

ALÜMİNYUM ALAŞIMLARI VE KOMPOZİTLER İÇİN YORULMA-ÖMÜR VERİLERİNİN İSTATİKSEL ANALİZİ

Raif SAKİN*, **Nurcan KUMRU****, **Muharrem ER*****, **İrfan AY******

*rsakin@balikesir.edu.tr Balıkesir Üniversitesi, Edremit Meslek Yüksekokulu Makine Böl., 10300, Edremit-Balıkesir

**nurcan.kumru@bayar.edu.tr Celal Bayar Üniversitesi, Soma Meslek Yüksekokulu, Makine Böl., 45500-Manisa

***muarrem@yaho.com K.K. Astsubay Meslek Yüksekokulu, Mekatronik Grubu, 10110, Çayırhisar-Balıkesir

****ay@balikesir.edu.tr Balıkesir Üniversitesi, Mühendislik – Mimarlık Fakültesi Makine Müh. Böl., 10145-Balıkesir

ÖZET

Bu çalışmanın amacı; alüminyum alaşımı ve cam/polyester kompozit numunelerin ankastre-tip düzlemsel eğme yorulması testlerinden elde edilen yorulma-ömür verilerini istatistiksel olarak değerlendirerek, hasar olasılığı ve güvenilirlik (ömrünü sürdürme olasılığı) analizlerinin yapılmasıdır.

Alüminyum alaşımları ve kompozitlerin yorulma test verileri genelde dağınık olduğundan, tasarımcı karar vermekte zorlanır. Bu durumda mutlaka bir istatistik analize ihtiyaç duyulmaktadır. Bu verilerin analizi için en uygun yöntemlerden biriside Weibull dağılımıdır. Bu dağılım ile yukarıda bahsedilen olasılıklar hesaplanabildiği gibi, dağınık veya yakın verilerin analizi yapılarak malzeme seçiminde tasarımcıya yardımcı olur. Ayrıca bu yöntem Microsoft Excel ortamında kolaylıkla uygulanabilmektedir.

Alüminyum oranı ortalama Al=%85.8 ve ticari ismi Etial141 (ISO AlSi12Fe) olan döküm plaka numuneler ile Al=%99.4 (ISO Al99.0Cu) ve Al=%99.6 (DIN Al99.5) olan hazır plaka numuneler hadde yönlerinde kesilerek alüminyum numuneler hazırlanmıştır. 200-300 gr/m² ağırlığındaki cam dokumalar ile 225-450-600 gr/m² ağırlığındaki cam keçeler kullanılarak, RTM (reçine enjeksiyonu) yöntemi ile 3 farklı yapıda ($V_f \approx \%44$) cam/polyester kompozit numuneler elde edilmiştir. Yorulma testleri oda sıcaklığında ve tam değişken ($R=-1$) gerilme oranı altında yapılmıştır. Testlere alüminyum numunelerde 10^7 , kompozit numuneler için ise en az 10^6 yük tekrar sayısına (çevrim) kadar devam edilmiş ve bu değerler hasar kriteri olarak alınmıştır. Yorulma-ömür analizi için iki parametrelili Weibull dağılımı kullanılmıştır.

Test verileri kullanılarak alüminyum alaşımı ve cam/polyester kompozitlerin her farklı malzeme tipi için, farklı güven seviyelerindeki S-N eğrileri oluşturulmuştur. Ayrıca çeşitli gerilme/çevrim seviyeleri için ömrünü sürdürme tahmin grafikleri elde edilmiştir. Elde edilen bu grafikler sayesinde hasar tahmini ve malzeme seçimi pratik olarak yapılabilmektedir. Genelde alüminyum ile kıyaslandığında kompozit numunelerin daha yüksek yorulma mukavemetine (ömrüne) sahip olduğu görülmüştür.

Anahtar Sözcükler : alüminyum alaşımı, cam/polyester kompozit, yorulma mukavemeti, Weibull dağılımı, güvenilirlik, yorulma-ömür tahmini

ABSTRACT

The aim of this study is evaluating fatigue-life data of aluminum alloys and glass/polyester composite samples from cantilever plane-bending fatigue tests statistically to analyze failure probability and reliability analyses.

It is difficult for designers to decide on aluminum alloys and composites, because data of aluminum alloys and composites are generally scattered. In this case statistical analysis should be required. One of the appropriate ways is Weibull distribution. This distribution helps designer to choose materials by calculation of the probabilities mentioned above or analysis of scattered or close data can be analyzed. In addition, this method can be applied into Microsoft Excel easily.

Aluminum samples were prepared from molded plate samples of aluminum alloy rate Al=85.8% and Etial141 (commercial name of ISO AlSi12Fe) and prepared plate samples Al=99.4% (ISO Al99.0Cu) and Al=99.6% (DIN Al99.5) by cutting on rolling direction. Composite samples were prepared by glass-woven, which have 200-300 gr/m² weight, and glass-mat, which have 225-450-600 gr/m² weight, using RTM (resin transfer molding) method in three different structures. Fatigue tests were conducted on fully-reversed (R=-1) tensile rate in room temperature. Test were continued up to 10⁷ cycles for aluminum samples, at least 10⁶ cycles for composite samples, and these values were taken as damage criteria. Two parameter Weibull distribution was used for fatigue-life analysis.

Using test data S-N curves was produced for every material type of aluminum alloys and glass/polyester composites and different reliability levels. Furthermore, probability of survival graphs were obtained for different stress/cycle levels. Failure probability and material selection could be easier using these obtained graphs. In general, it was seen that composite samples have higher fatigue-strength (life) than aluminum.

Keywords: aluminum alloy, glass/polyester composite, fatigue strength, Weibull distribution, reliability, fatigue-life prediction.

1. GİRİŞ

Alüminyum alaşımları ve kompozit malzemeler hafif olmaları ve mukavemet/yoğunluk oranlarının yüksek olması sebebiyle başta havacılık sektörü olmak üzere bir çok alanda kullanılmaktadır. Alüminyum ve kompozit gibi malzemelerin mekanik test sonuçlarındaki dağılımların farklı olması sebebiyle mekanik özelliklerine karar vermede istatistiksel yöntem kullanmak çok önemlidir. Bilindiği gibi malzemelerin yorulma dayanım sınırını belirlemede kullanılan S-N eğrileri, birçok gerilme seviyesine (S) karşılık numune kırılıncaya kadar sayılan yük-tekrar sayısı (kırılma çevrimi, N) verileri yardımıyla elde edilir. Bu eğrilere Wöhler eğrileri veya yorulma-ömür diyagramları adı verilir. Homojen olmayan bütün malzemelerde olduğu gibi, anizotrop yapıya sahip cam/polyester kompozitlerin (CTP=GFRP) yorulma ömür verilerinde farklılıklar görülmektedir. Benzer şekilde, alüminyum alaşımlarına uygulanan ve genellikle 10⁶ yük-tekrar (çevrim) sayısının üzerindeki yüksek çevrimlere (HCF) kadar devam eden testlerin verilerinde de saçılma yüksek olabilir. Geçmişte büyük emniyet katsayıları kullanıldığından sonuçlardaki bu dağılım nispeten önemsizdi. Ancak havacılık ve hava taşıtlarının gelişmesiyle mekanik özelliklerdeki bu değişkenliğin yarattığı sorunlar daha çok önem kazanmaya başladı.

Çünkü dinamik yük altında çalışan elemanların yorulma süresini (yapıda ani gevrek kırılma meydana gelmeden) yüksek doğrulukta hesaplamak çok önemlidir. Özellikle yorulma verilerinin çok geniş bir saçılma göstermesinden dolayı bu malzemeler için güvenilirlik analizlerinin yapılması zorunlu bir ihtiyaç haline gelmiştir. Bu nedenle hem alüminyum hem de kompozit malzemelerin konstrüksiyonlardaki emniyetli uygulamaları için, yorulma verilerinin istatistiksel olarak iyi anlaşılması gerekir. Kullanılan istatistiksel yöntemler, genelde ortalama mukavemetin bulunduğu normal dağılıma bağlıdır. Ancak özellikle yorulma verilerinin değerlendirilmesinde, Weibull dağılımı diğer dağılımlara göre ömür ve mukavemet parametrelerindeki değişim açısından daha gerçekçi değerler sunmaktadır [1-3]. Dolayısıyla alüminyum ve kompozit yapılardaki yorulma verilerinin güvenilirliğinin değerlendirilmesinde Weibull dağılımının daha faydalı olacağı literatürde kanıtlanmıştır [2-7].

Bu çalışmanın amacı; alüminyum alaşımı ve cam/polyester kompozit numunelerin ankastre-tip düzlemsel eğme yorulması testlerinden elde edilen yorulma-ömür verilerini istatistiksel olarak değerlendirerek, hasar olasılığı ve ömrünü sürdürme (sağ-kalım=güvenirlik) olasılığı gibi analizlerinin yapılmasıdır. Ayrıca, bu malzemelerin %99 gibi yüksek güvenilirlik seviyelerindeki yorulma ömürleri ve garanti sürelerinin hesaplanmasına yardımcı olacak S-N eğrilerini elde etmektir. Bu çalışmada yorulma ömür sonuçlarının istatistiksel analizi için iki parametrelili Weibull dağılımı kullanılmıştır.

2. MATERYAL VE METOT

2.1. Alüminyum Alaşımı Plaka Numuneler

Bu çalışmada kimyasal içeriklerinin özeti ve standart gösterimleri Tablo-1’de verilen külçe döküm alüminyum alaşımı plaka ile iki tip hadde ürünü hazır alüminyum plaka kullanılmıştır. Tablo-4’de alüminyum numunelerin boyutları, Tablo-5’de ise bütün alüminyum ve kompozit numunelerin mekanik özellikleri verilmiştir [8-10].

Tablo-1. Alüminyum plakaların kimyasal bileşim özeti (%ağırlık) ve standart gösterimi

Kimyasal Bileşim	Numune Grubu ve Standart Gösterimler		
	AL[1]	AL[2]	AL[3]
	Etial-141 (ISO AlSi12Fe)	AA1100-H14 (ISO Al99.0Cu)	AA1050-H14 (DIN Al99.5)
Al	85.80	99.40	99.60
Fe	1.000	0.494	0.196
Si	12.00	0.098	0.065

2.2. Cam/Polyester Kompozit Plaka Numuneler

Bu çalışmada cam/polyester kompozit plakaların imalatı için Tablo-2’de özellikleri ve diğer yardımcı maddeleri verilen genel amaçlı polyester reçinesi ile cam-dokuma ve cam-keçe fiberler kullanılmıştır. Tablo-3’de üç farklı grup olarak imal edilen cam-dokuma ve cam-keçelerin kalıp içindeki katman sayısı verilmiştir. Cam-fiber hacmi yaklaşık %44 olan kompozit plakalar reçine enjeksiyon metodu (RTM) ile imal edilmiştir. Daha önceden kesilerek hazırlanan cam fiberler bir kat cam-keçe bir kat cam-dokuma olacak şekilde kalıp boşluğuna yerleştirilmiştir. Polyester reçinesi, stren ilavesiyle RTM’ye uygun viskoziteye getirilmiştir. Sonra hazırlanan bu karışım ısıtılmalı kalıp içine yaklaşık 0.5–1 atm’lik basınç ile enjekte edilmiştir. Levhalar 40°C sıcaklık altında 12 saat tutulduktan sonra kalıp açılmış ve kalıp içinden 320x600x3mm boyutlarında levha çıkartılmıştır. Bu

levhalardan Tablo-4’de verilen boyutlarda yorulma test numuneleri kesilmiştir Elde edilen cam/polyester plakaların yoğunluğu (ρ) 1.716 gr/cm³ olarak hesaplanmıştır [11-13].

Tablo-2. Cam/polyester plakaların özellikleri

Matris	Ortoftalik polyester reçinesi ¹ Polipol™ 351, $\rho=1.128$ gr/cm ³
Monomer	Stren ¹ , $\rho=0.95$ gr/cm ³
Karışım Matris	Polyester (%85)+Stren (%15) $\rho=1.1$ gr/cm ³
Katalizör	%1’lik Kobalt ¹
Sertleştirici	MEKP ¹
Takviye	Cam-Dokumalar ^{2,3}
Fiberler	$\rho=2.5$ g/cm ³ , birim ağırlık=300, 200 gr/m ² Cam-Keçeler ^{1,3} $\rho=2.5$ g/cm ³ , birim ağırlık=225, 450, 600 gr/m ²

¹(Poliya A.Ş.) ²(Cam Elyaf A.Ş.) ³(Fibroteks A.Ş.)

Tablo-3. Kompozit numune grupları ve yapıları ($V_f = \%44$)

Grup	Fiber Yönü	Cam-Dokuma		Cam-Keçe		
		Birim		Ağırlıklar (gr/m ²)		
		300	200	225	450	600
G [300]	0/90°	5 ¹	--	4	2	--
H [200]	0/90°	--	7	8	--	--
K [Keçe]	Karışık	--	--	--	6	1

¹Numune içindeki katman (layer) sayısını göstermektedir

Tablo-4. Alüminyum ve kompozit plakaların numune boyutları

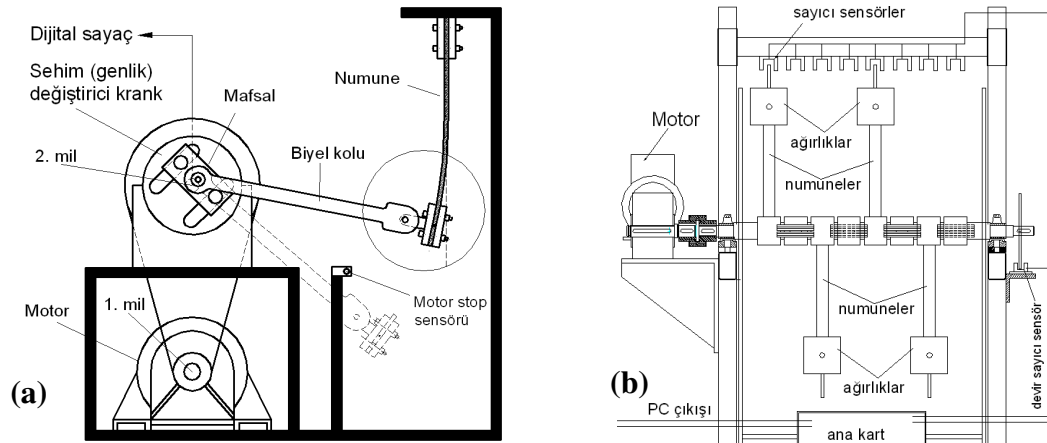
Numune Grubu	Genişlik B (mm)	Kalınlık H (mm)	Numune Boyu L ₁ (mm)	Moment Kolu L (mm)
AL[1] / G[300]	25 / 25	5 / 3	200 / 250	160 / 190
AL[2] / H[200]	25 / 25	3 / 3	200 / 250	160 / 190
AL[3] / K[Keçe]	25 / 25	3 / 3	200 / 250	160 / 190

Tablo-5. Alüminyum ve kompozit plakaların mekanik özellikleri

Numune Grupları	Çekme Dayanımı σ_{tu} - (MPa)	Akma Dayanımı σ_{ty} - (MPa)	Elastisite Modülü E_c - (MPa)	Eğilme Dayanımı σ_{fu} - (MPa)	Eğilme Modülü E_e - (MPa)
AL[1]	122	98	70000	98	45000
AL[2]	126	120	68900	120	60000
AL[3]	117	108	68900	103	54000
G[300]	327	257	16585	348	15611
H[200]	322	266	15520	312	17823
K[Keçe]	257	210	14180	296	14077

2.3. Ankastre-Tip Eğilmeli Yorulma Testleri

Yorulma testlerinden önce hem alüminyum hem de kompozit levhalardan sırasıyla ISO 7438:2005(E) ve ASTM 790-00’a göre statik üç noktadan eğilme testleri yapılarak maksimum eğilme mukavemeti değerleri elde edilmiştir. Bu değerler S-N eğrilerindeki başlangıç gerilme seviyelerini belirlemede yardımcı olmuştur [1,8-13]. Bütün testler oda sıcaklığında yapılmış ve kullanılan gerilme oranı (tam değişken) $R=-1$ ’dir. Her bir gerilme seviyesi için ortalama beşer adet numune kırılmıştır. Diğer test parametreleri Tablo-6’da, alüminyum ve kompozit plakalar için kullanılan test cihazlarının şematik resmi ise Şekil-2’de gösterilmiştir.



Şekil-2. a) Alüminyum ve b) kompozit plakalar için ankastre-tip eğilmeli yorulma test cihazları

Alüminyum plakalar Şekil-1(a)'da görülen tek numuneli ve sehim kontrollü, cam/polyester plakalar ise Şekil-2(b)'de görülen çok numuneli (16) ve gerilme kontrollü olarak tasarlanmış ve tarafımızdan geliştirilen yorulma makinelerinde test edilmişlerdir [1,9-10,12-13]. Testlere alüminyum numuneler için 10^7 , cam/polyester numuneler için ise 10^6 yük-tekrar sayısına kadar devam edilmiştir [1,12-13]. Cam/polyester numunelerde test esnasında numune yatay pozisyondayken (0-180°) maksimum gerilme oluşmaktadır. Dönüş esnasında 0°'de üst lifler çekiye zorlanırken alt lifler basıya zorlanmaktayken 180°'de ise durum tam terstir [1,12-14].

Tablo-6. Test parametreleri

	AL[1]	AL[2]	AL[3]	G[300]	H[200]	K[Keçe]
Test frekansı (Hz)	50	70	50	0.5	0.5	0.5
Numune hazırlama doğrultusu	---	Hadde yönünde	Hadde yönünde	0/90°	0/90°	karışık
Gerilme seviyesi sayısı (S-N eğrisi için)	10	10	10	7	8	8
Toplam kırılan numune sayısı	50	50	50	35	40	40

2.4. Yorulma Ömür Verilerinin İstatiksel Analizi

2.4.1. Weibull Dağılımının Teorisi

Weibull dağılımının, iki ve üç parametrelilik üzere iki popüler formu vardır. İki parametrelilik Weibull dağılımının olasılık yoğunluk fonksiyonu (probability density function=PDF) aşağıdaki denklem (1)'de verilmiştir. Bu PDF denklemini ise iki parametrelilik Weibull dağılımının en genel tanımıdır [1-2,15-16]

$$f(x) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{x}{\alpha}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{x}{\alpha}\right)^{\beta}} \quad \alpha \geq 0, \beta \geq 0 \quad (1)$$

Burada, (α) ve (β) sırasıyla skala ve şekil parametresidir. İki parametrelilik Weibull dağılımının birçok avantajı vardır [1-2].

- Basit bir fonksiyonla açıklanabilir ve kolay uygulanır.
- Kompozit ve alüminyumun yorulma ömrünün değerlendirilmesinde sıkça kullanılır.
- Basit hesaplama yöntemleri ve grafikleri mevcut olduğundan kullanımı kolaydır.
- Weibull ihtimal eğrisinin eğimi esas alındığında, hata ile ilgili fiziksel bazda ipuçları verir.

Eğer PDF denklemini entegre edilirse “kümülatif yoğunluk fonksiyonu (CDF)” olan denklem (2) elde edilir. Denklem (2) den de denklem (3) yazılır.

$$F_f(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x}{\alpha}\right)^{\beta}} \quad (2)$$

$$1 - F_f(x) = e^{-\left(\frac{x}{\alpha}\right)^{\beta}} \quad (3)$$

$$F_s(x) = 1 - F_f(x) \quad (4)$$

$$R_x = 1 - P_x \quad (5)$$

Yukarıdaki denklemlerde ;

- x : Değişken (genellikle ömür). Bu çalışmada kırılma çevrimi (N_f)
 β : Şekil parametresi veya Weibull doğrusunun eğimi
 α : Ölçek (skala) parametresi veya karakteristik ömür.
 $F_f(x)$: Kırılma olasılığı (P_x)
 $F_s(x)$: Ömrünü sürdürme (sağ kalım) olasılığı veya Güvenirlilik (R_x)

Denklem (3)'ün her iki tarafının matematiksel olarak doğal logaritması alınırsa, aşağıdaki denklem (6) yazılır.

$$\ln\left(\ln\left(\frac{1}{1-F_f(x)}\right)\right) = \beta \ln(x) - \beta \ln \alpha \quad (6)$$

Bu denklem doğrusal bir çizgi denklemi olarak yeniden düzenlenirse. Burada ;

$Y = \ln(\ln(1/(1 - F_f(x))))$, $X = \ln(x)$, $m = \beta$ ve $c = -\beta(\ln(\alpha))$ şeklinde yazılabilir ve bir doğru denklemi olan denklem (7) elde edilir .

$$Y = mX + c \quad (7)$$

$$\alpha = e^{(-c/\beta)} \quad (8)$$

Denklem (2)'de $x = \alpha$ olduğunda

$$F_f(x) = 1 - e^{-(1)^\beta} = 1 - 0.368 = 0.632$$

$$F_f(x) = P_x = \%63.2 \text{ bulunur.}$$

Buna göre; karakteristik ömür (α), kümeyi meydana getiren elemanların %63.2'sinin işe yaramaz hale geldiği ömürdür. Yorulma için tasarımı yapılan kritik parçaların (rulman, kanat, vs.) ömrü, P_{10} , P_1 , $P_{0.1}$ gibi düşük hasar ihtimalleri için ifade edilmelidir [1]. Bu çalışmada Şekil-6'da görüldüğü gibi P_1 , P_{50} , $P_{63.2}$, P_{90} (veya R_{99} , R_{50} , $R_{36.8}$, R_{10}) değerleri için S-N eğrileri çizilmiş ve tasarımcılara yol gösterilmiştir. N_{P_x} veya N_{R_x} ise, %X hasar ihtimaline karşılık gelen ömür değeridir ve denklem (9)'dan hesaplanabilir. Denklem (10)'da (α) ve (β) değerleri yerine konularak %50 ömür (medyan) değeri hesaplanabilir.

$$N_{P_x} = N_{R_x} = \alpha \cdot ((-\ln(R_x))^{1/\beta}) \quad (9)$$

$$N_{P_{50}} = N_{R_{50}} = \alpha \cdot ((\ln 2)^{1/\beta}) \quad (10)$$

İki parametrelili Weibull dağılımında kullanılan ortalama ömür veya ortalama kırılma zamanı ($MTTF=N_o$), standart sapma (SD) ve varyasyon katsayısı (CV) gibi değerler aşağıdaki formüllerle hesaplanabilir [1-2,16-18].

$$MTTF = N_o = \alpha \cdot \Gamma(1+1/\beta) \quad (11)$$

$$SD = \alpha \cdot \sqrt{\Gamma(1+2/\beta) - \Gamma^2(1+1/\beta)} \quad (12)$$

$$CV = \frac{SD}{N_o} = \frac{\sqrt{\Gamma(1+2/\beta) - \Gamma^2(1+1/\beta)}}{\Gamma(1+1/\beta)} \quad (13)$$

Burada Γ : gama fonksiyonudur.

2.4.2. Weibull Dağılımının Uygulaması

X ve Y için Weibull doğrusunun çizimi, Weibull dağılım parametrelerinin bulunması ve güvenilirlik analizi işlemleri Statistica, Reliability Studio (Relex), Weibull++(Reliasoft) ve SPSS gibi yazılımlarla yapılabildiği gibi Bu çalışmada olduğu gibi Microsoft Excel ile de rahatlıkla uygulanabilmektedir [1,19-20]. Weibull doğrusularını çizebilmek ve parametreleri elde etmek için sırasıyla aşağıdaki işlemler yapılmıştır.

1. Her bir gerilmeye karşılık gelen hasar çevrim sayıları artan sırada yerleştirildi.
2. Her bir değere (i = 1,2,3..n) şeklinde sıra numarası verildi.
3. Her bir değer için hasar ihtimali için denklem (14)'da verilen Benard'ın medyan sıra formülü kullanılmıştır [1,20-22].

$$MR = \frac{i - 0.3}{n + 0.4} \quad (14)$$

Burada, (i) ve (n) sırasıyla, hasar sıra numarası ve toplam test numune sayısını ifade etmektedir

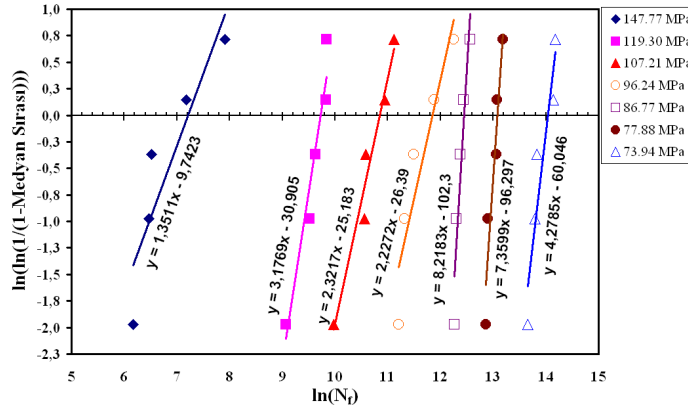
4. Her bir çevrim değeri için $\ln(\ln(1/(1-MR)))$ değerleri hesaplandı (Y-ekseni).
5. Her bir çevrim değeri için $\ln(\text{cycle})$ değerleri hesaplandı (X-ekseni).
6. Tablo-7'de örnek olarak sadece G[300] grubu numuneler için verilmiş olan veriler Microsoft Excel'e aktarıldı. Regrasyon analizi yapabilmek için Microsoft Excel'in ToolPak Analiz çözümleyicisi yüklendi [1,20].
7. $\ln(\text{cycle})$ ve $\ln(\ln(1/(1-MR)))$ değerlerinin grafiği Şekil-3'deki gibi çizdirildi.
8. Bu grafiklerden denklem (7)'de verilen $Y = mX + c$ doğru denklemi en uygun formda elde edildi.
9. Linear regrasyon (en küçük kareler metodu) uygulanarak (β) ve (c) değerleri bulundu. Doğrunun eğiminden direkt ($m=\beta$) parametresi elde edildi.
10. Denklem (8)'den ise (α) parametresi elde edildi.
11. Denklem (11)'den ise her bir gerilmeye karşılık gelen ortalama yorulma ömürleri (Mean Fatigue Life), denklem (13)'den ise varyasyon katsayıları hesaplanmıştır. Ortalama yorulma ömürleri ile varyasyon katsayıları arasındaki değişim Şekil-5'de verilmiştir.
12. Bütün numune grupları için, sırasıyla yukarıdaki işlemler (1-11) yapılmış ve Weibull grafikleri, (α) ve (β) parametreleri elde edilmiştir. G[300] grubu cam/polyester kompozit numune için bulunan (α) ve (β) parametreleri Tablo-7'de görülmektedir.

G[300] grubu cam/polyester numunelerin her gerilme değeri için 1-10 maddelerinin uygulanması sonucu elde edilen sonuçların özeti Tablo-7'de, her gerilme değeri için örnek Weibull grafikleri Şekil-3'de, ayrıca aynı numunenin beş adet test sonucu (N_f), Weibull

ortalaması ve farklı güven seviyeleri için elde edilen çevrim değerleri Tablo-8’de verilmiştir.

Tablo-7. G[300] numunelerin özetlenmiş Weibull değerleri

Gerilme Genliği S (MPa)	Yük Tekrar Sayısı (N _T)	Sıra	Medyan Sırası (MR)	ln(N _T) (X-ekseni)	ln(ln(1/(1-MR))) (Y-ekseni)	Karakteristik Ömür, (α)	Şekil Parametresi, (β)
147.77	476	1	0.129630	6.165418	-1.974459	1 354	1.351
	641	2	0.314815	6.463029	-0.972686		
	681	3	0.500000	6.523562	-0.366513		
	1 301	4	0.685185	7.170888	0.144767		
	2 735	5	0.870370	7.913887	0.714455		
73.94	853 713	1	0.129630	13.657350	-1.974459	1 244 927	4.278
	972 771	2	0.314815	13.787904	-0.972686		
	1 020 367	3	0.500000	13.835673	-0.366513		
	1 389 311	4	0.685185	14.144318	0.144767		
	1 431 192	5	0.870370	14.174018	0.714455		



Şekil-3. G[300] numuneler için Weibull doğruları

Tablo-8. Test sonuçları ve her gerilme seviyesi için Weibull parametreleri (numune=G[300])

Sıra	Gerilme	test-1	test-2	test-3	test-4	test-5	Alfa (α)	Beta (β)	Ort. Ömür (Weibull Ort.)	Güvenlilik / Ömrünü Sürdürme (sağ kalım) Olasılığı, F _s (x)=1-F(x) →			
										0.100	0.368	0.500	0.990
										Kırılma (hasar) Olasılığı, F(x) →			
										0.900	0.632	0.500	0.010
1	348.198	1	1	1	1	1	1	1.000	1	2	1	1	0
2	147.771	476	641	681	1 301	2 735	1 354	1.351	1 241	2 510	1 354	1 032	45
3	119.308	8 651	13 515	15 075	18 554	18 819	16 786	3.177	15 029	21 825	16 786	14 957	3 945
4	107.214	21 537	38 572	39 375	56 380	67 363	51 365	2.322	45 510	73 566	51 365	43 864	7 082
5	96.241	73 615	81 821	97 500	144 933	209 413	139 934	2.227	123 935	203 495	139 934	118 701	17 738
6	86.771	211 751	219 575	236 517	252 853	286 106	254 726	8.218	240 198	281 935	254 726	243 616	145 539
7	77.882	386 988	398 294	469 197	478 357	533 956	481 137	7.360	451 235	538 869	481 137	457 764	257 528
8	73.941	853 713	972 771	1 020 367	1 389 311	1 431 192	1 244 927	4.278	1 132 769	1 512 880	1 244 927	1 142 721	424 810

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

3.1. S-N Eğrileri

Yorulma testleri sonucundaki değerlendirmede cam/polyester numuneler için hasar kriteri olarak 10^6 , alüminyum numuneler için ise 10^7 çevrim sayısı ve bu çevrim sayısına karşılık gelen yorulma mukavemeti esas alınmıştır [1,9-14,23]. R=0.99 (%99) güvenirlilikli cam/polyester kompozit ve alüminyum numunelerin ortalama yorulma ömürlerine göre elde edilen elde edilen S-N eğrileri Şekil-4’de gösterilmiştir. Yorulma deney verilerinin değerlendirilmesi için denklem (15)’de verilen “Power Fonksiyonu” kullanılmıştır [1-3,11-13,24].

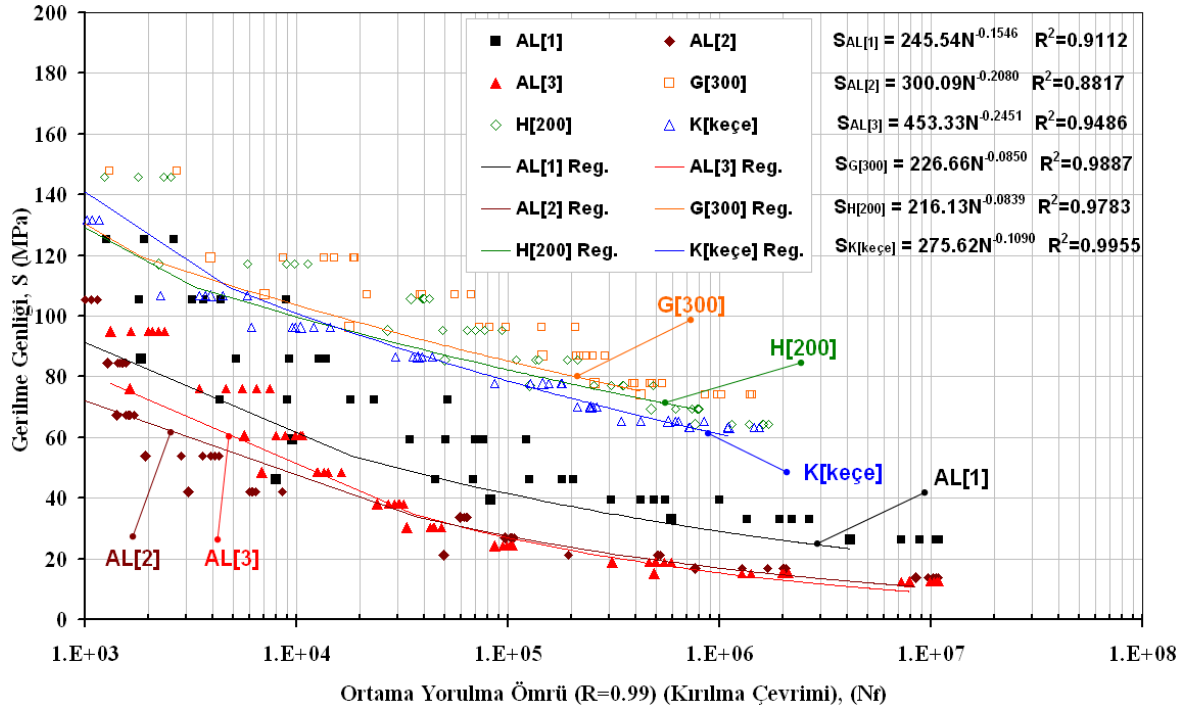
$$S = a.(N_f)^b \quad (15)$$

Bu denklemde ;

S : Gerilme genliği (yorulma mukavemeti),

N_f : Çevrim sayısı (yorulma ömrü),

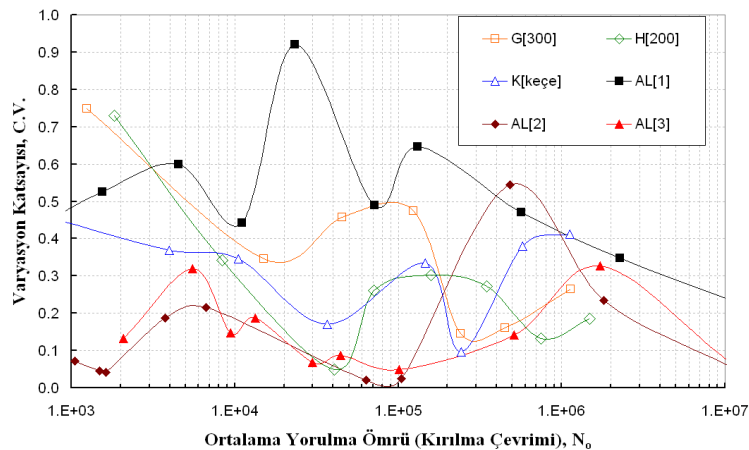
a ve **b** : Sabitlerdir (Şekil-4'de her malzeme grubu için verilmiştir)



Şekil 4. Numunelerin %99 güvenilirlik seviyesindeki S-N eğrileri
R² = korelasyon katsayısı (0 - 1). Korelasyon katsayıları Weibull'un iyi bir uyum gösterdiğinin göstergesidir

3.2. Yorulma-Ömür Verilerinin Dağılımı (Saçılımı)

Numunelerin yorulma ömürleri için varyasyon katsayısı (CV) değerleri denklem (13) kullanılarak hesaplanmıştır. Denklem (11) ile hesaplanan ortalama ömre (N_o) karşılık, CV grafiği Şekil-5'de gösterilmiştir. Farklı numune grupları için görülen bu eğilimler cam/polyester ve alüminyum yapıların tasarımı ve uygulanması için son derece önemlidir [1-2].

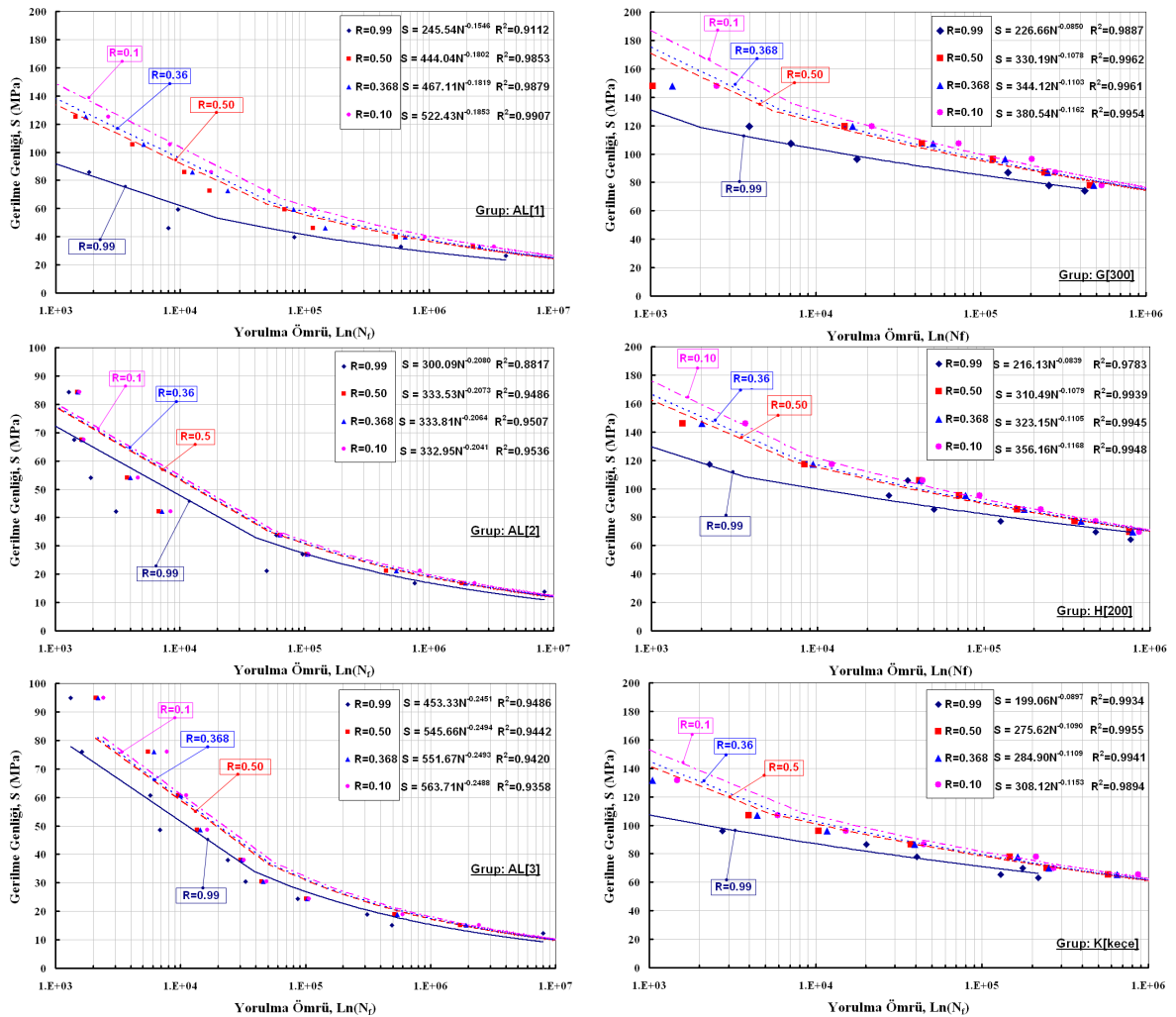


Şekil 5. Ortalama yorulma ömrünün (N_o) varyasyon katsayısına (CV) etkisi

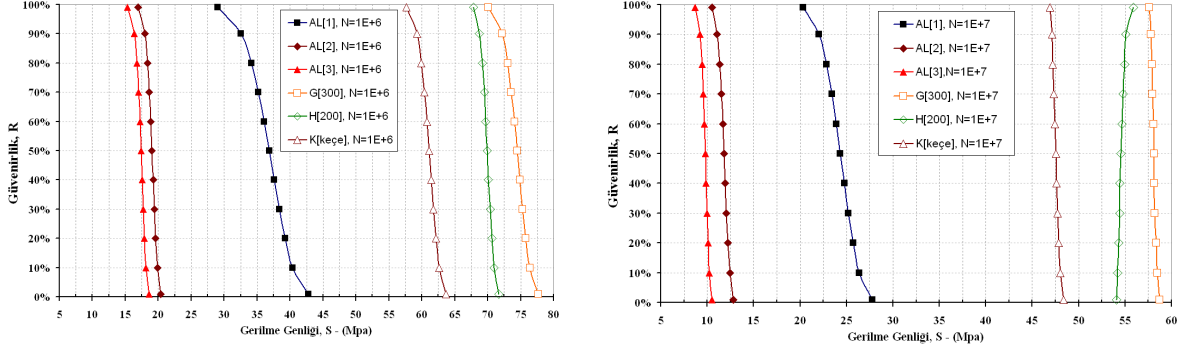
3.3. Yorulma Sonuçlarının Güvenilirlik Analizi ve S-N Eğrilerinin Sınırları

Cam/polyester kompozit malzemelerin anizotrop yapıları ve yarı gevrek davranışlarından dolayı yorulması sonuçları, önemli miktarda saçılma göstermektedir. Bu tür yapılarda tasarım için emniyetli ömür ve güvenilirlik önemli bir parametredir. “Güvenilirlik” terimi, bir parçanın belirli zaman periyodu içinde ve verilen çalışma şartları altında fonksiyonlarını yerine getirebilme ihtimalini; yada malzemenin hata vermeden kullanılacağı garantisini ifade eder Bu aynı zamanda “ömrünü sürdürme ihtimali” olarak da bilinir [1-2,25]. İşte Şekil-6 ve Şekil-7, mühendislikte “güvenilirlik” teriminin izahını içermektedir. Şekil-6 numunelerin çeşitli güvenilirlik seviyelerine ait S-N eğrilerini göstermektedir.

Bu çalışmadaki cam/polyester ve alüminyum alaşımlarının 10^6 ve 10^7 gibi yüksek çevrim bölgelerindeki her gerilme değeri için çizilmiş “ömrünü sürdürme ihtimali” grafikleri Şekil-7’de görülmektedir. Bu grafikler denklem (3) ve (4) kullanılarak çizilmiştir. Örneğin, bu diyagramlardan numunelerin %99 veya %50 “ömrünü sürdürme ihtimali” Y ekseninden yatay bir eksen çizilerek grafikte çakıştırılır ve buradan bu ihtimalin hangi gerilme değerine karşılık geldiği bulunabilir. Bu gerilme değeri de Şekil-6’da verilen eğri denklemlerinden yararlanılarak çevrime dönüştürülebilir.



Şekil-6. Farklı güven seviyeleri için S-N eğrileri



Şekil-7. Yüksek çevrimlerde gerilme – ömrünü sürdürme (sağ kalım=güvenlilik) grafikleri

4. SONUÇLAR

Cam/polyester kompozit ve alüminyum alaşımı numunelerin yorulma ömür değerlerindeki değişme, Weibull dağılımı kullanılarak modellenmiştir. Kompozit ve alüminyum malzemelerin yorulma testlerinden elde edilen dayanım ve ömür verilerinin değerlendirilmesinde Weibull dağılımı oldukça uygun bir metottür. Sonuçta kullanıcılara bu malzemeler daha bir güvenle sunulur. Bu çalışmada aşağıda açıklanan sonuçlara varılmıştır ;

- Şekil-4, 6 ve 7’den görüldüğü gibi aynı güvenilirlik seviyeleri için en büyük yorulma dayanımı cam/polyester kompozitlerde elde edilmiştir.
- Şekil-4’de bütün numunelerin %99 güven seviyesindeki S-N eğrileri verilmiş ve Power fonksiyon parametreleri elde edilmiştir. Bu diyagramlardan faydalanarak ilgili makine elemanının herhangi bir gerilme altındaki yorulma ömrünü ve garanti süresini hesaplamak mümkündür. Özellikle hava taşıtlarının elemanları gibi güvenilirliğin ve emniyetin çok yüksek olması gereken tasarımlarda R=0.99 olan S-N eğrilerinin kullanılması gerekir.
- Şekil-5’den de görüleceği gibi diğer numunelere göre AL[1] numune her çevrimde en yüksek saçılmayı gösterirken. AL[2] ise en düşük (10^5 çevrimde) saçılmayı göstermiştir.
- Özellikle gevrek yapıdaki kompozitler için emniyetli tasarım ömrü büyük önem taşımaktadır. Şekil-6’da sırasıyla dört farklı güven seviyesine ait (R=0.99, R=0.50, R=0.368 ve R=0.10) güvenilirlik seviyeleri için S-N diyagramları çizilerek tasarımcıların faydalanmasına sunulmuştur. Bu diyagramlar herhangi bir gerilme genliği altındaki elemanın ilk hata zamanının belirlenmesinde güvenilirlik veya emniyet sınırları olarak da düşünülebilir. Bu eğriler tasarımcının ihtiyacı olan güvenilir yorulma ömürlerini önceden tahmin etme imkanı sağlar.
- Tablo-8’den de görüldüğü gibi Weibull ortalaması olarak hesaplanan ortalama çevrim değerleri ile güvenilirliği %50 (R=0.50) olan çevrim değerleri birbirine çok yakındır. Dolayısıyla dağınık haldeki yorulma verilerinin Weibull ortalamaları, “%50 güvenilirlikli çevrim değerleri” olarak da kabul edilebilir. Şekil-6’da R=0.50 için S-N eğrileri ve Power fonksiyon parametreleri verilmiştir.
- Şekil-7’de iki parametrelili Weibull dağılım fonksiyonu kullanılarak ömrünü sürdürme olasılığı (sağ kalım) diyagramları çıkartılmıştır. Bu diyagramlardan gerilmeye karşılık, güvenilirlik yüzdesi veya herhangi bir güvenilirlik değerine karşılık yorulma dayanımı kolayca bulunabilir ve kıyaslanabilir. Ayrıca bu

diyagram diğer çevrim değerleri için de oluşturulabilir. Bu nedenle grafikteki bu değerler tasarımcılar için çok değerlidir.

- Bu çalışmada, konstrüksiyonda kullanılacak malzemelerin mekanik testlerinden elde edilen sayısal verilerin uygulamadaki önemi daha iyi anlaşılmıştır. Özellikle veri saçılımının dağınık olduğu durumlarda, elde edilen verilerin aritmetik ortalaması yerine %50 ve %99 güvenirlikli değerlerin elde edilip kullanılması çok daha doğrudur.
- Gerçek test verilerinin birbirine çok yakın olduğu durumlarda Weibull dağılımından elde edilen veriler analiz edilerek doğru malzeme seçimi yapılabilir. Örneğin test verileri birbirine çok yakın olan AL[2] ve AL[3] kıyaslanırsa, Şekil-7'den yararlanarak %99 güven seviyesi için AL[3]'ün tercih edileceği görülmektedir.
- Bu çalışmadan da görüldüğu gibi iki parametrelili Weibull dağılımını kullanılarak %99 doğrulukta S-N eğrilerini elde etmek son derece pratiktir. Bu dağılım parametrelerinin diğer yazılımların yanında Microsoft Excel'deki hazır fonksiyonlar yardımıyla bile hesaplanabilmesi de diğer bir avantajdır.

5. TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın bir bölümü Balıkesir Üniversitesi ve Celal Bayar Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Fonu tarafından desteklenmiştir. Alüminyum ile ilgili testlerin bir bölümü KK. Astsubay MYO imkanları ile yapılmıştır. Ayrıca yazarlar desteklerinden dolayı sırasıyla, Fibroteks A.Ş. (İstanbul), Camelyaf A.Ş. (Gebze), Poliya A.Ş. (İstanbul), SEAS Mekanik A.Ş. firmalarına ve KK. Astsubay MYO Komutanlığına teşekkür ederler.

6. KAYNAKLAR

[1] SAKİN, R., AY, İ., Statistical analysis of bending fatigue life data using Weibull distribution in glass-fiber reinforced polyester composites, **Materials & Design**, 29, 6, 1170-1181, (2008).

[2] KHASHABA, U. A., Fatigue and Reliability Analysis of Unidirectional GFRP Composites Under Rotating Bending Loads, **Journal of Composite Materials**, 37, 4, 317-331, (2003).

[3] ABDALLAH, M. H., ABDIN, E. M., SELMYI A. I., KHASHABAI U. A., Reliability analysis of GFRP pultruded composite rods, **International Journal of Quality & Reliability Management**, 13, 2, 88-98, (1996).

[4] LEE, J., HARRIS, B., ALMOND, D. P., HAMMETT, F., Fibre composite fatigue-life determination, **Composites - Part A: Applied Science and Manufacturing**, 28, 1, 5-15, (1997).

[5] LIN, S. H., MA, C. C. M., TAI, N. H., Long fiber reinforced polyamide and polycarbonate composites. II: Fatigue behavior and morphological property, **Journal of Vinyl and Additive Technology**, 2, 1, 80-86, (2004).

- [6] PIZHONG Q., MIJIA Y., Fatigue life prediction of pultruded E-glass/polyurethane composites, **Journal of Composite Materials**, 40, 9, 815-837, (2006).
- [7]. HARIS, B, A parametric constant-life model for prediction of the fatigue lives of fibre-reinforced plastics, **Fatigue in Composites**, Woodhead Publishing, Abington, UK and CRC Press, Boca Raton, Florida, USA, 546-568, (2003).
- [8] AY, İ., SAKİN, 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).
- [9] 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).
- [10] 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).
- [11] SAKİN, R., AY, İ., YAMAN, R., An investigation of bending fatigue behavior for glass-fiber reinforced polyester composite materials, **Materials & Design**, 29, 1, 212-217, (2008).
- [12] AY, İ., SAKİN, R., OKOLDAN, G., An improved design of apparatus for multi-specimen bending fatigue and fatigue behaviour for laminated composites, **Materials&Design**, 29, 2, 397-402, (2008).
- [13] SAKİN, R., KUMRU, N., AY, İ., Gerilme-Kontrollü, Çok Numuneli Eğilme Yorulma Test Cihazı Tasarımı ve Kompozitler için Uygulama, IMSP 2008, **12. International Materials Symposium**, Pamukkale University, Denizli, Turkey, (15-17 October 2008).
- [14] KIM, H. Y., MARRERO, T. R., YASUDA, H. K., Pringle, O. A., A Simple Multi-Specimen Apparatus for Fixed Stress Fatigue Testing, **Journal of Biomedical Materials Research**, 48, 3, 297-300, (1999).
- [15] ABDALLAH, M. H., ABDIN, E. M., SELMY, A. I., KHASHABA, U., Effect of mean stress on fatigue behavior of GFRP pultruded rod composites, **Composites-Part A:Applied Science and Manufacturing**, 28, 1, 87-91, (1997).
- [16] ZHOU, G., DAVIES, G. A. O., Characterization of thick glass woven roving/polyester laminates: 2. Flexure and statistical considerations, **Composites**, 26, 8, 587-596, (1995).
- [17] TOBIAS P.I, Engineering Statistics Handbook, Assessing Product Reliability, (2006).
<http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/apr/section1/apr162.htm>
(Erişim tarihi: 26.05.2010)

- [18] BARRINGER,P., Barringer and Associates, Reliability Engineering Consulting and Training,(2000). http://www.barringer1.com/sep01prb_files/sep01prb.pdf (Erişim tarihi: 26.05.2010)
- [19] DİRİKOĞLU, M. H., AKTAŐ, A., Statistical Analysis of Fracture Strength of Composite Materials Using Weibull Distribution, **Turkish Journal of Engineering & Environmental Sciences**, 26, 45-48, (2002).
- [20] DORNER, W.W., Using Excel for Data Analysis, Using Microsoft Excel for Weibull Analysis, (1999).
http://www.qualitydigest.com/jan99/html/body_weibull.html (Erişim tarihi: 26.05.2010)
- [21] ReliaSoft Corporation, The Weibull Distribution, (2006).
http://www.weibull.com/LifeDataWeb/the_weibull_distribution.htm
(Erişim tarihi: 26.05.2010)
- [22] TAI, N. H., MA, C. C. M., LIN, J. M., WU, G. Y., Effects of thickness on the fatigue-behavior of quasi-isotropic carbon/epoxy composites before and after low energy impacts, **Composite Science and Technology**, 59, 11, 1753-1762, (1999).
- [23] BEN ZINEBİ, T., SEDRAKIAN, A., BILLOET, J. L., An original pure bending device with large displacements and rotations for static and fatigue tests of composite structures, **Composites Part B: Engineering**, 34, 5, 447-458, (2003).
- [24] TAI N. H, YIP M. C., TSENG C. M, Influences of thermal cycling and low-energy impact on the fatigue behavior of carbon/PEEK laminates, **Composites Part-B: Engineering**, 30, 8, 849-865, (1999).
- [25] AKKURT, M., **Makine Konstrüksiyonunda Güvenirlik**, Birsen Yayınevi, Istanbul, (1997).