

149858

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

BİLGİSAYAR DESTEKLİ, ÇOK NUMUNELİ EĞİLME YORULMASI TEST
CİHAZI TASARIMI VE CAM-FİBER TAKVİYELİ POLYESTER
KOMPOZİTLERDE EĞİLME YORULMASI DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

DOKTORA TEZİ

Makine Yük. Müh.
Raif SAKİN

149858

Balıkesir, Eylül 2004

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

BİLGİSAYAR DESTEKLİ, ÇOK NUMUNELİ EĞİLME YORULMASI TEST
CİHAZI TASARIMI VE CAM-FİBER TAKVİYELİ POLYESTER
KOMPOZİTLERDE EĞİLME YORULMASI DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

DOKTORA TEZİ

Y. Müh. Raif SAKİN

Tez Danışmanı : Doç. Dr. İrfan AY

Sınav Tarihi : 12.11.2004

Jüri Üyeleri : Doç. Dr. Cevdet MERİÇ

(CBÜ)

Doç. Dr. İrfan AY

(Danışman - BAÜ)

Doç. Dr. Ali BAYRAM

(UÜ)

Yrd. Doç. Dr. Mustafa TAYANÇ

(BAÜ)

Yrd. Doç. Dr. Sare ÇELİK

(BAÜ)

Balıkesir, Eylül - 2004

ÖZET

BİLGİSAYAR DESTEKLİ, ÇOK NUMUNELİ EĞİLME YORULMASI TEST CİHAZI TASARIMI VE CAM-FİBER TAKVİYELİ POLYESTER KOMPOZİTLERDE EĞİLME YORULMASI DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

Raif SAKİN

Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

(Doktora Tezi / Tez Danışmanı : Doç. Dr. İrfan AY)

Balıkesir - Türkiye, 2004

Cam-fiber takviyeli polyeester kompozitlerin eğilme yorulması davranışlarını incelemek için, 800, 500, 300 ve 200 gr/m²'lik cam elyaf dokumalar ile 225, 450 ve 600 gr/m² 'lik rasgele cam keçe ve polyeester reçinesi kullanılmıştır. RTM (Reçine Transfer Kalıplama) yöntemi ile elde edilen bu numuneler, 0/90° ve ±45° yönlerinde kesilmiştir. Böylece dokuz değişik yapı elde edilmiştir. Ayrıca RTM metodu için yeni bir kalıp tasarlanmış ve cam fiberlerin tam ıslanması için bu kalıp üzerinde basit bir yöntem uygulanmıştır.

Çalışmanın hedefi, kompozitten yapılmış rüzgar türbin ve eksenel fan kanatlarındaki eğilme yorulmasından dolayı oluşan hasarı basite indirgeyerek incelemeye yöneliktir. Bu elemanlar için başta yorulma ömrü olmak üzere, diğer mekanik özellikler ve ekonomik açıdan en uygun malzeme yapısı elde edilmeye çalışılmıştır. Bu elemanlardaki yükleme ve gerilme şekline benzer bir yorulma yapabilmek için, bilgisayar destekli ve çok numuneli yeni bir yorulma cihazı tasarlanmıştır. Bu cihaz plastik ve kompozitlerin yorulması gibi düşük frekans ve düşük gerilme kullanılan testler için oldukça uygun olabilir. Ayrıca, aynı anda 16 adet numuneyi test edebildiği için de toplam test süresini azaltma ve zaman kazanma açısından çok önemlidir.

Eğilme yorulması testlerinde "sabit gerilmeli" yorulma tipi kullanılmıştır. Bütün yapıların yorulma sınırını tespit edebilmek için, deneysel veriler kullanılarak S-N diyagramları (Wöhler eğrileri) elde edilmiştir. Hasar kriteri ve yorulma ömür sınırı olarak, ortalama N=10⁶ çevrime karşılık gelen eğilme gerilmesi alınmıştır. Yorulma ömürlerinin tahmini için, çizilen S-N diyagramlardan faydalanılarak amprik formüller türetilmiş ve malzeme sabitleri hesaplanmıştır. Kullanılan bu model ise literatürlerdeki modellere uygundur. Deneysel verilerinin istatistiksel değerlendirmesi için iki parametrelili Weibull dağılımı kullanılmıştır. Eğilme yorulması deneylerinin yanı sıra, çekme ve üç noktadan eğilme testleri de gerçekleştirilmiş ve sonuçlar değerlendirilmiştir.

Test sonuçlarına göre en yüksek yorulma ömrü, 800 gr/m²'lik cam dokuma kullanılan 0/90° yönlü kompozitlerde tespit edilmiştir. Test sonuçlarının, cam dokuma fiberlerin alansal yoğunluğu, açısı, geçirgenliği ve tam ıslanıp ıslanmamasından etkilendiği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler : Cam-fiber takviyeli plastik (CTP) / Cam-dokuma / Polyeester / RTM metodu / Eğilme yorulması / Yorulma ömrü / S-N eğrileri / Sabit gerilmeli / Çok-numuneli / / Test cihazı tasarımı / Eğilme mukavemeti / Çekme mukavemeti

ABSTRACT

THE DESIGN OF TEST MACHINE WITH COMPUTER AIDED AND MULTI-SPECIMEN FOR BENDING FATIGUE & THE INVESTIGATION OF BENDING FATIGUE BEHAVIOUR OF GLASS-FIBER REINFORCED POLYESTER COMPOSITES

Raif SAKİN

Balikesir University, Institute of Science, Department of Mechanical Engineering

(Ph. D. Thesis / Supervisor: Doç. Dr. İrfan AY)

Balikesir – Turkey, 2004

In order to study the bending fatigue behaviors of polyester composites with reinforced glass fiber, woven glass of 800, 500, 300 and 200 gr/m², random mat glass of 225, 450 and 600 gr/m² and polyester resin have been used. These samples obtained by the RTM (Resin Transfer Moulding) method; have been cut off within the direction of 0/90° and ±45°. Thus, nine different structures have been obtained. Additionally, a new molding has been designed for RTM and a simple method has been applied on this molding in order for the glass fibers to get wet perfectly.

The target for the study is to investigate the damage resulting from the bending fatigue on the blades of axial fans and wind turbines made up of composite by reducing it to a simpler state. For these elements, firstly the fatigue life, the other mechanical properties and the most economical suitable materials have been tried to obtain. In order to provide a fatigue similar to the loading and stress shape in these elements, a new fatigue test machine with computer aided and with multi-specimen has been designed. This machine may be quite suitable for the test in which low frequency and low stress are used such as the fatigue of plastic and composites. Besides, it is very important in terms of reducing the total test period and of saving time.

Fixed-stress fatigue type has been used in bending fatigue tests. In order to find out the fatigue limit of all structures, S-N curves have been obtained by being used of experimental data. As failure criteria and fatigue life limit, the bending stress versus $N=10^6$ cycle on average has been taken. For the estimate of the fatigue life benefiting from the drawn S-N curves has derived empiric formulas and material constants have been calculated. This used modal is compatible with the modals taking places in the literature. For the statistical evaluation of the experiment data, Weibull distributions with two parameters have been used. In addition to the experiments of bending fatigue, tensile and three points bending tests have been accomplished and the results have been evaluated.

According to the test results, the highest fatigue life has been obtained on the composites directed 0/90° on which the woven glass of 800 gr/m² is used. It has been showed that the test results affected from areal density, direction, permeability and whether to get wet perfectly or not of fibers.

Key Words: Glass Fiber Reinforced Plastic (GFRP) / Woven-glass / Polyester / RTM method / Bending fatigue / Fatigue life / S-N curves / Fixed stress / Multi-specimen / Design of test machine / Bending (flexural) strength / Tensile strength

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET, ANAHTAR SÖZCÜKLER	II
ABSTRACT, KEY WORDS	III
İÇİNDEKİLER	IV
SEMBOL LİSTESİ	VI
ŞEKİL LİSTESİ	VIII
TABLO LİSTESİ	XI
ÖNSÖZ	XII

	<u>Sayfa</u>
BÖLÜM 1 GİRİŞ	1
BÖLÜM 2 LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	4
BÖLÜM 3 FİBER TAKVİYELİ KOMPOZİTLER	13
3.1 CAM FİBER TAKVİYELİ PLASTİK MALZEMELER (CTP)	14
3.1.1 Kompozit Malzeme Yapımı	14
3.1.2 CTP Kullanımının Avantajları	15
3.1.3 Reçineler	16
3.1.4 Takviye Malzemeleri	16
3.1.5 Cam Takviyeli Kompozitler ile Tasarım	17
3.1.5.1 Malzeme Seçimi	17
3.1.6 Polyester Reçineler	18
3.1.7 Monomerler	19
3.2 CAM TAKVİYELİ KOMPOZİT MALZEME ÜRETİM YÖNTEMLERİ	20
3.2.1 El Yatırması Yöntemi (Wet Hand Lay-Up)	21
3.2.3 Reçine Enjeksiyonu Metodu (Resin Transfer Moulding-RTM)	21
3.2.4 Elyaf Sarma Metodu	22
3.2.5 Pultruzyon (Profil Çekme) Metodu	22
3.3 REÇİNE ENJEKSİYONU İLE KALIPLAMA METODU	23
3.3.1 RTM Metodunun Avantajları	24
3.3.2 RTM Metodunda Kullanılan Malzemeler	25
3.3.2.1 RTM için Cam Elyafı :	25
3.3.2.2 RTM için Reçineler :	26
BÖLÜM 4 YORULMA OLAYI	29
4.1 MALZEMELERİN YORULMA MUKAVEMET SINIRLARI	30
4.1.1 Ortalama Gerilmenin Etkisi	33
4.2 KOMPOZİTLERİN YORULMASI	36
4.2.1 Yorulma Testi	36
4.2.2 Ortalama Gerilmenin Yorulma Mukavemeti Üzerine Etkisi	37
4.2.3 Kapalı Döngü Yorulma Testi	39
4.2.4 S/N Eğrileri (Wöhler)	40
4.2.5 Kompozitlerdeki Yorulma Modları	42
4.2.6 Kompozitlerin Yorulmasında Etkili Olan Faktörler	44
4.2.6.1 Fiber Özelliğinin Etkileri	45
4.2.6.2 Matris Özelliğinin Etkisi	45
4.2.6.3 Fiber Yerleşiminin Etkisi	46

	<u>Sayfa</u>
4.2.6.4 Fiber Oranının Etkisi	47
4.2.6.5 Tabaka Ayrılmasının (Delamination) Etkisi	48
4.3 RÜZGAR TÜRBİN VE VANTİLATÖR KANATLARINDAKİ YORULMA	49
4.3.1 Yorulma ile ilgili Yükler (Kuvvetler)	50
4.3.2 Kanat Malzemelerindeki Yorulma Özellikleri	51
4.3.3 Kompozit Kanatların Alüminyum Kanat ile Kıyaslanması	52
4.3.4 Kompozit Malzemedeki Yapılan Kanatların Avantajları	53
4.4 YORULMA VERİLERİNİN İSTATİKSEL DEĞERLENDİRİLMESİ	53
4.4.1 Yorulma Ömür Verilerinin Weibull Dağılımı ile İstatistiksel Analizi	54
4.4.1.1 Weibull Parametrelerinin Bulunması :	55
4.4.1.2 Örnek Weibull uygulaması :	57
BÖLÜM 5 BİLGİSAYAR DESTEKLİ ÇOK NUMUNELİ EĞİLME	
YORULMASI TEST CİHAZI TASARIMI VE İMALATI	60
BÖLÜM 6 DENEYSEL ÇALIŞMALAR	68
6.1 ÇALIŞMANIN AMACI	68
6.2 DENEY YÖNTEMLERİN BELİRLENMESİ	68
6.3 TEST NUMUNELERİ İÇİN MATERYAL VE METOT	69
6.3.1 MATERYALLER	69
6.3.1.1 Reçine	69
6.3.1.2 Hızlandırıcı (Katalizör)	70
6.3.1.3 Sertleştirici	70
6.3.1.4 Stiren (Styrene) Monomeri	71
6.3.1.5 Kalıp Ayırıcı	71
6.3.1.6 Aseton	71
6.3.1.7 Cam Elyafı	71
6.3.1.7.1 Cam Elyaf Tipleri ve Yönleri	72
6.3.2 TEST NUMUNELERİNİN İMALAT METODU	73
6.3.2.1 RTM Metodu için Kalıp Tasarımı ve İmalatı	73
6.3.2.2 RTM Metodu ile Numunelerin İmalat Aşamaları	74
6.3.2.3 RTM Metodunda Tam İslanma için Yapılan Çalışmalar	81
6.3.2.3.1 Tekrarlı Enjeksiyon (Sirkülasyon) Yöntemi	82
6.3.2.4 Kalıptan Çıkan Parçaların Kesimi	84
6.4 ÇEKME TESTLERİ VE SONUÇLARI	86
6.4.1 Çekme Testi için Numune Boyutları	86
6.5 ÜÇ NOKTADAN EĞİLME TESTLERİ VE SONUÇLARI	91
6.5.1 Üç noktadan eğilme Testi için Numune Boyutları	91
6.6 EĞİLME YORULMASI TESTLERİ	97
6.6.1 Yorulma Testleri için Numuneler	97
6.6.2 Numune Boyutları	98
6.6.3 Test Parametreleri :	98
6.6.4 Yorulma Testinin Analizi :	99
6.6.5 Yorulma Testlerinin Yapılışı	100
6.6.6 Yorulma Testi Sonuçları	104
6.6.7 Yorulma Sonuçlarının Weibull İstatistiksel Dağılımı ile Analizi	123
6.7 KIRILMA BÖLGELERİNİN İNCELENMESİ	129
6.8 SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ	139
6.9. GENEL SONUÇLAR	144
EKLER (EK-A)	146
KAYNAKLAR	152

SEMBOL LİSTESİ

<u>Sembol</u>	<u>Açıklama</u>	<u>Birim</u>
Γ	Gamma fonksiyonu	-
$\Delta\sigma$	Çevrim anındaki gerilme oranı	-
ε_f	Eğilme için şekil değişimi (flexural strain)	-
σ	Gerilme	MPa
σ_r	Gerilme dağılımı	MPa
σ_{max}	Maksimum gerilme	MPa
σ_{min}	Minimum gerilme	MPa
σ_f	Orta noktada oluşan maksimum eğilme gerilmesi (flexural stress)	MPa
σ_a^o	Ortalama gerilmenin sıfır olduğu gerilme (tam ters yükleme)	MPa
$\% \varepsilon$	Yüzde uzama	-
Υ	Güven seviyesi	-
α	Weibull için şekil parametresi	-
β	Weibull için yerleşim parametresi	-
σ_{AK}	Akma gerilmesi	MPa
σ_c	Gerilmeli kopma mukavemeti	MPa
σ_D	Sürekli mukavemet sınırı	MPa
σ_{DN}	Yorulma mukavemeti	MPa
σ_{FU}	Statik mukavemet, maksimum eğilme (flexural) mukavemeti	MPa
σ_{tu}	Maksimum çekme mukavemeti	MPa
σ_{TU}	Ortalama statik mukavemet	MPa
σ_{TU}	Statik mukavemet, maksimum çekme (tensile) mukavemeti	MPa
σ_{ty}	Akma mukavemeti	MPa
$\sigma_m, \sigma_{ort}, \sigma_o$	Ortalama gerilme	MPa
σ_a, σ_g	Gerilme genliği	MPa
A	Kesit alan	mm ²
A, B, C	Malzemeye bağlı katsayılar	-
B	Numune genişliği	mm
CFRP	Carbon Reinforced Fiber Plastic = Karbon Fiber Takviyeli Plastik	-
CTP	Cam Takviyeli Plastik	-
D	Hasar değeri (kırılmaya konu olan bölgenin hasar yüzdesi)	%
D	Merkez noktada oluşan maksimum şekil değişimi (deplasman)	mm
d	Standart sapma	-
E	Malzeme elastiklik modülü	MPa
EI/EI _o	Spesifik rijitlik oranı	-
F	Kuvvet, yük	Newton (N)
F	Maksimum kopma yükü	N
F(x)	Olasılık yoğunluğu fonksiyonu	-
F _{max}	Maksimum kuvvet	N
FRP	Fiber Reinforced Plastic = Fiber Takviyeli Plastik	-
GFRP	Glass Reinforced Fiber Plastic = Cam Fiber Takviyeli Plastik	-
H	Numune kalınlığı	mm
I	Şekil değişimi	mm
i	Hasar sıra numarası	-
L	Destek mesafesi	mm
L	Yük ile max. gerilme oluşan bölge arasındaki mesafe	mm
m, b, d, c	Malzeme sabitleri	-

<u>Sembol</u>	<u>Açıklama</u>	<u>Birim</u>
N	Hasara neden olan çevrim sayısını	-
n	Test numunelerinin toplam sayısı	adet
N_f	Çevrim sayısı (kırılıncaya kadar olan), Yorulma ömrü	çevrim
P	Deney verilerinin sıra ortalaması (medyan sırası)	-
$P_f(x), P_s(x)$	İlgili kümülatif dağılım fonksiyonu	-
R	Gerilme oranı	-
R	Güvenirlilik değeri	-
R^2	Korelasyon katsayısı	-
R_d	Şekil değiştirme oranı	-
S	Maksimum yorulma mukavemetini	MPa
S_a	Gerilme genliği	MPa
S_a/S_u	Uygulanan gerilme seviyesi	-
S_m	Ortalama gerilme	MPa
S_u	Test edilen malzemenin maksimum mukavemeti	MPa
t	Zaman	Dakika, sn.
U_{max}	Min. Şekil değiştirme miktarı	mm
U_{min}	Max. Şekil değiştirme miktarı	mm
V_f	Cam fiber hacim oranı	%



ŞEKİL LİSTESİ

2.1	Deney cihazının şematik gösterimi	7
2.2	Deney verileri ve simülasyon sonucu elde edilen yük - devir sayısı eğrisi	8
2.3	Çok numuneli dönel yorulma cihazının ve bağlama sisteminin şematik gösterimi	9
3.1	Reçineye fiber takviyesinin çekme mukavemetine etkisi	13
3.2	El Yatırması Yöntemi (Wet Hand Lay-Up)	21
3.3	Elyaf sarma metodu	22
3.4	Pultruzyon (Profil Çekme) metodu	22
3.5	RTM metodu	24
3.6	Sıcaklığın ve stiren oranının viskozite üzerindeki etkisi	26
3.7	Kalıp sıcaklığına bağlı olarak jelleşme ve kalıptan çıkarma süresi	27
4.1	Yorulma olayının başlangıcını etkileyen faktörler	30
4.2	Eksenel çeki-bası gerilmeleri uygulayan, sabit genlikli yorulma cihazı	31
4.3	Numunenin dört noktasına kuvvet gelen ve dönen eğme gerilmeleri uygulayan yorulma cihazı "Schenk (Simplex) modeli yorulma cihazı	31
4.4	Düzlemsel eğme gerilmesi uygulayan "Sonntag" modeli yorulma cihazı	31
4.5	Ortalama gerilmenin (σ_0), gerilme genliğine (σ_g) etkisi	33
4.6	Soderberg, Gerber ve Goodman Modelinin çıkarılışı	33
4.7	Örnek Goodman ve Smith diyagramları	35
4.8	Yorulma testi için sinüzoidal yükleme	36
4.9	Metal yorulması için tipik bir master diyagram	38
4.10	Kapalı döngü test ile yapılan dalgalı yük çevrimleri	39
4.11	Yorulma testinde yük ve şekil değişimi modlarının karşılaştırılması	40
4.12	Tek yönlü iki kompozit için S/N eğrisi	40
4.13	Çeşitli kompozit hasar modları için karşılaştırmalı S/N davranışları	42
4.14	Kompozit yorulması boyunca çatlak yayılması olayları	43
4.14'	ün devamı : Kompozit yorulması boyunca çatlak yayılması olayları	44
4.15	Bir ara katman yoluyla çatlak yayılması	44
4.16	Fiber tipinin kompozitin yorulması üzerindeki etkisi	45
4.17	Farklı matris malzemelerine sahip E-Camı takviyeli fiber kompozitlerin izafi mukavemet değerleri	46
4.18	Kompozit yorulmasında fiber yerleşim yönlerinin etkisi	47
4.19	Kompozit yorulmasında fiber oranının etkisi	47
4.20	Kompozit malzemedeki başlangıç delaminasyonu (PD)	48
4.21	İntralayer ve İnterlayer delaminasyon	48
4.22	Karbon/epoksi numunedeki intralayer delaminasyon	48
4.23	Çeşitli kanat malzemelerinin yorulma özellikleri	51
4.24	Mukavemet değerleri için çizilen Weibull diyagramı	58
4.25	Gerilmeye karşı - kırılmama (ömrünü sürdürme) grafiği (Survival Graph)	59
5.1	İmal edilen çok numuneli ve sabit gerilmeli eğilmeli yorulma deney cihazının şematik gösterimi	60
5.1'in devamı	: Çok numuneli ve sabit gerilmeli eğilmeli yorulma deney cihazının şematik gösterimleri	61
5.2.	Çok Numuneli Yorulma Cihazı (su kazanı monte edilmemiş)	61
5.3	Kontrol Panosu	62
5.4	Numune bağlama sistemi (şematik)	64
5.5	Numune bağlama sistemi	64
5.6	Bilgisayar yazılımının çalışması (sayıcı ekran)	65

5.7 Farklı gerilme oranı (R) sağlayan destek aparatı	66
5.8 Test cihazının şematik detay resmi	66
5.3 Çok numuneli Eğilme Yorulması Test Cihazı Detayları	67
6.1 Kullanılan cam elyaf tiplerinin şematik gösterimi	72
6.2 Kullanılan cam elyaf tipleri	73
6.3 RTM kalıbının şematik resmi ve uygulaması	74
6.4 RTM Metodunda kullanılan cam elyaf yerleşimleri	76
6.5 Cam elyaflarının kalıp boşluğuna yerleştirilmesi	76
6.6 RTM Uygulaması	77
6.7 Reçine çıkış (ventilasyon) deliklerinden havanın atılması	77
6.8 Kalıbın 12 saat sonraki açılmış hali	78
6.9 RTM yöntemi ile elde edilen ve kalıptan çıkan numune örnekleri	78
6.10 RTM yöntemi ile elde edilen ilk cam-elyaf numune örnekleri (çevrim 1-3)	83
6.11 RTM yöntemi ile elde edilen ve kalıptan çıkan cam-elyaf son numune örnekleri (çevrim 5-7)	84
6.12 Kesme makinesi	84
6.13 Farklı elyaf (fiber) yönlerinde elde edilen standart test numuneleri	85
6.14 ASTM D 3039'a göre test numunesi boyutları	86
6.15 Çekme testleri sonucu elde edilen örnek σ - ϵ diyagramı	86
6.15'in devamı : Çekme testleri sonucu elde edilen örnek σ - ϵ diyagramı	87
6.15'in devamı : Çekme testleri sonucu elde edilen örnek σ - ϵ diyagramı	88
6.16 Bütün grup numuneler için çekme testleri sonucu mukavemet değerlerinin sıralı grafiği	90
6.17 Cam fiber yönü $\pm 45^\circ$ ve 90° numuneler için çekme testleri sonucu mukavemet değerlerinin kıyaslamalı grafiği	90
6.18 ASTM D 790-00'a göre test numunesi boyutları	91
6.19 Üç noktadan eğme testi	92
6.20 Üç noktadan eğilme testleri sonucu elde edilen örnek σ - ϵ diyagramı	93
6.20'nin devamı : Üç noktadan eğilme testleri sonucu elde edilen örnek σ - ϵ diyagramı	94
6.21 Bütün grup numuneler için 3 noktadan eğme testleri sonucu mukavemet değerlerinin sıralı grafiği	96
6.22 Cam fiber yönü $\pm 45^\circ$ ve 90° numuneler için üç noktadan eğme testleri sonucu mukavemet değerlerinin kıyaslamalı grafiği	96
6.23 Yorulma numuneleri ölçüleri	98
6.24 Dönme esnasındaki gerilme dağılımı	99
6.25 Numunenin bağlama pabucuna ve ağırlığa bağlantı şekli	101
6.26 Yük bağlanmış ve teste hazır numuneler	102
6.27 Yorulma cihazın çalışması	102
6.28 Numunede oluşan hasar (delamination)	103
6.29 A grubu numune için karakteristik ömür verileri ile elde edilen S-N eğrisi	113
6.30 B grubu numune için karakteristik ömür verileri ile elde edilen S-N eğrisi	113
6.31 C grubu numune için karakteristik ömür verileri ile elde edilen S-N eğrisi	114
6.32 D grubu numune için karakteristik ömür verileri ile elde edilen S-N eğrisi	114
6.33 E grubu numune için karakteristik ömür verileri ile elde edilen S-N eğrisi	115
6.33 F grubu numune için karakteristik ömür verileri ile elde edilen S-N eğrisi	115
6.35 G grubu numune için karakteristik ömür verileri ile elde edilen S-N eğrisi	116
6.36 H grubu numune için karakteristik ömür verileri ile elde edilen S-N eğrisi	116
6.37 K grubu numune için karakteristik ömür verileri ile elde edilen S-N eğrisi	117
6.38 S-N eğrilerinin bir arada gösterimi (bütün gruplar)	117
6.39 S-N eğrilerine göre 10^6 çevrim için elde edilmiş ortalama eğilme gerilmesi değerlerinin kıyaslanması	118

6.40	10 ⁶ çevrim için $\pm 45^\circ$ ve 0/90° fiber yönleri ile rasgele dağılımlı keçe elyafın eğilme yorulması değişimi	119
6.41	Cam fiber yoğunluğu 800 gr/m ² , fiber yönü $\pm 45^\circ$ ve 0/90° olan numuneler için S-N eğrilerinin karşılaştırılması (A ve E Grubu)	120
6.42	Cam fiber yoğunluğu 500 gr/m ² , fiber yönü $\pm 45^\circ$ ve 0/90° olan numuneler için S-N eğrilerinin karşılaştırılması (B ve F Grubu)	120
6.43	Cam fiber yoğunluğu 300 gr/m ² , fiber yönü $\pm 45^\circ$ ve 0/90° olan numuneler için S-N eğrilerinin karşılaştırılması (C ve G Grubu)	121
6.44	Cam fiber yoğunluğu 200 gr/m ² , fiber yönü $\pm 45^\circ$ ve 0/90° olan numuneler için S-N eğrilerinin karşılaştırılması (D ve H Grubu)	121
6.45	Cam fiber yönü 0/90° olan numuneler için S-N eğrilerinin karşılaştırılması	122
6.46	Cam fiber yönü $\pm 45^\circ$ olan numuneler için S-N eğrilerinin karşılaştırılması	122
6.47	A grubu numuneler için Weibull ve hasar olasılığı grafikleri	124
6.48	B grubu numuneler için Weibull ve hasar olasılığı grafikleri	124
6.49	C grubu numuneler için Weibull ve hasar olasılığı grafikleri	125
6.50	D grubu numuneler için Weibull ve hasar olasılığı grafikleri	125
6.51	E grubu numuneler için Weibull ve hasar olasılığı grafikleri	126
6.52	F grubu numuneler için Weibull ve hasar olasılığı grafikleri	126
6.53	G grubu numuneler için Weibull ve hasar olasılığı grafikleri	127
6.54	H grubu numuneler için Weibull ve hasar olasılığı grafikleri	127
6.55	K grubu numuneler için Weibull ve hasar olasılığı grafikleri	128
6.56	Bütün numune grupları için kırılmama (ömrünü sürdürme) olasılıkları grafiği	128
6.57	Çekme testi sonucu kırılan numunelerin görüntüsü	129
6.58	Üç noktadan eğilme testi sonucu kırılan numunelerin görüntüsü	129
6.59	Yorulma testleri sonucu kırılan numunelerin görüntüsü	129
6.60	Yorulma testinde tabaka ayrılması (delamination) hasarına uğramış numuneler	130
6.61	Optik fotoğrafların çekildiği bölgeler (kırılma bölgesinin üç farklı yönünden)	130
6.62	Yorulması sonucu kırılan bölgenin önden görüntüsü (Grup : E, Büyütme : 40X)	131
6.63	Yorulması sonucu kırılan bölgenin önden görüntüsü (Grup : E, Büyütme : 60X)	131
6.64	Yorulması sonucu kırılan bölgenin önden görüntüsü (Grup : A, Büyütme : 40X)	132
6.65	Yorulması sonucu kırılan bölgenin önden görüntüsü (Grup : B, Büyütme : 40X)	132
6.66	Yorulması sonucu kırılan bölgenin önden görüntüsü (Grup : F, Büyütme : 40X)	133
6.67	Yorulması sonucu kırılan bölgenin önden görüntüsü (Grup : G, Büyütme : 40X)	133
6.68	Yorulması sonucu kırılan bölgenin önden görüntüsü (Grup : K, Büyütme : 40X)	134
6.69	Yorulması sonucu kırılan bölgenin yandan görüntüsü a) Grubu : E, b) Grubu : A	134
6.70	Yorulması sonucu kırılan bölgenin yandan görüntüsü (Grup : F, Büyütme : 20X)	135
6.71	Yorulması sonucu kırılan bölgenin yandan görüntüsü (Grup : G, Büyütme : 20X)	135
6.72	Yorulması sonucu kırılan bölgenin yandan görüntüsü (Grup : H, Büyütme : 20X)	136
6.73	Yorulması sonucu kırılan bölgenin yandan görüntüsü (Grup : K, Büyütme : 20X)	136
6.74	Kırılan bölgedeki $\pm 45^\circ$ fiberlerin üstten görüntüsü (Grup : A, Büyütme : 20X)	137
6.75	Kırılan bölgedeki 0/90° fiberlerin üstten görüntüsü (Grup : E, Büyütme : 20X)	137

TABLO LİSTESİ

3.1 Sertleştirilmiş Polyester ve Epoksi Reçinelerin Tipik Özellikleri	18
3.2 Değişik tip reçinelerin özellikleri	19
3.3 Bazı monomerlerin özellikleri	20
3.4 Tipik bir polyester hazırlama formülü	28
4.1 R değeri ile gösterilen yorulma yükü modları	37
4.2 (m) ve (b) sabitleri için tipik değerler	41
4.3 CTP'lerin termal ve mekanik özelliklerinin diğer yapı malzemeleri ile kıyaslanması	53
4.4 Weibull çizimi için sıralanmış mukavemet verileri	58
4.5 Microsoft Excel ile Hesaplanmış Weibull Parametreleri ve Güvenirlilik değerleri	59
5.1 Test cihazı ekipmanı ve teknik özellikleri	63
5.2 Elektronik sistem ile ilgili teknik özellikler	63
5.3 Çok numuneli Eğilme Yorulması Test Cihazı Detayları	67
6.1 Sıvı CE 92 N8 Polyester Reçinenin Özellikleri	69
6.2 Sertleşmiş CE 92 N8 Polyester Reçinenin Özellikleri	69
6.3 Cam fiber (E – Camı) yaklaşık mekanik özellikleri	72
6.4 Deney numunelerinde kullanılan cam elyaf tipleri	72
6.5 Kalıp ölçüleri	74
6.6 Cam-Fiber Takviyeli Kompozit Numunelerin Grup ve Kombinasyonları	79
6.7 RTM'de kullanılan malzemeler ve yoğunlukları	79
6.8 RTM Yöntemiyle Elde Edilen Test Numuneleri için Teknik Özellikler	80
6.9 Cam-Fiber numunelerin çekme testinden elde edilen ortalama değerler	88
6.10 ASTM D 3039'a göre çekme deneyi sonuçları	89
6.11 ASTM 790-00'a göre üç noktadan eğme deneyi sonuçları	95
6.12 CTP=GFRP numune grup ve özellikleri	97
6.13 A grubu numune için S-N verileri ve Weibull istatistik dağılımı ile hesaplanan karakteristik ömür değerleri	104
6.14 B grubu numune için S-N verileri ve Weibull istatistik dağılımı ile hesaplanan karakteristik ömür değerleri	105
6.15 C grubu numune için S-N verileri ve Weibull istatistik dağılımı ile hesaplanan karakteristik ömür değerleri	106
6.16 D grubu numune için S-N verileri ve Weibull istatistik dağılımı ile hesaplanan karakteristik ömür değerleri	107
6.17 E grubu numune için S-N verileri ve Weibull istatistik dağılımı ile hesaplanan karakteristik ömür değerleri	108
6.18 F grubu numune için S-N verileri ve Weibull istatistik dağılımı ile hesaplanan karakteristik ömür değerleri	109
6.19 G grubu numune için S-N verileri ve Weibull istatistik dağılımı ile hesaplanan karakteristik ömür değerleri	110
6.20 H grubu numune için S-N verileri ve Weibull istatistik dağılımı ile hesaplanan karakteristik ömür değerleri	111
6.21 K grubu numune için S-N verileri ve Weibull istatistik dağılımı ile hesaplanan karakteristik ömür değerleri	112
6.22 Düzeltilmiş S-N eğrilerine göre $N_f=10^6$ çevrime karşılık maksimum gerilme değerleri	118

ÖNSÖZ

Bu projede, bilimsel çalışma ve doktora projesi yapmanın ne olduğunu gerçekten daha iyi anladım. Ancak, dünyanın bir çok ülkesinde yapılan bilimsel çalışmalar ile aramızdaki tek farkın “eldeki imkanlar” veya “imkansızlıklar” olduğunu da bir kez daha vurgulamak isterim. Çünkü projenin çok büyük bir süresi, test cihazı tasarımı ve imalatı, RTM metodu için kalıp tasarımı ve imalatı, test numunelerinin imalatı, mekanik diğer deneyler için cihaz-aparat yapma veya arama ile geçti. Bu projede, RTM kalıbını, GFRP numunelerini, test cihazını, elektronik aksamı ve yazılımı ve diğer bir çok aparatı kendimiz tasarlayıp imalatını yaptık. Ancak bu yapılanlar, esas yapılması gereken testler ve değerlendirmeler için süreyi oldukça kısaltmıştır.

Cam-fiber takviyeli polimer kompozitlerin eğilme yorulması davranışlarını inceleyen bu çalışmada bir çok kişi ve kuruluşun maddi ve manevi desteği olmuştur. Uzun süren bu doktora projesinin yorgunluğu ile aşağıda ismini yazmayı unuttuğum kişi ve firmalardan özür dilerim. Bilimsel çalışma uğruna zamanını aldığım ve biraz ihmal ettiğim, emeği geçen bütün herkese minnettarım.

Proje süresince yaptığı bütün katkılardan ve yol göstericiliğinden dolayı; BAÜ Mühendislik, Mimarlık Fakültesi öğretim üyesi ve danışman hocam Doç. Dr. İrfan AY 'a

Proje süresince verdiği destekten dolayı, Edremit Meslek Yüksekokulu ve BAÜ Araştırma Projeleri Müdürü Yrd. Doç. Dr. Sakin Vural VARLI 'ya

Proje boyunca yaptığı bütün katkılardan, her an yanımda olmasından, bilgisini ve tecrübelerini hiç sakınmamasından ve yol göstericiliğinden dolayı; Edremit Meslek Yüksekokulu'ndan Öğr. Gör. Yük. Müh. Güven OKOLDAN 'a

Yaptıkları katkılardan dolayı Edremit Meslek Yüksekokulu'ndan Elektronik ve Haberleşme Mühendisi arkadaşlarım Öğr. Gör. Akif B. DUMANAY ve Öğr. Gör. Serkan YEŞİLIRMAK 'a

Test cihazının ve elektronik aksamın tasarımı ve imalatı, software'in yazılımı ve numunelerin imalatı aşamasındaki katkılarından dolayı; Coşkun Fiberglass Ltd. Şti.'den Şerafettin ÇOŞKUN 'a

RTM kalıbı ve test cihazının imalatı aşamasındaki katkılarından dolayı; Mısırlı Makina Kazan Ltd. Şti.'den Hüseyin DOĞRUCUOĞLU 'na

Test cihazının elektriksel bağlantılarındaki katkılarından dolayı; Sumaş A.Ş.'den Elektrik Teknikeri Şaban GÜLŞEN'e

Cam dokuma ve cam keçe teminindeki katkılarından dolayı Fibroteks Dokuma S.T. A.Ş.'ye

Cam dokuma, cam keçe ve polyster teminindeki katkılarından dolayı Cam Elyaf A.Ş.'ye

Polyester, stren, hızlandırıcı (Cobalt), sertleştirici (Mek-P) teminindeki katkılarından dolayı Poliya Poliester ve Yardımcı Maddeler Sanayi'ye

Uzun süren proje süresince günler geceler boyu bana ve bensizliğe katlandığından, verdiği sonsuz destekten ve anlayışından dolayı eşim Seden SAKİN 'e

Maddi ve manevi katkılarından dolayı bütün Ailem 'e,

Sonsuz teşekkür ederim.

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Cam fiber (glass fiber reinforced plastic= GFRP) ve karbon fiber (carbon fiber reinforced plastic=CFRP) takviyeli plastik kompozit malzemeler yapısal uygulamalarda metalden daha üstün önemli özellikler göstermektedir [1]. Bu malzemelerin hafiflik-ağırlık, yüksek mukavemet ve yüksek rijitlikleri, metalik malzemelerin kullanılmadığı öncelikli yapılarda metallere karşı alternatif olmaktadır. GFRP=CTP ve CFRP levhalar hava taşıtlarında, rüzgar türbin kanatlarında, transportta ve deniz taşımacılığında öncelikli yapılar olarak kullanıldığından beri, hasar toleranslarına bağlı olan yapı güvenilirliği üzerine günümüz kompozit araştırmacıları için çok önemli bir konu olmuştur. Özellikle hava araçlarının, rüzgar türbin ve vantilatör kanatlarının, deniz araçlarında kullanılan dönel elemanların ve kompozitten yapılmış pervanelerin ve diğer araçların bir çoğunun çalışma esnasında tekrarlı yüklere maruz kaldıkları çok iyi bilinmektedir. Kompozitlerin tekrarlı yük altındaki mekanizmaları ve kırılma davranışları gerçekten çok karmaşıktır. Kırılma prosesleri, matris çatlaması, fiber kırılması ve fiber-matris ara yüzey kırılması ve katmanlardaki (laminat) komşu tabakalar arasındaki delamination'u (tabaka ayrılması) kapsamaktadır. Bu nedenle, tekrarlı yük altındaki yorulma davranışlarının bilinmesiyle ilgili bir araştırma kompozit malzemelerin emniyetli kullanımı ve pratik yapısal dizaynları için hayati önem taşımaktadır [1,2,3,4].

Endüstriyel uygulamalardaki bir çok malzeme çekme mukavemetinin çok altındaki tekrarlı gerilme veya şekil değişimlerine maruz kalmaktadır. Bu yüzden malzemelerin kullanılabilirliğine yorulma özellikleri ile daha iyi karar verilebilir. Malzemelerin yorulma özelliklerini hesaplamak için genellikle S-N (Wöhler) eğrileri kullanılmaktadır [1,2,3,4,5].

Yorulma deneylerindeki zorluklardan bir tanesi deney zamanıdır. Bir malzemenin yorulma özelliklerini belirlemede, dayanma sınırı civarındaki deney verileri çok önemlidir. Dayanma sınırı, gerçek zaman ölçeğinde kırılmanın olmadığı gerilmenin altındaki bir gerilmedir. Dayanma sınırına ulaşmak için gereken çevrim sayıları malzemelere göre farklılık gösterir. Ancak, genellikle 1 milyon veya 10 milyon çevrim dayanma sınırına

ulaştığı düşünölen çevrim sayıları olarak kullanılmaktadır. Yorulma deneylerinin genel bir eğilimi ise deney sonuçlarının geniş dağılımlı olmasıdır. İstatistiksel olarak güvenilir sonuçlar için önemli sayıda numunenin test edilmesi gerekir. Sonuç olarak, malzemenin yorulma özelliklerinin belirlemesi için gereken deney zamanı oldukça uzun olmaktadır [6].

Deney frekansını arttırarak, deney zamanları azaltılabilir. Ancak, deney frekansını arttırmak kullanılan malzemede yanlış simölasyon, ısı birikimi (hysteric heating) ile mekanik bozulma gibi bazı problemlerin artmasına neden olur. Bu problemler, özellikle polimer malzemelerde önemlidir. Deney şartları gerçek kullanım şartlarına mümkün olduğunca yakın ve benzer olmalıdır [6].

Yorulma özelliklerinin tamamen malzemenin kendine özgü özelliklerinden değil, numunenin özelliklerinden de etkilenmektedir. Numunenin işlenmesi esnasında oluşan mikro boşluklar ve yüzey kusurlarının hepsi deney numunesinin yorulma özelliklerini etkiler [1,6].

Bu çalışmada, cam-fiber takviyeli polimer kompozitlerin eğilme yorulması davranışlarını incelemek için, 800, 500, 300 ve 200 gr/m²'lik alansal yoğunluğa sahip cam dokuma (woven glass) fiberler ile 225, 450 ve 600 gr/m²'lik rasgele dağılımlı cam keçe (mat glass) fiberler ve polyester reçinesi kullanılmıştır. Oluşturulan GFRP=CTP numunelerin mekanik özellikleri, eğilme yorulması davranışları ve yorulmadan dolayı oluşan hasar (kırılma) mekanizmaları açıklanmaya çalışılmıştır. GFRP numuneler RTM (Reçine Transfer Kalıplama=Resin Transfer Moulding) yöntemiyle imal edilmişlerdir. RTM kalıbından çıkan numuneler, 0/90° ve ±45° yönlerinde kesilerek dokuz değişik yapı elde edilmiştir. RTM yöntemi için özel bir kalıp tasarlanıp imal edilmiştir. RTM metodunda cam fiberlerin tam ıslanması için "tekrarlı enjeksiyon-sirkölasyon" adını verdiğimiz basit bir yöntem uygulanmış ve birden fazla enjeksiyon çevrimi kullanılarak cam fiberlerin daha iyi ıslanması sağlanmıştır. Eğilme yorulması testleri ise, tasarlanıp imal edilen bilgisayar destekli çok numuneli bir yorulma test makinesinde gerçekleştirilmiştir.

Çalışmanın hedefi, GFRP=CTP kompozitten yapılmış rüzgar türbin ve aksenel fan kanatlarındaki eğilme yorulmasından dolayı oluşan hasarı basite indirgeyerek incelemeye yöneliktir. Bu elemanlar için başta yorulma ömrü olmak üzere, mekanik özellikler ve

ekonomik açıdan en uygun malzeme yapısı elde edilmeye çalışılmıştır. Bu elemanlardaki yükleme ve gerilme şekline benzer bir yorulma yapabilmek için, bilgisayar destekli ve çok numuneli yeni bir yorulma cihazı tasarlanmıştır.

Yukarıda bahsedilen bütün faktörlere bağlı olarak yapılan araştırma sonunda, bilgisayar destekli çok numuneli yorulma deney cihazı bu problemlerle başa çıkmak için tasarlanmış, imal edilmiş ve bu çalışmada uygulanmıştır. Bu cihazın asıl özelliği, aynı zamanda 16 adet numuneyi test etmesi ve bütün deney verilerinin ve parametrelerinin (her parça için çevrim sayısı, kırılma çevrimi, devir sayısı vb.) bilgisayar ekranından izlenmesi ve kayıt edilebilmesidir. Böylece, düşük frekansta (devirde) çalışmasına rağmen toplam deney zamanları büyük oranda azaltılabilir. Ayrıca deney verilerinin ve parametrelerin takibinde hata yapma olasılığı en aza indirilebilir. Bu cihaz özellikle plastik ve fiber takviyeli kompozit malzemelerin yorulma deneyi gibi düşük gerilme ve düşük frekans uygulanması gereken yorulma deneyleri için geliştirilmiştir.

Çok numuneli cihazda yapılan eğilme yorulması testlerinde “sabit gerilmeli” yorulma tipi kullanılmıştır. Bunun için ise ortalama 192, 102, 100, 92 ve 50 gr’lık kare şeklindeki metal ağırlıklar kullanılmıştır. Bu ağırlıklar numunenin serbest ucuna bağlanarak farklı eğilme gerilmeleri elde edilmiştir. Bütün numune yapılarının yorulma sınırını tespitinde, deneysel veriler kullanılarak S-N diyagramları (Wöhler eğrileri) elde edilmiştir. Hasar kriteri ve yorulma ömür sınırı olarak, ortalama $N=10^6$ yük terar sayısına (hasar çevrimi=cycle to failure) karşılık gelen eğilme gerilmesi alınmıştır [1,2,6]. Yorulma ömürlerinin tahmini için, çizilen S-N diyagramlardan faydalanılarak amprik formüller türetilmiş ve malzeme sabitleri hesaplanmıştır. Kullanılan bu model ise literatürlerdeki modellere oldukça uygundur [1,2,3,6]. Deney verilerinin istatistiksel değerlendirmesi için iki parametrelili Weibull istatistik dağılımı kullanılmıştır. Eğilme yorulması deneylerinin yanı sıra, çekme ve üç noktadan eğilme testleri de gerçekleştirilmiş ve sonuçlar kıyaslamalı olarak değerlendirilmiştir.

BÖLÜM 2

LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Otomotiv ve hava araçları endüstrisinde ileri kompozit malzemelerin uygulaması, yapının ağırlığını azaltma, yakıt tasarrufu ve performans artması hedefleri açısından çok önemlidir. Yukarıda sözü edilen endüstriler için yorulma yüklemeleri genellikle kaçınılmaz bir durumdur. Bu sebepten dolayı, yorulma analizi yapılmadan yapılan son tasarımlar kompozit malzemelerin mekanik özellikleri açısından tam doğru değildir [2].

Son yıllarda, fiber takviyeli kompozit malzemeler, düşük yoğunluk ve yüksek mukavemetlerinden dolayı hava araçları ve otomobil endüstrisinde ve özellikle güneş araçlarında daha fazla kullanılır duruma getirilmiştir. Bu uygulamalarda genelde yorulma yükleri kaçınılmazdır. Bu nedenle, son tasarımlarda, başlangıç tasarım kriteri olarak alınan sadece statik mukavemete göre değil yorulma analizi de içermelidir. Taşımacılıkta, özellikle hava araçlarındaki endüstride yapısal malzemelerin performansını artırma isteği yorulma analizini çok önemli bir duruma sokmaktadır [3].

Bütün malzemelerde yorulma hasarı sırası, (1) çatlak başlangıcı, (2) çatlak ilerlemesi, (3) çatlak dağılımı şeklindedir. Geleneksel metalik malzemelerde, çatlak ortaya çıkmadan önce ömrünün çoğunu harcamış olur. Yani, bir çatlak başlar başlamaz hızlı bir şekilde ilerler ve malzemeyi hasara uğratar. Tam tersine, bir kompozit malzeme en düşük gerilme seviyesinde bile bir miktar çevrimden sonra çatlak oluşur ve ömrünün çoğunu çatlak ortaya çıktıktan sonra harcar [2].

FRP (Fiber Reinforced Plastic=Cam Takviyeli Plastik) kompozit malzemeler, iç yapısında bölgesel üç eksenli gerilme yaratan yüksek derecedeki anizotropik yapısından dolayı (fiber ve matris arasındaki farklı poisson oranlarının sonucu olarak) statik veya yorulma yükleri altında çok karmaşık mekanizmalar sergilerler. Yorulma hasarlarının ve sorumlu mekanizmalarının tamamen anlaşılması, yorulma ömrü sınır parametrelerini ortaya çıkarmak kadar daha iyi bir performans için kompozit tasarımında düzenlemeler

yapabilmek açısından çok gereklidir. Yorulma hasarı, genellikle büyük ölçekli hasarlara yol açar, ki bu çatlaklar başlangıçtaki tek çatlak boyunca çoğalır. Kompozit laminatlardaki yorulma hasarı, matris çatlağı, delamination, ara yüzey ayrılması ve fiber kırılması gibi hasar modlarını içeren değişik kombinasyonları kapsar. Her tip hasarın şekli, malzeme özelliğine tabaka sıklığına ve yükleme şekline bağlı olarak değişik şekillerde meydana gelebilir [3].

İdeal şartlar altında hazırlanıp test edilseler bile, kompozitlerin mekanik özellikleri dikkate değer bir dağılıma sahiptir. Geçmişte, çok büyük emniyet faktörleri kullanıldığı için mekanik özelliklerdeki bu değişkenlik nispeten önemsizdi. Ancak günümüzde durum farklıdır. Yüksek performanslı hava araçları için, mekanik özelliklerdeki bu değişkenlik yeni bir anlam kazanır. Özellikle, sistemde hasara uğraması ile felakete yol açabilecek herhangi bir kritik parça varsa, aşağıdaki maddeler güvenilir analiz için gereklidir. (a) uygulanan yük sıklığının geliştirilmesi (b) daha gerçek bir şekilde hasar şartlarının tanımlanması (c) yük ve mukavemetin istatistiksel tanımlanması (d) güvenilirliği hesaba katmak için tasarım kriterini tanımlamak [2].

Yoshiyuki Tomita, Kojiro Morioka ve Masayuki Iwasa yaptıkları araştırmalarında ; karbon takviyeli plastik kompozitlerin eğilme yorulması davranışları ve kırılma mekanizmalarını açıklamak için ortalama 3.5, 4.5, 5.0 ve 5.5 GPa'lık çekme mukavemetine sahip, sürekli karbon fiber takviyeli epoksi laminatlarla (katmanlar) çalışmışlardır. Eğilme yorulması testleri, Schenk tip bir eğilme yorulması makinesiyle ve oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. 0/90°'lik zıt yönlü laminat kompozitlerin yorulma sınırı, sadece laminatlardaki 0°'lik tabakaların bası gerilmesiyle ilgili değil, aynı zamanda test süresince oluşan ısı dağılımı ile de ilgili olduğu belirtilmiştir. Ara yüzey kırılmasına karşı yüksek dirençli laminatlar veya yüksek termal iletkenlikli laminatlarda da yorulma sınırı, 0°'lik tabakalı laminatların basma gerilmesiyle ilgilidir. Ara yüzey kırılmasına karşı düşük dirençli laminatların yorulma sınırı önemli ölçüde azalmıştır. Çünkü test süresince laminatların komşu tabakaları arasında "delamination" yani "tabaka ayrılması" meydana gelmektedir. Dolayısıyla (0°/±45°/90°) yönlü kompozit laminatların yorulma sınırı laminatlardaki (katmanlardaki) 0°'lik tabakaların basma mukavemetiyle ilgili olduğu vurgulanmıştır [1].

T. P. Philippidis ve A. P. Vassilopoulos yaptıkları araştırmalarında ; farklı yönlerde kesilen cam/polyester (CTP) numunelere, statik ve yorulma testleri uygulanmış ve sonuçları verilmiştir. Bu tip kompozit malzeme, rüzgar türbin kanat imalatçılarının el yatırması yöntemiyle ve oda sıcaklığında imal ettiklerine benzerdir. Numuneler farklı yönde ve çok katlı laminatlar $[0/(\pm 45)_2/0]_T$ şeklinde imal edilmiştir. Beş farklı yönde kesilen ve 140 adedin üzerindeki numunelere statik ve yorulma testleri uygulanmıştır. S-N eğrilerine bağlı olarak rijitliğe karar vermek ve gözlenen rijitlik azalmasını belirlemek için basit bir amprik model kullanılmıştır. Bu çalışmada kullanılan numuneler için, yüke bağlı olan E-modülü değişimi de gösterilmiştir [7].

G. Caprino ve G. Giorleo yaptıkları araştırmalarında ; Cam dokuma/epoksi kompozitlere iki farklı gerilme oranı altında, dört noktadan eğilme yöntemi kullanılarak statik ve yorulma testleri uygulanmıştır. Hem statik hem de yorulma testlerinde maksimum hasar, numunenin basma tarafında mikro flambaj ile kendiliğinden başlatılmıştır. Deneysel sonuçlar istatistiksel bir yorulma modeli kullanılarak değerlendirilmiştir. Bu modelin temelinde statik mukavemetteki iki parametrelili Weibull dağılımı vardır. Bu model yorulma üzerinde gerilme oranının etkisini açıklayabilmektedir. Bu ise, tahmin edilen klasik S-N eğrisinin doğruluğu ile mümkün olmaktadır. Bu model ile, yorulmaya tabi tutulan her numunenin özgül mukavemeti değerlendirilmiştir. Ayrıca, ölçülen ve hesaplanan statik mukavemet dağılımları karşılaştırılmıştır. İki dağılım arasındaki eğrilerin sonundaki zayıf uyumdan kaynaklanan bazı farklılıklar değerlendirilmiştir [5].

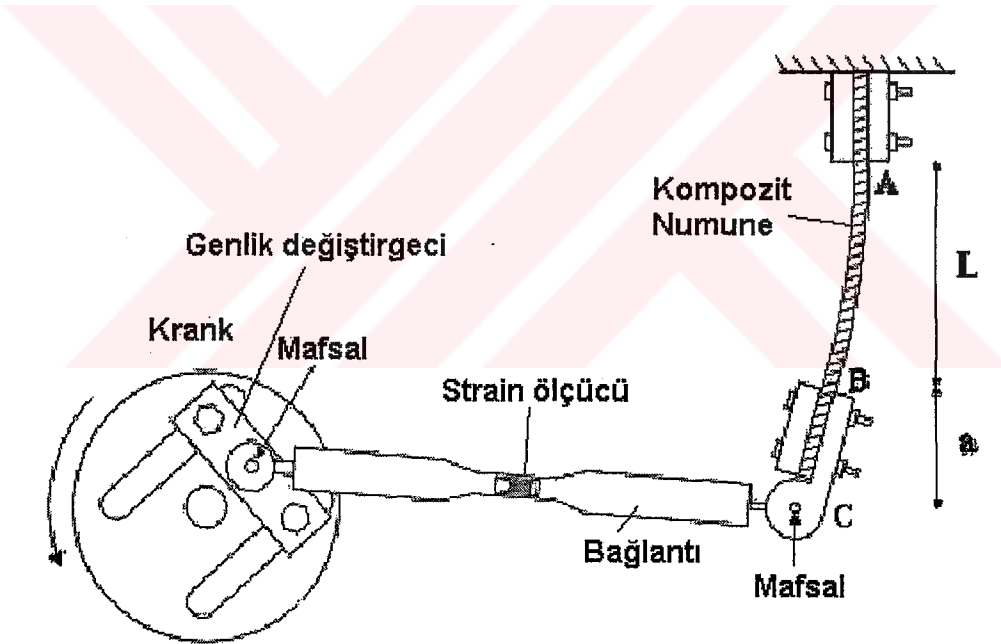
W. V. Paepegem ve W. Degrieck, fiber takviyeli kompozit malzemelerin yorulma dayanımları (ömürleri) üzerine çalışmalar yapmışlardır. Bu çalışmalar, deneysel veriler ve simülasyon programları kullanılarak (sonlu elemanlar paketi ve yarı analitik metot) gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışmadaki kompozit numuneler, dokunmuş cam elyafı / epoksi reçinesi kullanılarak reçine-transfer-kalıpla (RTM) yöntemi ile elde edilmiştir. Tabakaların yerleştirilme yönü ile yükleme yönü arasındaki açı 45^0 dir. Numuneler 8 tabakadan oluşmaktadır ve $[\pm 45]_8$ semboli ile tanımlanır. Numune ölçüleri 145x30x 2.72 mm dir. Deneysel çalışma esnasında kullanılan motorun devir sayısı 185 d/dak dır. Güç, V kayışıyla ikinci bir kasnağa iletilmiştir. Bu esnada kullanılan frekans 2.23 Hz dir. Bu deneysel çalışmada genlik,

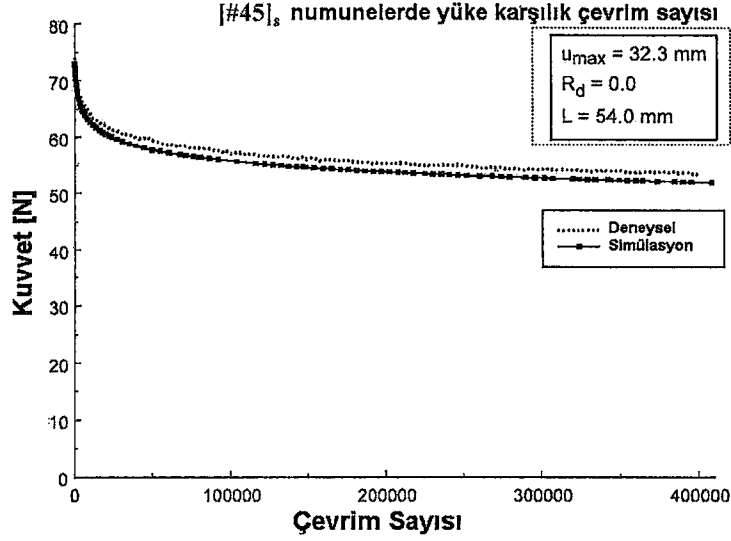
değiştirilebilen ve Şekil 2.1'de görüldüğü gibi ayarlanabilen bir parametredir. Bu mekanizma ile sıfırdan maksimuma doğru, tek yönde veya her iki yönde eğme gerçekleştirilebilmektedir.

Burada şekil değiştirme oranı (R_d), $R_d = U_{min}/U_{max}$ olarak tanımlanmakta ve tek yönde yükleme yapıldığı için $U_{max}=32.3$ mm, $U_{min} = 0$ ve dolayısıyla $R_d = 0$ olmaktadır. Deneysel veriler ve simülasyon sonucunda elde edilen yorulma eğrisi Şekil 2.2 'de verilmiştir.

Öncelikle, eğilme yorulması için Şekil 2.1 'de gösterilen test düzeneği kullanılmıştır. Daha sonra, hem sayısal bir program paketi (Mathcad™) hem de ticari bir sonlu elemanlar paket programı (SAMCEF™) kullanılarak elde edilen sonuçlar kıyaslanmıştır.



Şekil 2.1 Deney cihazının şematik gösterimi

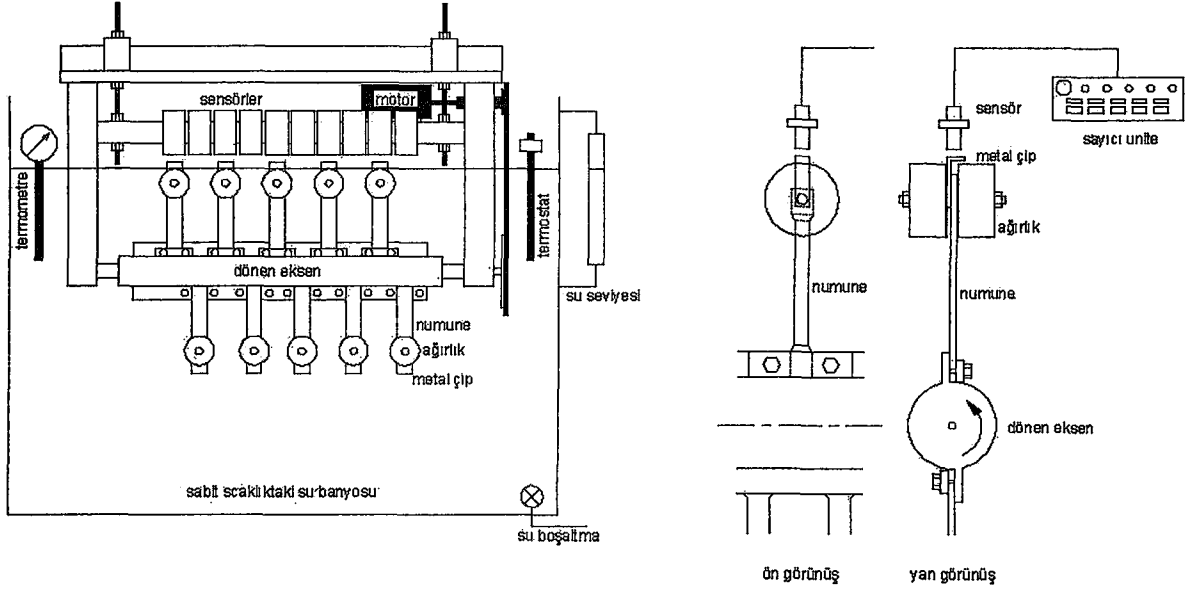


Şekil 2.2 Deney verileri ve simülasyon sonucu elde edilen yük - devir sayısı eğrisi

Sonuçta, bu çalışmadaki deneysel veriler ve bahsedilen yazılımlardan elde edilen sonuçlar, birçok kompozit yapının yorulma hasarlarını modellemeyi ve geriye kalan rijitliklerini tahmin etmeyi sağlamaktadır [4].

H. Y. Kim, T.R. Marrero, H.K. Yasuda ve O.A. Pringle “A Simple Multi-Specimen Apparatus for Fixed Stress Fatigue Testing” isimli araştırmalarında, yorulma deneylerinin zaman alıcı özellikleri ile başa çıkabilmek için, aynı anda on (10 adet) numuneyi test edebilen çok numuneli bir yorulma cihazı (Şekil 2.3) tasarlanmış, imal edilmiş ve test edilmiştir. Numuneler dönen bir eksen etrafına bağlanmış ve gerekli gerilme her bir numunenin diğer ucuna bağlanan ağırlıklar ile uygulanmıştır. Deney yöntemi gerilme kontrollü eğilme yorulması deneyi olarak sınıflandırılmıştır. Deney cihazının performansı üç noktadan eğmeli, ticari bir yorulma deney cihazı ile kıyaslanarak test edilmiştir. Her iki yorulma cihazından elde edilen poly(methylmethacrylate) (PMMA) malzemeye ait gerilme-çevrim sayısı (kırılmaya kadar) değerleri birbiri ile uyumlu sonuçlar göstermişlerdir. Acrylic bone cement malzemenin sabit gerilmede elde edilen yorulma deney sonuçları da yeni cihaz ve ticari cihazdan elde edilen veriler arasındaki uyumu göstermiştir. Deney sonuçları oldukça güvenilir görünmekte ve deney zamanını önemli ölçüde azaltarak uygulanabilirlik göstermektedir. Bu cihazın bone cement ve kompozit malzemelerin yorulma deneyi gibi özellikle düşük gerilme ve düşük frekansın uygulanmak zorunda olduğu yorulma deneylerinde değerli olabileceği söylenmiştir.

Bu çalışmada tasarlanan çok numuneli dönel yorulma cihazı Şekil 2.3'de gösterilmiştir.



a) Yorulma cihazının şematik gösterimi

b) Çevrim sayma ünitesi ve numune bağlama sistemi

Şekil 2.3 Çok numuneli dönel yorulma cihazının ve bağlama sisteminin şematik gösterimi

Dönme halindeki yorulma testlerinde, gerekli olan yük aşağıdaki gerilme formülünden hesaplanarak bulunmuştur.

$$\sigma = \frac{6FL}{BH^2} \quad (2.1)$$

Burada,

σ : uygulanan gerilme, F : gerilmeyi yaratmak için kullanılan yük, L : yükün merkezi ile kırılma bölgesi arasındaki mesafe, B : numune genişliği, H : numune kalınlığıdır.

Uygulanan yük dağılımı ile bu çalışmada kullanılan diğer test şartlarını benzetmek için sürüklenme ve kaldırma kuvveti ihmal edilmiştir [6].

Bu çalışmadaki dönel yorulmanın frekansı 2 Hz olarak kabul edilmiştir. Malzemenin dayanım sınırı 1 milyon çevrim olarak düşünülmüş ve testlere, 1 milyon çevrime gelinceye veya numune kırılıncaya kadar devam edilmiştir.

Bu özelliklere ve sonuçlara göre, özellikle düşük frekans ve düşük gerilme seviyeleri altında yapılan yorulma testlerinde, testlerin zaman alma özelliği ile başa çıkabilme açısından yeni cihazın kullanılabilirliği mümkündür [6].

M. H. Abd Allah, Enayat M. Abdin, A.I. Selmy ve U. A. Khashaba “Short communication effect of mean stress on fatigue behaviour of GFRP pultruded rod composites” adlı yaptıkları çalışmada; hava ve uzay araçları gibi hafifliğe duyarlı uygulamalarda, yüksek mukavemet/ağırlık oranlarından dolayı yüksek performans kompozitleri (FRP=Fiber Takviyeli Plastik) kullanılmıştır. GFRP (Cam Fiber Takviyeli Plastik) kompozitlerinin S-N diyagramları üzerinde ortalama gerilmenin etkisini açıklamak için, standart tek yönlü cam fiber takviyeli polyester kompozit çubukların sabit yer değiştirmeli eğilme yorulması davranışları incelenmiştir. Test makinesinin frekansı 25 Hz’dir. Hasar kriteri olarak, test numunelerinin geri kalan rijitliğinin test başlangıcındaki numune rijitliğinin %70’ine ulaştığı an olarak tanımlanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, ortalama gerilme malzeme sabitlerinden biraz etkilenmiştir (A: S-N eğrisindeki üstel power fonksiyonunun eğimidir). Spesifik rijitlik oranı $EI/(EI)_0$ ve çevrim oranı N/N_f arasındaki ilişki, başlangıçtaki gerilme genliği ve ortalama gerilme değerlerinden bağımsızdır. Çeşitli çevrim ömürleri için GFRP kompozit çubuklar için bir master diyagram ortaya konulmuştur. Başlangıçtaki gerilme genliği ve ortalama gerilme için emniyetli tasarım değerleri ortaya konulmuştur.

Bu çalışmanın hedefi, yönlendirilmiş E-roving cam takviyeli polyester kompozit çubukların eğilme yorulması davranışlarını incelemektir. S-N ilişkilerinin malzeme sabitleri (A ve B), ortalama gerilmenin farklı değerleri için tespit edilmiştir. Standart fiber hacim oranı ($V_f=44.7\%$) olan çubuk numuneler modifiye edilmiş bir pultrüzyon yöntemi ile imal edilmiştir.

FRP kompozitlerin yorulma ömrü, çeşitli ampirik S-N ilişkileri kullanılarak tahmin edilebilir. Bu ilişkiler, denklem (2.2) ve (2.3) görüldüğü gibi üstel veya logaritmik lineer fonksiyonlar olarak ifade edilir.

$$S_a = B(N_f)^A \quad (2.2)$$

$$S_a = B + A \cdot \ln(N_f) \quad (2.3)$$

Hwang ve Han, şekil değişimli hasar kriteri altındaki FRP kompozitlerin yorulma ömürlerini tahmin etmek için teorik bir formül türetmişlerdir.

$$S_a = S_u [1 - (N_f)^A/B] \quad (2.4)$$

Burada; S_u : test edilen malzemenin maksimum mukavemeti, S_a : gerilme genliğidir. Uygulanan gerilme seviyesi olarak, S_a/S_u ve malzeme sabitleri olarak A ve B bilinir. Bu şekilde yorulma ömrü hesaplanabilir.

Ortalama gerilme sıfır ($S_m=0$, gerilme oranı $R=-1$) iken test edilen GFRP pultruzyon çubukların ($V_f = \%44.7$) S-N ilişkisine denklem (2.2)-(2.4) kullanılarak karar verilmiştir [2].

U.A. Khashaba'nın, "Fatigue and Reliability Analysis of Unidirectional GFRP Composite under Rotating Bending Loads" isimli çalışmasında ; tek yönlü cam takviyeli polyeester (GFRP) kompozitlere dönel eğilme yorulması testleri uygulanmıştır. Çeşitli fiber hacim oranlarındaki (V_f) standart numuneler dairesel çubuk formunda hazırlanmıştır. Kompozit çubukların kırılma modları Taramalı Elektron Mikroskopu kullanılarak incelenmiştir. Deneysel yorulma ömür sonuçlarının istatistiksel analizi için 2 parametrelili Weibull dağılımı kullanılmıştır. İlk hasar zamanı kavramına (TTFF) bağlı olan emniyetli tasarım ömrü en yüksek güven seviyesinde ($\gamma=0.99$) ve iki ayrı güvenirlilik değerinde ($R=0.368$ ve 0.99) hesaplanmıştır.

Değişik fiber hacim oranlarındaki GFRP çubuklar için ortalama ömür (%50 artı kalan) için S-N diyagramları oluşturulmuştur. Bu diyagramlar, herhangi bir parçasının hasarında çok büyük problemler yaşayabilecek şekilde tasarımlar yapan tasarımcılar için dikkate değer sonuçlar içermektedir. Bu diyagramlarda 10^7 çevrim için çok keskin olmayan yorulma sonuçları elde edilmiştir. Fiber hacim parametresinin, ortalama ömrün belirlendiği power (üsteli) fonksiyonunun eğimi üzerinde çok fazla önemi yoktur. Farklı V_f oranları için en geniş dağılım 10^5 ve 10^6 çevrimdeki ömür oranlarında görülmüştür. Değişik gerilme seviyelerindeki yorulma ömrünün dağılımı, GFRP kompozitlerin uygulamasında çok önemlidir.

Yorulma özellikleri açısından verilerin istatiksel olarak iyi anlaşılması, kompozit malzemelerin başarılı uygulamaları için şarttır. Çünkü kompozitler, geleneksel malzemelerle kıyaslandığında anizotrop ve birbirinden farklı olma özelliklerinden dolayı istatiksel değerlendirme çok önemlidir. Yorulma ömrü sonuçları, bir olasılık fonksiyonu $F(x)$ ve ilgili kümülatif dağılım fonksiyonları $P_f(x)$ ve $P_s(x)$ kullanılarak istatiksel analizi iki parametrelili Weibull dağılımı kullanılarak incelenmiştir [3].

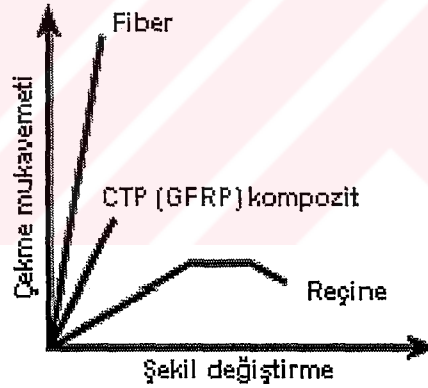


BÖLÜM 3

FİBER TAKVİYELİ KOMPOZİTLER

Fiber takviyeli kompozitler, genel olarak iki veya daha fazla fiber (cam elyaf) malzemesinin plastik reçine içerisine yerleştirilmesi ile elde edilir. Günümüzde, bir çok uygulamalarda temel malzeme olarak kullanılmaktadır. Fiber takviyeli kompozitler, sınırsız değişik şekilde ve sayıda form veya yüzey eldesine imkan verir. Aynı zamanda maliyeti diğer malzemelere göre oldukça düşüktür [8].

Reçinenin fiber ile takviyelendirilmesi, kompozitin mukavemet ve rijitliğinin artmasına yardımcı olur (Şekil 3.1). Cam fiber, karbon fiber, aramid fiber, kevlar gibi çok sayıda ve farklı özelliklere sahip takviye malzemesi vardır. Ancak endüstride en yaygın kullanılanı ise cam fiberdir [8].



Şekil 3.1 Reçineye fiber takviyesinin çekme mukavemetine etkisi [8]

Sonuç olarak, cam fiber takviyeli kompozit malzemelerin (GFRP=CTP), hafiflik, yüksek mukavemet, uzun süre özelliklerini koruma, UV ışınları altında çalışabilme ve iyi kimyasal direnç gibi çok önemli malzeme özelliklerine sahip olduğu belirlenmiştir [8]. Aşağıda cam takviyeli plastik malzemeler için daha ayrıntılı bilgiler verilecektir.

3.1 CAM FİBER TAKVİYELİ PLASTİK MALZEMELER (CTP) (Cam Fiber Takviyeli Kompozitler - GFRP)

Son 30-35 yıldan bu yana elyaf takviyeli termoset reçine ile üretilen ürünler bütün dünyada çok değişik uygulama alanlarında kullanılmaktadır. “Fiberglass” olarak tanınan bu malzeme, genellikle tüm dünyada belli kısaltmalarla ifade edilmektedir [9]. Türkçe ifadesi de Cam Takviyeli Plastik (CTP) olarak yerleşmiştir. İngilizce olarak ise genellikle “Glass Fiber Reinforced Plastic” (GFRP) kullanılmaktadır. Genel olarak cam elyafı ile takviye edilmiş polyester reçineleri ifade etmektedir. Ancak, polyester yerine diğer termoset ve termoplastik reçineler de kullanılabilir. Elyaf takviyeli reçine sistemi, takviye elemanın termoset reçine içersine yayılmasıyla oluşan bir kompozit malzemedir. Keçe veya dokuma şeklindeki elyafı malzemenin katalizlenmiş reçine ile ıslatılıp sertleşmesi beklenerek, kompozit malzeme elde edilir. Bu işlem açık veya kapalı bir kalıpta yapılır [9,10].

3.1.1 Kompozit Malzeme Yapımı

Cam elyafı kompozit malzemeler, takviye malzemesi ve taşıyıcı reçinenin (matrisin) birlikte kalıplanması ile elde edilmektedir. Bu işlem, birçok farklı metotla yapılmakla birlikte, tüm metotlarda geçerli olan esas, cam elyafının, taşıyıcısı reçine ile uygun bir şekilde ıslatılabilmesidir. Sıvı reçinelerde, elyafın ıslanması ve hızı, öncelikle reçinenin viskozitesine bağlıdır. Viskozite ne kadar düşük ise, elyafın ıslanması o kadar daha iyi olmaktadır. Bazen, tam ıslanmanın sağlanması için, sıcaklığın yükseltilmesine de gerek duyulabilir. Katı haldeki matris reçine, erime noktasına kadar ısıtıldığında sıvı hale geçer ve ıslanma, basınç uygulanarak kolaylaştırılabilir [11].

Kompozit'in kalitesi, cam elyafı ve taşıyıcı reçine arasında mükemmel birleşmenin sağlanmasına bağlıdır. Fiziksel özellikler de keza, takviyenin, kompozit içindeki oranına, karışımdaki dağılımına ve yönüne bağlıdır [11].

Matris: Matris, genellikle bir sentetik reçinedir. Termoset ve termoplastik olarak genelde iki tür reçine kullanılmaktadır. Termoset reçineler arasında doymamış polyester ve epoksi reçineler; termoplastik reçineler arasında poliamid, polipropilen, doymuş polyester ve polistiren türevleri en çok kullanılan reçinelerdir.

Takviye Malzemesi : En çok kullanılan takviye malzemesi cam elyafıdır (Kompozitlerin yaklaşık % 95'inde) ve hem termosetlerle, hem termoplastiklerle iyi bir performans sağlamaktadır. Kullanılacak cam elyafı türü, istenilen mekanik özelliklere ve kullanılan kalıplama metoduna bağlı olarak seçilir. Cam elyafı ve reçinenin bir araya getirilmesi sırasında aşağıdaki üç işlemin de sırası ile uygulanması gereklidir [11].

- Elyaf takviyesinin, reçine ile ıslatılması;
- Kompozitin, üretilecek parça boyutlarına göre şekillendirilmesi (kalıplama);
- Termosetlerde polimerizasyon veya polikondensasyon; termoplastiklerde basit bir soğutma ile sertleşmenin sağlanması.

3.1.2 CTP Kullanımının Avantajları

Endüstride CTP' kullanımındaki avantajları kısaca şöyle özetleyebiliriz [9,10] ;

- Termoset
- Avantajlı mukavemet / ağırlık oranı ve sertlik
- Sınırsız kaplama boyutları
- Kolay üretim
- Çok sayıda üretim tekniği
- Küçük sermaye yatırımı (El yatırması için)
- Düşük maliyetle az sayıda üretim olanağı (prototip)
- Tasarım esnekliği
- Diğer malzemelerle bağdaşma özelliği (Takviye amacı ile köpük kullanımı)
- Mükemmel su dayanımı
- Çok sayıda kimyasal maddeye dayanım
- Hava koşullarına ve UV ışınlarına dayanım
- Kendinden renklendirilme olayı
- İstenildiği takdirde yanmazlık özelliği
- İsteğe bağlı olarak ışık geçirgen özellikte üretilebilme olanağı
- Çok iyi elektrik ve termik özellikler

CTP kullanımını ile ilgili bir diğerk faktör de maliyet faktörüdür . Cam Takviyeli Plastik ürünlerde kullanılan reçineler genellikle petrol türevlerinden üretildikleri için fiyatları ham petrol fiyatları ile bağlantılıdır . Bu durumda CTP tüketimi diğerk ekonomik faktörlerin avantajına bağlı olacaktır .

3.1.3 Reçineler

Cam takviyeli plastik üretiminde en çok kullanılan, doymamış polyester reçinelerdir. Bu reçineler, bir polialkol ile bir polikarboksilli asidin reaksiyonu sonucu elde edilen ürünün stiren gibi bir sıvı monomer içinde çözünmesi ile oluşur. Organik peroksit (Metil etil keton peroksit=MEK-P gibi) katalizör kullanılarak ortam sıcaklığında veya ısı altında sertleştirme yapılabilir.

Diğerk önemli reçine sınıfı epoksi reçinelerdir. Polyester reçinelerden kimyasal yapı ve polimerizasyon yöntemi açısından farklılık gösterir. Yeterli miktarda bir sertleştirici ilavesi ile şebeke yapısı (cross-link) oluşur. Bu sertleştirici genellikle poliaminler ve organik anhidritlerdir. Ortam sıcaklığında veya yüksek sıcaklıklarda sertleştirilebilir. Sertleşme sırasında uçucu madde çıkışı yoktur. Polyestere oranla bir diğerk avantajı çekme oranının düşük olmasıdır.

Bir diğerk reçine türü vinilester reçineleridir. Bu reçineler, epoksi reçinelerin kimyasal yapısını polyester reçinelerin sertleştirme sistemi ile birleştirir. Uygun bir doymamış organik asit ile epoksi reçine, polyester reçine haline dönüştürülebilir. Elde edilen polimerin stiren içersinde çözülmesi ile kimyasal dayanım açısından epoksiye yakın, üretim biçimi olarak polyestere yakın bir reçine elde edilir [9,10].

3.1.4 Takviye Malzemeleri

Takviye, genel anlamda sertleşmiş reçinenin mekanik mukavemetini arttıran her türlü elyafı kapsamaktadır. Ancak genelde takviye olarak kullanılan elyaf sayısı oldukça düşüktür. Takviye olarak kullanılan elyaf boyu, kullanılan yöntemeye göre 3 mm' den kilometrelerce uzaklığa kadar olabilir. Başlıca takviye malzemesi, ilerideki bölümde daha ayrıntılı verilen cam elyafıdır . Takviye elemanı olarak kullanılan cam elyafı "E" camıdır ve yüksek mekanik mukavemetine sahip alkali miktarı düşük olan bir cam türüdür [9,10].

Cam elyafı dışında karbon elyafı, akrilik, polyester, asbest, pamuk, naylon ve yün elyafı da takviye malzemesi olarak kullanılmaktadır .

3.1.5 Cam Takviyeli Kompozitler ile Tasarım

Cam elyaf takviyeli plastikler genellikle sınırsız boyut, şekil ve renk olanakları sağlamaktadır. Ancak, herhangi bir ürün üretilmeden önce mutlaka tasarlanmak zorundadır. Bunun için sertleşmiş malzemenin özelliklerinin bilinmesi gerekir. Tasarımcı, her şeyden önce tasarlamak istediği ünitenin bir taslağını yapmak durumundadır. Bu taslak geliştirilerek, malzeme parametreleri ve tolerans limitleri göz önüne alınmak kaydı ile son tasarım haline getirilir. Tasarımı etkileyen faktörler, reçine seçimi, takviye malzemesi seçimi ve kalıplama yöntemidir. Kalıplama yönteminin seçimi ise kalıplama sayısı, üretim verimi, kalıplamanın karmaşıklığı ve boyutlarına bağlıdır [9,10].

3.1.5.1 Malzeme Seçimi

Malzeme seçimi reçine ve takviye elemanının seçimini kapsar. Dikkate alınması gerekli faktörlerden bazıları aşağıda sıralanmıştır [9,10].

- Mekanik ve Fiziksel özellikler ; mukavemet / ağırlık oranı, spesifik yoğunluk
- Çekme, eğilme ve darbe dayanımı. Malzeme yorulması hayati önem taşır mı? Ünite taşıyıcı mı, değil mi?
- Termik Özellikler; yük altında deformasyon sıcaklığı, çalışma sıcaklığı, genleşme katsayısı, rutubet koşulları, alev dayanımı, Kimyasal dayanım.
- Biyolojik,
- Elektrik özellikler, bozulma voltajı, yükleme direnci, yüzey ve hacim direnci, dielektrik sabiti.
- Hava koşulları, UV dayanımı
- Berraklık ve renk
- Hangi spesifikasyona uymak zorunda? Gıda depolaması (FDA approval), Deniz (Lloyd' s Register of Shipping), (Det Norske Veritas), diğer onay mercileri
- Performans testi ve garanti

Sertleştirilmiş polyester ve epoksi reçinelerin tipik özellikleri Tablo 3.1'de verilmiştir.

Tablo 3.1 Sertleştirilmiş Polyester ve Epoksi Reçinelerin Tipik Özellikleri [8,9,10,12]

Özellikler	Polyester	Epoksi
Özgül Ağırlık (gr/cm ³)	1.10 – 1.46	1.2 – 1.3
Eğilme Mukavemeti (Mpa)	60 – 160	110 – 215
Çekme Mukavemeti (Mpa)	40 – 90	50 – 130
Basma Mukavemeti (Mpa)	90 – 200	110 – 210
Uzama Yüzdesi (%)	< 5	< 9
Çekme Modülü (Gpa)	2 – 4	3 – 4.5

3.1.6 Polyester Reçineler

Polyester reçineler iki ana grupta toplanır [9]

1. Doymuş polyesterler
2. Doymamış polyesterler

Doymuş polyester reçineler polietilen teraftalat veya terilen gibi termoplastik özellik gösteren ve enjeksiyon kalıplamada ve elyaf üretiminde kullanılan reçinelerdir .

Doymamış polyester reçineler ise, uygun bir katalizör ile “cross-link” (şebeke yapısı) oluşturan termoset özellikli reçinelerdir. Cam takviyeli plastik üretiminde genellikle doymamış polyester reçine kullanılır ve değişik amaçlar için, değişik özellikte doymamış polyester reçine türleri geliştirilmiştir. Bu çalışmada “polyester reçine” terimi “doymamış polyester reçine “ anlamında kullanılmıştır .

Polyester reçine üretiminde kullanılan başlıca maddeler, bir dibazik organik asit veya anhidridi ile bir dihidrik alkol (Glikol) dur. Termoset reçine içinde polimer zincirinin cross-link yapabilmesi için dibazik asidin bir bölümünde doymamış grup veya çift bağ bulunması gerekir. Ancak, doymamışlık, aromatik olmayan bir madde ile sağlanmalıdır. Aksi takdirde, cross-link yine sağlanmaz. Örneğin stiren (vinil benzen) peroksit katalizör eşliğinde cross-link yaparken, benzer halkası bozulmaz, yalnızca vinildeki çifte bağ açılır [9]

Basit bir polyester reçine propilen glikol, maleik anhidrid (doymamış) ve ortoftalik anhidrid (doymuş) ile hazırlanabilir. Kullanılan değişik cins glikol ve dibazik asitlerle, değişik özelliklere sahip polyester reçinelerin elde edilmesi mümkündür. Polyester reçine içinde ayrıca stiren monomeri bulunur. Bu monomerin rolü hem polyester zinciri için

çözücü teşkil etmek, hem viskoziteyi düşürmek, hem de cross-link' i sağlamaktır [9]. Sertleşme sırasında, stiren monomeri, doymamış gruplarla birleşerek polyester zincirlerini birbirine bağlar ve cross-link oluşturur.

Polyester reçineler ticari olarak değişik cins ve türde bulunmaktadır. Bunları şöyle sıralayabiliriz ; Jelkot reçineler, Genel amaçlı reçineler, Kimyasal dayanımlı reçineler, Alev geciktirici reçineler, Stiren buharlaşması az olan reçineler, Düşük çekmeli reçineler, Özel amaçlı reçineler ve Döküm reçineler. Değişik tür reçinelerin özellikleri Tablo 3.2'de görülmektedir [9,10,12] .

Tablo 3.2 Değişik tip reçinelerin özellikleri

Polyester Reçine Tipi	Dökme Reçine Özelliği					Laminat Özelliği			
	Eğilme Day. (MPa)	Çekme Day. (MPa)	Çekme Modülü (GPa)	Uzama Yüzdesi (%)	Yük Altında Deformasyon Sıcaklığı (°C)	Cam (%)	Eğilme Day. (MPa)	Çekme Day. (MPa)	Çekme Modülü (GPa)
Ortoftalik	100	65 – 75	3.2	2.0 – 4.0	55 - 110	30	150	90	7
İzoftalik	140	70 – 85	3.5	3.5	75 – 110	30	230	120	8
Neopentil Glikol	130	70	3.4	2.4	110	30	170	90	7
İzoftalik / Neopentil Glikol	130	60	3.4	2.5	90 – 115	30	160	90	7
İzoftalik / HET Asit	85	55	3.2	2.9	70	30	150	90	7
HET Asit	80	40 – 50	3.2	1.3 – 4.0	55 – 80	30	150	85	7
Bisfenol A	130	60 – 75	3.2	2.5 – 4.0	120 – 136	30	170	90	7
Klorlu Parafin	110	50 – 60	3.4	1.2 – 4.8	55 – 80	30	140	90	7
İzoftalik / Klorlu Parafin	90	60	2.0	4.8	50	30	140	100	7

3.1.7 Monomerler

Monomerler iki amaçla kullanılır [9,10,13]

1. Reçinenin viskozitesini düşürecek şekilde bir çözücü fonksiyon göstermesi
2. polyester zincirinin cross-link birbirine bağlanmasının sağlanması

Bu amaçla, düşük viskovitesi, düşük fiyatı ve kolay bulunabilirliği nedeniyle en çok kullanılan monomer **stiren**' dir. Bir diğer monomer, daha berrak ve ultraviyole stabilitesi aranan reçinelerde kullanılan metil metakrilat ve n-bütül metakrilat' dır. Tablo 3.3'de değişik monomerlerin özellikleri görülmektedir [9,10].

Tablo 3.3 Bazı monomerlerin özellikleri

	Spesifik Yoğunluk (20 °C) (gr/cm ³)	Kaynama Noktası	Alev Alma Noktası	25 °C'de Buhar Bas. (mmHg)	Kırılma İndisi	25 °C' de Viskozite (mPas)	Sertleşmede Hacimsel Çekme %
Stiren	0.902	145	31	6	1.5439	0.75	17
a-Metil Stiren	0.906	165	58	-	1.5359	0.94	-
Kloro Stiren	1.094	187	80	1	1.5611	0.7	12
Vinil Tolien	0.896	167	60	2	1.5393	0.77	12.6
Divinil Benzen	0.908	195	24	-	1.5748	0.98	-
Metil Akriyat	0.952	80	10	-	1.4020	0.50	-
Metil Metakriyat	0.943	100	10	38	1.4118	0.84	21
n-Bütül Akriyat	0.89	145	48	10	-	0.9	-
Diallil Ftalat	1.13	290	166	1	1.519	9.0	11.8
Triallil Siyanürat	-	150	-	-	1.5069	-	-

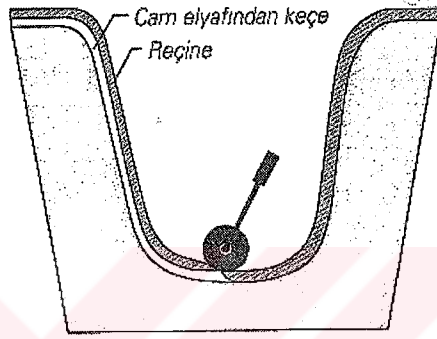
3.2 CAM TAKVİYELİ KOMPOZİT MALZEME ÜRETİM YÖNTEMLERİ

Sıvı termoset reçinelerin kullanımı, "El Yatırması", "Püskürtme", "Elyaf Sarma", "Pultruzyon", "Devamlı Levha", "Santrifüj Kalıplama" ve "Reçine Enjeksiyonu" gibi kalıplama metotları ile, uzun yıllardan beri takviyeli plastik endüstrisinin temelini oluşturmaktadır. Sıvı reçine ve takviye malzemesi ile, basınç altında uygulanan kalıplama metodu; "El Yatırması", "Püskürtme" veya "Reçine Enjeksiyonu" gibi düşük üretim kapasiteli kalıplama metotları ile, yüksek üretim kapasiteli SMC ve BMC metotları arasındaki boşluğu doldurmaktadır [9,10,11].

Az sayıda üretim için açık kalıplama metotları ; El yatırması yöntemi (Wet Hand Lay-Up) ve Püskürtme (Spray-Up) yöntemidir. Orta kapasiteli endüstriyel üretimler için kapalı kalıplama metotları ; Reçine enjeksiyonu metodu (Resin Transfer Moulding – RTM) ve Düşük basınçlı pres metodudur. Yüksek kapasiteli endüstriyel metotlar ise ; Hazır kalıplama pestili (SMC) metodu, Hazır kalıplama hamuru (BMC, DMC, TMC, CIC) metotları, Elyaf sarma metodu, Santrifüj kalıplama metodu, İki film arasında devamlı kalıplama metodu ve Pultruzyon (Profil çekme) metodudur. Bu metotlardan bazıları aşağıda açıklanmıştır. Diğer metotların ayrıntıları ise Literatür [9,10,11]'de bulunmaktadır.

3.2.1 El Yatırması Yöntemi (Wet Hand Lay-Up)

Kırılmış demetten keçeler, istendiği takdirde fitil dokuma katları ile beraber değişimli olarak, kalıp üzerine yerleştirilir ve sıvı reçine, el ile dolgun hale gelinceye kadar cam elyafı kat veya katlarına emdirilerek şekillendirilir. En çok kullanılan reçine, polyester olmakla birlikte vinilester, epoksi veya soğukta sertleşen fenolik reçineler de son üründe aranan sipesifik özelliklere bağımlı olarak kullanılmaktadır [9,10,11,13,14]



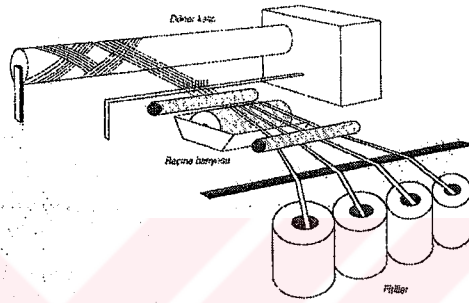
Şekil 3.2 El Yatırması Yöntemi (Wet Hand Lay-Up)

3.2.3 Reçine Enjeksiyonu Metodu (Resin Transfer Moulding – RTM)

Reçine Transfer Metodu (RTM) adı ile de tanınan Reçine Enjeksiyonu metodu, jelkötlu veya jelkotsuz her iki yüzeyi düzgün parçaların kalıplanmasında sık kullanılan bir metottur. Takviye malzemesi olarak kullanılan, keçe veya keçe+dokuma kombinasyonu, kalıp boşluğunu dolduracak şekilde önceden hazırlanıp kalıba yerleştirilerek kalıp kapatılmaktadır. Her iki halde de takviye malzemesini oluşturan lifler, reçinede geç çözünen bir bağlayıcı ile birbirine bağlanmıştır. Böylelikle kapatılmış kalıba enjekte edilecek reçinenin, lifleri sürüklemesi önlenmektedir. Aynı zamanda düşük basınçta uygulanan reçine enjeksiyonu, takviye malzemesini daha iyi ıslanmasını sağlamaktadır. Reçine enjeksiyonu, soğuk, ılık veya en çok 80°C' ye kadar ısıtılmış kalıplarda uygulanabilir. Bu metotta ayrıca kısmı vakum uygulanarak, kalıp içindeki havanın tahliyesi kolaylaştırılmakta ve reçinenin cam elyafına daha kolay emdirilmesi sağlanabilmektedir. İleriki bölümlerde bu metot daha detaylı anlatılacaktır [11,13]

3.2.4 Elyaf Sarma Metodu

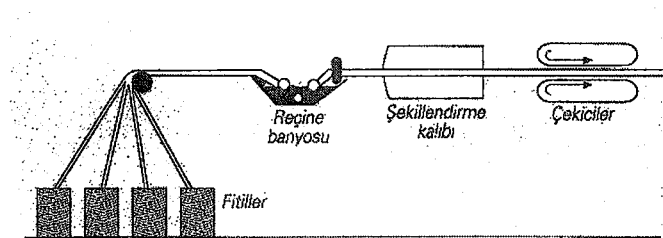
Devamlı cam elyafından fitiller, sıvı reçine ile ıslatıldıktan sonra, eksenini etrafında dönen bir kalıp üzerine, önceden belirlenmiş hatve aralığı ile sarılır. Fitiller, kalıp yüzeyine değişik açılarla sarılabilmekte ve farklı mekanik özellikler sağlanabilmektedir. Silo ve depo gibi silindirik ürünlerde sarma tekniği ile birlikte püskürtme kullanılmakta, kalıp yüzeyini çevresel olarak sarılan fitil katı üzerine cam elyafı katılarak püskürtülür. Böylece bir kat fitil, bir kat kırılmış cam elyafı değişimli olarak kalıplanmaktadır [9,10,11,13]



Şekil 3.3 Elyaf sarma metodu

3.2.5 Pultrüzyon (Profil Çekme) Metodu

Bu metot ; çubuk, köşebent, T ve U kirişler, içi boş tüpler, kare kesitli çubuklar gibi her türlü içi boş ve/veya dolu profilin, sürekli olarak kalıplanması için kullanılmaktadır. Sisteme beslenen devamlı takviye malzemesi reçine banyosundan geçirildikten sonra 120-150°C' ye ısıtılmış şekillendirilme kalıbından geçirilerek, sertleşmesi sağlanır. Kalıplar genellikle krom kaplanmış veya ayna parlaklığında polisaj uygulanmış çelik malzemeden yapılmaktadır. Devamlı cam elyafı fitil kullanıldığından, takviye yönünde çok yüksek mekanik mukavemet elde edilir [9,10,11,13]



Şekil 3.4. Pultrüzyon (Profil Çekme) metodu

3.3 REÇİNE ENJEKSİYONU İLE KALIPLAMA METODU (Resin Transfer Moulding = RTM)

Reçine enjeksiyonu yöntemi, ıslak kalıplama ile soğuk pres yöntemi arasında bir yöntemdir . CTP ürünün her iki yüzünün de düzgün olmasını sağlar. Çift cidarlı bir kalıp içersine cam elyafi yerleştirilir ve bir veya birkaç enjeksiyon deliğinden polyester, kalıp içine yaklaşık 1 atmosferlik bir basınçla verilir [9,11,13,14]. Cam elyafının polyesterle ıslanması tamamlanınca reçine fazlası, tahliye borularından atılır.

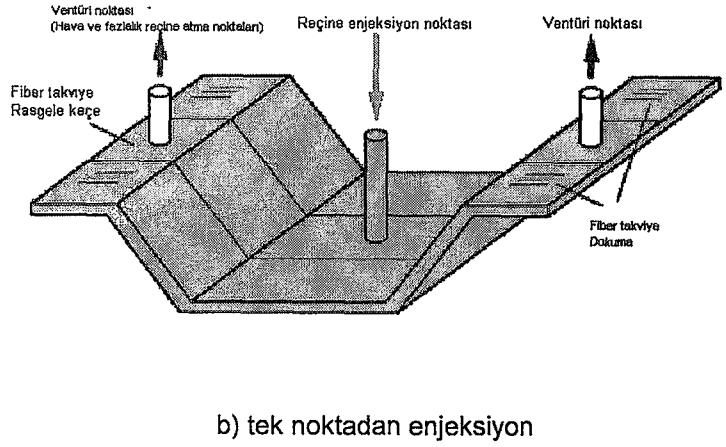
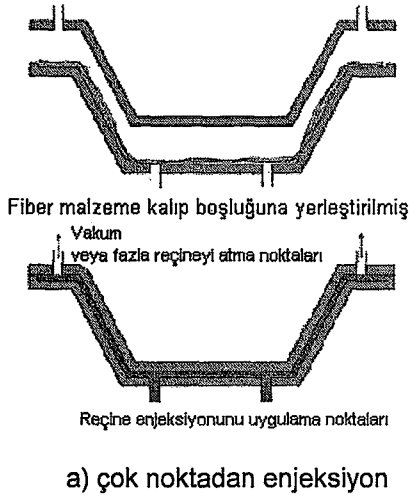
Bu yöntemde kullanılan cam elyafi ise, ya bağlayıcısı geç çözünen keçe olmalı, ya da devamlı elyafli keçe olmalıdır. Aksi halde enjeksiyon noktası etrafındaki cam elyafi, polyester ile birlikte sürüklenebilir [13,14].

Kullanılan reçinenin de düşük viskoziteli olması, cam elyafının çabuk ve tam ıslanması açısından gereklidir [13].

Önceleri, ürün el yatırması veya spray – up metotları ile üretildikten sonra, üzerine bir PET film seçilerek ikinci yüzeyin de düzgünleştirilmesi sağlanmış ; daha sonra ise, iki kalıp arasına cam elyafi takviyesi yerleştirildikten sonra, kalıp boşluğuna polyester enjekte edilmesi metodu uygulanmıştır. Böylece, her iki yüzü düzgün endüstriyel ürünlerin kalıplanabilmesi sağlanmıştır. Ancak kalıpların yüksek basınca dayanabilecek ağır bir konstrüksiyon gerektirmesi, enjeksiyon sırasında bazen hava boşlukları oluşması, kalıp sızdırmazlığının sağlanması gibi sorunları çözmek amacı ile de, düşük basınçlı bir pompa ile reçineyi kalıp içine aktarırken, diğer taraftan da vakum uygulayarak polyesterin kalıp içine kolaylıkla yayılmasını sağlamak üzere bir başka metot uygulanmaya başlanmıştır [13].

Kapalı kalıplar içine reçinenin aktarılması içeren “Reçine Enjeksiyonu” , “Vakum Destekli Enjeksiyonu” (VARI), (VARTM), “RIM” ve “SRIM” , “TERTM” ve “SCRIMP” metotlarının tümünü kapsayacak şekilde bir isim altında , RTM (Resin Transfer Moulding) metodu olarak adlandırılır .

Bu metotlarla, 1 ile 4 atmosfer arasında değişik düşük basınçlar kullanılır. Parça boyutuna ve kullanılan cam elyafi türüne bağlı olarak, 1.5 mm ile 20 mm arasında cidar kalınlığı ile ağırlıkça %23 ila %68 arasında cam elyafi takviyesi oranı sağlanabilmektedir [13].



Şekil 3.5 RTM metodu

3.3.1 RTM Metodunun Avantajları

RTM Metodunun en önemli avantajı kalıplanan CTP ürünlerin her iki yüzünün de düzgün olarak elde edilebilmesidir. Bu avantajının yanı sıra [9,13,14]

- Sabit şekil ve ağırlıkta ürün elde etme olanağı
- Tek kalıpta üretilen ürünlerden daha kaliteli ürün elde etme olanağı
- Takviye elemanları ve diğer parçaların tek işlemde eklenebilme olanağı
- Kapalı kalıp kullanılması nedeni ile stiren buharlaşmasının azalması
- Sertleşmenin ortam sıcaklığından fazla etkilenmemesi
- Daha temiz çalışma ve az fire verme olanağı
- İşçilik maliyetinde azalma
- Gerek kalıp maliyeti, gerek kullanılan ekipmanın basit ve nispeten ucuz olmaları nedeniyle, ilk yatırım maliyeti düşüktür.
- Uygun kalıp ve malzeme kullanıldığında, reçine zengin bir “A” sınıfı yüzey düzgünlüğü sağlanabilmektedir.
- Girift kalıplar için de uygulanabilmektedir.
- Büyük boyutlu ve karmaşık parçalar RTM metodu ile kalıplanabilmektedir.
- RTM Metodu ile yapılan kalıplarda, sandviç konstrüksiyondaki ürünler tek işlemde kalıplanabilmektedir.

- Ürünün kalıplanması sırasında, değişik bölgelerde farklı mekanik dayanım sağlamak amacıyla, farklı nitelikte, miktarda ve farklı yönlendirilmiş cam elyafı takviye türleri kullanılabilir .
- Cam elyafı takviyesinin kalıp içinde sabit kalması sayesinde kompozit içindeki dağılımı optimum olmaktadır.
- Kalıplama sırasında, bölgesel olarak ve/veya parçanın tamamında reçine/cam oranı ayarlanabilmekte ve kontrol altında tutulabilmektedir.
- Ürünün farklı bölgelerinde, farklı cidar kalınlıkları sağlanabilmekte, ayrıca, gömme parçalar kolaylıkla ürün bünyesine alınabilmektedir.
- Malzeme ölçümündeki hassasiyet sayesinde, malzeme fireleri azalmakta ; özellikle endüstriyel boyuttaki kalıplamalarda büyük önem taşıyan “tekrarlanabilirlik” özelliği sağlanabilmektedir.
- Egzotermik reaksiyon sonucu, polyesterin sertleşmesi sırasında oluşan ısı, aynı zamanda kalıbı da ısıtacağından, enerji tasarrufu ile kalıplama süresince avantaj sağlamaktadır.
- Uygun pompa sistemi kullanılarak, polyester reçine ile kalıplama yapılabilmektedir.
- İster reçine enjeksiyonunda olduğu gibi, iki parçalı kalıpla çalışılsın, ister kalıp ve film arasında vakum uygulansın, sistem kapalı olduğu için, kullanılan polyester içindeki stiren monomeri buharlaşacak bir ortam bulamamakta, dolayısı ile, açık kalıplama metotlarında olduğu gibi ortam havası stiren ile kirlenmemektedir.
- Kalıplama sırasında kullanılan reçine içine özel katkıları ve dolgular katılarak, “alev geciktiricilik”, “Low Profile”, “düşük çekme” gibi özellikler, RTM ile kalıplara CTP ürüne kazandırılabilir .

3.3.2 RTM Metodunda Kullanılan Malzemeler

3.3.2.1 RTM için Cam Elyafı :

RTM metodunda her türlü cam elyafı dokuma çeşidi kullanılabilir. Bunların dışında, dokuma/keçe kombinasyonları ; çok katlı, tek yönlü veya çok yönlü cam elyafı takviyeleri ile kontinü keçe, uzun demetli keçe ve ayrıca “Preform” adı verilen, önceden

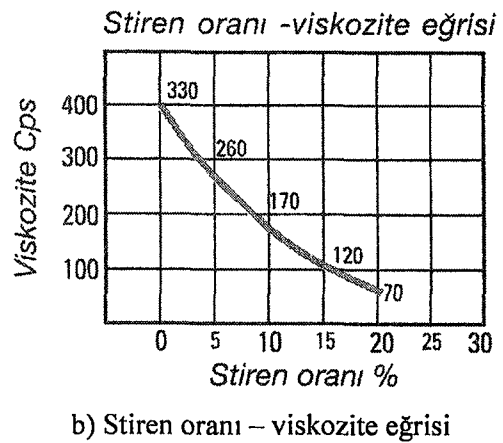
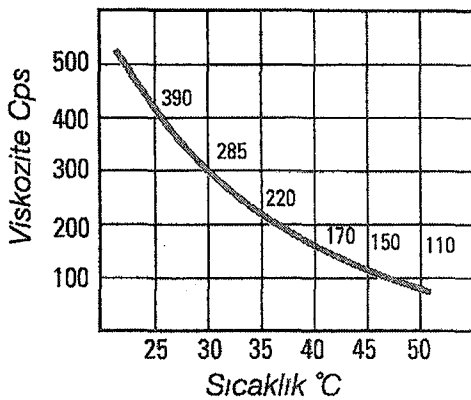
kalıplanacak ürünün şekline uygun olarak şekillendirilmiş bir cam elyafı takviyesi de kullanılmaktadır [9].

Burada önemli olan, elyaf takviyesinin reçine geçirgenliği ve sıkışabilme özellikleridir. Yüksek bir reçine geçirgenliği, gerek pompa basıncını, gerek kalıplama süresini kısaltmaktadır. Sıkışabilme özelliği, cam oranının ve ıslanma hızının ayarlanması gibi parametreleri etkilemektedir [9,14].

3.3.2.2 RTM için Reçineler :

RTM Metodunda kullanılacak optimum bir reçinenin özellikleri aşağıdaki tabloda verilmektedir. RTM metodunda en yaygın olarak kullanılan reçine türü polyesterdir. Bunun yanında, epoksi ve vinilester reçineler de çok kullanılmaktadır [9].

Reçinenin düşük viskozitede kullanılması sonucunda enjeksiyon basıncı azalmakta ve cam elyafı takviyesi daha kolay ıslanmaktadır [9,13]. Polyester reçinenin viskozitesi, içine bir miktar stiren katarak düşürülebileceği gibi, ısıtılarak da düşürülebilmektedir. Ayrıca, düşük viskoziteli RTM polyesteri de endüstride kullanılmaktadır. Şekil 3.6'da verilen grafiklerde, sıcaklık artışı ile, polyester viskozitesinin nasıl değiştiği ve polyester içine değişik oranlarda stiren ilavesinin viskoziteyi ne şekilde etkilediği, örnek olarak Cam Elyafı Sanayii A.Ş.'nin bir ürünü Neoxil CE 92 N8 polyesteri değerleriyle hazırlanan "sıcaklık/viskozite eğrisi" ve "stiren oranı/viskozite eğrisi" üzerinde görülmektedir [13].

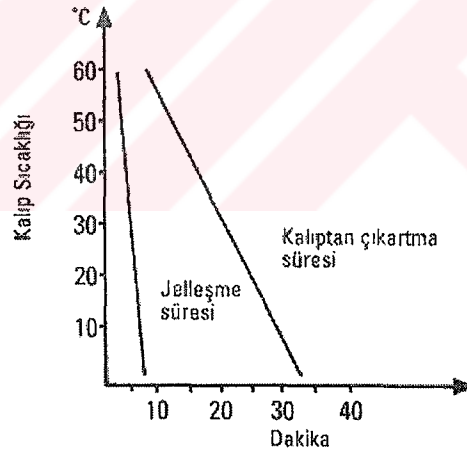


Şekil 3.6 Sıcaklığın ve stiren oranının viskozite üzerindeki etkisi [13]

Optimum bir RTM reçinesinin özellikleri [13] ;

- Viskozite < 200 Cps olmalı
- Sertleşme Sıcaklığı < 75 °C olmalı
- Sertleşme Süresi < 30 dakika olmalı
- Elyaf bağlayıcısı ile uyumlu olmalı
- “Port Cure” gerektirmemeli
- Sertleşme sırasında yan ürün vermemeli

RTM kalıplaması sırasında, kalıptan çıkartma süresinin, genel olarak, jelleşme süresinin dört katı olduğu kabul edilir. Bu ampirik bir yaklaşım olmakla birlikte, deneysel uygulamalar da benzer sonuç vermektedir. Aşağıdaki Şekil 3.7’de genel amaçlı bir polyester reçinenin jelleşme süresi ile kalıptan çıkartma süresi arasındaki bağıntı görülmektedir [13].



Şekil 3.7. Kalıp sıcaklığına bağlı olarak jelleşme ve kalıptan çıkarma süresi

RTM metodu ile kalıplama yapılırken, değişik polyester hazırlama formülasyonları kullanılabilir. En uygun formülasyon, kalıplama koşullarına bağlı olarak, deneme yanılma metodu ile üretici tarafından saptanmalıdır. Genel bir fikir vermek üzere, tipik bir polyester hazırlama formülü, değişik kalıplama koşulları öngörülerek, aşağıdaki Tablo 3.4’de verilmektedir [13].

Tablo 3.4 Tipik bir polyester hazırlama formülü

	Kısım	Kısım	Kısım	Kısım
Polyester Reçine	100	100	100	100
Kalsit	0	30	100	70
Kobalt Naftanat	0.3	0.3	0.3	0.3
Dimetil Anilin	0.3	0.3	0.5 (%5'lik)	0.5 (%5'lik)
MEK Peroksit	2	2	1.6 – 2	2 – 2.8
İnhibitör	0.1	0.1	0.05 – 0.5	0.05 – 0.1
İç Kalıp Ayırıcı	0.2 – 1	0.2 – 1	0.2 – 1	0.2 – 1
Kalıp Sıcaklığı	Oda – 60 °C	Oda – 60 °C	Oda – 60 °C	Oda – 60 °C

BÖLÜM 4

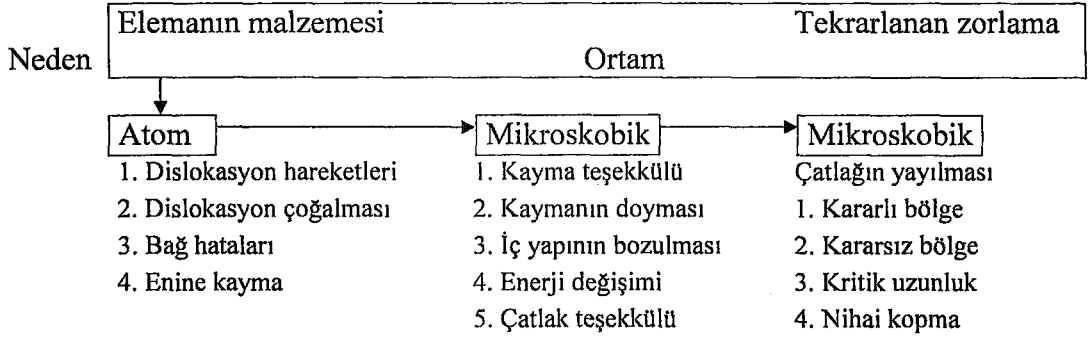
YORULMA OLAYI

Değişken zorlamalar altında malzemenin iç bünyesinde meydana gelen ve kopmasına yol açan değişikliklere “yorulma” denir. Ancak değişken zorlamaların darbeli veya dinamik zorlamalardan ayırt edilmesi gerekir. Değişken zorlama yükün veya gerilmenin zamana göre yönünü veya değerini değiştirdiği zorlamadır. Darbeli zorlama ise, yükün ani olarak uygulandığı zorlamadır. Her iki zorlamada malzemenin iç bünyesinde meydana gelen ve kopmasına yol açan değişiklikler farklıdır [15].

Değişken zorlamada malzemenin iç bünyesinde meydana gelen değişiklikler, N ile simgelenen yük değişme sayısına bağlıdır. Bu bakımdan alçak ve yüksek yük değişme sayılarına tekabül etmek üzere değişken zorlamalar iki bölgeye ayrılır. Kesin bir değer olmamakla beraber $N \leq 10^4$ olduğu bölge alçak yük değişme sayılarını (Low Cycle), $N > 10^4$ olduğu bölge yüksek yük değişme sayılarını (High Cycle) kapsar [15]. Alçak yük değişme sayısında meydana gelen kopma, statik kopma gibidir. Dolayısıyla, yukarıda bahsedilen ve statik kopmadan tamamen farklı olan yorulma, yüksek yük değişme sayılarının etkisi altında meydana gelen bir olaydır.

Yorulma olayının teşekkülü tam olarak bilinmemekle beraber, plastik şekil değiştirmelerin önemli rol oynadığı kabul edilir. Bununla beraber yorulmanın, çatlak oluşması, çatlak yayılması ve malzemenin kopması gibi üç kademe meydana geldiği düşünülmektedir.

Atom mertebesinde bir hatanın civarında meydana gelen plastik şekil değiştirmeler kayma şeritlerinin oluşmasına sebep olurlar ve tersinir olmadıklarından değişken yükün etkisi altında mikroskobik seviyede bir çatlak meydana getirirler. Yük sürekli olarak değiştiğinden çatlak yayılması başlar ve kalan kesit alan yükü taşıyamayacak bir değere ulaştığında kopma meydana gelir. Yorulma olayının başlangıcını etkileyen faktörler aşağıdaki şekilde verilmiştir.



Şekil 4.1 Yorulma olayının başlangıcını etkileyen faktörler

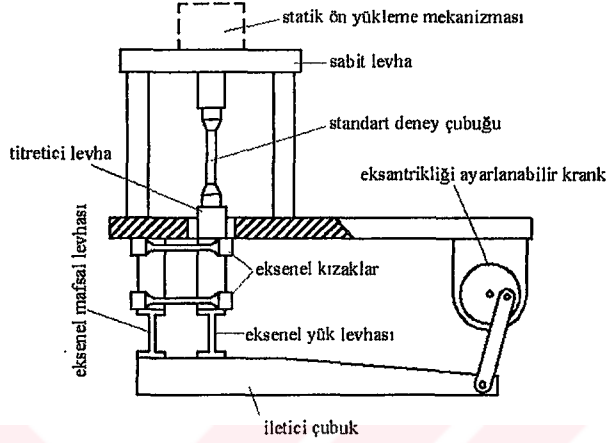
Makine elemanlarının genellikle değişken zorlamalara maruz kaldığı düşünürse, makine konstrüksiyonunda yorulma olayının önemi kendiliğinden ortaya çıkar. Bu çalışmada da değişken zorlamalar altında çalışan vantilatör ve rüzgar türbin kanatlarının malzemesi olarak düşünülen cam-fiber takviyeli polyster kompozitlerinin yorulma davranışı incelenmiştir.

4.1 MALZEMELERİN YORULMA MUKAVEMET SINIRLARI

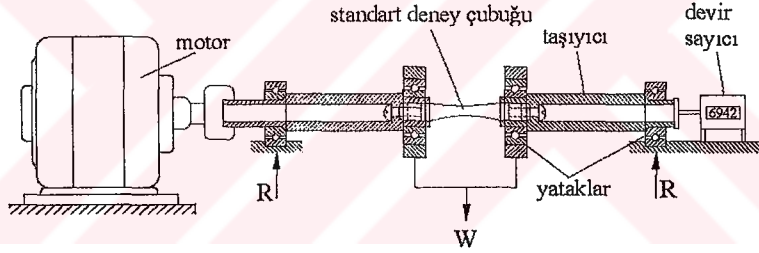
Statik zorlamada olduğu gibi burada da malzemelerin yorulma mukavemet sınırları deney yolu ile tayin edilir. İlk defa 1852 ile 1858 yılları arasında **Wöhler** tarafından yapılmış olan bu deneyler günümüzde gerek araç ve gerekse yöntem bakımından büyük gelişmeler kaydetmiştir [15].

Genellikle yorulma deneyleri, aksenal (çekme-basma ve eğilme), burulma ve bileşik zorlamaları meydana getiren deney makinelerinden yapılabilir. Ancak pratikte en çok aksenal zorlama oluşturan deney makineleri kullanılmaktadır. Bunlar çekme-basma (Şekil 4.2) ve eğilme deney makineleri olmak üzere iki gruba ayrılabilir. Eğilme deneyleri, dönen standart deneme çubuklu eğilme (Şekil 4.3) ve titreşimli eğilme (Şekil 4.4) deney makinelerinde yapılır. Dönen standart deneme çubuklu eğilme deney makineleri, eğilmeye maruz kalan ve aynı zamanda dönen bir elemanın kesitinde, yükleme sabit olsa dahi, tam değişken gerilmelerin meydana geldiği düşüncesine dayanmaktadır. Bundan dolayı bu makinelerde (Şekil 4.3) dönmekte olan standart deney çubuğu sabit bir yükte zorlanmaktadır [12,15,16].

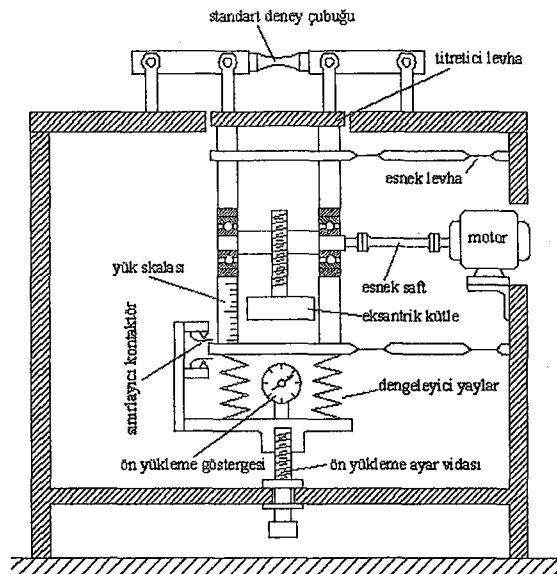
Yükün değişme tarzına gelince, pratik uygulamalarda en çok periyodik değişen yükler kullanılmaktadır. Çekme-basma ve titreşimli eğilme deney makinelerinde herhangi bir periyodik değişme tarzı meydana getirilebilir. Dönen standart deney makinelerinde yapılan yorulma ile, tam değişken ($\sigma_0=0$) zorlama tarzı elde edilir.



Şekil 4.2 Eksenel çeki-bası gerilmeleri uygulayan, sabit genlikli yorulma cihazı [12,15,16]



Şekil 4.3 Numunenin dört noktasına kuvvet gelen ve dönen eğme gerilmeleri uygulayan yorulma cihazı "Schenk (Simplex) modeli yorulma cihazı [12,15,16]



Şekil 4.4 Düzlemsel eğme gerilmesi uygulayan "Sonntag" modeli yorulma cihazı [12,15,16]

Sabit bir ortalama gerilmenin üzerine (σ_0 =sabit) başka deneme çubukları ile ve her defasında değişik gerilme genliği bindirilerek elemanın kopuncaya kadar olan N sayıda yük değişmesi tespit edilir. σ_g genlik değeri düşey eksen ve N değeri ise yatay eksen olmak üzere bir eksen takımında deney sonuçlarını grafik olarak temsil etmekle, σ -N veya Wöhler adını taşıyan diyagramlar elde edilir. Bu diyagramların yatay eksenleri logaritmik bir ölçekle çizildiği, yani N yerine logN konulduğu takdirde, sonuçlar daha ilginç olarak görülür [15].

Değişken zorlanmanın etkisi ancak $N \geq 10^3$ yük değişme sayısından sonra başlar. Bu sebepten $N=0$ ile $N=10^3$ değerleri arasındaki zorlama statik zorlama olarak kabul edilir [15].

Yorulma kopması, malzemenin kesme sınırı σ_{AK} 'nın altında bulunan gerilmelerde gerçekleşir [15].

Gerilme genliği σ_g azaldıkça, yük değişme sayısı N artar ; şöyle ki, belirli bir gerilme değişme sayısı N_0 için malzemenin hiç kırılmaksızın devamlı olarak dayanabileceği bir minimum gerilme genliğine, o malzemenin “sürekli mukavemet sınırı” adı verilir. Böylece bu diyagramlar yardımı ile yorulma değerlerini ifade etmek mümkün olur. Buna göre:

Elemanın ömrü N : Değişken zorlamaya maruz kalan elemanın kopuncaya kadar geçen zamandır. Ömür, yorulma olayında yük değişme sayısı N ile ifade edilir [15].

Yorulma mukavemeti σ_{DN} : Belirli bir N yük değişme sayısında, kopma olmaması şartı ile elemana tatbik edilen maksimum gerilme genliğidir [15].

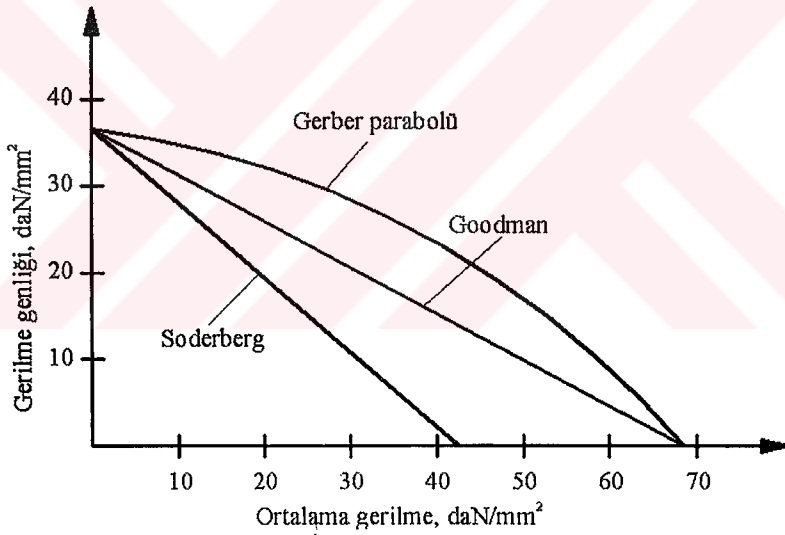
Sürekli mukavemet sınırı σ_D : Çok büyük, pratik bakımdan sonsuz olarak kabul edilen N_0 yük değişme sayısında kopma olmaksızın elemana uygulanan maksimum gerilme genliğidir. Çeliklerde $N_0=10^6$ ila 10^8 değerleri arasında değişir. Pratik bakımdan bir görüş birliği sağlamak amacı ile N_0 değerinin 10^7 olarak alınması tavsiye edilmektedir.

Pratikte, $N < N_0$ olması halinde elemanın ömrü sonlu, $N \geq N_0$ olması halinde ise, elemanın ömrü sonsuz olarak ifade edilir [15].

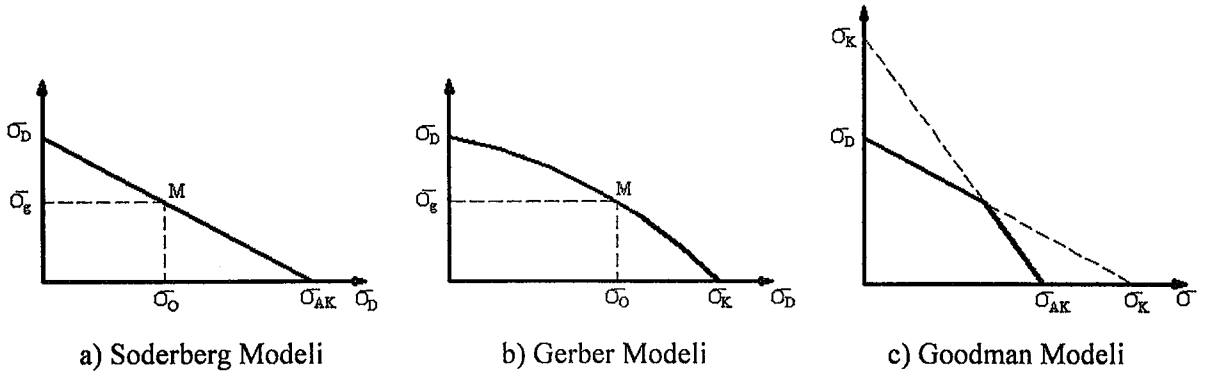
4.1.1 Ortalama Gerilmenin Etkisi

Yukarıda ifade edilen σ_{DN} ve σ_D gibi yorulma sınırları $\sigma_o=0$, yani tam değişken zorlama hali için geçerlidir. $\sigma_o \neq 0$, yani genel değişken zorlama hali için ayrıca yorulma sınırları tayin edilmez. Ancak deney yolu ile σ_{DN} ve σ_D 'nin üzerine σ_o 'nın etkisi incelenir ve bu sonuçları genel değişken zorlamaya maruz kalan elemanların hesabında kullanılır [15].

σ_g düşey eksen ve σ_o yatay eksen olmak üzere bir eksen takımında σ_o 'nın etkisi daha açık bir şekilde görülür (Şekil 4.5). Bu diyagramda $\sigma_o=0$ denklemi ile ifade edilen düşey eksen tam değişken zorlamayı ve dolayısıyla yorulma sınırlarını, $\sigma_g=0$ denklemi ile belirlenen yatay eksen ise, statik zorlamayı ve dolayısıyla statik mukavemet sınırlarını temsil etmektedir [15].



Şekil 4.5 Ortalama gerilmenin (σ_o), gerilme genliğine (σ_g) etkisi



Şekil 4.6 Soderberg, Gerber ve Goodman Modelinin çıkarılışı [15]

Aslında deney sonuçları σ_D ile σ_K arasında bir parabol (Gerber modeli) meydana getirmektedir. Problemi basitleştirmek için parabol yerine σ_D ve σ_K noktalarını birleştiren doğru (Goodman modeli) veya σ_D ve σ_{AK} noktalarını birleştiren bir doğru (Soderberg modeli) alınabilir (Şekil 4.6a). Parabolün veya doğrunun üzerinde bulunan ve koordinatları σ_g ve σ_o olan herhangi bir M noktası, genel değişken zorlamayı temsil eder. Soderberg modeli ele alınırsa (Şekil 4.6a), $0\sigma_D\sigma_{AK}$ ve $\sigma_oM\sigma_{AK}$ üçgenlerinin benzerliğinden

$$\frac{\sigma_g}{\sigma_D} = \frac{\sigma_{AK} - \sigma_o}{\sigma_{AK}} \quad (4.1)$$

veya

$$\sigma_g = \sigma_D \left(1 - \frac{\sigma_o}{\sigma_{AK}} \right) \quad (4.2)$$

bağıntısı elde edilir. Bu denklemde σ_{AK} yerine σ_K konulursa,

$$\sigma_g = \sigma_D \left(1 - \frac{\sigma_o}{\sigma_K} \right) \quad (4.3)$$

şeklinde Goodman modelinin matematiksel ifadesi bulunur [15].

Gerber modeli için benzer bir yöntem uygulanırsa (Şekil 4.6)

$$\sigma_g = \sigma_D \left[1 - \left(\frac{\sigma_o}{\sigma_K} \right)^2 \right] \quad (4.4)$$

denklemini elde edilir. Bu denklemler $N \geq N_o$ yük değişme sayısı, yani sonsuz ömür için geçerlidir [15].

$N < N_o$ olması halinde bu denklemler

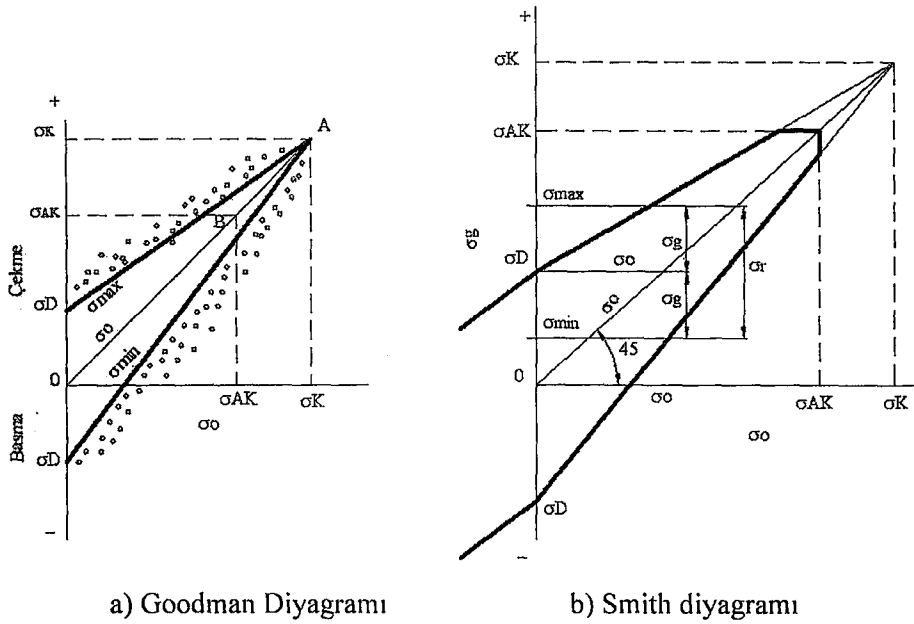
$$\sigma_g = \sigma_{DN} \left[1 - \left(\frac{\sigma_o}{\sigma_{AK}} \right) \right] \quad (4.5)$$

$$\sigma_g = \sigma_{DN} \left[1 - \left(\frac{\sigma_o}{\sigma_K} \right) \right] \quad (4.6)$$

$$\sigma_g = \sigma_{DN} \left[1 - \left(\frac{\sigma_o}{\sigma_K} \right)^2 \right] \quad (4.7)$$

şeklinde yazılır. İkisi de doğrusal olan Soderberg ve Goodman modellerinden birincisi sünek, ikincisi ise gevrek malzemelere uygulanır. Aslında Gerber modeli gerçeğe daha yakındır. Goodman ve Soderberg yöntemleri ise daha basit ve bu sebepten daha elverişli modellerdir. Bundan dolayı Gerber modeli yerine iki doğru parçasından meydana gelen (Şekil 4.6c) bir model kullanılabilir [15].

Yorulma değerleri Avrupa'da Smith ve Amerika'da Goodman diyagramları ile temsil edilmektedir (Şekil 4.7). Bu diyagramların yatay eksenine üzerine σ_o ortalama değerleri, düşey eksenine üzerine ise, başlangıç noktasının üstüne ve altına statik mukavemet (σ_{AK} , σ_K) ve sürekli mukavemet sınırları (σ_D), yan, maksimum ve minimum değerler nakledilir. Statik kopma mukavemetini temsil eden A noktası, (σ_D) noktaları ile birleştirildiği takdirde (Şekil 4.7a), Goodman modeli elde edilmiş olur. (σ_{AK}) akma sınırı ile sınırlandırılan bu diyagram (Şekil 4.7b) sünek malzemeler için geçerlidir [15].



Şekil 4.7 Örnek Goodman ve Smith diyagramları [15]

4.2 KOMPOZİTLERİN YORULMASI

Metallerin yorulma özellikleri, çevrim yüküne karşı gösterdiği tepkidir. Yorulma mukavemeti, statik mukavemetten daha düşüktür. Makro ölçüdeki yorulma hasarlarının, küçük veya çok belirgin olmayan deformasyon ile meydana geldiği görülür. Bununla birlikte, yorulma yüzeyleri mikro ölçüde incelendiğinde, plastik deformasyon görüntüleri açığa çıkar. Yorulma ömrü, gerilme seviyesine, gerilmenin durumuna, çevrim moduna, prosesin geçmişine ve çevresel şartlara bağlıdır [17].

4.2.1 Yorulma Testi

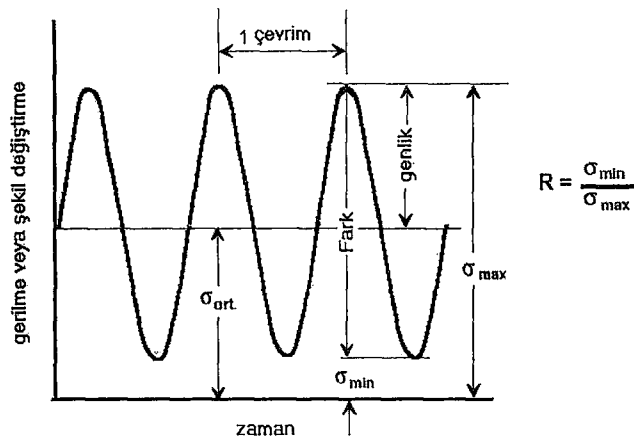
Yorulma testi, genellikle sinüzoidal yükleme ile yapılır. Böylece, yorulma yükünün durumu Şekil 4.8'de gösterilen birkaç parametre ile tarif edilebilir. Maksimum ve minimum gerilmenin belirlenmesiyle, gerilme dağılımı (σ_r), gerilme genliği (σ_a), ortalama gerilme (σ_m) ve gerilme oranı (R) gibi diğer gerilme parametrelerine kolayca karar verilebilir [17].

$$\sigma_r = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} \quad (4.8)$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} \quad (4.9)$$

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} \quad (4.10)$$

$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} \quad (4.11)$$



Şekil. 4.8 Yorulma testi için sinüzoidal yükleme

R değeri, yorulma yükünün modunu gösteren değerdir. Tablo 4.1’de önemli yorulma yükü modları özetlenmiştir [17].

Tablo 4.1 R değeri ile gösterilen yorulma yükü modları

Yorulma Gerilmesi Oranı	Yorulma Yükü Modu
R=1	Statik Yükleme
R=0	Çekme-Yüksüz
0<R<1	Çekme-Çekme
R=-1	Çekme-Basma, Tam Ters
-1<R<0	Çekme-Basma

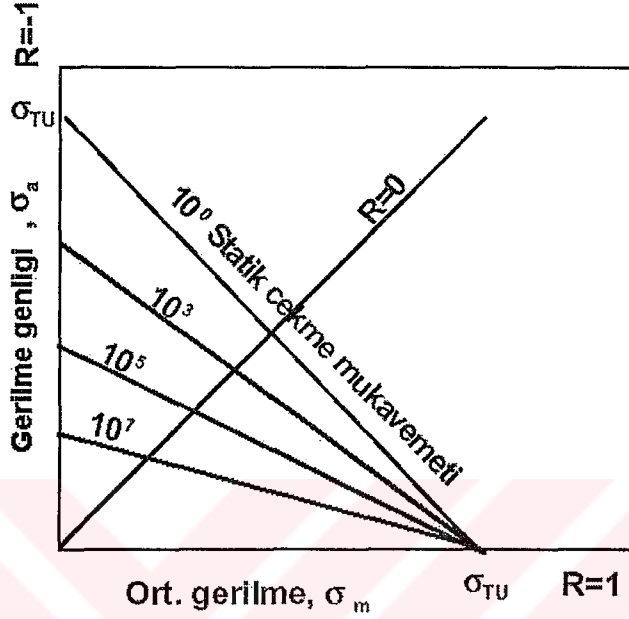
4.2.2 Ortalama Gerilmenin Yorulma Mukavemeti Üzerine Etkisi

Herhangi bir yük genliğindeki, verilen bir çevrim ömrü için yorulma mukavemeti, ortalama gerilmeye bağlıdır (σ_m). Aynı seviyedeki yorulma ömrü için, ortalama gerilme (σ_m) arttıkça, gerilme genliği (yorulma mukavemeti) azaltılmalıdır (σ_a). Bütün mümkün olabilecek yük değerlerindeki yorulma ömrünü hesaplamaktan kaçınmak için, genellikle ampirik (deneysel) bir metot olan ve “Goodman” olarak isimlendirilen eğri kullanılır. Goodman çizgisi olarak isimlendirilen bu değer, yorulma mukavemetinde (verilen bir yorulma ömrü için gerilme genliği) ortalama gerilme oranı ile lineer bir azalma gösterir. Goodman diyagramı, aşağıdaki formülde de belirtildiği gibi, gerilme genliği (verilen bir ömür için/yorulma mukavemeti), ortalama gerilmenin sıfır olduğu yorulma mukavemetiyle (σ_a^0 = tam ters yükleme), ortalama gerilmeyle (σ_m) ve çekme mukavemetiyle (σ_{TU}) ilişkilidir. Goodman ilişkisi aşağıdaki gibi ifade edilmiştir [17].

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_a^0} = 1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_{TU}} \quad (4.12)$$

Çelik gibi metaller için yorulma ömrünü sonsuz hale getiren bir gerilme vardır (malzeme bu gerilme altında yorulma ile hasara uğramaz). Bu gibi durumlarda dayanım sınırı denilen bir değere başvurulur. Alüminyum alaşımı gibi diğer metallerde bu dayanım sınırı yoktur, bu yüzden yaklaşık bir yorulma ömrü seçilmelidir (10 milyon cycle, 1 milyon cycle, 100.000 cycle, veya diğer ilgili ömürler). Goodman diyagramı bir çok ömür için

çizildiğinde genelde Şekil 4.9’da gösterilen master diyagrama başvurulur. Bu diyagramda, “Goodman çizgileri” statik yükleme için ve 10^3 , 10^5 , ve 10^7 gibi yorulma ömürleri için çizilmiştir [17].



Şekil 4.9 Metal yorulması için tipik bir master diyagram

Polimer kompozitler için, ortalama gerilmenin yorulma mukavemeti üzerine olan etkisini doğru olarak belirlemek için Goodman diyagramının bir modifikasyonuna ihtiyaç vardır. Bu modifikasyonda, Goodman-Boller çizgisi kullanılır. Burada ise, çevrim ömrüne karşılık gelen “gerilmeli kopma mukavemeti” (σ_c) kullanılır. Bu değer, x eksenini kestiğinden çekme mukavemetinin yerine gelmiştir. Goodman-Boller ilişkisi aşağıdaki gibidir [17].

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_a^0} = 1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_c} \quad (4.13)$$

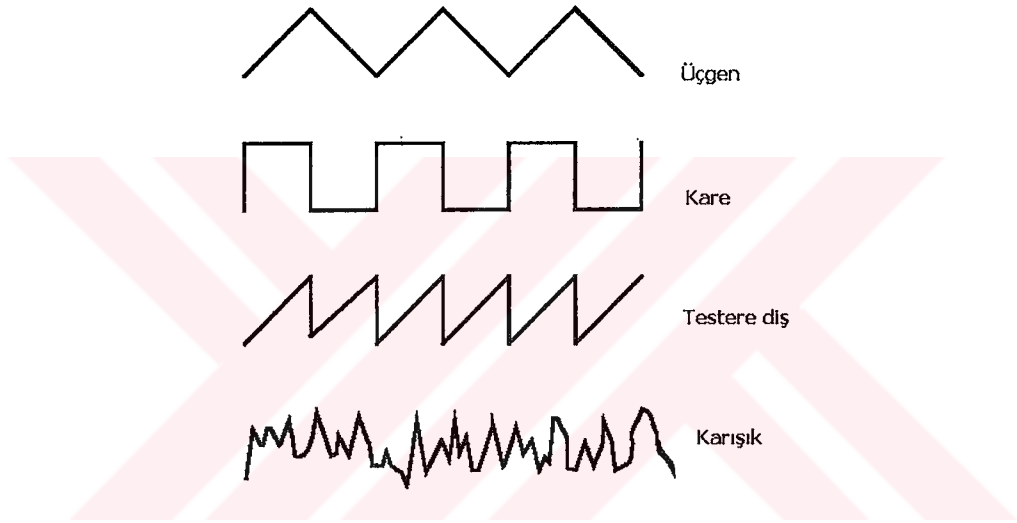
“Gerilmeli kopma mukavemeti” genellikle aşağıdaki verilen ilişkilerden tahmin edilebilir.

$$\sigma_c = \sigma_{TU} (A - B \log t) \quad (4.14)$$

Burada, (t) zaman, (σ_{TU}) statik çekme mukavemeti, A ve B katsayılarıdır.

4.2.3 Kapalı Döngü Yorulma Testi

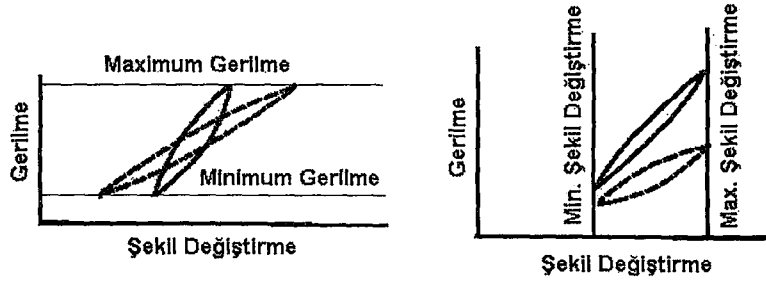
Tasarım için kullanılan yorulma dataları, genellikle bir sinüzoidal yük çevrimlerine (cycle) başvurarak elde edilir. Bunun sebebi ise, yorulma makinelerinin dönen kütleler kullanması veya sinüzoidal yüklemeye sonuçlanan örnekler kullanmasıdır. Bu makineler, hala kullanımda olsa da, bugün sinüzoidal yüklemeye ilaveten dalga tiplerinin çeşitlerini üretebilen yorulma makineleri geniş şekilde kullanılmaktadır (elektro-hidrolik kapalı döngü yorulma test makineleri). Bu tip yüklemeye çevrimleri Şekil 4.10’da gösterilmektedir [17].



Şekil 4.10 Kapalı döngü test ile yapılan dalgalı yük çevrimleri

Bu makineler ile, kompozitlerin yorulma testleri için farklı yüklemeye frekansları elde edilebilmesine rağmen, ısıyı minimize etmek için genellikle 10 Hz veya daha az test frekans kullanılır [17].

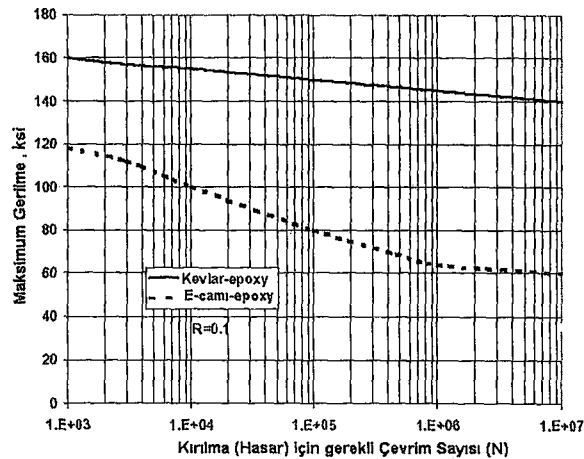
Kapalı döngü yorulma testlerinde “sabit yüklemeye” yada “sabit şekil değıştirme” kontrolü kolaylıkla uygulanabilir. Yüklemeye kontrolünde test numunesi belirtilen maksimum ve minimum yükler arasında döndürülür. Böylece sabit gerilme genliğı sağlanmış olur. Yük kontrollü yorulma testi için, gerilme-şekil değıştirme çevrimi Şekil 4.11a’da gösterilmiştir. Dolu çizgi, yorulma yüklemesindeki başlangıç çevrimlerini temsil eder. Yorulma (prosesi) hasarı ilerledikçe, malzemenin zayıflaması ve şekil değışimi artar. Şekil değışimi kontrolünde ise, numune belirlenen sabit maksimum ve minimum gerilimler arasında çalışır. Böylelikle sabit gerilme genliğı, Şekil 4.11b’de gösterildiğı gibi elde edilir [17].



a) Yük kontrollü
b) Şekil değişim kontrollü
Şekil 4.11 Yorulma testinde yük ve şekil değişimi modlarının karşılaştırılması

4.2.4 S/N Eğrileri (Wöhler)

Kompozit bir malzemenin yorulma performansı, verilen maksimum gerilme seviyesinde numunenin kırılıncaya kadar ki gerekli çevrim sayısı olarak açıklanır. Ayrıca, yorulma performansı ortalama gerilme veya yorulma gerilmesi oranı (R) ile açıklanır. Bu tip testlerin sonuçları, maksimum yorulma gerilmesine karşılık 10 tabanına göre yarı-logaritmik ölçek üzerindeki hasar çevrimleri olarak tanımlanır. Bu çizim, S/N eğrisi olarak adlandırılır. Tek yönlü (unidirectional) kompozit malzemeler için iki S/N eğrisi Şekil 4.12'de görülmektedir. E-Cami/Epoxy için S/N eğrilerinin formu birçok metalinkine benzerdir. Düşük gerilmelerde yorulma ömrü önemli ölçüde artar ve bazı durumlarda yorulma ömrü sonsuz olabilir. Bu durumda genellikle yüksek çevrimli yorulmadan (HFC) bahsedilir. Bu durumun oluştuğu gerilmeye “**yorulma dayanım sınırı**” denilir. Kevlar/Epoksi için S/N eğrisinin formu yüksek yorulma mukavemetine sahip bir metalin benzeridir [17].



Şekil 4.12 Tek yönlü iki kompozit için S/N eğrisi

S/N eğrisi aşağıdaki şekilde açıklanabilir [17];

$$S = \sigma_{TU} (m B \log N + b) \quad (4.15)$$

Bu formülde ;

S : Maksimum yorulma mukavemetini

N : Hasara neden olan çevrim sayısını

σ_{TU} : Ortalama statik mukavemet

m ve b : Sabitler

Sabit (m) sayısı eğim, (b) sayısı ise S/N eğrisinin kestiği gerilme olarak açıklanır. (m) nin düşük ve (b) nin yüksek değeri yüksek yorulma mukavemetini ifade eder. (m) ve (b) sabitleri için tipik değerler bazı geleneksel kompozitler için Tablo 4.2'de verilmiştir. Aynı (R) oranındaki, Karbon fiber ve E-Camı fiber kompozitler için (m) ve (b) değerleri kıyaslandığında, karbon fiber kompozitlerin daha iyi bir yorulma mukavemetine sahip olduğu görülmektedir. (b) katsayısı statik mukavemetten daha fazla etkilenmektedir.

S/N eğrileri aşağıdaki kural ile tarif edilebilir [17].

$$\frac{S}{\sigma_{TU}} N^d = c \quad (4.16)$$

Burada, (d) ve (c) sabitlerdir.

Tablo 4.2 (m) ve (b) sabitleri için tipik değerler

Malzeme	R	m	b
E-camı / sünek epoxy 0°	0.1	-0.1573	1.3743
T300 karbon / sünek epoxy 0°	0.1	-0.0542	1.0420
E-camı / gevrek epoxy 0°	0.1	-0.1110	1.0935
T300 karbon /gevrek epoxy 0°	0.1	-0.0873	1.2103
E-camı / epoxy [0/90°] _s	0.05	-0.0815	0.934

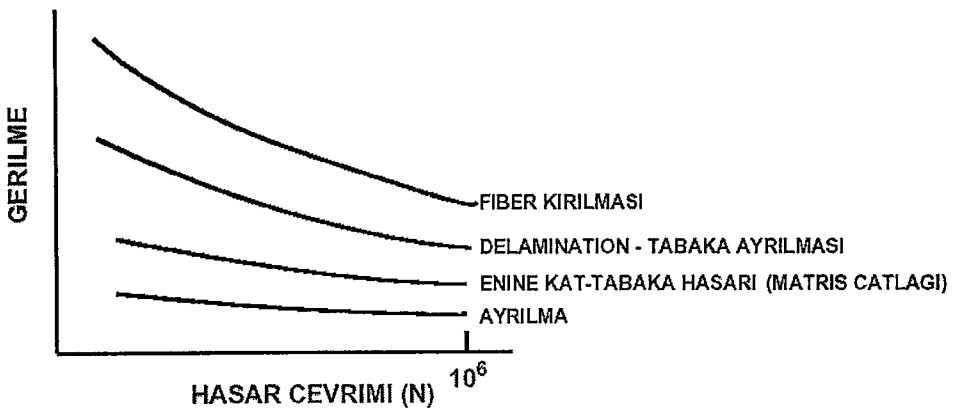
Bazı durumlarda, denklem (4.17)'deki gibi S-N diyagramlarından elde edilen veriler logaritmik fonksiyon yerine üslü fonksiyon (Power Law) olarak da ifade edilebilir [3].

$$S_a = A(N_f)^B \quad (4.17)$$

Burada, S_a : gerilme genliğini (uygulanan max. gerilme), N_f : çevrim sayısı (yorulma ömrü), A ve B sabitleridir ve en uygun ortalama yorulma ömür verileri için gösterilmiştir.

4.2.5 Kompozitlerdeki Yorulma Modları

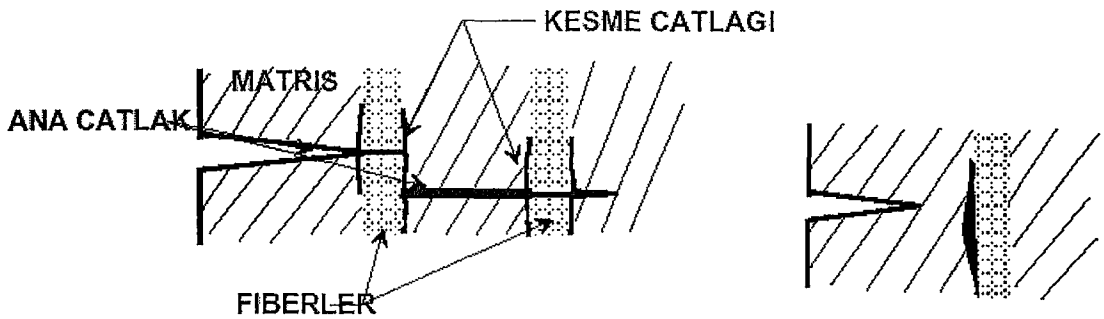
Tek yönlü, tek tabakalı kompozitlerin yorulma hasarları üç modda meydana gelir : **Fiber Kırılması**, **Matris Çatlağı** ve **Fiber-Matris Ayrılması**. Fiber kırılması fiber mukavemetine bağlıdır. Eğer fiberler yüksek rijitliğe sahipse, şekil değiştirmenin sınırlı bir miktarı matrise transfer olur ve böylece matris çatlaması gecikebilir. Ayrılma, eğer fiber-matris ara yüzeyindeyse; hasar zayıf fiber/matris ara yüzey mukavemeti sebebiyle oluşur. Çok katmanlı kompozitlerde hasar genellikle, yorulma yükünün bir sonucu olarak 4. hasar modu olan tabaka ayrılması (delamination) ile meydana gelir. Bir S/N eğrisi, Şekil 4.13'de görüldüğü gibi bu modların her biri için oluşturulabilir. Fiberler kırılıncaya kadar önemli bir tabaka mukavemeti hasarı (tabaka ayrılması) meydana gelmemesine rağmen, kompozit hasarının daha az görülen şekillerinden biri olan “tabaka hasarı=laminat failure” meydana gelebilir. Hatta bazı uygulamalarda, nem etkisinin artmasından dolayı kabul edilemeyecek derecede çabuk ilk fiber-matris ayrılması meydana gelebilir [17].



Şekil 4.13 Çeşitli kompozit hasar modları için karşılaştırmalı S/N davranışları

Yorulmaya iki aşamada karar verilir ; çatlak başlangıcı ve çatlağın yayılması. Yüksek gerilme seviyesinde, genellikle düşük çevrimli yorulmaya (LCF) başvurulur, başlangıç hali çok erken yük çevrimlerinde meydana gelir ve yorulma ömrünün büyük bir kısmı çatlak ilerlemesi için geçer. Yüksek çevrimli yorulmada (HCF), toplam yorulma çevrimlerinin büyük bir bölümünde yorulma çatlağının başlaması istenir. Metallerde yorulma çatlağının başlangıcı, kusur bulunma ihtimalinin veya gerilme dağılımının en büyük olduğu üst yüzeyde meydana gelir. Kompozitlerde, fiber/matris ara yüzeyindeki boşluklar potansiyel kusur yerleridir. Bununla birlikte, yorulma başlangıcının alt yüzeylerde bulunması da sıkça rastlanan bir durumdur [17].

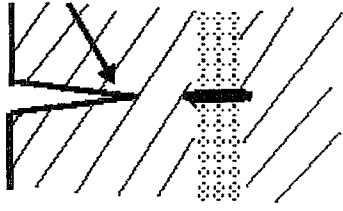
Kompozitlerin yorulmasında mümkün olan olayların birçoğu, yorulma çatlağının ilerlemesi süresince meydana gelebilir. Fiber ve matris kırılmasını içeren bir kompozitteki, yorulma çatlağının ilerlemesine kesme (shear) çatlakları yardımcı olur. Kesme çatlakları sadece çekme gerilmesiyle oluşur. Bazı durumlarda matris çatlağı veya kesme çatlağı olmadan da çatlak oluşabilir. Bu çatlaktan daha ileride oluşan fiber kopması ve matris çatlaması olmadan oluşan fiber kırılması, gibi iki faktör de yorulma çatlağına yardımcı olur. Bu olaylar Şekil 4.14'de şematik olarak gösterilmiştir. Kesme çatlağının bu şekli genellikle, yorulma ömrü için faydalıdır. Çünkü bu çatlaklar kırılma yolunda artarak yorulma enerjisini absorbe eder. Şekil 4.14a'de görüldüğü gibi yorulma çatlağı yavaşlatır. Kesme çatlakları, fiber ve matris arasındaki şekil değişim farkından (farklı poisson oranı) dolayı yorulma çatlağından daha ileride meydana gelebilir (Şekil 4.14b). Fiberin uzaması, matrisle kıyaslandığında daha küçük olduğundan, fiber Şekil 4.14c'de görüldüğü gibi çatlaktan daha ileride hasara uğrayabilir. Gevrek bir matris içinde sünek fiber olması durumunda, matris fiberden ayrılarak hasara uğrayabilir (Şekil 4.14d)



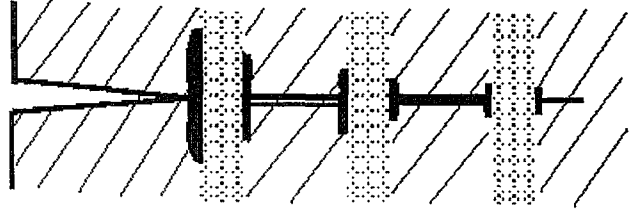
a) Kesme çatlağının oluşturduğu fiber ve matris kırılması

b) Çekme ile oluşan kesme çatlağı

Şekil 4.14 Kompozit yorulması boyunca çatlak yayılması olayları



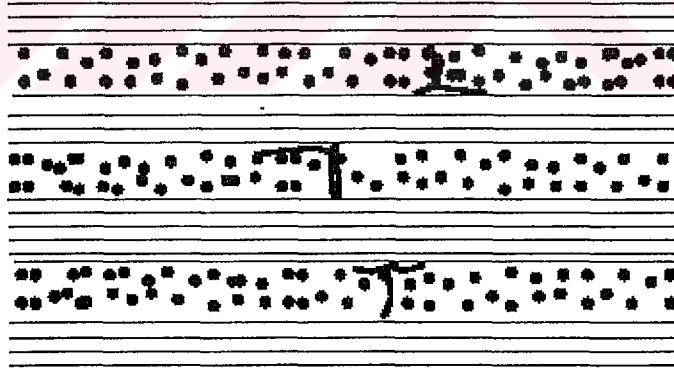
c) Çatlağın ilerisinde oluşan fiber kırılması



d) Fiber kırılması olmaksızın matris çatlağı

Şekil 4.14'ün devamı : Kompozit yorulması boyunca çatlak yayılması olayları [17]

Şekil 4.14'de gösterilen olaylar tekyönlü ve çok katlı tabakalı kompozitlerin her ikisinde de meydana gelebilir. Fakat, çok katlı (katmanlı) tabakalardaki fiber açıları ve tabaka sayılarının yorulma çatlağının ilerlemesinde çok büyük bir önemi vardır. Çatlak yayılması genellikle fiberlere paralel yönde küçük engellemelerle ilerleyebilir. Bu nedenle, kompozit kesitindeki (ara tabakalı kompozitteki) enine katmanlar statik yük ve yorulma yüklerinin her ikisinin altında da ilk önce hasara uğrayacaklardır. Enine katmanlardaki çatlaklar, ara yüzey katlarında kesme çatlakları oluşturularak ve çatlakların önü körleştirilerek (kapatılarak) durdurulabilir (Şekil 4.15).



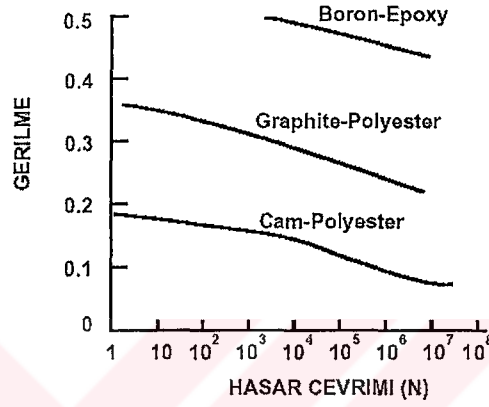
Şekil 4.15 Bir ara katman yoluyla çatlak yayılması [17]

4.2.6 Kompozitlerin Yorulmasında Etkili Olan Faktörler

Kompozitlerdeki yorulma; ara katman ve tabaka özellikleri, fiber özelliği, matris özelliği ve tabaka (fiber) yönü gibi temel unsurlardan etkilenir.

4.2.6.1 Fiber Özelliğinin Etkileri

Tek yönlü yüksek mukavemetli kompozitler ve yüksek rijitliğe sahip kompozitler en büyük yorulma mukavemetine sahiptir. Bu durum Şekil 4.16'da görülmektedir. Yüksek rijitliğe sahip fiberlerin matris içindeki şekil değişimi sınırlıdır. Bu fiberler gerilim arttırıcı olarak görev yapan matris çatlağının başlamasını da engeller [17].



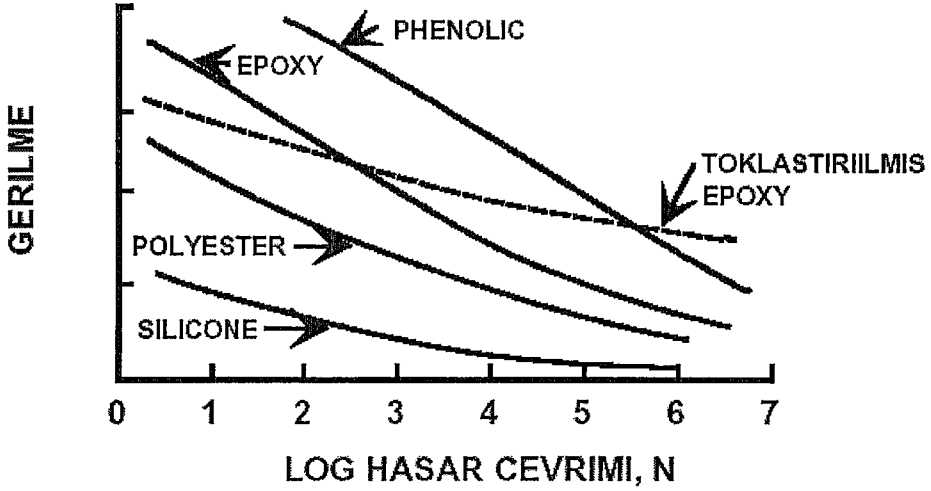
Şekil 4.16 Fiber tipinin kompozitin yorulması üzerindeki etkisi

Devamlı ve devamsız fiberler arasındaki kesme çatlakları, devamlı fiberin etrafındaki dairesel bölgedeki (tümsek ve çukurlardan oluşan) düzensiz yüzeye doğru ilerler [3].

4.2.6.2 Matris Özelliğinin Etkisi

GFRP kompozitlerdeki matrisin görevi fiberlere uygulanan yükü iletmektir. Bu nedenle, komşu fiberlerin arasındaki matrisin azlığı (yüksek fiber hacimli kompozitlerde) yorulma testleri süresince (tekrarlı çeki-bası gerilmeleri sebebiyle) sürekli ve süreksiz fiberler arasındaki yüzeyde fiber-matris bağının hasara uğramasına (ara yüzey ayrılmasına) yol açar [3].

Kompozitlerin yorulma mukavemeti; yüksek mukavemetli matris malzemeleri için sürekli geliştirilmektedir. Termal (ısısal) hasar direnci de özellikle cam fiber kompozitler için çok önemlidir. Çünkü özellikle düşük ısı iletkenliğe sahip malzemelerde yorulma ısısını dağıtmak hiç kolay değildir. Farklı matris malzemelerine sahip E-Camı takviyeli fiber kompozitlerin izafi mukavemet değerleri Şekil 4.17'de görülmektedir [17].

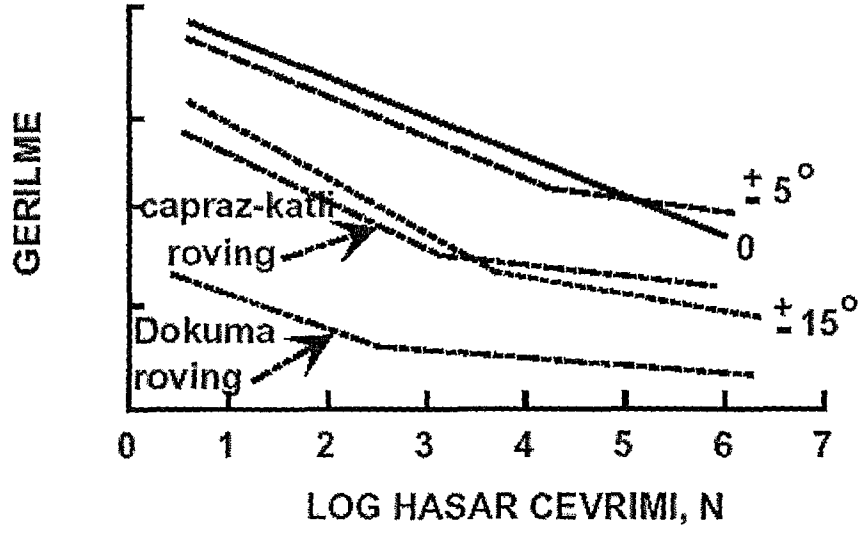


Şekil 4.17 Farklı matris malzemelerine sahip E-Camı takviyeli fiber kompozitlerin izafi mukavemet değerleri

Düşük mukavemetli silikon matris malzemeleri en düşük yorulma mukavemetine sahiptir. Polyester malzemeler orta mukavemetli polimerlerdir ve daha ileri yorulma mukavemeti gösterirler. Yüksek mukavemetli epoksiler en büyük yorulma mukavemetine sahiptirler. Sertleştirilmiş (toklaştırılmış) bir epoksi, yüksek mukavemetli epoksiden daha düşük bir yorulma mukavemeti sergiler. Bu durum yüksek gerilme seviyelerinde daha düşük bir yorulma mukavemetini gösterir. Ancak, düşük gerilme seviyelerinde ise toklaştırılmış epoksi önemli ölçüde ileri bir yorulma mukavemetine sahiptir. Hem mukavim hem de ısı direnci yüksek olan fenolik (E-Camı takviyeli) kompozitler çok yüksek yorulma mukavemeti sergilerler [17].

4.2.6.3 Fiber Yerleşiminin Etkisi

Farklı fiber yerleşimlerinin, kompozitlerin S/N eğrisi üzerindeki etkileri Şekil 4.18'de görülmektedir. Özellikle yüksek çevrimli yorulmada (LCF), eksene bağlı olarak yapılan farklı açısız yüklemeye ile en büyük yorulma mukavemeti elde edilebilir. Fiberlerin yerleşimindeki çok az değişiklik, eğriyi N ekseninden saparak paralel hale sokmaktadır. Boşal kırılma, kırılma büyüme oranında azalmaya ve ona bağlı olarak da yüksek çevrimlerde yorulma ömründe bir artmaya neden olabilir. Bu etki, daha büyük fiber yerleşim açıları için de görülebilir. Ancak bu durum komple yorulma mukavemetini daha da düşürecektir [17].

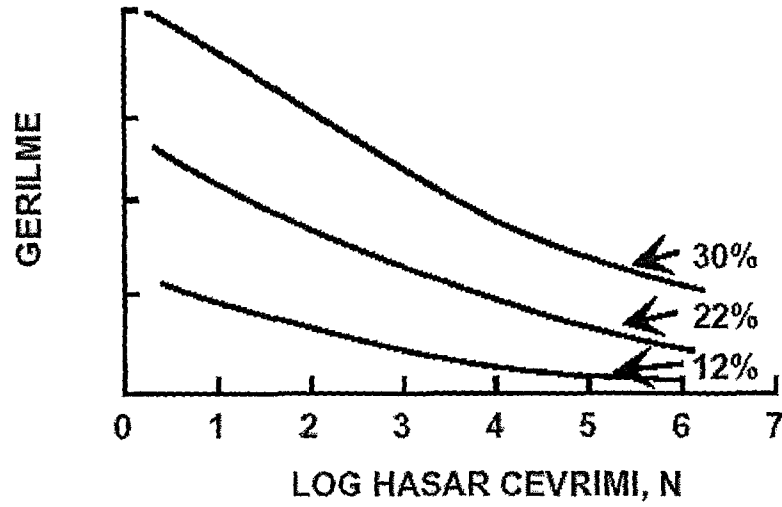


Şekil 4.18 Kompozit yorulmasında fiber yerleşim yönlerinin etkisi

Boysal çatlama, enine tabakalar (katlar) ile oluşturulabilir. Dokuma roving (iplik fitil) ile düz roving kıyaslandığında, dokuma rovingde karşı tabakalar fabrikasyon olduğundan yorulma mukavemetinde önemli bir azalma olduğu dikkati çekmektedir.

4.2.6.4 Fiber Oranının Etkisi

Yorulma mukavemeti üzerine fiber oranının etkisi Şekil 4.19'da açıklanmaktadır. Fiber oranı ne kadar yüksek ise yorulma mukavemeti de aynı oranda yüksektir [17].

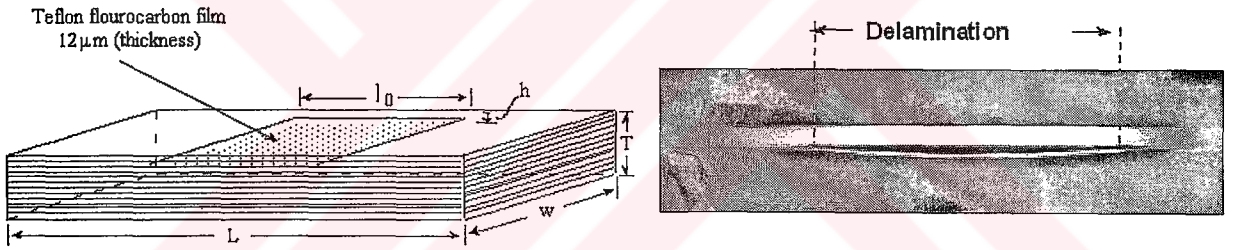


Şekil 4.19 Kompozit yorulmasında fiber oranının etkisi

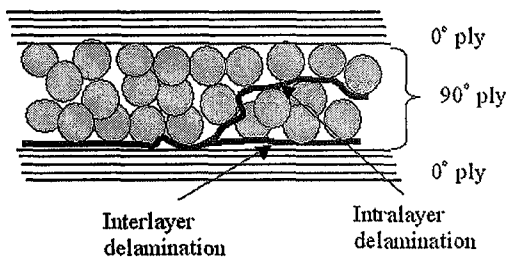
4.2.6.5 Tabaka Ayrılmasının (Delamination) Etkisi

Stratton, AL. Ve Pelegri, A.A. kompozit kanat malzemelerin yorulması ile ilgili yaptıkları çalışmada [18];

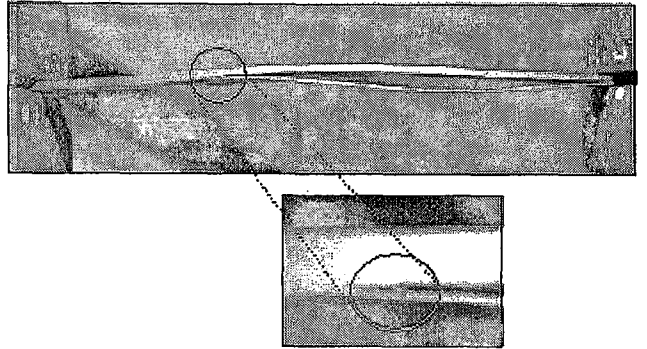
Belirli sayıda oluşan tabakalar 0° ve 90° yönlerde üst üste yığılarak, basınç ve sıcaklık etkisiyle kompozit malzeme oluşturulmuştur. Delamination veya sınır çatlakları, bir kompozit malzemenin farklı tabakaları arasında büyüyen bir çatlak olarak ifade edilir. Interlayer delamination, kompozit tabakalar arasında kırılma olmaksızın iki tabaka ara yüzeyinde büyüyen bir çatlaktır. Intralayer delamination ise, ara yüzeyde ilerlerken nadiren komşu ara yüzeylere atlayan bir çatlaktır. Daha sonra bu tabakaların biri veya daha fazlası kırılır, hatta yön değiştirir. Primary (PD) delamination (başlangıç delamination) bir teflonun iç yapıya yerleştirilmesi ile oluşturulur. Başlangıç delamination Şekil 4.20 'de gösterilmiştir [18]



Şekil 4.20 Kompozit malzemedeki başlangıç delaminasyonu (PD)



Şekil 4.21 İntralayer ve İnterlayer delaminasyon



Şekil 4.22 Karbon/epoksi numunedeki intralayer delaminasyon

Sonuçta ; kompozit kanatların ortalama ömürleri interlayer ve intralayer olarak adlandırılan tabaka ayrılmasına (delaminations) bağlıdır [18].

Eğer delaminasyon interlayer, yani iki tabaka arasında ilerleyen çatlak şeklinde ise, büyük bir ihtimalle duracak ve parçalar fonksiyonlarını belirli bir süre daha yerine getirebilecektir [18].

Intralayer delaminasyon ani büyümeye daha fazla meyillidir ve parçaların hasarına sebep olan esas çatlaktır. Yani intralayer delaminasyon fiberlerin kendi içinden ilerleyen tehlikeli bir çatlaktır [18].

Bu sebeplerden dolayı, interlayerden intralayere dönen delaminasyonların büyümesini engellemek için, bu orijinal çatlaklar önceden tespit edilmelidir [18].

4.3 RÜZGAR TÜRBİN VE VANTİLATÖR KANATLARINDAKİ YORULMA

Rüzgar türbinleri ve vantilatörler, etkiyen değişken yüklerin karmaşık sisteminden dolayı özellikle yorulma hasarından çok etkilenirler. Özellikle kanatlar risk altındadır. Bu nedenle bir çok araştırmacı, işletme ömrü süresince kanatların yorulma hasar olasılıklarını değerlendirebilmek için yoğun çaba sarf etmişlerdir [19].

Eğer yorulmadan dolayı oluşan hasar belirli bir seviyenin üzerine çıkmış ise çevrim yükleri altındaki bir rüzgar türbini kısa zamanda hasara uğrayabilir. İlk başlangıçta, kırılma olmaksızın çevrim yükü altında hasar büyür. Çünkü,

- Bölgesel olarak oluşan net gerilme, malzemenin maksimum gerilmesini aşmıştır, yada
- Hasar birikimden dolayı kritik bir çatlak oluşmuştur.

Bir elemandaki hasar büyüme oranı çevrimsel gerilme oranına bağlı ise, yük oranı R (Uygulanan çevrim gerilmesinin malzemenin maksimum çekme mukavemetine bölümü) ve o andaki hasar değeri D ise,

$$\frac{dD}{dN} = f(\Delta\sigma, R, D) \quad (4.18)$$

$\Delta\sigma$: Çevrim anındaki gerilme oranı

R : Uygulanan çevrim gerilmesinin malzemenin maksimum çekme mukavemetine oranı

D : Hasar değeri (kırılmaya konu olan bölgenin hasar yüzdesi)

N : Çevrim sayısı

Bu durumda yorulma ömrü N_f , kırılmanın olduğu yerdeki başlangıç hasarını kırılma için en yüksek değerine yükselten veya hasar seviyesini kritik seviyenin üzerine çıkaran yük çevrim sayısıdır [19].

Bu nedenle,

$$N_f = \frac{dD}{f(\Delta\sigma, R, D)} \quad (4.19)$$

olacaktır.

Bu durumda, N_f çevrim sayısını tanımlamak gerekecektir. Bu tanımlama için genellikle, S (gerilme)-N(çevrim) eğrileri kullanılır. Malzemeye uygulanan değişken gerilme ve çevrim sayısı (N) gerilme genliğinin bir fonksiyonu olarak tarif edilir. S-N eğrisinin eğimi, malzeme yorulmasındaki direncin bir ölçüsüdür ve malzemedeki malzemeye değişiklik gösterir [19].

4.3.1 Yorulma ile ilgili Yükler (Kuvvetler)

S-N eğrileri, kanatlardaki yorulma özelliklerini izafi olarak verir. Ancak, S-N eğrileri çalışma süresince türbin kanatlarında etkili olan karmaşık ve farklı yük tekrarlarının etkilerini hesaba katmaz. Bu kuvvetler, kanatların kendi kütlelerinden ve rüzgarın etkisiyle meydana gelir [19]. Bu kuvvetler ;

- Yerçekimi (kanadın kütlesi üzerindeki dünyanın çekiminden dolayı, her çevrimde basma ve çekmeye sebep olur)
- Merkezkaç (kanadın dönmesinden dolayı)
- Rüzgarın itmesi (saldırısı, vuruşu) (kanat düzlemine dik bir kuvvet) (nispeten daha yavaş)
- Rüzgar türbülansından dolayı hızlı bir şekilde değişerek meydana gelen kuvvetler.

Araştırmalara göre, nispeten düşük frekans ve yüksek genlikli rüzgar itme kuvveti değişken eğilme gerilmeleri (çeki-bası) yaratacağından yorulma hasarı üzerinde oldukça etkidir. Dolayısıyla, diğer bahsedilen yüklerle kıyaslandığında rüzgar itme kuvveti yorulma hasarı üzerinde çok daha fazla etlidir [19].

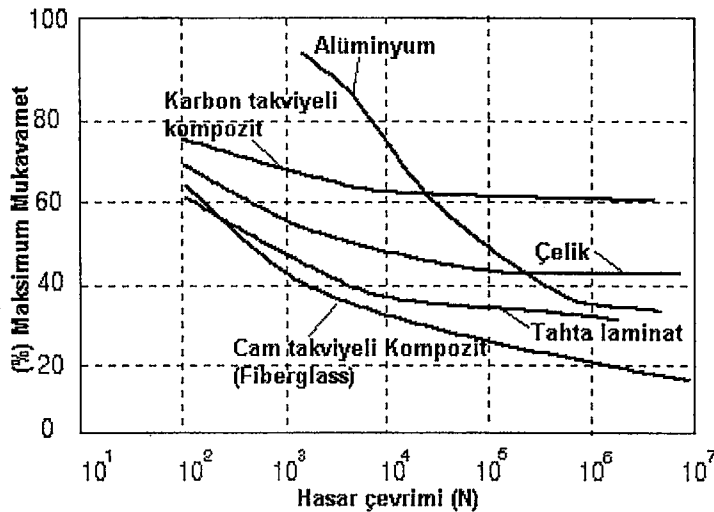
4.3.2 Kanat Malzemelerindeki Yorulma Özellikleri

Kompozit malzemelerin yorulma özellikleri doğal mukavemetlerine (mekanik özelliklerine) ve diğer bileşen malzemelerin rijitliklerine bağlıdır [19].

Cam takviyeli kompozitler rüzgar türbin ve vantilatör kanatlarında oldukça sık kullanılmaktadır. Yapılan bazı simülasyon çalışmaları, normal şartlar altında çalışan CTP kanat ömürlerinin memnun edici olduğunu göstermektedir. Ancak, bazı deneysel çalışmalara göre, CTP'nin sonlu çalışma ömrünü gösteren σ_k-N eğrisinde sürekli bir azalma olduğu görülmektedir. (Şekil 4.23) Ancak buna rağmen, CTP kanatlar tahribatsız muayene yöntemleri kullanılarak dikkatli bir şekilde takip edilirse daha güvenilir şekilde kullanılabilirler [19].

Eğer fiber yönlenmesi dönüş yönündeki gerilmelere paralel uygulanırsa, yüksek modüllü fiberler içeren kompozit malzemeler genelde çok daha iyi yorulma özelliklerine sahip olmaktadır [19]

Dönüş yüklemesi süresince matris malzeme olarak kullanılan epoksi veya diğer malzeme, fiberler tarafından zorlanmaktadır. Bu esnada, CTP kanadın kendisi, matristeki çatlak strainine yaklaşmayan, nispeten daha küçük strainlere maruz kalır. Hatta bu olay, özellikle yorulma çatlaklarının büyümesini engelleyerek, çatlakı durdurucu bir etken olarak da rol oynayabilir [19]



Şekil 4.23 Çeşitli kanat malzemelerinin yorulma özellikleri [19]

Karbon takviyeli kompozitler (CFRP), özellikle fiber yönlerine paralel yönde yükleme ile yorulma söz konusu olduğunda, metaller ve diğer kompozitlerle kıyaslandığında daha iyi bir yorulma performansı sergilerler. Fakat, CFRP belirgin bir şekilde yük taşıyıcı rol oynadığında bu avantajı azalır. Buna rağmen, karbon takviyeli kompozit kanatlar çoğu zaman diğer kompozitler veya malzemelerin performansına ulaşmaktadır. Ancak, karbon takviyeli kompozitler, yüksek maliyetlerinden dolayı türbin veya vantilatör kanatlarında nadir olarak kullanılırlar [19]

4.3.3 Kompozit Kanatların Alüminyum Kanat ile Kıyaslanması

Örneğin, ABB Flakt firması, kompozit malzemeden fan kanatları geliştirmişler ve patentini alarak FlexProb adını vermişlerdir. Yapılan çalışma sonucu, oldukça iyi özelliklere sahip kanat geliştirilmiştir [20].

Alüminyumdan yapılan bir kanat ile kıyaslandığında kompozit bir kanadın yoğunluğu çok düşüktür. Yoğunluk azalması alüminyumda 2.7 gr/cm^3 iken kompozit kanatta 0.7 gr/cm^3 değerine düşebilir [20].

Alüminyum kanatlı eksenel bir fanlardaki esas gerilim kütle gücüdür. Kütle gücü yaklaşık olarak toplam ağırlığın %95 ini oluşturmaktadır. Dolayısıyla, kanat ve merkezin boyutlandırılması söz konusu olduğunda kanatlardaki yoğunluk hayati bir önem kazanmaktadır. Kompozitten yapılan kanat konstrüksiyonu geleneksel alüminyum kanattan daha yüksek ağırlıklara müsaade eder. Yani, daha düşük yoğunluktan dolayı, merkezdeki boyutları azaltmak veya devir sayısını arttırmak gibi farklı iyileştirmeler yapılabilir. Aynı zamanda, kompozit malzemeler kanat geometrisi seçimini etkileyen, farklı serbestlik derecelerine müsaade edebilir [20].

Kompozit kanatlarda, flanşa civatalanarak tutturulan bölge kanadın en kritik bölgesidir [20].

CTP'lerin termal ve mekanik özelliklerinin diğer yapı malzemeleri ile kıyaslanması Tablo 4.3'de verilmiştir [8,9].

Tablo 4.3 CTP'lerin termal ve mekanik özelliklerinin diğer yapı malzemeleri ile kıyaslanması

Malzeme	Özgül Ağırlık (gr/cm ³)	Elastiklik Modülü (MPa)	Çekme Muk. (MPa)	Basma Muk. (MPa)	Max. Çalışma Sıcaklığı (°C)	Termal İletkenlik (W/mK)
Alüminyum	2.7	69	417		200	200
Yumuşak Çelik	7.8	207	240		400	50
Paslanmaz Çelik	7.92	193	241		450	55
CTP	1.5-2.2	7-53	80-900	130-520	170-250	0.2-0.3

4.3.4 Kompozit Malzemedeki Yapılan Kanatların Avantajları

Yapılan araştırmalarda, özellikle cam takviyeli kompozit (CTP) kanatların, geleneksel olarak kullanılan alüminyum kanatlardan ortalama %75 daha ucuza mal edilebileceği anlaşılmıştır.

Geleneksel olarak kullanılan alüminyumdan yapılan bir kanat ile kıyaslandığında kompozit bir kanadın yoğunluğu çok düşüktür. Kompozit kanadın yoğunluğu, alüminyuma göre %74 'lere kadar düşürülebilmektedir [19,20].

Kompozit malzemedeki yapılan kanatlar alüminyum veya diğer kanat malzemelerine göre daha düşük yoğunlukta olmalarından dolayı, kanat merkezindeki boyutları azaltmak veya devir sayısını arttırmak gibi farklı iyileştirmeler yapılabilir [20].

Özellikle, düşük yoğunluğu ve hafifliklerinden dolayı diğer kanat malzemelerine göre tercih sebebi olmaktadır [19,20].

4.4 YORULMA VERİLERİNİN İSTATİKSEL DEĞERLENDİRİLMESİ

Homojen olmayan bütün malzemelerde olduğu gibi kompozitlerin mukavemetinde de, numuneden numuneye mukavemet ve yorulma ömrü açısından çok büyük farklılıklar görülebilir. Kullanılan istatistiksel özellikler, genelde ortalama mukavemetin bulunduğu (aşağıda verilen) noktadaki normal dağılıma bağlıdır [3,17,21,22]. Bu dağılım ;

$$\bar{\sigma} = \sum \frac{\sigma_i}{n} \quad (4.20)$$

Standart sapma

$$d = \sqrt{\frac{\left(\sum \sigma_i^2\right) - n\bar{\sigma}^2}{(n-1)}} \quad (4.21)$$

katsayıların dağılımı ise,

$$r = \frac{100d}{\bar{\sigma}} \quad (4.22)$$

Burada, $\bar{\sigma}$: ortalama gerilme, n: deney sayısı, σ_i : sıralamadaki her bir gerilme değeri, d: standart sapma, r : katsayıların dağılım oranıdır. Weibull dağılımı ise, ömür ve mukavemet parametrelerindeki değişimin daha gerçek bir sunumudur [3,17,21,22].

4.4.1 Yorulma Ömür Verilerinin Weibull Dağılımı ile İstatiksel Analizi

Yorulma özellikleri açısından verilerin istatiksel olarak iyi anlaşılması kompozit malzemelerin başarılı uygulamaları için şarttır. Çünkü kompozitler, geleneksel malzemelerle kıyaslandığında anizotrop ve birbirinden farklı olma özelliklerinden dolayı istatiksel değerlendirme çok önemlidir. Yorulma ömrü sonuçları, bir olasılık yoğunluğu fonksiyonu $F(x)$ ve aşağıda verilen ilgili kümülatif dağılım fonksiyonu $F_f(x)$ ve $F_s(x)$ kullanılarak istatiksel analizi iki parametrelili Weibull dağılımı kullanılarak incelenebilir [3,17,21,22].

$$F(x) = \frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{x}{\beta}\right)^{\alpha-1} \exp\left\{-\left(\frac{x}{\beta}\right)^{\alpha}\right\} \quad (4.23)$$

$$F_f(x) = 1 - \exp\left\{-\left(\frac{x}{\beta}\right)^{\alpha}\right\} \quad (4.24)$$

$$F_s(x) = 1 - F_f(x) = \exp\left\{-\left(\frac{x}{\beta}\right)^{\alpha}\right\} \quad (4.25)$$

Burada,

$F_f(x)$ hasar olasılığı, $F_s(x)$ hasarsız (kırılmadan) ömrünü sürdürme olasılığı. (α) ve (β) değerleri, denklem (4.24)'ün tekrar yazılmasıyla elde edilebilir.

(α) ise şekil parametresi (boyutsuz) ve Weibull doğrusunun eğimidir. (β) Weibull doğrusunun x eksenini kestiği noktada bulunan yerleşim parametresidir veya ömür dağılımındaki ölçüm parametresidir [3,17,21,22].

$$\text{Ln}(x) = \frac{1}{\alpha} \text{Ln} \left(\text{Ln} \left(\frac{1}{1 - F_f(x)} \right) \right) + \text{Ln}(\beta) \quad (4.26)$$

Denklem (5), doğrusal bir fonksiyon denklemi olarak yazılabilir ve,

$$y = m x + b \quad (4.27)$$

şeklinde yazılır. Burada, $y = \text{Ln}(x)$, $m = 1/\alpha$, $b = \text{Ln}(\beta)$ ve $x = \text{Ln}(\text{Ln}[1/(1 - F_f(x))])$

Denklem (4.26)'daki değişkenler, yorulma ömrünün artan şekilde sıralanmış deneysel verileri (N_f) ve aşağıdaki denklem ile hesaplanan ortalama sırası P'dir. $P = F_f(x)$ yerine yazılarak her bir değer için kırılma ihtimali (sıra ortalaması=medyan sırası) hesaplanır [17].

$$P = \frac{i}{n + 1} \quad (4.28)$$

Ancak daha gerçekçi sonuçlarda P değeri Denklem (4.29) ile hesaplanır [21, 22]

$$P = \frac{i - 0.3}{n + 0.4} \quad (4.29)$$

Burada, (i) hasar sıra numarası, n her testteki numunelerin toplam sayısı. α ve β 'nin değerleri çeşitli istatistik metotlar (en küçük kareler metodu, gibi) kullanılarak uygun bir değere karar verilir.

4.4.1.1 Weibull Parametrelerinin Bulunması :

Weibull kümülatif dağılımının fonksiyonu, doğrusal bir çizgi denklemi olarak görüldüğünden ($y = m x + b$) şeklinde yazılabilir.

Weibull matematiksel olarak denklemini aşağıdaki gibi yazılırsa [21,22];

$$F(x) = 1 - e^{-\left[\frac{x}{\beta}\right]^\alpha} \quad (4.30)$$

$$1 - F(x) = e^{-\left[\frac{x}{\beta}\right]^\alpha} \quad (4.31)$$

$$\text{Ln}(1 - F(x)) = -\left(\frac{x}{\beta}\right)^\alpha \quad (4.32)$$

$$\text{Ln}\left[\frac{1}{1 - F(x)}\right] = \left(\frac{x}{\beta}\right)^\alpha \quad (4.33)$$

$$\text{Ln}\left[\text{Ln}\left(\frac{1}{1 - F(x)}\right)\right] = \text{Ln}\left[\alpha\left(\frac{x}{\beta}\right)\right] \quad (4.34)$$

$$\text{Ln}\left[\text{Ln}\left(\frac{1}{1 - F(x)}\right)\right] = \alpha \text{Ln}(x) - \alpha \text{Ln}(\beta) \quad (4.35)$$

Bu denklem basit çizgi denklemini olarak yazılırsa, denklemin sol tarafında $y = \text{Ln}(x)$ ile, $m = 1/\alpha$ ile ve $b = \text{Ln}(\beta)$ şeklinde yazılır. Burada lineer rekreasyon uygulanarak Weibull parametreleri bulunur. Burada doğrusal çizginin eğimi α 'dır.

β parametresi ise,

$$\beta = e^{-\left[\frac{b}{\alpha}\right]} \quad (4.36)$$

şeklinde hesaplanır [21, 22].

Ortalama değer [3];

$$M[X] = \int_0^{\infty} x.F(x)dx = \beta.\Gamma\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right) \quad (4.37)$$

Burada, Γ : gamma fonksiyonudur [3,23]

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^{\infty} x^{\alpha-1} e^{-x} dx \quad (4.38)$$

4.4.1.2 Örnek Weibull uygulaması :

Weibull doğrusunu çizme aşamasında bu parametreleri elde etmek için, sırasıyla aşağıdakiler işlemler yapılır [17];

- 1) Veriler artan sırada yerleştirilir:
- 2) Her bir değere $I=1,2,3,\dots,n$ şeklinde ifade edilir
- 3) Her bir değer için kırılma ihtimalini şu formülle hesaplanır (sıra ortalaması=medyan sırası) denklem (4.28)'den veya denklem (4.29) hesaplanır. Burada denklem (4.28) kullanılacaktır;

$$P = \frac{i}{n+1} \text{ olarak hesaplanır}$$

- 4) Her bir değer için $\ln(\text{gerilme})$ ve $\ln\left[\ln\left(\frac{1}{1-P}\right)\right]$ değerleri hesaplanır.

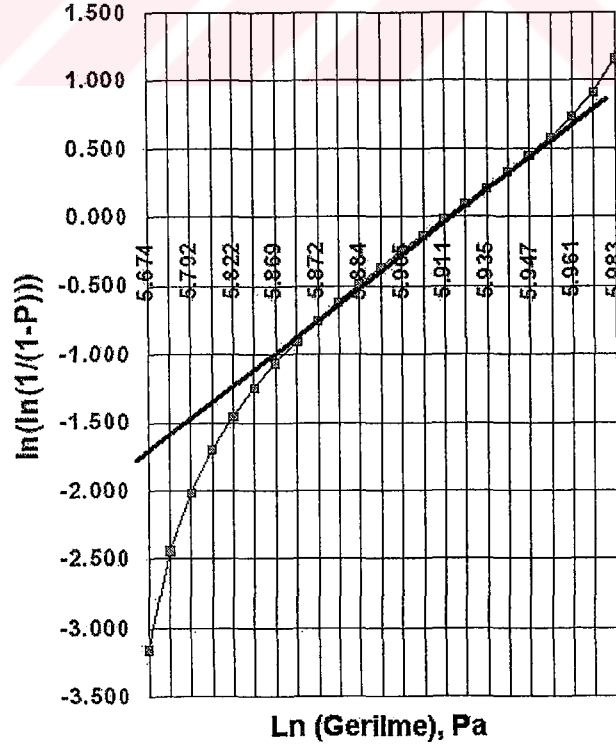
Düzenlenmiş mukavemet verilerinin benzer bir çeşidi Tablo 4.4'de verilmiştir.

Weibull dağılım parametreleri ve güvenilirlik analizi, Microsoft Excel ile kolaylıkla yapılabilir [21, 23]. Weibull parametrelerinin hesabı için Tablo 4.4'deki bütün veriler Microsoft Excel'e aktarılır. $\ln(\text{Gerilme})$ ve $\ln(\ln(1/(1-P)))$ değerlerinin grafiği Şekil 4.24'deki gibi çizdirilir. Bu grafikten, $y=mx+b$ doğru denklemi en uygun formda elde edilir. Bu basit doğru denklemi denklem (4.30-4.35)'deki değerlere uygulanır. Lineer regresyon uygulanarak, doğrunun eğiminden direkt α parametresi elde edilir. Denklem (4.36)'dan ise β parametresi elde edilir.

Şekil 4.24'de bu veriler için çizilmiş Weibull diyagramı görülmektedir. Bu çizimdeki parametrelerden $\sigma_0 = 371.7965 \text{ MPa}$ ($\ln \sigma_0 = 5.91834$) ve $\alpha = 14.023$ bulunmuştur.

Tablo 4.4 Weibull çizimi için sıralanmış mukavemet verileri

No	Gerilme, MPa	$P=i/(1+n)$	$\text{Ln}(\text{Gerilme})$	$\text{Ln}(\text{Ln}(1/(1-P)))$
1	291,2	0.042	5.674	-3.157
2	304,1	0.083	5.717	-2.442
3	327,6	0.125	5.792	-2.013
4	332,3	0.167	5.806	-1.702
5	337,5	0.208	5.822	-1.454
6	347,0	0.250	5.849	-1.246
7	353,8	0.292	5.869	-1.065
8	354,8	0.333	5.872	-0.903
9	355,1	0.375	5.872	-0.755
10	356,8	0.417	5.877	-0.618
11	359,4	0.458	5.884	-0.489
12	360,4	0.500	5.887	-0.367
13	366,7	0.542	5.905	-0.248
14	368,2	0.583	5.909	-0.133
15	369,2	0.625	5.911	-0.019
16	372,3	0.667	5.920	0.094
17	377,9	0.708	5.935	0.209
18	378,7	0.750	5.937	0.327
19	382,5	0.792	5.947	0.450
20	383,7	0.833	5.950	0.583
21	388,0	0.875	5.961	0.732
22	394,4	0.917	5.977	0.910
23	396,8	0.958	5.983	1.156



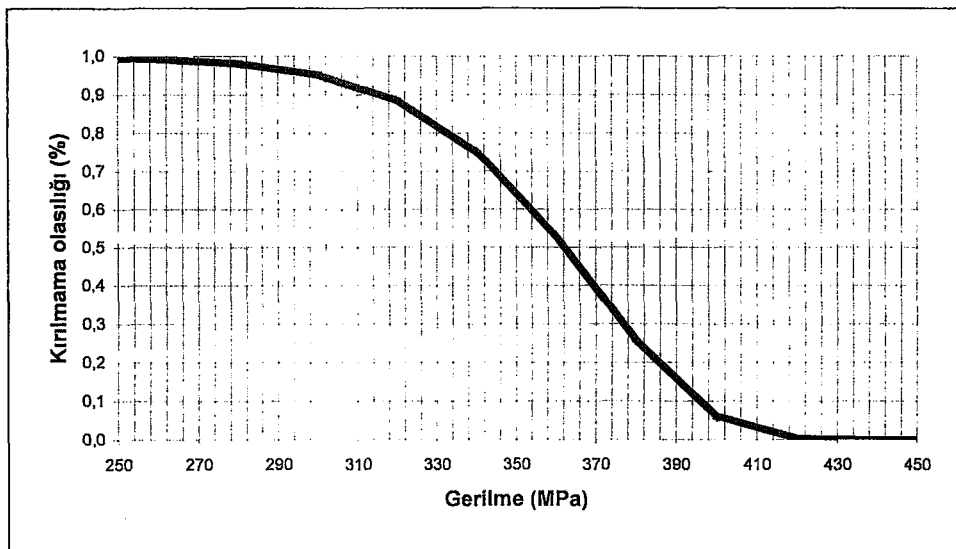
Şekil 4.24 Mukavemet değerleri için çizilen Weibull diyagramı

Tablo 4.5'deki güvenilirlik olasılığı denklem (4.25)'den veya Microsoft Excel'in 1-WEIBULL fonksiyonu ile hesaplanabilir. İşe yaramama ise WEIBULL şeklinde hesaplanabilir [21].

Tablo 4.5 Microsoft Excel ile Hesaplanmış Weibull Parametreleri ve Güvenirlik değerleri

Beta	Alfa	Gerilme	İşe Yaramama	Güvenirlik	Güvenirlik	Gerilme
β	α	x	$F_s(x) = e^{-\left[\frac{x}{\beta}\right]^\alpha}$	$F_f(x) = 1 - F_s(x)$	$F_f(x)$	$x = \alpha(-\text{Ln}(F(x)))^{1/\beta}$
14.0227	371.796	250	0.0038	0.9962	0.01	414.575
		260	0.0066	0.9934	0.1	394.580
		270	0.0112	0.9888	0.5	362.204
		280	0.0186	0.9814	0.9	316.672
		290	0.0302	0.9698	0.99	267.815
		300	0.0482	0.9518		
		310	0.0752	0.9248		
		320	0.1148	0.8852		
		330	0.1712	0.8288		
		340	0.2483	0.7517		
		350	0.3486	0.6514		
		360	0.4707	0.5293		
		370	0.6072	0.3928		
		380	0.7428	0.2572		
		390	0.8584	0.1416		
		400	0.9385	0.0615		
		410	0.9806	0.0194		
		420	0.9960	0.0040		
		430	0.9995	0.0005		
		440	1.0000	0.0000		

Tablo 4.5'deki elde edilen verilerden uygulanan gerilmeye bağlı olarak kırılmama (ömrünü sürdürme=Survival Graph) için Şekil 4.25'deki grafik çizilebilir [21].

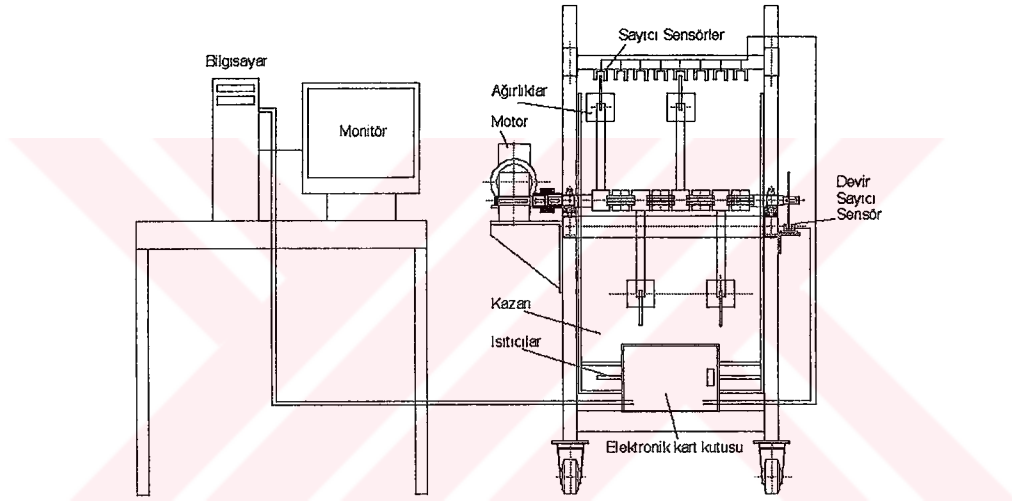


Şekil 4.25 Gerilmeye karşı – kırılmama (ömrünü sürdürme) grafiği (Survival Graph)

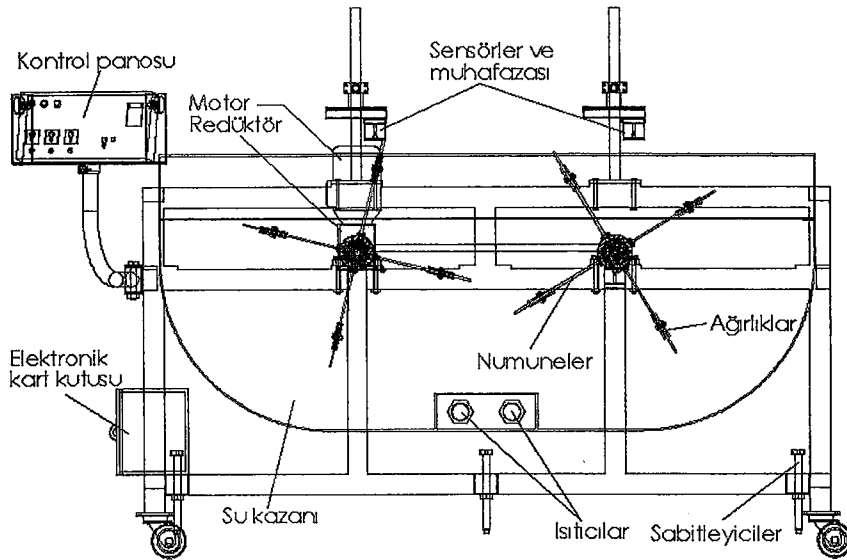
BÖLÜM 5

BİLGİSAYAR DESTEKLİ ÇOK NUMUNELİ EĞİLME YORULMASI TEST CİHAZI TASARIMI VE İMALATI

Aynı anda 16 adet standart kompozit test numunelerini tek taraflı eğilme yorulmasına tabi tutabilen test cihazı Şekil 5.1 ve Şekil 5.2’de görüldüğü gibi tasarlanmış ve imalatı yapılmıştır. Şekil 5.1’de görülen iki adet ana mil üzerine 8’erli gruplar halinde 16 adet numune bağlanabilmektedir.

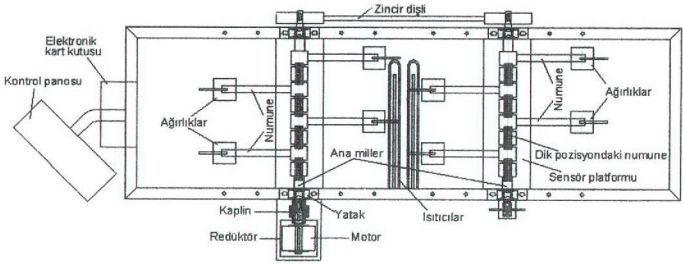


a) Test cihazının ön görünüşü (şematik)



b) Test cihazının sol yan görünüşü (şematik)

Şekil 5.1 İmal edilen çok numuneli ve sabit gerilmeli eğilmeli yorulma deney cihazının şematik gösterimi



b) Test cihazının üst görünüşü (şematik)

Şekil 5.1'in devamı : Çok numuneli ve sabit gerilmeli eğilmeli yorulma deney cihazının şematik gösterimleri



Şekil 5.2. Çok Numuneli Yorulma Cihazı (su kazanı monte edilmemiş)

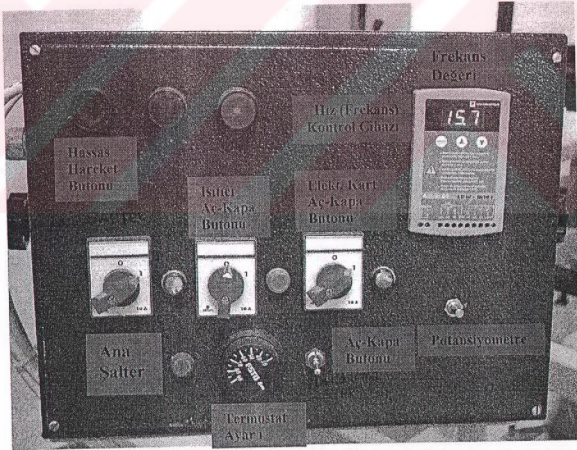
Genel olarak, Bilgisayar Destekli Çok Numuneli Eğilme Yorulması Test Cihazı 10 temel gruptan oluşmaktadır (Şekil 5.1 ve Şekil 5.2).

- Bilgisayar
- Elektronik Ana Kart
- Kontrol Panosu

- Elektrik Motoru ve Redüktör
- 2 adet Ana Mil
- Ana mil üzerine bağlanan test numuneleri
- Sensör Gruplarının bulunduğu 2 adet platform
- Devir Sayıcı Sensör
- Kasa
- Su Kazanı ve Isıtıcılar

Kontrol Panosu Üzerinde (Şekil 5.3) :

- Ana şalter, ana elektrik açma/kapama düğmesi
- Elektronik kart elektriği açma/kapama düğmesi
- Sıcaklık ayar düğmesi (Termostat)
- Frekans ayarını sağlayan potansiyometre
- Hız (frekans) kontrol cihazı



Şekil 5.3 Kontrol Panosu

Elektrik motoru - redüktör grubu ve motor hız (frekans) kontrol cihazı REMAK REDÜKTÖR MAKİNA SANAYİ VE TİC. LTD. ŞTİ.'den temin edilmiştir. Test cihazı ekipmanı ile ilgili teknik özellikler Tablo 5.1'de verilmiştir.

Tablo 5.1 Test cihazı ekipmanı ve teknik özellikleri

Test cihazı ekipmanı	Teknik özellik
Motor hız (frekans) kontrol cihazı	Altivar 08 HU Soğutuculu – Telemecanique
Frekans aralığı	0,5 – 120 Hz
Elektrik motoru gücü	0,37 KW (0,5 HP)
Besleme gerilimi	200 – 240 V 50/60 Hz (monofaze)
Redüktör	Alüminyum gövdeli, sonsuz vidalı
Redüktör çevrim oranı	$i = 15$
Redüktör çıkış devri (50 Hz'de)	95 dev/dak
Motor çalışma frekansı (test anında)	15.79 Hz
Redüktör çıkış devri : (15.79 Hz'de)	30 dev/dak.
Kesintisiz güç kaynağı	3000 Watt

Elektronik ana kart, sensör grubu, test parametreleri (çevrim sayıları, kırılma sayısı, devir sayısı, vb.) ve diğer bilgilerin takip edilip ayarlandığı software (yazılım) COŞKUN FİBERGLAS LTD. ŞTİ. – BİDES BİLGİSAYAR LTD. ŞTİ.'nin işbirliği ile yapılmıştır. Elektronik sinyalleri algılamak için optik foto-sensörler kullanılmıştır. Sensörlerin algılama mesafesi en az 4-5 cm'ye kadar çıkarılmış, algılama zamanı ise 20 nanosaniye'ye kadar indirilmiştir. Elektronik sistem ile ilgili teknik özellikler Tablo 5.2'de verilmiştir.

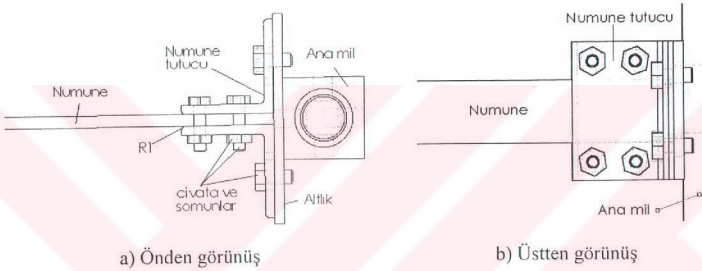
Tablo 5.2 Elektronik sistem ile ilgili teknik özellikler

Elektronik Sistem	Teknik Özellik
Kod sinyali üretici entegreler	LM339 (4 x comparator)
Binary (kod) dönüştürücü entegre	74HC244
Sensörler	IR (infrared) led ve algılayıcı
Algılama mesafesi	4-5 cm
Algılama zamanı	20 nanosaniye ($20 \cdot 10^{-9}$ sn.)
Yazılım	Visual Basic 6.0

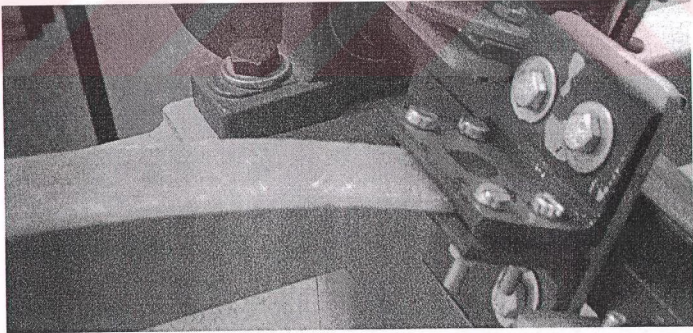
Test cihazının metalik aksamı MISIRLI MAKİNA KAZAN LTD. ŞTİ'nin işbirliği ile yapılmıştır.

Hız (frekans) kontrol cihazı ile entegre çalışan 0,37 KW'lık elektrik motoru 220 V'luk akım ile beslenmekte ve 1390 dev/dak ile dönmektedir. Ancak motora bağlı sonsuz vidalı redüktörü sayesinde maksimum devir yaklaşık 15 kat düşürülerek 95 dev/dak. inmektedir. Sabit 50 Hz olan elektrik motoru frekansı, frekans kontrol cihazı sayesinde 0-50 Hz

arasında hassas potansiyometre ile değiştirilebilmektedir (Şekil 5.3). Böylece redüktör çıkışındaki ana miller, 0-95 dev/dak aralığındaki farklı devirlerde çalıştırılabilmektedir. Birinci ana milden alınan dönme hareketi, zincir dişli vasıtasıyla ikinci ana mile aynı hızda iletilmektedir. Kesiti 40x40 kare olan miller üzerine, birbirine 90° olacak şekilde 8'er adet toplam 16 adet yorulma numunesi bağlanabilmektedir. Numunelerin bağlama sistemini Şekil 5.4'de görülmektedir. Numuneler, dönme esnasındaki yuvarlatma yarıçapı $R=1$ mm olan numune tutucular ile çift taraftan altlığa bağlanmıştır. Altlık ise direkt olarak ana mil üzerine bağlanmıştır.



Şekil 5.4 Numune bağlama sistemi (şematik)



Şekil 5.5 Numune bağlama sistemi

Şekil 5.1 ve Şekil 5.2'de görüldüğü gibi sensörlerin bulunduğu platformlarda her bir numunenin çevrim sinyalinin alıp elektronik karta gönderen ve 8'erli 2 gruptan oluşan toplam 16 adet sensör bulunmaktadır.

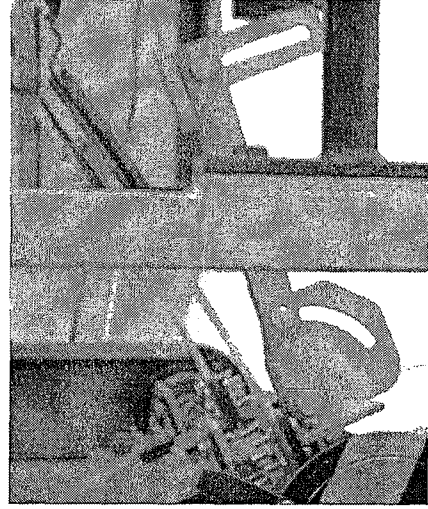
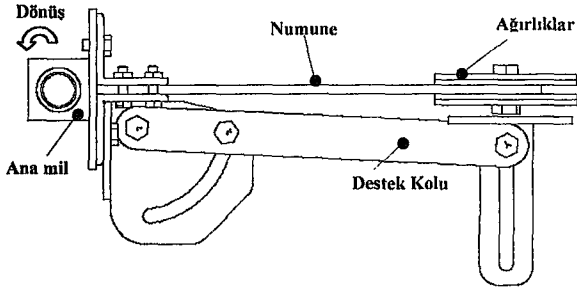
Her bir numunenin veya ağırlığın ucunda görülen ince parçalar ise kendisine ait sensörlerin arasından geçerek elektronik sinyal üretmektedir. Sayıcı sensörlerden alınan her data (çevrim) elektronik ana karta gelmektedir. Burada comparator devre sayesinde yorumlanıp daha sonra binary koduna dönüştürülen sinyaller, bilgisayarın “LPT portu” aracılığı ile yazılıma ulaşmaktadır. İlgili yazılım sayesinde datalar yorumlanıp sayılar olarak sabit diske kaydedilmektedir. Dolayısıyla 16 adet sensörden alınan sinyaller bilgisayara kadar iletilmekte ve kayıt altına alınmaktadır. Kırılan numune düştükten sonra, sinyal göndermeyeceğinden program bu numunenin çevrim sayısını durdurup kırılma sayısını kaydetmektedir. Sayılan datalar aynı zamanda monitörden izlenebilmektedir. Şekil 5.6 bilgisayar yazılımının çalışması görülmektedir.

Sensör	Devir Sayısı	Kırılma Sayısı
1	9236	
2	9236	
3	9236	
4	9237	
5	9236	
6	9236	
7	9236	
8	9237	
9	9236	
10	9236	
11	9236	
12	9237	
13	9236	

Şekil 5.6 Bilgisayar yazılımının çalışması (sayıcı ekran)

Şekil 5.1a’da görülen devir sayıcı sensörün görevi ise yine bilgisayara sinyal göndererek çalışma anındaki devir sayısını hesaplayıp yazılım üzerinde göstermektir.

Şekil 5.1 ve Şekil 5.2’de görülen şekliyle eğilme yorulması testleri “sabit gerilmeli” ve “tam değişken” (ortalama gerilmenin sıfır olduğu yükleme hali, $R=-1$) yükleme hali ile test edilmektedir. Ancak Şekil 5.7’de görülen açısı ayarlanabilir destek kolları sayesinde farklı yükleme halleri (farklı R gerilme oranları) içinde yorulma testleri yapılabilecektir. Aynı zamanda bu destek kolları sayesinde eğilme yorulması testi sabit “şekil değişim kontrollü” deney makinesi haline de dönüşmektedir.

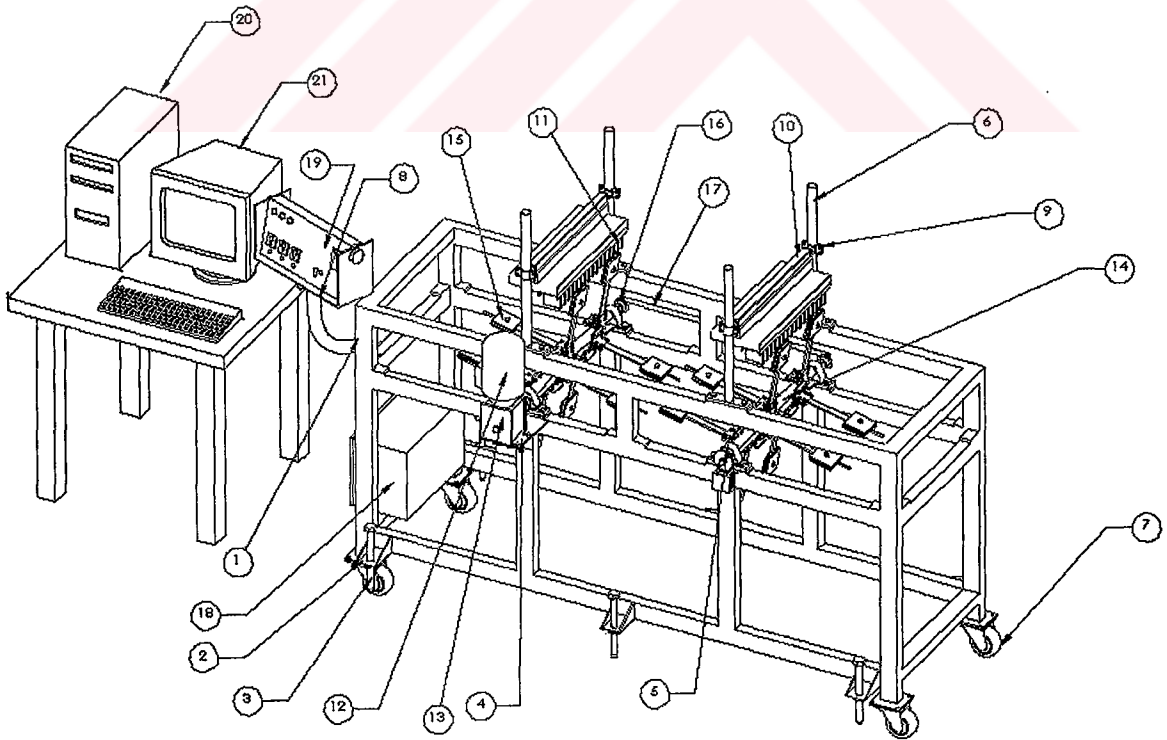


a) Destek aparatı şematik resmi

b) Destek aparatının bağlantı şekli

Şekil 5.7 Farklı gerilme oranı (R) sağlayan destek aparatı

Şekil 5.8’de imal edilen test cihazının şematik olarak detay resmi görülmektedir.



Şekil 5.8 Test cihazının şematik detay resmi

Tablo 5.3 Çok numuneli Eğilme Yorulması Test Cihazı Detayları

PARÇA NO	ADET	İSİM	MALZEME	AÇIKLAMA ÖLÇÜ (mm)
1	1	Kasa	Profil	40X60x2
2	6	Alt sabitleyici	St 37	3
3	6	Dengeleme civatası	Hazır	M20x220
4	1	Motor altlığı	St 37	3
5	4	Yatak	Hazır	Ø22
6	4	Sensör platformu tutucu kolu	St 37	Ø30
7	4	Tekerlek	Hazır	Ø85
8	1	Kontrol panosu tutucu kolu	Hazır	Ø50
9	4	Kelepçe	Hazır	½"
10	2	Profil	Profil	30x30x2
11	16	Sensör platformu	DKP	1
12	1	Motor	220/230 V	0.5 HP 1350 dev/dak
13	1	Sonsuz vidalı redüktör	(i=15)	çıkış = 95 dev/dak
14	2	Ana mil	St52	40x40
15	64	Ağırlık	St 37	80x80x4
16	2	Zincir dişli	Hazır	½ " 24 diş
17	1	Zincir	Hazır	½"
18	1	Elektronik kart kutusu	DKP	1
19	1	Kontrol ünitesi	DKP	1
20	1	Bilgisayar	Pentium III	800 Mhz
21	1	Monitör	Monitör	15"

BÖLÜM 6

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

6.1 ÇALIŞMANIN AMACI

Endüstriyel uygulamalardaki bir çok malzeme çekme mukavemetinin çok altındaki tekrarlı gerilme veya şekil değişimlerine maruz kalmaktadır. Bu yüzden malzemelerin kullanılabilirliğine yorulma özellikleri ile daha iyi karar verilebilir [1,3,5,7,15].

Çalışmanın amacı, GFRP (CTP) kompozitten yapılmış rüzgar türbin ve fan kanatlarındaki eğilme yorulmasından dolayı oluşan hasarı basite indirgeyerek incelemeye yöneliktir. Bölüm 4’de de bahsedildiği gibi rüzgar türbin kanatları üzerinde en etkili olan hasarlardan biri yorulma hasarıdır. Yorulma hasarı üzerinde en etkili olan kuvvet ise rüzgar itme kuvveti ve bunun oluşturduğu değişken eğilme gerilmeleridir. Bu nedenle bu çalışmada, yorulma üzerinde etkisi az olan sürüklenme ve merkezkaç kuvveti ihmal edilmiştir. Bu elemanlar için başta yorulma ömrü olmak üzere, mekanik özellikler ve ekonomik açıdan en uygun malzeme yapısı elde edilmeye çalışılmıştır. Bu elemanlardaki yükleme ve gerilme şekline benzer bir yorulma yapabilmek için, bilgisayar destekli ve çok numuneli yeni bir yorulma cihazı tasarlanmıştır.

6.2 DENEY YÖNTEMLERİN BELİRLENMESİ

Yukarıda bahsedilen amaca yönelik bir yapısal bileşimin tespitinde, uygulanacak deney yöntemlerinin belirli bir sistematığe göre yapılması gerekir. Bu nedenle bu çalışmamızda sırasıyla çekme, üç noktadan eğme ve yorulma deneyleri yapılmıştır.

6.3 TEST NUMUNELERİ İÇİN MATERYAL VE METOT

6.3.1 MATERYALLER

Çekme, üç noktadan eğilme ve yorulma testlerine tabi tutulmak için RTM (Reçine Transferi=Enjeksiyonu Metodu) yöntemiyle imal edilen deney numuneleri için aşağıda temel özellikleri verilen materyaller kullanılmıştır.

6.3.1.1 Reçine

CAMELYAF SANAYİ 'den (Şişecam) temin edilen CE 92 N8 tipi genel amaçlı Elyaf Polyesteri kullanılmıştır. CE 92 N8 tipi polyester genel amaçlı CTP uygulamaları için geliştirilmiş, orta reaktiviteli, ortoftalik polyester reçinesidir [13,24]. Deneysel çalışmalarda kullanılan polyester reçinesinin özellikleri Tablo 6.1 ve Tablo 6.2'de verilmiştir.

Sağladığı Faydalar :

- Uygun viskozitesi sayesinde cam elyafını çabuk ve kolay ıslatır.
- Yüksek mekanik dayanım sağlar

Tablo 6.1 Sıvı CE 92 N8 Polyester Reçinenin Özellikleri [24]

Özellikler	Birim	Spesifikasyon Değerleri
Görünüm	...	Berrak
Viskozite	Cps	400 ± 60
Asit Sayısı	MgKOH/g	Max. 25
Katı Madde Miktarı	%	Min. 58
Jelleşme Süresi (25°C)	dak.	8 ± 2
Egzoterm Pik (25°C)	°C	180 ± 20
Stabilite	ay	4

(*) Jelleşme süresi ve "Egzoterm Pik" tayini 50 mm çapında bir cam kaba konan 100 gr. reçineye 25°C'de %0.25 oranında %6'lık Kobalt Naftanat ve %2 oranında %50 aktif Metil Etil Keton Peroksit ilave edilmesinden sonra yapılır.

Tablo 6.2 Sertleşmiş CE 92 N8 Polyester Reçinenin Özellikleri [24]

Özellikler	Birim	Spesifikasyon Değerleri
Spesifik Yoğunluk	gr/cm ³	1,2
Sertlik	Barcol	Min. 45
Eğilme Dayanımı	Kg/cm ²	Min. 850
Çekme Dayanımı	Kg/cm ²	Min. 450

6.3.1.2 Hızlandırıcı (Katalizör)

Hızlandırıcı olarak, Poliya Polyester ve Yardımcı Maddeler Sanayi'den temin edilen COBALT (%1'lik) kullanılmıştır. Firma, genel amaçlı polyesterler için 23 °C de ortalama 10-11 dakikalık jelleşme süresi için %1 oranında Cobalt kullanımını önermiştir [25]. Ancak uyguladığımız RTM metodu için ortalama 120-150 dakikalık bir jelleşme süresine ihtiyaç duyulduğundan 1000 ml polyester için yaklaşık %0,2 oranında Cobalt kullanılmıştır. Kullanılan Cobalt oranları Tablo 6.8'de verilmiştir.

6.3.1.3 Sertleştirici

Sertleştirici olarak Poliya Polyester ve Yardımcı Maddeler Sanayi'den temin edilen MEK-PEROXIDE (Methyl Ethyl Ketone Peroxide) kullanılmıştır. Firma, genel amaçlı polyesterler için 23 °C de ortalama 10-11 dakikalık jelleşme süresi için %1 oranında MEK-P kullanımını önermiştir [25]. Ancak uyguladığımız RTM metodu için ortalama 100-150 dakikalık bir jelleşme süresine ihtiyaç duyulduğundan, 1000 ml polyester için yaklaşık %0,7 oranında MEK-P kullanılmıştır. Kullanılan MEK-P oranları Tablo 6.8'de verilmiştir.

Kullanılacak hızlandırıcı (cobalt), sertleştirici (MEK-P) ve diğer katkı maddeleri için firmalar tam ve kesin değerler belirmemektedir. Çünkü, uygulamalarda RTM metodu ile kalıplama yapılırken, değişik polyester hazırlama formülasyonları kullanılabilir. En uygun formülasyon, kalıplama koşullarına bağlı olarak, deneme yanılma metodu ile üretici tarafından saptanmalıdır [13,24,25].

Dolayısıyla numune hazırlarken ; kullanılan polyester cinsi, polyesterin jelleşmeden reçine transfer işlemini tamamlamak için gereken süre (100-150 dak), ortam sıcaklığı, kalıp sıcaklığı ve kullanılan stiren oranına bağlı olarak, 100'er ml'lik polyester+stren karışımlarına farklı oranlarda cobalt ve MEK-P karıştırılarak jelleşme ve sertleşme süreleri takip edilmiştir. Sonuçta, bütün şartlar değerlendirildiğinde, 31x60x0,3 cm boyutlarındaki bir tabaka numune hazırlayabilmek için gereken 1000 ml'lik karışıma ortalama %0,2 oranında cobalt (hızlandırıcı) ve %0,7 oranında MEK-P kullanılabileceği kanıtlanmıştır. Bu değerler Tablo 6.8'de daha detaylı verilmiştir.

6.3.1.4 Stiren (Styrene) Monomeri

Polyesterin viskozitesini RTM'ye uygun olarak düşürebilmek, elyafların ıslanma kabiliyetlerini yükseltmek ve akıcılığı daha iyi sağlamak için, Poliya Polyester ve Yardımcı Maddeler Sanayi'den temin edilen Stiren kullanılmıştır. Reçinenin düşük viskozitede kullanılması sonucunda enjeksiyon basıncı azalmakta ve cam elyaf takviyesi daha kolay ıslanmaktadır [CES Bülten]. Elyafların çok iyi ve homojen ıslanması sonucunda, kalıp içinde hava boşluğu en aza indirilebilmektedir. Bölüm 3'de bahsedildiği gibi optimum bir RTM reçinesinde ; Viskozite < 200 Cps ve Sertleşme Sıcaklığı < 75 °C olmalıdır [13]. Tablo 6.1'de görüldüğü gibi deneylerde kullanılan CE 92 N8 Polyester reçinesinin viskozitesi ortalama 400 cps'dir. RTM'ye uygun olarak viskoziteyi 200 cps'in altına düşürebilmek için ortalama %10-20 arasında stiren kullanılması gerekir [13]. Bu durum Bölüm 3'de verilen Şekil 3.6'da gösterilmiştir. Dolayısıyla reçine transferi uygulamasında toplam 1000 ml'lik CE 92 N8 polyester içine yaklaşık %15-17 arasında stiren ilave edilmiştir. Bütün numunelerde kullanılan polyester ve stiren oranları Tablo 6.8'de verilmiştir.

6.3.1.5 Kalıp Ayırıcı

Kalıp ayırıcı olarak, Poliya Polyester ve Yardımcı Maddeler Sanayi'den temin edilen Poliya Polivaks ve Poliya Polivaks EKO PVA Sıvı kalıp ayırıcı kullanılmıştır. Ancak kullanım kolaylığı ve kalıptan ayrılma kolaylığı göz önüne alındığında, daha ziyade Polivaks tercih edilmiştir.

6.3.1.6 Aseton

Kalıp, piston, silindir ve kullanılan diğer ekipmanın polyesterden rahat temizlenebilmesi için Erco Aseton kullanılmıştır.

6.3.1.7 Cam Elyafı

Reçine transferi metodunda kullanılmak üzere; 800, 500, 300, 200 gr/m²'lik cam dokuma fiberler FİBROTEKS A.Ş'den temin edilmiştir. 225, 450, 600 gr/m²'lik cam keçe fiberler ise CAM ELYAF A.Ş.'den temin edilmiştir. Bütün fiberlerin cinsi "E" camı

elyafıdır. Cam elyaf tipleri ve yönleri ile ilgili detaylar Şekil 6.2 ile Tablo 6.3 ve Tablo 6.4’de verilmiştir. 0/90°’lik cam dokuma elyaflar, Şekil 6.1’de görüldüğü gibi $\pm 45^\circ$ yönlerde kesilerek, tip ve yön olarak farklı malzeme parametreleri elde edilmiştir.

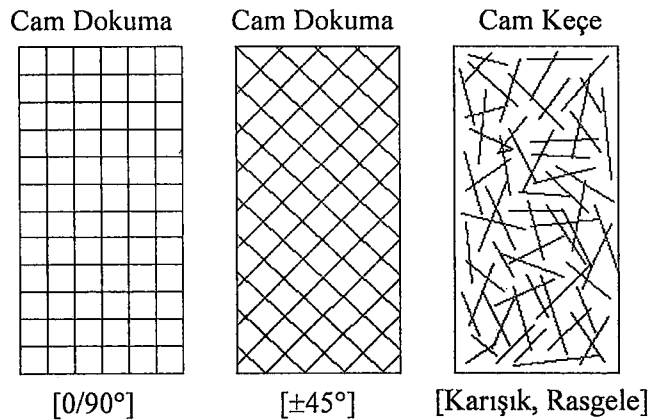
6.3.1.7.1 Cam Elyaf Tipleri ve Yönleri

Tablo 6.3 Cam fiber (E – Camı) yaklaşık mekanik özellikleri [26]

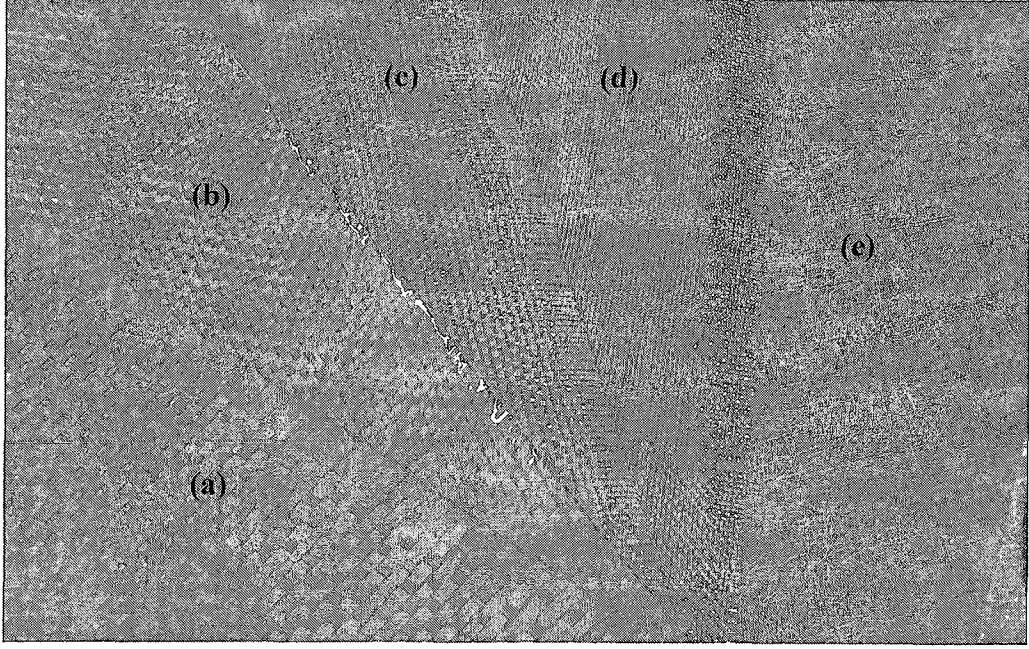
Malzeme Tipi	Çekme Mukavemeti (MPa)	Çekme Modülü (GPa)	Tipik Yoğunluk (gr/cm^3)	Spesifik Modül
Cam Fiber – E Camı	2400	69	2,5	27

Tablo 6.4 Deneysel numunelerinde kullanılan cam elyaf tipleri

Cam Elyaf Tipi	Yön	Elyaf Tipi Alansal yoğunluk (gr/m^2)
Dokuma	0/90°	800
Dokuma	0/90°	500
Dokuma	0/90°	300
Dokuma	0/90°	200
Dokuma	$\pm 45^\circ$	800
Dokuma	$\pm 45^\circ$	500
Dokuma	$\pm 45^\circ$	300
Dokuma	$\pm 45^\circ$	200
Keçe	Karışık	600
Keçe	Karışık	450
Keçe	Karışık	225



Şekil 6.1 Kullanılan cam elyaf tiplerinin şematik gösterimi



a) 800 gr/m² Cam Dokuma b) 500 gr/m² Cam Dokuma c) 300 gr/m² Cam Dokuma
d) 200 gr/m² Cam Dokuma e) 225 gr/m² Cam Keçe

Şekil 6.2 Kullanılan cam elyaf tipleri

6.3.2 TEST NUMUNELERİNİN İMALAT METODU

6.3.2.1 RTM Metodu için Kalıp Tasarımı ve İmalatı

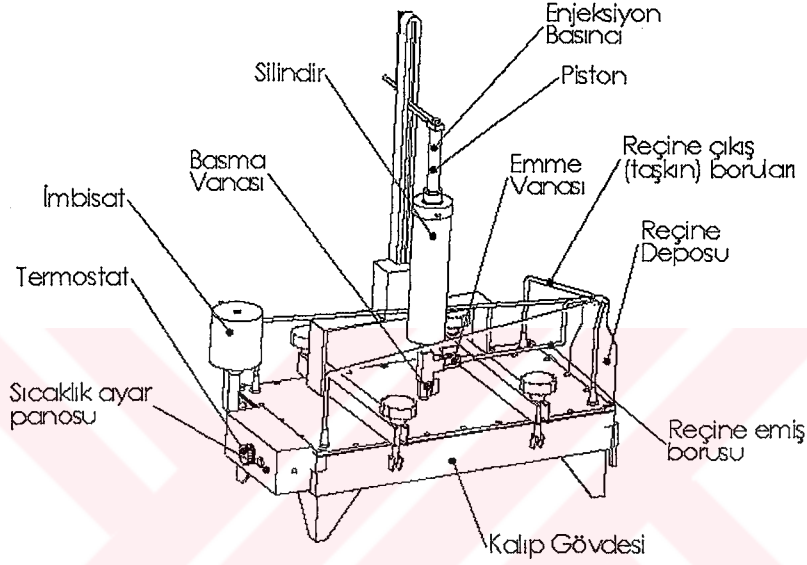
Bölüm 3’de RTM metodunun avantajları sıralanmıştır.

Reçine Enjeksiyonu (RTM) metodu ile CTP numune elde edebilmek için Şekil 6.3’de görülen ısıtmalı bir kalıp imal edilmiştir. Kalıp MISIRLI MAKİNA KAZAN LTD. ŞTİ’nin işbirliği ile yapılmıştır.

İmal edilen RTM kalıbı, özellikle hava sıcaklığının düştüğü günlerde reçine transferini kolaylaştırmak, elyaflardaki nemi almak, reçine viskozitesini sabit tutmak, kalıp içinde reçine akışını kolaylaştırmak, kür ve sertleşme sıcaklığının yeterli olmadığı ortam şartlarında, kalıptan çıkarma zamanı kısaltabilmek için 90 °C’ye kadar ısıtılabilir. RTM kalıbından çıkacak numunelerde iyi yüzey kalitesi için, kalıp içi boşluğunun alt ve üst yüzeyi paslanmaz çelikten imal edilmiştir. İmal edilen bu kalıp ile 1 atm veya daha az basınç ile reçine enjeksiyonu yapılabilir.

Tablo 6.5 Kalıp ölçüleri

Kalıp Boyutu	Birim	Değer
Kalıp içi eni	cm	31
Kalıp içi boyu	cm	60
Kalıp içi derinliği	cm	0,3
Kalıp alanı	cm ²	1860
Kalıp içi hacmi	cm ³	558



Şekil 6.3 RTM kalıbının şematik resmi ve uygulaması

6.3.2.2 RTM Metodu ile Numunelerin İmalat Aşaması

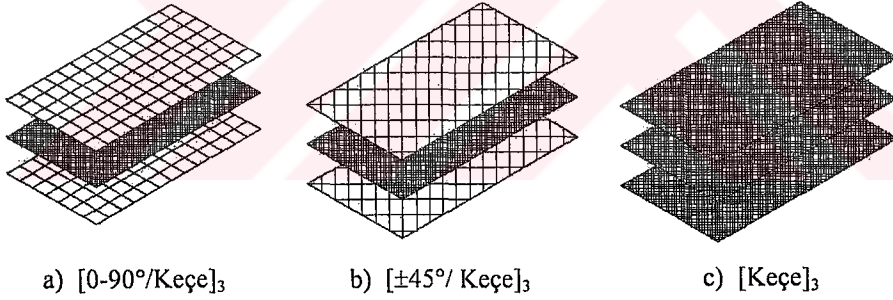
- Cam dokuma elyaflar, yönleri $0/90^\circ$ ve $\pm 45^\circ$, boyutları ise 30×59 cm olacak şekilde kesilerek hazırlanmıştır. Yine cam keçe elyaflar boyutları 30×59 cm olacak şekilde kesilerek hazırlanmıştır.
- Paslanmaz çelikten yapılmış olan ve Şekil 6.3'de görülen kalıp içi boşluğu ve kalıp üstü asetonla temizlenmiştir.
- Kalıp içi boşluğuna ve kalıp üstüne yeterli miktarda polivaks kalıp ayırıcı sürülmüştür. Temiz bir bez ile kalıp ayırıcının hem fazlalığı alınmış hem de kalıbın her yerine ulaştırılıp, parlatılmıştır.
- Kalıp açık durumda 10-15 dakika kurumaya bırakılmıştır.
- Daha önceden kesilerek hazırlanmış cam elyaf numuneler, Şekil 6.4'deki gibi bir kat cam keçe bir kat cam dokuma olacak şekilde kalıp boşluğu içine yerleştirilmiştir (Şekil 6.3).

6.5). Şekil 6.2'de ve Tablo 6.4'de görüldüğü gibi farklı elyaf tipleri ve açıları kullanılmıştır.

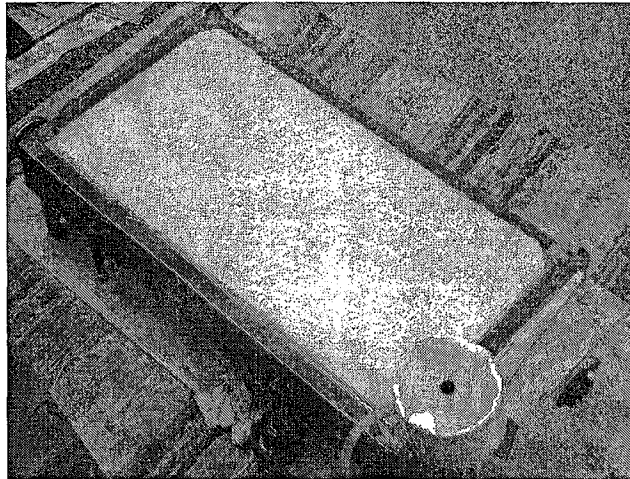
- f) Kalıp sızdırmazlığı için özel şeffaf silikon kullanılmış olup, kalıp kenarlarına yeteri kadar sürülmüş ve kalıp üst kapağı kapatılmıştır. Daha sonra kalıp kenarları emniyetli bir şekilde sıkılmıştır
- g) Silikonun kuruması için ortalama 45-60 dakika beklenilmiştir.
- h) Ölçülü beher ile 850 ml'lik polyester reçinesi karışım kabına dökülmüştür.
- i) Ölçülü beher ile 150 ml'lik stiren karışım kabına dökülerek, toplam hacim 1000 ml'ye ulaştırılmıştır.
- j) 1000 ml'lik polyester+stiren karışımına %0.2 oranında cobalt (%1'lik) hızlandırıcısı katılmış ve bu karışım iyice karıştırılmıştır.
- k) Karışımın dolayısı ile oluşan hava kabarcıklarının atılması için ortalama 10 dakika dinlemeye alınmıştır. Çünkü reçine enjeksiyonu sırasında hava kabarcıklarının kalıp içine gitmesi istenmemektedir.
- l) 1000 ml'lik polyester+stiren karışımına %0.7 oranında MEK-P sertleştiricisi katılmış ve bu karışım, hava kabarcıkları en az oluşacak şekilde karıştırılmıştır.
- m) Enjeksiyon için hazır olan karışım Şekil 6.3' ve Şekil 6.6'da görülen reçine deposuna boşaltılmıştır.
- n) Şekil 6.3 ve Şekil 6.6'da görülen emme vanası açılarak silindir içerisine karışım çekilmiştir.
- o) Silindir tamamen dolduktan sonra, emme vanası kapatılıp basma vanası açılmıştır. Silindir içindeki karışım, kalıp içine ortalama 0,5-1 atm'lik basınç ile enjekte edilmiştir. Her bir çevrim için silindir içindeki karışımın enjeksiyon süresi yaklaşık 17-21 dakikadır.
- p) Silindir içindeki karışım bitir bitmez, basma vanası kapatılıp emme vanası açılmıştır. Tekrar silindire polyester karışımı emilerek enjeksiyona devam edilmiştir. Dört ventilasyon noktasından çıkan fazlalık polyester karışım Şekil 6.3 ve Şekil 6.6'da görülen taşkın boruları sayesinde tekrar reçine deposuna alınmaktadır. Bu sırada Şekil 6.7'de görüldüğü gibi kalıp içindeki havanın borulardan dışarıya atıldığı gözlenmiştir.
- q) Islanmanın tam olarak sağlanması ve içeride hava boşluğu bırakılmaması için bu çevrim yaklaşık 5-7 defa tekrar edilmiştir.

- r) Reçine enjeksiyonu çevrimi bittikten sonra, piston ve silindir asetonla temizlenmiştir. Kalıp içinden atılan bir miktar fazlalık polyester ise yine taşkın boruları ile başka bir kaba alınmıştır.
- s) Kapalı kalıp içindeki numunenin “tam sertleşmesini” hızlandırmak için termostat 30-40 °C’ye ayarlanarak ısıtma sistemi devreye sokulmuştur.
- t) Yaklaşık 12 saat sonra kalıp açılmış ve Şekil 6.8’de görüldüğü gibi numune kalıptan çıkarılmıştır.

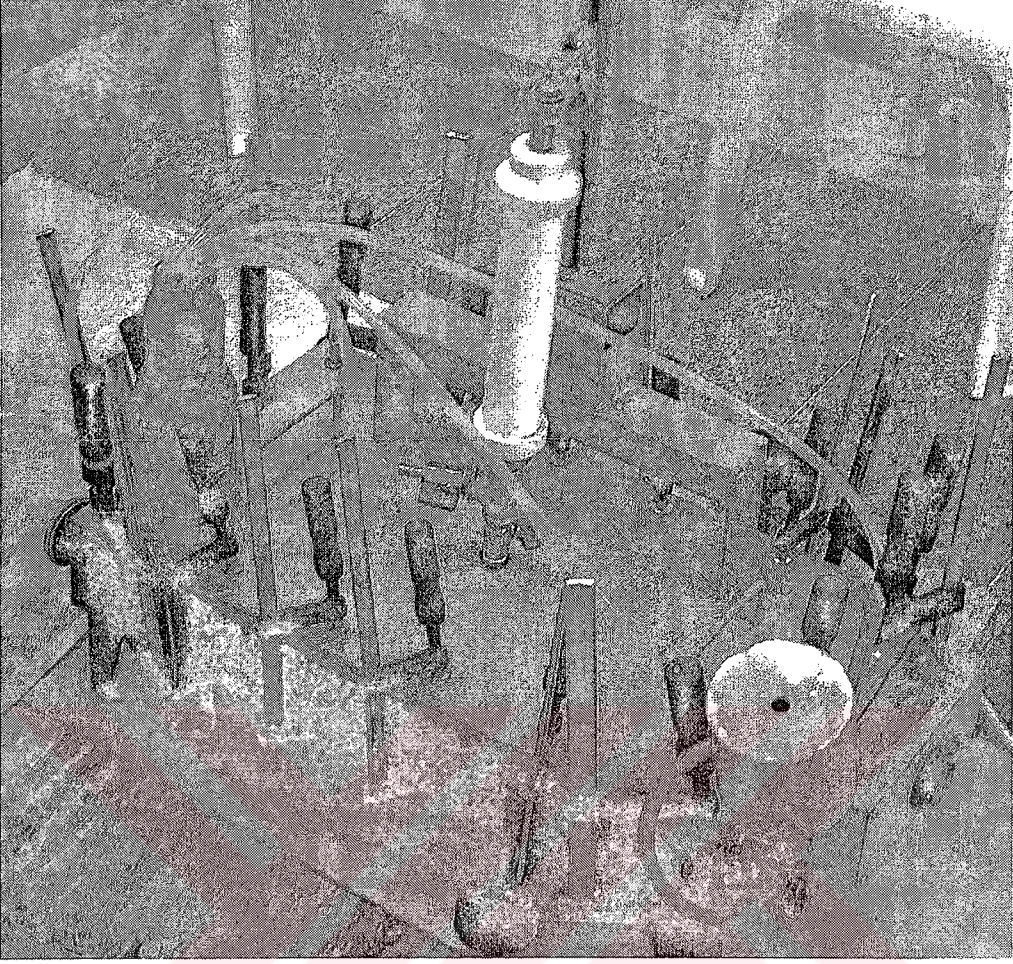
Yukarıda sıralanan (b)-(t) şıklarındaki işlem sırası, 31x60 cm boyutlarındaki 20 adet numune için tekrarlanmıştır. Bu şekilde dokuz farklı malzeme kombinasyonu elde edilmiştir. Bu kombinasyonlar alfabetik olarak A,B,C,D,E,F,G,H ve K gruplarıyla Tablo 6.6’da verilmiştir. Ancak, K grubuyla gösterilen son iki numune de, 6 kat 450 gr/m² + 1 kat 600 gr/m² olacak şekilde sadece cam keçe olarak imal edilmiştir. Böylece toplam dokuz farklı malzeme yapısı elde edilmiştir. Ayrıca numunelerin elde edilmesi esnasındaki bütün teknik detaylar Tablo 6.8’de verilmiştir.



Şekil 6.4 RTM Metodunda kullanılan cam elyaf yerleşimleri



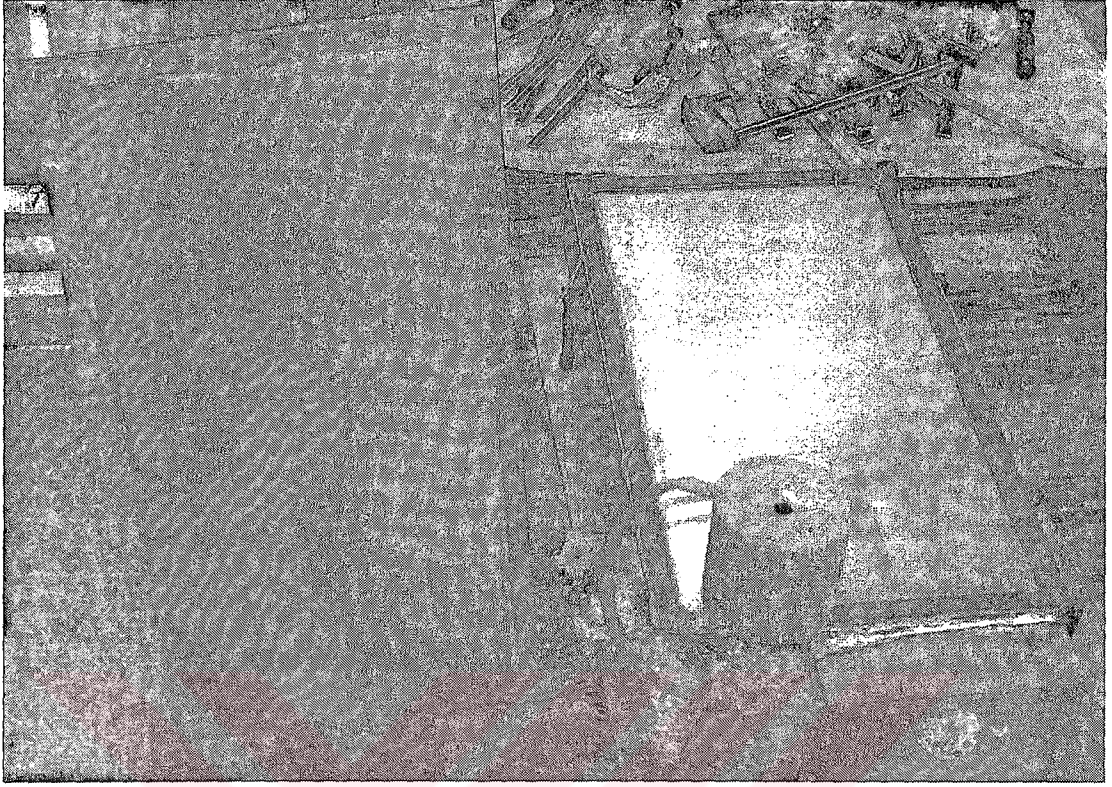
Şekil 6.5 Cam elyaflarının kalıp boşluğuna yerleştirilmesi



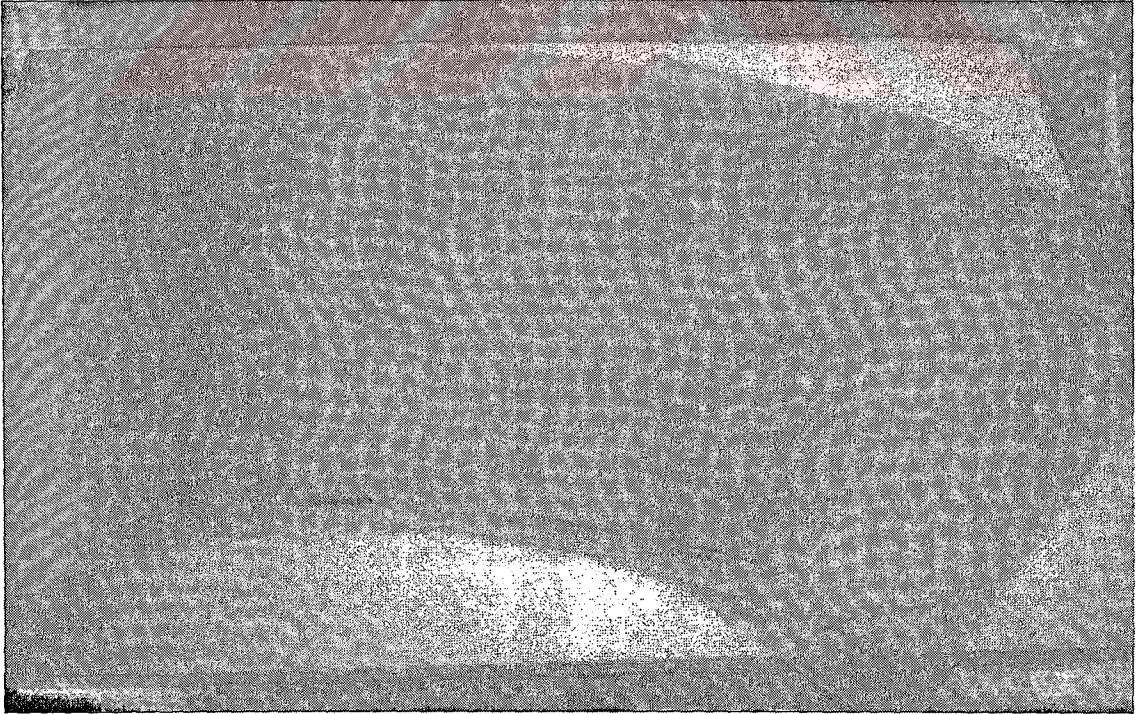
Şekil 6.6 RTM Uygulamas



Şekil 6.7 Reçine çıkış (ventilasyon) deliklerinden havanın atılması



Şekil 6.8 Kalıbın 12 saat sonraki açılmış hali



Şekil 6.9 RTM yöntemi ile elde edilen ve kalıptan çıkan numune örnekleri

Şekil 6.3’de şematik resmi gösterilen ısıtmalı kalıp ile hacimsel olarak %40-45 cam elyaf oranı içeren kompozit numuneler elde edilmiştir. Bu oran, RTM yöntemi için oldukça iyi bir fiber oranı anlamına gelmektedir [9,13].

Tablo 6.6 Cam-Fiber Takviyeli Kompozit Numunelerin Grup ve Kombinasyonları

Grup	Malzeme Kodu	Dokuma Fiber Yönü	Cam Fiber Hacmi	Cam-Fiber Kombinasyonu
A	3D800 4K225-45	± 45	% 44,00	3 Kat 800 gr/m ² Dokuma 4 Kat 225 gr/m ² Keçe
B	4D500 4K225 1K450 - 45	± 45	% 44,67	4 Kat 500 gr/m ² Dokuma 4 Kat 225 gr/m ² Keçe 1 Kat 450 gr/m ² Keçe
C	5D300 4K225 2K450 – 45	± 45	% 44,00	5 Kat 300 gr/m ² Dokuma 4 Kat 225 gr/m ² Keçe 2 Kat 450 gr/m ² Keçe
D	7D200 8K225 – 45	± 45	% 42,67	7 Kat 200 gr/m ² Dokuma 8 Kat 225 gr/m ² Keçe
E	3D800 4K225 – 0/90	0/90	% 44,00	3 Kat 800 gr/m ² Dokuma 4 Kat 225 gr/m ² Keçe
F	4D500 4K225 1K450 – 0/90	0/90	% 44,67	4 Kat 500 gr/m ² Dokuma 4 Kat 225 gr/m ² Keçe 1 Kat 450 gr/m ² Keçe
G	5D300 4K225 2K450 – 0/90	0/90	% 44,00	5 Kat 300 gr/m ² Dokuma 4 Kat 225 gr/m ² Keçe 2 Kat 450 gr/m ² Keçe
H	7D200 8K225 – 0/90	0/90	% 42,67	7 Kat 200 gr/m ² Dokuma 8 Kat 225 gr/m ² Keçe
K	6K450 1K600	Rasgele	% 44,00	6 Kat 450 gr/m ² Keçe 1 Kat 600 gr/m ² Keçe

Tablo 6.7 RTM’de kullanılan malzemeler ve yoğunlukları

Malzeme Özelliği	Birim	Değer
Cam Elyaf Yoğunluğu	gr/cm ³	2,5
Polyester Yoğunluğu	gr/cm ³	1,2
Stiren Yoğunluğu	gr/cm ³	0.906

Tablo 6.8 RTM Yöntemiyle Elde Edilen Test Numuneleri için Teknik Özellikler

Ö ZELLİKLER	NUMUNE GRUPLARI									
	A	B	C	D	E	F	G	H	K	
Dokuma Elyaf Katı (800 gr/m ²)	3*				3					
Dokuma Elyaf Katı (500 gr/ m ²)		4				4				
Dokuma Elyaf Katı (300 gr/ m ²)			5				5			
Dokuma Elyaf Katı (200 gr/ m ²)				7				7		
Keçe Elyaf Katı (225 gr/ m ²)	4	4	4	8	4	4	4	8		
Keçe Elyaf Katı (450 gr/ m ²)		1	2			1	2		6	
Keçe Elyaf Katı (600 gr/ m ²)										1
Elyaf Yönü (derece)	± 45	± 45	± 45	± 45	0/90	0/90	0/90	0/90	0/90	rasgele
Kalıp Hacmi (cm ³)	558	558	558	558	558	558	558	558	558	558
Elyaf Ağırlığı (gr)	613,8	623,1	613,8	595,2	613,8	623,1	613,8	595,2	613,8	613,8
Elyaf Hacmi (cm ³)	245,52	249,240	245,52	238,080	245,52	249,240	245,52	238,080	245,52	245,52
Toplam Elyaf Yüzdesi (%)	44,00	44,67	44,00	42,67	44,00	44,67	44,00	42,67	44,00	44,00
Top. Karışım Hacmi (cm ³)	1000	1000	1000	1000	1000	1050	1050	1050	1050	1050
Top. Kull. Polyester Hacmi (cm ³)	850	850	850	850	830	875	875	875	875	875
Top. Kull. Stren Hacmi (cm ³)	150	150	150	150	170	175	175	175	175	175
Stren Yüzdesi (%)	15	15	15	15	17	17	17	17	17	17
Cobalt Hacmi (cm ³)	2,25	2	2	2	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,5
Cobalt Yüzdesi (%)	0,225	0,200	0,200	0,200	0,160	0,152	0,152	0,152	0,152	0,143
MEK Peroksit Hacmi (cm ³)	7,5	7	7	7	6,2	6,2	6,2	6,2	6,2	6
MEK Peroksit Yüzdesi (%)	0,750	0,700	0,700	0,700	0,620	0,590	0,590	0,590	0,590	0,571
Toplam Enjeksiyon Süresi (dak)	105	111	132	132	122	132	143	157	153	153
Toplam Çevrim Sayısı (cycle)	6	6	7	7	6	7	8	9	8	8

(* sayılar : numunedeki ilgili fiber katman sayılarını ifade eder)

6.3.2.3 RTM Metodunda Tam Islanma için Yapılan Çalışmalar

Kompozit üretimi için Türkiye'deki uygulamaların büyük çoğunda el yatırması (hand lay-up) yöntemi kullanılmaktadır. Bu yöntem, çok basit ve ucuzdur. Ancak, çıkan ürün içerisinde yeterinden fazla reçine ve fazla hava boşluğu olduğundan, elde edilen mukavemet çok düşük ve boyut toleransları çok büyüktür. Bu yöntemin alternatifi ise bu çalışmada uyguladığımız RTM metodudur. RTM yönteminde, ilk olarak istenilen oranda cam dokuma ve diğer cam elyafları (keçe, örgü) katmanlar halinde dişi kalıba yerleştirilip üst kalıp kapatılır. Daha sonra, katalizörleri ilave edilmiş kimyasal polimer (reçine) ortalama 1- 4 atm basınç ile kapalı kalıba enjekte edilir. Fazla reçine ise kalıptaki ventüri (boşaltma) noktalarından hava ile birlikte dışarı verilir. Reçine kür olduktan ve yeterince soğuyup sertleştikten sonra kalıp üst kapağı açılıp parçalar çıkartılır.

Ancak bu üretim tekniğinin en büyük sorunları ise,

- İşçiliğin çok titiz olması zorunluluğudur. Kesilen elyafların kalıp içerisine yerleştirilirken büyük veya küçük olması sonucu, kalıp içerisinde istenmeyen boşluklar veya kırışıklıklar oluşmakta ve istenilen enjeksiyon elde edilememektedir.
- Uygun olmayan enjeksiyon noktası, elyafların kalıp içerisinde sürüklenmesine yol açmaktadır.
- Enjeksiyon sırasındaki işçiliğin uygun olmamasından veya azda olsa değişmesinden dolayı numune veya kalıp içinde fazla miktarda hava boşlukları kalabilmektedir.
- Eğer enjeksiyon esnasında kalıp içerisinde ince bir kanal oluşturmuşsanız, polimer öncelikle o kanaldan ilerlemek suretiyle ventilasyona daha çabuk ulaşmakta ve bazı bölgelerde hava sıkışarak, o bölgenin ya tam ıslanmamasına veya kuru kalmasına neden olmaktadır.

Dolayısıyla bütün elyaflar reçine ile tam olarak ıslanamamaktadır.

Bu durumda, kompozit malzemeden yapılmış bir eleman, özellikle tekrarlı yükler altındaki işletme şartlarında, bu bölgeden tabaka ayrılması (delamination) hasarına uğrayarak kısa sürede ömrünü dolduracaktır [14].

6.3.2.3.1 Tekrarlı Enjeksiyon (Sirkülasyon) Yöntemi

Literatürdeki çalışmalarda bahsedildiği gibi enjeksiyon ve ventilasyon noktalarının seçimi çok önemlidir. Bu konu ile ilgili çeşitli simülasyon çalışmaları da yapılmıştır. Enjeksiyon parametrelerinin bilgisayarla kontrollü bir şekilde kalıp içine verilmesi ve reçinenin kalıp içerisinde ilerlerken istenildiği şekilde bu şartların değiştirilebilmesi için çalışmalar yapılmıştır [14].

İmal ettiğimiz bu kalıpta, orta noktadan kimyasal reçine enjeksiyon yapılmış ve kalıbın dört köşesinden reçine dışarı verilmiştir. Bu şekildeki tasarımdaki amacımız ise, reçinenin bütün noktalara aynı anda ve aynı oranda ulaşması ve daha iyi bir ıslanmanın gerçekleşmesidir. Bu tasarım ile optimum enjeksiyon parametrelerini en kolay şekilde yaklaşım sağlanmıştır.

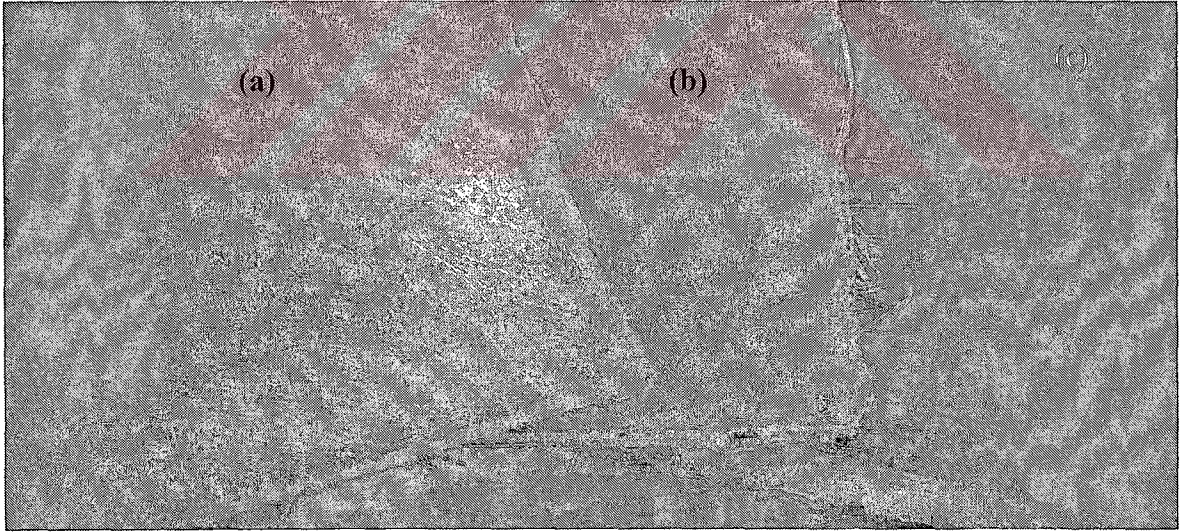
Bu çalışmalarımızda, RTM yöntemi ile 1.5-20 mm arasında cidar kalınlığı sağlanabildiği düşünüldüğünde [13] ; cidar kalınlığının arttığı, elyafların çok sık olduğu ve dolayısıyla cam fiber geçirgenliğinin düştüğü durumlarda (vakum olmaksızın), tek bir defa reçine enjeksiyonu ile tam ıslanmanın sağlanamayacağı anlaşılmıştır. Bununla birlikte, yukarıda da bahsedildiği gibi, reçine enjeksiyonu esnasında işçilikteki en küçük değişkenlik sonucunda polimerin kalıp içerisindeki ilerlemesi ideal koşullardan uzaklaşmakta ve enjeksiyon başarısızlıkla sonuçlanmaktadır.

RTM metodunda cam fiberlerin tam ıslanması için “tekrarlı enjeksiyon-sirkülasyon” adını verdiğimiz basit bir yöntem uygulanmış ve birden fazla enjeksiyon çevrimi kullanılarak cam fiberlerin daha iyi ıslanması sağlanmıştır.

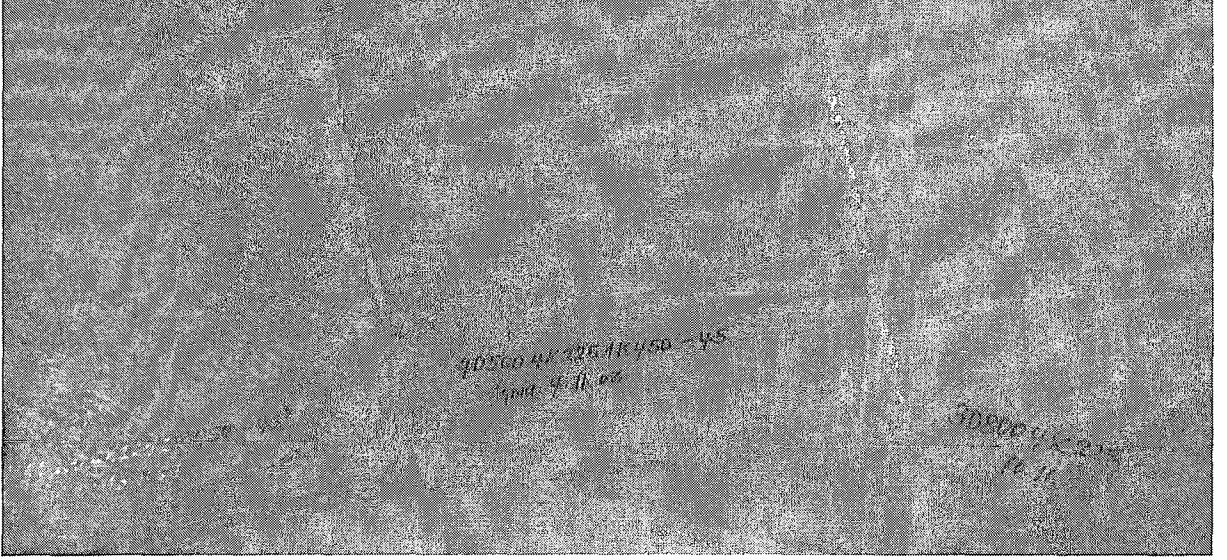
Bilhassa cidar kalınlığının arttığı durumlarda, kalıp içerisine düşük debi ve basınçta birden fazla (hava boşluğu kalmayınca kadar) enjeksiyon yapılırsa, tekrarlı enjeksiyon çevrimi ile kalıp içinde hava kalmaksızın elyafların reçine ile tam ıslandığı gözlenmiştir. Yukarıda sayılan sebeplerden dolayı kalıp boşluğu doluncaya kadar yapılan tek bir enjeksiyondan sonra kalıp içinde hava boşluğu kaldığı bilinmektedir. Dolayısıyla birinci enjeksiyonun arkasından polyester enjeksiyonuna tekrarlı çevrimler halinde devam edilmiştir. Hatta bu ilk enjeksiyondan sonraki ara çevrimlerde bile taşkın borularından dışarıya havanın atıldığı Şekil 6.7’de görülmektedir. Şekil 6.10’da RTM yöntemini ilk uyguladığımız ve sadece birkaç enjeksiyon yapılarak elde edilen numuneler görülmektedir. Bu numunelerde, sıkışan hava

yoğunluğun ancak köşe noktalarındaki ventilasyon noktalarının yakınına kadar ilerlediği ve tam olarak atılmadığı gözlenmiştir. Dolayısıyla bu bölgelerde tam ıslanmanın olmadığı görülmektedir. Fakat, aynı numunede reçinenin süreklilik arz ettiği ve enjeksiyonun yapıldığı orta bölgelerde ise ıslanmanın “çok iyi” olduğu görülmüştür. Şekil 6.11’deki numunelere dikkat edilirse, enjeksiyon çevriminin yada sirkülasyonun birden fazla olduğu durumlarda ıslanmanın daha iyi olduğu ve içeride bölgesel olarak sıkışan havanın dışarıya atıldığı gözlenmektedir.

Bu çalışmalardan da anlaşıldı ki, enjeksiyon sayısı direkt olarak cam fiberlerin reçine geçirgenliği ile ilgilidir. Çünkü, 200 gr/m^2 ve 300 gr/m^2 ’lik sık dokulu cam fiberlerde daha fazla sayıda enjeksiyon çevrimine ihtiyaç olduğu gözlenmiştir (Tablo 6.8). Dolayısıyla, tam ıslanmanın gerçekleşmesi ve kalıp içinde hava boşluklarının kalıp kalmaması olayı cam fiberlerin reçine geçirgenliği ile orantılıdır [15]. Sözer, M. (2003)’de yaptığı Tübitak çalışmasında 500 gr/m^2 ’lik cam dokumalar kullanarak RTM üretimdeki tam ıslanma problemi için cam dokuma geçirgenliği üzerinde durmuştur.



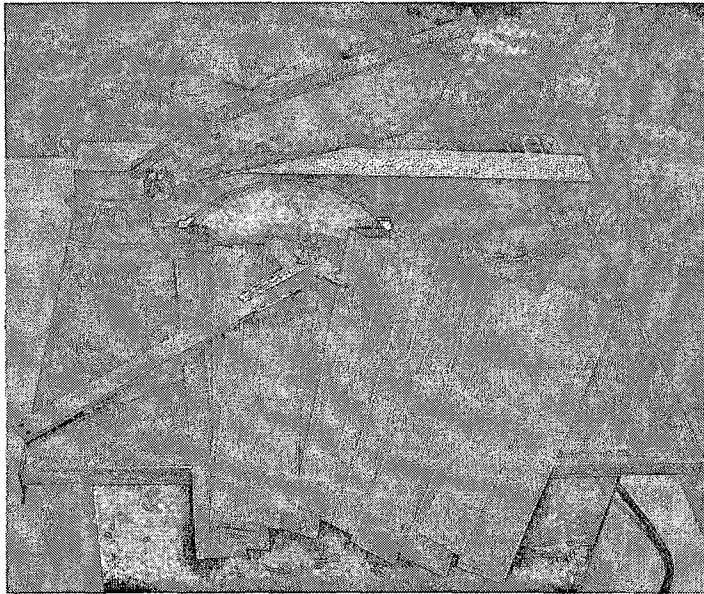
a) Köşe noktalarda ıslanma çok az b) ıslanma orta c) Tam ıslanmış numune
Şekil 6.10 RTM yöntemi ile elde edilen ilk cam-elyaf numune örnekleri (çevrim 1-3)



Şekil 6.11 RTM yöntemi ile elde edilen ve kalıptan çıkan cam-elyaf son numune örnekleri (çevrim 5-7)

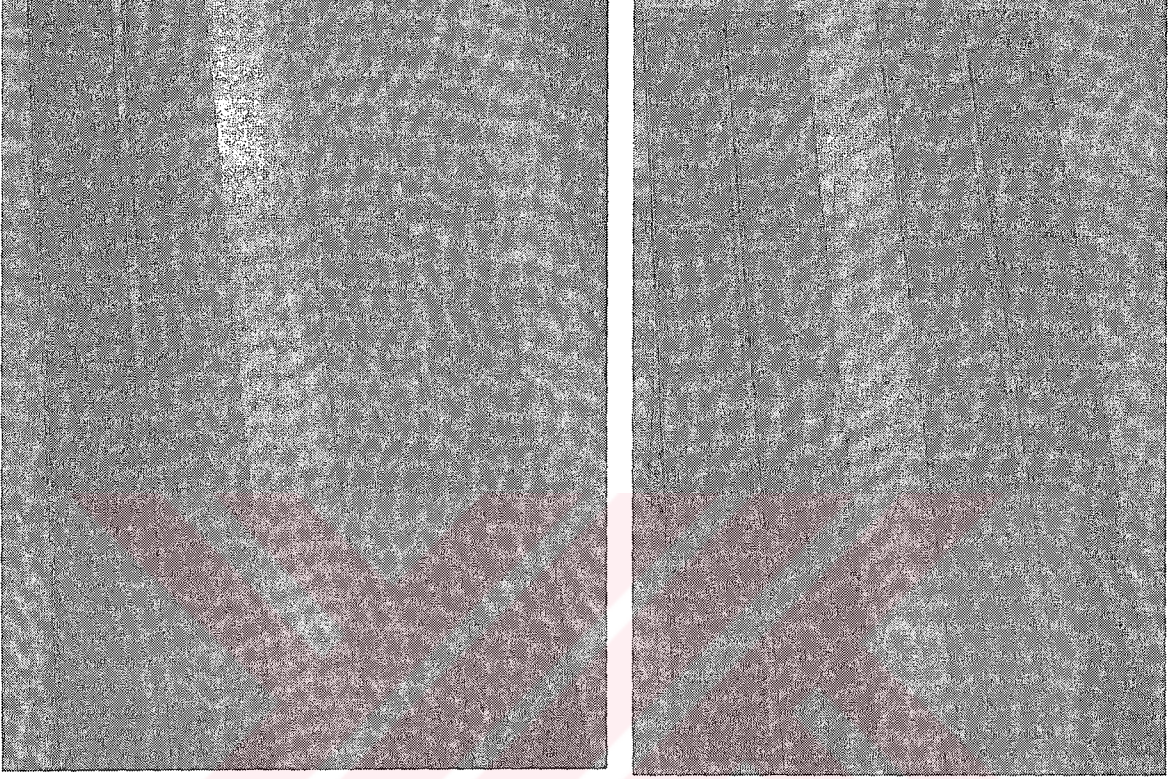
6.3.2.4 Kalıptan Çıkan Parçaların Kesimi

Kalıptan çıkan numuneler 550 W gücünde, devir sayısı 2800 dev/dak, testere ölçüsü 180x2x30 mm olan (elmas kaplı) ve sulu kesim yapabilen bir makine ile 25x250 mm boyutlarında kesilmiştir. Kesme makinesi Şekil 6.12’de görülmektedir.



Şekil 6.12 Kesme makinesi

Şekil 6.12'deki kesme makinesi ile 25x250 mm boyutlarına getirilen standart numuneler ve bu numune içindeki 0/90° ve ±45°'lik cam dokuma yönleri (fiber açıları) Şekil 6.13'de görülmektedir.



a) ±45° yönlü dokuma/Keçe örnekleri

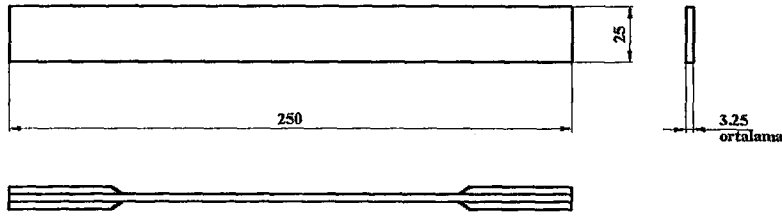
b) 0/90° yönlü dokuma/Keçe örnekleri

Şekil 6.13 Farklı elyaf (fiber) yönlerinde elde edilen standart test numuneleri

6.4 ÇEKME TESTLERİ VE SONUÇLARI

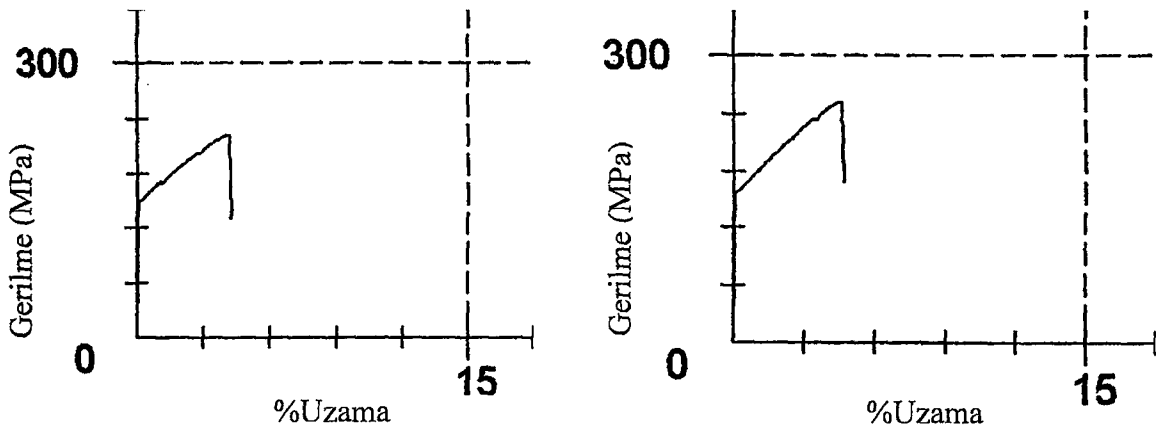
6.4.1 Çekme Testi için Numune Boyutları

Tek taraflı eğilme yorulması ve çekme testlerine tabii tutulan deney numunelerinin boyutları Şekil 6.14’de verilmiştir (ASTM D 3039 Standart Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials) [27].



Şekil 6.14 ASTM D 3039’a göre test numunesi boyutları

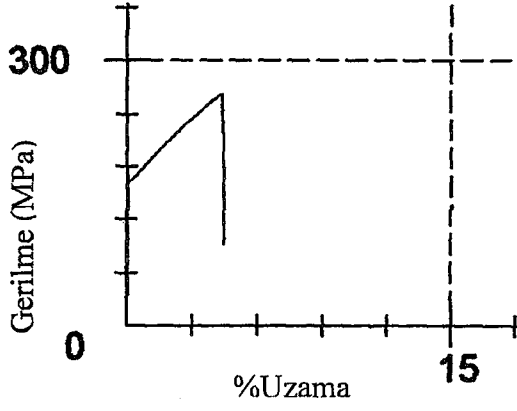
RTM (Resin Transfer Moulding- Reçine Enjeksiyonu) yöntemi ile imal ettiğimiz dokuz değişik tipteki cam-fiber numunelerin grup numaraları, malzeme kodları, fiber yönleri, cam fiber hacimleri ve fiber kombinasyonları Tablo 6.6’da açıklanmaktadır. Dokuz değişik tipteki cam-fiber numunelerin ASTM D 3039’a uygun olarak yaklaşık 2 mm/dak’lık çekme hızı altında çekme testleri yapılmıştır. Testler altmış ton kapasiteli digital, kalibreli ve standart bir çekme cihazında gerçekleştirilmiştir. Her bir numune tipinden beşer adet parça çekme testine tabii tutulmuştur. Ortalama değerlere yakın olan birer numunenin gerilme-%uzama eğrileri Şekil 6.15’de görülmektedir. Diğer numunelerin çekme testlerinden elde edilen mekanik özellikleri ise Tablo 6.10’da görülmektedir.



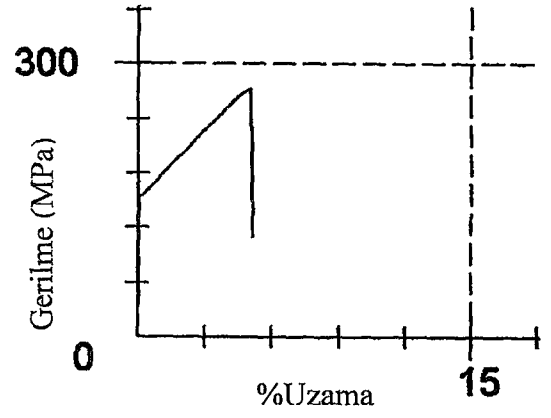
a) A grubu numunelerin σ - ϵ diyagramına örnek (A3)

b) B grubu numunelerin σ - ϵ diyagramına örnek (B3)

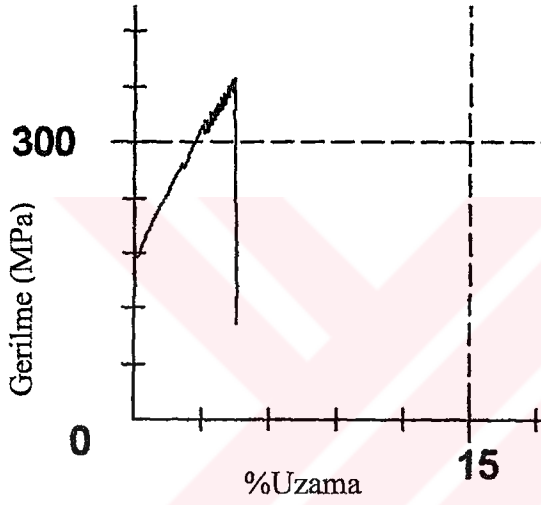
Şekil 6.15 Çekme testleri sonucu elde edilen örnek σ - ϵ diyagramı



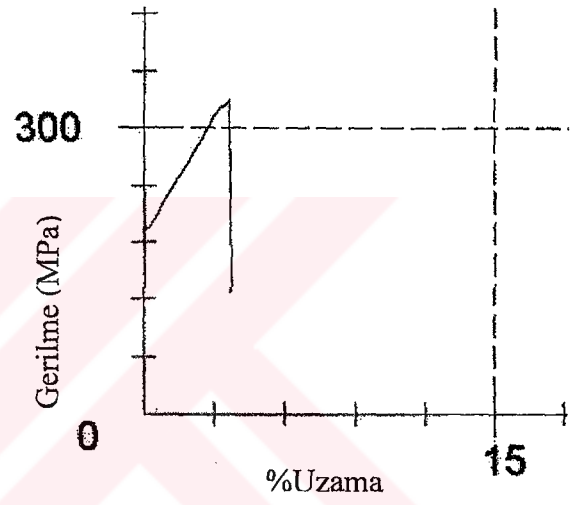
c) C grubu numunelerin σ - ϵ diyagramına örnek (C2)



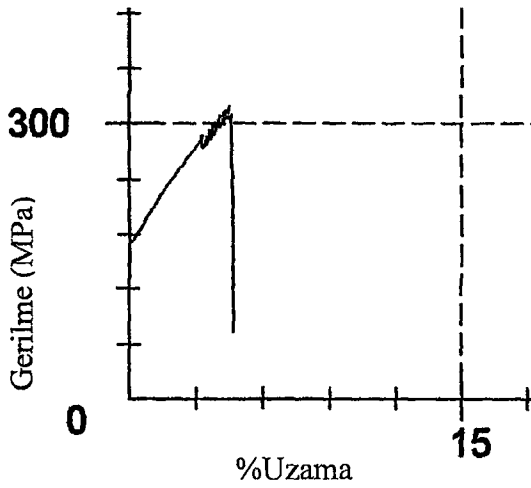
d) D grubu numunelerin σ - ϵ diyagramına örnek (D2)



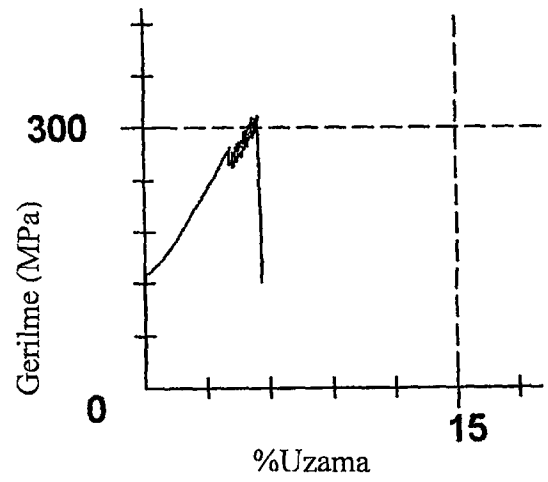
e) E grubu numunelerin σ - ϵ diyagramına örnek (E3)



f) F grubu numunelerin σ - ϵ diyagramına örnek (F1)

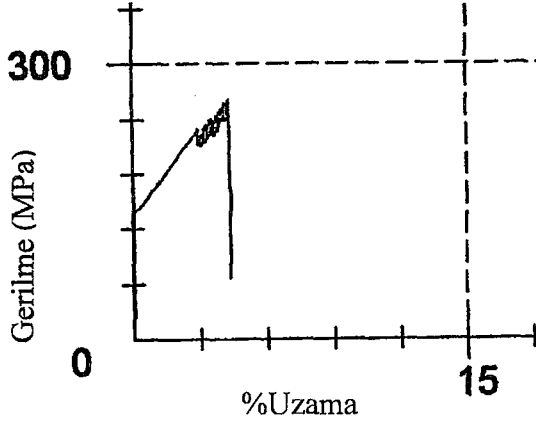


g) G grubu numunelerin σ - ϵ diyagramına örnek (G2)



h) H grubu numunelerin σ - ϵ diyagramına örnek (H1)

Şekil 6.15'in devamı : Çekme testleri sonucu elde edilen örnek σ - ϵ diyagramı



i) K grubu numunelerin σ - ϵ diyagramına örnek (K5)

Şekil 6.15'in devamı : Çekme testleri sonucu elde edilen örnek σ - ϵ diyagramı

Maksimum çekme mukavemeti ;

$$\sigma_{tu} = \frac{F_{max}}{A} \quad (6.1)$$

Formülüyle hesaplanmıştır [27]. Burada ;

σ_{tu} : Maksimum çekme mukavemeti (MPa)

F_{max} : Maksimum kuvvet (MPa)

A : Kesit alan (mm^2)

σ_{ty} : Akma mukavemeti (MPa)

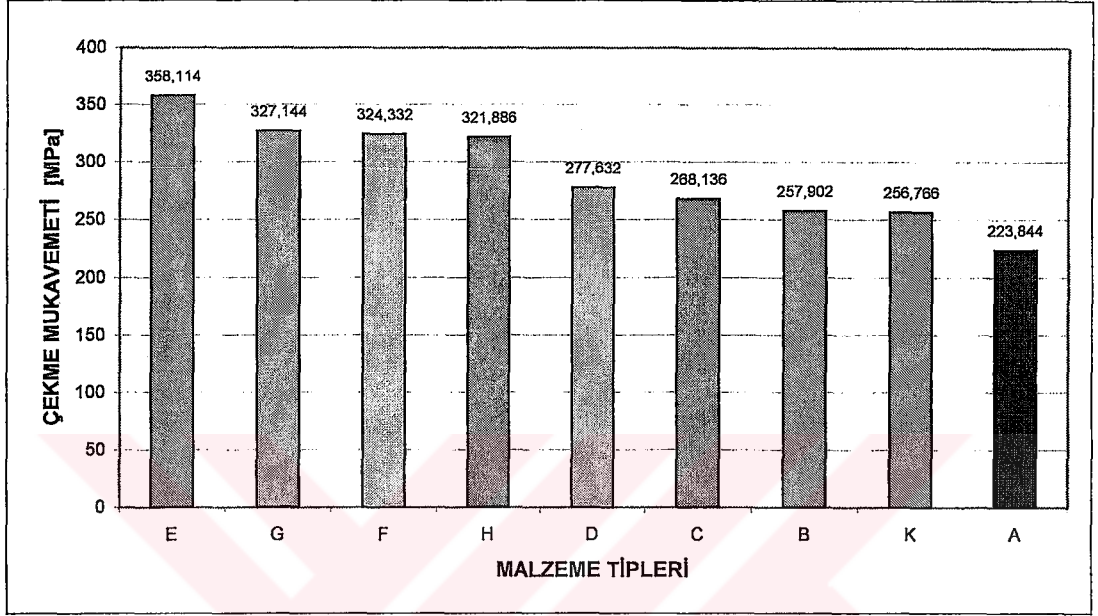
Tablo 6.9 Cam-Fiber numunelerin çekme testinden elde edilen ortalama değerler

Grup	Çekme Mukavemeti σ_{tu} - (MPa)	Akma Mukavemeti σ_{ty} - (MPa)	$\sigma_{tu} / \sigma_{ty}$	%Uzama (ϵ)
E	358,114	298,596	1,200	5,154
G	327,144	257,176	1,278	5,050
F	324,332	257,208	1,270	4,724
H	321,886	266,048	1,212	5,580
D	277,632	203,585	1,373	5,422
C	268,136	202,183	1,338	5,448
B	257,902	198,422	1,300	5,608
K	256,766	210,216	1,222	4,420
A	223,844	177,790	1,250	5,350

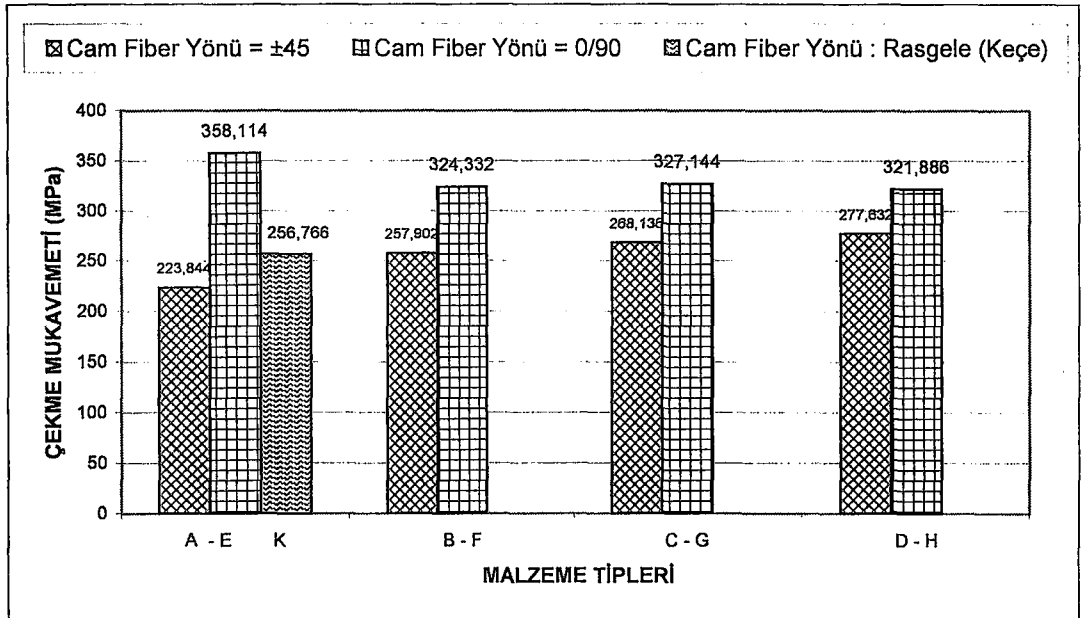
Tablo 6.10 ASTM D 3039'a göre çekme deneyi sonuçları

Numune	Akma Kuv. (F _{ty}) (kN)	Akma Muk. (σ _{ty}) (MPa)	Çekme Kuv. (F _{tu}) (kN)	Çekme Muk. (σ _{tu}) (MPa)	$\frac{\sigma_{tu}}{\sigma_{ty}}$	%Uzama (%ε)	Ort. Çekme Modülü (E _c) (MPa)	Ort. Çekme Muk. (σ _{tu}) (MPa)
A1	9,930	128,710	17,580	227,980	1,770	9,600	11478	223,844
A2	13,920	181,390	16,850	219,650	1,210	4,300		
A3	12,860	172,560	16,520	221,610	1,280	4,400		
A4	8,970	114,680	17,480	223,570	1,950	6,300		
A5	14,410	179,420	18,190	226,410	1,260	6,400		
B1	15,510	200,150	19,880	256,610	1,280	6,440	13870	257,902
B2	14,730	188,840	19,720	252,710	1,340	5,400		
B3	15,860	196,590	20,380	252,510	1,280	4,800		
B4	15,730	205,230	20,390	266,150	1,300	5,800		
B5	15,320	201,300	19,900	261,530	1,300	5,600		
C1	13,540	171,000	20,750	262,070	1,530	6,840	14850	268,136
C2	16,570	205,320	21,170	262,320	1,280	4,600		
C3	15,440	203,850	21,120	278,900	1,370	5,600		
C4	15,680	190,510	21,410	260,160	1,370	5,800		
C5	16,940	209,050	22,460	277,230	1,330	4,400		
D1	11,480	154,460	20,280	272,870	1,770	4,610	15380	277,632
D2	15,190	205,230	20,190	272,910	1,330	5,300		
D3	15,000	211,900	20,490	289,490	1,370	5,900		
D4	14,480	209,350	19,450	281,250	1,340	6,300		
D5	13,180	187,860	19,060	271,640	1,450	5,000		
E1	23,310	314,500	27,110	365,860	1,160	4,170	18150	358,114
E2	21,270	285,080	25,650	343,840	1,210	4,500		
E3	22,200	309,410	26,500	369,350	1,190	4,700		
E4	19,920	275,070	24,930	344,230	1,250	5,700		
E5	22,580	308,920	26,850	367,290	1,190	6,700		
F1	17,980	245,990	24,060	329,190	1,340	3,820	18070	324,332
F2	19,380	257,320	24,250	321,870	1,250	6,000		
F3	13,420	174,030	24,390	316,180	1,820	4,000		
F4	20,210	267,620	24,200	320,490	1,200	4,800		
F5	18,800	257,900	24,340	333,930	1,290	5,000		
G1	18,960	237,400	24,950	312,350	1,320	3,600	16585	327,144
G2	22,320	276,050	25,890	320,200	1,160	4,800		
G3	21,390	258,590	27,200	328,930	1,270	6,100		
G4	22,300	270,360	27,370	331,770	1,230	5,700		
G5	19,920	243,480	28,030	342,470	1,410	9,300		
H1	20,000	268,700	23,410	314,510	1,170	5,800	15520	321,886
H2	19,970	266,540	24,880	331,970	1,250	5,000		
H3	20,070	254,470	23,680	300,280	1,180	5,200		
H4	18,890	253,880	24,790	333,050	1,310	5,900		
H5	22,040	286,650	25,350	329,620	1,150	6,000		
K1	17,020	186,980	22,130	243,190	1,300	3,900	14180	256,766
K2	18,220	229,190	22,770	286,450	1,250	5,000		
K3	18,120	201,500	22,010	244,760	1,210	3,900		
K4	19,270	214,250	22,280	247,700	1,160	4,800		
K5	19,110	219,160	22,820	261,730	1,190	4,500		

Bütün grup numuneler için çekme testleri sonucu mukavemet değerlerinin sıralı grafiği Şekil 6.16'da, Cam fiber yönü $\pm 45^\circ$ ve 90° numuneler için çekme testleri sonucu mukavemet değerlerinin kıyaslamalı grafiği ise Şekil 6.17'de verilmiştir



Şekil 6.16 Bütün grup numuneler için çekme testleri sonucu mukavemet değerlerinin sıralı grafiği

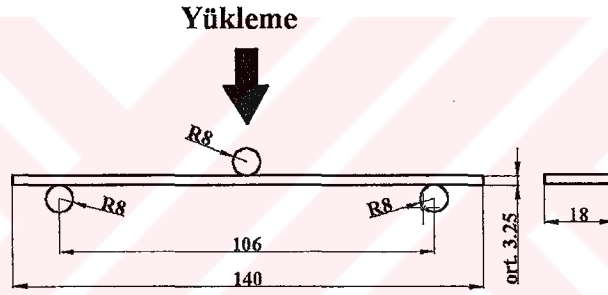


Şekil 6.17 Cam fiber yönü $\pm 45^\circ$ ve 90° numuneler için çekme testleri sonucu mukavemet değerlerinin kıyaslamalı grafiği

6.5 ÜÇ NOKTADAN EĞİLME TESTLERİ VE SONUÇLARI

6.5.1 Üç noktadan eğilme Testi için Numune Boyutları

Numunelerin statik olarak maksimum eğilme gerilmelerini (ultimate flexural stress) bulabilmek için üç noktadan eğilme testleri yapılmıştır. Üç noktadan eğilme testleri için ASTM 790-00 (Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials, January 2001) standardına uygun olarak Şekil 6.18'da verilen numune boyutları kullanılmıştır [28]. L/H (Destek mesafesi/numune kalınlığı) olarak yine standarda uygun olarak yaklaşık 32:1 alınmıştır. Test esnasındaki yükleme hızı ise ortalama 12 mm/dak' dır. Her malzeme yapısı için beş adet numune teste tabi tutulmuştur.



Şekil 6.18 ASTM D 790-00'a göre test numunesi boyutları

Üç noktadan eğme deneylerinde 500 kg kapasiteli S tipi loadcell ve kopma (kırılma) anındaki en yüksek yük değerini veren dijital indikatör kullanılmıştır. Yüklemenin her anındaki mesafeyi ölçmek için ise 0.01 mm hassasiyetindeki Mitutoyo dijital kumpas kullanılmıştır. Testin başlangıcından sonuna kadar her an yük-şekil değişimi değerleri kayıt altına alınarak (gerilme – %şekil değişimi) eğrileri çizilmiştir. Ortalama değerlere yakın numunelerin gerilme-%şekil değişim grafikleri Şekil 6.20'de verilmiştir. Deney standı Şekil 6.19'de gösterilmiştir. Üç noktadan eğme deneyinde kullanılan ekipmanın özellikleri aşağıda verilmiştir.

Yük hücresi (Loadcell) :

Model : SS300 – 500K – S Tipi

Yük kapasitesi : 500 kg

R.O. : 1.9960 mV/V

Digital indikatör (indicator) :

Model : FS-8000

Ayarlanan kalibrasyon hassasiyeti : 50 gr

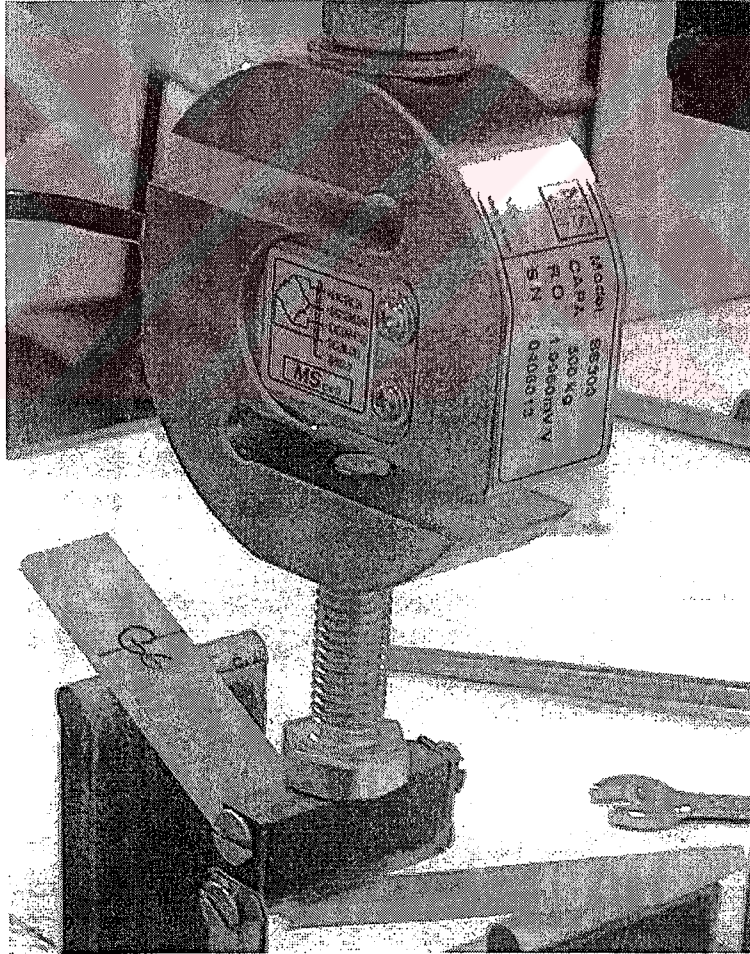
Özellik (Set Hold Function özelliği) : Maksimum yükü gösterdiği andaki değeri tutma ve yük artışlarında maksimum yükü yenileme (kırılma-kopma anındaki yük değerini gösterme)

Mesafe ölçücü :

Dijital kumpas

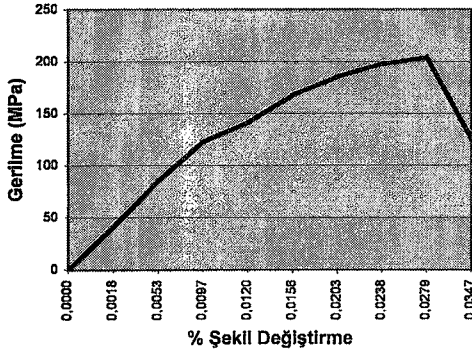
Marka : Mitutoyo

Hassasiyet : 0.01

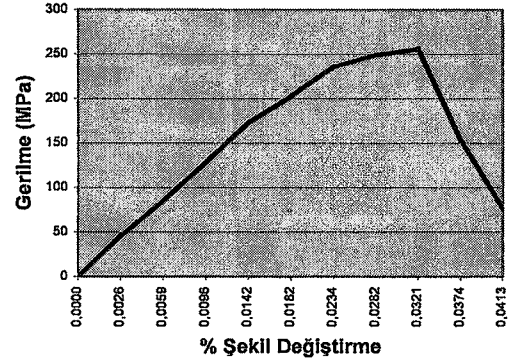


Şekil 6.19 Üç noktadan eğme testi

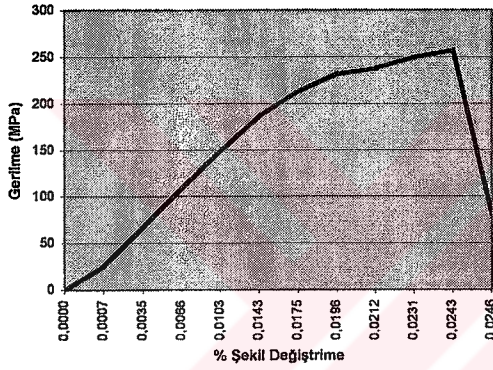
Üç noktadan eğme testlerinden elde edilen bütün veriler Tablo 6.11’de verilmiştir.



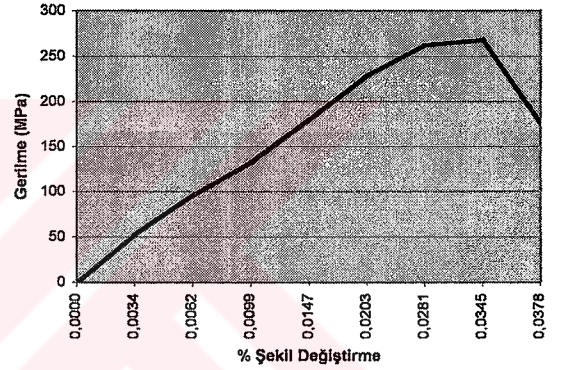
a) A grubu numunelerin σ - ϵ diyagramına örnek (A4)



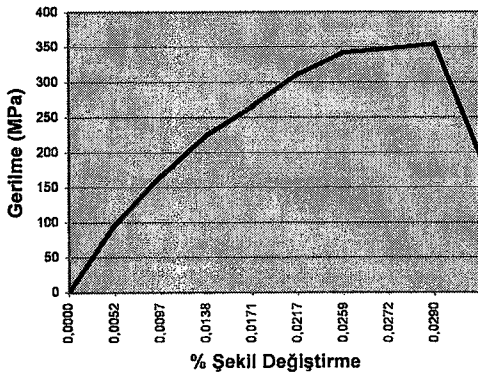
b) B grubu numunelerin σ - ϵ diyagramına örnek (B5)



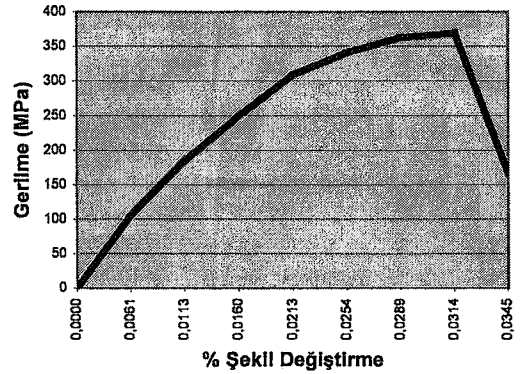
c) C grubu numunelerin σ - ϵ diyagramına örnek (C1)



d) D grubu numunelerin σ - ϵ diyagramına örnek (D3)

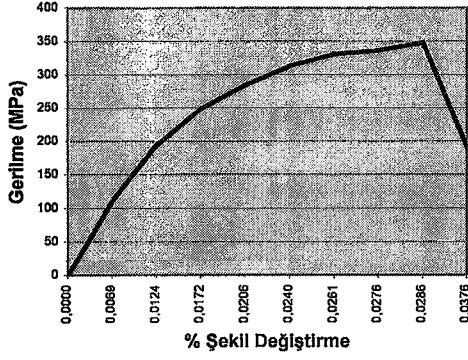


e) E grubu numunelerin σ - ϵ diyagramına örnek (E5)

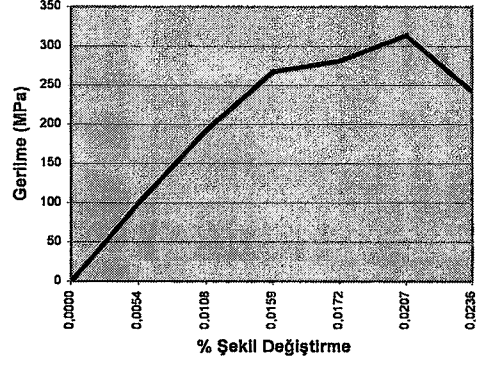


f) F grubu numunelerin σ - ϵ diyagramına örnek (F2)

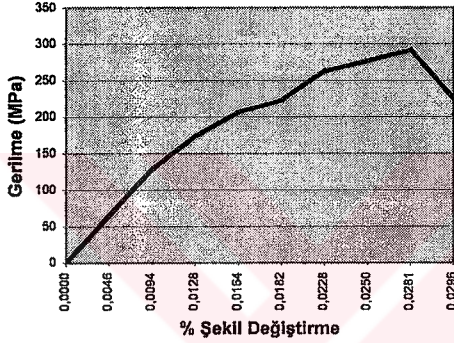
Şekil 6.20 Üç noktadan eğilme testleri sonucu elde edilen örnek σ - ϵ diyagramı



g) G grubu numunelerin σ - ϵ diyagramına örnek (G4)



h) H grubu numunelerin σ - ϵ diyagramına örnek (H1)



i) K grubu numunelerin σ - ϵ diyagramına örnek (K2)

Şekil 6.20 devamı : Üç noktadan eğilme testleri sonucu elde edilen örnek σ - ϵ diyagramı

Maksimum eğilme gerilmesi için [28];

$$\sigma_f = \frac{3 F L}{2 B H^2} \quad (6.2)$$

Şekil değişimi için ise [28];

$$\epsilon_f = \frac{6 D H}{L^2} \quad (6.3)$$

Formülleri kullanılmıştır. Burada ;

σ_f : Orta noktada oluşan maksimum eğilme gerilmesi (flexural stress) (Mpa)

F : Maksimum kopma yükü (N)

L : Destek mesafesi (mm)

B : Numune genişliği (mm)

H : Numune kalınlığı (mm)

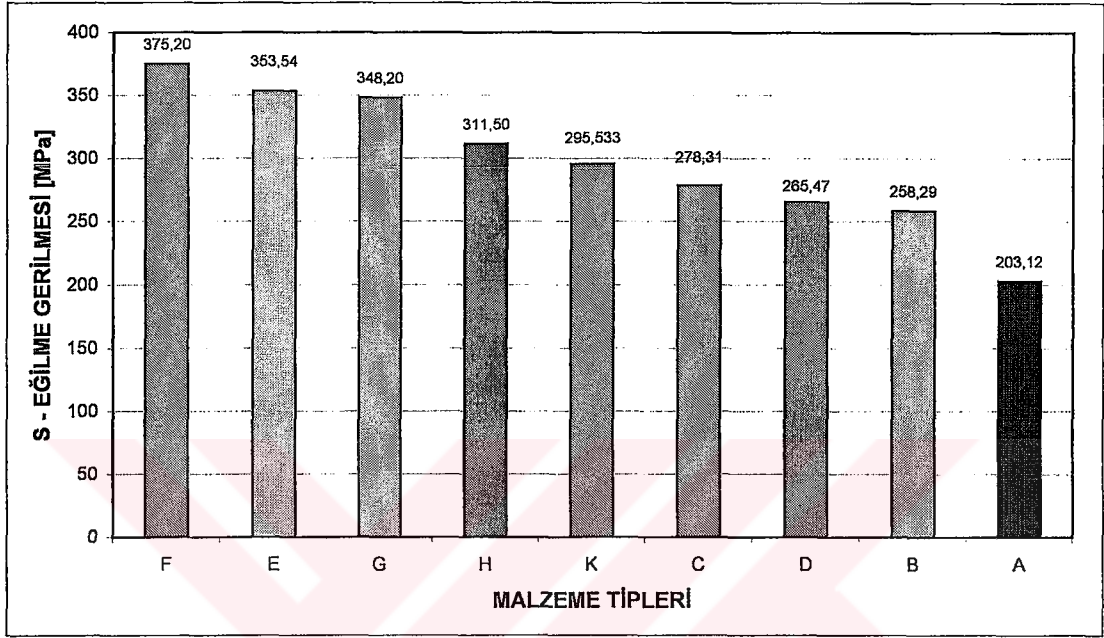
ϵ_f : Eğilme için şekil değişimi (flexural strain)

D : Merkez noktada oluşan maksimum şekil değişimi (deplasman) (mm)

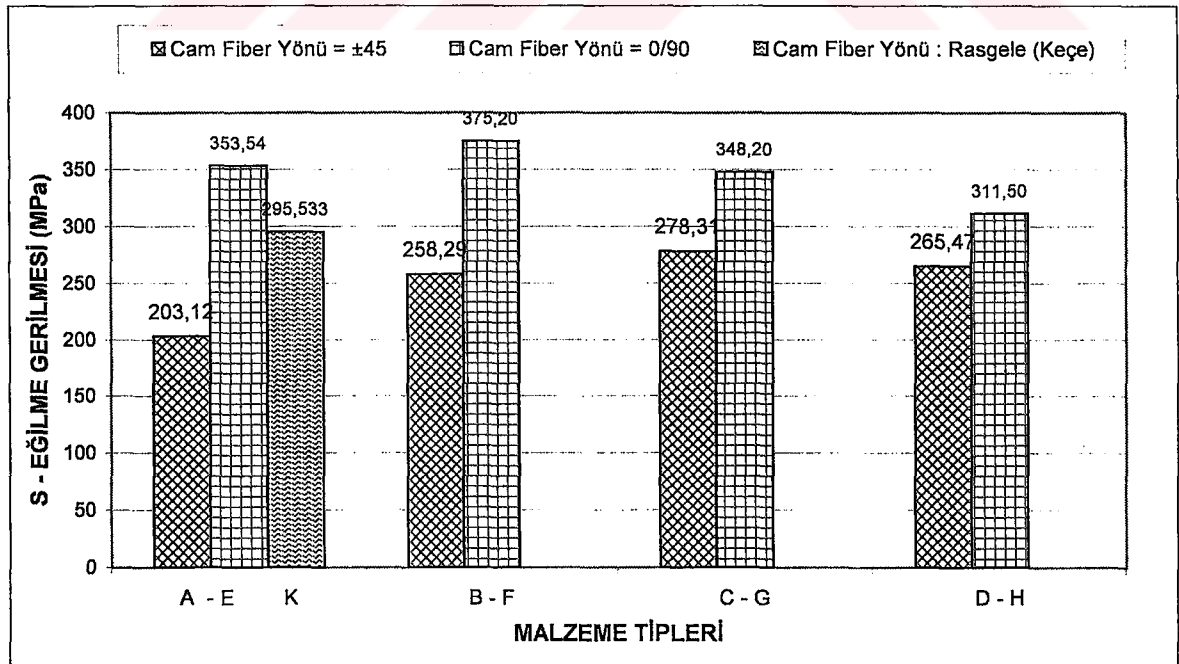
Tablo 6.11 ASTM 790-00'a göre üç noktadan eğme deneyi sonuçları

Numune	Genişlik (B) (mm)	Yükseklik (H) (mm)	Kopma Yüklü (F) (N)	Max. Gerilme (σ_f) (MPa)	Ort. Eğilme Modülü (E_f) (MPa)	Ort. Gerilme (σ_f) (MPa)
A1	17,87	3,28	233,97	193,500	12698	203,120
A2	17,84	3,29	267,32	220,113		
A3	18,11	3,39	261,93	200,105		
A4	18,07	3,21	239,36	204,403		
A5	18,12	2,96	197,18	197,478		
B1	17,85	2,99	264,87	263,900	13394	258,287
B2	18,05	3,46	335,99	247,227		
B3	17,97	3,29	320,30	261,824		
B4	17,79	2,89	244,76	261,917		
B5	18,04	3,36	328,64	256,564		
C1	17,92	3,57	369,84	257,474	14778	278,313
C2	18,00	3,32	388,48	311,324		
C3	17,94	3,21	346,29	297,857		
C4	18,02	3,73	384,06	243,571		
C5	17,93	3,11	302,15	277,023		
C6	17,98	3,28	343,84	282,629		
D1	18,00	3,19	305,58	265,259	15404	265,468
D2	17,93	2,96	256,53	259,641		
D3	17,84	3,15	298,71	268,310		
D4	18,05	3,11	306,56	279,201		
D5	17,95	3,07	271,25	254,929		
E1	18,02	3,24	437,04	367,340	17131	353,540
E2	17,48	3,76	517,97	333,259		
E3	17,65	2,98	322,75	327,404		
E4	17,95	2,79	337,95	384,576		
E5	17,88	2,98	354,63	355,119		
F1	18,00	3,18	423,30	369,760	16438	375,199
F2	17,83	3,23	432,62	369,784		
F3	17,81	3,32	475,79	385,361		
F4	17,98	2,93	375,72	387,025		
F5	17,94	3,30	447,34	364,066		
G1	18	3,86	565,06	334,997	15611	348,198
G2	17,71	3,12	361,50	333,407		
G3	17,95	3,16	431,64	382,895		
G4	17,96	3,35	447,34	352,886		
G5	18,01	3,90	580,26	336,804		
H1	17,85	3,00	317,35	314,094	17823	311,503
H2	17,8	3,30	367,38	301,3492		
H3	17,27	2,97	315,39	329,1864		
H4	17,95	3,27	379,65	314,4975		
H5	17,63	2,97	291,85	298,3925		
K1	17,8	3,60	411,53	283,643	14077	295,532
K2	17,75	3,69	443,90	292,034		
K3	17,93	3,23	391,91	333,117		
K4	17,90	3,36	356,10	280,182		
K5	17,86	3,24	340,41	288,684		

Bütün grup numuneler için üç noktadan eğme testleri sonucu mukavemet değerlerinin sıralı grafiği Şekil 6.21’de, Cam fiber yönü $\pm 45^\circ$ ve 90° numuneler için üç noktadan eğme testleri sonucu mukavemet değerlerinin kıyaslamalı grafiği ise Şekil 6.22’de verilmiştir



Şekil 6.21 Bütün grup numuneler için 3 nokta eğme testleri sonucu mukavemet değerlerinin sıralı grafiği



Şekil 6.22 Cam fiber yönü $\pm 45^\circ$ ve 90° numuneler için üç noktadan eğme testleri sonucu mukavemet değerlerinin kıyaslamalı grafiği

6.6 EĞİLME YORULMASI TESTLERİ

Eğilme yorulması testleri sonucu amaç, malzeme yorulması için en kötü hal olan “tam değişken” ($R=-1$) yükleme halinde her bir kompozit yapı için S-N eğrilerini oluşturup uygulanan gerilme-çevrim’den oluşan ömür denklemlerini elde etmektir. Sonuçta ise bu denklemlerden yararlanarak, malzeme karakteristiği olan katsayıları belirlemektir.

6.6.1 Yorulma Testleri için Numuneler

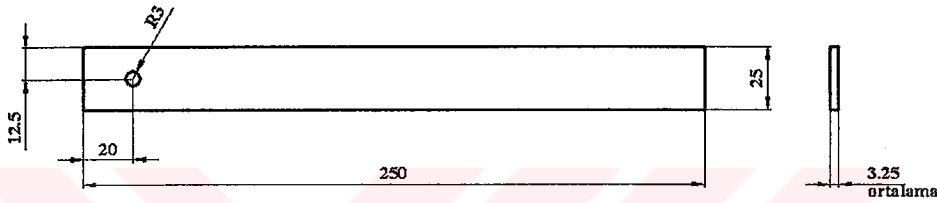
Eğilme yorulması için gerekli olan CTP=GFRP numunelerin imalatı Bölüm 6.3’de anlatılmıştır. Yorulma testlerinde kullanılan ve dokuz farklı gruptan oluşan numunelerin Tablo 6.12’de özellikleri görülmektedir.

Tablo 6.12 CTP=GFRP numune grup ve özellikleri

Grup	Dokuma Fiber Yönü	Cam Fiber Hacmi	Cam-Fiber Kombinasyonu
A	± 45	% 44,00	3 Kat 800 gr/m ² Dokuma 4 Kat 225 gr/m ² Keçe
B	± 45	% 44,67	4 Kat 500 gr/m ² Dokuma 4 Kat 225 gr/m ² Keçe 1 Kat 450 gr/m ² Keçe
C	± 45	% 44,00	5 Kat 300 gr/m ² Dokuma 4 Kat 225 gr/m ² Keçe 2 Kat 450 gr/m ² Keçe
D	± 45	% 42,67	7 Kat 200 gr/m ² Dokuma 8 Kat 225 gr/m ² Keçe
E	0/90	% 44,00	3 Kat 800 gr/m ² Dokuma 4 Kat 225 gr/m ² Keçe
F	0/90	% 44,67	4 Kat 500 gr/m ² Dokuma 4 Kat 225 gr/m ² Keçe 1 Kat 450 gr/m ² Keçe
G	0/90	% 44,00	5 Kat 300 gr/m ² Dokuma 4 Kat 225 gr/m ² Keçe 2 Kat 450 gr/m ² Keçe
H	0/90	% 42,67	7 Kat 200 gr/m ² Dokuma 8 Kat 225 gr/m ² Keçe
K	Rasgele	% 44,00	6 Kat 450 gr/m ² Keçe 1 Kat 600 gr/m ² Keçe

6.6.2 Numune Boyutları

RTM metodu ile hazırlanan CTP numuneler kalıptan ortalama 320x600x3.25 mm boyutlarında plakalar halinde çıkarılmıştır. Enjeksiyon esnasındaki oluşan basınç farkından ve kalıp alt ve üst plakalarının tam olarak rijit olmamasından dolayı elde edilen numune kalınlıklarında çok az farklılıklar olmuştur. Numunelerin ortalama kalınlığı ise 3.25 mm'dir. Bu plakalar, Bölüm 6.3.2.4'de anlatıldığı gibi ortalama 25x250x3.25 boyutlarında kesilmiştir (Şekil 6.23). Bu numune boyutları, çekme testinde kullanılan ve ASTM 3039 standardına uygun boyutlardır.



Şekil 6.23 Yorulma numuneleri ölçüleri

6.6.3 Test Parametreleri :

Deney sırasında hız (frekans) kontrol cihazının frekansı 15.7 Hz olarak ayarlanarak ana millerin 30 dev/dak ile dönmesi sağlanmıştır (Şekil 5.3)

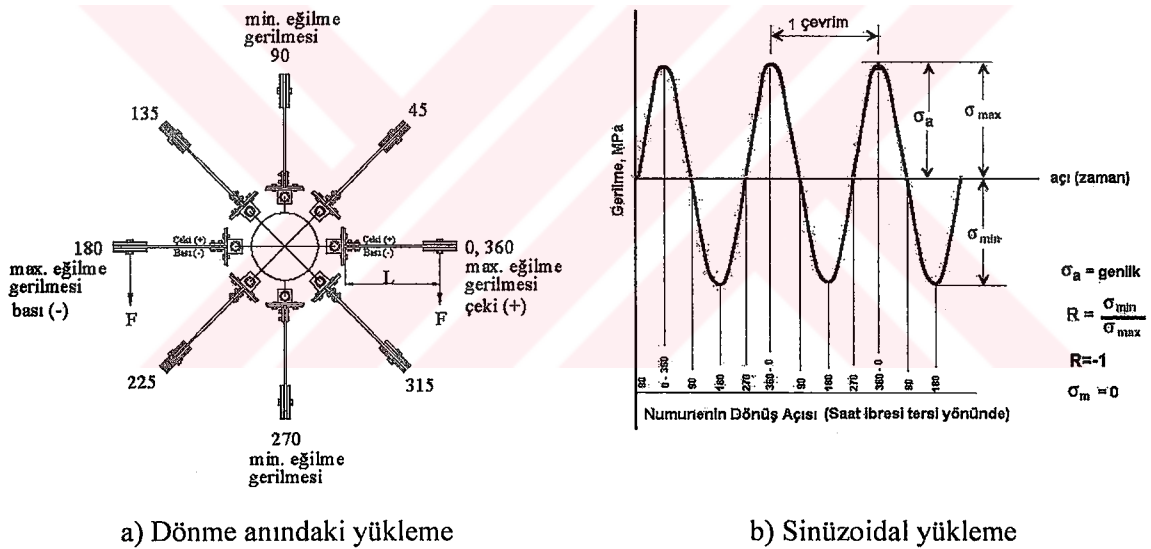
Test frekansı : 2 Hz
Test periyodu : 0.5 sn
Test Isısı : oda sıcaklığı

Literatürlerde de bahsedildiği gibi, yorulma makineleri ile kompozitlerin yorulma testleri için farklı yükleme frekansları elde edilebilmesine rağmen, ısıyı minimize etmek için genellikle 10 Hz veya daha az frekans kullanılır [17]. Dolayısıyla malzemenin kırılma bölgesindeki ısıyı en düşük seviyede tutmak, test frekansının artmasıyla kompozit malzemelerde farklı mekanik özellikler elde edilmesi gibi bir yanılsığa düşmemek ve sağlıklı veriler elde edebilmek için düşük test frekansı (2 Hz) kullanılmıştır. Ayrıca merkezkaç kuvvetini en düşük seviyede tutmak için de düşük devir sayısı ve düşük frekansta çalışılmıştır. Bunun yanında, özellikle büyük ölçekli rüzgar türbinlerinde

kompozit malzemeden imal edilen türbin kanatlarının da düşük devirlerde (frekansta) çalışma ile yorulması düşünülürse, seçilen deney frekansının uygun olduğu söylenebilir.

6.6.4 Yorulma Testinin Analizi :

Eğilme yorulması testi, önceki bölümlerde de bahsedildiği gibi yük (gerilme) kontrollü yorulma testidir. Dönme esnasında malzemeye rüzgar türbin kanatlarında olduğu gibi kaldırma ve sürüklenme ve merkezkaç kuvvetleri de etkimektedir. Ancak, dönme hızı çok düşük olduğundan bu kuvvetlerin etkisi ihmal edilmiştir [6]. Dolayısıyla, dönme esnasında malzemeye uygulanan en büyük gerilme ağırlıklar vasıtasıyla oluşturulan eğilme gerilmesidir ve bu gerilme denklem (6.4)'den hesaplanmıştır. Bu gerilmenin etkisi için gerekli analiz Şekil 6.24'de gösterilmiştir.



Şekil 6.24 Dönme esnasındaki gerilme dağılımı

σ_{max} : Maksimum gerilme = gerilme genliği (MPa)

σ_a : Gerilme genliği = maksimum ve minimum gerilme (MPa)

σ_m : Ortalama gerilme (MPa)

F : Uygulanan yük (N)

L : Uygulanan yük ile maksimum gerilmenin olduğu bölge arasındaki mesafe (mm)

B : Numune genişliği (mm)

H : Numune kalınlığı (mm)

R : Gerilme oranı

$$\sigma_{\max} = -\sigma_{\min} = \frac{6 F L}{B H^2} \quad (6.4)$$

$$R = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\min}} = -1 \quad (6.5)$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} = 0 \quad (6.6)$$

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} \quad (6.7)$$

$$\sigma_{\max} = -\sigma_{\min} = \sigma_a = \frac{6 F L}{B H^2} \quad (6.8)$$

Test esnasında, numunenin yatay pozisyonda olduğu durumlarda (0 ve 180°) maksimum gerilme oluşmaktadır ve bu gerilmelerin mutlak değeri birbirine eşittir ($\sigma_{\max} = -\sigma_{\min}$).

Dönüş esnasında, 0°'de üst lifler çekiye zorlanırken alt lifler basıya zorlanmaktadır. Numune pozisyonu 180° olduğu anda üst lifler basıya, alt lifler çekiye zorlanmaktadır. Dolayısıyla Şekil 6.24'de de gösterildiği gibi tam değişken bir yükleme hali söz konusudur. Bu durumda, gerilme oranı denklem (6.5)'den R=-1 değerini almaktadır.

Denklem (6.6)'da σ_{\max} ve σ_{\min} değerleri yerine konulursa ortalama gerilme değeri ise $\sigma_m = 0$ olmaktadır.

6.6.5 Yorulma Testlerinin Yapılışı :

Yorulma testi için gerekli olan gerilme seviyesini belirlemek için, Bölüm 6.5'de anlatıldığı gibi beşer adet CTP numuneye üç noktadan eğilme testi uygulanmış ve bu numunelerin maksimum eğilme mukavemetleri tespit edilmiştir.

Bölüm 6.5'de üç noktadan eğilme testlerinden elde edilen maksimum eğilme mukavemeti değerleri 1 çevrimlik mukavemet olarak alınmış ve S-N eğrilerine taşınmıştır. Daha sonraki aşamada, yaklaşık 1000 çevrimi sağlayan maksimum eğilme gerilmesi (yaklaşık)

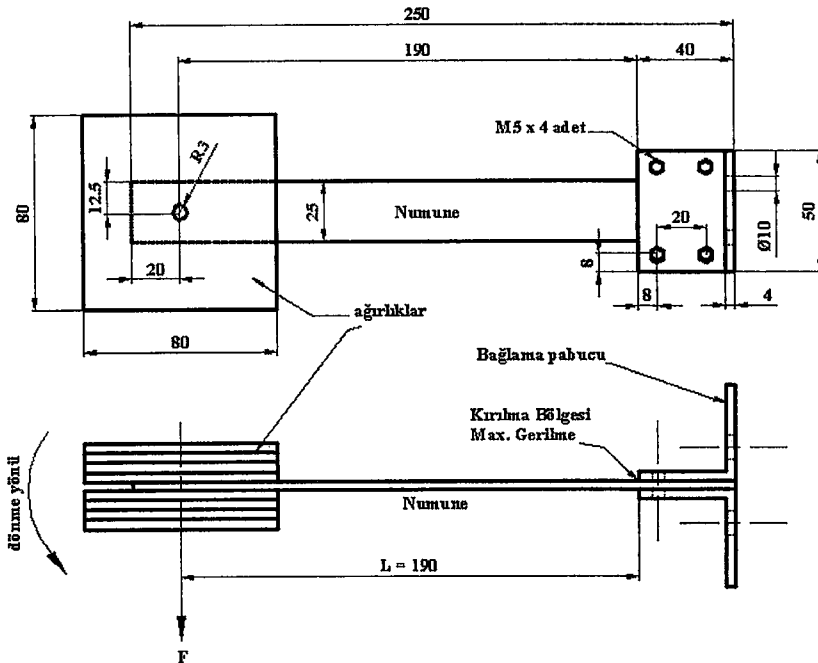
değerleri tespit edilmiştir. Bu değerlerden, ortalama %10 azaltılarak 7-8 nokta için yarı-logaritmik S-N eğrileri elde edilmiştir.

Dönme halindeki yorulma testlerinde, gerekli olan yük yukarıda verilen denklem (6.4)'deki gerilme formülünden hesaplanarak bulunmuştur. Eğilme yorulması testi için gerekli olan gerilmeler ise, numunelerin serbest ucuna bağlanan ağırlıklar ile sağlanmıştır (Şekil 6.25 ve Şekil 6.26). Bu metal parçalar, 192, 102, 100, 92 ve 50 gr olmak üzere 5 farklı boyut ve ağırlıkta hazırlanmıştır.

Ağırlıkların bağlı olduğu numuneler ile bağlama pabuçlarının dikliğini sağlamak üzere bir bağlama kalıbı yapılmıştır. Bu kalıbın üzerinde numune ile bağlama pabuçları birleştirilmiş ve Şekil 6.26'deki gibi hazırlanmıştır.

İlk 16 adet parça yukarıda anlatıldığı gibi yorulma cihazının ana milleri üzerindeki bağlama altlığına yerleştirilmiş ve teste hazır hale getirilmiştir.

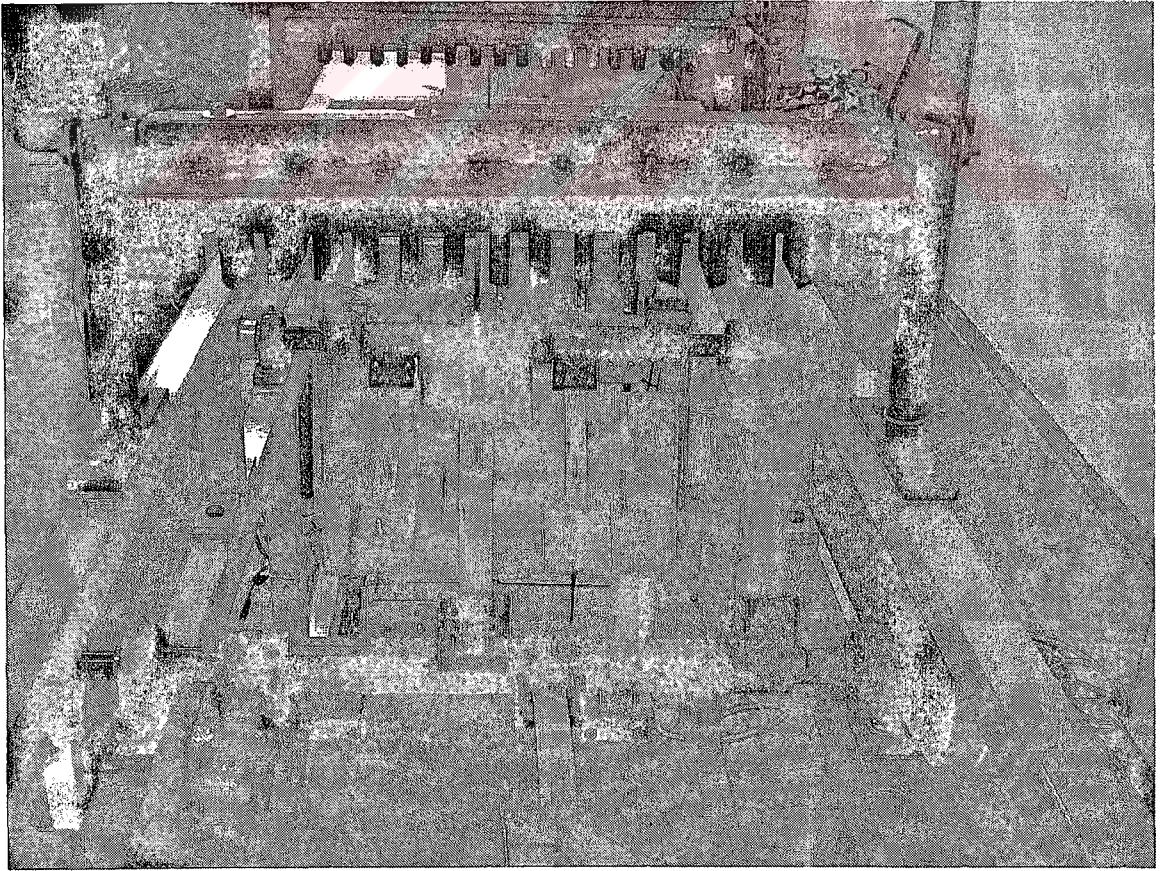
Eğilme yorulması testleri Bölüm 5.1'de detayları anlatılan ve imalatı yapılan sabit gerilme kontrollü, bilgisayar destekli çok numuneli test cihazında gerçekleştirilmiştir. Yorulma cihazının çalışma anı Şekil 6.27'de görülmektedir.



Şekil 6.25 Numunenin bağlama pabucuna ve ağırlığa bağlantı şekli



Şekil 6.26 Yük bağlanmış ve teste hazır numuneler

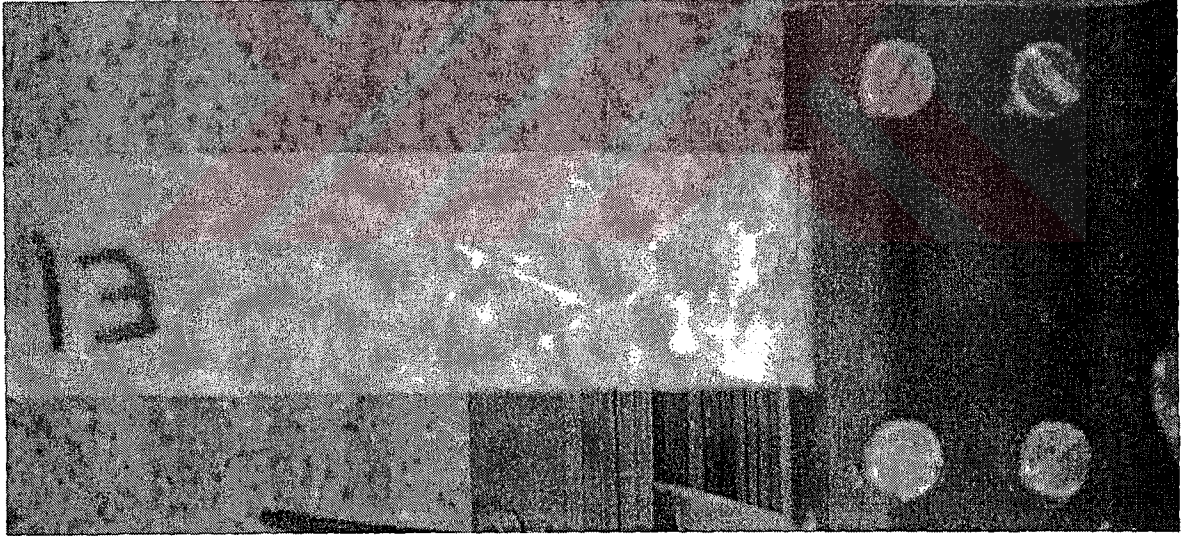


Şekil 6.27 Yorulma cihazın çalışması

Deneyler süresince ortalama 380 parça kırılmış ve her bir numune tipi için Wöhler (S-N) eğrileri çıkarılmıştır. Her bir S-N eğrisi için 7-8 farklı nokta, her bir nokta için ise yaklaşık 4-6 parça kırılmıştır.

Cam-fiber takviyeli kompozit malzemeler, metal veya alüminyum gibi bariz yorulma sınırı göstermediğinden her bir numune için ortalama 10^6 çevrime gelinmiştir [1,6,7]. Literatürlerde de bu şekilde testler gerçekleştirilmiştir. Ancak bazı parçaların beklenenden daha fazla olarak 2.10^6 çevrimin de üzerine çıktığı görülmektedir.

Çalışma esnasında yorulan parçaların bağlantı bölgelerinde yorulma veya hasar belirtileri (beyazlıklar) Şekil 6.28 ve Şekil 6.29'da görülmektedir. Bu, hasara ise bilindiği gibi "delamination" yani "tabaka ayrılması" denilmektedir.



Şekil 6.28 Numunede oluşan hasar (delamination)

6.6.6 Yorulma Testi Sonuçları

Yorulma testleri sonucu kırılan parçalardan elde edilen veriler Tablo 6.13 – Tablo 6.21’de verilmiştir. Elde edilen S-N eğrileri ise Şekil 6.29 – Şekil 38’da verilmiştir.

Tablo 6.13 A grubu numune için S-N verileri ve Weibull istatistik dağılımı ile hesaplanan karakteristik ömür değerleri

A Grubu Numune için S-N verileri			
Çevrim	Gerilme	Karakteristik Ömür	Gerilme
1	203,120	1	203,120
360	106,740	922	106,728
736	106,728	4.748	85,336
1.010	106,732	25.061	76,264
1.016	106,712	70.341	68,895
1.601	85,351	282.538	61,954
3.698	85,268	790.840	55,751
3.869	85,308	1.108.771	50,257
6.872	85,418		
8.170	76,248		
20.174	76,250		
24.713	76,248		
25.036	76,291		
25.083	76,283		
50.532	68,884		
53.561	68,907		
60.856	68,910		
87.671	68,878		
141.423	61,944		
159.704	61,962		
199.095	61,908		
278.126	61,989		
445.307	61,964		
533.061	55,779		
595.950	55,733		
713.877	55,713		
781.933	55,752		
979.766	55,775		
751.162	50,255		
1.088.925	50,265		
1.170.104	50,252		

Tablo 6.14 B grubu numune için S-N verileri ve Weibull istatistik dağılımı ile hesaplanan karakteristik ömür değerleri

B Grubu Numune için S-N verileri			
Çevrim	Gerilme	Karakteristik Ömür	Gerilme
1	258,288	1	258,288
605	116,671	907	116,764
806	116,700	8.082	93,788
950	116,699	56.447	84,403
955	116,987	257.142	76,105
4.853	93,778	497.918	68,653
6.825	93,795	797.578	61,550
8.066	93,798	1.425.945	57,922
9.342	93,779		
25.948	84,389		
44.555	84,408		
56.482	84,367		
69.192	84,448		
102.565	76,072		
132.895	76,137		
133.885	76,070		
200.019	76,107		
526.386	76,136		
253.036	68,682		
324.927	68,664		
363.787	68,643		
525.194	68,624		
714.155	68,654		
404.604	61,518		
521.427	61,557		
666.662	61,563		
825.228	61,519		
1.098.291	61,591		
868.778	57,886		
1.571.436	57,958		

Tablo 6.15 C grubu numune için S-N verileri ve Weibull istatistik dağılımı ile hesaplanan karakteristik ömür değerleri

C Grubu Numune için S-N verileri			
Çevrim	Gerilme	Karakteristik Ömür	Gerilme
1	278,313	1	278,313
838	128,033	1.515	128,039
1.425	128,023	6.306	103,769
1.428	128,058	20.819	93,235
1.672	128,044	41.748	84,152
1.031	103,692	153.385	75,485
3.541	103,782	309.238	68,028
7.126	103,747	974.745	63,378
9.182	103,856	1.170.541	61,221
8.922	93,211		
14.600	93,204		
22.763	93,246		
25.316	93,280		
13.580	84,199		
20.650	84,160		
46.533	84,024		
60.255	84,227		
81.647	75,508		
107.216	75,449		
131.270	75,464		
175.749	75,508		
184.914	75,497		
145.060	68,022		
241.231	68,048		
287.480	68,008		
403.221	68,034		
761.462	63,370		
834.733	63,381		
982.194	63,383		
886.831	61,219		
1.032.300	61,187		
1.139.285	61,270		
1.313.533	61,208		

Tablo 6.16 D grubu numune için S-N verileri ve Weibull istatistik dağılımı ile hesaplanan karakteristik ömür değerleri

D Grubu Numune için S-N verileri			
Çevrim	Gerilme	Karakteristik Ömür	Gerilme
1	265,468	1	265,468
374	111,502	1.351	111,502
651	111,480	4.569	97,072
988	111,532	12.643	87,219
1.862	111,499	34.067	78,800
1.877	111,498	162.954	70,792
1.854	97,091	449.883	63,757
2.525	97,061	781.781	57,411
4.399	97,079	1.438.684	53,070
6.850	97,055	2.515.862	51,662
1.937	87,214		
8.010	87,253		
13.593	87,194		
17.663	87,214		
16.441	78,792		
19.554	78,752		
26.197	78,833		
53.941	78,823		
50.893	70,775		
60.937	70,796		
132.172	70,831		
182.460	70,805		
269.143	70,755		
173.297	63,749		
228.270	63,764		
295.332	63,752		
418.026	63,773		
829.950	63,747		
533.910	57,421		
743.490	57,395		
775.006	57,448		
821.051	57,381		
541.068	53,088		
1.108.399	53,059		
1.972.093	53,065		
1.291.126	51,678		
2.541.891	51,649		
2.612.040	51,659		

Tablo 6.17 E grubu numune için S-N verileri ve Weibull istatistik dağılımı ile hesaplanan karakteristik ömür değerleri

E Grubu Numune için S-N verileri			
Çevrim	Gerilme	Karakteristik Ömür	Gerilme
1	353,540	1	353,540
673	163,980	2.149	163,271
1.545	163,055	6.063	129,452
1.597	163,035	51.298	106,908
3.455	163,015	386.507	96,166
3.667	129,459	528.518	91,170
5.753	129,462	861.131	88,734
6.700	129,435	1.097.184	86,640
30.646	106,897	1.158.121	84,250
45.770	106,880		
59.661	106,947		
133.487	96,200		
191.099	96,135		
414.205	96,138		
570.293	96,189		
185.218	91,185		
250.735	91,143		
632.392	91,143		
701.084	91,207		
513.969	88,658		
546.600	88,860		
812.124	88,680		
1.134.606	88,737		
616.482	86,602		
641.858	86,593		
1.046.480	86,685		
1.132.165	86,699		
1.380.747	86,584		
714.473	84,242		
934.554	84,247		
986.428	84,220		
1.304.742	84,279		
1.306.086	84,261		

Tablo 6.18 F grubu numune için S-N verileri ve Weibull istatistik dağılımı ile hesaplanan karakteristik ömür değerleri

F Grubu Numune için S-N verileri			
Çevrim	Gerilme	Karakteristik Ömür	Gerilme
1	375,200	1	375,200
1.386	151,890	3.344	151,934
2.858	151,927	9.731	123,852
3.377	151,972	41.710	111,613
3.421	151,949	246.047	100,138
5.113	123,856	322.324	90,322
5.683	123,910	755.135	81,316
7.229	123,837	1.061.397	73,201
7.257	123,849		
16.265	123,809		
15.583	111,658		
36.714	111,635		
38.514	111,636		
49.840	111,524		
156.982	100,137		
190.815	100,168		
232.788	100,162		
304.437	100,084		
157.132	90,311		
249.367	90,302		
299.826	90,311		
302.143	90,366		
401.462	81,327		
470.792	81,322		
529.528	81,370		
725.610	81,332		
855.557	81,191		
1.025.171	81,356		
611.601	73,167		
1.012.151	73,230		
1.050.718	73,220		
1.097.848	73,184		

Tablo 6.19 G grubu numune için S-N verileri ve Weibull istatistik dağılımı ile hesaplanan karakteristik ömür değerleri

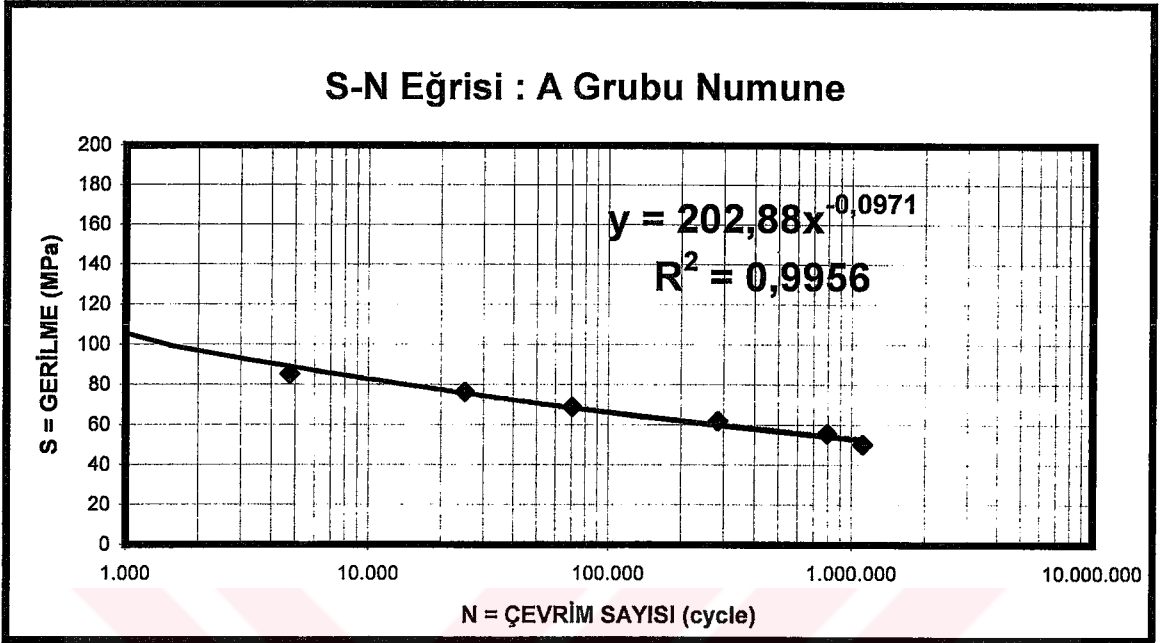
G Grubu Numune için S-N verileri			
Çevrim	Gerilme	Karakteristik Ömür	Gerilme
1	348,198	1	348,198
681	147,744	1.874	147,771
1.301	147,817	14.881	119,308
2.735	147,750	39.375	107,214
4.000	119,342	142.684	96,241
4.790	119,335	252.853	86,771
13.515	119,268	478.357	77,882
18.554	119,260	1.185.603	73,941
21.537	119,335		
8.651	107,151		
15.075	107,212		
18.819	107,259		
38.572	107,200		
56.380	107,221		
67.363	107,242		
73.615	96,242		
81.821	96,252		
97.500	96,265		
144.933	96,215		
219.575	96,233		
209.413	86,792		
211.751	86,744		
236.517	86,754		
286.106	86,794		
386.988	77,904		
398.294	77,854		
469.197	77,967		
533.956	77,805		
334.174	73,971		
853.713	73,921		
972.771	73,948		
1.020.367	73,954		
1.389.311	73,885		
1.431.192	73,970		

Tablo 6.20 H grubu numune için S-N verileri ve Weibull istatistik dağılımı ile hesaplanan karakteristik ömür değerleri

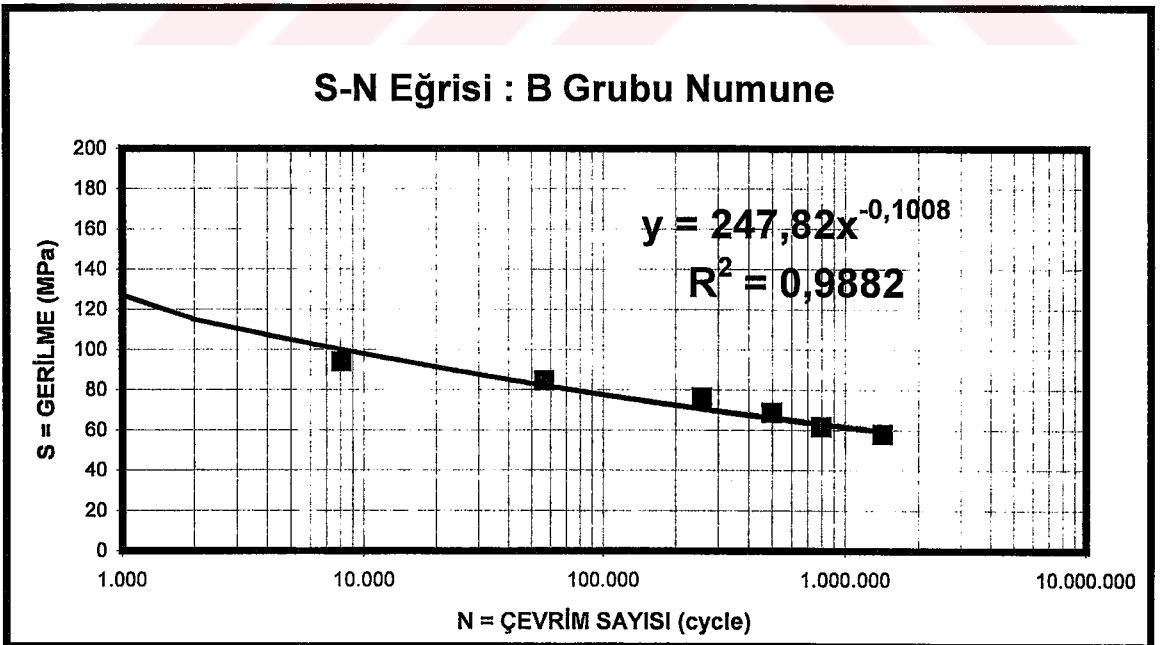
H Grubu Numune için S-N verileri			
Çevrim	Gerilme	Karakteristik Ömür	Gerilme
1	311,504	1	311,504
432	145,823	1.798	145,837
1.229	145,834	5.867	117,274
1.779	145,853	42.286	105,754
2.538	145,837	69.956	95,132
2.342	117,315	183.253	85,619
2.626	117,259	371.418	76,938
5.850	117,249	780.379	69,377
8.936	117,275	1.621.458	64,270
9.779	105,774		
39.774	105,708		
40.116	105,788		
42.647	105,745		
39.429	95,118		
49.129	95,138		
64.213	95,113		
93.404	95,160		
77.764	85,599		
109.467	85,602		
135.559	85,652		
139.656	85,567		
191.657	85,620		
306.055	85,671		
213.422	76,928		
253.801	76,949		
348.111	76,942		
351.873	76,931		
487.644	76,941		
620.488	69,352		
739.304	69,396		
795.359	69,350		
801.976	69,410		
1.147.504	64,245		
1.596.448	64,288		
1.699.884	64,278		

Tablo 6.21 K grubu numune için S-N verileri ve Weibull istatistik dağılımı ile hesaplanan karakteristik ömür değerleri

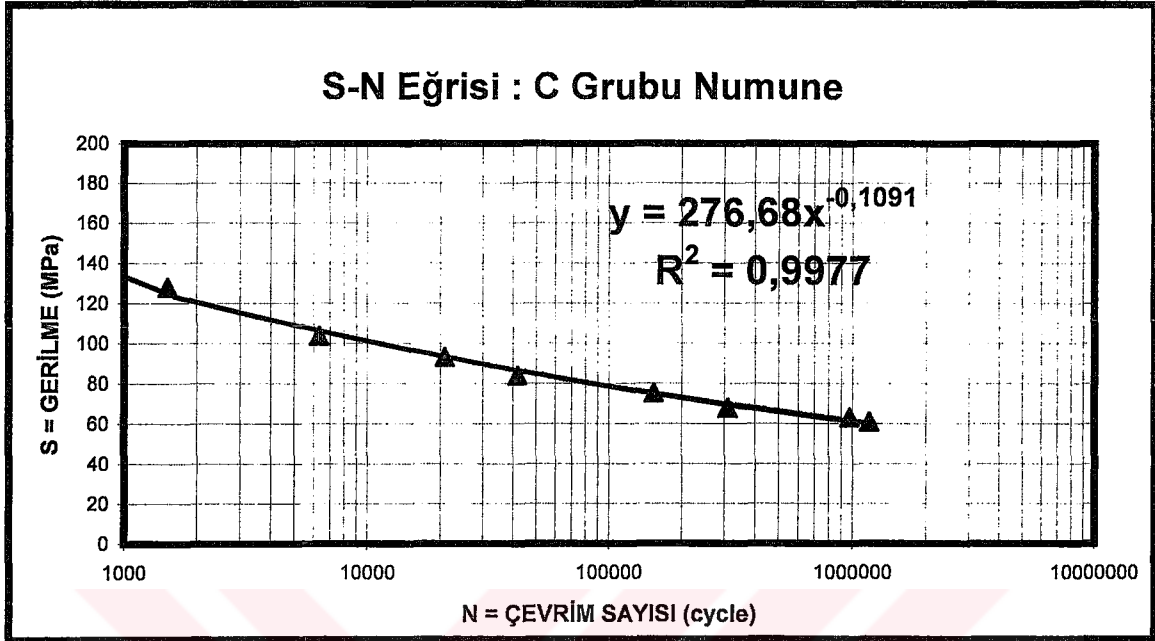
K Grubu Numune için S-N verileri			
Çevrim	Gerilme	Karakteristik Ömür	Gerilme
1	295,533	1	295,533
815	131,738	1.077	131,715
1.019	131,737	4.597	106,853
1.163	131,671	9.909	96,161
2.286	106,840	39.485	86,636
3.495	106,849	163.999	77,815
4.483	106,843	252.401	69,876
5.847	106,879	638.568	65,444
3.714	96,181	1.268.883	63,180
6.135	96,147		
9.597	96,158		
14.480	96,158		
29.428	86,597		
35.410	86,617		
44.133	86,693		
86.805	77,812		
128.406	77,756		
156.109	77,769		
178.998	77,906		
180.762	77,835		
213.450	69,881		
246.359	69,931		
262.535	69,814		
344.343	65,278		
424.164	65,589		
619.045	65,469		
846.241	65,439		
719.595	63,175		
721.588	63,222		
1.090.944	63,196		
1.462.769	63,104		
1.549.897	63,197		



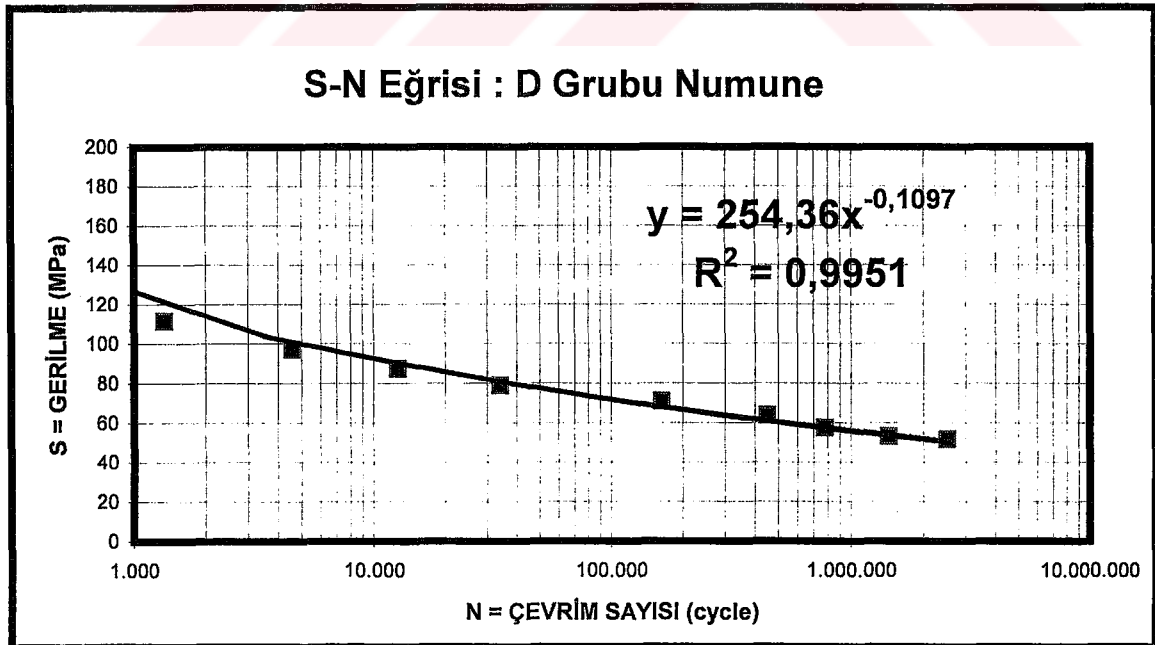
Şekil 6.29 A grubu numune için karakteristik ömür verileri ile elde edilen S-N eğrisi



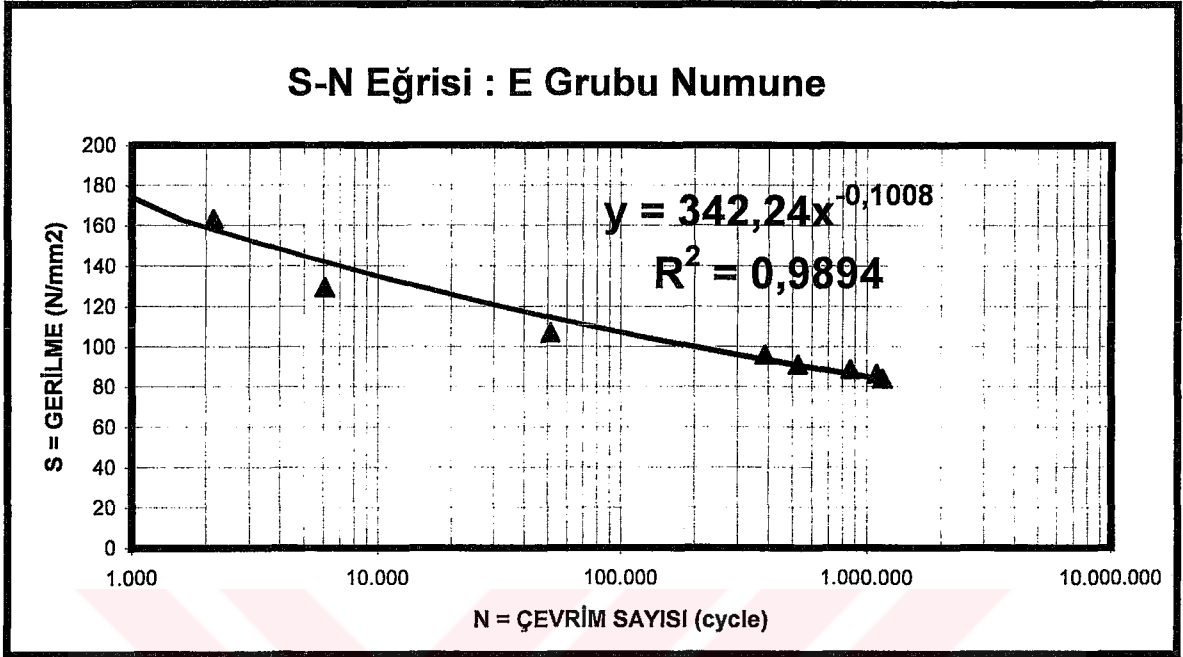
Şekil 6.30 B grubu numune için karakteristik ömür verileri ile elde edilen S-N eğrisi



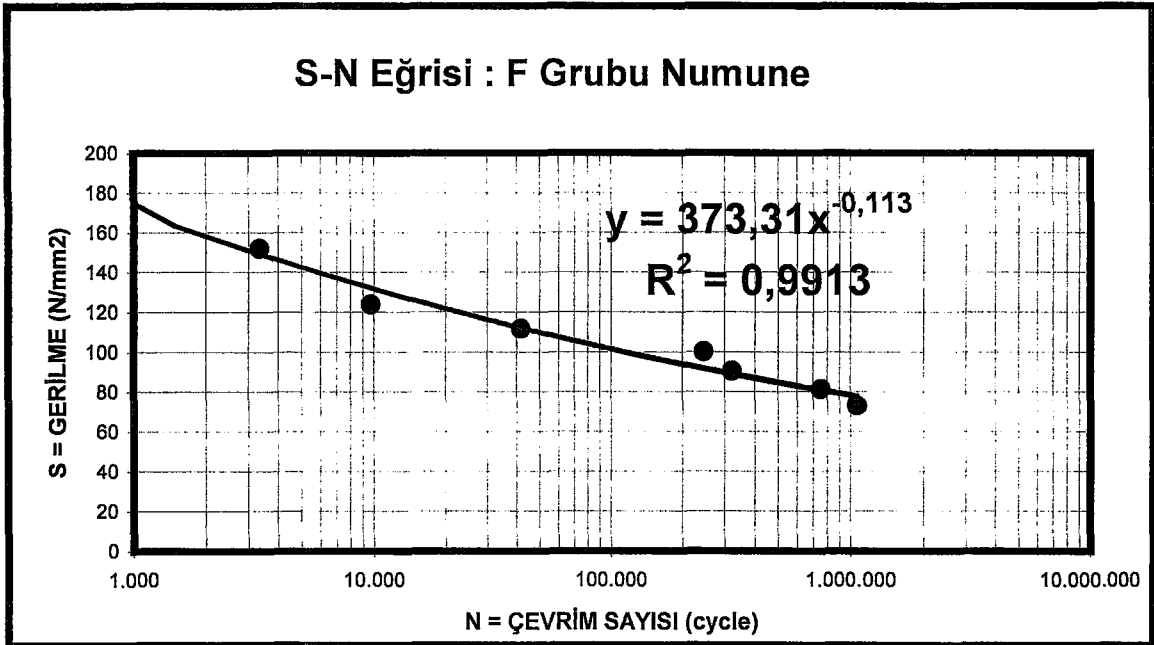
Şekil 6.31 C grubu numune için karakteristik ömür verileri ile elde edilen S-N eğrisi



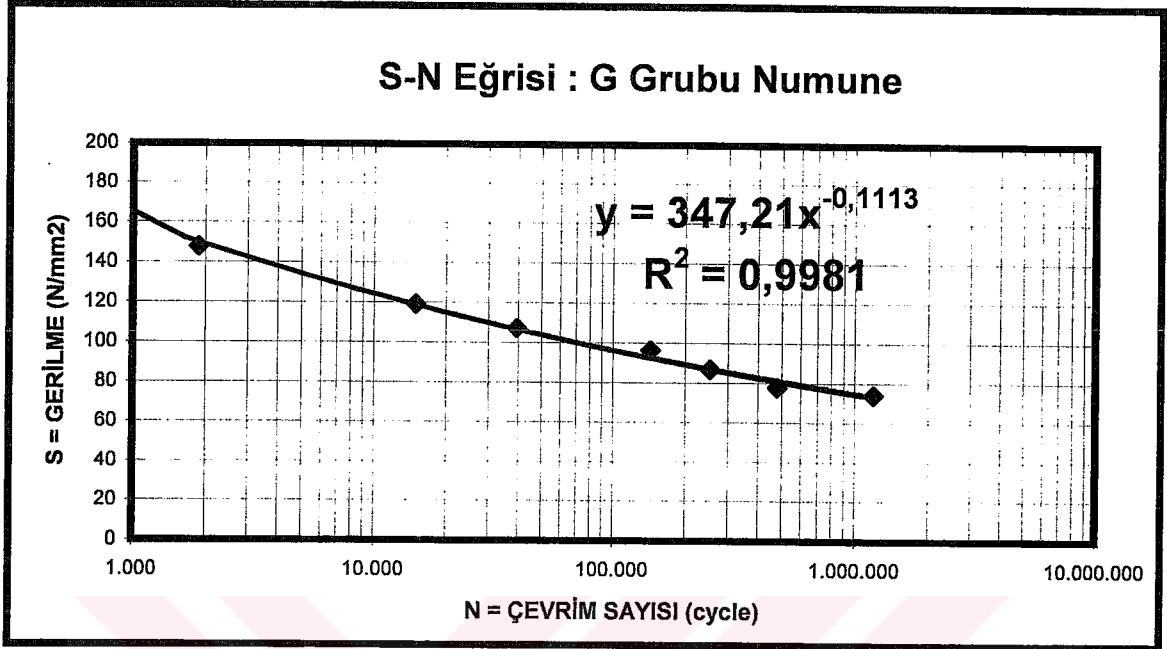
Şekil 6.32 D grubu numune için karakteristik ömür verileri ile elde edilen S-N eğrisi



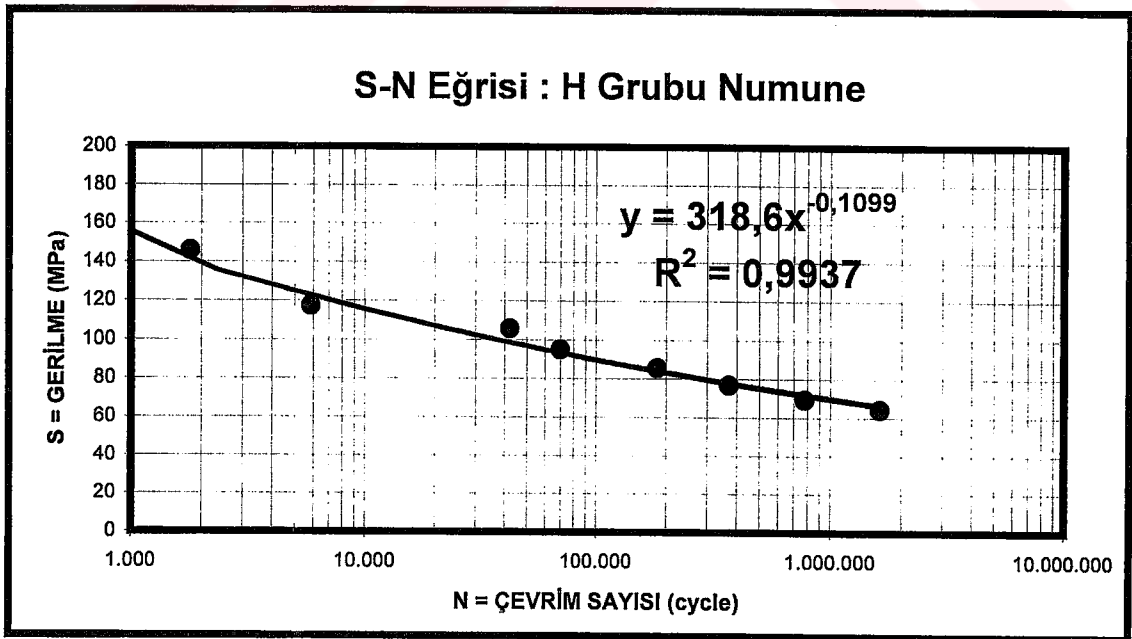
Şekil 6.33 E grubu numune için karakteristik ömür verileri ile elde edilen S-N eğrisi



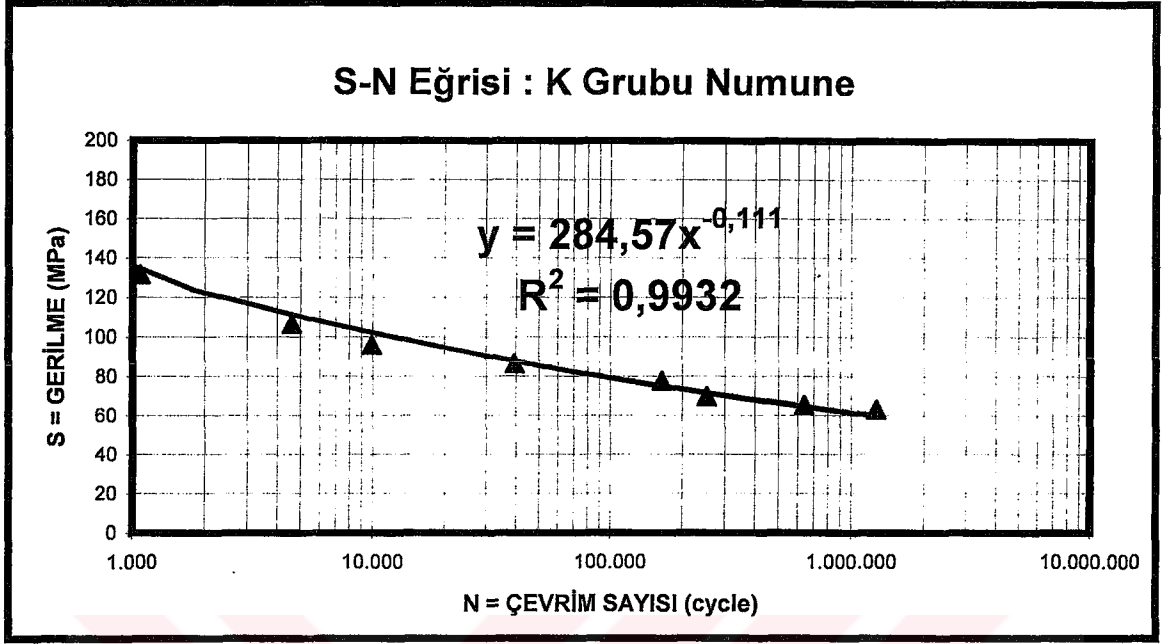
Şekil 6.34 F grubu numune için karakteristik ömür verileri ile elde edilen S-N eğrisi



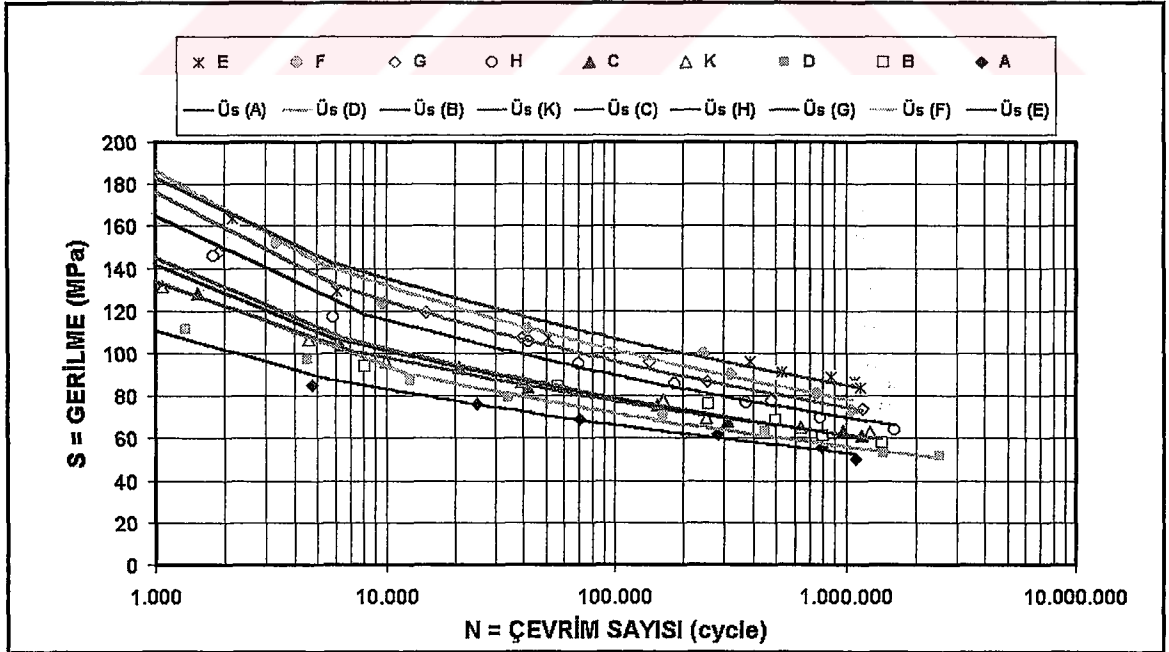
Şekil 6.35 G grubu numune için karakteristik ömür verileri ile elde edilen S-N eğrisi



Şekil 6.36 H grubu numune için karakteristik ömür verileri ile elde edilen S-N eğrisi



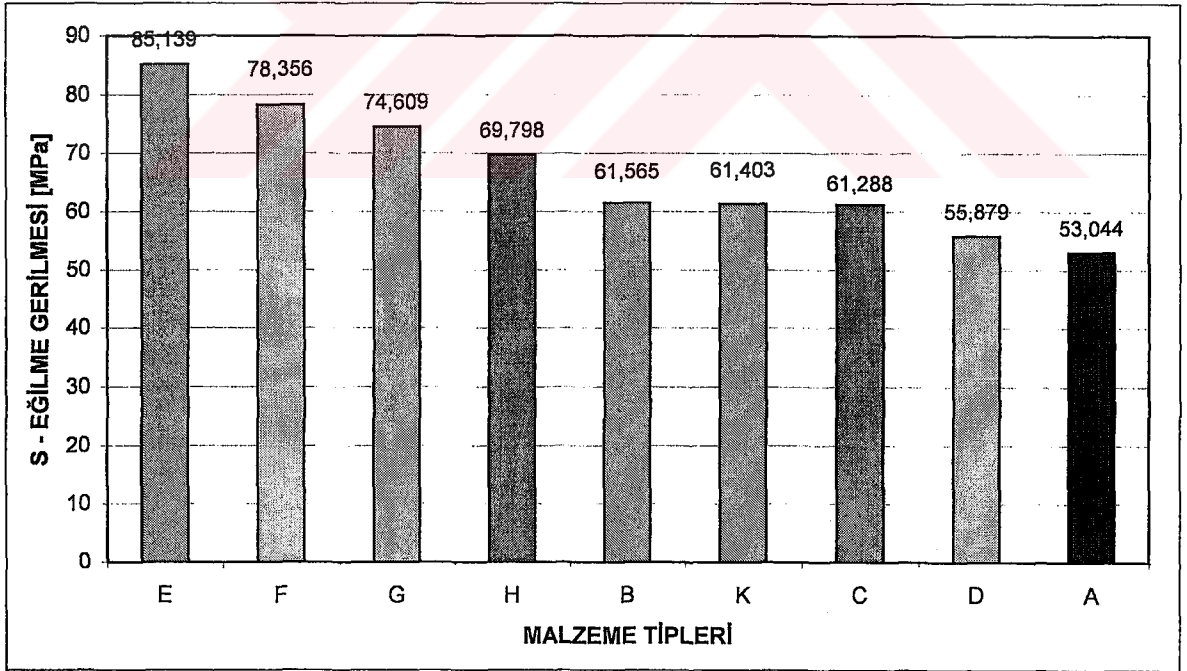
Şekil 6.37 K grubu numune için karakteristik ömür verileri ile elde edilen S-N eğrisi



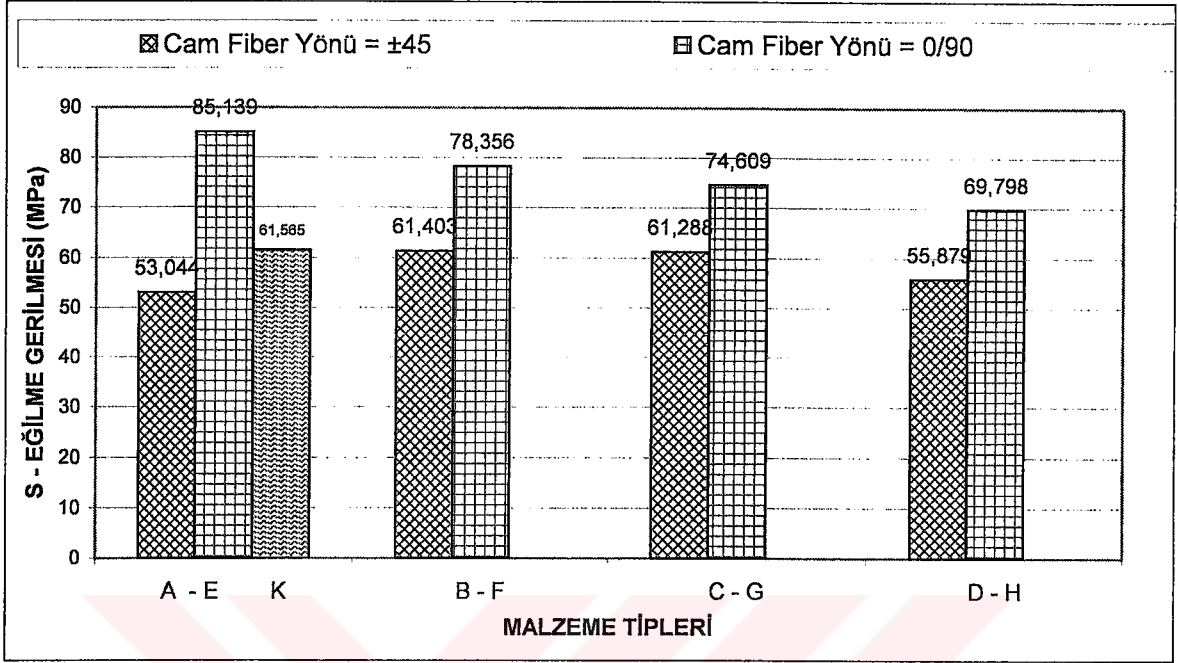
Şekil 6.38 S-N eğrilerinin bir arada gösterimi (bütün gruplar)

Tablo 6.22 Düzeltilmiş S-N eğrilerine göre $N_f=10^6$ çevrime karşılık maksimum gerilme değerleri

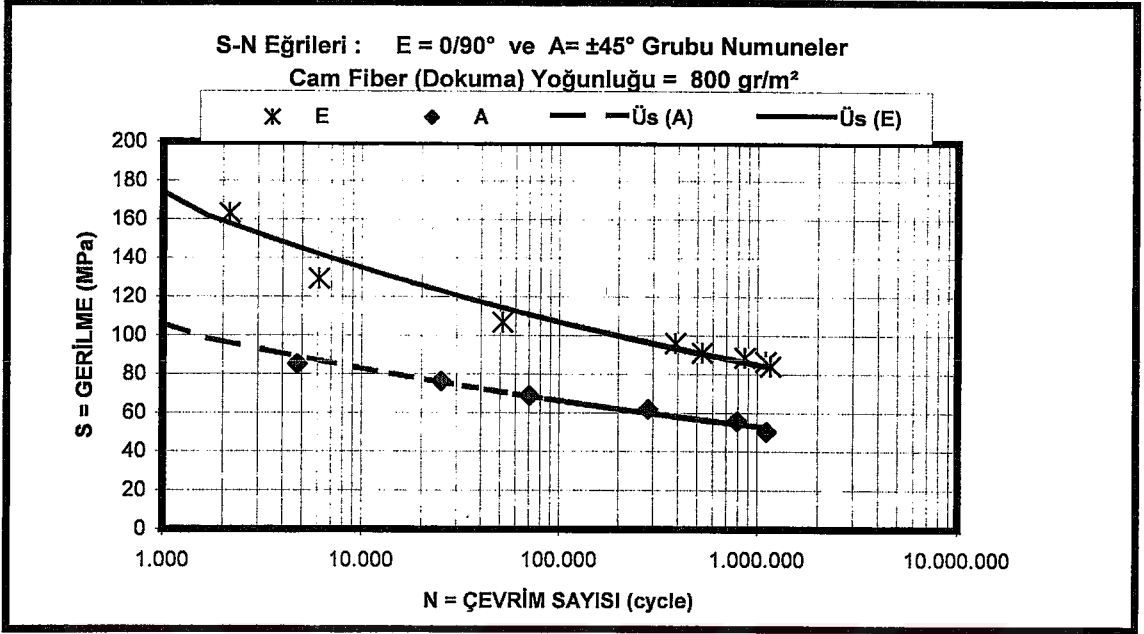
Grup	R^2	$S_a = A(N_f)^{-B}$	A	B	N_f	S_a
E	0,9894	$S_a = 342.24(N_f)^{-0.1008}$	342,24	-0,1007	1.000.000	85,139
F	0,9913	$S_a = 373.31(N_f)^{-0.1130}$	373,31	-0,1130	1.000.000	78,356
G	0,9981	$S_a = 347.21(N_f)^{-0.1113}$	347,21	-0,1113	1.000.000	74,609
H	0,9937	$S_a = 318.60(N_f)^{-0.1099}$	318,60	-0,1099	1.000.000	69,798
B	0,9882	$S_a = 247.82(N_f)^{-0.1008}$	247,82	-0,1008	1.000.000	61,565
K	0,9932	$S_a = 284.57(N_f)^{-0.1110}$	284,57	-0,1110	1.000.000	61,403
C	0,9977	$S_a = 276.68(N_f)^{-0.1091}$	276,68	-0,1091	1.000.000	61,288
D	0,9951	$S_a = 254.36(N_f)^{-0.1097}$	254,36	-0,1097	1.000.000	55,879
A	0,9956	$S_a = 202.88(N_f)^{-0.0971}$	202,88	-0,0971	1.000.000	53,044



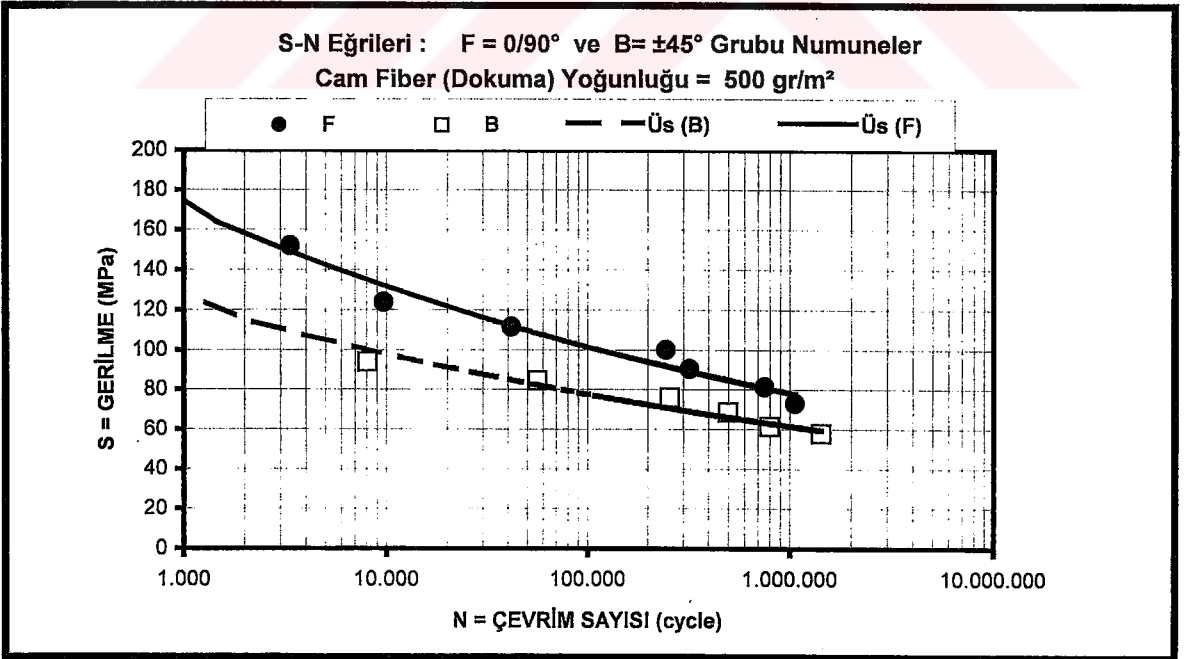
Şekil 6.39 S-N eğrilerine göre 10^6 çevrim için elde edilmiş ortalama eğilme gerilmesi değerlerinin kıyaslanması



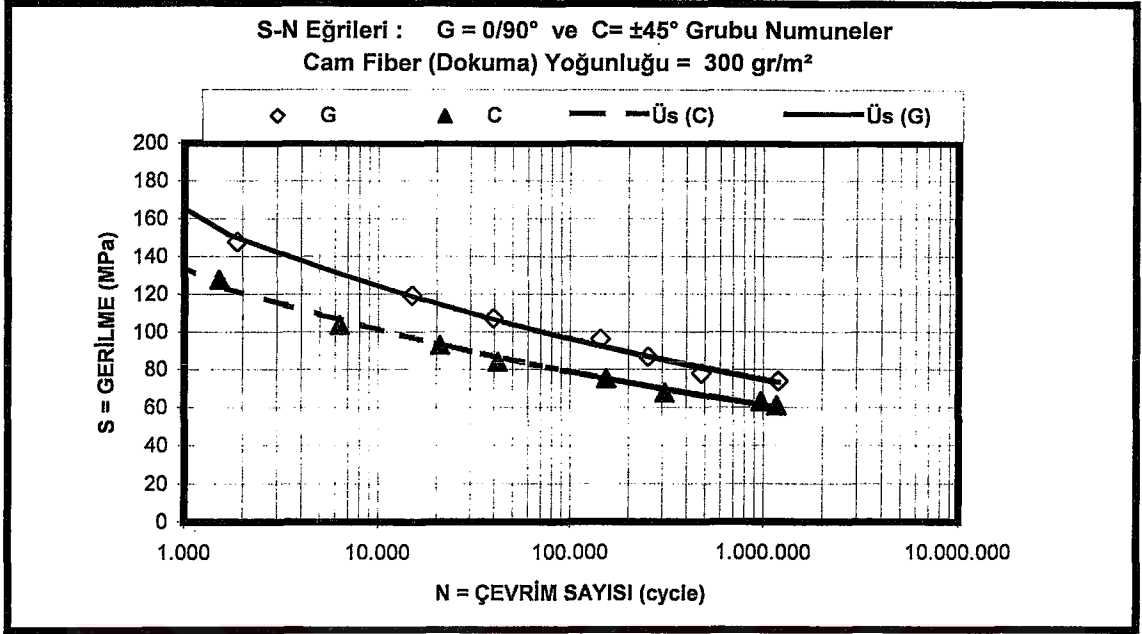
Şekil 6.40 10^6 çevrim için $\pm 45^\circ$ ve $0/90^\circ$ fiber yönleri ile rasgele dağılımlı keçe elyafın eğilme yorulması değişimi



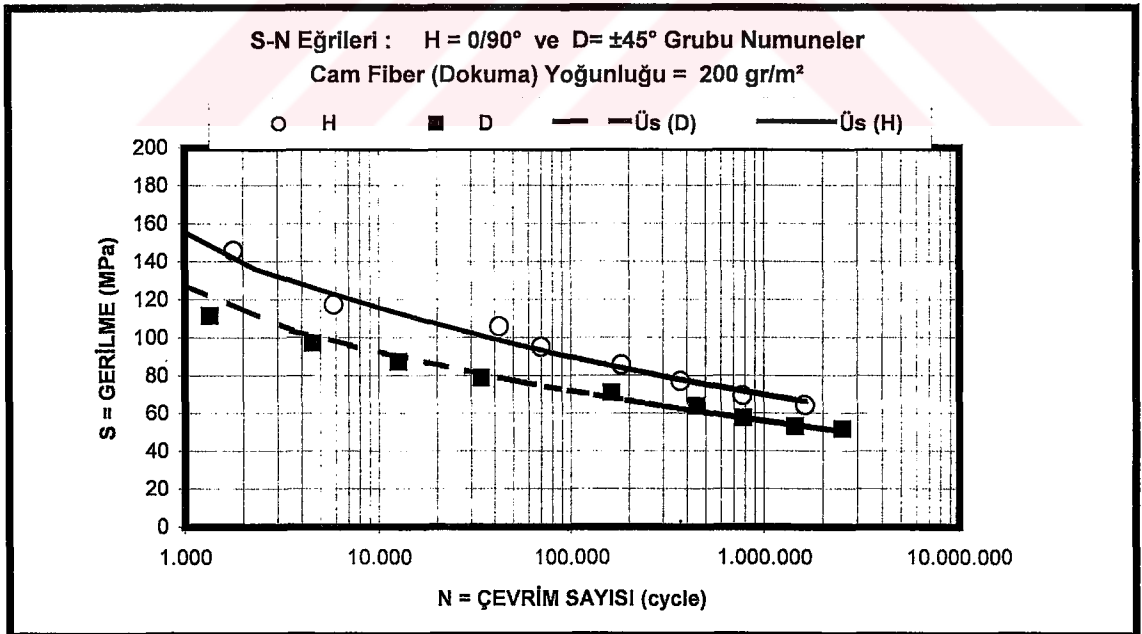
Şekil 6.41 Cam fiber yoğunluğu 800 gr/m², fiber yönü ±45° ve 0/90° olan numuneler için S-N eğrilerinin karşılaştırılması (A ve E Grubu)



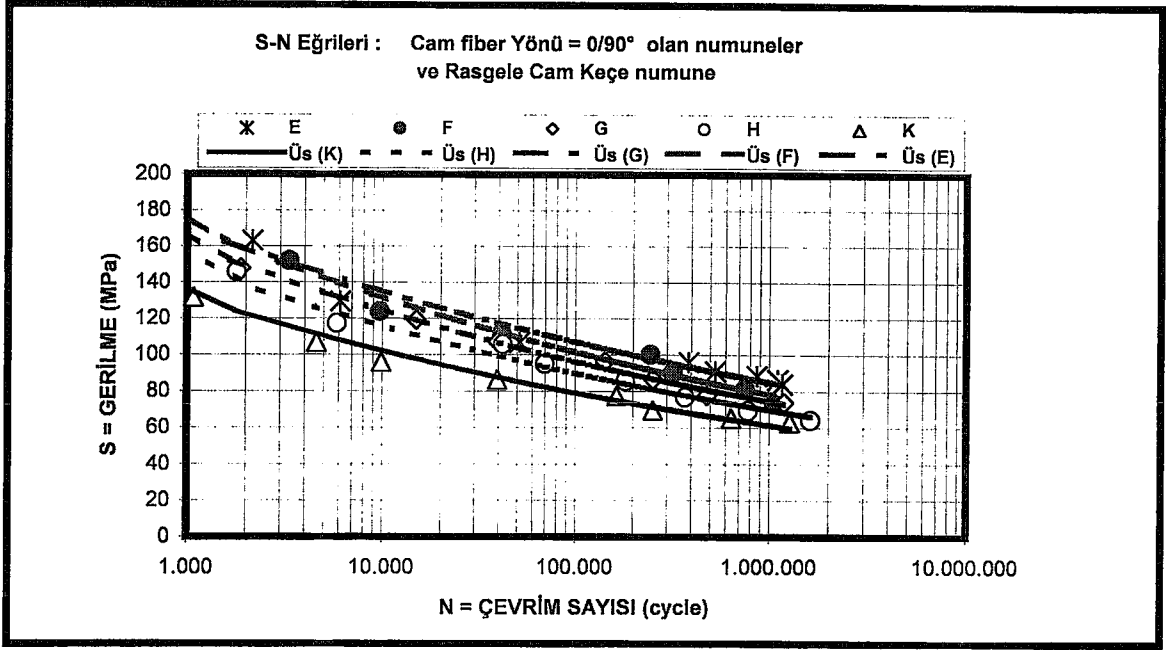
Şekil 6.42 Cam fiber yoğunluğu 500 gr/m², fiber yönü ±45° ve 0/90° olan numuneler için S-N eğrilerinin karşılaştırılması (B ve F Grubu)



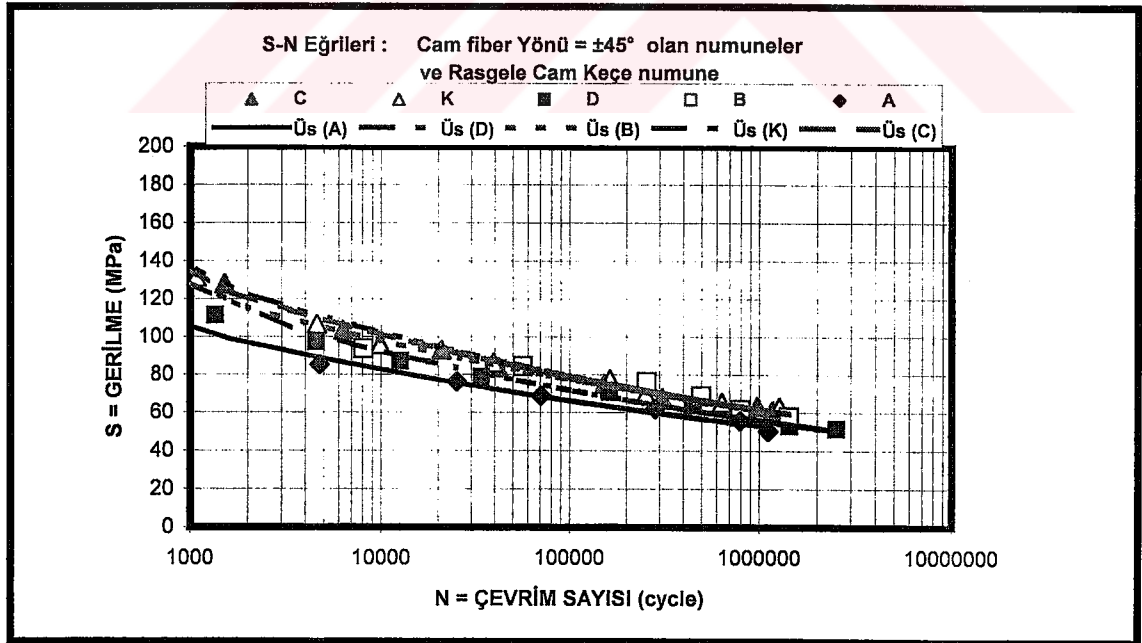
Şekil 6.43 Cam fiber yoğunluğu 300 gr/m², fiber yönü ±45° ve 0/90° olan numuneler için S-N eğrilerinin karşılaştırılması (C ve G Grubu)



Şekil 6.44 Cam fiber yoğunluğu 200 gr/m², fiber yönü ±45° ve 0/90° olan numuneler için S-N eğrilerinin karşılaştırılması (D ve H Grubu)



Şekil 6.45 Cam fiber yönü 0/90° olan numuneler için S-N eğrilerinin karşılaştırılması



Şekil 6.46 Cam fiber yönü ±45° olan numuneler için S-N eğrilerinin karşılaştırılması

6.6.7 Yorulma Sonuçlarının Weibull İstatiksel Dağılımı ile Analizi

Mühendislikteki “güvenirlilik” terimi, bir ürünün veya sistemin, özel bir zaman periyodunda verilen çalışma şartları altındaki tasarım fonksiyonlarını yerine getirebilme olasılığına dayanır. Bu durum ise “hasara uğramadan çalışabileceği ömür olasılığı”, “kırılmadan çalışma olasılığı” veya “kırılmadan devam edebileceği çalışma yüzdesi (toplam ömre oranı)” şeklinde açıklanır [3].

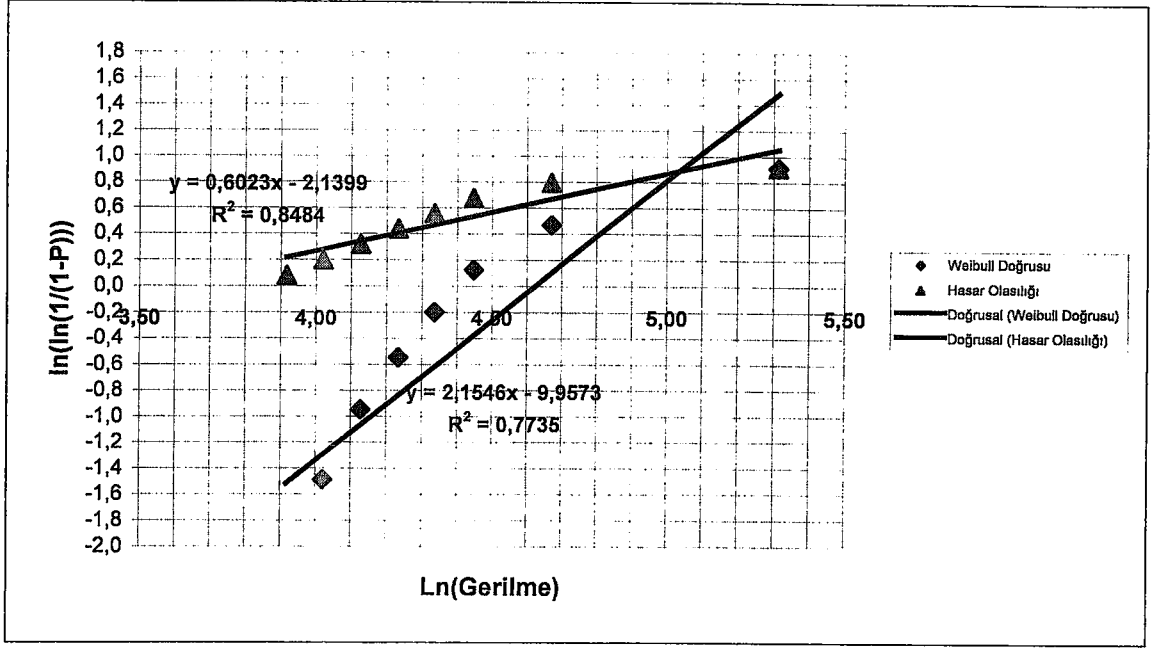
Yorulma testleri sonunda, her bir gerilme değeri için ortalama 4-6 çevrim (ömür) değeri bulunmuştur. Bu çevrim değerlerinin ortalaması yada karakteristik ortalama değeri için Bölüm 4.4’de anlatılan Weibull dağılım denklemleri kullanılmıştır. Her bir gerilme değeri için bulunan karakteristik ömür (çevrim) sonuçları Tablo 6.13- Tablo 6.21’de görülmektedir.

Tek bir grup malzemedan elde edilen sonuçların analizi, yine Weibull dağılımı ile yapılmıştır. Bütün grup numunelerden elde edilen Weibull parametreleri ve güvenirlilik değerleri EK-A’da verilmiştir.

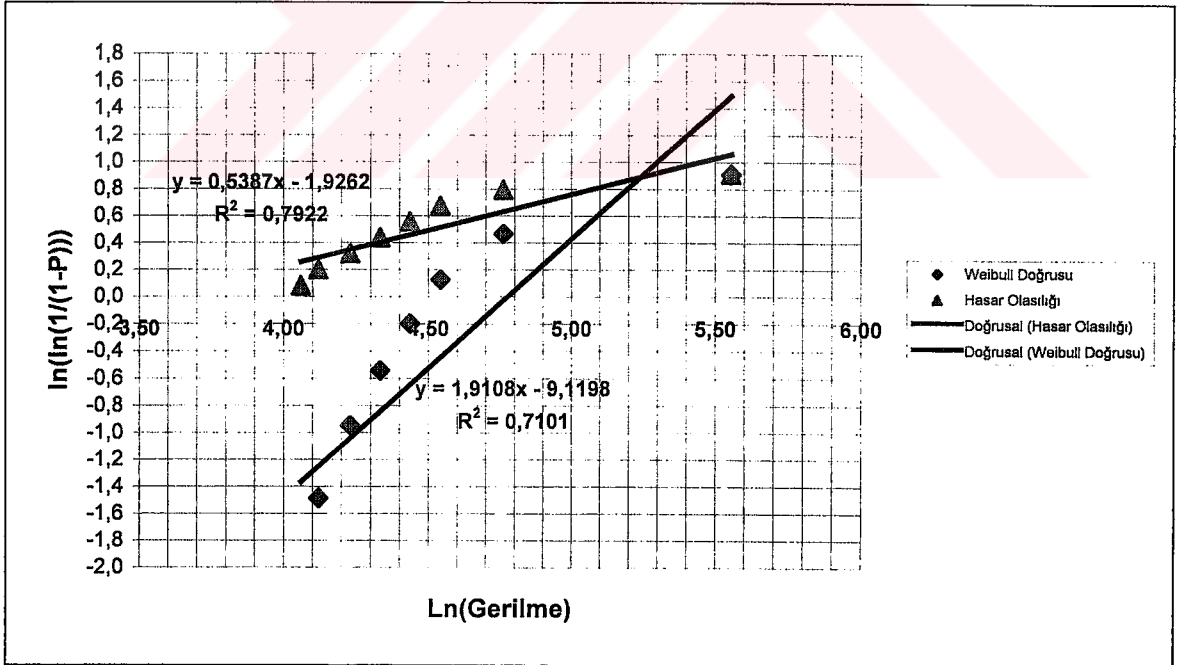
Uygulanan gerilmelere karşılık oluşturulan Weibull grafikleri ve hasar olasılıklarını veren grafikler Şekil 6.47 – Şekil 6.56’da verilmiştir.

Ayrıca, bütün numune grupları için kırılmama (ömrünü sürdürme) olasılıklarını gösteren grafikler Şekil 6.56’de verilmiştir.

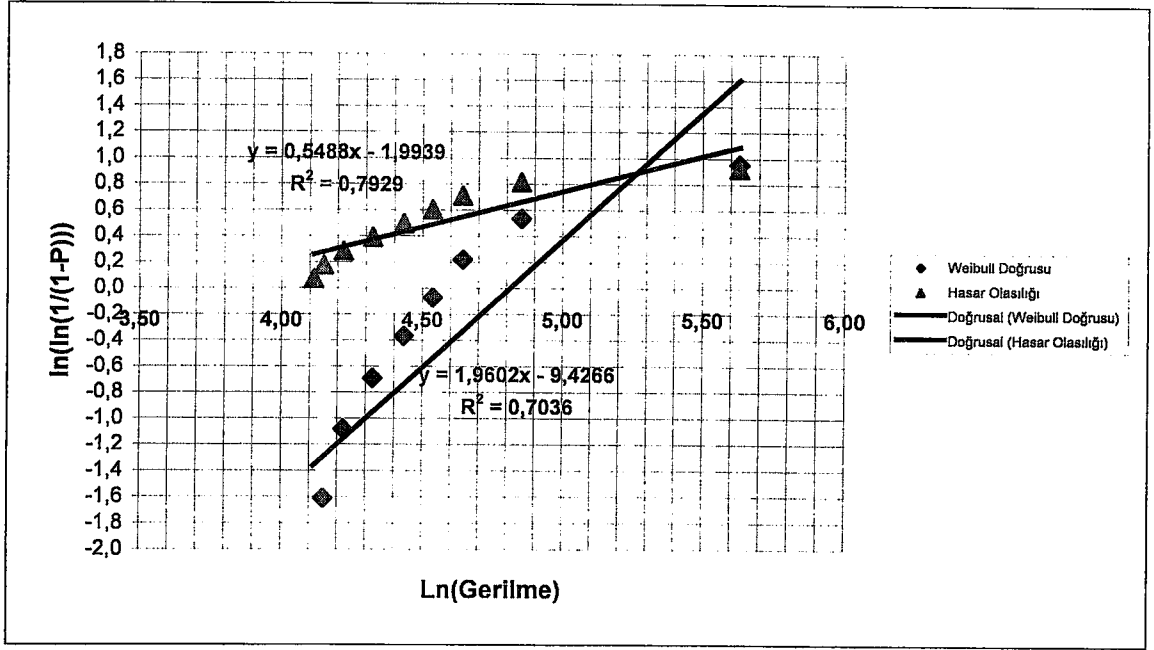
Bütün bulunan değerler ve grafikler, Bölüm 4.4.1’deki Weibull Dağılım denklemleri kullanılarak Microsoft Excel yardımı ile bulunmuştur.



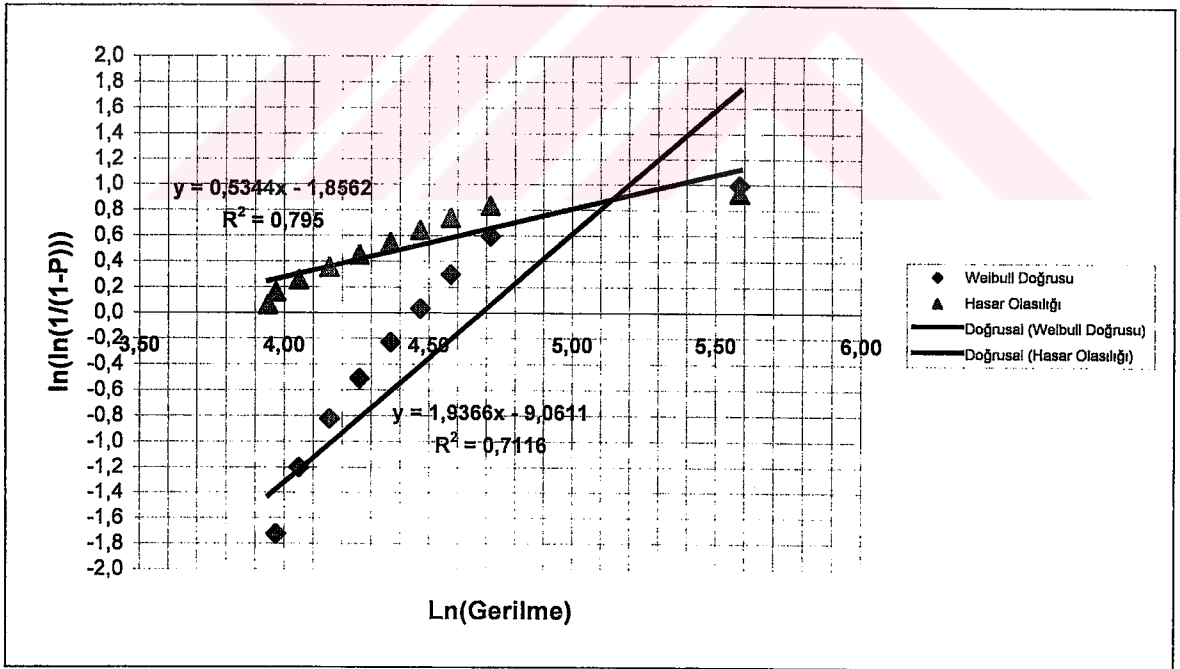
Şekil 6.47 A grubu numuneler için Weibull ve hasar olasılığı grafikleri



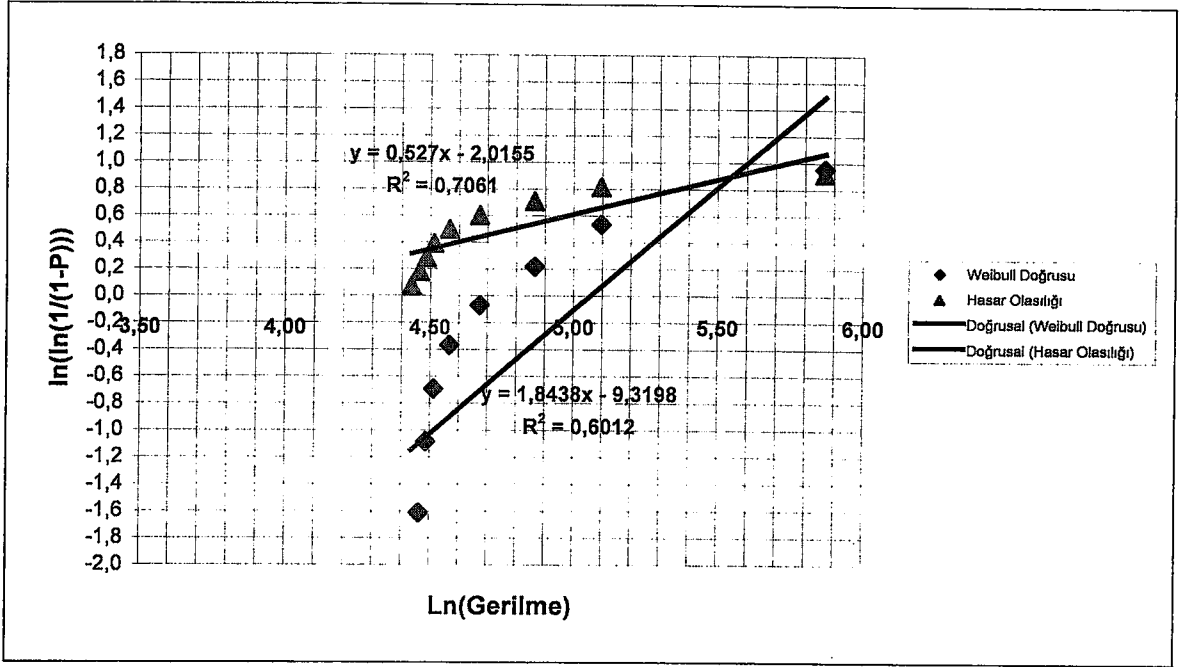
Şekil 6.48 B grubu numuneler için Weibull ve hasar olasılığı grafikleri



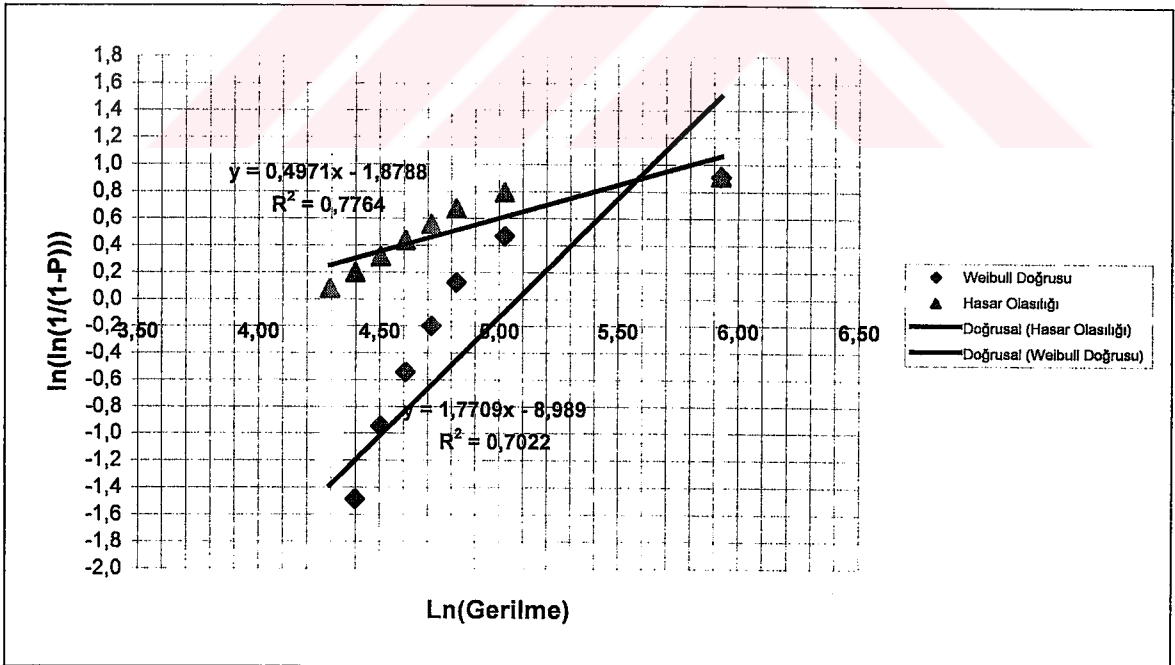
Şekil 6.49 C grubu numuneler için Weibull ve hasar olasılığı grafikleri



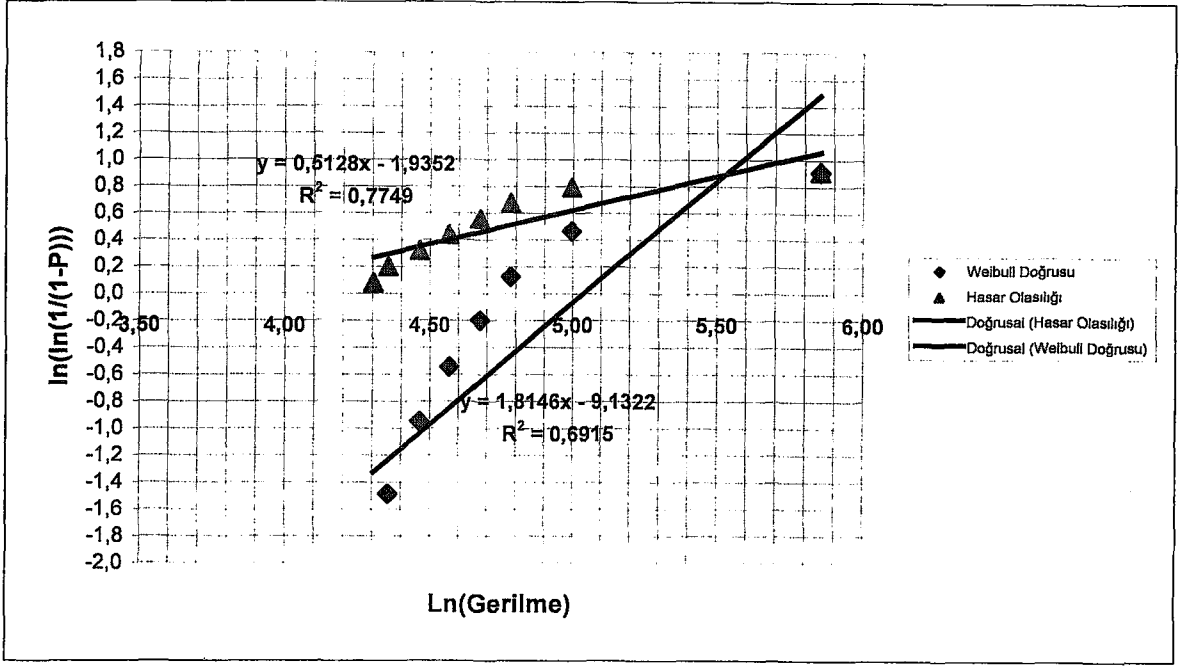
Şekil 6.50 D grubu numuneler için Weibull ve hasar olasılığı grafikleri



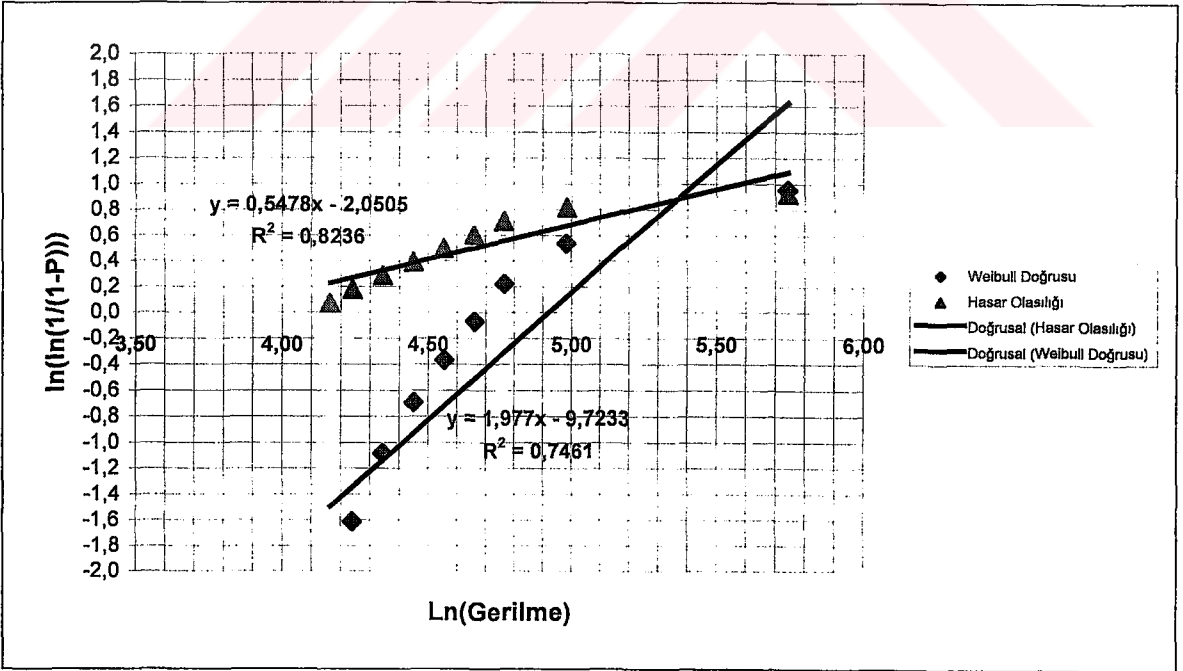
Şekil 6.51 E grubu numuneler için Weibull ve hasar olasılığı grafikleri



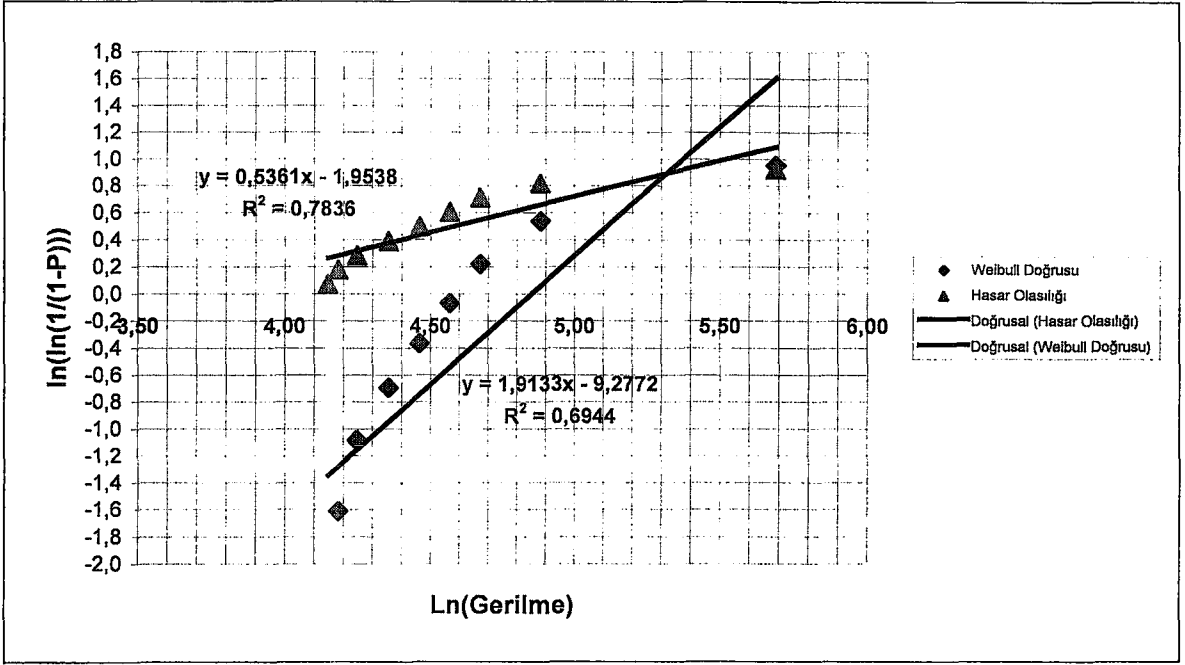
Şekil 6.52 F grubu numuneler için Weibull ve hasar olasılığı grafikleri



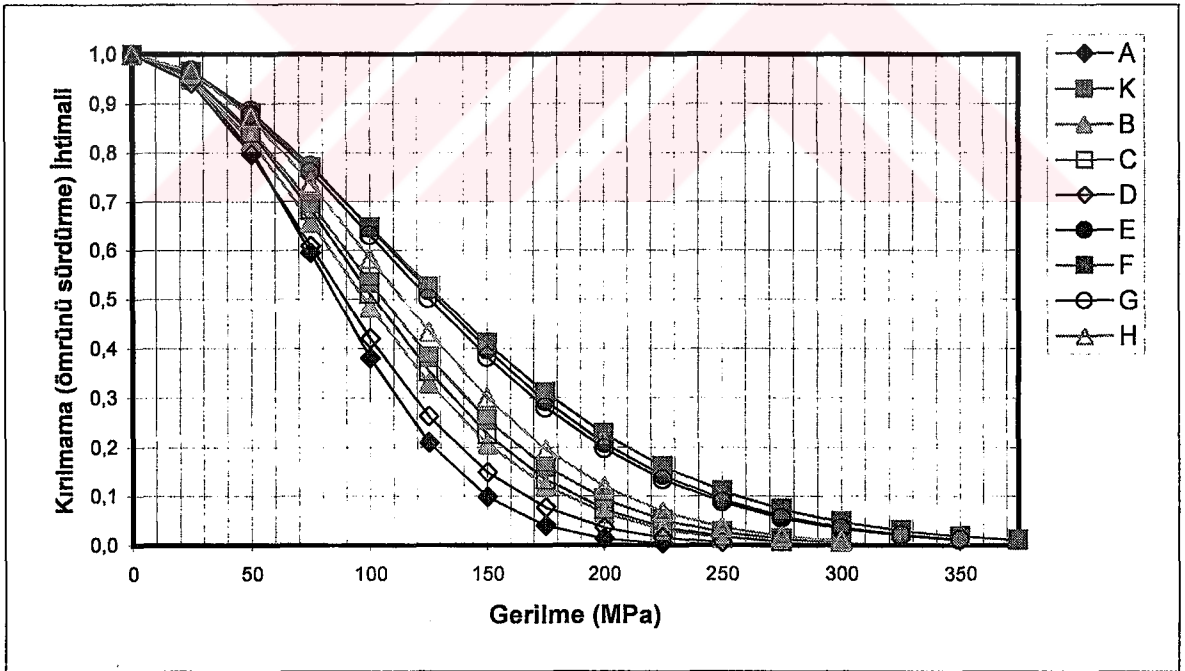
Şekil 6.53 G grubu numuneler için Weibull ve hasar olasılığı grafikleri



Şekil 6.54 H grubu numuneler için Weibull ve hasar olasılığı grafikleri



Şekil 6.55 K grubu numuneler için Weibull ve hasar olasılığı grafikleri



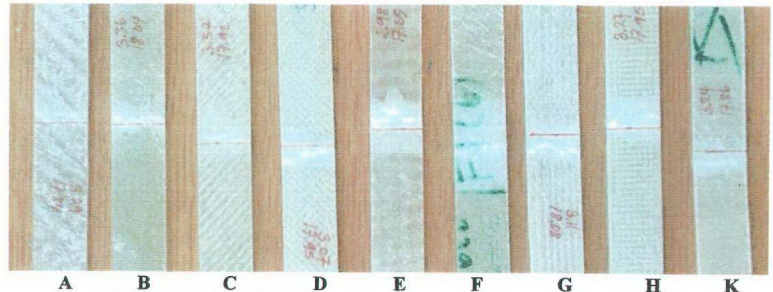
Şekil 6.56 Bütün numune grupları için kırılmama (ömrünü sürdürme) olasılıkları grafiği

6.7 KIRILMA BÖLGELERİNİN İNCELENMESİ

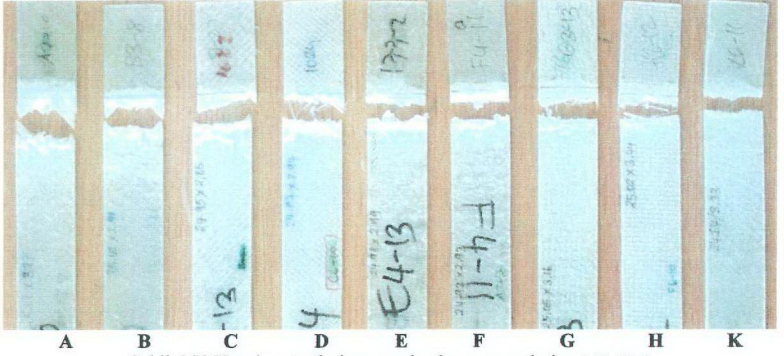
Çekme testi sonucu kırılan bazı numunelerin kırılma yüzeyleri Şekil 6.57'de, üç noktadan eğilme testi sonucu kırılan bazı numunelerin kırılma yüzeyleri Şekil 6.58'de ve eğilme yorulması sonucu kırılan bazı numunelerin kırılma yüzeyleri ise Şekil 6.59'da görülmektedir. Şekil 6.57-6.59'a bakılacak olursa, $\pm 45^\circ$ 'lik cam dokumadan oluşan numunelerde kırılmalar, $\pm 45^\circ$ 'lik düzlemlerden gerçekleşmiştir. Çünkü $\pm 45^\circ$ 'lik düzlemler üzerinde maksimum kayma gerilmesi oluşmakta ve bu bölgedeki zayıf fiber-matris ara yüzeyi bularak hasar meydana gelmektedir. Ayrıca, çekme, eğilme ve yorulma testleri esnasında $\pm 45^\circ$ 'lik fiber yönlü A, B, C ve D grubu numunelerin 45° 'lik kayma düzlemleri üzerinde polyester alanının çok daha fazla olmasından ve 45° 'lik düzlemlerdeki cam fiberlerin 0° 'lik fiberlere göre 1.9 kat daha fazla yük taşımışından dolayı daha kısa zamanda hasara uğramaktadır. Bütün kırılma bölgelerinde görülen beyazlıklar, fiber-matris ara yüzeyinin ayrıldığı ve o bölgede hasar olduğu anlaşılmaktadır.



A B C D E F G H K
Şekil 6.57 Çekme testi sonucu kırılan numunelerin görüntüsü



A B C D E F G H K
Şekil 6.58 Üç noktadan eğilme testi sonucu kırılan numunelerin görüntüsü

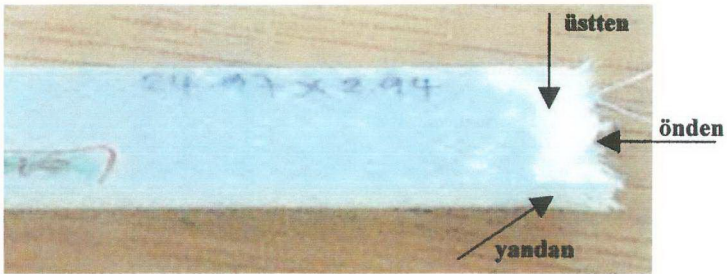


Şekil 6.59 Yorulma testleri sonucu kırılan numunelerin görüntüsü

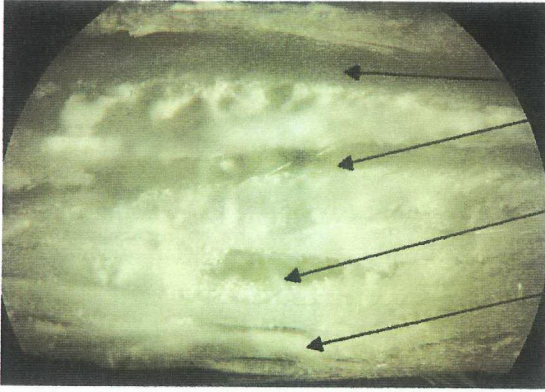
Şekil 6.60'da ise B ve E grubuna ait iki numunede, yorulma kırılması esnasında çok bariz bir şekilde tabaka ayrılmasının (delamination) meydana geldiği görülmektedir.



Şekil 6.60 Yorulma testinde tabaka ayrılması (delamination) hasarına uğramış numuneler



Şekil 6.61 Optik fotoğrafların çekildiği bölgeler (kırılma bölgesinin üç farklı yönünden)



90°'lik fiberin ayrılmasıyla oluşan enine boşluklar

Çatlak başlangıcı, 0° 'lik fiberin kopup ayrıldığı boşluk (debonding)

Tabaka ayrılması
Enine tabakalar

Şekil 6.62 Yorulması sonucu kırılan bölgenin önden görüntüsü
(Numune grubu : E, Büyütme : 40X)



90°'lik fiberin ayrılmasıyla oluşan enine boşluk

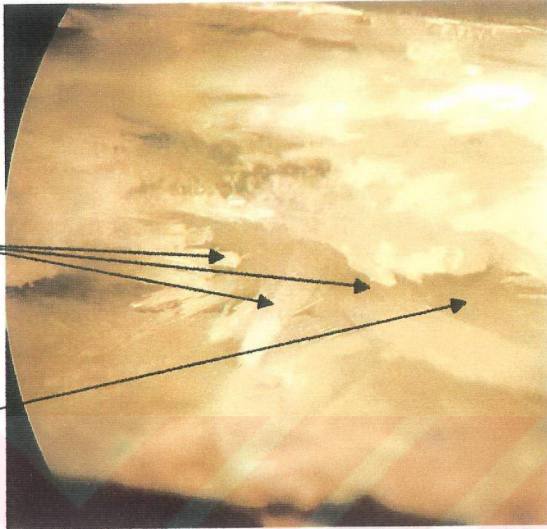
Çatlak başlangıcı, 0° 'lik fiberin kopup ayrıldığı boşluk (debonding)

Tabaka ayrılması

Şekil 6.63 Yorulması sonucu kırılan bölgenin önden görüntüsü
(Numune grubu : E, Büyütme : 60X)

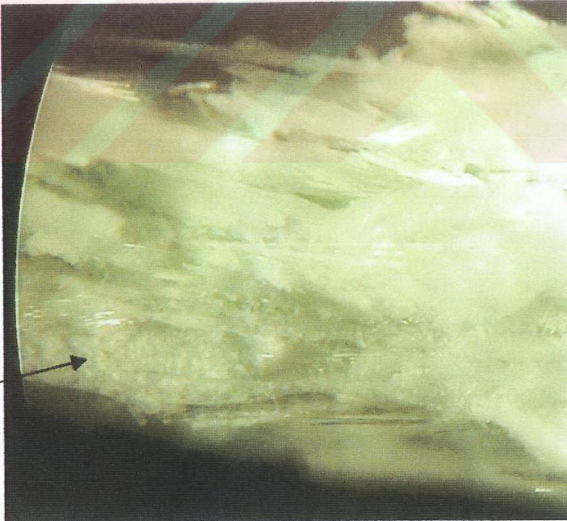
$\pm 45^\circ$ yönünde kırılan cam fiberler

Matrisin dağılmasıyla oluşan boşluk

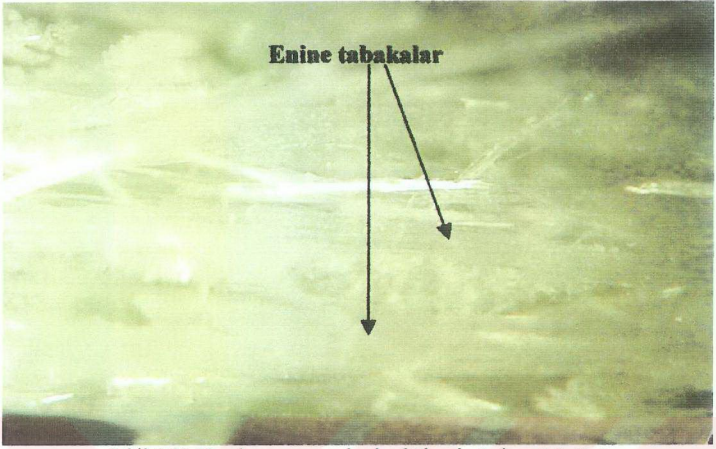


Şekil 6.64 Yorulması sonucu kırılan bölgenin önden görüntüsü
(Numune grubu : A, Büyütme : 40X)

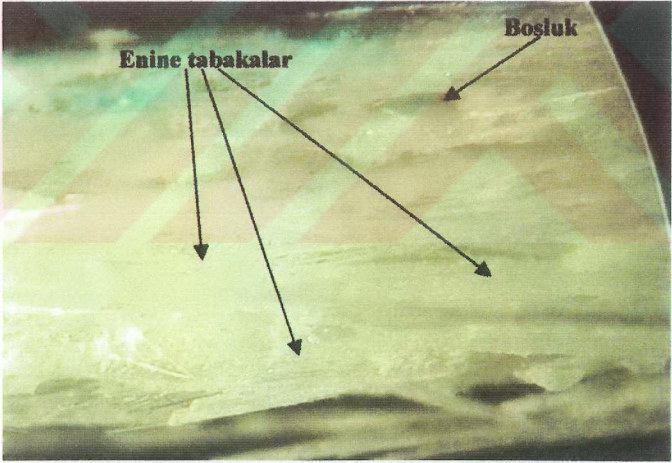
Matrisin dağılması (hasarı)



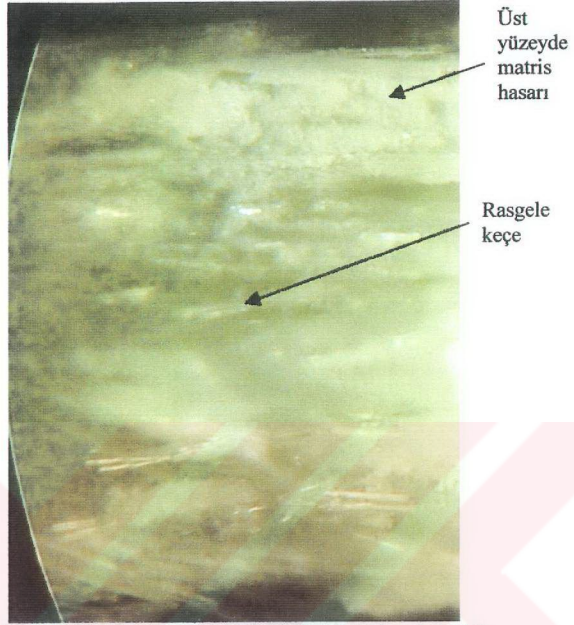
Şekil 6.65 Yorulması sonucu kırılan bölgenin önden görüntüsü
(Numune grubu : B, Büyütme : 40X)



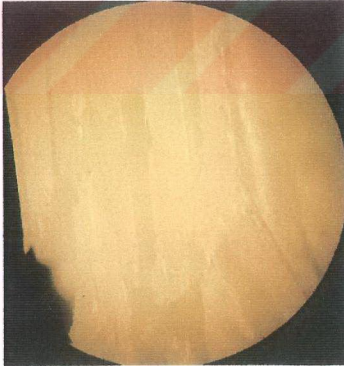
Şekil 6.66 Yorulması sonucu kırılan bölgenin önden görüntüsü
(Numune grubu : F, Büyütme : 40X)



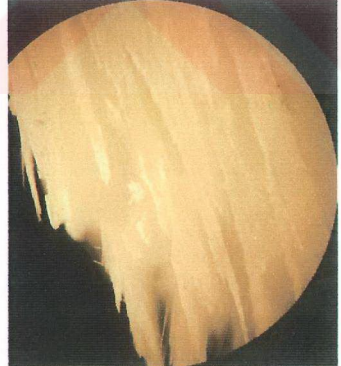
Şekil 6.67 Yorulması sonucu kırılan bölgenin önden görüntüsü
(Numune grubu : G, Büyütme : 40X)



Şekil 6.68 Yorulması sonucu kırılan bölgenin önden görüntüsü
(Numune grubu : K, Büyütme : 40X)



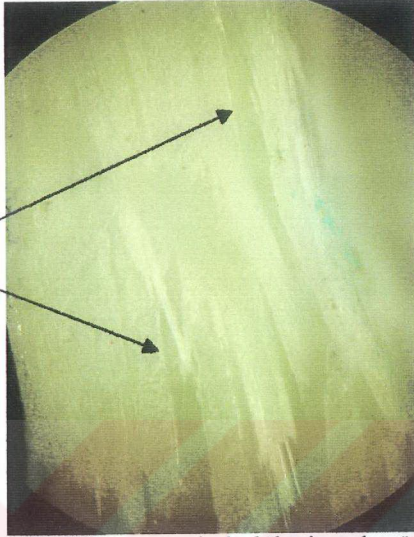
a) Numune grubu : E, Büyütme : 20X



b) Numune grubu : A, Büyütme : 20X

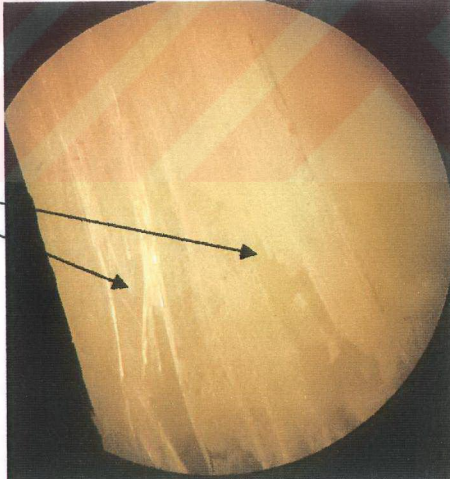
Şekil 6.69 Yorulması sonucu kırılan bölgenin yandan görüntüsü (tabaka ayrılmaları)

Tabaka ayrılması



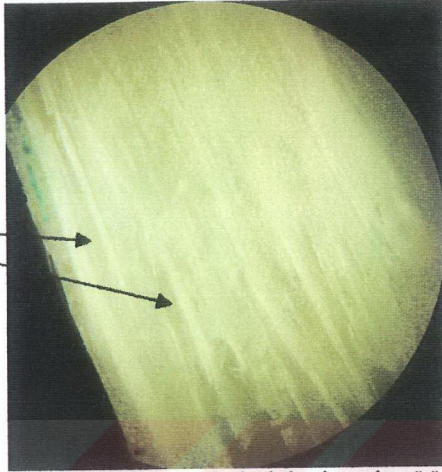
Şekil 6.70 Yorulması sonucu kırılan bölgenin yandan görüntüsü
(Numune grubu : F, Büyütme : 20X)

Tabaka ayrılması



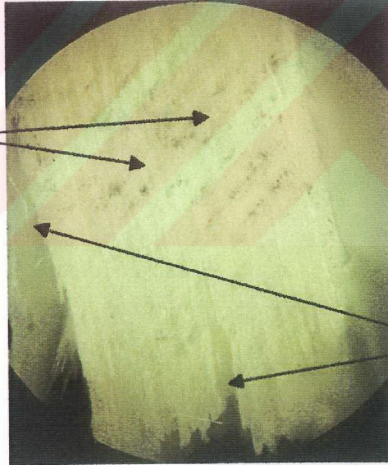
Şekil 6.71 Yorulması sonucu kırılan bölgenin yandan görüntüsü
(Numune grubu : G, Büyütme : 20X)

Tabaka ayrılması



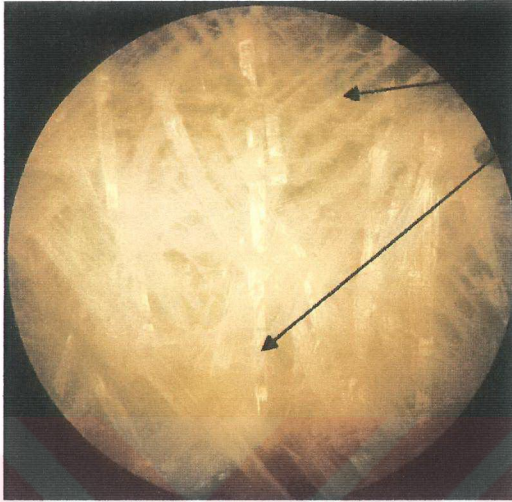
Şekil 6.72 Yorulması sonucu kırılan bölgenin yandan görüntüsü
(Numune grubu : H, Büyütme : 20X)

Katmanlar



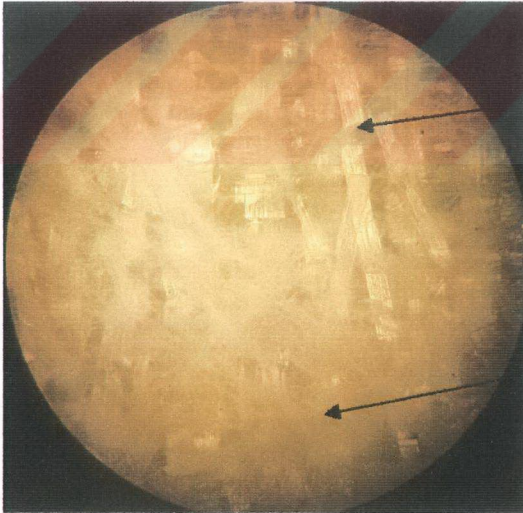
Tabaka ayrılması

Şekil 6.73 Yorulması sonucu kırılan bölgenin yandan görüntüsü
(Numune grubu : K, Büyütme : 20X)



±45° 'lik
Fiberlerin
Kırılması

Şekil 6.74 Kırılan bölgedeki ±45° fiberlerin üstten görüntüsü
(Numune grubu : A, Büyütme : 20X)



Fiber
Kırılması
(Boyuna fiberler)

0/90° 'lik
Fiberlerin
Kırılması

Şekil 6.75 Kırılan bölgedeki 0/90° fiberlerin üstten görüntüsü
(Numune grubu : E, Büyütme : 20X)

Yorulma sonucu kırılan bazı numunelerden (Şekil 6.61’de örnek olarak belirtilen bölgelerinden) optik mikroskop ile yukarıda verilen resimler elde edilmiştir. Bu numuneler ise, ortalama 1 milyon çevrim yaparak kırılan parçalardan seçilmiştir.

Şekil 6.62-6.75 arasındaki verilen mikro fotoğraflar NIKON SMZ 1500 marka optik mikroskopta 20X – 40X – 60X büyütmelemleri kullanılarak çekilmiştir.

Şekil 6.62 ve 6.63’de görülen boş lif yatakları, yorulma çatlağının başlangıcını temsil etmektedir. Ayrıca, numunenin en zayıf bölgesi olarak da düşünülebilir. Yorulma çatlağı, en zayıf bölgede olduğundan matris (polyester) ve fiberi (cam elyaf) birbirinden ayırıp, ilerlemekte ve fiberin kırılıncaya kadar devam etmektedir. Bir matrisin boş lif yatakları ve çıplak liflerin lif-matris ara yüzeyinde zayıflık işareti olduğu (çatlak başlangıcı) önemle dikkate alınması gereken bir noktadır [29]

Enine veya çapraz matris-lif ayrılması genellikle üst yüzeylerde başlamıştır (Şekil6.62-6.67). Çünkü tekrarlı eğilmeden dolayı (çeki-bası) en fazla rijitliğini ve elastikiyet kaybeden bölge üst ve alt yüzeylerdir. Dolayısıyla tekrarlı yük altında zamanla elastikiyet modülünde de azalma meydana gelecektir [30]. Uzunlamasına yönelmiş lif ve matris arasındaki ayrılma, çapraz matris çatlaklarındaki ayrılmaya benzerdir [30].

Fotoğraflardan anlaşıldığına göre, statik (çekme, eğilme) kırılma modları ile yorulma kırılması modları birbirine çok benzerdir. Her iki kırılma da, çatlak aynı şekilde oluşmakta ve ilerlemektedir.

6.8 SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

Eğilme yorulması testlerinde “sabit gerilmeli” yorulma tipi kullanılmıştır. Bütün yapıların yorulma sınırını tespit edebilmek için, deneysel veriler kullanılarak S-N diyagramları (Wöhler eğrileri) elde edilmiştir. Hasar kriteri ve yorulma ömür sınırı olarak, ortalama $N=10^6$ çevrime karşılık gelen eğilme gerilmesi alınmıştır. Yorulma ömürlerinin tahmini için, çizilen S-N diyagramlardan faydalanılarak Tablo 6.22’de görülen ampirik formüller türetilmiş ve malzeme sabitleri hesaplanmıştır. Kullanılan bu model ise literatürlerdeki modellere uygundur. Deney verilerinin istatistiksel değerlendirilmesi için iki parametrelili Weibull dağılımı kullanılmıştır. Weibull dağılımından elde edilen istatistiksel veriler oldukça tatmin edici görülmektedir. Eğilme yorulması deneylerinin yanı sıra, çekme ve üç noktadan eğilme testleri de gerçekleştirilmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Çekme Testi Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Fiber yönü 0/90° olan numunelerin fiber (lif) yoğunluğuna göre değerlendirilmesi ;

Bu değerlendirmede, 800 gr/m²’lik E grubu numuneler en yüksek çekme mukavemetine sahiptir. 500 gr/m² (F grubu), 300 gr/m² (G grubu) ve 200 gr/m² (H grubu) numunelerin çekme mukavemeti değerlerinin birbirine çok yakın olduğu görülmektedir. 800 gr/m²’lik E grubu numunelerin çekme mukavemeti, 0/90° fiber yönlü numunelerin içinde en düşük mukavemete sahip olan H grubunun (200 gr/m²) mukavemetinden yaklaşık %11.25 daha büyük değerdedir. Dolayısıyla bu değerlendirmeye göre E grubu numuneler en yüksek mukavemete (358.114 MPa), H grubu numuneler ise en düşük mukavemete (321.886 MPa) sahiptir (Tablo 6.10, Şekil 6.16-6.17)

Fiber yönü ±45° olan numunelerin fiber (lif) yoğunluğuna göre değerlendirilmesi ;

Bu değerlendirmede, 200 gr/m² D grubu numuneler en yüksek çekme mukavemetine (277.632 MPa) sahip olduğu görülmektedir. 800 gr/m²’lik A grubu numuneler ise en düşük (223.884 MPa) çekme mukavemetine sahiptir. Aralarındaki fark yaklaşık %24’dür. (Tablo 6.10, Şekil 6.16-6.17)

Genel değerlendirme;

Sonuçlara dikkat edildiğinde, öncelikle 0/90° lik cam-dokuma yönüne sahip numunelerin $\pm 45^\circ$ 'lik numunelere göre bariz olarak daha fazla çekme mukavemetine sahip olduğu görülmektedir (Şekil 6.16 - 6.17). Ancak, buradaki en ilgi çekici sonuç fiber yoğunlukları aynı olan (800 gr/m²) E ve A grubu numuneler arasındaki farktır. Aralarında yaklaşık %60 mukavemet farkı vardır. 0/90° ve $\pm 45^\circ$ 'lik numuneler arasındaki bu bariz mukavemet farklarının sebebi ise ; çekme testi esnasında $\pm 45^\circ$ 'lik fiber yönlü A, B, C ve D grubu numunelerin 45°'lik kayma düzlemleri üzerinde polyester alanının çok daha fazla olmasından ve statik denge denklemleri düşünülürse 45°'lik düzlemlerdeki cam fiberlerin 0/90°'lik fiberlere göre 1.9 kat daha fazla yük taşımasındandır. Dolayısıyla, 45°'lik kayma düzlemleri üzerinde, cam-fiber veya polyester hacmi farkı A ve E grupları arasında daha fazla olduğu için, bu gruplar arasındaki mukavemet farkı da diğerlerine göre daha fazladır. Bu durumda tasarımda 800 gr/m²'lik cam fiber kullanmak biraz riskli olacaktır. Çünkü anizotrop özelliği diğer fiber yoğunluklarına göre daha keskin ve baskındır. Gerçekten de çekme testleri sonucu kopan numuneler incelendiğinde, 45°'lik düzlemlerden ve en zayıf polyester ara yüzey bölgesinden kopmaların gerçekleştiği görülmüştür.

Bütün sonuçlara bakılırsa rasgele keçe (K grubu) numunelerin çekme mukavemeti değeri B grubu (500 gr/m² $\pm 45^\circ$) numunelerin mukavemetine çok yakındır (Şekil 6.16 - 6.17).

Genel değerlendirmede cam-fiber yoğunluğu daha az olan 200 gr/m²'lik numunelerde çekme mukavemetinin daha düşük olmasının sebebi ise, 200 gr/m²'lik cam dokuma fiberlerin reçine geçirgenliğinin diğer cam dokumalara göre daha düşük olmasıdır. Bunun yanında, aynı cam-fiber hacmini elde etmek için diğer cam dokumalardan daha fazla sayıda laminat (dokuma ve keçe) katı kullanılması da, reçine geçirgenliği daha da fazla düşürmüş ve ıslanmayı zorlaştırmıştır. Bu dezavantajı, gidermek için RTM esnasında çok sayıda enjeksiyon yapılmasına rağmen, yinede tam ıslanma probleminden dolayı olduğu söylenebilir. Ayrıca daha fazla enjeksiyon çevrimi ile artık polyester sarfiyatı daha fazla artmıştır. 800 gr/m²'lik numunelerin imalatında ise tam ıslanma için uygulanan enjeksiyon çevrimi 200 gr/m²'lik numunelere göre daha az olduğundan artık polyester sarfiyatı da azalmıştır. Uygulamada, ekonomi açısından bu durum son derece önemlidir. Ayrıca Tablo 6.6'ya bakılırsa aynı cam-fiber hacmini elde edebilmek için H grubunda 7 kat 200 gr/m²

cam-dokuma, 8 kat 225 gr/m² cam-keçe olmak üzere toplam 15 kat cam fiberler kullanılırken E grubu için 3 kat 800 gr/m² cam-dokuma 4 kat 225 gr/m² cam-keçe kullanılmıştır. Bu durum işçilik açısından son derece önemlidir.

Sonuç olarak, 800 gr/m²'lik ve 0/90° yönlü fiberler ile imal edilip çekme testleri yapılan numunelerin RTM yöntemiyle imalatındaki daha kolay işçiliği, artık polyester sarfiyatı açısından ekonomikliği ve en yüksek çekme mukavemeti düşünülürse, tasarımlarda tercih sebebi olabileceğini söyleyebiliriz.

Üç Noktadan Eğilme Testi Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Fiber yönü 0/90° olan numunelerin fiber (lif) yoğunluğuna göre değerlendirilmesi ;

Bu değerlendirmede, 500 gr/m² 'lik F grubu numuneler en yüksek eğilme mukavemetine sahiptir. 800 gr/m² (E grubu) ve 300 gr/m² (G grubu) numunelerin eğilme mukavemeti değerlerinin birbirine çok yakın olduğu görülmektedir. 200 gr/m² (H grubu) numunelerin ise en düşük eğilme mukavemetine sahiptir. 500 gr/m² 'lik F grubu numunelerin eğilme mukavemeti, 0/90° fiber yönlü numunelerin içinde en düşük eğilme mukavemete sahip olan H grubunun (200 gr/m²) mukavemetinden yaklaşık %20.44 daha büyük değerdedir.

Dolayısıyla bu değerlendirmeye göre F grubu numuneler en yüksek eğilme mukavemetine (375.20 MPa), H grubu numuneler ise en düşük mukavemete (311.50 MPa) sahiptir (Tablo 6.11, Şekil 6.21-6.22)

Fiber yönü ±45° olan numunelerin fiber (lif) yoğunluğuna göre değerlendirilmesi ;

Bu değerlendirmede, 300 gr/m² C grubu numuneler en yüksek eğilme mukavemetine (278.31 MPa) sahip olduğu görülmektedir. 800 gr/m² 'lik E grubu numuneler ise en düşük (203.12 MPa) eğilme mukavemetine sahiptir. Aralarındaki fark yaklaşık %37'dir. (Tablo 6.11, Şekil 6.21-6.22)

Genel değerlendirme;

Sonuçlara dikkat edildiğinde, çekme sonuçlarına benzer şekilde, 0/90°'lik cam-dokuma yönüne sahip numunelerin ±45°'lik numunelere göre daha yüksek eğilme mukavemetine sahip olduğu görülmektedir (Şekil 6.21 - 6.22). Ancak, yine çekme testine benzer olarak,

fiber yoğunlukları aynı olan (800 gr/m^2) E ve A grubu numuneler arasındaki fark. %74 'dür. F ve B grubu arasındaki fark ise %45.26'dır.

Bütün sonuçlara bakılırsa rasgele keçe (K grubu) numunelerin eğilme mukavemeti değeri H ve C grubu numunelerin mukavemeti arasında bir değerdir (Şekil 6.21 - 6.22).

Genel değerlendirme ve sonuç olarak, $0/90^\circ$ ve $\pm 45^\circ$ 'lik numuneler arasındaki bariz eğilme mukavemeti farkları, işçilik, ekonomiklik ve mukavemet açısından. yukarıda çekme test sonuçları için bahsedilen açıklamalar, üç noktadan eğilme testi sonuçları için de geçerlidir.

Çekme ve üç noktadan eğilme test sonuçları karşılaştırılırsa, numune özellikleri açısından bazı farklı eğilimler söz konusudur. Bu farklılık ise, kompozit numuneler için son derece normaldir. Hatta burada elde edilen sonuçlar literatürdeki değerlere göre son derece tatmin edici görülmektedir.

Çok Numuneli Yorulma Cihazının Değerlendirilmesi

Yorulma cihazın asıl özelliği, aynı zamanda 16 adet numuneyi test etmesi ve bütün deney verilerinin ve parametrelerinin bilgisayar ekranından izlenmesi ve kayıt edilebilmesidir. Gerçekten testler süresince bu açıdan hiçbir problemle karşılaşılmamıştır. Böylece, düşük frekansta çalışmasına rağmen tüm deney zamanları büyük oranda azaltılabilmıştır. Ayrıca deney verilerinin ve parametrelerin takibinde hata yapma olasılığı en aza indirilmiştir.

Testler sonucunda, özellikle plastik ve kompozit malzemelerin yorulma deneyi gibi düşük gerilme ve düşük frekans uygulanması gereken yorulma deneyleri için yeni cihazın kullanılabilirliği mümkündür.

Yorulma Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Statik çekme ve eğilme mukavemetinin artmasıyla yorulma mukavemetinin de arttığı görülmüştür (Şekil 6.39).

Uygulanan gerilme azaltıldıkça, tipik olarak bütün numune grupları için kırılma çevrimleri artmıştır.

Şekil 6.41-6.44 arasındaki S-N eğrilerine bakılacak olursa, çekme ve eğilme testlerinden elde edilen sonuçlara benzer şekilde, yorulma sonuçlarına göre de 0/90°'lik fiber yönlü numuneler ±45°'lik numunelere göre bariz olarak daha yüksek yorulma ömrüne sahiptir.

Şekil 6.56'ya bakılacak olursa bütün grup numunelerin kırılmama (ömrünü sürdürme) olasılıkları güvenilirlikleri görülebilir. Örneğin 100 MPa'lık bir gerilme altında A grubu numunenin kırılmadan ömrünü sürdürme olasılığı ve güvenirliliği A=%40.26 iken C=%46.81, D=%47.24, B=%50.21, H=%63.82, G=%64.97, E=%65.45 ve F=%70.09'dir

Bu değerler cam-fiber takviyeli kompozitlerin mekanik özelliklerinin fiber yönüne bağlı olarak çok değişkenlik gösterdiğini kanıtlamaktadır.

Şekil 6.39 ile Şekil 6.30 – 6.38 arasındaki S-N eğrilerine bakılacak olursa, E grubu numunelerin en yüksek, A grubu numunelerin ise en düşük eğilme yorulması mukavemetine sahip olduğu görülmektedir. K grubu olarak ifade edilen düzlemsel rasgele keçe numunelerin eğilme yorulması değerlerinin B ve C grubuna çok yakın değerde olduğu görülmektedir. Hatta, 0/90°'lik fiber yönlü numuneler ile ±45°'lik fiber yönlü numunelere ait yorulma değerlerinin tam arasında bir ömre sahip olduğunu Şekil 6.39'a bakarak söyleyebiliriz.

A grubu numuneler, hasar kriteri olarak alınan 10^6 çevrime maksimum eğilme gerilmesinin yaklaşık % 26.1'inde, B grubu numuneler %23.35'inde, C grubu numuneler %21.57'sinde, D grubu numuneler %20.22, E grubu numuneler %23.32, F grubu numuneler %20.6, G grubu numuneler %21.18, H grubu numuneler %22.68 ve K grubu numuneler %20.7'sinde ulaşmıştır. Bu değerlendirmeye göre özellikle A grubu, takiben B ve E grubu numuneler daha yüksek performans göstermektedir. Dolayısıyla 800 gr/m²'lik ve cam fiber yönü ±45° olan A grubu numuneler, diğer değerlendirme kriterlerinde olumsuz görünürken, max.yorulma ömrü / max. eğilme gerilmesi oranında daha yüksek bir performans göstermiştir. Bu ise dikkate değer bir sonuçtur.

Sonuç olarak ; en yüksek yorulma ömrü, 800 gr/m²'lik cam dokuma kullanılan 0/90° yönlü kompozitlerde tespit edilmiştir. Test sonuçlarının, cam dokuma fiberlerin alansal yoğunluğu, cam dokuma fiberlerin açısı, reçine geçirgenliği, RTM yöntemindeki parametrelerden ve tam ıslanıp ıslanmamasından etkilendiği görülmüştür. Bu deney sonuçlarının güvenilirliği Weibull dağılımı kullanılarak doğrulanmıştır (Şekil 6.47 – 6.56).

6.9 GENEL SONUÇLAR

- 1) Testler sonucunda, özellikle plastik ve kompozit malzemelerin yorulma deneyi gibi düşük gerilme ve düşük frekans uygulanması gereken yorulma deneyleri için yeni cihazın kullanılabilirliği mümkündür.
- 2) En yüksek çekme mukavemeti ; 800 gr/m²'lik cam dokumaya sahip 0/90° yönlü E grubu numunelerde tespit edilmiştir (Şekil 6.16).
- 3) En düşük çekme mukavemeti ; 800 gr/m²'lik cam dokumaya sahip ±45° yönlü A grubu numunelerde tespit edilmiştir (Şekil 6.16).
- 4) En yüksek eğilme mukavemeti ; 500 gr/m²'lik cam dokumaya sahip 0/90° yönlü F grubu numunelerde tespit edilmiştir (Şekil 6.21).
- 5) En düşük eğilme mukavemeti ; 800 gr/m²'lik cam dokumaya sahip ±45° yönlü A grubu numunelerde tespit edilmiştir (Şekil 6.21).
- 6) En yüksek yorulma mukavemeti ; 800 gr/m²'lik cam dokumaya sahip 0/90° yönlü E grubu ve 500 gr/m²'lik cam dokumaya sahip 0/90° yönlü F grubu numunelerde tespit edilmiştir (Şekil 6.39).
- 7) En düşük yorulma mukavemeti ; 800 gr/m²'lik cam dokumaya sahip ±45° yönlü A grubu numunelerde tespit edilmiştir (Şekil 6.39).
- 8) Rasgele dağılımlı cam keçe'den imal edilen K grubu numunelerin mekanik özellikleri ve yorulma ömrü, 0/90° ve ±45° yönlü diğer grup numunelerden elde edilen sonuçların tam ara değerinde olduğu görülmüştür (Şekil 6.16 - 6.21 - 6.39).
- 9) Yorulma ömrü, çekme ve üç noktadan eğilme test sonuçları karşılaştırılırsa, numune özellikleri açısından bazı farklı eğilimler söz konusudur (Şekil 6.16 - 6.21 - 6.39). Bu farklılık ise, kompozit numuneler için son derece normaldir. Hatta burada elde edilen sonuçlar literatürdeki değerlere göre son derece tatmin edici görülmektedir.

- 10) Tam ıslanma için, düşük yoğunluklu liflerde daha fazla enjeksiyon çevrimi yapılmıştır. Ancak bu durum, artık polyester sarfiyatı artmıştır.
- 11) 800 gr/m² ve 500 gr/m²'lik numunelerin imalatında ise tam ıslanma için enjeksiyon çevrimi 200 gr/m²'lik numunelere göre daha az olduğundan artık polyester sarfiyatı azalmıştır.
- 12) Aynı cam-fiber hacmi için H grubunda 7 kat 200 gr/m² cam-dokuma, 8 kat 225 gr/m² cam-keçe olmak üzere toplam 15 kat cam fiberler kullanılırken, E grubu için 3 kat 800 gr/m² cam-dokuma 4 kat 225 gr/m² cam-keçe kullanılmıştır. Bu durum işçilik açısından çok önemlidir.
- 13) 800 ve 500 gr/m²'lik ve 0/90° yönlü cam dokuma fiber ile imal edilip testleri yapılan E ve F grubu numunelerin, RTM yöntemiyle imalatında daha kolay işçiliği, artık polyester sarfiyatı açısından ekonomikliği ve en yüksek mukavemet değerlerine sahip oldukları düşünüldüğünde ; E ve F grubu numunelerin tasarımda tercih sebebi olabilecekleri söylenebilir.
- 14) Fiber yoğunlukları aynı, ancak yönleri farklı olan (800 gr/m²) E ve A grubu numuneler arasındaki mukavemet farkı %60'lara kadar çıkmaktadır. Bu durum ise, 800 gr/m² 'lik cam dokuma kullanılması ile elde edilen CTP'nin anizotrop özelliği (mekanik özelliklerin yöne bağımlılığı) diğer cam dokuma yoğunluklarına göre çok daha baskın ve keskin olduğunu göstermektedir.
- 15) En yüksek mukavemet değerleri 800 gr/m²'lik cam dokumaya sahip E grubu numunelerden elde edilmesine rağmen, anizotrop özelliği diğer fiber yoğunluklarına göre çok daha baskın olduğundan tasarımda 800 gr/m²'lik cam dokuma fiber kullanmak riskli olabilir. Zira, en düşük mukavemet değerleri de aynı yoğunluktaki (800 gr/m²) cam dokumaya sahip ±45° yönlü A grubu numunelerde elde edilmiştir. Bu açıdan, tasarımda 500 gr/m²'lik cam dokuma kullanmak daha uygun olacaktır.
- 16) Yorulma testleri sonucu elde edilen veriler ve yorulma ömrü için güvenilirlik değerleri Weibull istatistiksel dağılımı ile gerçekleştirilmiştir. Yorulma ömrü açısından kullanılan güvenilirlik dağılımı tasarım aşamasında son derece faydalı olabilir.
- 17) Genel olarak bütün test sonuçları aşağıdaki faktörlerden etkilenmiştir ;
 - a) Cam dokuma fiberlerin alansal yoğunluğundan
 - b) Cam dokuma fiberlerin yönünden,
 - c) Cam dokuma fiberlerin reçine geçirgenliğinden
 - d) RTM yöntemindeki parametrelerden ve
 - e) Cam dokuma fiberlerin tam ıslanıp ıslanmamasından

EK – A

Weibull parametreleri ve güvenilirlik değerleri

Tablo A.1 A Numuneleri için Weibull Parametreleri						
Çevrim	Gerilme	Sıra	P	1/(1-P)	ln(ln(1/(1-P)))	Ln(Gerilme)
1.108.771	50,257	1	0,083333	1,090909	-2,441716	3,917150
790.840	55,751	2	0,202381	1,253731	-1,486671	4,020895
282.538	61,954	3	0,321429	1,473684	-0,947354	4,126392
70.341	68,895	4	0,440476	1,787234	-0,543574	4,232584
25.061	76,264	5	0,559524	2,270270	-0,198574	4,334201
4.748	85,336	6	0,678571	3,111111	0,126615	4,446596
922	106,728	7	0,797619	4,941176	0,468505	4,670284
1	203,120	8	0,916667	12,000000	0,910235	5,313798

Tablo A.2 B Numuneleri için Weibull Parametreleri						
Çevrim	Gerilme	Sıra	P	1/(1-P)	ln(ln(1/(1-P)))	Ln(Gerilme)
1.425.945	57,922	1	0,083333	1,090909	-2,441716	4,059097
797.578	61,550	2	0,202381	1,253731	-1,486671	4,119850
497.918	68,653	3	0,321429	1,473684	-0,947354	4,229065
257.142	76,105	4	0,440476	1,787234	-0,543574	4,332114
56.447	84,403	5	0,559524	2,270270	-0,198574	4,435603
8.082	93,788	6	0,678571	3,111111	0,126615	4,541037
907	116,764	7	0,797619	4,941176	0,468505	4,760155
1	258,288	8	0,916667	12,000000	0,910235	5,554075

Tablo A.3 C Numuneleri için Weibull Parametreleri						
Çevrim	Gerilme	Sıra	P	1/(1-P)	ln(ln(1/(1-P)))	Ln(Gerilme)
1.170.541	61,221	1	0,074468	1,080460	-2,558941	4,114490
974.745	63,378	2	0,180851	1,220779	-1,611994	4,149117
309.238	68,028	3	0,287234	1,402985	-1,082929	4,219919
153.385	75,485	4	0,393617	1,649123	-0,692660	4,323934
41.748	84,152	5	0,500000	2,000000	-0,366513	4,432625
20.819	93,235	6	0,606383	2,540541	-0,070018	4,535123
6.306	103,769	7	0,712766	3,481481	0,221108	4,642167
1.515	128,039	8	0,819149	5,529412	0,536541	4,852335
1	278,313	9	0,925532	13,428571	0,954505	5,628746

Tablo A.4 D Numuneleri için Weibull Parametreleri						
Çevrim	Gerilme	Sıra	P	1/(1-P)	ln(ln(1/(1-P)))	Ln(Gerilme)
2.515.862	51,662	1	0,067308	1,072165	-2,663843	3,944723
1.438.684	53,070	2	0,163462	1,195402	-1,723263	3,971612
781.781	57,411	3	0,259615	1,350649	-1,202023	4,050236
449.883	63,757	4	0,355769	1,552239	-0,821667	4,155079
162.954	70,792	5	0,451923	1,824561	-0,508595	4,259746
34.067	78,800	6	0,548077	2,212766	-0,230365	4,366913
12.643	87,219	7	0,644231	2,810811	0,032925	4,468422
4.569	97,072	8	0,740385	3,851852	0,299033	4,575453
1.351	111,502	9	0,836538	6,117647	0,593977	4,714043
1	265,468	10	0,932692	14,857143	0,992689	5,581496

Tablo A.5 E Numuneleri için Weibull Parametreleri

Çevrim	Gerilme	Sıra	P	1/(1-P)	ln(ln(1/(1-P)))	Ln(Gerilme)
1.158.121	84,250	1	0,074468	1,080460	-2,558941	4,433789
1.097.184	86,640	2	0,180851	1,220779	-1,611994	4,461762
861.131	88,734	3	0,287234	1,402985	-1,082929	4,485643
528.518	91,170	4	0,393617	1,649123	-0,692660	4,512726
386.507	96,166	5	0,500000	2,000000	-0,366513	4,566076
51.298	106,908	6	0,606383	2,540541	-0,070018	4,671969
6.063	129,452	7	0,712766	3,481481	0,221108	4,863310
2.149	163,271	8	0,819149	5,529412	0,536541	5,095411
1	353,540	9	0,925532	13,428571	0,954505	5,867997

Tablo A.6 F Numuneleri için Weibull Parametreleri

Çevrim	Gerilme	Sıra	P	1/(1-P)	ln(ln(1/(1-P)))	Ln(Gerilme)
1.061.397	73,201	1	0,083333	1,090909	-2,441716	4,293209
755.135	81,316	2	0,202381	1,253731	-1,486671	4,398343
322.324	90,322	3	0,321429	1,473684	-0,947354	4,503381
246.047	100,138	4	0,440476	1,787234	-0,543574	4,606549
41.710	111,613	5	0,559524	2,270270	-0,198574	4,715038
9.731	123,852	6	0,678571	3,111111	0,126615	4,819087
3.344	151,934	7	0,797619	4,941176	0,468505	5,023446
1	375,200	8	0,916667	12,000000	0,910235	5,927458

Tablo A.7 G Numuneleri için Weibull Parametreleri

Çevrim	Gerilme	Sıra	P	1/(1-P)	ln(ln(1/(1-P)))	Ln(Gerilme)
1.185.603	73,941	1	0,083333	1,090909	-2,441716	4,303267
478.357	77,882	2	0,202381	1,253731	-1,486671	4,355195
252.853	86,771	3	0,321429	1,473684	-0,947354	4,463272
142.684	96,241	4	0,440476	1,787234	-0,543574	4,566855
39.375	107,214	5	0,559524	2,270270	-0,198574	4,674827
14.881	119,308	6	0,678571	3,111111	0,126615	4,781708
1.874	147,771	7	0,797619	4,941176	0,468505	4,995664
1	348,198	8	0,916667	12,000000	0,910235	5,852772

Tablo A.8 H Numuneleri için Weibull Parametreleri

Çevrim	Gerilme	Sıra	P	1/(1-P)	ln(ln(1/(1-P)))	Ln(Gerilme)
1.621.458	64,270	1	0,074468	1,080460	-2,558941	4,163093
780.379	69,377	2	0,180851	1,220779	-1,611994	4,239555
371.418	76,938	3	0,287234	1,402985	-1,082929	4,343000
183.253	85,619	4	0,393617	1,649123	-0,692660	4,449907
69.956	95,132	5	0,500000	2,000000	-0,366513	4,555265
42.286	105,754	6	0,606383	2,540541	-0,070018	4,661116
5.867	117,274	7	0,712766	3,481481	0,221108	4,764513
1.798	145,837	8	0,819149	5,529412	0,536541	4,982490
1	311,504	9	0,925532	13,428571	0,954505	5,741412

Tablo A.9 K Numuneleri için Weibull Parametreleri

Çevrim	Gerilme	Sıra	P	1/(1-P)	ln(ln(1/(1-P)))	Ln(Gerilme)
1.268.883	63,180	1	0,074468	1,080460	-2,558941	4,145988
638.568	65,444	2	0,180851	1,220779	-1,611994	4,181195
252.401	69,876	3	0,287234	1,402985	-1,082929	4,246722
163.999	77,815	4	0,393617	1,649123	-0,692660	4,354334
39.485	86,636	5	0,500000	2,000000	-0,366513	4,461715
9.909	96,161	6	0,606383	2,540541	-0,070018	4,566024
4.597	106,853	7	0,712766	3,481481	0,221108	4,671454
1.077	131,715	8	0,819149	5,529412	0,536541	4,880640
1	295,533	9	0,925532	13,428571	0,954505	5,688779

Tablo A.10 A Grubu için Güvenirlik Değerleri ve Alfa, Beta				
Gerilme	İşe Yaramama	Güvenirlik	Güvenirlik	Gerilme
0	0,000	1,000	0,010	206,460
25	0,048	0,952	0,100	149,666
50	0,195	0,805	0,500	85,731
75	0,405	0,595	0,900	35,762
100	0,619	0,381	0,990	12,017
125	0,790	0,210	0,368	101,628
150	0,901	0,099		
175	0,960	0,040	ALFA	BETA
200	0,986	0,014	101,628	2,155
225	0,996	0,004		
101,628	0,632	0,368		

Tablo A.11 B Grubu için Güvenirlik Değerleri ve Alfa, Beta				
Gerilme	İşe Yaramama	Güvenirlik	Güvenirlik	Gerilme
0	0,000	1,000	0,010	263,004
25	0,050	0,950	0,100	182,986
50	0,176	0,824	0,500	97,621
75	0,342	0,658	0,900	36,422
100	0,516	0,484	0,990	10,648
125	0,671	0,329	0,368	118,263
150	0,793	0,207		
175	0,879	0,121	ALFA	BETA
200	0,935	0,065	118,263	1,911
225	0,967	0,033		
250	0,985	0,015		
118,263	0,632	0,368		

Tablo A.12 C Grubu için Güvenirlik Değerleri ve Alfa, Beta				
Gerilme	İşe Yaramama	Güvenirlik	Güvenirlik	Gerilme
0	0,000	1,000	0,010	267,238
25	0,043	0,957	0,100	187,640
50	0,158	0,842	0,500	101,703
75	0,317	0,683	0,900	38,900
100	0,489	0,511	0,990	11,731
125	0,646	0,354	0,368	122,614
150	0,773	0,227		
175	0,866	0,134	ALFA	BETA
200	0,926	0,074	122,614	1,960
225	0,963	0,037		
250	0,982	0,018		
275	0,992	0,008		
122,614	0,632	0,368		

Tablo A.13 D Grubu için Güvenirlik Değerleri ve Alfa, Beta				
Gerilme	İşe Yaramama	Güvenirlik	Güvenirlik	Gerilme
0	0,000	1,000	0,010	236,864
25	0,057	0,943	0,100	165,598
50	0,203	0,797	0,500	89,089
75	0,391	0,609	0,900	33,679
100	0,580	0,420	0,990	10,009
125	0,737	0,263	0,368	107,651
150	0,851	0,149		
175	0,923	0,077	ALFA	BETA
200	0,964	0,036	107,651	1,937
225	0,985	0,015		
250	0,994	0,006		
107,651	0,632	0,368		

Tablo A.14 E Grubu için Güvenirlik Değerleri ve Alfa, Beta				
Gerilme	İşe Yaramama	Güvenirlik	Güvenirlik	Gerilme
0	0,000	1,000	0,010	358,865
25	0,033	0,967	0,100	246,413
50	0,115	0,885	0,500	128,494
75	0,227	0,773	0,900	46,254
100	0,354	0,646	0,990	12,932
125	0,483	0,517	0,368	156,752
150	0,602	0,398		
175	0,706	0,294	ALFA	BETA
200	0,791	0,209	156,752	1,844
225	0,857	0,143		
250	0,906	0,094		
275	0,940	0,060		
300	0,963	0,037		
325	0,978	0,022		
350	0,988	0,012		
156,752	0,632	0,368		

Tablo A.15 F Grubu için Güvenirlik Değerleri ve Alfa, Beta				
Gerilme	İşe Yaramama	Güvenirlik	Güvenirlik	Gerilme
0	0,000	1,000	0,010	379,368
25	0,037	0,963	0,100	246,413
50	0,120	0,880	0,500	128,494
75	0,230	0,770	0,900	46,254
100	0,352	0,648	0,990	12,932
125	0,475	0,525	0,368	156,752
150	0,590	0,410		
175	0,690	0,310	ALFA	BETA
200	0,773	0,227	160,149	1,771
225	0,839	0,161		
250	0,889	0,111		
275	0,926	0,074		
300	0,952	0,048		
325	0,970	0,030		
350	0,982	0,018		
375	0,989	0,011		
160,149	0,632	0,368		

Tablo A.16 G Grubu için Güvenirlik Değerleri ve Alfa, Beta				
Gerilme	İşe Yaramama	Güvenirlik	Güvenirlik	Gerilme
0	0,000	1,000	0,010	355,694
25	0,037	0,963	0,100	242,766
50	0,123	0,877	0,500	125,275
75	0,239	0,761	0,900	44,361
100	0,369	0,631	0,990	12,152
125	0,499	0,501	0,368	153,313
150	0,618	0,382		
175	0,720	0,280	ALFA	BETA
200	0,802	0,198	153,313	1,815
225	0,865	0,135		
250	0,912	0,088		
275	0,944	0,056		
300	0,966	0,034		
325	0,980	0,020		
350	0,989	0,011		
153,313	0,632	0,368		

Tablo A.17 H Grubu için Güvenirlik Değerleri ve Alfa, Beta				
Gerilme	İşe Yaramama	Güvenirlik	Güvenirlik	Gerilme
0	0,000	1,000	0,010	296,058
25	0,034	0,966	0,100	208,504
50	0,128	0,872	0,500	113,604
75	0,263	0,737	0,900	43,810
100	0,416	0,584	0,990	13,347
125	0,567	0,433	0,368	136,743
150	0,699	0,301		
175	0,804	0,196	ALFA	BETA
200	0,880	0,120	136,743	1,977
225	0,931	0,069		
250	0,963	0,037		
275	0,981	0,019		
300	0,991	0,009		
136,743	0,632	0,368		

Tablo A.18 K Grubu için Güvenirlik Değerleri ve Alfa, Beta				
Gerilme	İşe Yaramama	Güvenirlik	Güvenirlik	Gerilme
0	0,000	1,000	0,010	283,397
25	0,043	0,957	0,100	197,271
50	0,153	0,847	0,500	105,332
75	0,304	0,696	0,900	39,351
100	0,466	0,534	0,990	11,524
125	0,618	0,382	0,368	127,571
150	0,744	0,256		
175	0,840	0,160	ALFA	BETA
200	0,906	0,094	127,571	1,913
225	0,948	0,052		
250	0,973	0,027		
275	0,987	0,013		
300	0,994	0,006		
127,57134	0,632	0,368		

KAYNAKLAR

- [1] Tomita, Y., Morioka, K., Iwasa, M., "Bending fatigue of long carbon fiber-reinforced epoxy composites", *Materials Science and Engineering A*, Cilt 319-321, December 2001, Sayfa 679-682
- [2] Abd Allah, M.H., Abdin, Enayat M., Selmy, A.I., Khashaba, U., "Short communication effect of mean stress on fatigue behaviour of GFRP pultruded rod composites", *COMPOSITES - Part A: Applied Science and Manufacturing*, Cilt.28, No.1, 1997, Sayfa 87-91
- [3] Khashaba, U.A.. "Fatigue and Reliability Analysis of Unidirectional GFRP Composites Under Rotating Bending Loads", *Journal of Composite Materials*, Cilt. 37, No. 4, 2003, Sayfa 317-331
- [4] Van Paepegem, W., Degrieck, J., "Experimental set-up for and numerical modelling of bending fatigue experiments on plain woven glass/epoxy composites", *Composite Structures*, Cilt 51, No.1, January 2001, Sayfa 1-8
- [5] Caprino, G., Giorleo, G., "Fatigue lifetime of glass fabric/epoxy composites", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Cilt 30, No. 3, March 1999, Sayfa 299-304
- [6] 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* Cilt. 48, No. 3, 1999, Sayfa 297-300
- [7] Philippidis, T. P., Vassilopoulos A. P., "Fatigue of composite laminates under off-axis loading", *International Journal of Fatigue*, Cilt 21, No. 3, March 1999, Sayfa 253-262
- [8] <http://International - Fibre Reinforced Composites.htm>, 2001
- [9] Cam Elyaf Sanayii A.Ş., "CTP Teknolojisi – Cam Elyafı Takviyeli Reçine Sistemleri", Cam Elyaf Sanayii A.Ş., İstanbul, Kasım 1984
- [10] Sakin, R., "Düzlemsel Rasgele Dağılımlı Keçe Elyafı Takviyeli Kompozit Malzemede Kırılma Tokluğunun Elyaf Hacmi, Elyaf Yönlenmesi ve Deformasyon Hızı ile Değişiminin Saptanması", Yüksek Lisans Tezi, BAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir, 1994
- [11] Cam Elyaf Sanayii A.Ş., "Kompozit Malzeme Üretim Yöntemleri", Cam Elyaf Sanayii A.Ş., Kocaeli, 1997
- [12] Ateş E., "Epoksi Polimer Betonun Makine Yapım Malzemesi Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması", Doktora Tezi, BAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir, 1994
- [13] Cam Elyaf Sanayii A.Ş., "İki Yüzü Düzgün Ürün : RTM", Cam Elyaf Sanayii A.Ş., Bülten, Gebze, Kocaeli, Ocak 1997
- [14] Sözer, M., "Simülasyonlarla Destekli Resin Transfer Kalıplama Metoduyla Kompozit Malzeme Üretim Kontrolü", Tübitak-Misag Projesi, Proje No :192, 2003

- [15] Akkurt, M., "Makine Konstrüksiyonunda Güvenirliğin Esasları", Makine Müh. Odası Yayını, No.106, İstanbul, 1977
- [16] Kayalı, E.S., Ensari, C., Dikeç, F., "Metalik Malzemelerin Mekanik Deneyleri", İ.T.Ü. yayınları, 1978
- [17] Fatigue of Composites, www.aero.iitb.ac.in:8081/~awarman/composite_course/Chapter18.pdf
- [18] Stratton, A.L., Pelegri, A.A. "Investigation of interlayer and intralayer delaminations", Rutgers University, Piscataway, NJ, 1999
- [19] Rowler, P.N., "Dynamics and Fatigue", AMSET Wind Energy Training Course, De Montfort University, GB, 1996
- [20] <http://ABB.Flakt/Article/ABB.htm>, "Axial fan blades made of composite material", 1997
- [21] Dorner, William W., "Using Microsoft Excel for Weibull Analysis", www.qualitydigest.com/jan99/html/weibull.html
- [22] Barringer & Associates, Inc. "Can Reliability Software Solve Other Statistical Problems?", <http://www.barringer1.com/jun04prb.htm>, 2004
- [23] Özkara, Y., Dondurmacı, G.A., "Herkes için Microsoft Excel 2000", Türkçe Sürüm, Alfa Yayınları, İstanbul, 2000
- [24] Cam Elyaf Sanayii A.Ş. "Reçine ve Elyaf Katalogu", Cam Elyaf Sanayii A.Ş., Kocaeli, 1997
- [25] Poliya Polyester ve Jelkot Seçim Kılavuzu "Poliya Polyester and Gelcoat Selection Guide", İstanbul 2003
- [26] Mallick, P.K., "Composites Engineering Handbook", [ISBN: 0-8247-9304-8], Marcel Dekker (published by), 1997.
- [27] Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials, ASTM D3039/D3039M-95a, October 1995
- [28] Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials, ASTM D790-00, January 2001
- [29] Degallaix, G., Hassaini, D., Vittecoq, "Cyclic shearing behavior of a unidirectional glass/epoxy composite", *International Journal of Fatigue*, Cilt 24, No. 2-4, 2002, Sayfa 319-326
- [30] Liao, K., Schultheisz, C.R., Hunston, D.L., "Long-term environmental fatigue of pultruded glass-fiber-reinforced composites under flexural fatigue", *International Journal of Fatigue*, Cilt 21, No.5, 1999, Sayfa 485-495