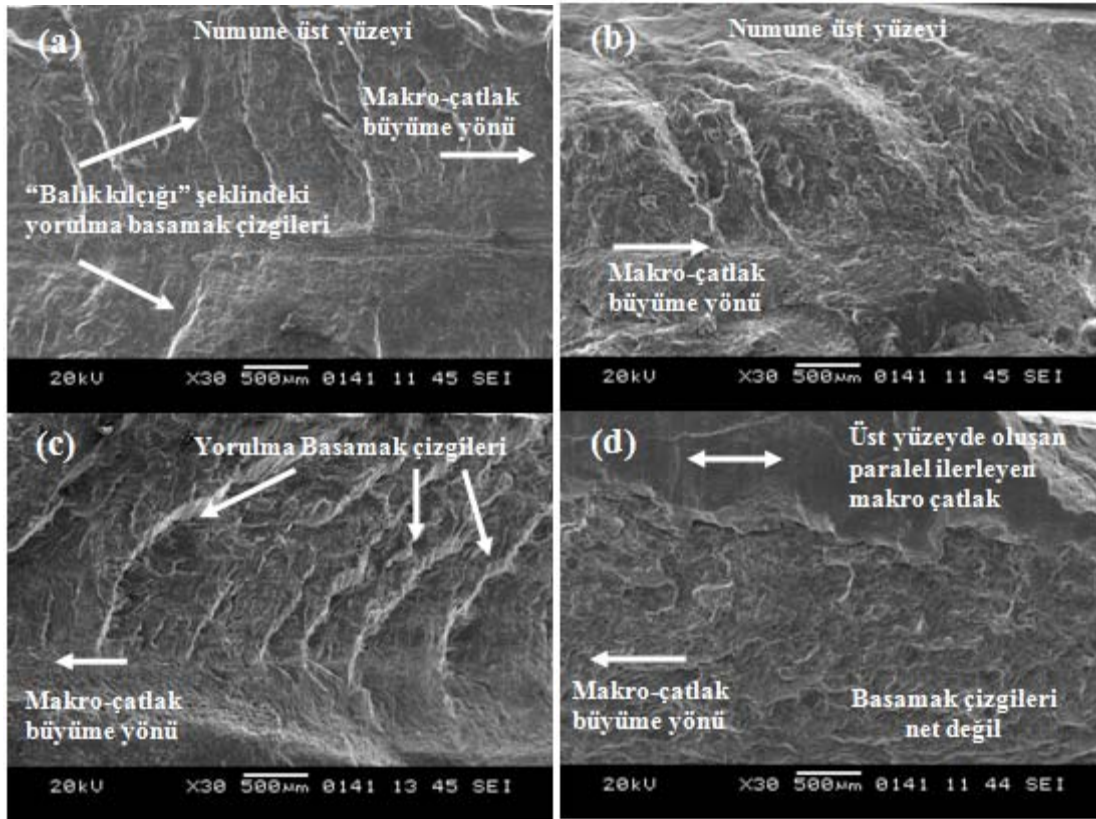
orijinden başlayan çatlaklar daha sonra birleşerek tek bir çatlak cephesi oluşturmuşlardır. Şekil 7 ve Şekil 8’de görüldüğü gibi bu çatlaklar birleşmeden önce farklı düzlemlerde ilerlediklerinden, birbirlerinden basamak çizgileri ile ayrılmaktadır [15,21]. Ancak sehim değeri azalıp yüksek çevrimlere ulaştıkça basamak çizgileri küçülmüş ve net görünemez hale gelmiştir (Şekil 7c-d, Şekil 8c-d). Şekil 5 ve Şekil 7d’den de görüldüğü gibi, HYD numunelerde çatlak taneler arasından daha kolay ilerlemiştir. Küçük çatlaklar yerine büyük bir çatlak taneler arasından boyuna ilerleyerek hasara neden olmuştur. HYP numunelerde daha küçük ama daha çok çatlak görülmüş ve bu küçük çatlakların enine ilerlemesi sonucu hasar meydana gelmiştir.

Şekil 6’da görüldüğü gibi en büyük sehim değerinde (10mm) test edilen numunelerin yüzeyleri incelendiğinde; HYP numunelerde yüzeyden merkeze ilerleyen çok sayıda enine çatlak görülmektedir. Bu durum HYP numunelerin yorulma sonucu kırılabilmesi için çok sayıda yüzeyden merkeze ilerleyen çatlak oluşması gerektiği anlamına gelebilir (Şekil 6a). HYD numunelerde ise Şekil 5 ve Şekil 6b’de görüldüğü

**Şekil 4.** Kalınlık yönündeki (kesit) kırılma yüzeyinin optik görüntüsü (büyütme=50X) (In thickness direction (cross-section) of the optical image of the fracture surface (magnification=50X))**Şekil 5.** HYD numune üst yüzeyinde boyuna ilerleyen makro-çatlaklar (büyütme=50X) (The macro-cracks growing longitudinal on the upper surface of the RTD sample (magnification=50X))



Şekil 6. (a) HYP numunede üst yüzeyinden başlayan ve esas gerilme yönünde ilerleyen makro çatlaklar (b) HYD numunede üst yüzeyinden başlayan ve boyuna (paralel) yönde ilerleyen makro çatlaklar (sehim=10mm, büyütme=100X) ((a) The macro-cracks starting from the upper surface of the RLD sample and growing in the direction of main stress (b) The macro-cracks starting from the upper surface of the RTD sample and growing in the longitudinal (parallel) direction (deflection=10mm, magnifications=100X)

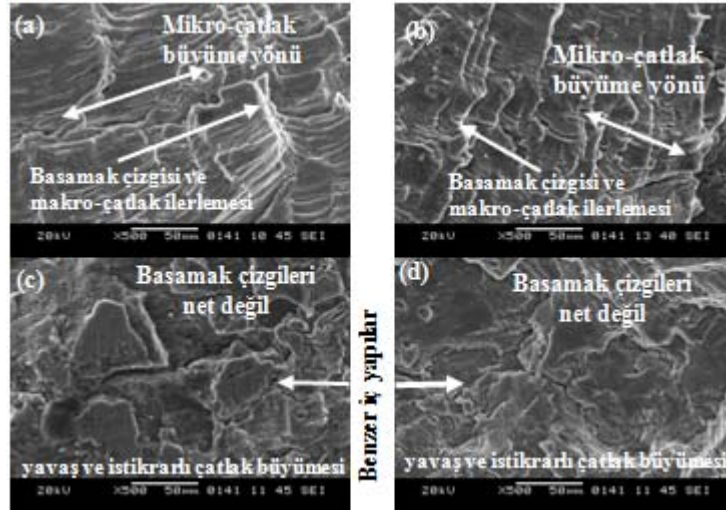


Şekil 7. Kırılma yüzeylerinin SEM görüntüsü (a) HYP numune, kırılma=27171 çevrim (b) HYP numune, kırılma=7261948 çevrim (c) HYD numune, kırılma=34668 çevrim (d) HYD numune, kırılma=5038254 çevrim (SEM image of fracture surface (a) RLD sample, fracture=27171 cycles (b) RLD sample, fracture=7261948 cycles (c) RTD sample, fracture=34668 cycles (d) RTD sample, fracture=5038254 cycles)

gibi genelde, yine yüzeyden başlayan kritik birkaç çatlak ve bunların birleşimi sonucu oluşan ve daha hızlı ilerleyen makro boyutta çatlaklar sonucu kırılmaktadır. Sehim değeri küçülüp çevrim arttıkça numunelerde yüzeyel enine çatlaklar daha da küçülmektedir. YÇY bölgesinde (sehim=1.3mm) ise, HYP numunelerde enine HYD numunelerde boyuna çatlaklar çok net ayırt edilememektedir. Şekil 4 ve Şekil 7a'daki gibi plakaların yorulma kırılması yüzeylerinde görülen "balık kılıcı" (<<) şeklindeki basa-

mak çizgileri yorulma çatlaklarının eğik düzlemlerde de ilerleyebildiğinin göstergesidir [21,22].

Şekil 8a ve 8b'de görüldüğü gibi "balık kılıcı" işaretleri arasında yüzlerce "ince yorulma çizgileri" vardır. Ayrıca bu ince yorulma çizgilerinde çok sayıda ince çatlak veya yırtılmalar gözlenmiştir. Şekil 8c ve 8d'de ise YÇY bölgesindeki numunelerin SEM görüntüsü görülmektedir. Bu bölgede yorulma çizgileri daha da incelişmiş ve sıklaşmıştır. Farklı tekstür (HYP ve HYD) yapısına sahip numunelerin YÇY testlerinde



Şekil 8. Kırılma yüzeylerinin SEM görüntüsü (a) HYP numune, kırılma=27171 çevrim (b) HYD numune, kırılma=34668 çevrim (c) HYP numune, kırılma=7261948 çevrim (d) HYD numune, kırılma=5038254 çevrim (SEM image of fracture surface (a) RLD sample, fracture=27171 cycles (b) RTD sample, fracture=34668 cycles (c) RLD sample, fracture=7261948 cycles (d) RTD sample, fracture=5038254 cycles)

yorulma çizgilerinin azaldığı ve mikro-yapının benzer olduğu görülmektedir. Bu nedenle 10^7 değerine yakın yüksek çevrimlerde yavaş ve istikrarlı çatlak büyümesi vardır. Bu durum, YÇY bölgesinde haddeleme yönünün yorulma mukavemetine etkisinin ihmal edilecek kadar az olduğunu gösteren kanıtlardan biridir.

3.3. Yorulma Mukavemetini Etkileyen Faktörler (Factors Affecting Fatigue Strength)

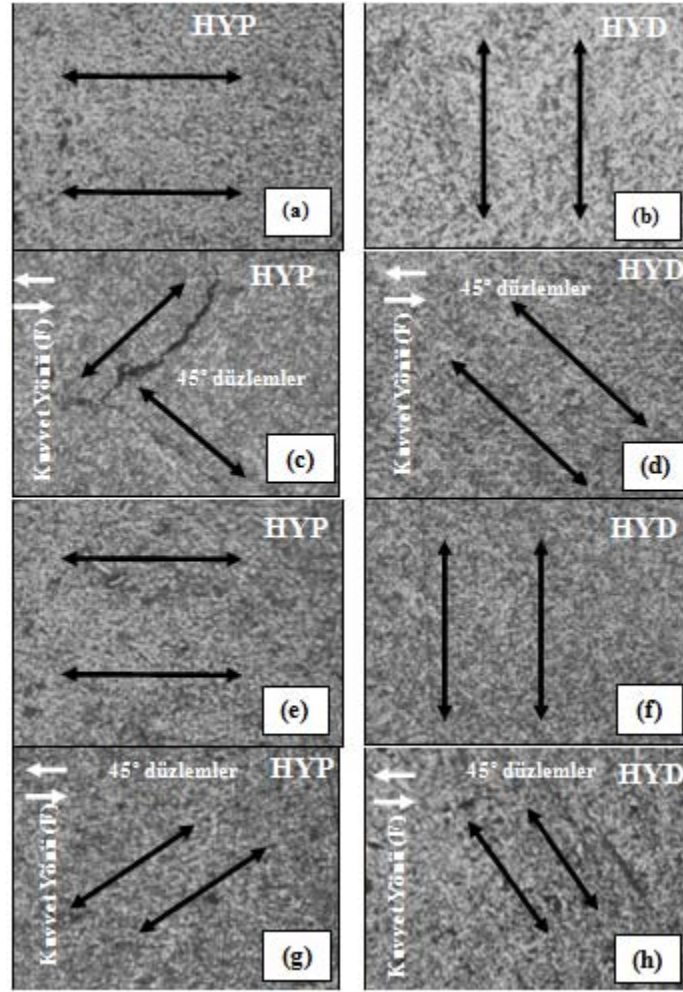
Yorulma mukavemeti; test frekansı, numune ölçüsü (boyut etkisi), numune geometrisi (geometrik etki), test yöntemi, numunenin mikro yapısı ve tane boyutu gibi birçok faktörden etkilenir. Bu etkilerin detayları ve bazı ticari alüminyumların mekanik özellikleri literatür [3,19,20,23,24,25]'de verilmiştir.

3.3.1. Mikro-yapı ve tane boyutunun etkisi (The effect of micro-structure and grain size)

Haddeleme veya ekstrüzyon gibi işlem görmüş alaşımlar tekrarlı yüklemelere maruz kalırsa yorulma bölgesinde plastik deformasyon bölgeleri oluşur. Plastik deformasyon, numunenin bu bölgedeki tane büyüklüğü, tane yapısı, tane yönelmesi/yönlenmesi, tane dağılımı ve tane morfolojisine bağlıdır [26]. Çatlaklar öncelikli olarak tane sınırlarında başlar. Taneler arasında bölgede ise yüzey kırıklarının olduğu görülür. Malzemelere yapılan haddeleme veya ekstrüzyon uygulamalarının sonucunda mikro yapıdaki iri tanelerin varlığı ve tane sınırı özellikleri taneler arası kırılmayı hızlandırır [27]. Geleneksel tane yapısına sahip hacim merkezli ve yüzey merkezli metallerdeki tekrarlı yükleme veya gerilme-uzama (çekme) davranışında tane büyüklüğü çok önemli bir etki göstermez. Ancak, tane büyüklüğü alüminyum, bakır ve α -pirinç gibi yüzey merkezli metallerin yorulma ömründe az veya çok etkilidir [28]. Düşük-gerilmeli ve yüksek-çevrimli yorulma (YÇY) bölge-

sinde tane boyutunun yorulma ömrü üzerinde büyük etkisi vardır [29]. Özellikle alüminyum alaşımlarında tane boyutu ve tane yönelmesi yorulma ömrüne karar vermede çok önemli bir rol oynar. Alüminyum dışında varolan diğer bileşenlerin tane sınırlarında dizilmesi ile birlikte uzamış tanelerin varlığı yorulma ömrünü etkiler. Gerilme seviyesinin düşmesiyle iki yön (hadde yönü ve tersi) arasındaki yorulma mukavemeti farkı artabilir. Diğer bir deyişle alüminyum dışındaki diğer bileşen yoğunluğunun azalması HYP ve HYD olmak üzere her iki yönde elde edilen yorulma mukavemetini birbirine yaklaştırarak düşük gerilme seviyelerinde yorulma direncini önemli ölçüde iyileştirir [30]. Dolayısıyla ticari saf alüminyumda bu özellik çok daha belirgindir. Alüminyum ve alüminyum alaşımlarının yüksek-gerilme ve düşük-çevrimli yorulma (DÇY) bölgesinde büyük tane yapısından dolayı (YÇY bölgesine göre) daha sünek bir yapı vardır. DÇY bölgesinde, sünek yapı ve şekil değişimine karşı aşırı hassasiyetten dolayı makro boyutta kesilme (yırılma) bandı oluşur. Buna karşın YÇY bölgesinde taneler düşük gerilme altındaki tekrarlı deformasyondan dolayı şekil değiştirir ve daha sert bir yapı oluşur [31]. Dolayısıyla YÇY bölgesindeki bu yapı değişiminden dolayı, HYP ve HYD yönlerdeki yorulma sınırı birbirine çok yakındır. Numune yüksek gerilme genliğine maruz kaldığında, çatlak farklı konumlardan başlayabilir, daha sonra kesme kuvveti yönünde devam eder (Şekil 5,6). Şekil 7 ve 8'de görüldüğü gibi, eğer numune düşük gerilme genliğine maruz kalırsa, çatlak bir noktadan başlar istikrarlı devam eder [32].

Bu çalışmada, HYP ve HYD numunelerin DÇY ve YÇY bölgelerindeki kırılma mekanizmasını anlamak için, test öncesi ve test sonrası kırılma bölgelerinin mikro-fotoğrafları çekilmiş ve Şekil 9'da verilmiştir. HYP ve HYD numunelerin $\approx 10^7$ yük tekrar sayılarındaki kırılma bölgelerinin iç yapı ve porozitesi (göze-



Şekil 9. Yatay ve kalınlık yönündeki (dikey) kırılma bölgelerinin mikro-fotoğrafları, HYP için kırılma=1403949 çevrim, sehim=1.6mm, HYD için kırılma=3328553 çevrim, sehim=1.3mm, Büyütmeler=40X, (a)–(b) Dikey konum, test öncesi (c)–(d) Dikey konum, test sonrası (e)–(f) Yatay konum, test öncesi, (g)–(h) Yatay konum, test sonrası (The micro-photos of the fracture zones in the horizontal and thickness (vertical) directions, the fracture for HYP samples=1403949 cycles, deflection=1.6mm, the fracture for HYD samples=3328553 cycles, deflection=1.3mm, magnifications=40X, (a)-(b) the vertical position, test before (c)-(d) the vertical position, test after (e)-(f) the horizontal position, test before, (g)-(h) the horizontal position, test after)

nek yapısı) birbirine çok benzerdir. Şekil 9(c,d,g,h)'da görüldüğü gibi YÇY bölgesinde tane sınırları, tane boyutu, tekstür ve tane yapısı 45° düzlemlere doğru yönelmektedir. Bu sebeple, hem HDP hem de HYD doğrultularda kırılmaya yol açan çatlaklar da 45° düzlemlere doğru yönelmektedir. Bu durum, 1100-H14 alüminyumun özellikle YÇY bölgesinde HYP ve HYD yönlerindeki yorulma mukavemetinin birbiri ile aynı düzeyde olmasının bir göstergesi olabilir. Yani, YÇY bölgesinde test edilen alüminyum plakalarda oluşan kararlı deformasyon, tane yapısını ve tane sınırlarını etkileyerek her iki yönde de çok benzer kırılma mekanizması oluşmuştur. Ayrıca, yukarıda ve literatür [15,16,30]'da da bahsedildiği gibi 1100-H14 yüksek saflıkta ticari bir alüminyum olduğundan az miktarda diğer bileşenlere sahiptir. Bu durum da özellikle YÇY bölgesinde her iki yön için benzer kırılma mekanizmasının gelişmesinin bir kanıtı olabilir.

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Deneysel olarak yapılan bu çalışmada, 1100-H14 alüminyum plakaların ankastre tip düzlemsel-eğmeli yorulma davranışları ile ilgili aşağıdaki temel sonuçlara varılmıştır.

- Test sonuçlarına göre çekme ve akma değerleri haddeleme yönüne paralel kesilmiş numunelerde biraz daha yüksek elde edilmesine rağmen, genel olarak çekme özelliklerinin oda sıcaklığında haddeleme yönünden çok fazla etkilenmediği (%2) görülmüştür.
- Doğal olarak çevrim sayısı arttıkça yorulma mukavemeti azalmıştır. Ancak 1100-H14 alüminyumun $10^6 - 10^7$ arası yüksek çevrimli bölgede yorulma mukavemetinde azalma oranı $10^4 - 10^5$ çevrimler arası bölgeye göre daha fazladır (Şekil 2). Dolayısıyla, 1100-H14 alüminyumun kullanılacağı tasarımlarda bu durum göz önüne alınmalıdır.

- Ortalama 10^4 çevrim sonucu kırılan HYP ve HYD numuneler arasındaki yorulma mukavemeti farkı %30 seviyesinde iken 10^7 çevrimde ise bu fark sıfıra inmiştir .
- Testlerin oda sıcaklığında yapılması nedeniyle mikro-yapı ve tane boyutunun fazla etkilenmesinden, 1100-H14 yüksek saflıkta ticari bir alüminyum olup (Al>%99) az miktarda diğer bileşenlere sahip olduğundan, numunelerin her iki tekstür yönünde de iç yapı ve porozitesinin birbirine çok benzer olduğundan ve YÇY bölgesinde oluşan kararlı deformasyon, tane yapısını ve tane sınırlarını etkileyerek her iki yönde de çok benzer kırılma mekanizması oluşturmasından dolayı YÇY bölgesinde haddeleme yönünün yorulma mukavemetini etkisi hissedilmemiştir.
- Pratik uygulamalarda da tasarımcıya yol gösterebilecek olan dikdörtgen kesitli 1100-H14 alüminyum numunelerin farklı çevrimlerdeki çekme ve yorulma mukavemetleri arasındaki ilişkiyi gösteren ampirik formüller elde edilmiştir (Tablo-7).
- Test sonuçlarına göre, 1100-H14 alüminyumun yüksek çevrim ve yüksek yorulma mukavemeti gerektirmeyen yerlerde kullanılması tavsiye edilir. Yani, DÇY bölgesinde çalışması daha uygundur.
- 1100-H14 alüminyum malzeme için yorulma dayanım sınırı literatür [3,19]'da R.R Moore tipi test cihazında silindirik numune için verilen değerden farklı olduğu görülmektedir. Bu sonuç ise, yorulma sonuçlarının Bölüm 3.3'de bahsedilen faktörlerin yanında test makinesi tipi, test yöntemi, test şartları ve test parametrelerine kadar birçok faktörden de etkilendiğinin önemli bir kanıtıdır. Bu durum ise yorulma testlerinin gerçek kullanım şartlarına uygun olarak yapılmasının önemini bir kez daha göstermiştir.

SEMBOLLER (NOMENCLATURE)

HYP	: Hadde Yönüne Paralel Yön (RLD: Rolling Longitudinal Direction)
HYD	: Hadde Yönüne Dik Yön (RTD: Rolling Long-Transverse Direction)
S_{HYP}	: Haddeleme Yönüne Paralel Yorulma Mukavemeti
S_{HYD}	: Haddeleme Yönüne Dik Yorulma Mukavemeti
S_u	: Maksimum Çekme Mukavemeti
N_f	: Kırılma çevrim (yük tekrar) sayısı
R_d	: Sehim (eğilme miktarı) oranı
R	: Gerilme oranı
R^2	: Korelasyon katsayısı
U_{min}	: Minimum sehim miktarı (negatif değerde)
U_{maks}	: Maksimum sehim miktarı
S veya σ	: Maksimum gerilme genliği
a, b	: malzeme parametreleri

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma, K.K. Astsubay Meslek Yüksekokulu ve Balıkesir 1012 Ana Tamir Fabrikasının imkanları ve destekleri ile gerçekleştirilmiştir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Sadeler, R., Totik, Y., Gavgalı, M., Kaymaz, I., "Improvements of fatigue behaviour in 2014 Al alloy by solution heat treating and age-hardening", **Materials and Design**, Vol. 25, 439-445, 2004.
2. Smith, W.F., **Malzeme Bilimi ve Mühendisliği**, Çev: Kınikoğlu, N.G., Literatür Yayınları, İstanbul, 2001.
3. ASM Handbook, ASM International Handbook Committee, **Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials**, The Materials Information Company, A.B.D., Vol. 2, 2005.
4. Değer, M., "Perlitik-Ferlitik ve Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Yorulma Dayanımı Üzerine Mikro Yapı ve Yüzey İşlemlerinin Etkisi", Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 1995.
5. Sakin, R., "Bilgisayar Destekli, Çok Numuneli Eğilme Yorulması Test Cihazı Tasarımı ve Cam-Fiber Takviyeli Polyester Kompozitlerde Eğilme Yorulması davranışının incelenmesi", Doktora Tezi, Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2004.
6. Srivatsan, T.S., "Mechanisms governing cyclic deformation and failure during elevated temperature fatigue of aluminum alloy 7055", **International Journal of Fatigue**, Vol. 21, 557-569, 1999.
7. Srivatsan, T.S., Anand, S., Sriram, S., Vasudevan, V.K., "The high-cycle fatigue and fracture behavior of aluminum alloy 7055", **Materials Science and Engineering**, Vol. A281, 292-304, 2000.
8. Srivatsan, T.S., Kolar, D., Magnusen, P., "The cyclic fatigue and final fracture behavior of aluminum alloy 2524", **Materials and Design**, Vol. 23, 129-139, 2002.
9. George, T.J., Seidt, J., Shen, M.H., Nicholas, T., Cross, C.J., "Development of a novel vibration – based fatigue testing methodology", **International Journal of Fatigue**, Vol. 26, 477-486, 2004.
10. Sutherland, H.J., "On the Fatigue Analysis of Wind Turbines", Sandia National Laboratories, Albuquerque, New Mexico, A.B.D., 1999.
11. Ünal, E., "Cam Elyafli Kompozit Malzemelerin Atmosferik Ortamda ve Deniz Ortamında Yorulma Simülasyonu", Y. Lisans Tezi, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2006.
12. Mallick, P.K., "Composites Engineering Handbook", Marcel Dekker, 1997.

13. Kazdal Zeytin, H., Bilal, T., Arısoy, O., “**Alüminyum Alaşımları, Otomotiv Endüstrisinde Uygulamaları ve Geleceği**”, Tübitak Marmara Araştırma Merkezi, Proje No: 50H5602, Gebze, 2000.
14. TS EN 485-2, “**Alüminyum ve alüminyum alaşımlarının mekanik özellikleri**”, Türk Standartları Enstitüsü, 2005.
15. Er, M., “**Yüksek Frekanslı, Genlik Ayarlı Eğilme Yorulması Test Cihazı Tasarımı ve 1100-H14 Alüminyum Levhasının Eğilme Yorulması Davranışının İncelenmesi**”, Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2005.
16. Kumru, N., “**Etial-141, 145 ve 160 Tipi Döküm Alüminyum ile Plaka Tipi Alüminyum Malzemeler için Yorulma Makinesi Tasarımı ve Eğilmeli Yorulma Davranışlarının İncelenmesi**”, Doktora Tezi, Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2007.
17. Ay, İ., Sakin, R., “**Balıkesir ilinde Alüminyum’dan Üretilen Eksenel Fan Kanatlarının Kompozit (CTP) Malzemeden Yapılması ve Mekanik Özelliklerin İncelenmesi**”, Balıkesir Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi, BAP 2002/14, Balıkesir, 2006.
18. Paepegem, W.V., Degriek, J., “Experimental set-up for and numerical modeling of bending fatigue experiments on plain woven glass/epoxy composites”, **Composite Structures**, Vol. 51, No 1, 1-8, 2001.
19. ASM Handbook, ASM International Handbook Committee, Cilt 8, **Mechanical Testing and Evaluation**, the Materials Information Company, A.B.D., 2000.
20. Kayalı, E.S., Ensari, C., Dikeç, E., “**Metalik malzemelerin mekanik deneyleri**”, İ.T.Ü.Yayımları, İstanbul, 1983.
21. Eryürek, İ.B., “**Hasar analizi**”, Birsan Yayınevi, İstanbul, 75-79, 117, 1993.
22. Glancey, C. D.; Stephens, R. R. “Fatigue crack growth and life predictions under variable amplitude loading for a cast and wrought aluminum alloy” **International Journal of Fatigue**, Vol.28, 53-60, 2006.
23. E. Donnelly, D. Nelson, “A study of small crack growth in aluminum alloy 7075-T”, **International Journal of Fatigue**, Vol.24, 1175-1189, 2002.
24. T. Hassan, Z. Liu, “On the difference of fatigue strengths from rotating bending, four-point bending, and cantilever bending tests”, **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, Vol. 78, 9-30, 2001.
25. Markl ARC. “**Fatigue tests of piping components**”, Trans ASME 1952,74:287-303.
26. S. Yip (ed.), “**Handbook of Materials Modeling**”, Springer, Netherlands, 1193, 2005.
27. Berg, D.E., Klimas, P.C., “Fatigue characterization of a wavt blade material”, **Proceedings of the Eighth ASME Wind Energy Symposium**, 19-23, New Mexico, 1989.
28. Hael Mughrabi, Heinz Werner Höppel, “Cyclic deformation and fatigue properties of very fine-grained metals and alloys”, **International Journal of Fatigue**, Article in Press, Corrected Proof, 2009
29. Cemil Hakan Gür, Jiansheng Pan, “**Handbook of Thermal Process Modeling of Steels**”, Taylor & Francis Group, U.S.A, Page.173, 2009.
30. Muhammad Afzaal Malik, Iftikhar us Salam, Wali Muhammad, Noveed Ejaz, ”Effect of Microstructural Anisotropy on Mechanical Behavior of a High-Strength Al-Mg-Si Alloy”, **Journal of Failure Analysis and Prevention**, Vol. 9, No.2, 114-121, 2009.
31. Yuri Estrin, Alexei Vinogradov, “Fatigue behaviour of light alloys with ultrafine grain structure produced by severe plastic deformation: An overview”, **International Journal of Fatigue**, Vol. 32, No.6, 898-907, 2010.
32. Teng-Shih Shih, Quin-Yang Chung, “Fatigue of as-extruded 7005 aluminum alloy”, **Materials Science and Engineering A**, Vol. 348, No.1-2, 333-344, 2003.