

T.C.
UŞAK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**CAM ELYAF TAKVİYELİ POLİMER MATRİSLİ KOMPOZİT
MALZEMELERDE SÜRÜNME DAVRANIŞININ İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Gülşah DOĞU

TEMMUZ 2019
UŞAK

T.C.
UŞAK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**CAM ELYAF TAKVİYELİ POLİMER MATRİSLİ KOMPOZİT
MALZEMELERDE SÜRÜNME DAVRANIŞININ İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Gülşah DOĞU

UŞAK 2019

Gülşah DOĞU tarafından hazırlanan Cam Elyaf Takviyeli Polimer Matrisli Kompozit Malzemelerde Sürünme Davranışının İncelenmesi adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Osman ASİ
Tez Danışmanı, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Osman ASİ
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Uşak Üniversitesi

Prof. Dr. Hasan Çallıoğlu
Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Pamukkale Üniversitesi

Doç. Dr. Abdullah Yıldız
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Uşak Üniversitesi

Tarih: 01.07.2019

Bu tez ile U.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Doç. Murat Kemal KARACAN
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Gülşah DOĞU



CAM ELYAF TAKVİYELİ POLİMER MATRİSLİ KOMPOZİT MALZEMELERDE SÜRÜNME DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Gülşah DOĞU

**UŞAK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

Temmuz 2019

ÖZET

Teknolojik gelişmelere paralel olarak ürün yaşam sürelerinin kısalmasıyla Ar-Ge ve Ür-Ge faaliyetleri önem kazanmış, yeni ürün geliştirme, ürünlerin özelleştirilebilmesi, hızlı model değişimi gibi konular ön plana çıkmıştır. Çevik üretim yöntemlerinin ön plana çıkmasıyla birlikte günümüz piyasa koşullarında firmaların ürünlerini hem kaliteli hem hızlı aynı zamanda optimum maliyet ile üretmek gibi zorlu hedefleri vardır. Firmaların kar edebilmesi için ürün maliyetleri en önemli unsurlardan biridir. Ürün maliyetine etki eden faktörlerden biri de en az üretim süreci kadar önemli olan malzeme seçimidir. Ürünün kullanım alanına göre en uygun malzemenin seçilmesi kritik önem arz etmektedir. Doğru malzeme seçimi, üretim sürecindeki birçok maliyet unsurunu devre dışı bırakabilir. Gelişen teknoloji ile birlikte uzay, havacılık, savunma sanayii ve ulaşım sektörlerindeki kullanımı giderek yaygınlaşan polimer matrisli kompozit malzemelerin kullanıldığı ürünler için üretim maliyetlerini düşürmek, daha az maliyetle daha kaliteli malzemeler üretmek, yeniden işleme maliyetlerini minimize etmek daha önemli hale gelmiştir. Bu anlamda üretilen kompozit malzemelerin sıcaklık, basınç, yük, gerilme, zaman vb. faktörlerin etkisindeyken nasıl bir davranış sergileyeceğinin önceden bilinmesi, meydana gelecek hasarların önceden tahmin ve tespit edilmesine olanak sağlayacaktır. Kompozit malzemelerin sıcaklıktan ve maruz kaldığı gerilmelerden kaynaklanan sürünme hasarının önlenmesi büyük önem arz etmektedir. Bu nedenle yüksek sıcaklık ve gerilme altında çalışacak olan ürünlerde kullanılan malzemeleri yüksek sürünme davranışına sahip olması

gerekmektedir. Bu çalışmada 20°C, 30°C, 40°C ve 50°C olmak üzere 4 farklı sıcaklık değerinde 2 kg, 4 kg ve 6 kg olmak üzere 3 farklı yükleme altında 4 farklı kumaş yoğunluğuna sahip (200 gr/m², 300 gr/m², 500 gr/m², 800 gr/m²) elyaf takviyeli polimer matrisli kompozit malzemenin davranışı incelenmiştir. Çekme ve eğme deneyleri sayesinde mekanik özellikleri belirlenen kompozit malzemeler belirtilen yük ve sıcaklıklarda sürünme deneyine tabi tutulmuşlardır.

Bilim Kodu: 625.02.05

Anahtar Kelimeler: Kompozit malzeme, cam elyafı, epoksi reçine, sürünme deneyi, mekanik özellikler

Sayfa Adedi: 57

Tez Yöneticisi : Prof. Dr. Osman Asi

**THE INVESTIGATION OF CREEP BEHAVIOUR OF GLASS FIBER
REINFORCED POLYMER MATRIX COMPOSITES**

(M.Sc. Thesis)

Gülşah DOĞU

UNIVERSITY OF USAK

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

July 2019

ABSTRACT

In parallel with the technological developments, R & D and P & D activities gained importance with the shortening of product life span, and new product development, product customization and rapid model change came to the fore. With the agile production methods come to the forefront, in today's market conditions, companies have challenging targets such as producing their products with high quality and fast at the same time with optimum cost. Product cost is one of the most important factors for companies to make profit. One of the factors that affect the cost of the product is the material selection which is just as important as the production process. Choosing the most suitable material according to the usage area of the product is critical. Choosing the right material can eliminate many cost elements in the production process. With the developing technology, it has become more important to reduce the production costs, to produce higher quality materials with less cost and to minimize the reprocessing costs for products using polymer matrix composite materials which are becoming more widely used in the aerospace, defense industry and transportation sectors. In this sense knowing how the composite materials will behave under the influence of factors such as temperature, pressure, load, stress, time will allow for the prediction and determination of the damages that will occur. Prevention of creep damage caused by temperature and stresses of composite materials is of great importance. Therefore, the materials used in products that will work under high temperature and stress should have high creep behavior. In this study, fiber reinforced polymer matrix composite material that have 4 different fabric density (200 g / m^2 , $300 \text{ g /$

m², 500 gr / m², 800 gr / m²) was investigated in 4 different temperature values (20°C, 30°C, 40°C, 50°C) and under 3 different loading (2 kg, 4 kg, 6 kg). Composite materials whose mechanical properties were determined by tensile and bending tests were subjected to creep test at specified loads and temperatures.

Science Code: 625.02.05

Key Words: Composite materials, glass fiber, epoxy resin, creep test, mechanical properties

Page Number: 57

Adviser: Prof. Dr. Osman Asi



TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimin boyunca bilgi birikimi ve tecrübesini esirgmeden beni her konuda daima yönlendiren, destekleyen ve çalışmamın sonuca ulaşmasını sağlayan danışman hocam Sayın Prof. Dr. Osman ASİ' ye teşekkürlerimi sunarım.

Bugüne kadar her anımda yanımda olan, varlıkları bana güç veren, beni her konuda daima destekleyen anneme, babama, kardeşime ve eşime en içten minnet duygularımı ve teşekkürü borç bilirim.

Gülşah DOĞU

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER	vi
ÇİZELGELERİN LİSTESİ	viii
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	ix
RESİMLERİN LİSTESİ	x
SİMGELER VE KISALTMALAR	xi
1 GİRİŞ	1
2 LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	3
3 KOMPOZİT MALZEMELER	15
3.1 Kompozit Malzeme Tanımı ve Çeşitleri	15
3.2 Kompozit Malzemelerin Genel Özellikleri, Avantaj ve Dezavantajlar	16
3.3 Polimer Matrisli Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri	18
3.4 Polimer Matrisli Kompozitlerin El Yatırma Yöntemi ile Üretimi	18
4 SÜRÜNME	20
4.1 Sürünmenin Tanımı ve Önemi	20
4.2 Sürünme Deneyi	22
5 MATERYAL VE METOD	24
5.1 Cam Elyaf Takviyeli Polimer Matrisli Kompozit Tabakaların Üretim Aşamaları	24
5.2 Deneysel Çalışmalar	26
5.2.1 Kalsinasyon deneyleri	26
5.2.2 Çekme deneyi	28
5.2.3 Eğme deneyi	33
6 SÜRÜNME DENEYİ	40
6.1 Deney Standardı	40
6.2 Sürünme Deney Cihazı	40
6.3 Deney Numuneleri	41
6.4 Sürünme Deney Programı	43

6.5	Sürünme Deney Sonuçları	45
7	SONUÇLAR.....	53
	KAYNAKLAR.....	54
	ÖZGEÇMİŞ.....	57



ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 5.1. Reçine ve sertleştirici malzemenin özellikleri.....	25
Çizelge 5.2. Numunelerin elyaf ağırlık oranları (%).....	27
Çizelge 5.3. Çekme deneyi sonucunda elde edilen ortalama çekme dayanımı değerleri.....	31
Çizelge 5.4. Üç nokta eğme deneyi sonucunda elde edilen ortalama eğme dayanımı değerleri.....	36
Çizelge 5.5. Kalsinasyon, çekme ve eğme deney sonuçları.....	39
Çizelge 6.1. Deney programı.....	44



ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 3.1: El yatırma yöntemi.....	19
Şekil 4.1 Sürünme eğrisi.....	21
Şekil 4.2 Sürünme test cihazının çalışma prensibinin şematik görünümü.....	23
Şekil 5.1. Çekme deneyi numunesi ölçüleri.....	29
Şekil 5.2. Çekme deneyi sonucunda elde edilen numunelere ait gerilme-şekil değiştirme diyagramları.....	33
Şekil 5.3. Eğme deney numunesinin ölçüleri.....	34
Şekil 5.4. Üç nokta eğme deneyinin şematik gösterimi.....	35
Şekil 5.5. Üç nokta eğme deneyi sonucunda elde edilen numunelere ait gerilme-şekil değiştirme diyagramları.....	38
Şekil 6.1. Sürünme numunesinin teknik resmi.....	41
Şekil 6.2. Deney numunelerinin kodlama mantığının gösterimi.....	43
Şekil 6.3. Sürünme deneyi sonucunda elde edilen numunelere ait sürünme sabiti (ϵ) – zaman diyagramları.....	51

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 5.1. Üretimde kullanılan cam elyaf takviyeli dokuma kumaşlar.....	24
Resim 5.2. Piton serisi KP2 pres cihazı.....	25
Resim 5.3. Hassas terazide yapılan ölçümlerden biri.....	26
Resim 5.4. Kalsinasyon deney cihazı.....	27
Resim 5.5. Numunelerin kül fırınından çıktıktan sonraki görüntüleri.....	28
Resim 5.6. Çekme deney numunesi örneği.....	29
Resim 5.7. Çekme deneyi cihazı.....	30
Resim 5.8. Deneyin yapılışı esnasında çekilen görüntü.....	30
Resim 5.9. Çekme deneyi sonrasında numunenin görüntüsü.....	30
Resim 5.10. Eğme deney numunesi örneği.....	35
Resim 5.11. Eğme deney cihazı.....	35
Resim 5.12. Numunenin eğme deneyi öncesi ve sonrasındaki görüntüsü.....	35
Resim 6.1. Sürünme deney cihazı görseli.....	40
Resim 6.2. Deney numunelerinin CNC tezgâhında kesilmesi.....	41
Resim 6.3. Tabakaların CNC kesim işleminden sonraki görüntüsü.....	42
Resim 6.4. Yoğunluklarına göre örnek birer numune görseli.....	42
Resim 6.5. 800 gr/m ² elyaf kumaş yoğunluğuna sahip numuneler.....	43

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
g/m²	Gram/metrekare
°C	Santigrat derece
MPa	Mega paskal
K	Kelvin
Mm	Milimetre
Sn	Saniye
mW / cm²	Megawatt/ santimetrekare
GPa	Giga paskal
t	Zaman
ε	İzin verilebilecek birim şekil değiştirme değeri
ε_s	Sürünme hızı
σ	Gerilme
E	Elastisite modülü
M_e	Eğme momenti
F	Uygulanan kuvvet
L_s	Mesnet merkezleri arasındaki uzaklık
σ_e	Eğme Dayanımı
M	Eğme Momenti
y	Numunenin en dış yüzeyinden uzaklık
I	Nötr eksene göre eylemsizlik momenti
h	Numune kalınlığı / yüksekliği
w	Numune genişliği
Kısaltmalar	Açıklama
CO₂	Karbondioksit
ASTM	American Society for Testing and Materials

Kısaltmalar	Açıklama
TSE	Türk Standartları Enstitüsü
SEM	Taramalı elektron mikroskobu
Al₂O₃	Alümina
DMA	Dinamik mekanik analizör
CFRP	Carbon fiber reinforced polymer
GFRP	Glass fiber reinforced polymer
LCD	Linear cumulative damage law
LFT	Long fiber reinforced thermoplastic
TTSSP	Time Temperature Stress Superposition Principle
TTSP	Time Temperature Superposition Principle
MWS	Maximum Work Stress Criteria
UTS	Ultimate Tensile Strength
DSC	Diferansiyel taramalı kalorimetre
NY66	Naylon
PP	Polipropilen
PPE	Propilen-ko-etilen
PJF	Pulverized jute fillers

1 GİRİŞ

Günümüz piyasa koşullarında iç ve dış pazarda rekabet gücü yüksek olan firmalar ayakta kalabilmektedir. Firmaların iç ve dış pazardaki rekabet gücünü etkileyen maliyet, esneklik, kalite ve standartlara uyum, güvenilirlik, prestij gibi bir çok etmen söz konusudur. Değişen koşullara adapte olabilmek için firmalar geleneksel üretim yöntemlerinden ziyade piyasa koşullarındaki belirsizliklerle rekabet edebilen çevik üretim sistemlerini benimsemeye başlamışlardır. Teknolojideki hızlı gelişmeler, hızlı tüketim, değişen müşteri beklentileri üretim sistemlerindeki bu değişimi neredeyse zorunlu kılmıştır.

Ürün yaşam sürelerinin teknolojideki gelişmelerle paralel olarak kısalmasıyla Ar-Ge ve Ür-Ge faaliyetleri önem kazanmış, yeni ürün geliştirme, ürünlerin özelleştirilebilmesi, hızlı model değişimi gibi konular ön plana çıkmıştır. Çevik üretim yöntemlerinin hız kazanmasıyla beraber kaliteli ürüne olan ihtiyaç da gün geçtikçe artmıştır. Günümüz piyasa koşullarında firmaların ürünlerini hem kaliteli hem hızlı aynı zamanda optimum maliyet ile üretmek gibi zorlu hedefleri vardır.

Firmaların kar edebilmesi için ürün maliyetleri hala en önemli unsurlardan biridir. Ürün maliyetlerine etki eden birçok etmen olmasıyla beraber ürünün tasarım aşamasında ön görülen malzeme seçimi bu maliyet kalemlerinden birini oluşturmaktadır.

Günümüzde malzeme seçimi, en az üretim süreci kadar önem taşımaktadır. Ürünün kullanım alanına göre en uygun malzemenin seçilmesi kritik önem arz etmektedir. Doğru malzeme seçimi üretim sürecindeki birçok maliyet unsurunu devre dışı bırakabilir.

Malzemelerde aranan hafiflik, esneklik, dayanım, kolay ve düşük maliyetli üretim gibi özellikler birçok alanda kompozit malzeme kullanımının yaygınlaşmasına sebep olmuştur. Kompozit malzemelerin; tıp, savunma sanayii, havacılık, denizcilik, otomotiv gibi sektörler başta olmak üzere birçok alanda tercih edilme sebeplerini ise şu şekilde sıralamak mümkündür;

- Yüksek mukavemet/yoğunluk oranı (Özgül Mukavemet)
- Yüksek rijitlik/yoğunluk oranı (Özgül rijitlik)
- Hafiflik

- Yüksek dielektrik direnç
- Korozyon dayanımı
- Çeşitlilik
- Kalıplama kolaylığı
- Renk çeşitliliği / Tasarım esnekliği
- Çeşitli yüzeylere uygulayabilme
- Yanmazlık özelliği
- Isıl dayanım
- Tamir edilebilirlik / yeniden işlenebilirlik

Matris ve takviye elemanı olmak üzere iki bileşenden oluşan kompozit malzemeler matris tipi ve takviye elemanı şekline bağlı olarak iki farklı kategoride sınıflandırılabilir. Matris tipine göre polimer, metal ve seramik matrisli; takviye şekline göre ise elyaf takviyeli, parçacık takviyeli ve tabakalı kompozit malzeme olarak üç sınıfa ayrılır.

Malzeme özelliklerinin bilinmesi malzeme seçiminin doğru yapılması açısından önem taşımaktadır. Yanlış malzeme seçimi arızaya, üretim kaybına, kazalara, emek kaybına yol açabilir ve yüksek maliyet gerektiren onarım ve yeniden işleme sürecini gerektirebilir. Bu yüzden hangi sektörde olursa olsun malzeme seçiminin en başta doğru şekilde yapılması kritik bir konudur. Malzeme seçimini doğru yapabilmek için de malzemelerin tüm özelliklerine vakıf olunması gerekmektedir. Yüksek sıcaklıkta çalışacak olan bir ekipmana malzeme seçilmesi gerektiğinde bu malzemenin yüksek sıcaklık altında nasıl davrandığının, hangi özellikleri gösterdiğinin biliniyor olması gerekir.

Malzemelerin yüksek sıcaklıktaki davranışlarını ölçmek için başvurulan yöntemlerden biri de sürünme deneyidir. Sürünme, sürekli olarak sabit bir sıcaklık, sabit yük ya da basınç altında zaman içinde göstermiş olduğu sürekli ve yavaş deformasyondur. Özellikle yüksek sıcaklıkta kullanılacak olan ürünler için sürünme davranışı malzemenin çalışma sıcaklığını sınırlayan etmendir.

Bu tez çalışmasında polimer matrisli kompozit malzemelerin sürünme davranışına farklı sıcaklık ve farklı yüklemelerin etkisi araştırılmış, ayrıca farklı yoğunluktaki cam elyaf takviyeli polimer matrisli kompozit malzemelerin yüksek sıcaklıktaki davranışları kıyaslanmıştır.

2 LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

KOUADRİ-BOUDJELTHIA, A. ve arkadaşları [1], sıcaklığın; doymamış polyesterden yapılmış ve 450 g / m^2 yüzey kütleli rastgele yönlendirilmiş C tipi cam elyaf takviyeli kompozit bir malzemenin sürünme parametreleri üzerine etkilerini araştırmışlardır. Sürünme olayının karmaşık bir süreç olduğunu göstermek ve sıcaklık, yük, lif konsantrasyonu ve kristallik oranı (termoplastik polimerler için) gibi birden çok parametreye bağlı olduğunu göstermek için çeşitli deneyler yapmışlardır. Çeşitli örnekleri değişen sıcaklıklarda ve yüklerde test etmişler ve sonrasında bu verileri fenomenolojik ilişkiyi ve tayin edilen katsayıları (ε , ε_0 , σ) belirlemek için kullanmışlardır. Malzemelerin termo-mekanik performanslarını arttırmak için takviyelerin yüzey kütesinden faydalanılabileceğini öneren bu bir dizi sistematik çalışma sonucunda test edilen malzemelerin özellikle düşük sıcaklıktan yüksek sıcaklığa çıkan fakat düşük yüklemenin yapıldığı durumlarda daha iyi bir davranış sergilediğini belirtmişlerdir.

MİLİTKÝ, J. ve arkadaşı [2], lazer, ozon, enzim ve plazma işlemlerinin, jüt kumaş takviyeli yeşil epoksi kompozitlerin kısa süreli sürünme davranışına etkisini Burgers dört parametre metodunu kullanarak araştırmışlardır. CO₂ darbeli kızılötesi lazer, ozon, enzim ve plazma uygulanan jüt kumaşta bulunan lifler taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile karakterize edildi. El yatırma ve kompresyon kalıplama tekniği ile hazırlanan kompozit malzemeler dinamik mekanik analizör (DMA) ile üç noktalı bükme modunda sürünme ve dinamik mekanik testlere tabii tutulmuştur. Sürünme geriniminin sıcaklık arttıkça arttığı ve işlem görmüş kompozit malzemelerin, işlem görmeyenlere oranla tüm sıcaklıklarda daha az sürünme gerilimi sergilediği gözlemlenmiştir. Sürünme deformasyonu açısından en iyi sonuç, özellikle yüksek sıcaklıklarda viskoz davranıştan ziyade elastik davranış sergileyen lazerle işlenmiş kompozit malzeme tarafından ortaya konduğu belirtilmiştir. Dinamik mekanik analiz sonuçları, işlem görmüş kompozit malzemelerinin teğet delta tepe yüksekliğindeki azalmanın, fiber / matris ara yüzey yapışmasındaki iyileşmeden kaynaklanabileceği ortaya konmuştur. Jüt lifi ile yeşil epoksi arasındaki ara yüzey yapışma derecesi, DMA verileri ve lazerle işlem görmüş kompozit malzeme vasıtasıyla elde edilen

yapışma faktörü kullanılarak da tahmin edilmiş ve ara yüzeyde fiberler ve matrisin daha iyi birbirine bağlandığı sonucunda varılmıştır.

TSYBİNA, N. Y. ve arkadaşları [3], dikdörtgen kesitli üç katmanlı kompozit modelin polimer katmanındaki deformasyonlar ile serbest prizmatik bir polimer çubuktaki deformasyonları, enine kesit üzerinde eşit bir şekilde dağılmış çekme yükü altında karşılaştırmışlardır. Bileşikteki üç eksenli gerilme-gerinim durumunun büyük ölçüde homojen olmamasından dolayı aynı yükleme koşulları için polimer tabakasının deformasyon değerinin, tek eksenli gerilme-gerinimindeki serbest prizmatik polimer çubuktaki benzer gerinimlerden farklı olması gerektiği vurgulanmıştır. Bu çalışma sonucunda bileşikteğin polimer katmanındaki deformasyonun, serbest polimer çubuktan önemli ölçüde daha az olduğu ve deformasyon farkının, bileşik kesit büyüklüğü ile polimer tabakanın kalınlığı arasındaki oranın artmasıyla arttığı, temas katmanının rijitliğinin daha az önemli olduğu ve sert alt katmanların serbest polimer çubuğun sünme deformasyonuna kıyasla sünme deformasyonunu azalttığı tespit edilmiştir.

HARRIES, K. A. ve arkadaşları [4], pultrüzyon cam elyaf takviyeli polimer (pGFRP) plaka örneklerinin eğilme ve burkulma sürünme davranışlarını araştıran bir takım deneysel çalışmalar yapmışlardır. Bu çalışmada kısa vadeli malzeme özellikleri belirlenmiş, sürünme gerinim davranışını tanımlayan Findley güç yasası parametrelerinin elde edildiği üç yük seviyesinde 1000 saatlik burkulma sürünme deneyi yapılmış, ince eşmerkezli (konsantrik) olarak yüklenmiş numunelerin ince burkulma testleri yapılmış ve burkulma testlerinden elde edilen sonuçlar, Findley güç yasasının tahminleriyle karşılaştırılmıştır. Kısa vadeli elastik modülü, E_0 , standart test yöntemlerinden belirlenmiştir. Findley parametreleri n ve $m = r / E_0 t$, 1000 saatlik eğilme sürünme testlerinden belirlenmiştir. Bu tür testlerin yapılması için malzemenin esasen elastik kalması için sürünme yükü oranının yeterince düşük olması; test süresinin, ikincil sürünme davranışını gerçekleştirmek için yeterince uzun olması gerektiği belirtilmiştir. Bu çalışmada, 24 saatlik testlerin, 0.12 F_u 'luk sürünme yükü oranı için yeterli olduğu ancak 0.25 F_u için 200 saatin gerektiği tespit edilmiştir. Eksenel yük için, sürünme kaynaklı burkulma potansiyeli gösterilmiştir. Bu yaklaşım, makul bir test süresinde sürünme burkulmasına neden olmak için (bu çalışmada, 6 ila 200 saat arasında) yeterince yüksek bir yük oranında $P / P_{cr} = 0.92$ ince eşmerkezli olarak yüklenmiş numunelerin sürünme burkulması testleri ile doğrulanmıştır. Hasar zamanının, tahmini başlangıç kusurlarıyla ters orantılı olduğu gösterilmiştir. Bu makalede

pGFRP malzemelerinin sünme parametreleri ve sünme burkulması performansı oluşturmada bir yaklaşım ortaya koymaktadır. Eğilme sürünme testlerinin göreceli olarak küçük yükleri olması ve malzemenin birincil sürünme aşamasından geçmek için yeterli sürenin olması koşuluyla, güvenilir sürünme parametreleri belirlenmiştir. Sürünme davranışının malzeme bileşen özelliklerinden, bileşen oranlarından ve lif mimarisinden etkileneceği; bu nedenle, malzemeler için diğer malzeme ve mekanik özelliklerle aynı şekilde sürünme parametreleri oluşturulması gerektiği ayrıca vurgulanmıştır.

RUEDES, G. M. [5], çalışmasında, enerji tasarrufu kaygıları nedeniyle, ulaşım endüstrisi için hafif yapılara, elektrik rüzgar jeneratörlerine artan talepler ve bu durumun inşaat mühendisliği yapılarının tasarımı ve bakımı ile dayanıklılık konularında baskı yaratmasından dolayı bu yapıların 50 yıl veya daha uzun süre hizmette kalması gerektiğini savunmuş ve bu nedenle gerçek uzun vadeli mekanik performans tahminlerinin oldukça önemli olduğunu vurgulamıştır. Bu çalışmada sunulan tüm zamana bağlı hasar kriterlerinin, sürünme hasarı ile sabit gerilme hızı hasar gerinimi arasındaki benzer ilişkileri öngördüğü yani her iki eğrinin de zaman kaydırma kullanılarak örtüştüğü belirtilmiştir. Bununla birlikte, değişen zaman miktarı hata kriterlerine bağlı olduğu sonucuna varılmıştır Miyano ve arkadaşları. [Miyano Y, Nakada M, Sekine N. Denizcilikte kullanım için FRP laminatların uzun süreli dayanıklılığı için hızlandırılmış test. J Kompozit Mater 2005; 39: 5-20] tarafından Karbon ve Cam Elyaf Takviyeli Polimerlerde (CFRP ve GFRP) laminatlar, zaman-süperpozisyon ilkesinin statik, sünme ve yorulma dayanımları için aynı olduğu gerçeğine yani Lineer Kümülatif Hasar Yasasına (LCD) dayanan metodoloji ile, viskoelastik malzemeler için zamana bağlı hasar kriterleri gözden geçirilmiştir. Sabit gerilme / gerilme hızı testleri altında sürünme hasarı ile statik hasar arasındaki karşılaştırma analiz edilmiştir. Miyano'nun metodolojisine yakın bir zaman kaymasını öngören zamana bağlı hasar kriterinin Maksimum İş Stresi Kriteri (MWS) olduğu sonucuna varılmıştır. Monkman-Grant ilişkisinin, sabit gerilme (veya stres) oranları için bir hasar kriteri olarak kullanılabilmesi ve daha düşük gerilme (stres) oranları için ekstrapolasyonlara izin verilebileceği gösterilmiştir. Bu yaklaşımın uygulanabilirliği, statik kuvvet eğrisinin Monkman-Grant tipi bir ilişkiye uyduğu deneysel bir vaka için verilmiştir. Bu modele dayanarak, sürünme eğrisi, Miyano ve arkadaşları tarafından önerilen Doğrusal Kümülatif Hasar Yasası (LCD) uygulanarak elde edilmiştir. Hesaplanan sünme dayanımı eğrisinin, deneysel sünme verilerine yakın olduğu sonucuna varılmıştır.

SPATHIS, G. ve arkadaşı [6], polimer ve polimer kompozit malzemeler için sürünme hasar zamanının tahmini için teorik bir yaklaşım üzerine çalışmışlar ve polimerik / polimer kompozit malzemelerin viskoelastisitesinin bir sonucu olarak uzun vadeli dayanımının araştırılması kapsamında birçok deneysel ve teorik çalışma yapmışlardır. Küçük gerinimlerde viskoelastik yolu ve yüksek gerilmelerde viskoplastik yolu dikkate alan bu analizlerde sürünme gerinim oranının hesaplanmasının, termal olarak aktive edilmiş bir hız işlemine dayanmakta olduğu ve sürünme zamanının artmasıyla birlikte plastik gerinimin ortaya çıktığı ve arttığı göz önünde bulundurulmuştur. Birikmiş gerilimin, hasara yol açabilecek kadar yüksek değerlere ulaştığı anda, zamana karşı eğiminin ani bir değişiklik gösterdiği ve bu belirli zamanda, süreye göre sürünme oranı fonksiyonunun minimum değerini aldığı belirtilmiştir. Bu durumda sürünme hasar süresinin, sürünme hızının minimum değerini aldığı zaman olarak tanımlanmıştır. Ortaya konan bu model, polimer kompozitlerde olduğu gibi birçok polimer malzeme üzerinde de test edilmiştir. İlk olarak kısa sürünme gerilmesine ait verilerden yola çıkarak model parametreleri tahmin edilmiştir, sonrasında ise çeşitli bası seviyelerinde test edilen tüm malzeme çeşitleri için sürünme hasarı süresi başarılı şekilde belirlenmiştir.

RAGHAVAN, J. ve arkadaşları [7], fiber yönü 10° ve 90° olan sürekli karbon fiber takviyeli polimer matrisli malzeme kullanarak 295 K, 373 K, 403 K ve 433 K sıcaklık değerinde maksimum 24 saat süreyle sürünme deneyi gerçekleştirmişlerdir. Geliştirilmiş olan termo-reolojik olarak kompleks, yüksek-T epoksi ve karbon elyaf takviyeli kompozitlerin sürünme kopmalarını çeşitli stres ve sıcaklıkta tahmin edebilecek şekilde tasarlanmış sürünme kopma modeli test edilmiştir. Sürünme kırılma kriteri olarak kritik bir enerji kullanılmıştır. Bu enerji değerinin, çalışmada kullanılan kompozit için, özellikle yüksek sıcaklıklarda, uzun süre uygulanan gerilmelerde sürünme kopmasını öngörmek için uygun olduğu bulunmuştur. Bu kritik enerjinin, gerilme hızı ile sıcaklığa bağlı olduğu ve gerilme hızı ve sıcaklık ile birlikte kırılma modunda değişikliklere neden olduğu bulunmuştur.

GRECO, A. ve arkadaşları [8], bu çalışmada, polipropilen ve cam elyafı karışımli dokuma kompozit (Twintex) tabakaların eğilme sürünme davranışını incelemiştir. Test numuneleri, farklı plaka sıcaklıklarında bir basınçla kalıplama düzeneğinde elde edilmiştir. Kısa süreli eğilme sürünme testleri çoklu stres seviyelerinde uygulanmıştır. Uygulanan gerilme seviyesine göre değişen ve Boltzmann süperpozisyon prensibi kullanılarak sürünme

davranışının doğrusallığı test edilmiştir. Doğrusal viskoelastik bölgede, 303 ile 425 K arasında değişen farklı sıcaklıklarda sürünme testleri yapılmıştır. Kompozitin tek bir referans sıcaklıkta ve uzun bir süredeki sürünme davranışını tahmin etmekte kullanılan ana eğriyi oluşturmak için zaman-sıcaklık süperpozisyon ilkesi uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar, plakaların daha yüksek sıcaklıklarının, daha düşük sürünme uyumluluğuna sahip bir kompozite yol açtığını, bunun soğutma sırasında polimer matrisinde geliştirilen kristal yapıyla ve daha iyi bir elyaf doygunluğu elde edilmesini sağladığını göstermiştir. Polimer matrisinin kristallik derecesi, esas olarak işlem sıcaklıklarına bağlı olarak, kalıplama sıcaklıkları ile artar, daha kalın kristallerin oluşmasına ve kompozitin etki özelliklerinin azalmasına yol açar. Öte yandan, bu çalışmada, plakaların sıcaklığı artırılarak elyaf emdirme işlemlerinde bir gelişme sağlanmıştır.

CHEVALI, V. S. ve arkadaşı [9], bu çalışmada ekstrüzyon / basınçla kalıplanmış uzun elyaf takviyeli termoplastik (LFT) naylon, polipropilen ve yüksek yoğunluklu polietilen ile ağırlıkça %10 ve %40 cam elyaf takviyeli LFT kompozitlerde lif ağırlık fraksiyonunun ve işlem kaynaklı lif diziliminin bir fonksiyonu olarak eğilme sürünme davranışını incelemiştir. Kalan lif uzunlukları ve olasılık dağılım parametrelerinin, ilk lif uzunluğu ve işlemine bakılmaksızın, neredeyse eşit olduğu belirtilmiştir. Sürünme uyumu artan lif ağırlığı oranı ile azalmış ve model parametrelerinde fiber uyumunun net etkisi bulunmuştur. X-ışını radyografisi kullanılarak görüntülenen işleme bağlı fiber hizalaması, stratejik olarak bölümlenmiş numunelerin sürünme uyumları ile ilişkilendirilmiştir ve ASTM D-2990'a göre test edilmiştir. Uzunlamasına lifler, sürünme uyumunun azaltılmasında yardımcı olmuştur ve uygunluk aralığı, düşük tercihli fiber hizalamasıyla azalmıştır. Eğilme sürünme testlerinden ve dinamik mekanik analiz / statik sürünme testlerinden gelen sürünme uyumları, uzun süreli testlerle yakından ilişkili olan uzun vadeli ana eğrileri oluşturmak için zaman-sıcaklık-stres süperpozisyonu (TTSSP) kullanılarak birleştirilmiştir. Lif takviyeli kompozitlerin nihai ortalama lif uzunluğunun, başlangıç uzunluğunun% 20-40 aralığında olduğu tespit edildiğinden, ekstrüzyonda işleme ile lif uzunluğu bozulması gözlenmiştir. LFT kompozitlerindeki uzun elyaf takviyeleri, nihai elyaf uzunluğu kritik elyaf uzunluğundan daha yüksek olduğundan, saf reçine üzerindeki sürünme uyumunu azaltmıştır. Radyografilerde görülen lif hizalaması, eğilme davranışına kuvvetli bir şekilde bağlı olduğunu doğrulayarak, bükülme kayma tepkisi ile yakından uyuşmuştur.

ABDEL-MAGID, B. ve arkadaşları [10], uzun süreli sürünme davranışı ve sürünme kopma özelliklerini E-cam / poliüretan kompozit ve E-cam / epoksi kompozit olmak üzere iki E-cam takviyeli polimer kompozit malzeme için incelenmiştir: İki bileşik sistem benzer kısa vadeli mekanik özellikler gösterdiği ancak uzun vadeli sürünme özellikleri oldukça farklı olduğu tespit edilmiştir. E-cam / poliüretan, ters eğimli bir yüzey sergilerken, bükülme mukavemetinin yaklaşık % 60'ına maruz kaldığında birkaç saat içinde kopmaya neden olurken, E-cam / epoksi, ayıklanmadan önce 50 ° C'deki bükülme mukavemetinin % 60'ına kadar yüklenmiştir. Bu çalışma neticesinde, malzeme karakterizasyonunda ve malzeme seçiminde sürünme testinin gerekli olduğu, üç noktalı eğilme testinin sürünme kopma özelliklerini belirlemek için hızlı bir test yöntemi olarak kullanılabilceğini ve sürünme kopmasının matris türü ve fiber / matris arayüzünden yüksek oranda etkilendiği, matrisin kayma özelliklerinin ve elyaf ile matris arasındaki arayüzey bağlanma kuvvetinin sürünme kopma mukavemeti için kritik olduğu sonucuna varılmıştır.

GOERTZEN, W.K. ve arkadaşı [11], karbon takviyeli epoksi matris kompozit malzemelerin sürünme davranışını çekme ve eğilme sürünme testleri ile araştırmıştır. %77 nihai çekme gücü üzerindeki yüklemelerde oda sıcaklığında 1600 saatten az kısa sürelerde herhangi bir sürünme hasarı gözlemlenmemiştir. Yüksek sıcaklıkta eğilme sürünme verileri 30°C ve 75°C arasında zaman-sıcaklık temelinde oluşturulmuştur. Ana eğri elle değiştirilen verilerle oluşturulmuştur ve değişimi tahmin etmek için sabit bir aktivasyon enerjisi kullanılmıştır. T_g değerinin altındaki sıcaklıklarda sabit aktivasyon enerjisi varsayımının iyi çalıştığı görülmüştür. Önerilen 50 yıllık tasarım ömrünün sonunda sürünme seviyelerine ilişkin tahminler yapılmıştır.

RWAWIIRE, S. ve arkadaşları [12], çalışmada doğal elyaf takviyeli polimer kompozitlerin çeşitli endüstrilerde uygulanmasında küresel bir dalgalanma olduğunu ve gerçek uygulama ortamının frekans ve sıcaklık değişkenlerine sahip olmasından dolayı polimer takviyeli kompozitlerin servis ömrü boyunca boyutsal dengesizliklerle karşı karşıya kaldığını belirtmiştir. Bu araştırmada, ilk kez, 30°C-100°C sıcaklık aralığında sürünme davranışı için dinamik mekanik analiz kullanılarak alkali, enzim ve plazma ile işlem görmüş ağaç kabuğu kumaş takviyeli epoksi tabakalı kompozitler incelenmiştir. Sürünmenin tabakalaşmadan etkilendiğini göstermektedir. İşlem görmemiş ağaç kabuklu kompozitlerin çok düşük bir anlık deformasyona sahip olduğu, enzim ile işlem görmüş kumaşla güçlendirilmiş kompozitlerin çok düşük sürünme direncine sahip olduğu, ancak

sıcaklık değişiminden etkilenmeyen BFE enzimi ile işlem görmüş kompozitlerde ise bir istisna görüldüğü belirtilmiştir. Alkali ile işlem yapılmasının mekanik özellikleri iyileştirmenin yanı sıra 30-50 °C sıcaklık aralığında sürtünmeye karşı dirençli kompozitler oluşturacağı tespit edilmiştir. Yeşil kompozitlerin optimum çalışma sıcaklığının 100 °C' nin altında olması gerektiği vurgulanmıştır.

EL-SAFTY, S. ve arkadaşları [13], klinik olarak ilgili bir aralıkta sıcaklığın, aynı reçine matrisine ve değişken dolgu maddesi yüklemesine sahip iki alt grup içeren bir dizi geleneksel ve akışkan reçine-kompozitin sünme davranışı üzerindeki etkisini belirlemek üzere çalışmalar yapmışlardır. Dört akışkan ve dört konvansiyonel olmak üzere sekiz dental reçine kompoziti incelenmiştir. Sürünme incelemesi için silindirik örnekler hazırlamak için paslanmaz çelik split kalıplar (4 mm - 6 mm) kullanılmıştır. Numuneler, kalıplarda çıkarıldıktan sonra radyal doğrultuda 2 mm kalınlıkta (her biri 40 sn) katmanlarda, 650 mW / cm² ışınımı olan bir ışıkla sertleştirme ünitesi kullanılarak işleme tabii tutulmuştur. Her malzemedden toplam 15 örnek hazırlanmış ve sıcaklığa göre üç gruba (n = 5) ayrılmıştır; Grup I: (23°C), Grup II (37°C) ve Grup III: (45°C). Her örnek 2 saat boyunca (20 MPa) yüke tabii tutulmuş ve 2 saat boyunca boşaltılmıştır. Sürünme yükleme ve boşaltma sürelerinde sürekli olarak ölçülmüştür. Daha yüksek sıcaklıklarda daha yüksek sürünme kaydedilmiştir. En düşük ortalama sürünme GS ve GH reçine kompozitlerinde meydana gelmiştir. Yüksek sıcaklıklarda sürünme toparlanma yüzdesi azalmıştır. 23°C' de, malzemeler karşılaştırılabilir bir sürünme davranışı sergilemişlerdir. Bununla birlikte, 37°C ve 45°C' de, malzemeler arasında daha büyük bir değişiklik meydana geldiği belirtilmiştir. İncelenen tüm reçine kompozitleri için, sürünme gerinimi 23-45°C aralığında artan sıcaklıkla sistematik olarak arttığı tespit edilmiştir.

ASI, O. [14], çalışmasında farklı oranlarda Al₂O₃ partiküllerle doldurulmuş cam elyaf takviyeli epoksi kompozitin mekanik özelliklerini incelemek için deneysel bir çalışma yapmıştır. Bir karşılaştırma olarak, doldurulmamış cam elyaf takviyeli epoksi kompozitin mekanik özellikleri de aynı test koşulları altında değerlendirilmiş ve Al₂O₃ partikül içeriğinin artmasıyla kompozitlerin gerilme mukavemeti ve kopma mukavemetinin azaldığı, Eğilme özelliklerinin Al₂O₃ partikül içeriğinin artmasıyla birlikte ilk olarak arttığı, daha sonra nispeten azaldığı tespit edilmiştir. Dolgusuz cam elyaf takviyeli epoksi kompozitin eğilme özellikleri ile karşılaştırıldığında, matriste ağırlıkça % 10 Al₂O₃ partikül ilavesi ile eğilme mukavemeti ve eğilme modülü sırasıyla % 33 ve % 78 arttığı

tespit edilmiştir. En iyi eğilme özellikleri için optimum Al_2O_3 partikül miktarının %10 olması önerilmiştir.

ABDEL-MAGID, B. ve arkadaşları [15], yük, nem ve sıcaklığın E-cam/epoksi kompozit üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Tabakalı birleştirme tekniği ile üretilmiş olan %52 fiber yoğunluğuna sahip E-cam/epoksi malzeme kullanılmıştır. Numuneler oda sıcaklığında ve 65°C'de 500, 1000 ve 3000 saat süre ile deneye tabi tutulmuştur. Daha sonra nem soğurumlarının belirlenmesi için suya batırılmadan önce ve sonra tartılmıştır. Deneyler ASTM D 3039, ASTM D 570, ASTM D 2247, ASTM E 104 standartlarına göre yapılmıştır. Testler sırasında kullanılan epoksi malzemenin kopma dayanımı 767 MPa ve modülü 36,5 Gpa'dır. Oda sıcaklığında kısa süre yani 500 ve 1000 saat uygulanan çekme gerilimi ve saf suya batırma işlemi sonrasında, dayanımın arttığı, modülün azaldığı ve hasara karşı gerilme arttığı gözlemlenmiştir. Oda sıcaklığında uzun süre (3000 saat) uygulanan bası ve nem koşullarından sonra matriste yayılan çatlakta ve yüzeyde malzeme daha az sünek ve daha çok gevrek yapıda olduğu için dayanım ve hasara karşı gerilmede gözle görülür bir düşüş olduğu tespit edilmiştir. Oda sıcaklığı 65°C'ye yükseltildiğinde ise 1000 saatlik yükleme sonrasında hasara karşı mukavemet %28 artarken dayanım %18, elastisite modülü ise %28 azalmıştır. Elastisite modülündeki düşmenin sebebi, yükleme, nem ve sıcaklığa bağlı olarak matristeki plastikleşmedir. Mukavemetteki düşüş, kimyasal bağların, ara fazda gerilme transferini iyi muhafaza eden fiziksel bağlar ile yer değişmesi nedeniyle önemli ölçüde değildir. Bu testler sonucunda uygulanan gerilme kısa süreli olduğunda malzemede pozitif etkileri görüldüğü, yüksek sıcaklıkta malzemede meydana gelen değişmelerin ise oda sıcaklığında meydana gelen değişimlerden oldukça farklı olduğu görülmüştür.

GUPTA, A. ve arkadaşı [16], eksen ve eksen dışı yük altındaki düz dokuma kompozitlerin aksenal ve eksen dışı yük altında çekme sünmesi üst çekme sınırı (UTS)'nin %70'i oranına kadarki çeşitli gerilmelerde ve 80-240°C' de deneysel ve analitik olarak incelemiştir. Zaman-sıcaklık-süperpozisyon ilkesi (TTSP), deney zaman penceresinin ötesindeki bir süre boyunca her stres seviyesinde ana sünme eğrileri elde etmek için kullanılmıştır. Sünme uyumunun, epoksi matrisinin sünme payının artması nedeniyle, dolum / çözgü elyaflarına göre yükün oryantasyon açısının artmasıyla arttığı gözlemlenmiştir. Stres ve sıcaklığın sünme üzerindeki etkisinin, eksen üstü yüklemelerde eksen dışı yüklemeye kıyasla daha az olduğu belirtilmiştir. Tek yönlü polimer kompozitlerin deneysel sünme

kompliyansı kullanılarak, düz örgü kompozitlerin elyaf eksenine göre herhangi bir yük oryantasyonuna ait sürünme kompliyansını tahmin etmek için değiştirilmiş eşdeğer bir laminat modeli (MELM) geliştirilmiştir.

CHEVALİ, V.S. ve arkadaşları [17], Naylon (NY66) ve polipropilen (PP) bazlı uzun elyaf takviyeli termoplastik (LFT) kompozitlerin eğilme sünme davranışını, ultraviyole ışınlanmanın ve nem emiliminin bir fonksiyonu olarak incelemiştir. Ekstrüzyon / sıkıştırma kalıplı paneller, ASTM D-2990'a ve ASTM D-618'e göre hazırlanmıştır. NY66 ve PP LFT'ler, pozlanmamış durumda taramalı elektron mikroskobu (SEM), diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) ve Fourier-dönüşen kızılötesi (FTIR) spektroskopisi kullanılarak ve 253.7 nm UV radyasyonuna maruz bırakılarak karakterize edilmiştir. Nem emme deneyleri, NY66 ve LFT kompozitlerinde doyumluğa kadar kaynar suda gerçekleştirilmiştir. Doğal renkli malzemelerde sarı renklenme görülürken, tüm malzemelerde UV ışınlarına maruz kalmanın artmasıyla yüzey çatlaması görülmüştür. PP LFT'nin sünme uyumu, artan UV maruziyeti ile artarken, NY66 LFT'nin sünme uyumu, artan UV maruziyeti ile birlikte orta derecede bir azalma göstermiştir.

ASADİ, A. ve arkadaşı [18], bir polimer kompozitin sabit yük altında zamana bağlı değişim ve enine çatlakların, 45 ± 45 ve 90 katlarında, $[\pm 45/90_2]_S$ çok yönlü tabakanın sürünmesi üzerindeki etkisi üzerine çalışmış ve modellemişlerdir. Hasar, test koşullarına bağlı olarak her iki katlı grupta sırayla ve / veya aynı anda zaman içinde meydana gelmiştir. Katmanın sürünmesi, hem katların viskoelastisitesinden hem de zamana bağlı hasardan kaynaklanmaktadır. Hasar görmüş bir kat, zamana bağlı enine çatlak yoğunluğunun bir fonksiyonu olarak belirlenen, belirgin bir uyumluluğa sahip eşdeğer bir hasarsız kat kullanılarak modellenmiştir. Çok yönlü tabakanın $[\pm 45/90_2]_S$ sürünmesi, tüm katlarında zamana bağlı enine çatlama önemli ölçüde etkilenmiştir. Model tahminlerinin, düşük sıcaklıklarda deneysel sürünme gerinimi ile uyumlu olmasına karşın, daha yüksek sıcaklıkta tahminin doğruluğu daha az tatmin edici olmuştur.

DASAPPA, P. ve arkadaşları [19], rastgele diziliimli sürekli cam elyaf takviyeli mat termoplastik kompozitlerde (GMT) sıcaklığın, çekme sürünme davranışı üzerindeki etkilerini, hızlandırılmış bir karakterizasyon prosedürü izlenerek incelemiştir. 30 dakikalık sürünme ve ardından 1 saat geri kazanımdan oluşan kısa süreli sürünme testleri, geniş bir gerilme aralığında ve malzeme servis sıcaklığı limitine kadar sürekli bir elyaf GMT kompozit üzerinde gerçekleştirilmiştir. Uygulanan stres aralığı, 10 MPa'lık artışlarla

20 ila 60 MPa ve sıcaklık aralığı 5°C' lik artışlarla 25 ila 90°C'dir Çalışmalarının amaçlarından ilki, oda sıcaklığında lineer viskoelastik rejim (20 MPa' ya kadar) davranışını temsil edebilen zaman sıcaklık süperpozisyonunu (TTS) kullanarak uzun süreli bir sürünme modeli elde etmektir. İkincisi ise çok çeşitli gerilmeleri ve sıcaklıkları açıklayan doğrusal olmayan bir viskoelastik model geliştirmektir. Sürünme ve geri kazanım testleri, oda sıcaklığı ila 90°C arasındaki bir sıcaklık aralığında 20 ila 60 MPa arasındaki bir gerilme aralığında gerçekleştirilmiştir. Malzemelerin genel olarak tüm gerilmeler ve sıcaklıklar için doğrusal olmayan davranış sergilediği tespit edilmiştir. 50 MPa' ya kadar olan gerilmeler için, sıcaklıktan kaynaklanan doğrusal olmayan viskoelastik davranışın, yalnızca TTS'den gelen zamanın sıcaklık değişim faktörleri ile makul bir şekilde modellenebileceği belirtilmiştir. Bununla birlikte, 60 MPa' da doğrusal olmayan parametrelerin gerilme ve sıcaklığa bağlı fonksiyonların bir ürünü olarak modellenmesi gerekir. Model tahminlerinin, çoğu stres ve sıcaklık seviyesindeki deneysel sonuçlarla uyumlu olduğu tespit edilmiştir. Özellikle 60 MPa'dan yüksek sıcaklıklarda tahmin edilen sürünme eğrileri, daha uzun zamanlarda azalma eğilimindedir. Bu testlerin, sürekli fiber GMT malzemesinin, özellikle servis sıcaklığı 65°C' nin üzerindeyse, 60 MPa'nın üzerindeki baskılarda kullanılmaması gerektiğini ortaya koymaktadır.

HOUSHYAR, S. ve arkadaşları [20], stres altındaki bir malzemenin zaman içindeki deformasyonu olan sürünmenin, belirli uygulamalarda düşük performansla sonuçlanan kompozitlerin bir özelliği olduğunu belirtmiş ve bu çalışmada, farklı elyaf konsantrasyonlarında rastgele poli (propilen-ko-etilen) (PPE)'de PP elyaf kullanmanın avantajlarını araştırmışlardır. Uzun polipropilen liflerinin PPE'ye eklenmesi, kompozitin sürünme direncini ve elastikiyet modülünü matris polimerine kıyasla büyük ölçüde geliştirmiştir. Bununla birlikte, yüksek konsantrasyonlarda uzun elyaf, elyaf paketleme problemlerine ve boşluk muhtevasında bir artışa neden olarak, sürünme direncinde bir azalmaya yol açmıştır. Sürünme modülünün eğrileri ve göreceli sürünme – zaman eğrileri, kompozitin çok uzun ve kısa zaman davranışının tahmin edilmesini sağlayan bir sürünme ana eğrisi geliştirmek için logaritmik zaman ölçeği boyunca kaydırılmıştır. Deneysel sonuçları doğrulamak için, kompozitlerin viskoelastik davranışını ölçmek amacıyla dört parametrelili bir viskoelastik model uygulanmıştır. Kompozitlerin morfolojisi optik ve taramalı elektron mikroskopu (SEM) kullanılarak incelenmiştir. Optik mikroskopi görüntüleri, matris polipropilenin transkristalizasyonunun PPE'de gözlemlendiğini

göstermiştir. SEM fotoğrafları, takviye üzerinde, liflerin iyi bir şekilde doyurulmasına ve ıslanmasına atfedilen ince bir matris tabakası sergilemiştir. Sonuçlar, PP elyafın konsantrasyon artışlarıyla birleştirilmesiyle, kompozitin sürünme direncinin arttırıldığını göstermektedir.

BERARDI, V.P. ve arkadaşları [21], çalışmalarında kompozitlerin ve fazlarının viskoz davranışını modellemek için bir sürünme testi programı uygulamış ve ıslak döşeme tekniği ile üretilmiş, tek yönlü cam elyaf takviyeli polimer laminatların sürünme olayları ve kurucu fazları(matris ve elyaf) hakkında teorik ve deneysel bir araştırma sunulmuştur. Sürünme deneyleri tasarımı yazarlarına ait olan çelik cihazlarda ve oda sıcaklığında farklı gerilme değerlerinde gerçekleştirilmiştir. Mekanik açıdan, GFRP(Cam Elyaf Takviyeli Poilmer) laminatlar ve elyaf numuneleri doğrusal bir viskoelastik davranış sergilerken, reçine numuneleri için doğrusal olmayan bir kayma davranışı gözlemlenmiştir. GFRP laminatlar ve cam fiberler üzerindeki sürünme testlerinin sonuçları, mekanik, havacılık ve denizcilik için literatürde beklenenden daha iyi bir reolojik davranış göstermiştir. Altı ay boyunca elde edilen deneysel verilerden yola çıkarak, laminatlar ve lifler için öngörücü bir mikromekanik model önerilmiştir.

DU, Y. ve arkadaşları [22], biyofiber takviyeli epoksi kompozit yüzey-petek göbekli sandviç panellerin ortam ve yüksek bağıl nem koşullarındaki sürünme davranışı incelemiştir. Toplanan verilere dayanarak, sandviç paneller ortam koşullarında (bağıl nem:% 20–50) yük altında 30 gün sonra, statik arıza stresinin % 40' ına kadar olan stres seviyelerinde üçüncül sürünmeye ulaşmamıştır. % 65 bağıl nemde, sandviç paneller tersiyer sürünme aşamasına, statik arıza stresinin% 20 ila 40'luk gerilme seviyelerine maruz kaldıklarında nispeten erken (7-15 gün) girmiştir. Ortam koşullarında, bu çalışmada test edilen sandviç paneller, uygulanan stres seviyesi% 30'dan küçük veya ona eşit olduğunda doğrusal viskoelastisite göstermiştir. Bu aralık için, deneysel sürünme verileri, Findley ve Bailey-Norton modellerinin öngördüğü teorik değerlerle uyumlu olduğu görüşmüştür.

JABBAR, A. ve arkadaşı [23], farklı ortam sıcaklıklarında pulverize jüt lifleri (PJF) içeren alkali ile işlem görmüş jüt / yeşil epoksi kompozitlerin sürünme davranışını araştırmıştır. Kompozitler, el yatırma metodu ve kompresyon kalıplama tekniği ile üretilmiştir. Sürünme ve dinamik mekanik testler, dinamik mekanik analizör (DMA) ile üç noktalı bükme modunda gerçekleştirilmiştir. Sürünme deformasyonunun sıcaklıkla arttığı ve PJF'nin dahil edilmesinin, sürünme direncini ve kompozitlerin gerilme oranını önemli ölçüde geliştirdiği

bulunmuştur. Bu çalışmada sürünme davranışını modellemek için üç adet sürünme modeli yani Burger'in modeli, Findley'nin güç yasası modeli ve daha basit iki parametrelili bir güç yasası modeli kullanılmıştır. Uzun vadeli sürünme performansını tahmin etmek için zaman sıcaklık süperpozisyon ilkesi (TTSP) uygulanmıştır. Findley'nin güç hukuku modelinin uzun vadeli sürünme davranışını öngörmeye tatmin edici olduğu tespit edilmiştir. Sonuçların analizine dayanarak, kompozitlerin geliştirilmiş sürünme direnci, PjF'nin büyük arayüzey temas alanı ve başlatılan polimer matris ile etkileşime girme etkileşimlerinin yanı sıra polimer matris moleküler zincirlerinin inhibe edilmiş hareketliliğine de bağlıdır.

EFTEKHARİ, M. ve arkadaşları [24], Düzgün, talk dolgulu ve kısa cam elyafla güçlendirilmiş enjeksiyonla kalıplanmış termoplastik kompozitlerin sürünme davranışını incelemiştir, oda ve yüksek sıcaklıklarda modellemiştir. Sürünme kuvveti azalmış ve sıcaklık artışı ile sürünme gerinimi ve sürünme hızı artmıştır. Sıcaklık etkisinin, cam elyafların yüklenme yönünün boylamasında doğrultuda olanlara nazaran enine doğrultuda bulunduğu örneklerde daha önemli olduğu tespit edilmiştir. Metalik malzemelerin sürünme kopma korelasyonları için yaygın olarak kullanılan Larsson-Miller parametresi, bütün malzemelerin sürünme kopma verilerini ilişkilendirmek için kullanılmıştır. Bu parametrenin, kısa vadeli verilere dayanarak uzun vadeli sürünme hasar verilerini tahmin etmek için de kullanılabileceği belirtilmiştir.

3 KOMPOZİT MALZEMELER

3.1 Kompozit Malzeme Tanımı ve Çeşitleri

Kompozit malzemeler; özelliklerine göre seçilen benzer ya da farklı türdeki malzemelerin belirli bir amaca istinaden makro seviyede birleştirilmesi ile oluşturulan yeni malzemelerdir. Matris fazı ile matris fazı içerisine dağılmış takviye elemanları kompozit malzemelerin yapısını oluşturmaktadır.

Makro seviyede incelendiğinde homojen yapıda gözlemlenmelerine rağmen mikro yapılarında heterojendirler ve bileşenleri ayırt edilebilir özelliklere sahiptir. Kompozit malzemeler mikro seviyede homojen görünen malzemelerden bu açıdan farklılık göstermektedir [25].

Kompozit malzemelerde neden takviye malzemesi kullanıldığı sorusuna cevaben matrisin rijitliğinin ve dayanımının artırılması, malzeme üzerindeki yükün taşınmasının sağlamak olarak belirtilebilir. Kompozit malzemelerdeki matrisin temel görevi ise genelde gevrek ve kırılğan olan takviye elemanlarını çevresel etkilere karşı korunaklı hale getirmek, malzeme üzerindeki yükü takviye elemanlarına aktarmak ve yapıyı genel itibari ile bir arada tutmaktır [25].

Kompozit malzemeler, kompozit yapısını oluşturan malzemelere ve üretim yöntem/şekillerine göre olmak üzere iki farklı şekilde gruplandırılabilir.

Matris tipine göre kompozit malzemeleri 4 farklı sınıfa ayırmak mümkündür;

- *Metal Matrisli Kompozitler*; arzu edilen, ürün için gereken özellikleri ortaya çıkarmak için az bir metal olan malzemelerin sistematik bileşimiyle elde edilen yeni malzemelerdir. Metallerin düşük sürünme oranına sahip olması, yüksek elastiklik modülü ve yüksek mukavemet özelliği taşıması, yorulmaya karşı dirençli olmaları, yüksek sıcaklıklarda mukavemetlerini koruyabilme yetenekleri, aşınmaya karşı gösterdikleri yüksek direnç gibi özellikler sayesinde metal matrisli kompozit malzemeler endüstride kullanılmaktadır.

- *Seramik Matrisli Kompozitler*; matris malzemesi olarak inorganik kimyasal bileşikler (SiC, SiO₂, Al₂O₃ gibi metaller ve metal olmayan elementlerin birleşiminin oluşturduğu) ile bu türdeki bileşiklerin oluşturduğu porselen, cam, refrakter, tuğla, cam yünü, beton gibi malzemelerin seçildiği kompozitlerdir. Seramik malzemeler gevrek olmalarının yanı sıra yüksek ısıl kararlılık ve yüksek sertlik özelliği gösterirler. Sünek özellik göstermemeleri sebebiyle seramik malzemelerin kullanım alanları sınırlıdır [26].
- *Polimer Matrisli Kompozitler*; matris malzemesi olarak termoplastik, termoset, elastomer gibi polimerlerin seçildiği kompozit malzemelerdir. Polimer kelimesi Yunanca'dan gelmektedir ve çok parça anlamına gelir, monomerlerin birbirine eklenmesi ile oluşan uzun zincirli moleküllere denir [27].
- *Melez (Hibrit) Kompozitler*; teknolojik gelişmelere paralel olarak üzerinde çalışmaların devam ettiği, en son üretilen bu malzeme türü, kompozit malzemeyle bir başka malzemenin karışımından oluşur. Aynı zamanda birden çok takviye elemanının kullanıldığı kompozit yapılar da olabilir [25].

3.2 Kompozit Malzemelerin Genel Özellikleri, Avantaj ve Dezavantajlar

Kompozit malzemelerin ısı, ses ve elektrik yalıtımı sağlamaları, hafif olmaları, özellikle fiber takviyeli kompozit malzemeler söz konusu olduğunda korozyona dayanımlarının yüksek olması gibi çeşitli özellikler kompozit malzemelerin kullanım alanları, endüstride sıkça tercih edilmeleri açısından önemli bir üstünlük sağlamaktadır.

Kompozit malzemelerin avantajlarını şöyle sıralayabiliriz:

- ✓ *Kolay Şekillendirme*: Özellikle kullanılan malzemedен ve işçilik maliyeti açısından kazanç sağlayan kolay şekillendirme özelliği ile yapımında kompozit malzeme kullanılmış karmaşık yapılar kısa zamanda, çok az işleme şekillendirilebilirler. Ayrıca bu özellik estetik açıdan daha iyi görünmesine olanak sağlar.
- ✓ *Yüksek Mukavemet*: Kompozit malzemeler birden fazla malzemenin en güçlü özelliklerini elde etmek amacıyla birleştirildiği için çekme ve eğilme dayanımları

birçok malzemeye göre çok daha yüksektir. Ayrıca kaplanabilmeleri sayesinde istenen kısımlara ya da arzu edilen yönde gerekli mukavemet verilebilmesi mümkündür.

- ✓ *Korozyona ve Kimyasal Etkilere Karşı Dayanıklılık:* Kompozit malzemelerin, havanın etkilerine, kimyasallara ve korozyona göre dirençlidir. Bu özellik kompozit malzemelerin kimya, denizcilik gibi sektörlerdeki kullanım alanlarının artmasını sağlamıştır.
- ✓ *Isıya Dayanıklılık:* Kompozit malzemeler ısı iletim kat sayısı düşük malzemelerdir. Bu sebeple ısıya karşı dirençlidirler. Bu özellikleri kompozit malzemelerin güvenle yüksek sıcaklıklarda çalışacak ürünlerin yapımında kullanılmasına olanak sağlar. Kompozit malzemelerin ısıya dayanıklılıkları daha da artırılmak istenirse özel katkı maddeleri de kullanılabilir.
- ✓ *Titreşim Sönümlenme:* Kompozit malzemeler sünek özellik gösterirler. Bu durum kompozit malzemelere şok yutabilme ve doğal titreşim sönümlenme özelliği sağlar ve malzemede oluşan herhangi bir hasarın, çatlağın gevrek malzemelerdekine aksine malzeme içerisinde ilerlemesini engeller.
- ✓ *Düşük Ağırlık:* Metalik malzemeler ile kıyaslandığında kompozit malzemeler daha hafiftir.
- ✓ *Kalıcı Renklendirme:* Kompozit malzemelere, üretim aşamasında reçinelerine ilave edilen renk pigmentleri sayesinde ürün tasarımına yönelik istenen rengin verilmesi mümkündür. Renklendirme işlemi için ilaveten bir masraf ya da emek gücüne ihtiyaç bulunmaz. İstenen renkte üretilebilmeleri sayesinde; estetik kaygıların ön planda olduğu otomobil gövdesi, tekneler, ev içi dekorasyon, banyo, ev eşyaları, tarım araçları gibi birçok alanda kullanılmak üzere seçilebilecek malzemelerdir.

Kompozit malzemelerin avantajları yanı sıra bazı dezavantajları da mevcuttur. Bunları aşağıdaki şekilde sıralamak mümkündür;

- Malzemelerin sınırlı raf ömürleri vardır, kompozit malzemelerin türlerine göre sıcak ya da soğuk kurutulmaları gerekebilir.

- Gerek üretim yöntemi gerek kullanılan hammadde yönünden diğer malzemelere nazaran daha yüksek maliyet gerektirirler.
- Malzemenin kalitesi, üretim yönteminin kalitesi ile direkt bağlantılıdır.
- Kompozitler kırılğan (gevrek) malzemelerdir, bu sebepten dolayı zarar gördüklerinden yeniden işlenmeleri/onarılmaları ya neredeyse imkansız ya da yüksek maliyetlidir.

3.3 Polimer Matrisli Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri

Ürün kalitesini, seçilen hammaddelerin yanı sıra üretim yönteminin doğru seçilmesi de büyük ölçüden etkilemektedir. Bu yüzden kompozit malzeme üretilirken mutlaka kullanım alanına uygun olacak bir üretim yöntemi belirlenmelidir.

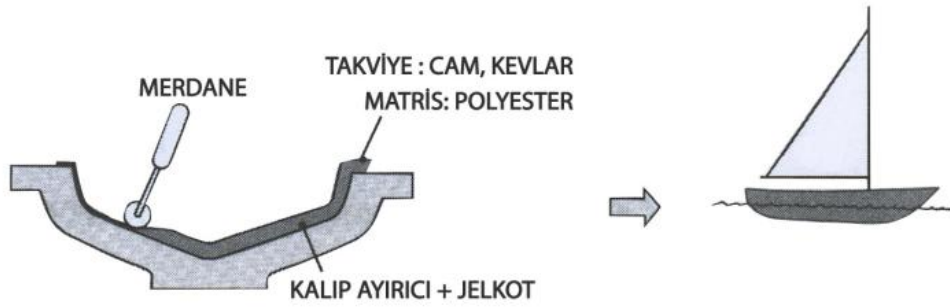
Polimer matrisli kompozit malzeme üretim yöntemleri aşağıdaki verilmiştir. Bu tez çalışması kapsamında kullanılan kompozit malzemeler el yatırma yöntemi ile üretildiği için bir sonraki başlıkta el yatırma yöntemi daha detaylı olarak anlatılacaktır.

- El yatırma yöntemi
- Püskürtme yöntemi
- Press (basınçlı) kalıplama yöntemi
- Vakumla kalıplama yöntemi
- Otoklavda kalıplama yöntemi
- Filament (helisel) sarma yöntemi
- Soğuk kalıplama yöntemi
- Pultruzyon (profil çekme) yöntemi
- Matris enjeksiyon yöntemi
- Transfer kalıplama yöntemi
- Enjeksiyon yöntemi
- Santrifüj yöntemi

3.4 Polimer Matrisli Kompozitlerin El Yatırma Yöntemi ile Üretimi

El yatırma yöntemi, kompozit malzeme üretiminde kullanılan en yaygın yöntemlerden biridir. İşçilik anlamında emek yoğun bir işçilik gerektirmekte, üretim hacmi az fakat boyutsal anlamda büyük malzemelerin üretiminde tercih edilmektedir. Bu üretim yönteminde matris malzemesi olarak genellikle epoksi ve polyeester, takviye malzemesi olarak ise cam elyaf tercih edilmektedir

Kompozit yapılar, takviye katmanlarına (keçe, elyaf vb.) önceden hazırlanmış olan matris malzemesi ve katalizörün emdirilmesi ile oluşturulur. Bu işlemde evvel öncesinde kalıp temizliği yapılır ve pigment katkılı jelkot malzeme sürülür. Hava kabarcıklarının oluşması Şekil 3.1’de şematik görünümü verilen merdane benzeri bir silindir ile engellenir. Daha sonrasında ilgili mekanik özelliklere göre katmanlandırma işlemi gerçekleştirilir. Oda sıcaklığında gerçekleştirilen polimerizasyon işlemini hızlandırmak için kızılötesi ısıtıcı, fırın vb. kullanılabilir ya da katalizör ilave edilebilir. Bu yöntem düşük yatırım maliyeti gerektirir fakat emek yoğun bir işçiliğe ihtiyaç duyar. Üretim sırasında ürüne müdahale edilebilir, istenen kısımların mukavemeti artırılabilir aynı zamanda farklı renk seçeneği ile ürün çeşitliliğini sağlar. Fakat işçi kabiliyetine bağlı kalite sorunları ve kimyasal malzemelerin üretim sırasında ortaya çıkan zehirli maddeleri dezavantaj olarak belirtilebilir [25].



Şekil 3.1: El yatırma yöntemi [28]

4 SÜRÜNME

4.1 Sürünmenin Tanımı ve Önemi

Sabit bir sıcaklık ve basınç altında zamana bağlı olarak malzemede meydana gelen deformasyon olayına sürünme (creep) denir. Günümüzde türbinler, kimyasal ve petrokimyasal endüstriler, nükleer reaktörlerde yüksek sıcaklıkta çalışma söz konusu olduğu için bu alanlarda kullanılan malzemelerin sürünme davranışı önem arz etmektedir.

Sürünme davranışı metaller, polimerler, seramikler vb. gibi birçok mühendislik malzemesinde görülebilir. Malzemelerin göstermiş oldukları sürünme davranışı kullanım alanlarını sınırlar. Özellikle yüksek sıcaklıktaki ortamlarda, sürünme malzemeler üzerinde ciddi bir etkiye sahiptir.

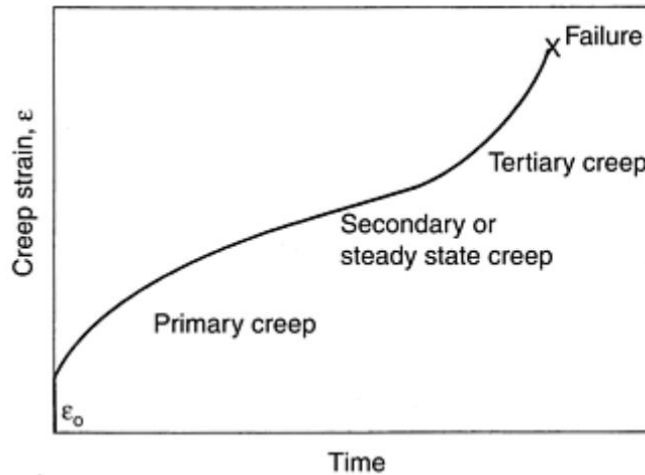
Bir malzemenin sürünme davranışının anlaşılması, tasarım ve imalat aşaması açısından önemlidir; çünkü sürünme olayı, üretilen ürünün gerilme mukavemetinden önemli ölçüde daha düşük olan uygulanan sabit gerilmelerde hasara yol açabilir. Sürünmeyi etkileyen birden fazla parametre söz konusudur. Örneğin, elyaf takviyeli kompozitler ele alınacak olursa bu malzemelerin sürünme davranışı etkileyen elyaf geometrisi, elyaf ve matrisin birbiriyle olan ilişkisi, elyafların elastik ve kırılma davranışı, matrisin sürünme davranışı gibi bir çok etmen söz konusudur. Sürünme olgusunun karmaşık bir fenomen olduğunu aktarmak adına fiber çevresinde artan yer değiştirme yoğunluğu, matristen fibere yük aktarımı ve fiber ile matris arasındaki termal genleşme katsayılarındaki farktan kaynaklanan artık gerilmeler gibi mekanizmaların da aynı anda dikkate alınması gerektiğini belirtmek yerinde olacaktır.

Sürünme olayının karmaşıklığını ve önemini gösteren bir başka örnek, epoksi bazlı yapısal yapıştırıcıların sürünme davranışdır. Epoksi bazlı yapısal yapıştırıcılar, yüksek ağırlık / ağırlık oranı, mükemmel yapışma özellikleri ve üstün termal kararlılıklarından dolayı yapısal parçaların montajı için kritik bir bileşen olarak ortaya çıkmıştır. Yapısal bir yapıştırıcı, yapısal bütünlüğü kaybetmeden stresi iletebilen yüksek modüllü ve mukavemete sahip yük taşıyıcı malzeme olarak tanımlanabilir. Kaynak veya cıvatalama

gibi diğer birleştirme yöntemleriyle karşılaştırıldığında, epoksi bazlı yapısal yapıştırıcılar, stres konsantrasyonlarını en aza indirirken, farklı malzemelerin birleştirilmesi ve toplam ağırlığı ve üretim maliyetlerini düşürürken, gerilmelerin geniş bir alana eşit olarak dağıtılması dahil olmak üzere olağanüstü avantajlar sağlar. Bununla birlikte, doğada viskoelastik olan epoksi reçineleri zamana bağlı benzersiz davranış sergiler. Bu, uzun vadeli yük taşıma performanslarının değerlendirilmesinde büyük endişe yaratmaktadır [29].

Sürünme Eğrisi Şekil 4.1’de verilmiştir. Sürünme diyagramı birinci bölge, ikinci bölge ve üçüncü bölge olmak üzere üç bölgeye ayrılır.

1. Bölge: Bu bölgeye “Azalan Sürünme” bölgesi de denmektedir. Yükün etkisiyle numune uzar, burada dislokasyon hareketleri gözlenir. Numunede deformasyon sertleşmesi gerçekleşir. Diğer taraftan iç gerilmeler yüksek sıcaklık nedeni ile giderilir. Deformasyon sertleşmesi söz konusu olduğu için de sürünme hızı gittikçe düşer.
2. Bölge: Bu bölgede deformasyon sertleşmesi ile kendine gelme hızı birbirine eşittir. Bu sebepten bu bölge kararlı sürünme bölgesi olarak adlandırılır. Sürünmeye karşı direnmede en yüksek değere sahip olan bölge bu bölgedir. Malzemenin sürünme hızını bulmak için bu bölgedeki eğrinin eğimi hesaplanır.
3. Bölge: Bu bölgede sürünme hızı tekrar artar. Numune boyun vermeye başlar. Hızdaki artıştan dolayı malzemenin iç yapısı değişir, boşluklar oluşur ve nihayetinde hızlı bir plastik deformasyondan bahsedilebilir. Sonunda kopma meydana gelir



Şekil 4.1 Sürünme eğrisi [30]

Sıcaklık ve gerilme artışının malzemenin sürünme davranışına etkileri aşağıdaki gibidir;

- Gerilme ve sıcaklık arttığında sürünme hızı da artar.
 - Kopmaya kadar geçen zaman sürünme ömrü olarak adlandırılır ve sürünme ömrü sıcaklık artışıyla ters orantılı olarak azalır.
 - Sıcaklık ve gerilme artışı kopmaya kadar olan toplam uzama oranını da artırır.
- Sürünme birim şekil değiştirme - zaman diyagramının II. Bölgesinin, yani kararlı bölgenin sürünme hızı, bu bölgedeki eğrinin eğimine eşittir(Eşitlik 4.1). ($d_\varepsilon/d_t=\varepsilon_s$)

$$\varepsilon_s = \tan \theta = \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (4.1)$$

Malzemenin izin verilebilecek maksimum birim şekil değiştirme değerinin (ε) ve o malzemeye ait kararlı sürünme hızının bilinmesi halinde, malzemenin emniyetle kullanılabileceği süre eşitlik 4.2 ile hesaplanabilir.

$$t = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_s} \quad (4.2)$$

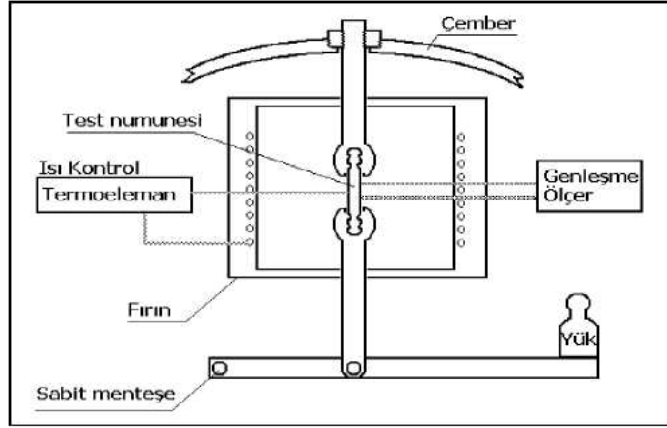
t :Zaman

ε : İzin verilebilecek birim şekil değiştirme değeri

ε_s : Sürünme hızı

4.2 Sürünme Deneyi

Sürünme deneyi malzemelerin yüksek sıcaklıklardaki davranışı hakkında en iyi bilgi veren ve yapılışı basit olmasına karşılık çok uzun zaman alan bir deneydir. Belirli bir sıcaklık ve belirli bir gerilim altında gerçekleştirilen sürünme deneyi sonucu elde edilen veriler, gerilim - kopma ömrü diyagramı şeklinde ifade edilebilir. Bu diyagramlardan yararlanarak, bir malzemenin akma mukavemetinin altındaki hangi gerilme değerinde ve hangi sıcaklık ortamında çalışmasının uygun olacağı ve malzemede meydana gelecek bir hasarın zamanının tahmin edilmesine olanak sağlar. Sürünme deneyinin şematik gösterimi Sekil 4.2'de verilmiştir.



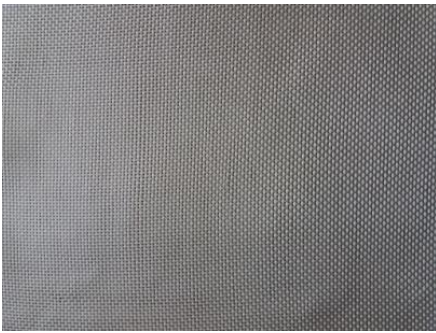
Şekil 4.2 Sürünme test cihazının çalışma prensibinin şematik görünümü [31]

5 MATERYAL VE METOD

Çeşitlik sıcaklık ve yük altında sürünme davranışlarını belirlemek amacıyla cam elyaf takviyeli polimer matrisli tabakalar üretilmiştir. Kompozit tabakaların üretim aşaması ile fiziksel ve mekanik özelliklerinin belirlenmesi için yapılan çalışmalar başlıklar halinde incelenmiştir.

5.1 Cam Elyaf Takviyeli Polimer Matrisli Kompozit Tabakaların Üretim Aşamaları

Kompozit plaka üretimi için Resim 5.1’de görülen kumaş yoğunlukları 200, 300, 500 ve 800 gr/m² olan elyaf kumaşlar seçilmiştir. Reçine malzemesi olarak Resin 828 Lvel epoksi reçine, sertleştirici olarak da Curing Agent 866 kullanılmıştır. Reçine ve sertleştiricinin özellikleri Çizelge 5.1’de verilmiştir. Reçinenin sertleştiriciye oranı 100:80 olarak alınmıştır. Kompozit plakalar İzmir’de bulunan İzoreel Kompozit İzole Malzemeler San. Tic. Ltd. firmasında el yatırma metodu ile üretilmiştir. Dokunan kumaşlar 50x50 cm ölçülerinde kesilerek tabakalar arasına reçine ve sertleştirici ilave edilmiş, Resim 5.2’deki Piton serisi KP2 pres cihazında 120 °C sıcaklık altında 3 saat boyunca 0,3 MPa basınç altında bekletilmiş ve sonra oda sıcaklığına dek soğumaya bırakılmıştır.



a)200 gr/m²



b)300 gr/m²



c) 500 gr/m²



c) 800 gr/m²

Resim 5.1. Üretimde kullanılan cam elyaf takviyeli dokuma kumaşlar

Çizelge 5.1. Reçine ve sertleştirici malzemenin özellikleri

Özellikler	Resin 828 Lvel	Curing Agent 866
25°C'de Vizkosite mPa.s	10000 ± 2000	60 ± 5
40°C'de Vizkosite mPa.s	950 ± 50	25 ± 5
60°C'de Vizkosite mPa.s	175 ± 25	7 ± 3
20°C'de Vizkosite mPa.s		1,21 ± 0,02



Resim 5.2. Piton serisi KP2 pres cihazı

5.2 Deneysel Çalışmalar

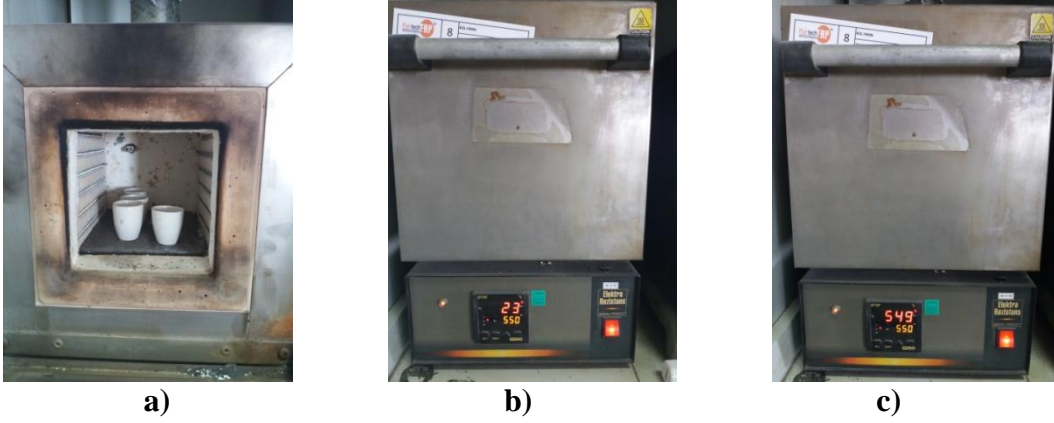
Üretilmiş olan cam elyaf takviyeli polimer matrisli kompozit malzemelerin fiziksel ve mekaniksel özelliklerini belirlemek için kalsinasyon, çekme ve eğme deneyleri yapılmıştır.

5.2.1 Kalsinasyon deneyleri

Elyaf takviye oranını bulabilmek amacıyla Uşak Karma Organize Sanayi Bölgesi'nde bulunan Pull Tech Frp Kompozit Yapı Tekn.İmalat San.Tic.A.Ş firmasının laboratuvarında kalsinasyon deneyleri yapılmıştır. Elyaf kumaş yoğunluğu farklı 4 tabakadan, TS 1177 EN ISO 1172 (Tekstil - Cam Takviyeli Plâstikler - Prepregler, Kalıplama Hamurları Ve Lâminantlar - Tekstil - Cam ve Mineral Dolgu Muhtevasının Tayini Kalsinasyon Metotları) [32] standardına göre kesilen numunlerin ağırlıkları Resim 5.3'te görüldüğü gibi hassas terazide ölçülmüştür. Daha sonra Elektra Rezistans marka kalsinasyon deney cihazına Resim 5.4'teki gibi yerleştirilmiştir. Kademeli olarak 550°C (Resim 5.4) sıcaklığa yükseltildikten sonra 45 dk süre ile bekletilerek yalnızca cam elyafların kalması sağlanmıştır. Deney sonucunda reçinelerden arındırılmış numune görünüşleri Resim 5.5'te gösterilmiştir.



Resim 5.3. Hassas terazide yapılan ölçümlerden biri



Resim 5.4. Kalsinasyon deney cihazı a) Numunelerin yerleştirilmesi b)/c) Kademeli sıcaklık artışı

Her numune için cam muhtevası M_{cam} , başlangıç kütlesinin yüzdesi olarak aşağıdaki Eşitlik 5.1 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$M_{cam} = \frac{m_3 - m_1}{m_2 - m_1} \times 100 \quad (5.1)$$

Burada;

m_1 : Kuru kayıkçık veya krozenin başlangıç kütlesi, (g)

m_2 : Kuru kayıkçık veya krozenin ve kurutulmuş numunenin başlangıç kütlesi, (g)

m_3 : Kayıkçık veya kroze ve kalsinasyon işleminden sonraki kalıntının son kütlesi, (g) dir.

Kalsinasyon deney sonuçlarına göre elde edilen hacim oranları Çizelge 5.2.'de verilmiştir. Bu tabloya göre en yüksek elyaf oranı ağırlığı 200 gr/ m² olan numunede %77,8 olarak bulunmuştur.

Çizelge 5.2. Numunelerin elyaf ağırlık oranları (%)

Numune elyaf kumaş yoğunluğu	200 gr/m ²	300 gr/m ²	500 gr/m ²	800 gr/m ²
Elyaf ağırlık oranı (%)	77,8	76,6	75,5	75,6



Resim 5.5. Numunelerin kül fırınından çıktıktan sonraki görüntüleri

5.2.2 Çekme deneyi

Malzemelerin mekanik özelliklerini belirlemek için yapılan en yaygın deneylerden biri çekme deneyidir. Çekme deneyi, malzemelerin sabit bir yük altında elastik ve plastik davranışlarının tespit edilmesine olanak sağlar. Çekme deneyi, standartlara uygun olarak kesilmiş numunelerin çekme deney cihazının aşağı ve yukarı yönde hareket eden çenelerine bağlanmasının akabinde çenelerden birinin sabit hızda hareket ettirilerek numuneye çekme kuvveti uygulaması ve bu kuvvete karşılık gelen uzamanın kaydedilmesi prensibine uygun olarak yapılır.

Gerilme (σ): Birim alana etkiyen yükü ifade eder. Eşitlik 5.2'deki formül ile hesaplanır.

$$\sigma = \frac{P}{A_0} \quad (5.2)$$

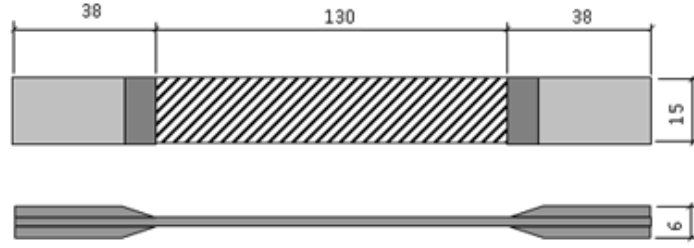
Birim şekil değiştirme (ε) : Malzemeye yük uygulandığında oluşan boy değişiminin ilk boya oranıdır ve Eşitlik 5.3'teki gibi hesaplanır.

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (5.3)$$

Elastisite Modülü (E): Birim uzama başına gerilme olarak tanımlanan elastisite modülü malzemeye ait karakteristik bir özelliktir ve Eşitlik 5.4'te verilen formül ile bulunur.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (5.4)$$

Çekme deneyi uygulanacak olan 4 farklı ağırlıktaki tabakalardan her biri için 3'er adet numune, ASTM D3039 (Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials) [33] standardına göre Şekil 5.1'deki ölçülerde kesilmiştir.



Şekil 5.1. Çekme deneyi numunesi ölçüleri

Standarda uygun kesilen Resim 5.6'da bir örneği bulunan numuneler Uşak Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği bölümüne ait laboratuarda bulunan Resim 5.7'de görülen Besmak marka çekme deney cihazında deneye tabi tutulmuştur. Deneyler, oda sıcaklığında dakikada 1 mm şekil değiştirme hızı ile yapılmıştır. Deney yapılırken numunenin görseli Resim 5.8'de, deney sonrası numunenin görüntüsü ise Resim 5.9'da verilmiştir.



Resim 5.6. Çekme deney numunesi örneği



Resim 5.7. Çekme deneyi cihazı



Resim 5.8 Deneyin yapılışı esnasında çekilen görüntü



Resim 5.9. Çekme deneyi sonrasında numunenin görüntüsü

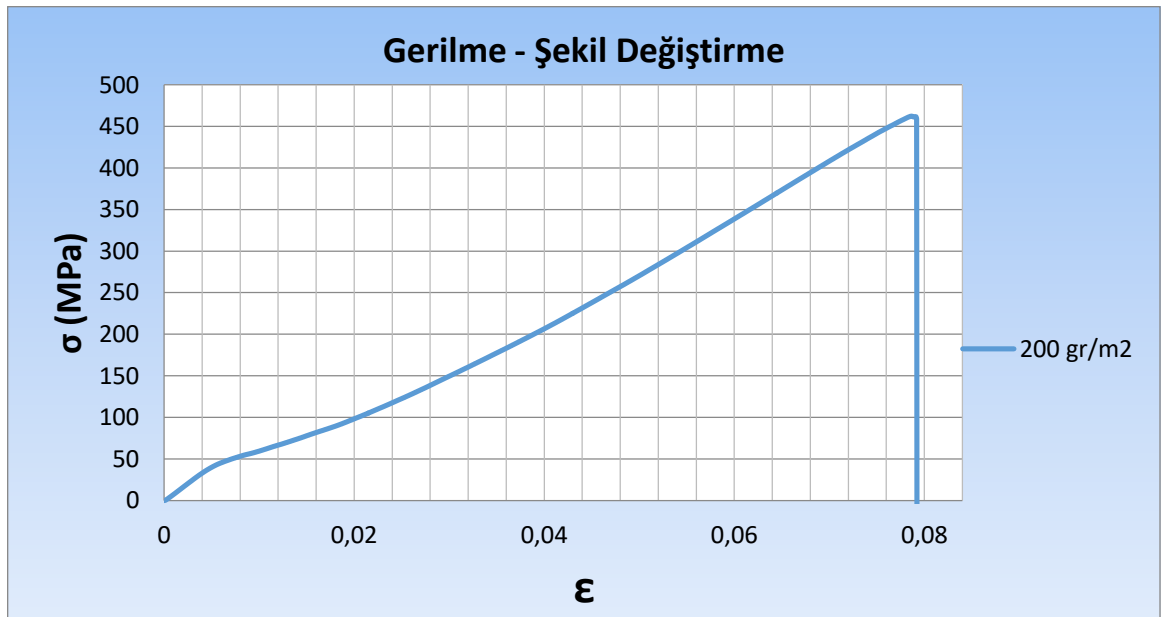
Üretilen kompozit plakalardan standarda göre kesilen deney numunelerinin çekme deneyi cihazındaki deneyleri sonucunda kompozit malzemelerin çekme dayanımı değerleri tespit edilmiştir.

4 farklı yoğunluktaki malzemedan 3'er adet numune ile gerçekleştirilen çekme deneyi sonucuna göre ortalama çekme dayanımları aşağıdaki Çizelge 5.3'te verilmiştir.

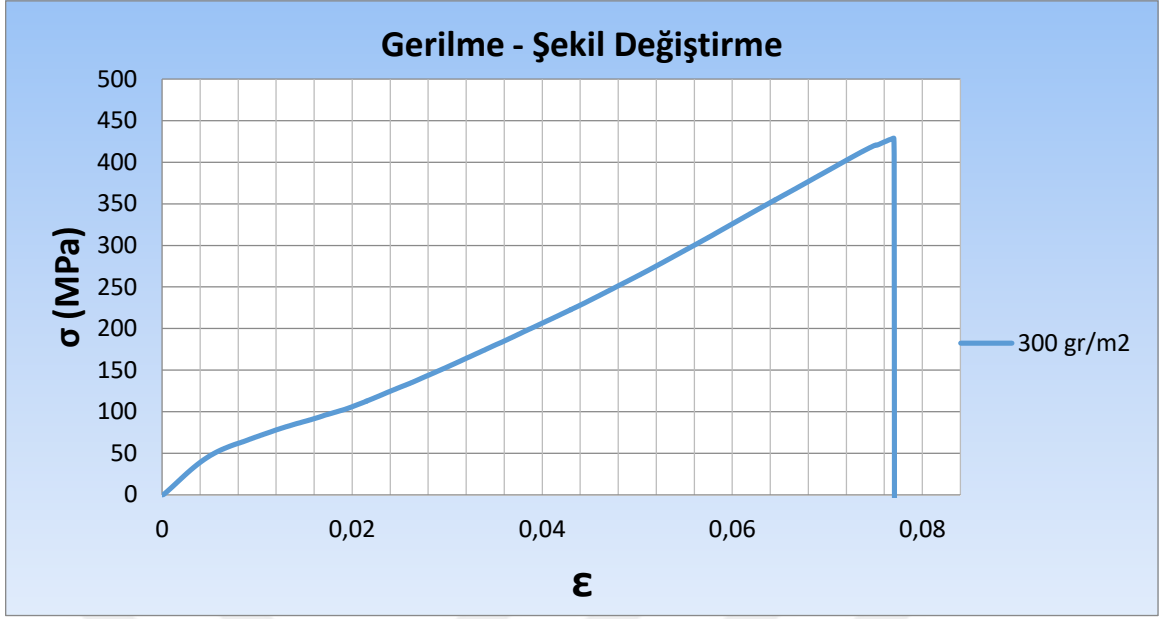
Çizelge 5.3. Çekme deneyi sonucunda elde edilen ortalama çekme dayanımı değerleri

Numune elyaf kumaş yoğunluğu	200 gr/m ²	300 gr/m ²	500 gr/m ²	800 gr/m ²
Ortalama Çekme Dayanımı (MPa)	463	429	405	331

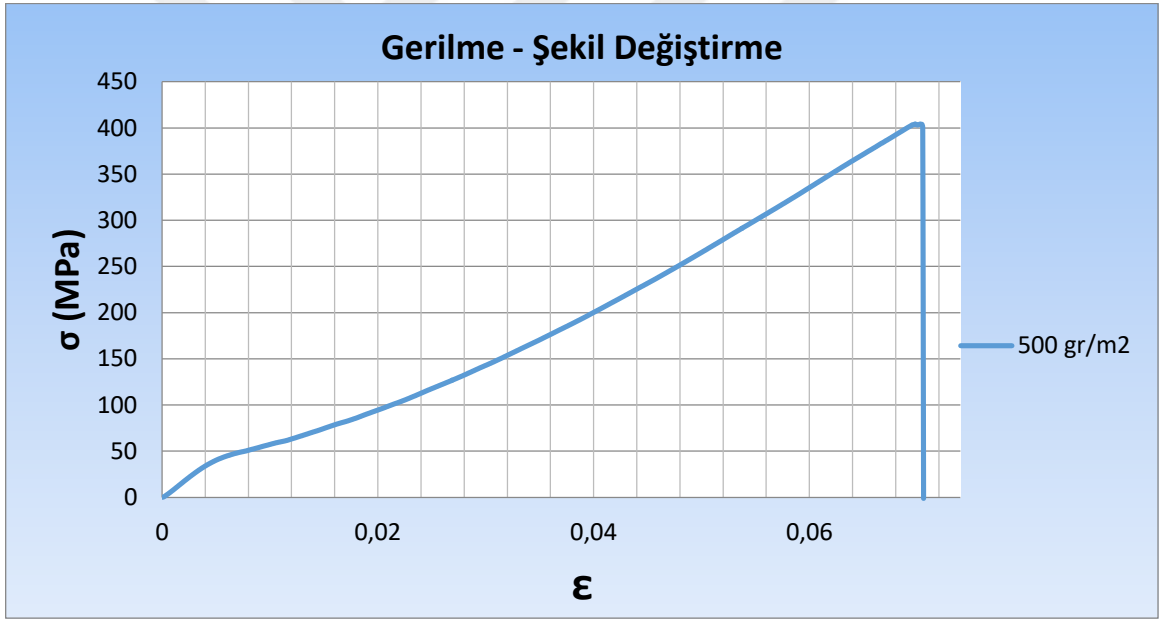
Çekme deneyi esnasında, çekme deney cihazında elde edilen numunelere ait gerilme-şekil değiştirme diyagramları Şekil 5.2'de sunulmuştur. Deney sonuçlarına bakıldığında elyaf kumaş yoğunluğu en düşük olan malzemenin çekme dayanımının 463 MPa ile diğerlerinden daha yüksek olduğu sonucu ortaya çıkmıştır. En düşük çekme dayanımı değeri ise elyaf kumaş yoğunluğu 800 gr/m² olan kompozit malzemede elde edilmiştir. Bunun sebebi, bu kompozit malzemelerde kullanılan cam elyaf fitillerinin tex numaralarının daha büyük olmasından dolayı matris malzemesi ile elyaflarının bütünlük oluşturamamasıdır.



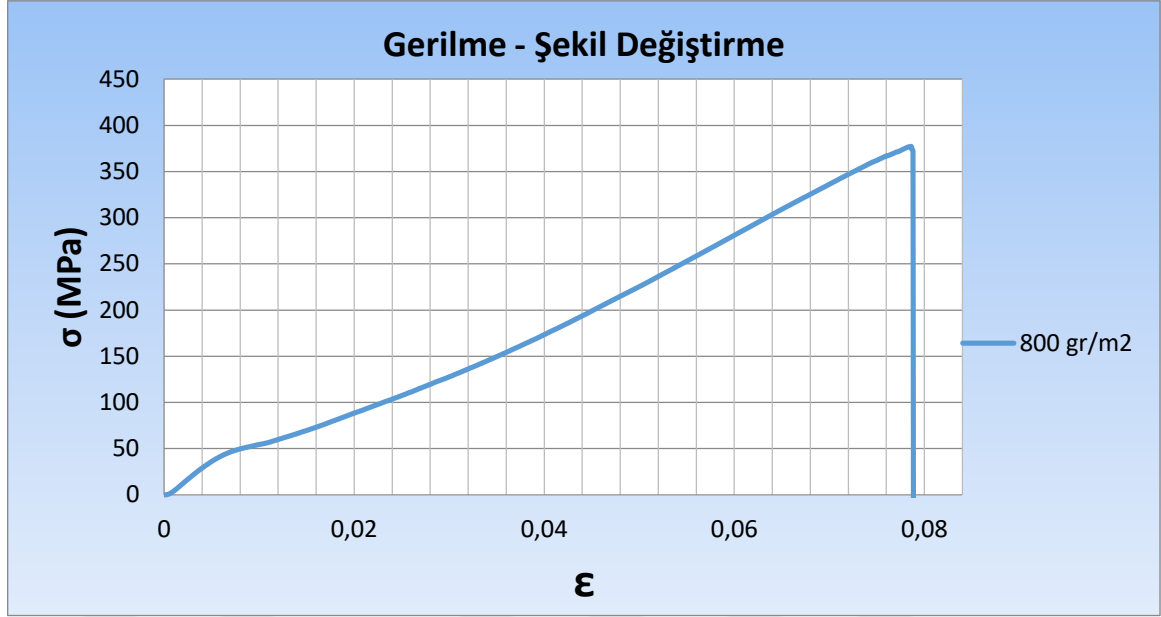
a)



b)



c)



d)

Şekil 5.2. Çekme deneyi sonucunda elde edilen numunelere ait gerilme-şekil değişirme diyagramları

- a) 200 gr/m² yoğunluklu numune için gerilme-şekil değişirme diyagramı
- b) 300 gr/m² yoğunluklu numune için gerilme-şekil değişirme diyagramı
- c) 500 gr/m² yoğunluklu numune için gerilme-şekil değişirme diyagramı
- d) 800 gr/m² yoğunluklu numune için gerilme-şekil değişirme diyagramı

5.2.3 Eğme deneyi

Eğilmeye karşı mekanik özellikleri belirlemek amacıyla malzemeler eğilme deneyine tabii tutulur. Numuneye bir kuvvet uygulandığında, numunenin bir kısmında basma gerilmesi, diğer kısmında ise çekme gerilmesi oluşuyorsa numune eğilme halindedir ve böyle bir malzemenin iç yüzeyine yakın bölgesinde basma gerilmesi, dış yüzeye yakın bölgelerde ise çekme gerilmesi meydana gelmektedir.

Deney sonucunda verileri hesaplamak için uygulanan yükü miktarı ile eğilme miktarının ölçülmesi ve mesnetler arası mesafenin bilinmesi gerekmektedir.

Eğme momenti ve eğme dayanımı 5.5 ve 5.6'da verilen formüller ile hesaplanmaktadır.

$$M_e = \frac{F.L_s}{4} \quad (5.5)$$

M_e : Eğme momenti [kg.mm] [N.m]

F: Uygulanan kuvvet (P) [kg] [N]

L_s : Mesnet merkezleri arasındaki uzaklık [mm] [m]

$$\sigma_e = \frac{M.y}{I} \quad (5.6)$$

σ_e : Eğme Dayanımı [N/m²]

M: Eğme Momenti [N.m]

y: Numunenin en dış yüzeyinden uzaklık [m]

I :Nötr eksene göre eylemsizlik momenti

Dikdöğren numune için y ve I değerleri 5.7 ve 5.8’de verilen formüller ile hesaplanır.

$$y = \frac{h}{2} \quad (5.7)$$

$$I = \frac{w.h^3}{12} \quad (5.8)$$

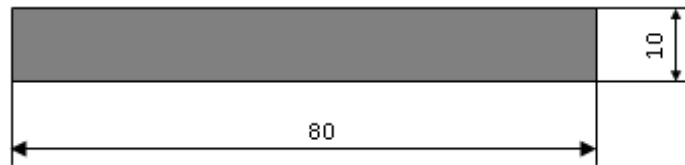
h: Numune kalınlığı / yüksekliği [mm]

w: Numune genişliği [mm]

Bu durumda eğme dayanımı 5.9’da verilen eşitlik yardımı ile bulunur:

$$\sigma_e = \frac{3.F.L}{2.w.h^2} \quad (5.9)$$

Sürünme deneyine tabi tutulacak olan malzemelerin eğilmeye karşı mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla 4 farklı yoğunluktaki (200 gr/m², 300 gr/m², 500 gr/m², 800 gr/m²) elyaf takviyeli polimer matrisli kompozit malzemedan ASTM D7264 (Standard Test Method for Flexural Properties of Polymer Matrix Composite Materials) [34] standartlarına göre 3’er adet numune hazırlanmıştır.

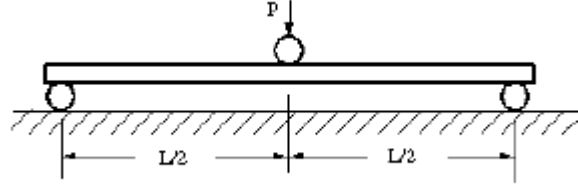


Şekil 5.3. Eğme deney numunesinin ölçüleri

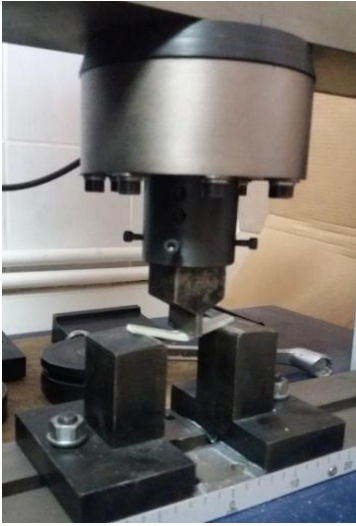


Resim 5.10. Eğme deney numunesi örneği

Testere ile Şekil 5.3'te verilen ölçülerde numunelerin kesimleri yapılmıştır, örnek bir numunenin görseli Resim 5.10'da verilmiştir. Numuneler Resim 5.11.'de görseli bulunan üç nokta eğme deney cihazı ile Şekil 5.4'te şematik gösterimi bulunan üç nokta eğme deneyine tabii tutulmuştur. Temsili bir numunenin deneye tabii tutulmadan önceki ve sonraki şekli Resim 5.12'de verilmiştir.



Şekil 5.4. Üç nokta eğme deneyinin şematik gösterimi



Resim 5.11. Eğme deney cihazı



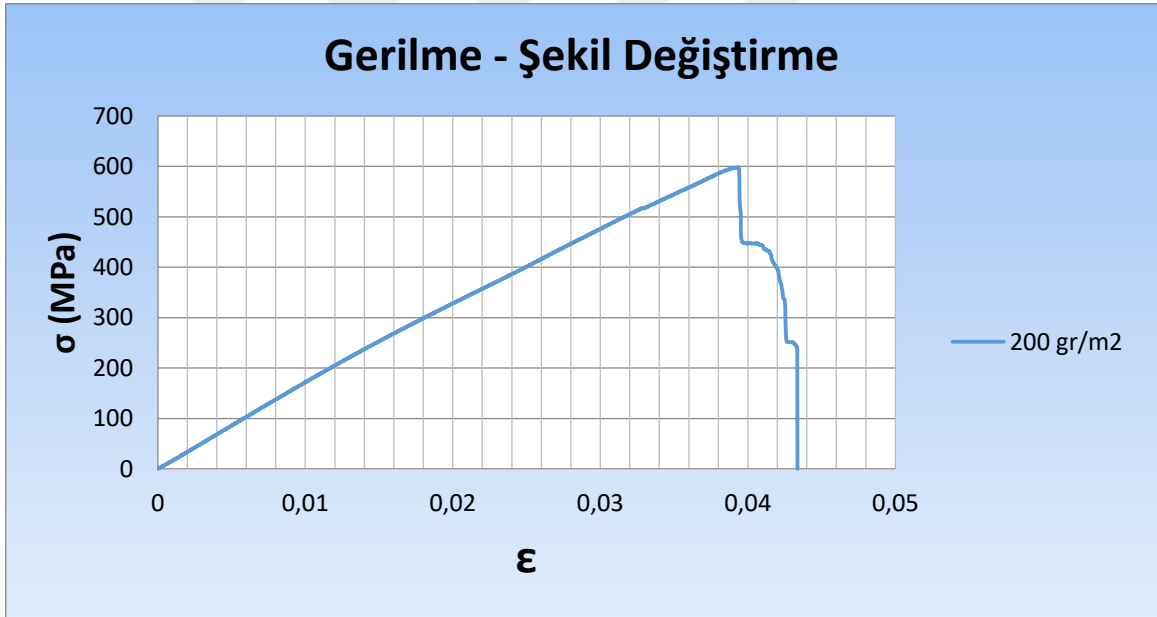
Resim 5.12. Numunenin eğme deneyi öncesi ve sonrasındaki görüntüsü

Üç farklı yoğunluktaki malzemeden 3'er adet numune ile gerçekleştirilen üç nokta eğme deneyi sonucuna göre ortalama eğme dayanımları Çizelge 5.4'te verilmiştir.

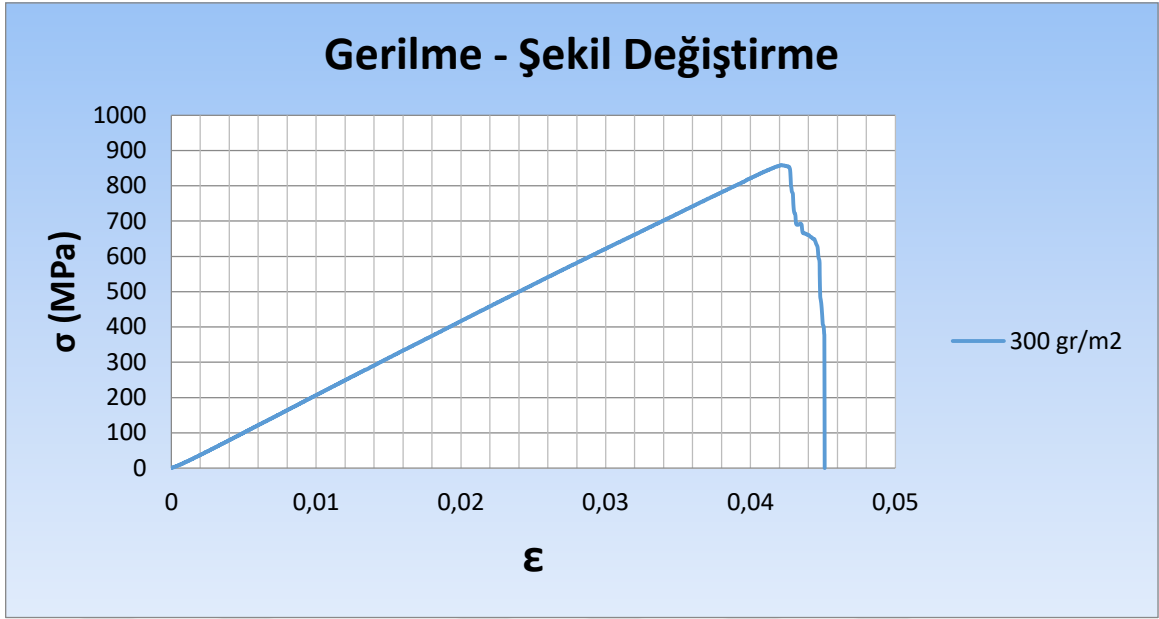
Çizelge 5.4. Üç nokta eğme deneyi sonucunda elde edilen ortalama eğme dayanımı değerleri

Numune elyaf kumaş yoğunluğu	200 gr/m ²	300 gr/m ²	500 gr/m ²	800 gr/m ²
Ortalama Eğme Dayanımı (MPa)	603	865	723	541

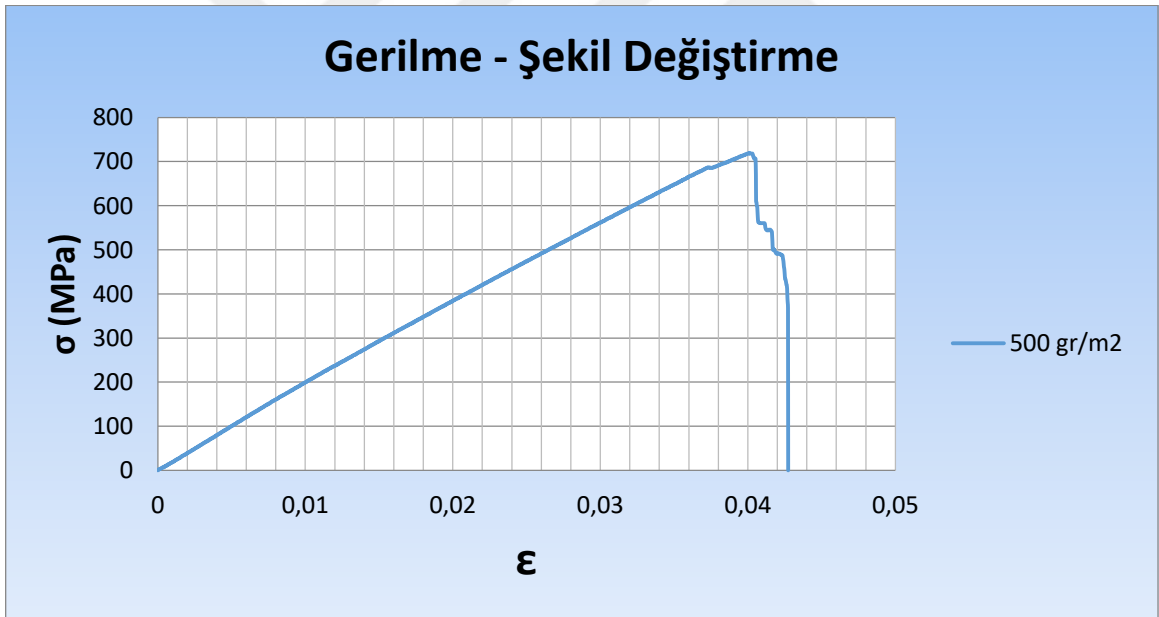
Eğme deneyi esnasında, eğme deney cihazında elde edilen numunelere ait gerilme-şekil değiştirme diyagramları Şekil 5.5'te sunulmuştur. Deney sonuçlarına bakıldığında elyaf kumaş yoğunluğu en yüksek olan malzemenin eğilme dayanımının 541 MPa ile diğerlerinden daha düşük olduğu sonucu ortaya çıkmıştır. En yüksek eğilme dayanımı değeri ise elyaf kumaş yoğunluğu 300 gr/m² olan kompozit malzeme elde edilmiştir.



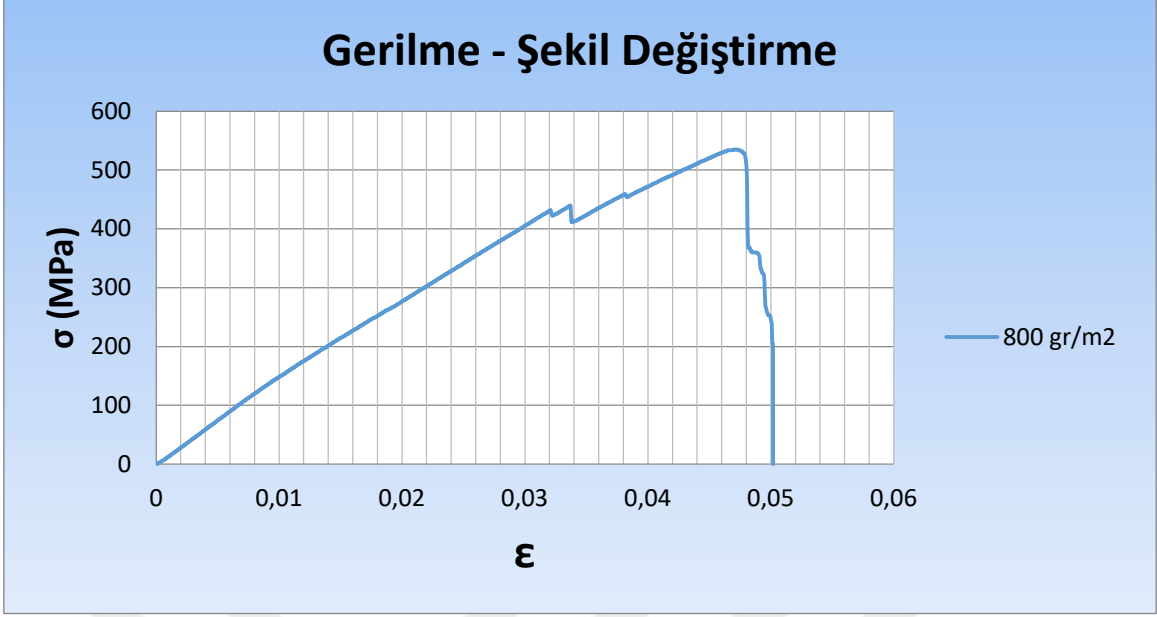
a)



b)



c)



d)

Şekil 5.5. Üç nokta eğme deneyi sonucunda elde edilen numunelere ait gerilme-şekil değiştirme diyagramları

- a) 200 gr/m² yoğunluklu numune için gerilme-şekil değiştirme diyagramı
- b) 300 gr/m² yoğunluklu numune için gerilme-şekil değiştirme diyagramı
- c) 500 gr/m² yoğunluklu numune için gerilme-şekil değiştirme diyagramı
- d) 800 gr/m² yoğunluklu numune için gerilme-şekil değiştirme diyagramı

Yapılan kalsinasyon deneyine ait veriler ile çekme ve eğme deneylerinde elde edilen ortalama çekme ve eğme dayanımları Çizelge 5.5'te gösterilmiştir. Bu deney sonuçlarına göre elyaf kumaş yoğunluğu 200 gr/m² olan numunelerin elyaf ağırlık oranı ve ortalama çekme dayanımı değeri diğer numunelere göre daha yüksek iken eğme dayanımı daha düşüktür. Elyaf kumaş yoğunluğu arttıkça çekme dayanımının azaldığı görülmektedir. Elyaf kumaş yoğunluğu yüksek olan numunelerde cam elyaf fitillerinin tex numaralarının daha büyük olmasından dolayı matris malzemesi ile elyaflarının bütünlük oluşturamaması çekme dayanımının düşmesine sebep olması muhtemeldir. Eğme dayanımı değerleri incelendiğinde ise 300 gr/m² elyaf yoğunluğundaki malzemenin en yüksek eğme dayanımına sahip olduğu, 800 gr/m² elyaf kumaş yoğunluğundaki malzemenin ise en düşük çekme dayanımına sahip olduğu gibi en düşük eğme dayanımına da sahip olduğu gözlemlenmiştir. 800 gr/m² elyaf kumaş yoğunluklu malzemenin en düşük eğme

dayanımına sahip malzeme elyaf kumaş yoğunluğu 200 gr/m² olarak tespit edilmiştir. Buradan yola çıkarak elyaf kumaş yoğunluğu ile eğme dayanımı arasında doğrusal bir ilişki gözlemlenmemiştir.

Çizelge 5.5. Kalsinasyon, çekme ve eğme deney sonuçları

Numune elyaf kumaş yoğunluğu	Elyaf ağırlık oranı (%)	Çekme Dayanımı (MPa)	3 Nokta Eğme Dayanımı (MPa)
200 gr/m ²	77,8	463	603
300 gr/m ²	76,6	429	865
500 gr/m ²	75,6	405	723
800 gr/m ²	75,6	331	541

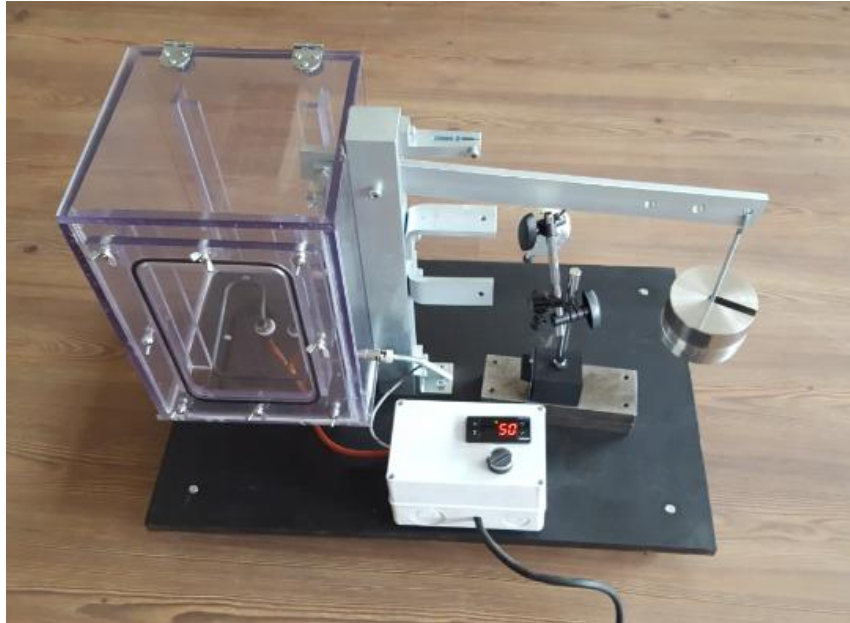
6 SÜRÜNME DENEYİ

6.1 Deney Standardı

Bu tez kapsamındaki sürünme deneyleri çekme zorlaması altında ASTM D 2990-01 (Standard Test Methods for Tensile, Compressive, and Flexural Creep and Creep-Rupture of Plastics) [35] deney standardına göre gerçekleştirilmiştir.

6.2 Sürünme Deney Cihazı

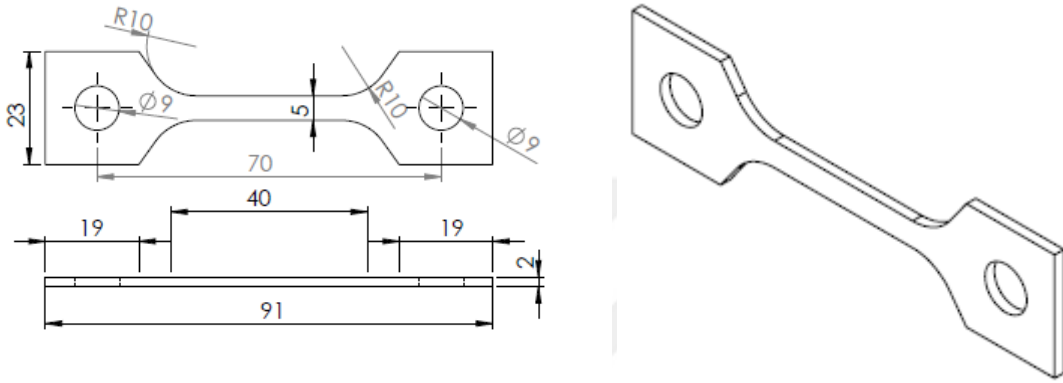
Sürünme deneyleri Uşak Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü laboratuvarında bulunan sürünme deney cihazında gerçekleştirilmiştir. Ağırlık kontrollü bu sürünme deney cihazında deney ortamının sıcaklığı 100°C' ye kadar yükseltilebilmektedir. Deney cihazının görseli Resim 6.1'de verilmiştir.



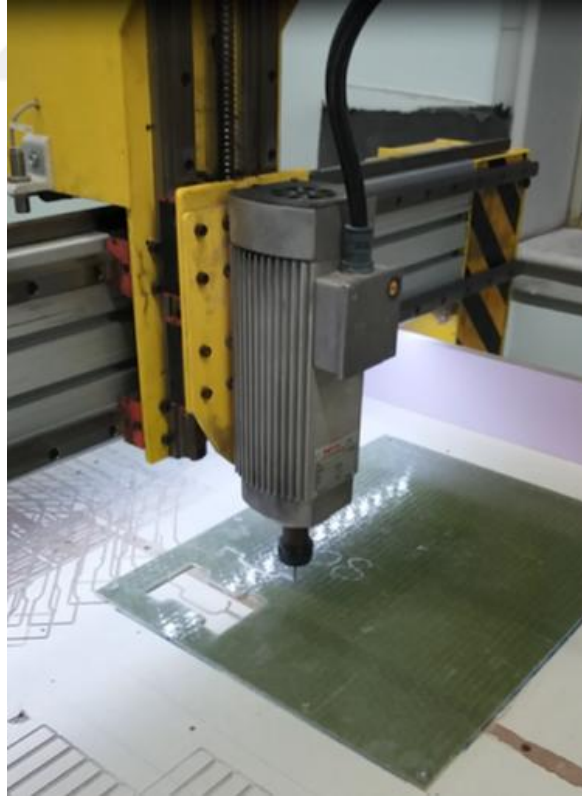
Resim 6.1. Sürünme deney cihazı görseli

6.3 Deney Numuneleri

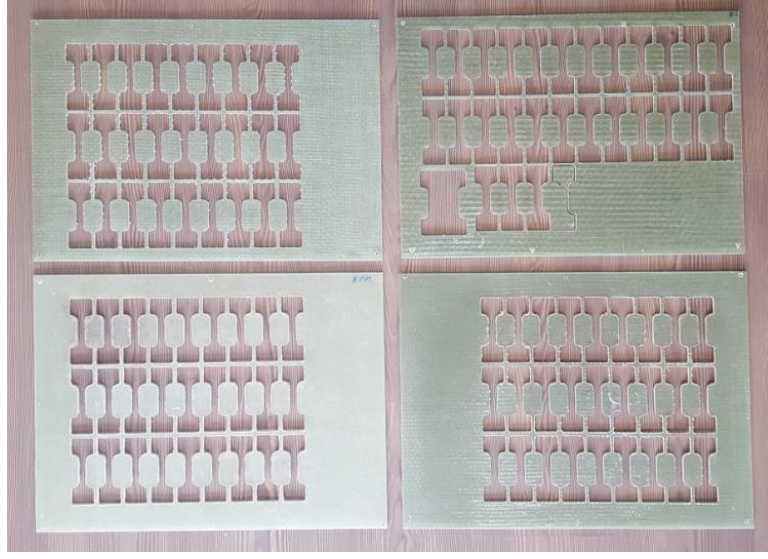
Sürünme deney numuneleri, üretilen kompozit tabakalardan standarda göre Şekil 6.1’de teknik resimde verilen boyutlarda Resim 6.2’de gösterilen CNC tezgâhında kesilmiştir. Tabakaların CNC tezgahındaki kesim işleminden sonraki görüntüleri Resim 6.3’te, sürünme deney numunelerinin birer örneği ise Resim 6.4’te verilmiştir.



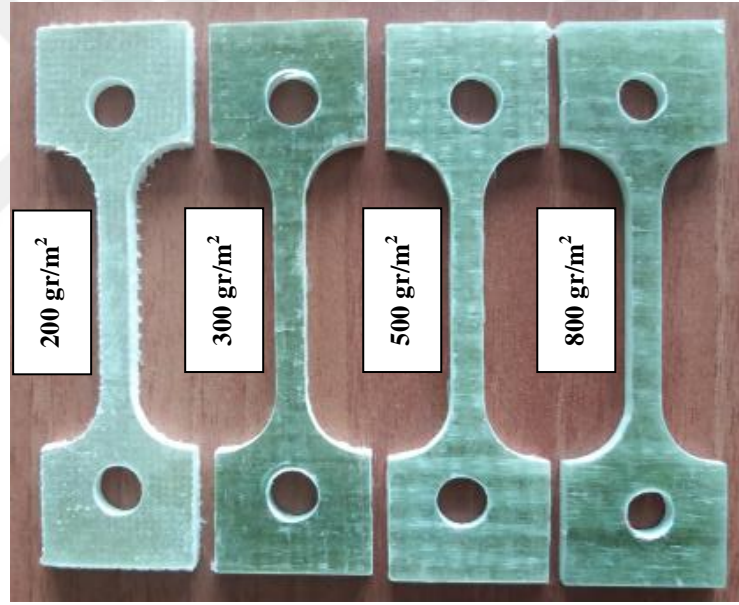
Şekil 6.1. Sürünme numunesinin teknik resmi



Resim 6.2. Deney numunelerinin CNC tezgâhında kesilmesi



Resim 6.3. Tabakaların CNC kesim işleminden sonraki görüntüsü



Resim 6.4. Yoğunluklarına göre örnek birer numune görseli

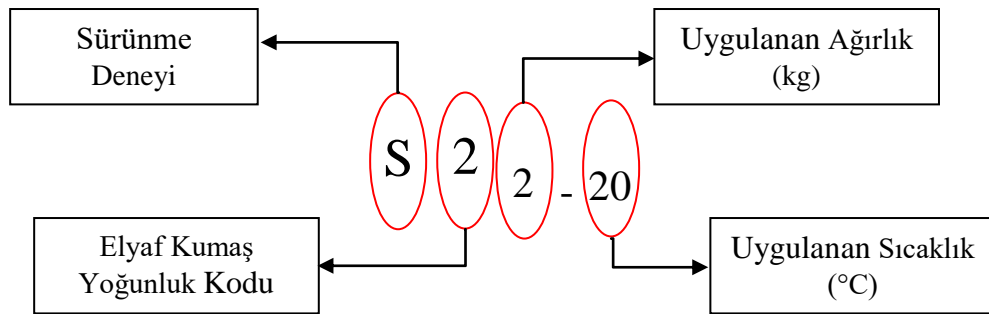
6.4 Sürünme Deney Programı

Farklı yoğunluktaki deney numuneleri sırasıyla 20°C, 30°C, 40°C, 50°C sıcaklık altında 2 kg, 4 kg ve 6 kg yüke maruz bırakılmıştır. Resim 6.5'te 800 gr/m² elyaf kumaş yoğunluğuna sahip numunelerin deney programına göre gruplanmış görseli bulunmaktadır.



Resim 6.5. 800 gr/m² elyaf kumaş yoğunluğuna sahip numuneler

Deney numuneleri Şekil 6.2'de bulunan örnekte gösterildiği gibi kodlanmıştır. Çizelge 6.1'de deney programı yer almaktadır.



Şekil 6.2. Deney numunelerinin kodlama mantığının gösterimi

Çizelge 6.1. Deney programı

S2 ₂₋₂₀	S3 ₂₋₂₀	S5 ₂₋₂₀	S8 ₂₋₂₀
S2 ₂₋₃₀	S3 ₂₋₃₀	S5 ₂₋₃₀	S8 ₂₋₃₀
S2 ₂₋₄₀	S3 ₂₋₄₀	S5 ₂₋₄₀	S8 ₂₋₄₀
S2 ₂₋₅₀	S3 ₂₋₅₀	S5 ₂₋₅₀	S8 ₂₋₅₀
S2 ₄₋₂₀	S3 ₄₋₂₀	S5 ₄₋₂₀	S8 ₄₋₂₀
S2 ₄₋₃₀	S3 ₄₋₃₀	S5 ₄₋₃₀	S8 ₄₋₃₀
S2 ₄₋₄₀	S3 ₄₋₄₀	S5 ₄₋₄₀	S8 ₄₋₄₀
S2 ₄₋₅₀	S3 ₄₋₅₀	S5 ₄₋₅₀	S8 ₄₋₅₀
S2 ₆₋₂₀	S3 ₆₋₂₀	S5 ₆₋₂₀	S8 ₆₋₂₀
S2 ₆₋₃₀	S3 ₆₋₃₀	S5 ₆₋₃₀	S8 ₆₋₃₀
S2 ₆₋₄₀	S3 ₆₋₄₀	S5 ₆₋₄₀	S8 ₆₋₄₀
S2 ₆₋₅₀	S3 ₆₋₅₀	S5 ₆₋₅₀	S8 ₆₋₅₀

Sürünme deneyleri yukarıda belirtilen sıcaklık ve ağırlık değerleri altında gerçekleştirilmiş ve numunelere ilişkin sürünme sabiti $\epsilon(\%)$ değerleri aşağıdaki Eşitlik 6.1 yardımı ile bulunmuştur.

$$\epsilon(\%) = \frac{\Delta L}{L_0} 100 \quad (6.1)$$

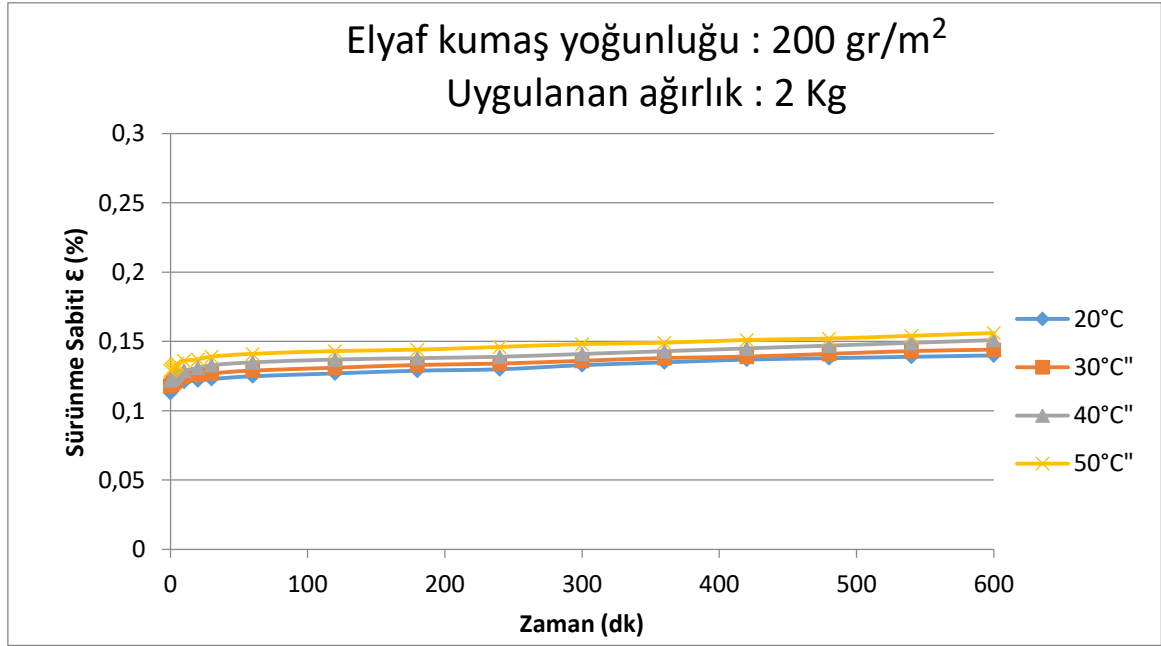
$\epsilon(\%)$: Sürünme Sabiti

ΔL : Numune boyundaki değişme

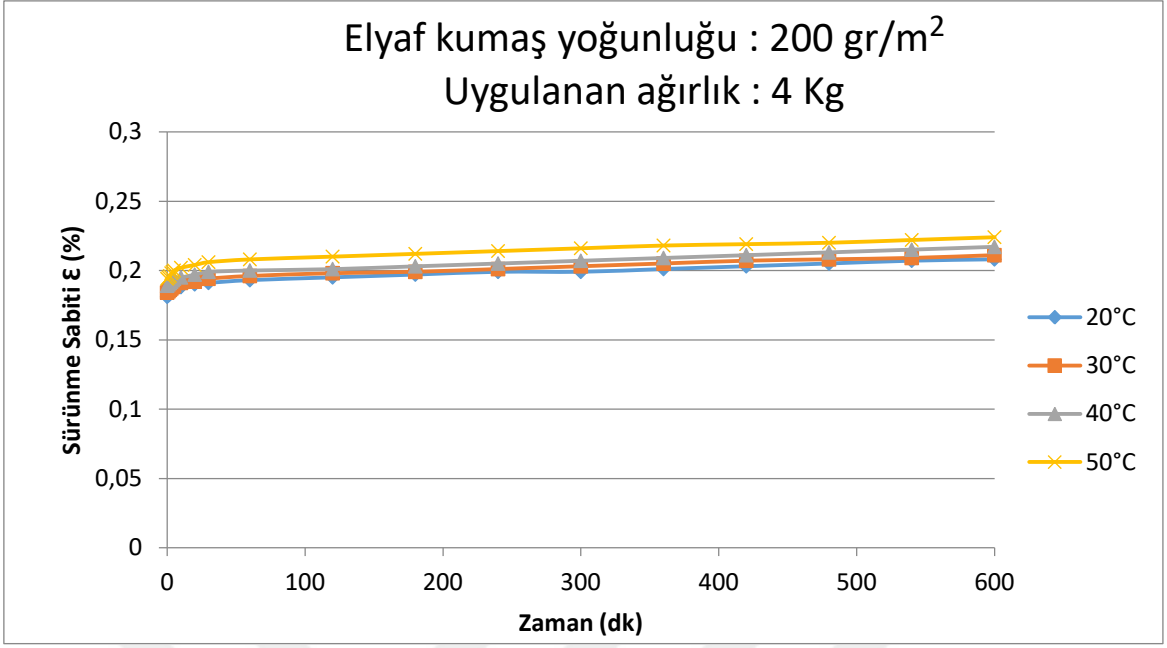
L_0 : Numunenin başlangıç boyu

6.5 Sürünme Deney Sonuçları

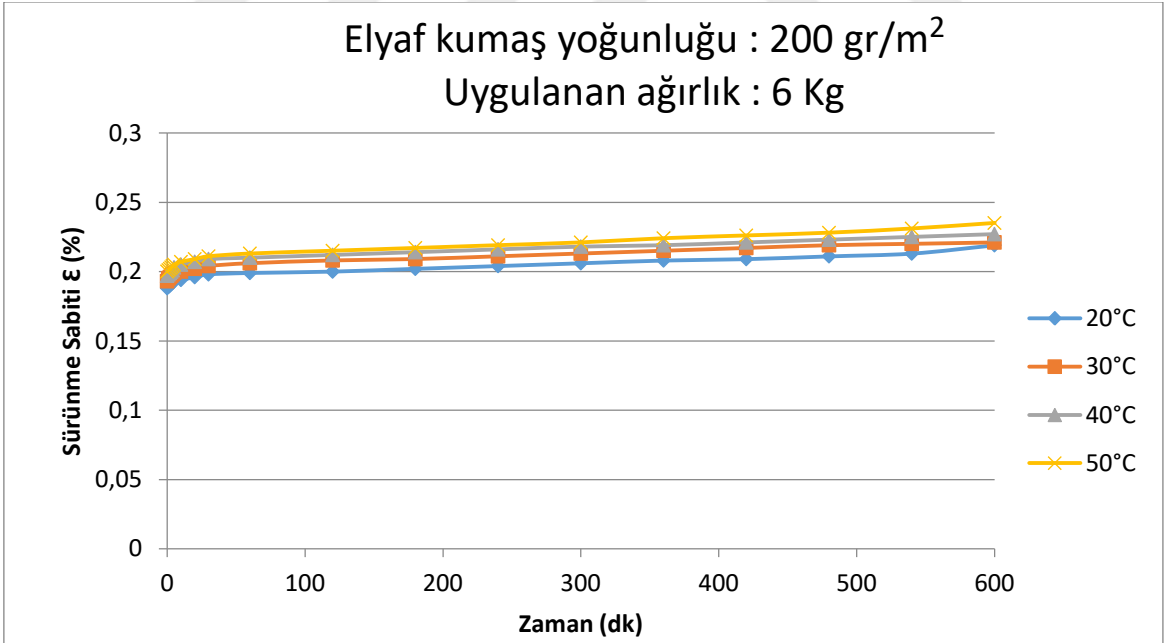
Çizelge 6.1'deki deney programı kapsamında sürünme deneyleri gerçekleştirilmiş ve her bir numune için deney süresince belirli aralıklarla kompratörden alınan değerler sayesinde elde edilen veriler Şekil 6.3'te yer alan grafiklere dönüştürülmüştür. Şekil 6.3'te yer alan grafiklerde Çizelge 6.1'deki deney programına karşılık gelen her bir senaryo için sürünme deneyine tabii tutulan malzemelerin sürünme sabiti değerleri görülmektedir.



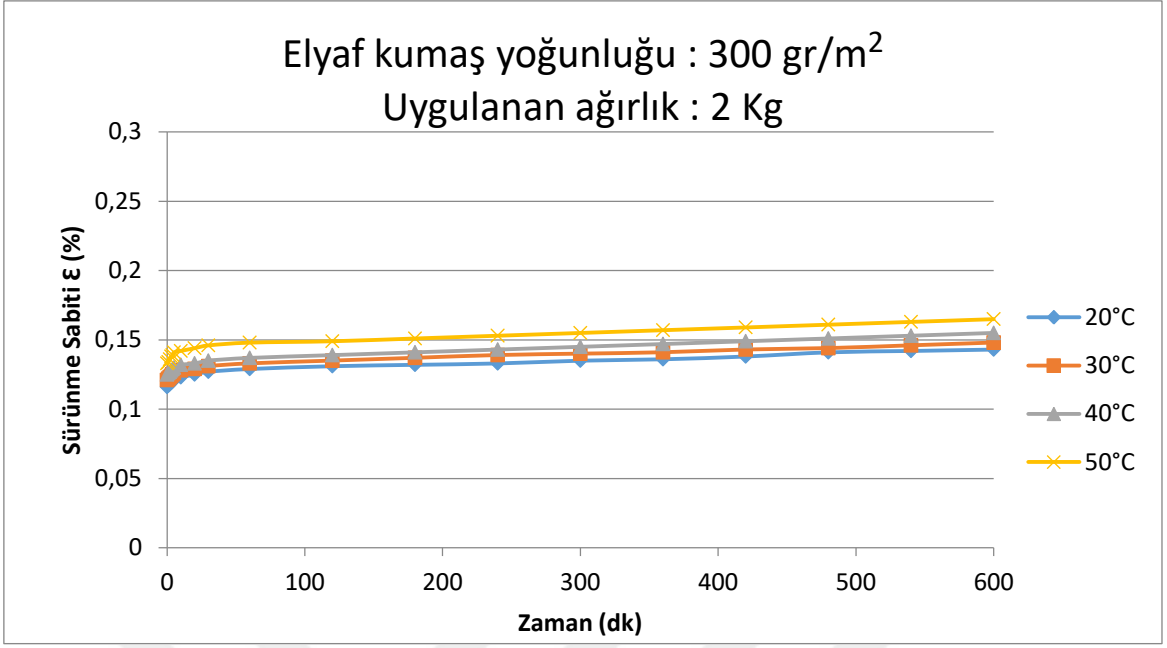
a)



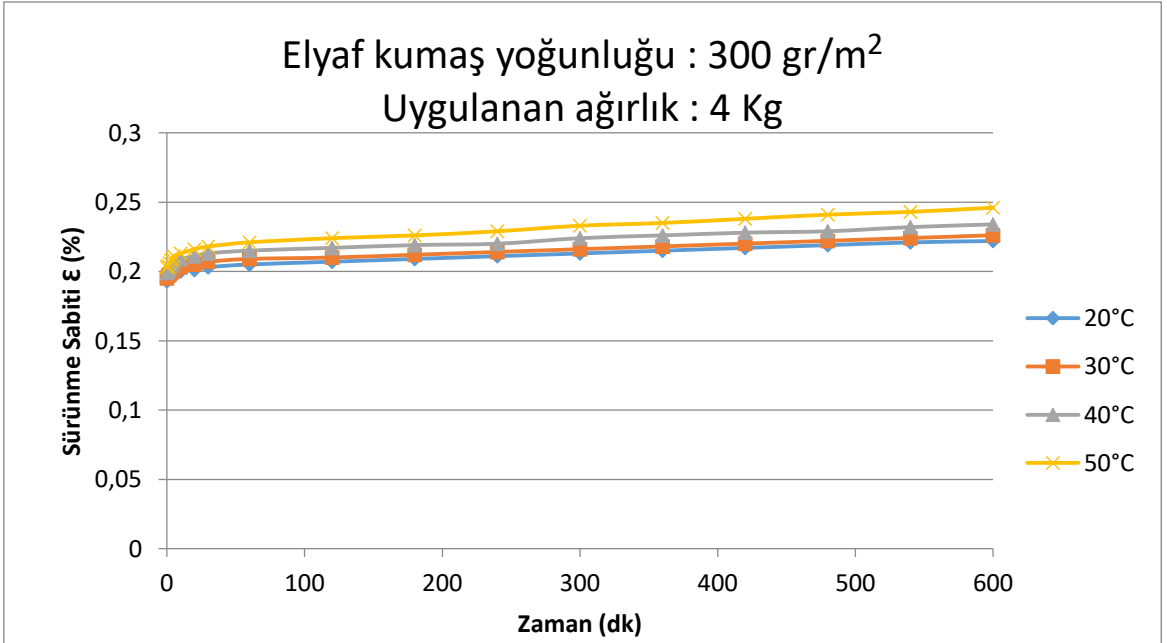
b)



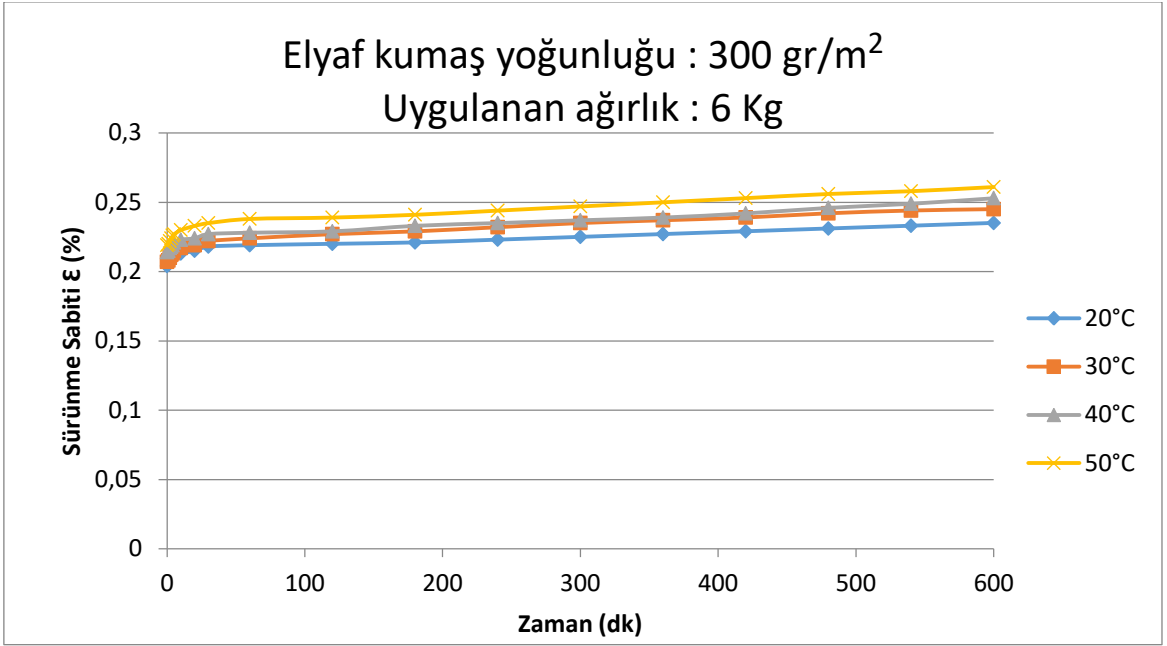
c)



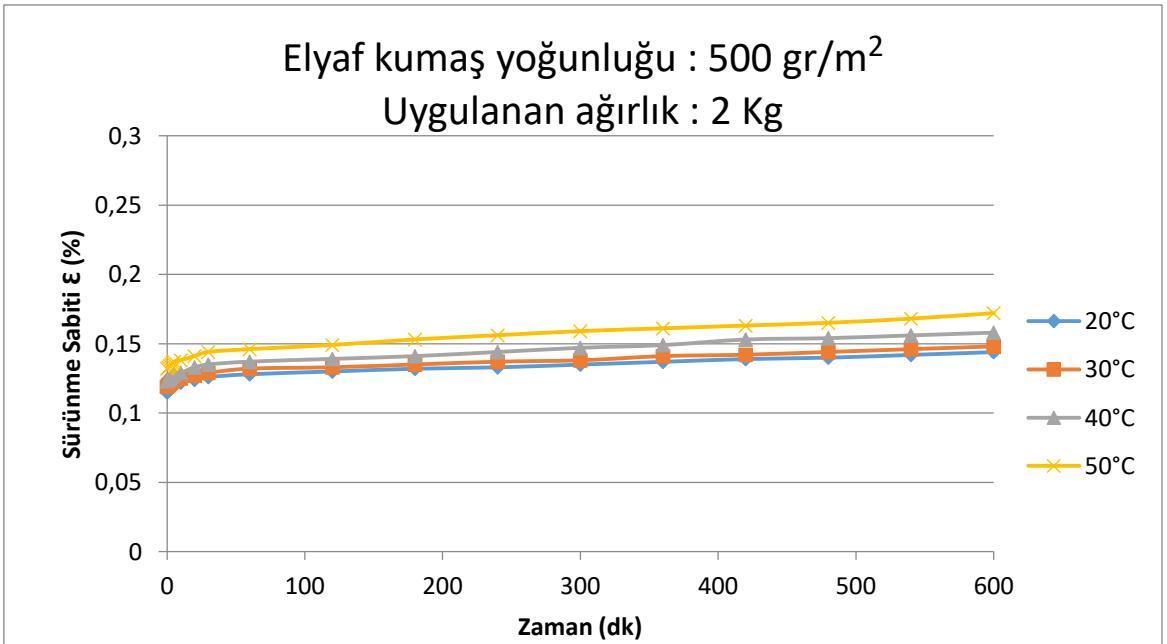
d)



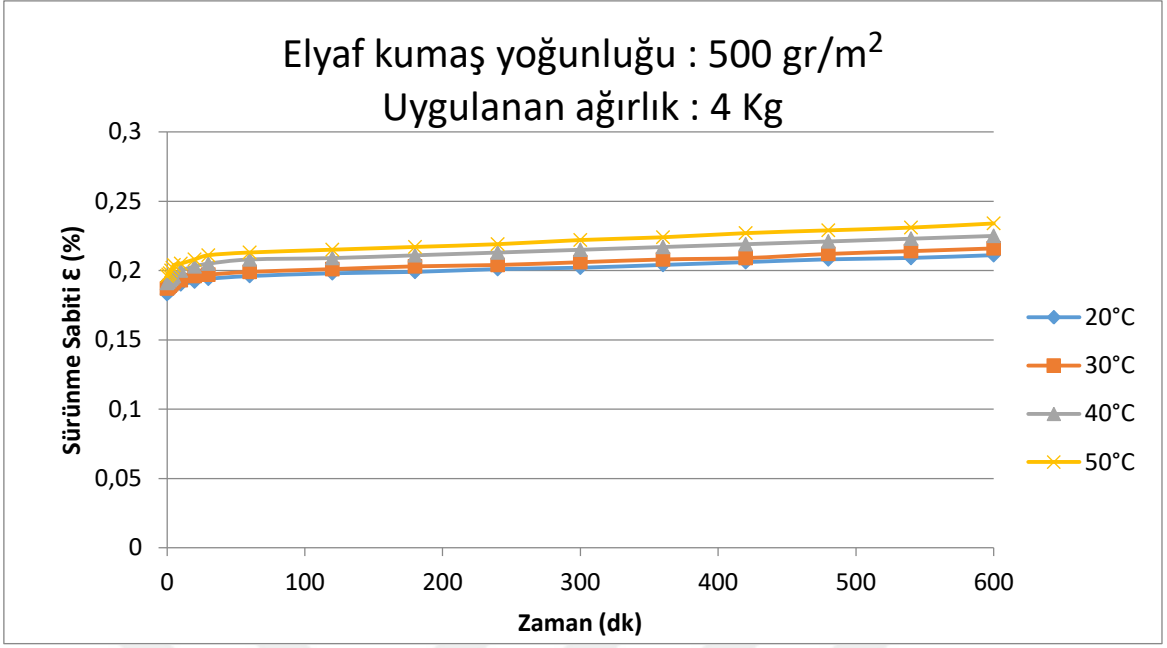
e)



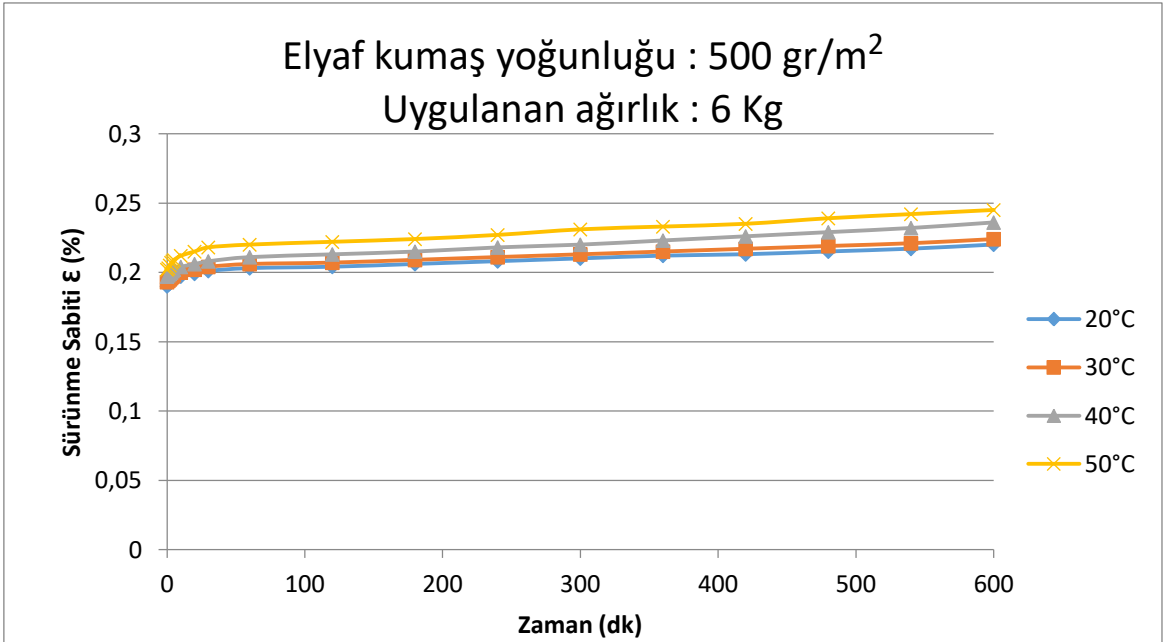
f)



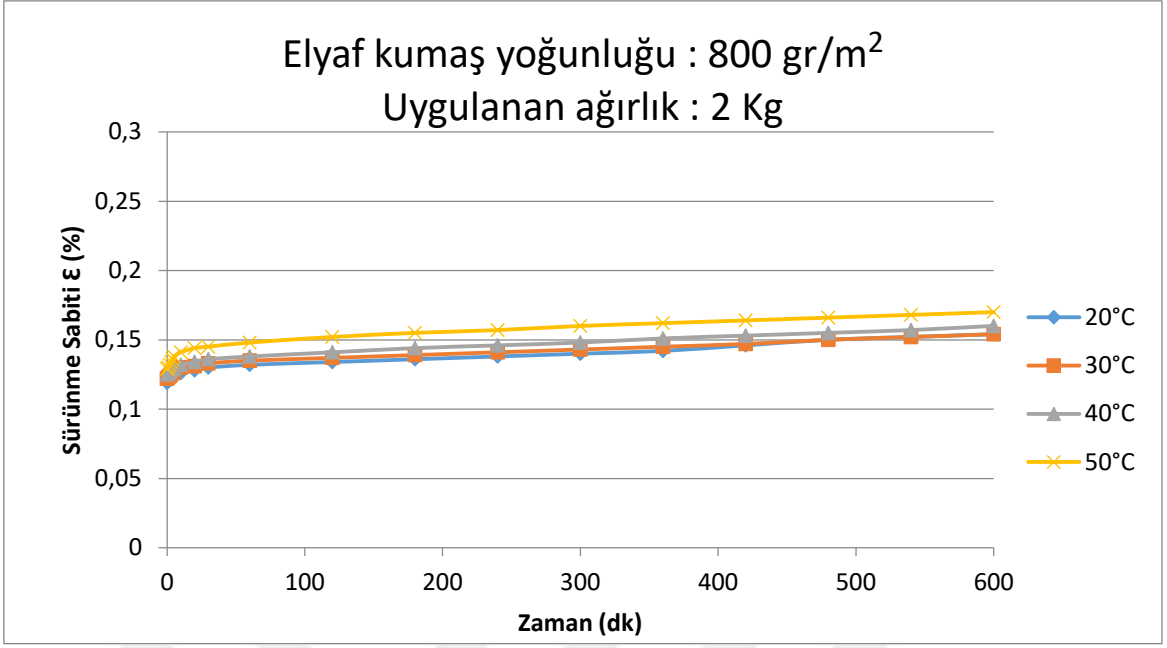
g)



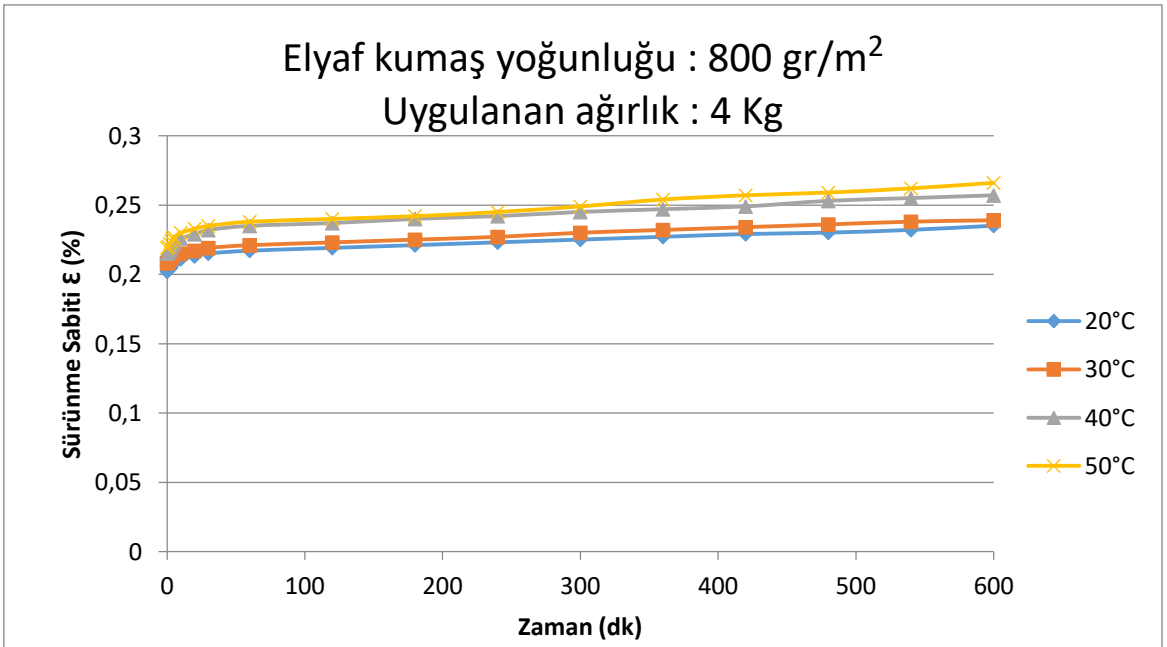
h)



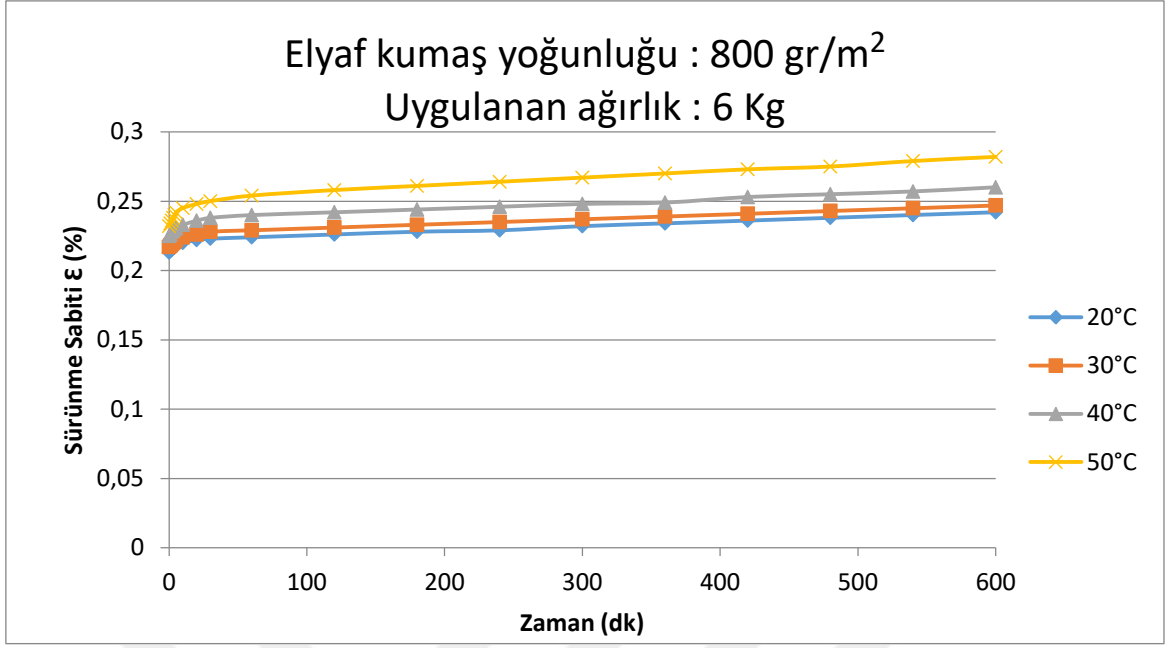
1)



j)



k)



1)

Şekil 6.3. Sürünme deneyi sonucunda elde edilen numunelere ait sürünme sabiti (ε)-zaman diyagramları

- a) 200 gr/m² elyaf kumaş yoğunluğundaki malzemeye 2 kg'lık ağırlık uygulanması durumunda ait sürünme sabiti (ε)-zaman diyagramları
- b) 200 gr/m² elyaf kumaş yoğunluğundaki malzemeye 4 kg'lık ağırlık uygulanması durumunda ait sürünme sabiti (ε)-zaman diyagramları
- c) 200 gr/m² elyaf kumaş yoğunluğundaki malzemeye 6 kg'lık ağırlık uygulanması durumunda ait sürünme sabiti (ε)-zaman diyagramları
- d) 300 gr/m² elyaf kumaş yoğunluğundaki malzemeye 2 kg'lık ağırlık uygulanması durumunda ait sürünme sabiti (ε)-zaman diyagramları
- e) 300 gr/m² elyaf kumaş yoğunluğundaki malzemeye 4 kg'lık ağırlık uygulanması durumunda ait sürünme sabiti (ε)-zaman diyagramları
- f) 300 gr/m² elyaf kumaş yoğunluğundaki malzemeye 6 kg'lık ağırlık uygulanması durumunda ait sürünme sabiti (ε)-zaman diyagramları
- g) 500 gr/m² elyaf kumaş yoğunluğundaki malzemeye 2 kg'lık ağırlık uygulanması durumunda ait sürünme sabiti (ε)-zaman diyagramları
- h) 500 gr/m² elyaf kumaş yoğunluğundaki malzemeye 4 kg'lık ağırlık uygulanması durumunda ait sürünme sabiti (ε)-zaman diyagramları

- i) 500 gr/m² elyaf kumaş yoğunluğundaki malzemeye 6 kg'lık ağırlık uygulanması durumunda ait sürünme sabiti (E)-zaman diyagramları
- j) 800 gr/m² elyaf kumaş yoğunluğundaki malzemeye 2 kg'lık ağırlık uygulanması durumunda ait sürünme sabiti (E)-zaman diyagramları
- k) 800 gr/m² elyaf kumaş yoğunluğundaki malzemeye 4 kg'lık ağırlık uygulanması durumunda ait sürünme sabiti (E)-zaman diyagramları
- l) 800 gr/m² elyaf kumaş yoğunluğundaki malzemeye 6 kg'lık ağırlık uygulanması durumunda ait sürünme sabiti (E)-zaman diyagramları

Şekil 6.3'e ait grafikler incelendiğinde 200 gr/m², 300 gr/m², 500 gr/m² ve 800 gr/m² elyaf kumaş yoğunluğuna sahip tüm malzemeler için birim şekil değiştirme oranının sıcaklık ile doğru orantılı şekilde arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca uygulanan ağırlık miktarının artmasının da sürünme sabiti (E) değerini artırdığı tespit edilmiştir.

Şekil 6.3'e ait a, d, g ve j grafikleri kendi içerisinde değerlendirildiğinde sürünme deneyi sırasında malzemelere 2 kg'lık ağırlık uygulandığında tüm malzemelerin sürünme davranışlarının aynı sıcaklık değerlerinde birbirine benzer olduğu görülmektedir.

Malzemelere 6 kg'lık ağırlık uygulandığında ise Şekil 6.3'e ait c, f, ı ve l grafiklerinde görülebileceği gibi 4 kg'lık yükte olduğu gibi kumaş yoğunluğunun artması ile sıcaklık ve uygulanan yüke bağlı olarak sürünme sabiti değerinin arttığı gözlemlenmiştir. Elyaf kumaş yoğunluğu 800 gr/m² olan malzemelerin sürünme sabiti değerleri her sıcaklık için diğer malzemelere oranla daha yüksek olarak bulunmuştur. Elyaf kumaş yoğunluğu 200 gr/m² olan malzemelerde ise zamana bağlı birim şekil değiştirme miktarları diğer malzemelere oranla aynı sıcaklıklarda daha düşük oranda gerçekleşmiştir.

7 SONUÇLAR

Bu tez kapsamında yapılan sürünme deneyleri neticesinde cam elyaf takviyeli polimer matrisli kompozit malzemelerin sürünme davranışı incelenmiş ve elyaf kumaş yoğunluğu, sıcaklık ve ağırlık verilerinin sürünme davranışı üzerindeki etkisi gözlemlenmiştir.

Elyaf kumaş yoğunluğundan bağımsız olarak deney ortam sıcaklığı ve uygulanan ağırlık miktarının artması ile birlikte malzemelerin sürünme hızının ve zaman içerisindeki birim şekil değiştirme oranlarının arttığı tespit edilmiştir.

Elyaf kumaş yoğunluğu faktörü devreye girdiğinde ise düşük sıcaklık ve düşük ağırlıklarda malzemelerin birbirine yakın sürünme davranışı gösterdiği görülmüştür. Fakat sıcaklık ve uygulanan yük miktarının artması ile beraber elyaf kumaş yoğunluğu arttıkça birim şekil değiştirme oranı da artmıştır. Yüksek sıcaklık ve yüksek ağırlık altında çalışacak ürünlerde sürünme ömrünü artıracığı ve sürünme hasarını aza indireceği için düşük elyaf kumaş yoğunluğuna sahip malzemelerin seçilmesi önerilmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Kouadri-Boudjelthia, A., Imad, A., Bouabdallah, A., Elmeguenni, M., 2008, “ Analysis of the effect of temperature on the creep parameters of composite material”, *Material and Design*, 30 (2009): 1569-1574
- [2] Militký, J., Jabbar, A., 2015, “Comparative evaluation of fiber treatments on the creep behavior of jute/green epoxy composites”, *Composites Part B*, 80: 361-368
- [3] Tsybin, N. Yu., Turusov, R.A., Andreev, V. I., 2016, “Comparison of creep in free polymer rod and creep in polymer layer of the layered composite”, *Procedia Engineering*, 153: 51-58
- [4] Harries, K. A., Guo, Q., Cardoso D., 2017, “Creep and creep buckling of pultruded glass-reinforced polymer members”, *Composite Structures*, 181: 315-324
- [5] Guedes, R. M., 2008, “Creep and fatigue lifetime prediction of polymer matrix composites based on simple cumulative damage laws”, *Composites: Part A*, 39: 1716-1725
- [6] Spathis, G., Kontou, E., 2012, “Creep failure time prediction of polymers and polymer composites”, *Composites Science and Technology*, 72: 959-964
- [7] Raghavan, J., Meshii, M., 1997, “Creep Of Polymer Composites”, *Composites Science and Technology*, 57: 1673-1688
- [8] Greco, A., Musardo C., Maffezzoli A., 2007, “Flexural creep behaviour of PP matrix woven composite”, *Composites Science and Technology*, 67: 1148-1158
- [9] Chevali, V.S., Janowski, G.M., 2010, “Flexural creep of long fiber-reinforced thermoplastic composites: Effect of processing-dependent fiber variables on creep response”, *Composites: Part A*, 41: 1253-1262
- [10] Abdel-Magid B., Lopez-Anido, R., Smith, G., Trofka, S., 2003, “Flexure creep properties of E-glass reinforced polymers”, *Composite Structure*, 62:247-253
- [11] Goertzen, W.K., Kessler, M.R., 2006, “Creep behavior of carbon fiber/epoxy matrix composites”, *Materials Science and Engineering: A*, 421:217-225
- [12] Rwawiire, S., Tomkova, B., Wiener, J., Militky, J., Kasedde, A., Kale, B.M., Jabbar, A., “Short-term creep of barkcloth reinforced laminar epoxy composites“, 2016, *Composites Part B*, 103: 131-138
- [13] El-Safty, S., Silikas, N., Watts, D.C., 2013, “Temperature-dependence of creep behaviour of dental resin-composites”, *Journal of Dentistry*, 41: 287-296

- [14] ASI, O., 2008, "Mechanical Properties of Glass-Fiber Reinforced Epoxy Composites Filled with Al₂O₃ Particles", *Reinforced Plastics and Composites*, 28: 2861-2867
- [15] Abdel-Magid, B., Ziaee, S., Gass, K., Schneider, M., 2005, "The combined effects of load, moisture and temperature on the properties of E-glass/epoxy composites", *Composite Structure*, 71:320-326
- [16] Gupta, A., Raghavan, J., 2010, "Creep of plain weave polymer matrix composites under on-axis and off-axis loading", *Composites: Part A*, 41:1289-1300
- [17] Chevali, V.S., Dean, D.R., Janowski, G.M., 2010, "Effect of environmental weathering on flexural creep behavior of long fiber-reinforced thermoplastic composites", *Polymer Degradation and Stability*, 95:2628-2640
- [18] Asadi, A., Raghavan, J., 2011, "Influence of time-dependent damage on creep of multidirectional polymer composite laminates", *Composites: Part B*, 42:489-498
- [19] Dasappa, P., Lee-Sullivan, P., Xiao, X., 2009, "Temperature effects on creep behavior of continuous fiber GMT composites", *Composites: Part A*, 40:1071-1081
- [20] Houshyar, S., Shanks, R.A., Hodzic, A., 2005, "Tensile creep behaviour of polypropylene fibre reinforced polypropylene composites", *Polymer Testing*, 24: 257-264
- [21] Berardi, V.P., Perrella M., Feo, L., Cricri, G., 2017, "Creep Behavior Of GFRP Laminates And Their Phases: Experimental Investigation And Analytical Modeling", *Composites Part B*, 122:136-144
- [22] Du, Y., Yan, N., Kortschot, M. T., 2013, "An Experimental Study Of Creep Behavior Of Lightweight Natural Fiber-Reinforced Polymer Composite/Honeycomb Core Sandwich Panels", *Composites Structure*, 106:160-166
- [23] Jabbar, A., Militky, J., Kale, B.M., Rwawiire, S., Nawab, Y., Baheti, V., 2016, "Modeling And Analysis Of The Creep Behavior Of Jute/Green Epoxy Composites Incorporated With Chemically Treated Pulverized Nano/Micro Jute Fibers", *Industrial Crops and Products*, 84:230-240
- [24] Eftekhari, M., Fatemi, A., 2016, "Creep Behavior And Modeling Of Neat, Talc-Filled, And Short Glass Fiber Reinforced Thermoplastics", 2016, *Composites Part B*, 97:68-83
- [25] Sönmez, M., 2009, "Polimer Matrisli Kompozitlerin Endüstri Ürünleri Tasarımında Önemi Ve Geleceği: Türkiye'den Dört Örnek Firma Üzerine Bir İnceleme", Yüksek Lisans, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 41
- [26] Pala, İ., 2015, "Polimer Tekstil Lifleri İle Takviyelendirilmiş Kompozit Malzemelerin Ürün Tasarımında Kullanılması", Yüksek Lisans, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 10

- [27] Gülmez, S., 2018, “Otomotiv Endüstrisinde Kullanılan Polimer Matrisli Kompozit Malzemeler”, Yüksek Lisans, *Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Denizli, 15
- [28] Gay, D., and Hoa, V.S., 2007, “*Composite Materials: Design and Application*”, CRC Pres – Boca, Raton
- [29] Guedes, M. R., 2011, “Creep and Fatigue in Polymer Matrix Composite”, *Woodhead Publishing*, UK, 4-7.
- [30] Kuhn, H., Medlin D., 2000, “Mechanical Testing and Evaluation, Volume 8”, *ASM International*, Ohio, 786-787.
- [31] Erzi, E., 2011, “Isıl Püskürtme Yöntemi ile Kısmi Stabilize Edilmiş Zirkonya Kaplanmış Hafif Metal Alaşımlarının Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi”, Doktora, *İstanbul Teknik Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı*, İstanbul, 43
- [32] TS 1177 EN ISO 1172, Tekstil - Cam Takviyeli Plâstikler - Prepregler, Kalıplama Hamurları Ve Lâminantlar - Tekstil - Cam Ve Mineral Dolgu Muhtevasının Tayini Kalsinasyon Metotları, TSE, 2004
- [33] ASTM D3039 / D3039M-17, Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017
- [34] ASTM D7264 / D7264M-15, Standard Test Method for Flexural Properties of Polymer Matrix Composite Materials, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015
- [35] ASTM D 2990-17, Standard Test Methods for Tensile, Compressive, and Flexural Creep and Creep-Rupture of Plastics, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : DOĞU, Gülşah
Uyruğu : T.C.
Doğum tarihi ve yeri : 30.05.1991 Uşak
Medeni hali : Evli
Telefon : 0 (553) 444 66 42
e-mail : gulsahkabagac@gmail.com

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Lisans	Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Endüstri Mühendisliği	2013
Lise	Afyon Anadolu Öğretmen Lisesi	2009

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2018-	Eldor Elektronik ve Plastik Malz. Üretim ve Tic.Ltd. Şti.	Organizasyon Sistem Geliştirme Mühendisi
2013-2018	Tüprağ Kışladağ Altın Madeni	İnsan Kaynakları Uzmanı

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

-

Hobiler

Pilates, Yoga