T.C.
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
TEKSTİL MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

KARBON KUMAŞ TAKVİYELİ HİBRİT KOMPOZİT YAPILARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

CANSU VAR

DENİZLİ, HAZİRAN - 2021

T.C.
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
TEKSTİL MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

KARBON KUMAŞ TAKVİYELİ HİBRİT KOMPOZİT YAPILARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

CANSU VAR

DENİZLİ, HAZİRAN - 2021

Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bilimsel etiğe ve akademik kurallara özenle riayet edildiğini; bu çalışmanın doğrudan birincil ürünü olmayan bulguların, verilerin ve materyallerin bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini ve alıntı yapılan çalışmalara atfedildiğine beyan ederim.

Cansu VAR

ÖZET

KARBON KUMAŞ TAKVİYELİ HİBRİT KOMPOZİT YAPILARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

CANSU VAR

PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TEKSTİL MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

(TEZ DANIŞMANI: DR. ÖĞR. ÜYESİ ALİ SERKAN SOYDAN)

DENİZLİ, HAZİRAN - 2021

Tekstil takviyeli kompozitler, sunmuş oldukları yüksek mukavemet/ağırlık ve modül/ağırlık oranı gibi karakteristikleri dolayısıyla yüksek performans gerektiren sektörlerde gerek iç gerekse de dış bileşenlerde oldukça fazla kullanım potansiyeline sahiptir. Literatürdeki çalışmalar göz önünde bulundurulduğunda bu tip kompozitlerde, yaygın olarak cam elyaf dokuma kumaşların takviye malzemesi olarak kullanıldığı tespit edilmiştir. Bu tez çalışmasında, örme ve dokuma kumaşların özgün karakteristiklerinin tek matriste kombinasyonunun kompozit mekanik davranışına olan etkisinin incelenmesi amaçlanmıştır. Bu doğrultuda, her biri karbon elyafından üretilmiş olan bezayağı dokuma kumaş, 2/2 dimi dokuma kumaş ve interlok örme kumaşların ayrı ayrı ve birbiri ile kombinasyonu olacak şekilde takviye olarak kullanıldığı; dokuma, örme ve dokuma/örme kumaş takviyeli kompozitlerin eğilme ve çekme yükü altındaki dayanım, modül ve uzama değeri gibi mekanik özellikleri incelenmiştir. Deneysel sonuçlar, hibrit kompozitlerin, dokuma kumaş kompozitlere göre daha düşük eğilme dayanımı sergilediğini göstermiştir. Bununla birlikte beş kat takviye kumaşı içeren hibrit kompozitlerden dimi ve örme kumaş kombinasyonuna sahip olan kompozitin eğilme modülü, yedi kat dimi içeren kompozitten daha yüksek olarak belirlenmiştir. Aynı zamanda hibrit kompozitlerin dokuma kumaş kompozitlere göre çekme dayanımı ve modülünün daha zayıf olduğu gözlenmiştir.

ANAHTAR KELİMELER: Karbon kompozitler, karbon örme kumaş, karbon dokuma kumaş, hibrit kompozitler.

ABSTRACT

INVESTIGATION ABOUT MECHANICAL PROPERTIES OF HYBRID CARBON FABRIC REINFORCED COMPOSITES

MSC THESIS

CANSU VAR

PAMUKKALE UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE

TEXTILE ENGINEERING

(SUPERVISOR:ASSIST. PROF. DR. ALİ SERKAN SOYDAN)

DENİZLİ, JUNE 2021

Since they offer high strength to weight and modulus to weight ratio, textile reinforced composites have quite high potential of use on both external and internal components in sectors requiring high performance. Recently, much attention has been attracted to find out mechanical behaviour of glass woven fabric reinforced composites. This thesis was aimed at testing effect of combination of unique characteristics of woven and knitted fabrics in one matrice on mechanical behaviour of composites. In this direction, carbon tows fabricated into plain woven, 2/2 twill woven and interlock knitted fabrics. The effect of reinforcement construction on flexural and tensile properties like strength, modulus and strain of epoxy composites manufactured in three variations as woven, knitted and woven/knitted reinforced was investigated conducting 3-point bending and tensile tests. Experimental results indicated that hybrid composites displayed lower flexural strength than the woven fabric composites. However, combination of 2/2 twill woven and knitted fabric in hybrid composites including five fabric layers had higher flexural modulus in comparison with 2/2 twill composites including seven fabric layers. Also, it was observed that mechanical performance of hybrid composites under tensile load in terms of strength and modulus was poor as compared to the woven fabric composites.

KEYWORDS: Carbon composites, carbon knitted fabrics, carbon woven fabrics, hybrid composites.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET ..... **i**
ABSTRACT ..... **ii**
İÇİNDEKİLER ..... **iii**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **v**
TABLO LİSTESİ ..... **vii**
SEMBOL LİSTESİ ..... **viii**
ÖNSÖZ ..... **ix**
1. GİRİŞ **1**
1.1 Uygulama Alanları 3
1.2 Matris Malzemeleri 7
1.2.1 Polimer Matrisler 9
1.2.1.1 Termoplastikler 9
1.2.1.2 Termosetler 10
1.3 Takviye Edici Lif 12
1.3.1 Cam Lifi 13
1.3.2 Kevlar Lifi 13
1.3.3 Karbon Lifi 14
1.4 Termoset Matrisli Kompozitler İçin Üretim Yöntemleri 17
1.4.1 El Yatırması Yöntemi 17
1.4.2 Sprey Püskürtme Yöntemi 17
1.4.3 Vakum Torbalama Yöntemi 17
1.4.4 Vakum Destekli Reçine İnfüzyon Kalıplama (VARIM) 18
1.4.5 Reçine Transfer Metodu (RTM) 18
1.4.6 VARIM ve RTM Varyasyonu Süreçleri 19
1.4.7 Baskı Kalıplama Yöntemi 21
1.4.8 Filament Sarma 21
1.4.9 Pultrüzyon Yöntemi 21
1.4.10 Enjeksiyon Kalıplama 22
2. LİTERATÜR **24**
2.1 Kompozitlerde Kullanılan Örme ve Dokuma Kumaşlar ve Bu Kompozitlere Uygulanan Mekanik Testler 24
2.1.1 Örme Kumaş Takviyeli Kompozitler 24
2.1.1.1 Düz Örgü Kumaş Takviyeli Kompozitler 25
2.1.1.2 Tam Rib Örgü Kumaş Takviyeli Kompozitler 26
2.1.1.3 Interlok Örgü Kumaş Takviyeli Kompozitler 27
2.1.1.4 Tam Selanik Örgü Kumaş Takviyeli Kompozitler 28
2.1.1.5 Milano Örgü Kumaş takviyeli Kompozitler 29
2.1.2 Dokuma Kumaş Takviyeli Kompozitler 29
2.1.2.1 Bezayağı Dokuma Kumaş Takviyeli Kompozitler 30
2.1.2.2 Dimi Dokuma Kumaş Takviyeli Kompozitler 30
2.1.2.3 Basket Dokuma Kumaş Takviyeli Kompozitler 31
2.1.2.4 Saten Dokuma Kumaş Takviyeli Kompozitler 31
2.2 Dokuma ve/veya Örme Kumaş Takviyeli Kompozit Plakalarda Eğilme ve Çekme Davranışı 32

2.3 Kompozit Plakaların Mekanik Davranışında Rol Oynayan Kumaş Konstrüksiyon Parametreleri 36
3. MATERYAL ve METOT 41
3.1 Materyal 41
3.2 Kompozit Plakaların Üretimi 44
3.3 Metot 45
3.3.1 Test Metodu 48
3.3.1.1 Üç Noktalı Eğilme Testi 48
3.3.1.2 Çekme Testi 49
4. BULGULAR 51
4.1 Üç Noktalı Eğilme Testi 51
4.1.1 Eğilme Dayanımı 52
4.1.2 Eğilme Modülü 54
4.1.3 En Yüksek Uzama 56
4.2 Çekme Testi 60
4.2.1 Çekme Dayanımı 61
4.2.2 Çekme Modülü 63
4.2.3 Akma Uzaması, En Büyük Kuvvetteki Uzama ve Kopma Uzaması 64
5. SONUÇLAR 71
6. KAYNAKLAR 73
7. ÖZGEÇMİŞ 86

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1: Kompozitlerin takviye tipine göre sınıflandırılması 2
Şekil 1.2: (a) Empenajı ve üst gövde paneli GLARE'den imal edilmiş A380 yolcu uçağı (b) Aramid/karbon saç örgü jet motoru statör vanası 5
Şekil 2.1: (a) Tam rib örgü yapısının geometrik modeli ve (b) Tam rib örgü yapısının çift iğne yatağındaki iğne düzeninin temsili gösterimi 26
Şekil 2.2: (a) Interlok örgü yapısının geometrik modeli ve (b) İnterlok örgü yapısının çift iğne yatağındaki iğne düzeninin temsili gösterimi 28
Şekil 3.1: Kumaşların üretildiği Passap Duomatic 80 örme makinesi 42
Şekil 3.2: Takviye kumaşlarının ön yüz görünümleri. (a) Bezayağı konstrüksiyonundaki kumaş (b) 200 g/m^2 gramajındaki 2/2 dimi konstrüksiyonundaki kumaş (c) 650 g/m^2 gramajındaki 2/2 dimi konstrüksiyonundaki kumaş (d) 720 g/m^2 gramajındaki interlok konstrüksiyonundaki kumaş 43
Şekil 3.3: Üç noktalı eğilme testi numuneleri. (a) Atkı/sıra yönünde kesilen numuneler (b) Çözgü/çubuk yönünde kesilen numuneler 46
Şekil 3.4: Çekme testi numuneleri. (a) Atkı/sıra yönünde kesilen numuneler (b) Çözgü/çubuk yönünde kesilen numuneler 47
Şekil 3.5: Alüminyum parça yapıştırma işlemi sırasında çekme testi numuneleri 47
Şekil 3.6: Üç noktalı eğilme testlerinin gerçekleştirildiği SHIMADZU test cihazı 49
Şekil 3.7: Çekme testinin gerçekleştirildiği cihaz 50
Şekil 4.1: Kompozit numunelerinin atkı/sıra ve çözgü/çubuk yönündeki eğilme dayanımı değerleri 52
Şekil 4.2: Kompozit numunelerinin atkı/sıra ve çözgü/çubuk yönündeki eğilme modülü değerleri 54
Şekil 4.3: Kompozit numunelerinin atkı/sıra ve çözgü/çubuk yönündeki en yüksek uzama değerleri 56
Şekil 4.4: C1 kodlu kompozitin (a) atkı ve (b) çözgü yönündeki kuvvet-şekil değişimi eğrileri 57
Şekil 4.5: C2 kodlu kompozitin (a) atkı ve (b) çözgü yönündeki kuvvet-şekil değişimi eğrileri 57
Şekil 4.6: C3 kodlu kompozitin (a) atkı ve (b) çözgü yönündeki kuvvet-şekil değişimi eğrileri 58
Şekil 4.7: C4 kodlu kompozitin (a) sıra ve (b) çubuk yönündeki kuvvet-şekil değişimi eğrileri 58
Şekil 4.8: C5 kodlu kompozitin (a) atkı/sıra ve (b) çözgü/çubuk yönündeki kuvvet-şekil değişimi eğrileri 59
Şekil 4.9: C6 kodlu kompozitin (a) atkı/sıra ve (b) çözgü/çubuk yönündeki kuvvet-şekil değişimi eğrileri 59
Şekil 4.10: C7 kodlu kompozitin (a) atkı/sıra ve (b) çözgü/çubuk yönündeki kuvvet-şekil değişimi eğrileri 60
Şekil 4.11: Kompozit numunelerinin atkı/sıra ve çözgü/çubuk yönündeki çekme dayanımı değerleri 62

Şekil 4.12: Kompozit numunelerinin atkı/sıra ve çözgü/çubuk yönündeki çekme modülü değerleri 63
Şekil 4.13: Kompozit numunelerinin atkı/sıra ve çözgü/çubuk yönündeki akma uzaması değerleri 65
Şekil 4.14: Kompozit numunelerinin atkı/sıra ve çözgü/çubuk yönündeki en büyük kuvvetteki uzama değerleri 65
Şekil 4.15: Kompozit numunelerinin atkı/sıra ve çözgü/çubuk yönündeki kopma uzaması değerleri 65
Şekil 4.16: C1 kodlu kompozitin (a) atkı ve (b) çözgü yönündeki gerilim-uzama eğrisi 66
Şekil 4.17: C2 kodlu kompozitin (a) atkı ve (b) çözgü yönündeki gerilim-uzama eğrisi 66
Şekil 4.18: C3 kodlu kompozitin (a) atkı ve (b) çözgü yönündeki gerilim-uzama eğrisi 67
Şekil 4.19: C4 kodlu kompozitin (a) sıra ve (b) çubuk yönündeki gerilim-uzama eğrisi 67
Şekil 4.20: C5 kodlu kompozitin (a) atkı/sıra ve (b) çözgü/çubuk yönündeki gerilim-uzama eğrisi 68
Şekil 4.21: C6 kodlu kompozitin (a) atkı/sıra ve (b) çözgü/çubuk yönündeki gerilim-uzama eğrisi 69
Şekil 4.22: C7 kodlu kompozitin (a) atkı/sıra ve (b) çözgü/çubuk yönündeki gerilim-uzama eğrisi 69

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 1.1: Bazı yaygın reçinelerin ısıl özellikleri 11
Tablo 1.2: Epoksi reçineler ve bazı tipik matrislerin mekanik özellikleri 12
Tablo 1.3: E-cam ve S-cam lifinin kimyasal bileşimi (ağırlıkça %) 13
Tablo 1.4: Karbon lifi tiplerinin çekme yükü altındaki değerleri ve oryantasyon tipi 15
Tablo 3.1: Çalışmada kullanılan karbon elyafına ait teknik bilgiler 41
Tablo 3.2: Çalışmada kullanılan kumaşların teknik bilgileri 42
Tablo 3.3: Kompozitlere ait kalınlık, yoğunluk ve elyaf hacim oranı değerleri 46
Tablo 3.4: LOCTITE EA 3430 çift bileşenli yapıştırıcının teknik özellikleri . 48
Tablo 4.1: Kompozit numunelerinin atkı/sıra yönündeki eğilme yükü altındaki değerleri 51
Tablo 4.2: Kompozit numunelerinin çözgü/çubuk yönündeki eğilme yükü altındaki değerleri 52
Tablo 4.3: Kompozit numunelerinin atkı/sıra yönündeki çekme yükü altındaki değerleri 61
Tablo 4.4: Kompozit numunelerinin çözgü/çubuk yönündeki çekme yükü altındaki değerleri 61

SEMBOL LİSTESİ

C	:	Kıvrım oranı
L	:	İpliğin uzunluğu
S	:	İpliğin kumaş üzerindeki uzunluğu
l	:	İlmek iplik uzunluğu
T	:	Sıkılık faktörü
w_f	:	Kumaş gramajı
$n_ç$	:	Çubuk sayısı
n_s	:	Sıra sayısı
d_y	:	İplik lineer kütle yoğunluğu
ρ_b	:	Kumaş hacim ağırlığı
t	:	Kumaş kalınlığı
ϕ	:	Kumaş gözenekliliği
ρ_f	:	Lif yoğunluğu
v_f	:	Elyaf hacim oranı
N_t	:	Kompozitteki toplam kumaş kat sayısı
h	:	Kompozit kalınlığı
ρ_c	:	Kompozit yoğunluğu
σ_{sb}	:	Özgül eğilme dayanımı
σ_b	:	Eğilme dayanımı
E_{sb}	:	Özgül eğilme modülü
E_b	:	Eğilme modülü
σ_{st}	:	Özgül çekme dayanımı
σ_t	:	Çekme dayanımı
E_{st}	:	Özgül çekme modülü
E_t	:	Çekme modülü

ÖNSÖZ

Yüksek lisans eğitimim boyunca bana her konuda yardımcı olan, bilgi birikiminden yararlanma fırsatı sunan, çok değerli danışman hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Ali Serkan SOYDAN'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Bilgi birikimini ve değerli görüşlerini benden esirgemeyen, çok değerli hocam Sayın Prof. Dr. Sema PALAMUTÇU'ya en içten teşekkürlerimi sunarım.

Tüm yaşamım boyunca koşulsuz desteklerini ve sevgilerini sunan, değerli aileme sonsuz sevgi ve teşekkürlerimi sunarım.

1. GİRİŞ

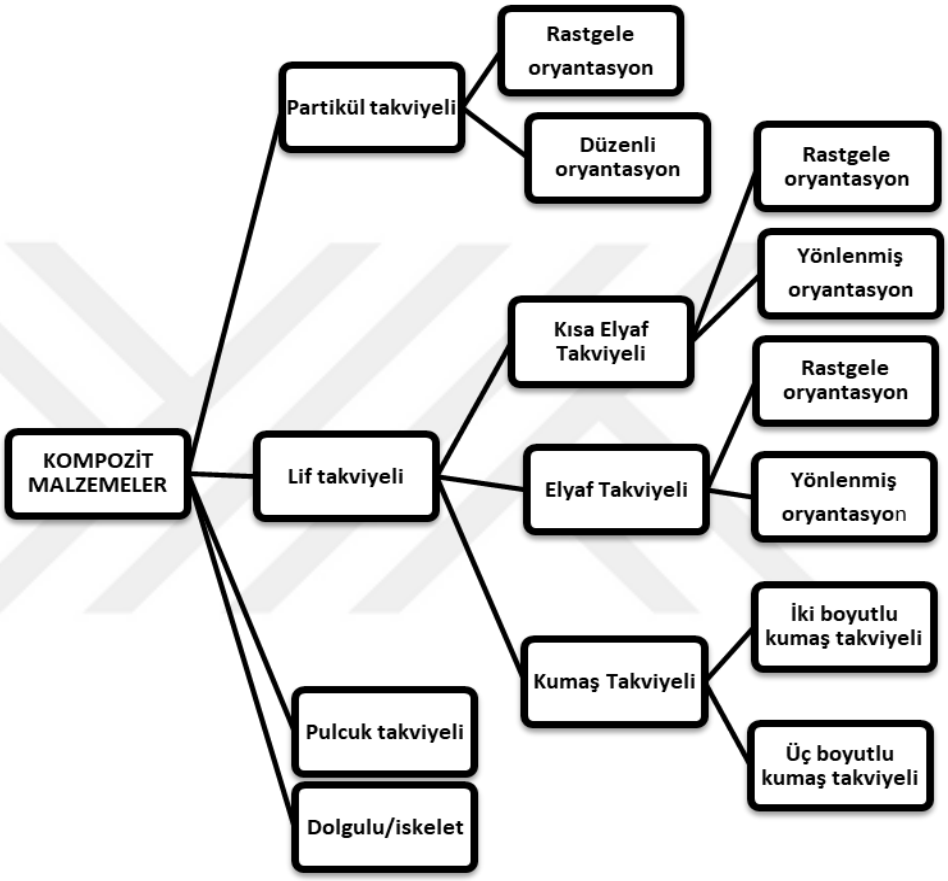
Kompozit malzemeler en geniş anlamda; fiziksel veya kimyasal özellikleri birbirinden farklı olan ve birbiri içerisinde çözünmeyen iki veya daha fazla bileşenden oluşan malzemeler olarak tanımlanabilir (Ryutoku ve diğ. 1990; Vinson ve Sierakowski 2008). Majör bileşenler olarak; takviye tekstili(lif) ve matris malzemesi içeren tekstil takviyeli kompozitler yapılarında bu bileşenlere ek olarak bağlayıcı ajanlar, kaplamalar ve dolgu maddeleri de barındırabilmektedir. Bağlayıcı ajanlar ve kaplamaların kullanım amacı elyafın matris ile ıslanabilirliğini arttırmak ve elyaf - matris arafazı boyunca adezyonu iyileştirerek elyaf-matris arasındaki yük transferini kolaylaştırmak iken bazı polimerik matrisler ile birlikte kullanılan dolgu maddeleri maliyeti azaltmak ve matrisin boyutsal stabilitesini geliştirmek amacıyla kullanılmaktadır (Pritchard 1998; Mallick 2007).

Kompozit malzemeleri belirgin başlıklar altında sınıflandırmak zor olsa da, matris tipine ve takviye yapısına göre iki farklı şekilde sınıflandırmak mümkündür. Kompozit malzemeleri matris tipine göre (Vinson ve Sierakowski 2008);

- Polimer matrisli kompozitler (PMC),
- Metal matrisli kompozitler (MMC),
- Seramik matrisli kompozitler (CMC),
- Karbon-karbon kompozitler ve bu matrislerin birbirleri ile ve/veya çeşitli formlardaki takviye malzemelerinin çeşitli kombinasyonu olan hibritler şeklinde sınıflandırmak mümkündür.

Takviye yapısı tipine göre ise; “partikül takviyeli”, “lif takviyeli”, “pulcuk takviyeli” ve “dolgulu/iskelet kompozitler” ana başlıkları altında Şekil 1.1’deki gibi sınıflandırılabilir (Vinson ve Sierakowski 2008; Matthews ve Rawlings 1999; Mallick 2007). Makroskobik ya da mikroskobik boyutlardaki seramik, metalik veya inorganik partikül takviye elemanları, genellikle matris malzemesinden daha sert olduğu için; matris ile arasında oluşacak deformasyonu kısıtlama yoluyla malzeme sertliğini arttırmak amacı ile kullanılır. Öte yandan sert partiküller, kırılgan yapıdaki matris ile

kullanılmaları durumunda; matriste gerilim yoğunlaşmasına sebep olmalarından kaynaklı malzeme mukavemetinin düşmesine yol açmaktadır. Bununla birlikte partikül yapılar; kompozit malzemenin ısıl ve iletkenlik özelliklerini ve yüksek sıcaklıklardaki performansını geliştirmek için, sürtünmeyi azaltmak, aşınma dayanımını ve işlenebilirliği geliştirmek, yüzey sertliğini arttırmak ve büzülmeyi azaltmak amacı ile de oldukça yaygın kullanılmaktadır (Agarwal ve diğ. 2017).



Şekil 1.1: Kompozitlerin takviye tipine göre sınıflandırılması (Vinson ve Sierakowski 2008; Matthews ve Rawlings, 1999; Mallick 2007)

Üstün performansları dolayısıyla endüstriyel ve ticari olarak birçok alanda uygulama alanına sahip olan lif takviyeli kompozitler ise kompozit malzemelerin en önemli sınıfı olma özelliğine sahiptir (Agarwal ve diğ. 2017). Hammadde olarak organik, metalik, sentetik ve mineral esaslı liflerin takviye olarak kullanıldığı bu tip kompozitler, takviye malzemesinin matriste kesikli veya sürekli formda gömülü oluşuna bağlı olarak farklı konfigürasyonlar ihtiva edebilir. Bu konfigürasyonların anlamları şu şekildedir (Vinson ve Sierakowski 2008); Kısa elyaf takviyeli kompozitler, 1 mm uzunluğundaki kıyılmış liflerin veya kristalitlerin bir matriste

gömülü olduğu kompozitler iken, elyaf takviyeli kompozitler, kesikli veya sürekli liflerin takviye olarak kullanıldığı kompozitlerdir. Kumaş takviyeli kompozitler ise lif kütlesinin kumaş formunda bir matriste gömülü bulunduğu kompozitlerdir.

Lif Takviyeli Kompozitlerin Genel Özellikleri

Lif takviyeli polimer kompozitlerin, düşük ağırlıklarından dolayı, mukavemet-ağırlık ve modül-ağırlık oranlarının metalik malzemelere göre belirgin şekilde üstün olduğu ifade edilmektedir (Mallick 2007; Wang ve diğ. 2011). Çekme karakteristiklerine ek olarak, lif takviyeli kompozitlerin mükemmel seviyede yorulma dayanımı ve hasar toleransı, iyi seviyedeki aşınma dayanımı gibi avantajları olduğu da belirtilmektedir (Mallick 2007; Long 2005; Rubino ve diğ. 2020). Bu üstün özellikleri sayesinde lif takviyeli kompozitlerin, havacılık-uzay ve otomotiv sektörleri gibi ağırlık azaltımının kritik bir rol oynadığı sektörlerde metal malzemelere ikame olma potansiyeline sahip olduğu düşünülmektedir. Geleneksel metal malzemeler, tüm yönlerinde hemen hemen eşit özellikler sergileyip izotropik karakteristik sergileme eğiliminde iken, lif takviyeli kompozitlerin özellikleri, yöne bağlı olarak önemli ölçüde değişiklik gösterdiği için bu tip kompozitler anizotropik olarak değerlendirilir. Farklı yönlerde farklı davranış sergilemelerinden dolayı lif takviyeli kompozitlerin tasarımı metal yapıların tasarımından daha zor olsa da bu anizotropik davranışları, kompozitlerin özelliklerini yönetebilme imkânı sunarak tasarımda esneklik gibi önemli bir parametreyi de beraberinde getirmektedir. Lif takviyeli kompozitler ile metal malzemeler arasındaki diğer bir fark ise; metal malzemeler akma davranışı ve plastik deformasyon sergilerken, birçok lif takviyeli kompozit çekme yükü altındaki gerilim-uzama eğrilerinde elastik davranış sergilemektedir. Tüm bu karakteristiklerine ek olarak, birçok lif takviyeli kompozitin ısıl genleşme katsayısının metallerden düşük olması sayesinde kompozit yapılar, geniş sıcaklık aralığında daha iyi boyutsal stabilite sergileme potansiyeline sahiptir (Mallick 2007).

1.1 Uygulama Alanları

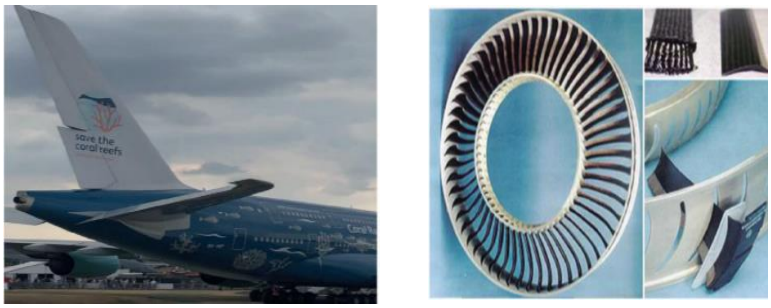
Ticari ve endüstriyel olarak oldukça geniş bir kullanım alanına sahip olan lif takviyeli kompozitlerin başlıca uygulama alanları; hava taşıtları, uzay araçları,

otomotiv endüstrisi, spor malzemeleri, deniz araçları, inşaat-altyapı ve medikal uygulamalarıdır.

Bununla birlikte bu malzemeler, baskılı devre kartları, devre kesiciler, kablo taşıyıcılar ve rüzgâr tribünleri gibi elektrik-elektronik endüstrisinde, petrol platformları gibi yakıt endüstrisinde ve dişliler, rulmanlar, tahrik düzenekleri, robotik kollar, dokuma tezgâhı mekikleri ve yay malzemeleri gibi genel mühendislik sektöründe de kullanım potansiyeline sahiptir (Mallick 2007; Gay 2014; Palanikumar 2012).

Hava Araçları

Daha yüksek hızlara ulaşılabilmesi ve yük taşıma kapasitesinin arttırılması için ağırlık azaltımının kritik bir rol oynadığı sektörlerden olan askeri ve ticari hava araçları lif takviyeli kompozitlerin başlıca kullanım alanlarındandır. Kompozitlerin kullanıldığı araç bileşenlerinden bazıları; kanat hücum kenar panelleri, burun tekerleği kapıları, motor muhafaza elemanları, irtifa dümenleri, burun kaportaları, kuyruk konileri, yatay stabilizatörler ve dikey stabilizatörlerdir. Kompozitlerin kullanıldığı tipik ticari hava araçlarına, Boeing 757, 767 ve 777 ve Airbus A310, A320, A330 ve A340 yolcu uçakları örnek verilmektedir (Irving ve Soutis 2019). 2007 yılında pazara sunulan, ağırlıkça %25'ini kompozit malzemelerin oluşturduğu, Airbus A380 uçağının kanat arka panellerinde reçine film infüzyon tekniği ile üretilmiş cam elyafı ve karbon elyafı takviyeli polimer kompozitler kullanılmıştır. Aynı aracın, duvarlarında alüminyum/cam elyafı takviyeli (GLARE) epoksi malzeme (Şekil 1.2(a)) kullanılmasıyla ağırlıkta azalma, hasar toleransı ve yorulma ömründe iyileşme sağlanmıştır (Irving ve Soutis 2019). Düzlem dışı özelliklerinin ve darbe dayanımının, geleneksel takviyelerden üstün olduğu bilinen 3D saç örgü kompozitlerin hava aracı motor bileşenlerinde kullanımına örnek olarak ise Şekil 1.2 (b)'de A&P Technology tarafından üretilen aramid/karbon saç örgü jet motoru statör vanası gösterilmektedir (Kumar ve Thakur 2017).



(a) (b)

Şekil 1.2: (a) Empenajı ve üst gövde paneli GLARE'den imal edilmiş A380 yolcu uçağı (Irving ve Soutis 2019) (b) Aramid/karbon saç örgü jet motoru statör vanası (Kumar ve Thakur 2017)

Uzay Uygulamaları

Lif takviyeli kompozitlerin, uzay araçlarında kullanımının başlıca motivasyon sebepleri; ağırlık azaltımı ve geniş sıcaklık aralığında boyutsal stabilitelerini koruyabilme becerisidir.

Birçoğu, sıfıra yakın ısıl genleşme katsayısına (CTE) sahip bir şekilde tasarlanabilen karbon elyafı takviyeli kompozitler, Invar gibi uzay uygulamalarında kullanılan bir nikel-demir alaşımı ile yakın bir CTE değerine sahiptir. Bunun yanında karbon elyafı takviyeli kompozitlerin düşük CTE, düşük yoğunluk, yüksek mukavemet ve yüksek sertlik-ağırlık oranı gibi özelliklerinin eşsiz bir kombinasyonuna sahip olması; bu malzemelerin yapay uydu uygulamalarında kullanım potansiyelini ortaya çıkarmaktadır (Mallick 2007).

Otomotiv Uygulamaları

Lif takviyeli kompozitlerin otomotiv sektöründeki uygulama alanlarını; araç gövdesi, şasi ve motor bileşenleri olarak üç sınıfa ayırmak mümkündür. Kaporta ve kapı panelleri gibi yüksek sertlik, hasar toleransı ve aynı zamanda "A sınıfı" yüzey bitimi gerektiren dış gövde panelleri, kesikli cam liflerinin polyester veya vinilester reçinede rastgele yönlendiği, baskı kalıplama yöntemlerinden olan hazır kalıplama (SMC) ile üretilen E-cam elyafı takviyeli kompozitlerdir. SMC yönteminin kullanıldığı diğer bileşenler ise şu şekildedir: motor valf kapakları, radyatör destekleri, tampon kirişleri, tavan ve kapı çerçeveleri, eksantrik dişli kapakları ve karter kapakları, kaporta, bagaj kapakları, çamurluk ve rüzgarlıklar. Otomotiv endüstrisinde gövde panellerinde kullanılan lif takviyeli kompozitlerin üretiminde kullanılan bir diğer yöntem, yapısal reaksiyon enjeksiyon kalıplama (SRIM)'dır. Bu alanlardaki

kompozitlerde, rastgele yönlenmiş, kesikli E-cam lifleri ve poliüretan matrisler kullanılmaktadır. Lif takviyeli kompozitlerin şasi bileşenlerindeki uygulama alanlarına örnek olarak ise yapraklı yay ve kullanımı kısıtlı olsa da laboratuvar ve tatbikat denemeleri başarılı sonuçlanan kardan milleri verilebilmektedir. Lif takviyeli kompozitlerin, motor bileşenlerinde kullanımında ise gövde ve şasi bileşenlerinde olduğu kadar başarılı sonuçlar elde edilememiştir. Yüksek sıcaklıklardaki yorulma yükleri bu kompozit malzemelerin bu alandaki en büyük dezavantajı olmuştur (Mallick 2007).

Spor Malzemeleri Uygulamaları

Lif takviyeli polimerlerin spor malzemelerindeki uygulama alanlarından bazıları şu şekildedir: Tenis ve raketbol raketleri, golf sopası şaftı, olta çubukları, bisiklet iskeleti, kar ve su kızakları, kayak sopaları, atletizm sırıkları, hokey sopaları, beyzbol sopaları, yelkenliler, kayık kürekleri, kano gövdeleri, sörf tahtaları, ok ve okçuluk yayları, ciritler, koruyucu kasklar ve atlet ayakkabısı tabanları ve topukları. Spor malzemelerinde lif takviyeli polimerlerin kullanım avantajları; ağırlık azaltımı, titreşim sönümleme ve tasarım esnekliğidir. Ağırlık azaltımı, metalik malzemeler yerine karbon elyafı takviyeli epoksilerin kullanımı ile gerçekleştirilmiş olup, bisiklet ve kano yarışları gibi yarış sporlarında daha yüksek hızlara çıkmayı ve hızlı manevra kabiliyetini de beraberinde getirmiştir (Mallick 2007).

Denizcilik Uygulamaları

Atalet azaltımı ve yakıt tasarrufunun ihtiyaç olduğu bir diğer sektör olan deniz taşımacılığı sektörü, yapı kaynaklı ağırlığı azaltma arayışı içindedir (Kimpara 1991). Mallick'de (2007) dinlence amaçlı hizmet sunan teknelerin birçok bileşeninin cam elyafı takviyeli polyester veya vinil ester reçineden imal edildiği belirtilmektedir. Gemi gövdesi, güverte ve çeşitli iç mekân bileşenleri bu kompozitlerin kullanıldığı bileşenlerdendir. Bu bileşenlerin çoğunluğunun üretiminde kullanılan yöntem, işçi yoğun bir proses olmasına rağmen ekipman maliyeti düşük bir yöntem olan açık kalıp yöntemidir (Mallick 2007).

Yapı ve İnşa Uygulamaları

Lif takviyeli kompozitler, köprü ve bina gibi inşa uygulamalarında yüksek oranda betonarme ve çelik malzemelerin yerine ikame olma potansiyeline sahiptir. Kompozitlerin bu alanlarda kullanım tercihinin başlıca motivasyonu, daha uzun kullanım ömrüne ve daha düşük bakım ve onarım maliyetine imkân sağlayan aşınma dayanımıdır. Profil çekme cam lifi takviyeli vinil ester çubukların, tabliye betonlarında kullanımı kompozitlerin bu alandaki kullanım örneklerindendir (Mallick 2007).

Medikal Uygulamalar

Kompozit malzemelerin medikal uygulamalardaki en sık kullanım alanı kemik tedavisi (internal fiksatör plağı) ve protez uygulamalarıdır. Paslanmaz çelik ve titanyum alaşımları gibi geleneksel malzemelere alternatif olarak karbon elyafı/epoksi, cam elyafı/epoksi, karbon elyafı/Polietilen (PE), karbon elyafı/Polipropilen (PP), karbon elyafı/Nylon ve karbon elyafı/Polietereterketon (PEEK) kompozitleri gibi rijitliği daha düşük malzemeler kullanılabilmektedir. Kompozitlerin kullanıldığı diğer uygulamalar ise: kemik dolgusu, diş implant ve köprüleri, kateterler ve yürüme destek ürünleri gibi medikal ekipmanlardır (Kumar ve Thakur 2017).

1.2 Matris Malzemeleri

Matris malzemesinin kompozit yapıdaki dört temel rolü (Mohd Nurazzi ve diğ. 2017);

- Takviye elemanının yapısal bütünlüğünü korumak.
- Kompozit malzeme yük altındayken takviye elemanına yük transferi sağlamak.
- Sünek yapısı dolayısıyla çatlak ilerlemesini engellemek veya yavaşlatmak ve
- Takviye lifini kimyasal ve fiziksel etkilere karşı korumaktır.

Termoset ve termoplastik olarak kategorilendirilen polimer matrisler en sık kullanılan matris tipi iken metal ve seramik matrisler özel uygulamalarda kullanılmaktadır (Vinson ve Sierakowski 2008). Kompozit malzemenin sürekli fazı olan matrislerin özellikleri, yapının delaminasyon, darbe dayanımı, kimyasal dayanımı, su absorbsiyonu ve sürünme direnci gibi aşındırıcı proseslerinde büyük rol

oynamaktadır (Saba ve diğ. 2017). Bunun yanı sıra bir kompozit malzemenin işlenebilirliği ve yapısındaki olası kusurlar da matris malzemesinin viskozite, camsı geçiş sıcaklığı ve işlem koşulları gibi fiziksel karakteristiklerine yüksek oranda bağlıdır (Nicolais ve diğ. 1993).

Bir matris malzemesinden kullanım alanına da bağlı olarak beklenen özellikler şu şekildedir (Peters 2013):

- Nem absorbsiyonunu minimize etmeli.
- Düşük büzülme oranına sahip olmalı.
- Lifli yapıyı ıslatabilmeli ve bağ yapabilmeli.
- Isıl genleşme katsayısı düşük olmalı.
- Lif demetlerinin arasına nüfuz edebilmeli ve boşluk oluşumunu elimine etmeli.
- Dayanım, modül ve uzama değerleri makul seviyede olmalı.
- Yükü liflere transfer edebilmesi için elastik olmalı.
- Uygulama alanına bağlı olarak yüksek sıcaklıklarda dayanımı yüksek olmalı.
- Nihai kompozit şekline kolaylıkla işlenebilmeli.
- Boyutsal stabiliteye sahip olmalı.

Polimerik bir malzemenin yüksek maliyetinin kompanse edilmesi malzemenin tasarımı, imalatı, bitim işlemi, montajı, bakım ve onarım maliyeti ve malzemenin uzun süreli dayanım performans faktörleri ile kontrol edilebilir. Bu doğrultuda, polimer matrisli kompozitlerin (PMC), günümüzde en yaygın lif takviyeli kompozit tipi olmasındaki, teknik özellikleri dışındaki üretim esaslı temel etkenler şu şekilde sıralanabilir (Mallick 1997; Biron 2018):

- Tasarım esnekliği ve seçeneklerindeki çeşitlilik,
- Yapısal ve teknik özellik çeşitliliğinden faydalanılarak fonksiyon entegrasyonu,
- Tek polimer ile elde edilemeyen fonksiyonları elde edebilmek adına iki farklı polimerin kombinasyonunun mümkün olması,
- Estetik açıdan renklendirme ve kalıp tasarımındaki çeşitlilik ile bitim işlemlerinin azaltılması,
- Üretim tekniklerindeki çeşitlilik ve PMC tipine göre üretim sisteminin yüksek oranda otomasyona uygunluğu,

- İki veya daha fazla tipte lifin bir arada kullanılması ile yüksek sertlik ve yüksek darbe dayanımında hibrit yapı oluşturulabilmesidir.

1.2.1 Polimer Matrisler

Polimer matrisler ısıl davranışlarına göre termoset ve termoplastik olmak üzere iki sınıfa ayrılır (Vinson ve Sierakowski 2008).

1.2.1.1 Termoplastikler

Termoplastikler çapraz bağlı olmayan, kimyasal olarak birbirinden bağımsız makromoleküllere sahip olmaları ile karakterize edilir (Vinson ve Sierakowski 2008; Biron 2018). Isı ile eritilir, kalıp içinde şekillendirilir ve soğutma ile tekrar katılaştırılabilirler Termoplastik malzemeler, teorik olarak ısıtma-soğutma döngüsü tekrar edilerek yapıda hasar meydana gelmeden tekrar şekillendirilebilirler (Biron 2018). Termoplastikler amorf veya yarı kristalinler olmak üzere iki gruba ayrılır (Tanzi ve diğ. 2019). Yüksek kristalinite derecesine sahip polimerlerin rijitliği, ergime sıcaklığı ve solvent direnci daha yüksek iken, amorf polimerler daha düşük ergime sıcaklığı ve zayıf solvent direncine sahiptir (Tanzi ve diğ. 2019; Balani ve diğ. 2015)

Makromolekülleri arasında kimyasal bağ olmamasından dolayı sıcaklık yükselmesiyle sürünme ve relaksasyon davranışları termosetler kadar iyi değildir (Biron 2018). Oldukça iyi darbe dayanımı ve hasar toleransına sahip termoplastik matris kompozitler, termosetler ile kıyaslandığında daha yüksek tokluğa sahip olup kırılganlıkları daha düşüktür (Saba ve diğ. 2017; Peters 2013). Bununla birlikte termoplastik kompozit üretiminin termoset kompozit üretimine göre maliyeti daha yüksek olup, enerji yoğun bir prosese sahiptir (Saba ve diğ. 2017).

Polietilen, polistiren, polipropilen (PP), akrilonitril bütadien stiren (ABS), poliasetal, polikarbonat (PC), polivinilklorürler (PVC), Nylon 6,6, Nylon 6, PET ve PBT gibi termoplastik poliesterler, polietereterketon (PEEK), polifenilen sülfid (PPS), polisülfon (PSF), poliamid-imid (PAI), polieter-imid (PEI) termoplastik matris malzemeler arasında yer almaktadır (Vinson ve Sierakowski 2008).

Termoplastik reçinelerin matris olarak kullanıldığı başlıca uygulamalar şu şekildedir (Mallick 1997):

- Nylon 6,6, nylon 6, PET ve PBT gibi termoplastik poliesterler, PC, poliasetal ve PP; kesikli lifler ile enjeksiyon kalıp uygulamaları.
- PEEK, PPS, PSF, PAI, PEI; hem kesikli hem sürekli lifler ile birlikte yüksek sıcaklık uygulamaları.

1.2.1.2 Termosetler

Katılaşmadan önce bağımsız makromoleküllere sahip olan termoset polimerler, kürlenme sırasında makromoleküllerinin kovalent çapraz bağlar ile birbirine bağlanarak üç boyutlu bir yapıya geçmeleri ile karakterize edilir (Biron 2018). Molekül zincirleri kovalent çapraz bağlar ile birbirine bağlandığı için basınç ve ısı altında bir defa şekillendikten sonra tekrar şekillendirilemeyen polimerlerdir (Vinson ve Sierakowski 2008). Kovalent bağlanma ile üç boyutlu bir yapı elde edildiğinden bu malzemeler oldukça katıdır. Molekül zincirleri arasındaki bağlar, makromoleküllerin birbirinin üzerinden kayma hareketini kısıtlamasından dolayı genel olarak iyi sünme davranışına sahiptirler (Biron 2018). Termoset kompozitler aynı zamanda iyi yorulma dayanımına sahiptir (Saba ve diğ. 2017).

Epoksiler, vinilesterler, doymamış poliesterler PMC'lerde kullanılan geleneksel termoset matrisler iken, fenolikler, bismaleimidler (BMI), poliimidler, polibenzimidazoller ve siyanat esterler yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanılan termoset matris malzemeler arasında yer almaktadır (Vinson ve Sierakowski 2008; Mallick 1997).

Epoksi Reçineler

En sık kullanılan termoset matrislerinden olan epoksi reçineler, kimyasal yapısında iki veya daha fazla 1,2 epoksit grubu (bir oksijen atomu ve iki karbon atomu) içeren polimerlerdir. Bu reçinelerin sentez şartlarına göre tokluk, kimyasal dayanım, olağanüstü esneklik, sertlik, yüksek mukavemet, iyi ısıl dayanım ve iyi elektriksel dayanım gibi karakteristikleri elde etmek mümkündür. Karakteristiklerindeki bu

çeşitliliğin bir sonucu olarak epoksi reçineler, koruyucu kaplamalarda, yapıştırıcılarda, zemin kaplamalarında, kalıplamada, tekstillerde ve tekstil takviyeli kompozitlerde oldukça yüksek oranda kullanım alanı bulmaktadır. (May 2018). Epoksi reçineler arasında; ticari olarak pazar payının yaklaşık %90'ını domine eden difenilolpropanın digilisidil eteri olan bisfenol A epoksi reçinesi (DGEBA), difenilolpropanla, epiklorhidrinin alkali ortamda kondenzasyonu sonucu meydana gelir (Brydson 1999). DGBEA iki epoksi grubu içeren, düşük molekül ağırlıklı bir organik sıvıdır (Chawla 2012). Doğrusal yapılı oligomer bileşikler olan epoksi reçineler sertleştirici ajan ilavesiyle oda sıcaklığı veya yüksek sıcaklıkta kürlenerek termoset ürün haline getirilir. Yapıda meydana gelen çapraz bağlanma yoğunluğunun artmasıyla reçinenin sertlik, mukavemet, camsı geçiş sıcaklığı gibi karakteristikleri geliştirilirken, tokluğunda düşme meydana gelir (Chawla 2012).

Epoksi reçinelerin maliyeti polyester reçinelerden daha yüksektir. Bununla birlikte bismaleimidler veya poliimidler kadar yüksek ısıl kabiliyete sahip değildir (Peters 2013). Tablo 1.1'de epoksi reçinelerin, yaygın kullanım alanına sahip bazı termoset polimer matris tipleri ile ısıl özelliklerinin karşılaştırılması verilmektedir.

Tablo 1.1: Bazı yaygın reçinelerin ısıl özellikleri (John ve Nair 2014; Li ve diğ. 2019; Mottram ve diğ., 1992; Andrew ve diğ., 2013)

	Epoksi	**Fenolikler**	**BMI**	**Siyanat Ester**
En yüksek kullanım sıcaklığı (ºC)	180	200	~200	150–200
Kürleşme sıcaklığı (ºC)	RT–180	150–190	220–300	180–250
TGA onset sıcaklığı (ºC)	260–340	300–360	360–400	400–420
Camlaşma sıcaklığı (ºC)	150–220	170	230–380	250–270
Isıl genleşme katsayısı (10^{-6}/ ºC)	45-65	55-100	44	59

Diğer termoset alternatiflerine göre ısıl davranış ve maliyet yönünden çeşitli kısıtlar barındırsa da epoksi reçinelerin ileri kompozitlerde en sık kullanılan matrislerden olmasını sağlayan avantajları şu şekildedir:

- Lifli yapılar ile iyi bağ yaparlar.
- Kürlenme sırasında yan ürün açığa çıkarmaz.
- Kürlenme sırasında düşük büzülme oranına sahiptir.
- Oda sıcaklığından yüksek sıcaklığa geniş kürleşme sıcaklık aralığına sahiptir.
- Kimyasal direnci iyidir.
- Sünme ve yorulmaya dayanıklıdır.

Epoksi reçinelerin mekanik özelliklerinin, bazı tipik polimer matris malzemeleri ile karşılaştırılması Tablo 1.2'deki gibidir.

Tablo 1.2: Epoksi reçineler ve bazı tipik matrislerin mekanik özellikleri

Malzeme Tipi	**Yoğunluk (kg/m^3)**	**Elastisite Modülü (GPa)**	**Çekme Dayanımı (MPa)**	**Basma Dayanımı (MPa)**	**Poisson oranı**
Polyester	1200-1400	2,5-4,0	45-90	100-250	0,37-0,40
Epoksi	1100-1350	3,0-5,5	40-125	100-200	0,20-0,40
PVC	1400	2,8	58	-	-
Nylon	1140	2,8	70	-	-
Polietilen	960	1,2	32	-	-

1.3 Takviye Edici Lif

Lif takviyeli kompozitlerin yük taşıyan başlıca bileşeni olan lif, kompozit yapıdaki esas mukavemet elemanıdır (Agarwal ve diğ. 2017; Mallick 2007). Kompozit yapıda kullanılacak lif tipi, lif hacim oranı, lif uzunluğu ve lif oryantasyonunun uygun bir şekilde seçimi; kompozit malzemenin fiziksel, mekanik, elektriksel ve ısıl karakteristikleri üzerinde oldukça önemli bir rol oynamaktadır (Mallick 2007). Kompozit malzemelerde en sık kullanılan sentetik lifler; cam, karbon ve Kevlar lifleri iken, olağanüstü özelliklere sahip Boron lifleri yüksek maliyetleri sebebi ile yüksek performansın arzu edildiği alanlarda kullanılmaktadır (Agarwal ve diğ. 2017). Lif

takviyeli kompozitlerin yüksek mukavemete sahip olmasının başlıca sebebi; takviye liflerinin yüksek mukavemet ve sertliğe sahip olmasıdır. Uzunluk/çap oranı, arayüzey arası yapışma, lif hacim oranı ve lifin uzama miktarı gibi faktörler lif takviyeli kompozitlerde takviye etkinliğini etkileyen başlıca faktörler iken lif uzunluğu ve matris içindeki oryantasyonu malzemenin izotropi-anizotropi karakteristiğinde belirleyici faktörlerdir (Vallittu 2015).

1.3.1 Cam Lifi

Cam lifleri nispeten daha düşük maliyetleri ve yüksek mukavemet karakteristikleri sebebi ile polimer matrisli kompozit malzemelerde en sık kullanılan takviye lifleridir. Diğer başlıca avantajları; yüksek kimyasal dayanım ve olağanüstü yalıtım özelliklerine sahip olmasıdır. Nispeten düşük modüle sahip olmaları, diğer ticari lifler arasında daha yüksek bir yoğunluğa sahip olmaları, aşınma hassasiyeti ve buna bağlı olarak çekme dayanımında düşme, nispeten düşük yorulma dayanımı ise bu liflerin dezavantajlarındandır. Lif takviyeli kompozitlerde en yaygın kullanılan iki cam lifi tipi, E-cam lifi ve S-cam lifidir. S-cam liflerini E-cam liflerinden ayıran fark Tablo 1.3'te verildiği gibi bileşimsel farklılık ve S-cam liflerinin daha yüksek üretim maliyetine sahip olmalarıdır (Mallick 2007).

Tablo 1.3: E-cam ve S-cam lifinin kimyasal bileşimi (ağırlıkça %) (Mallick 2007)

	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	B_2O_3	Na_2O
E-cam	54,5	14,5	17	4,5	8,5	0,5
S-cam	64	26	-	10	-	-

1.3.2 Kevlar Lifi

Yüksek çekme dayanımı, yüksek tokluk, yüksek darbe dayanımı ve yüksek sıcaklıklarda kimyasal stabilite gibi üstün özelliklere sahip olan Kevlar®(Dupont) lifi aromatik poliamid grubunda yer alan bir para-aramid lifidir (Yilbas 2018). Basma dayanımının genellikle zayıf olması ve higroskopik yapıları nedeniyle Kevlar® esaslı bazı bileşenlerin su absorbsiyon oranının ağırlıkça %8 olması ise bu liflerin kompozit kullanımındaki başlıca dezavantajlarıdır (Hasan 2020). Kevlar liflerinin kompozit

yapılarda hibritleşerek kullanımına oldukça sık rastlanmaktadır. Özellikle kompozit yapıların darbe hasar toleransını belirgin şekilde arttırmak amacı ile karbon lifleri ile kullanımına literatürde rastlanmaktadır (Gustin ve diğ. 2005; Dorey ve diğ. 1978). Kevlar lifi takviyeli kompozitlerin (KFRC) eksenel yönde çok iyi mekanik özelliklere sahip olmasının yanında, enine yöndeki özellikleri, cam elyaf takviyeli kompozitler ve karbon elyaf takviyeli kompozitlere göre zayıftır. Enine yöndeki mekanik özelliklerini geliştirmek için KFRC'ler; cam, karbon ve alüminyum gibi liflerle hibritleşerek kullanılmaktadır. Cam ve karbon lifleri ile hibritleşerek kullanımının KFRC yapıların modül değerlerini iyileştirdiği kaydedilmiştir (Singh ve Samanta 2015).

1.3.3 Karbon Lifi

Ticari olarak, çekme modülü en düşük 207 GPa ile en yüksek 1035 GPa arasında değişkenlik gösteren karbon lifleri mevcuttur. Yüksek modüllü liflere kıyasla düşük modüllü lifler genellikle daha düşük yoğunluğa, daha düşük maliyete, daha yüksek çekme ve basma dayanımına ve daha yüksek kopma uzamasına sahiptir. Olağanüstü seviyede yüksek çekme dayanımı/ağırlık oranı, çekme modülü/ağırlık oranı, oldukça düşük lineer ısıl genleşme katsayısı, yüksek yorulma dayanımı ve yüksek ısıl iletkenlik karbon liflerinin başlıca avantajlarıdır. Düşük kopma uzaması, düşük darbe dayanımı ve kısa devre yaptırma olasılığından dolayı yüksek elektrik iletkenliği ise bu liflerin dezavantajları arasında sayılmaktadır (Mallick 2007). Karbon lifleri, üretim koşullarına göre amorf veya kristalin yapıda olmaktadır. Mükemmel kristalin yapı elde etmek oldukça güç olup karbon lifleri daha çok turbostratic yapıda bulunmaktadır (Clyne ve Hull 2019).

Kristalin bölge, sp^2 hibritleşmesi yapan karbon atomlarının balpeteği kafesi yapısında, kovalent bağlar ile bağlandığı grafit yapısına oldukça yüksek oranda benzemektedir (Wang 2017). Yüksek çekme modülleri, karbon atomlarının paralel tabakaların kristalografik yapıda dizildiği grafitik formdan kaynaklanmaktadır.

Karbon lifleri lif yapısı, kristalit oryantasyonu ve mekanik performanslarına göre şu şekilde sınıflandırılabilir: Ultra yüksek modül (UHM), yüksek modül (HM), orta modül (IM), standart elastisite modülü (HT), düşük elastisite modülü (LM). UHM ve HM karbon lifleri 2000 °C-3000 °C arası sıcaklıkta grafitleştirilip, 350 GPa'dan

yüksek modül değerine sahip olmaları ile karakterize edilmektedir. Bu karbon liflerinin mekanik özellikleri Tablo 1.4'teki gibidir (Wang 2017).

Tablo 1.4: Karbon lifi tiplerinin çekme yükü altındaki değerleri ve oryantasyon tipi (Wang 2017)

Karbon lifi tipi	**Elastisite modülü (GPa)**	**Çekme dayanımı (MPa)**	**Kristalit oryantasyonu**
Ultra yüksek elastisite modül (UHM))	Modül≥600	≥2500	Lif eksenine yüksek oranda paralel
Yüksek elastisite modül (HM)	350–600	2500	Lif eksenine yüksek oranda paralel
Orta elastisite modül (IM)	280–350	3500	Lif eksenine yüksek oranda paralel
Standart elastisite modülü (HT)	200–280	2500	Lif eksenine yüksek oranda paralel
Düşük elastisite modül (LM)	Modül≤200	≤3500	Rastgele

Karbon lifleri çoğunlukla, çeşitli organik elyaf başlatıcıların ısı ile ayrışımı yoluyla üretilmektedir. Ticari olarak mevcut karbon lifi üretiminde başlatıcı elyafı olarak çoğunlukla Poliakrilnitril (PAN), rayon ve zift başlatıcıları kullanılmaktadır (Chung ve Chung 2012; Buckley ve Edie 1993; Donnet ve Bansal 1998). Bununla birlikte, polietilen, fenolik reçineler, lignin, polivinil metil keton, poliamid, polivinil alkol, polivinil klorür, polivinil asetilen, polibenzimidazol gibi çeşitli başlatıcıların da kullanımı yaygın olmasa da mümkündür. (Chand 2000; Buckley ve Edie 1993). Çeşitli başlatıcıların mevcudiyetine rağmen ticari olarak üretilen karbon liflerinin %70- %80'inde PAN başlatıcı elyafı kullanılmaktadır (Donnet ve Bansal 1998).

Karbon lif üretimi adımları temel olarak lif çekimi, stabilizasyon, karbonizasyon ve grafitizasyondur. Kullanılan PAN elyafı başlatıcıları genellikle yaş lif çekim ve kuru lif çekim yöntemi ile üretilmektedir.

PAN elyafı başlatıcılarının, karbon lifi üretimi sırasında geçtiği ısıl işlemler ise şu şekildedir:

Stabilizasyon

Stabilizasyon işlemi, hava ortamında, gerilim altında 1-2 ^{o}C/dk oranında kontrollü ısıtma ile 220 ^{o}C-270 ^{o}C arası bir sıcaklıkta 30 dk ile 7 saat arası kadar bir süre boyunca gerçekleştirilir (Donnet ve Bansal 1998; Buckley ve Edie 1993). Bu

sürece özel sıcaklık ve süre değerleri PAN lifi çapına göre değişkenlik göstermektedir. Bu aşama, akrilik elyaf başlatıcının, maruz kalacağı sonraki adımlar olan yüksek ısıl işlemlerde termal olarak kararlı bir yapıya dönüşmesi için kimyasal yapısında değişikliklerin meydana geldiği aşamadır (Buckley ve Edie 1993; Nunna ve diğ. 2019). Stabilizasyon işlemi, elyafın nihai yapısı ve mekanik özellikleri üzerinde büyük rol oynadığı için karbon lifi üretiminde en belirleyici adımdır (Donnet ve Bansal 1998).

Karbonizasyon

Termal olarak kararlı hale gelen liflerin inert ortamda yaklaşık 1500 ^{o}C sıcaklıkta, karbon liflerine dönüştüğü, elyaftan karbon olmayan elementlerin uzaklaştırıldığı aşamadır. Karbonizasyon aşamasında, yüksek sıcaklıklarda oksidasyon oluşumunu engellemek için inert ortam gereklidir. Bu amaçla azot, argon veya HCl, BBr_3, ZnO gibi oksitleyici olmayan ortam kullanılmaktadır (Buckley ve Edie 1993; Donnet ve Bansal 1998). Karbonizasyon işlemi kritik iki aşamadan oluşur. Bunlardan ilki; yavaş bir kütle transferinin arzu edildiği, 5 ^{o}C/dk'dan daha düşük bir ısıtma oranında yaklaşık 600 ^{o}C'ye çıkıldığı ön karbonizasyondur. Daha yüksek bir ısıtma oranında daha hızlı bir kütle transferinin gerçekleşmesi, açığa çıkan gazların difüzyonundan kaynaklı olarak, lif yüzeyinde gözenek formunda düzensizliğe yol açabilmektedir (Donnet ve Bansal 1998). Daha yüksek ısıtma oranının kullanıldığı ikinci aşamada ise sıcaklık 600 ^{o}C-1500 ^{o}C arasındadır.

Grafitizasyon

Karbonizasyon işlemi uygulanan lifler küçük kristalitli bir yapıya sahiptir. Grafitizasyon aşamasında, kristalit boyutu arttırılması ve yönelimlerinin iyileştirilmesi 1500 ^{o}C'nin üstünde genellikle 2000 ^{o}C -3000 ^{o}C'de, gerilim altında inert bir ortamda liflerin ısıl işlem görmesiyle gerçekleşmektedir (Buckley ve Edie 1993).

1.4 Termoset Matrisli Kompozitler İçin Üretim Yöntemleri

1.4.1 El Yatırması Yöntemi

Lif takviyeli polimer üretiminde kullanılan en eski ve en basit üretim yöntemi olan el yatırması yöntemi, geniş ebattaki parçaların, düşük hacimli üretim miktarı için uygun bir yöntemdir. Üretim başlangıcında yüksek kaliteli bir yüzey elde etmek amacı ile kalıp yüzeyine pigment katkılı jelkot sürülür. Jelkot üzerine takviye malzemesi yerleştirilir ve reçine dökülür. Ardından manuel rulolama yöntemi ile hava kabarcıkları giderilir, kompozit yoğunlaştırılır ve takviye malzemesinin reçine ile tamamen ıslatılması sağlanır. İstenilen kalınlığa ulaşılana kadar takviye ve reçine eklemesine devam edilir. Düşük takım maliyeti, prosesin basit oluşu, parça ebatında geniş aralık potansiyeli ve tasarım esnekliği bu yöntemin avantajları iken emek yoğun bir proses oluşu ve üretilen parçaların tek bir yüzeyinin düzgün oluşu dezavantajlarıdır (Vinson ve Sierakowski 2006).

1.4.2 Sprey Püskürtme Yöntemi

Sprey püskürtme yöntemi, termoset reçine ve kırpılmış elyaf karışımının bir kalıba sprey tabancası vasıtası ile püskürtülmesi ve ardından kompozit malzemenin atmosfer koşullarında kürleşmeye bırakılması tekniğine dayanır (Middleton 2015).

1.4.3 Vakum Torbalama Yöntemi

El yatırması yönteminin kullanıldığı bu metotta; laminasyonun reçine kaplı tabakalarını bir arada tutmak amacı ile atmosferik basınç kullanılır. Vakum torbalama sistemi hava geçirmez, sıkı bir torbalama ve sistemden hava çıkışını sağlayacak bir sistemden oluşmaktadır. Kompozit yapı, hava geçirmez bir düzenek içine sabitlenir. Bu düzenek, bir yüzeyinde hava geçirmez bir kalıp diğer yüzeyinde ise hava geçirmez bir torbadan oluşmaktadır. Hava geçirmez torba, kalıp içinde izole edildiğinde sistemin içindeki ve dışındaki basınç, 14.7 psi, atmosferik basınca eşittir. Sistem içerisindeki hava vakum pompası ile çekildikçe dışarıdaki basınç 14.7 psi'da kalırken

içerideki basınç düşer. Oluşan negatif basınç, reçine ve kumaş sistemini baskı altında tutar ve hava kabarcıklarının elimine edildiği bir yapı elde edilir. Reçine tamamen emdirildikten sonra, vakum kesilerek parça otoklava alınır ve kürleşmeye bırakılır. Sistemin içi ve dışı arasındaki basınç farkı, tabakalı yapının bağlanma kuvvetini belirler. Teorik olarak laminasyona uygulanabilecek mümkün olan en yüksek basınç, mükemmel bir vakumlama uygulandığı ve tüm havanın sistemden çıkışı sağlandığı takdirde 1 atm, 14.7 psi'dır. Gerçekte ise basınç farkı, sıkıştırma basıncı, 6-12.5 psi'a eşittir (URL_1).

1.4.4 Vakum Destekli Reçine İnfüzyon Kalıplama (VARIM)

Bu metotta, kalıp içine yerleştirilen istiflenmiş kumaşlar vakum torbalama metodunda olduğu gibi dış ortamdan izole edilir. 14 psi'ye eşit veya daha büyük bir vakum kuvveti uygulanır. Vakum, kompozit yapıyı sıkıştırır ve önceden şekillendirilmiş kompozit parçasının reçine tarafından ıslatılmasına yardımcı olur. Kompozit yapı, oda sıcaklığından 180 ^{o}C'ye kadar sıcaklık aralığında kürleşmeye bırakılır (Vinson ve Sierakowski 2006; Irving ve Soutis 2019).

1.4.5 Reçine Transfer Metodu (RTM)

Dişi ve erkek kalıp kullanılan bu yöntemde, elyaf matı veya kumaş preformlar, alt kalıba (dişi kalıp) yerleştirilip üst kalıp kapatılır. Katalize edilmiş, düşük viskoziteli reçine, düşük bir basınç altında kalıp içine enjekte edilir. Kalıp tamamen dolana kadar enjekte edilen reçine kumaş yapısındaki açık boşluklara doğru sızar. Reçine akışının düzgün bir şekilde gerçekleşmesi için aynı zamanda kalıp kenarlardan hava tahliyesi sağlanır. Isıtma ve basınç uygulandığında takviye kumaşının yapısındaki açıklıklar ve filamentler arası boşluklar tamamen reçine ile doldurulur. Enjekte işleminin ardından, kalıp ısıtılır ve matris kürleşmeye bırakılır. Kürleme işlemi ile nihai ürün elde edilir. RTM tekniği, her iki yüzeyi de düzgün malzeme üretimi sunmaktadır (Vinson ve Sierakowski 2006; Irving ve Soutis 2019).

1.4.6 VARIM ve RTM Varyasyonu Süreçleri

Vakum Destekli Reçine Transfer Kalıplama (VARTM)

VARIM sürecinin bir türü olan bu yöntemde elyaf preform açık rijit bir kalıba yerleştirilir ve esnek bir vakum torbası ile dış ortamdan izole edilir. Vakum uygulamasıyla, kalıp yüzeyinde yoğunlaştırılan elyaf preformun içine reçine çekilir.

Reçine Film İnfüzyon (RFI)

Açık kalıp kullanılan bu metodda kalıp içine reçine enjektesi yerine, ince film formundaki reçine, preformun alt ve üst yüzeyine veya katmanlar arasına yerleştirlir. İstiflenmiş yapı vakum torbası ile dış ortamdan izole edilip vakum uygulanır. Isı ve basınç uygulaması için istiflenmiş yapı otoklava yerleştirilir. Uygulanan basınç altında reçinenin, kumaş katmanları arasına akarak karışacak bir seviyeye gelecek şekilde viskozitesinin düşürülmesi için sıcaklık arttırılır. İnfüzyonun tamamlanması ile kompozit yapının katılaşması ve tamamen kürleşmesi için basınç ve sıcaklık arttırılır (Irving ve Soutis 2019; Mouritz 2012). Yüksek elyaf hacim oranına ulaşılması ve maliyetinin nispeten düşük olması bu yöntemin avantajlarındandır (Irving ve Soutis 2019).

Hafif Reçine Transfer Kalıplama (LRTM)

Bu yöntemde üst kalıp bazı durumlarda çelik yapı destekli yarı şeffaf bir kompozit yapıdan üretilir. Kalıp maliyetinin düşük olması ve üretim döngüsünün daha kısa olması bu yöntemin avantajlarıdır (Irving ve Soutis 2019).

Seeman Kompozit Reçine İnfüzyon Kalıplama Prosesi (SCRIMP)

Bu yöntemde elyaf preform ve vakum torbası arasında bir soyma kumaş yerleştirilir ve bu kumaş üzerinde reçine dağıtıcı bir ortam oluşturulur (Irving ve Soutis 2019).

Vakum ile İndüklenen Gevşeme (VIPR)

VARTM ile SCRIMP proseslerin geliştirilmesi ile tasarlanan bu yöntemde, vakum torbasının üzerinde bir vakum haznesi yerleştirilir. Dolma süresinin azaltımı

ve dolumun zor olduğu bölgelere doğrudan akışın sağlanması bu metodun avantajlarıdır (Irving ve Soutis 2019).

Hızlı Kanallı Reçine Kalıplama (FASTRAC)

Esas ve ikincil olmak üzere iki vakum torbası kullanılan bu yöntemde, temassız bir kalıp kullanımı reçinenin preforma daha hızlı bir şekilde tamamen nüfuz etmesine olanak sağlar (Irving ve Soutis 2019).

Yapısal Reaksiyon Enjeksiyon Kalıplama (S-RIM)

RTM ile benzeyen bu yöntemde reçine ve katalizör kalıp içine enjekte edilmeden hemen önce karıştırılır (Irving ve Soutis 2019).

Eşzamanlı Reçine Transfer Kalıplama (CIRTM)

İki veya daha fazla reçinenin eşzamanlı olarak kalıp içine enjekte edilmesine olanak sağlayan bu yöntem çok katmanlı ve multireçineli yapıların üretilmesi avantajlarına sahiptir (Irving ve Soutis 2019).

Baskılı Reçine Transfer Kalıplama (CRTM)

Baskılı enjeksiyon kalıplama yöntemi olarak da bilinen bu yöntemde kalıp yüzeyi ile elyaf preformu arasında boşluk bulunur. Reçine bu boşluğa enjekte edilir ve reçinenin elyaf preforma baskılanması için kalıp kapatılır. Enjeksiyon basıncının ve RTM'de gereken dolma süresinin düşürülmesi bu yöntemin avantajlarıdır (Irving ve Soutis 2019).

Esnek Kalıplama Altında Reçine İnfüzyon (RIDFT)

Bu yöntemde reçine, iki esnek kalıp arasına yerleştirilen preform içine enjekte edilir. Preformun şekil alabilmesi için vakum kullanılır (Irving ve Soutis 2019).

1.4.7 Baskı Kalıplama Yöntemi

Baskı kalıplama işlemi, yüksek mukavemetli ve değişken boyutlarda karmaşık yapılı parça üretimi imkânı sunmaktadır. Bu metotta, hidrolik veya mekanik bir kalıplama presine monteli dişi ve erkek kalıplar kullanılmaktadır. Pestil, hamur veya preform biçimindeki kalıplama bileşimleri açık kalıba yerleştirilir, ısıtılmış kalıp kapatılıp, basınç uygulanarak malzemeye istenilen şekil verilir. Kalıplama süresi parça boyutu ve kalınlığına bağlı olarak 1-5 dk arasında değişkenlik göstermektedir. Baskı kalıplama işlemi iyi mekanik ve kimyasal özelliklere sahip kompozit üretimi imkânı sunmaktadır. Bunun yanında, üstün renk ve üstün yüzey kalitesi ve traşlama ve bitim maliyetinin minimize edilmesi gibi avantajları bulunmaktadır (Vinson ve Sierakowski 2006).

1.4.8 Filament Sarma

Kompozit üretiminde kullanılan en eski metot olan filament sarma tekniğinde, önceden reçine emdirilmiş bant veya işlem esnasında reçine banyosundan geçirilen sürekli elyaf filamentler veya iplikler dönen bir mandrel üzerine belirli bir hız ve gerginlikte sarılır. Sarım işleminin tamamlanması ile sarılmış yapı oda sıcaklığında veya bir fırında kürleşmeye bırakılır. Kürleşmenin ardından mandrel ayrılır. Tasarım ve sarım tekniğine göre istenilen yönde en yüksek elyaf mukavemetinin elde edilmesi ve filament sarımının otomasyona ve robotik prosedüre uygun olması, bu yöntemin avantajlarıdır (Kenny ve Nicoalis 1989).

1.4.9 Pultrüzyon Yöntemi

Pultrüzyon prosesi düşük maliyetli, sabit enine kesitli kompozit profillerin üretilebildiği, otomasyona uygun sürekli bir üretim yöntemidir. Bir cağlık sisteminden çekilen kumaş, mat, tülbent veya fitil formundaki elyaf topluluğu, reçine banyosuna daldırılır. Reçine emdirilmiş elyaf banyodan çıkar ve aşırı polimerin giderilmesi amacıyla bir seri silici sistemden geçirilmesinin ardından, nihai bileşen şeklini almak üzere ısıtılmış kalıba girmeden önce bir yönlendiriciden geçirilir. Elyaf-reçine sistemi ısıtılmış kalıptan geçirilmesiyle, reçine kürleşirken bileşen son şeklini almış olur.

Isıtılmış kalıplar genellikle 1 m uzunluğundadır. Eğer çekim çok hızlı bir şekilde gerçekleşirse, kompozit yapı kalıptan kısmi kürleşmiş olarak çıkar. Çekimin gereğinden yavaş olması ise süreci yavaşlatarak üretim oranının düşmesine yol açar. Epoksi esaslı kompozitler için çekim hızı 10-200 cm/dk aralığındadır. Kürlenmiş kompozitin kalıptan ayrılmasının ardından, sabit bir uzunluk elde etmek için kesim bıçağı tarafından kesilir (Mouritz 2012).

Kürleme kalıbının kesit şekline göre I veya H profiller, kare, dikdörtgen veya dairesel enine kesitler elde etmek mümkün olabilmektedir (Balasubramanian ve diğ. 2018). Sürekli işlem olması, elyaf gerilimi ve oryantasyonunun kürleşme süresi ve sıcaklığı boyunca düzenli bir şekilde kontrol edilmesine olanak vermektedir. Böylelikle, tekrarlanabilir özelliklere sahip yüksek performanslı kompozit profillerinin üretimi mümkün olmaktadır (Rawal ve Goodman 2000). Pultrüzyon prosesinde en sık kullanılan matris tipi termoset matrislerdir. Fenolik reçineler yüksek ısıl dayanımına sahip olmalarından ve diğer termosetlere göre düşük maliyete sahip olmalarından dolayı en sık kullanılan matris türlerindendir (Balasubramanian ve diğ. 2018; Rawal ve Goodman 2000; Verma ve diğ. 2019). Poliester, epoksi reçine, vinil ester ve fenolik reçinelerin kullanımı mümkün iken doymamış poliester reçineler, diğer reçine sistemleri ile karşılaştırıldığında daha düşük ısı girişi ile daha hızlı jelleşme meydana geldiğinden en sık kullanılan matris tipidir. En sık kullanılan lif tipi ise E-cam ve S- cam lifidir. Kullanımının mümkün olduğu takviye formları ise fitil, tow, mat, kumaş veya bunların hibrit formudur (Verma ve diğ. 2019).

1.4.10 Enjeksiyon Kalıplama

Yüksek kapasiteli üretim imkânı sunan bu yöntem, termoplastik endüstrisinde yaygınlıkla kullanılmakla birlikte termoset bileşenlerde de kullanımı mümkündür. İki sistemin başlıca farkı, sistemin farklı bölgelerindeki sıcaklık kontrolüdür. Termoplastiklerde enjeksiyon vidası ve hazne yüksek sıcaklıkta tutulurken termosetlerde vida ve hazne sıcaklığı reçinede çapraz bağların kalıp boşluğuna girmeden önce oluşmaması ve reçinenin kalıba enjekte edilebilmesi adına kontrol altında tutulmaktadır. Termoset uygulamalarda kalıp, hammadde ile doldurulduktan

sonra reçinenin ergime sıcaklığı üstüne çıkılarak çapraz bağlanma oluşur ve hammadde nihai haline ulaşır (Vinson ve Sierakowski 2006).

2. LİTERATÜR

Bu bölümde, yapılmış olan literatür araştırması "Kompozitlerde Kullanılan Örme ve Dokuma Kumaşlar ve Bu Kompozitlere Uygulanan Mekanik Testler", "Dokuma ve/veya Örme Kumaş Takviyeli Kompozit Plakalarda Eğilme ve Çekme Davranışı" ve "Kompozit Plakaların Mekanik Davranışında Rol Oynayan Kumaş Konstrüksiyon Parametreleri" olmak üzere üç ana başlık halinde derlenmiştir.

2.1 Kompozitlerde Kullanılan Örme ve Dokuma Kumaşlar ve Bu Kompozitlere Uygulanan Mekanik Testler

Takviye malzemesi olarak kumaşların kullanıldığı kompozit malzemelerde temel olarak örme, dokuma, saç örgüsü ve dokusuz yüzey yapıları kullanılmaktadır. Bahsi geçen her bir kumaş tipi, kumaşı meydana getiren ara bileşenler olan iplik veya ana bileşen olan elyafın birbirleri ile bağlanma tipi farklılığından kaynaklı olarak oluşturulan bir kumaş geometrisini temsil etmektedir. Bu bölümde, kompozit yapılarda kullanılan iki boyutlu atkı örme ve dokuma kumaş konstrüksiyonlarından ve bu kumaşların kullanıldığı kompozitlere uygulanan mekanik testlerden bahsedilmiştir.

2.1.1 Örme Kumaş Takviyeli Kompozitler

Örme teknolojisi, ipliklerin meydana getirdiği ilmeklerin örme iğneleri vasıtasıyla birbirine geçmesi yoluyla kumaş oluşturma tekniğine dayanır. Bu teknikte, sürekli bir dizi halindeki iç içe geçmiş ilmekler, iğnelerin ipliği yakalaması ve yakaladığı ipliği bir önce oluşmuş olan ilmeğin içinden geçirerek yeni bir ilmek oluşturması ile meydana gelir. Örme kumaşların esneyebilirlikleri, mükemmel seviyedeki dökümlülükleri ve şekillendirilebilirlikleri sayesinde elyaf preformlarının net şekle yakın üretim imkanını ve karmaşık şekilli kompozit bileşimi üretimini kolaylaştırması ve işlem maliyeti azaltımını beraberinde getirmesi bu kumaşların kompozit yapılarda kullanım avantajlarındandır (Tong ve diğ. 2002; Leong ve diğ. 2000; Khondker 2005; Pandita ve diğ. 2002; Verpoest ve Dendauw 1992). Bunun

yanında, Pandita ve diğ. (2002) yaptığı çalışmada örme yapılarda liflerin, düzlem içi dizilimin yanında kumaş kalınlığı yönünde de bir dizilime sahip olması; örme kumaş takviyeli kompozitleri, tek yönlü elyaf takviyeli kompozitler, dokuma kumaş takviyeli kompozitler ve saç örgü kumaş kompozitleri arasında kalınlık doğrultusunda, en iyi özelliklere sahip olmasıyla öne çıkardığını belirtmektedir. Verpoest ve Dendauw (1992) ise çalışmasında reçine transfer uygulamalarında mükemmel seviyedeki reçine geçirgenliğinin, makul sürelerde ve düşük basınçta geniş yüzeylerde reçine emdirilmesini de beraberinde getirmesinin üretimde ek avantaj sağladığını ifade etmiştir. Ayrıca, Verpoest ve Dendauw (1992) ve Kim ve diğ. (2012) örme kumaş takviyeli kompozitlerin ilmekli yapısından dolayı, dokuma ve UD takviyeli kompozitlerden daha yüskek kırılma tokluğuna (mod 1) sahip olma potansiyelini vurgulamaktadır. Bununla birlikte, örme teknolojisi, haşıllama ve çözgü hazırlık gibi herhangi bir ön işlem gerektirmediği için, düşük maliyette yüksek miktarlarda üretim mümkün olabilmektedir.

Literatürdeki çalışmalarda örme kumaş takviyeli kompozitlerde kullanılan atkı örme kumaş varyasyonları olarak; Khondker ve diğ. (2004), Ramakrishna ve diğ. (1994), Ramakrishna ve diğ. (1995), Hu ve diğ. (2010) düz örgü, Muralidhar ve diğ. (2012), Muralidhar (2013), Pandita ve diğ. (2002), Kim ve diğ. (2005), Aktaş ve diğ. (2013) 1×1 Rib örgü, Pandita ve diğ. (2002), Kim ve diğ. (2005), Delavar ve Dabiryan (2021) interlok örgü, Pandita ve diğ. (2002), Chou ve diğ. (1992) tam selanik, Aktaş ve diğ. (2013), Pandita ve diğ. (2002), Leong ve diğ. (1998), Kim ve diğ. (2005) milano örgü yapılarını kullanmıştır. Kumaşlarda sıklıkla kullanılan hammaddeler ise şu şekildedir; Ramakrishna ve diğ. (1995), Ramakrishna (1995), Rudd ve diğ. (1990), Chou ve diğ. (1992), Chou ve Wu (1992), Ramakrishna ve diğ. (1994), Shekarchizadeh ve diğ. (2021) cam elyafını, Ramakrishna ve Hull (1993), Ramakrishna (1995), Chou ve diğ. (1992) ise karbon elyafını tercih etmiştir.

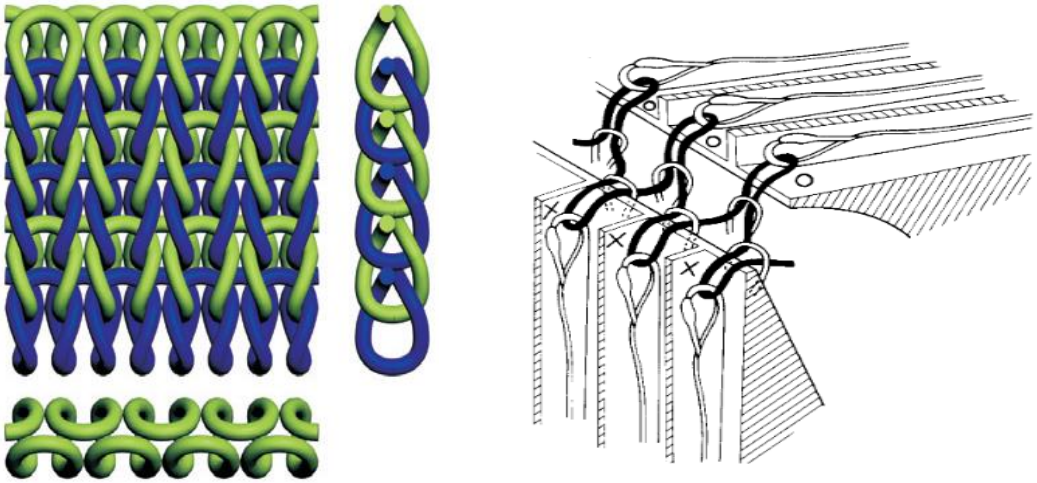
2.1.1.1 Düz Örgü Kumaş Takviyeli Kompozitler

En basit örme tipi olan düz örme kumaşlar V yataklı düz örme ve yuvarlak örme makinelerinde tek iğne yatağında üretilmekte olup, teknik yüzü ve teknik arkası görünüşte birbirinden farklı kumaşlardır. Bu kumaşların, kumaş eni yönünde esneme

özellikleri nispeten düşüktür. Literatürde, düz örgü kumaşların 2 boyutlu veya 3 boyutlu sandviç formda, kompozit plakalarda kullanıldığı çalışmalarda tercih edilen hammadde tipi ve test metodu olarak; Ramakrishna ve diğ. (1994) cam elyafı ve cam elyafı/polipropilen (PP) lifinden düz örgü takviyeli termoplastik kompozitlerin çekme testini, Ramakrishna ve diğ. (1995) cam elyafı/PP lifinden düz örgü takviyeli PP plakaların düşük hızlı darbe dayanımı, Khondker ve diğ. (2004) aramid elyafından düz örgü takviyeli nylon ve epoksi kompozit plakaların çekme testini, Hu ve diğ. (2010) bazalt lifinden düz örgünün üç boyutlu dikişli dokuma kumaşların iç katmanında konumlandığı kumaşların takviye olarak kullanıldığı polyester plakaların çekme, eğilme ve darbe testlerini gerçekleştirmiştir.

2.1.1.2 Tam Rib Örgü Kumaş Takviyeli Kompozitler

Rib örme kumaşlar, çift iğne yatağında üretilmekte olup teknik yüzü ve teknik arkası görünüşte aynı olan kumaşlardır. Şekil 2.1 (a)'da tam rib örgüsünün geometrik modeli, Şekil 2.1 (b)'de ise üretim sırasındaki iğne dizilimi gösterilmektedir. Bu kumaşlar, kumaş eni yönünde iyi esneme özelliğine sahiptir.



(a) (b)

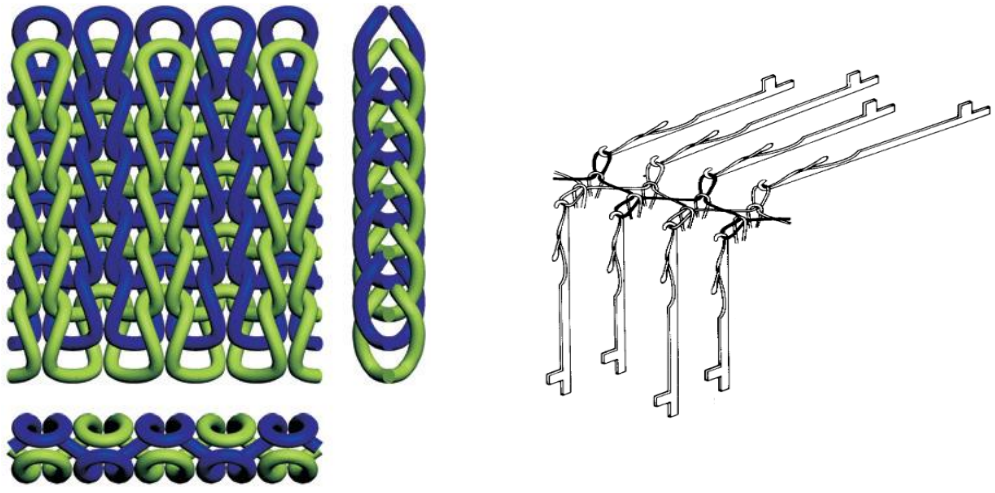
Şekil 2.1: (a) Tam rib örgü yapısının geometrik modeli (Kurbak 2009) ve (b) Tam rib örgü yapısının çift iğne yatağındaki iğne düzeninin temsili gösterimi (Spencer 2001)

Literatürde, bazı çalışmalarda 1×1 rib olarak da adlandırılan tam rib ve diğer rib varyasyonu örgü kumaşların 2 boyutlu veya 3 boyutlu sandviç formda, kompozit plakalarda kullanıldığı çalışmalarda tercih edilen hammadde tipi ve test metodu

olarak; Chou ve Wu (1992) epoksi kompozitlerin mekanik özelliklerini incelediği çalışmasında takviye malzemesi olarak cam elyaf rib kumaş tercih etmiştir. Delavar ve Dabiryan (2021) polyester elyafından 1×1 ve 3×3 rib ve cam elyafından 1×1, 3×3 ve 5×5 rib kumaşların kullanıldığı sandviç kumaş takviyeli epoksi kompozitlerin eğilme davranışında z lifi oryantasyonunun etkisini incelerken, Pandita ve diğ. (2002) cam elyafından 1×1 rib kumaş takviyeli epoksi kompozitlerin çekme, çift konsol kiriş ve 3, 5 ve 7 J enerji altında darbe testlerini gerçekleştirmiştir. Aktaş ve diğ. (2013) cam elyafından 1×1 rib kumaşlar ile birlikte çift katmanlı dokuma kumaşların farklı dizilim varyasyonlarında takviye olarak kullanıldığı epoksi hibrit kompozitlerin 5 J – 45 J, cam elyafından 1×1 rib kumaşlar ile milano kumaşların farklı dizilim varyasyonlarında kullanıldığı kompozitlerin ise 5 J - 25 J arası farklı enerji varyasyonları altındaki darbe ve darbe sonrası davranışını incelemiştir. Kim ve diğ. (2005) cam elyafından 1×1 rib kumaşların takviye olarak kullanıldığı epoksi kompozitlerin modifiye çift konsol kiriş testi ile kırılma analizini, Chou ve diğ. (1992) cam ve karbon elyafından rib kumaş takviyeli epoksi kompozitlerin yorulma dayanımını incelerken, Balcıoğlu ve Yalçın (2020) cam ve karbon elyafından 1×1 rib takviyeli epoksi kompozitlerin çekme testini gerçekleştirip, modifiye arcan testi ile kırılma tokluğunu analiz etmiştir. Muralidhar ve diğ. (2012) keten lifinden rib kumaş takviyeli epoksi kompozitlerin eğilme ve darbe testini ve Muralidhar (2013) keten lifindan 1×1 rib kumaş takviyeli epoksi kompozitlerin çekme ve basma testini gerçekleştirmiştir.

2.1.1.3 Interlok Örgü Kumaş Takviyeli Kompozitler

Geometrik modeli Şekil 2.2 (a)'da, çift iğne yatağındaki iğne düzeni ise Şekil 2.2 (b)'de gösterilen interlok örme kumaşlar, iğnelerin karşılıklı gelecek şekilde yerleştirildiği çift iğne yatağında ardışık iğne iptalli olarak her biri rib yapısında olan iki sistemde bir sıra oluşturulmasıyla elde edilir. Bu kumaşların teknik yüzü ve teknik arkası görünüşte aynıdır. Kumaşın enine yönünde esneme özelliği; rib örgülerin aksine, ilmeklerin karşılıklı olarak birbirine zıt yönde oluşmalarından dolayı yoktur. Düz örgülere kıyasla yaklaşık iki kat daha ağır, daha kalın ve boyutsal stabilitesi daha yüksektir (Das ve diğ. 2017).



(a) (b)

Şekil 2.2: (a) Interlok örgü yapısının geometrik modeli (Kurbak ve Alpyildiz 2009) ve (b) İnterlok örgü yapısının çift iğne yatağındaki iğne düzeninin temsili gösterimi (Spencer 2001)

Literatürde, interlok örgü kumaşların 2 boyutlu veya 3 boyutlu sandviç formda, kompozit plakalarda kullanıldığı çalışmalarda hammadde tipi ve test metodu olarak; Delavar ve Dabiryan (2021) cam elyafından 2×2, 4×4 ve 5×5 interlok ve polyester elyafından 2×2 ve 4×4 interlok örgü kumaşların kullanıldığı sandviç kumaş takviyeli epoksi kompozitlerin eğilme davranışında z lifi oryantasyonunun etkisini incelerken Pandita ve diğ. (2002) cam elyafından interlok kumaş takviyeli epoksi plakaların çekme, çift konsol kiriş ve 3 J, 5 J ve 7 J enerji altında darbe testlerini gerçekleştirmiştir. Kim ve diğ. (2005) cam elyafından interlok kumaşların takviye olarak kullanıldığı epoksi kompozitlerin modifiye çift konsol kiriş testi ile kırılma analizini gerçekleştirirken Chou ve diğ. (1992) cam ve karbon elyafından interlok kumaş takviyeli epoksi kompozitlerin yorulma dayanımını incelemiştir.

2.1.1.4 Tam Selanik Örgü Kumaş Takviyeli Kompozitler

Tam selanik örme kumaşlar, ilk sistemde ön iğne yatağında iğnelerin tamamının ilmek, arka ön iğne yatağında askı, ikinci sistemde ise ön iğne yatağında askı arka iğne yatağında ilmek oluşturulmasıyla üretilen kumaşlardır. Bu kumaşların enine yönde esnemesi oldukça yüksektir. Literatürde, tam selanik örgü kumaşların kompozit plakalarda kullanıldığı çalışmalarda hammadde ve uygulanan test metodu olarak; Chou ve diğ. (1992) cam ve karbon elyafından tam selanik kumaş takviyeli

epoksi kompozitlerin yorulma dayanımını incelerken, Pandita ve diğ. (2002) cam elyafından tam selanik kumaş takviyeli epoksi plakaların çekme, çift konsol kiriş ve 3 J, 5 J ve 7 J enerji altında darbe testlerini gerçekleştirmiştir

2.1.1.5 Milano Örgü Kumaş takviyeli Kompozitler

Rib iğne düzeninde, makinede bir sıra rib örüldükten sonra ön ve arka iğne yataklarında kanalların oluşturulduğu örgü yapısıdır. Teknik yüzü ve teknik arkası aynı görünüşte olan bu tip kumaşların, esnemesi az olup boyutsal stabilitesi yüksektir. Literatürde, milano örgü kumaşların kompozit plakalarda kullanıldığı çalışmalarda hammadde ve uygulanan test metodu olarak; Pandita ve diğ. (2002) cam elyafından milano kumaş takviyeli epoksi plakaların çekme, çift konsol kiriş ve 3 J, 5 J ve 7 J enerji altında darbe testlerini gerçekleştirirken, Aktaş ve diğ. (2013) cam elyafından milano kumaşlar ile birlikte çift katmanlı dokuma kumaşların farklı dizilim varyasyonlarında takviye olarak kullanıldığı epoksi hibrit kompozitlerin 5 J - 45 J arası farklı enerji varyasyonları altındaki darbe ve darbe sonrası davranışını incelemiştir. Kim ve diğ. (2005) cam elyafından milano kumaşların takviye olarak kullanıldığı epoksi kompozitlerin modifiye çift konsol kiriş testi ile kırılma analizini gerçekleştirmiştir. Leong ve diğ. (1998) cam elyafından milano-rib kumaşların takviye olarak kullanıldığı epoksi kompozitlerin çekme, basma ve 0 J - 21 J arası farklı enerji varyasyonları altındaki darbe ve darbe sonrası basma davranışını incelerken, Chou ve diğ. (1992) cam ve karbon elyafından milano kumaş takviyeli epoksi kompozitlerin yorulma dayanımını incelemiştir.

2.1.2 Dokuma Kumaş Takviyeli Kompozitler

Dokuma teknolojisi, birbirlerine paralel olarak yan yana dizilmiş çözgü iplikleri arasından atkı ipliklerinin, çözgü ipliklerine dik yönde ve bir doku oluşturacak şekilde ard arda geçirilmesi tekniğine dayanmaktadır. Leong (2000), Ashraf ve diğ. (2017) ve Muralidhar (2013), dokuma kumaşların takviye olarak kullanıldığı kompozit yapıların düzlemsel(in-plane) mukavemet ve sertlik gibi mekanik özelliklerinin örme kumaş kompozitlere göre daha yüksek olduğunu ifade etmektedir. Bu başlık altında,

literatürdeki, bezayağı konstrüksiyonundaki kumaşlar ve basket, dimi ve saten konstrüksiyonu varyasyonlarının kullanıldığı kompozitler üzerine gerçekleştirilmiş çalışmalardan alt başlıklar halinde bahsedilmiştir.

2.1.2.1 Bezayağı Dokuma Kumaş Takviyeli Kompozitler

Bezayağı kumaşlar atkı ve çözgü ipliklerinin birbirlerine tam olarak bağlanmaları sonucu, yapısı en sağlam olan dokuma tipidir. Bezayağı tekniğinde kesişme düzeni atkı ve çözgü yönündeki iki iplikten sonra aynı biçimde tekrarlanmaktadır (Başer 2004). Literatürde, bezayağı dokuma kumaşların kompozit plakalarda kullanıldığı çalışmalarda hammadde ve uygulanan test metodu olarak; Chen ve diğ. (2019) karbon, bazalt ve cam elyafından bezayağı kumaşların kullanıldığı epoksi kompozitlerin 50 J altındaki darbe davranışını, Wagih ve diğ. (2020) karbon ve aramid elyaflarından bezayağı kumaşların bir arada kullanıldığı hibrit epoksi kompozitlerin 5 J - 45 J arası farklı enerji varyasyonları altındaki darbe davranışını ve darbe sonrası eğilme davranışını incelerken, Carillo ve diğ. (2012) aramid elyafından bezayağı kumaş takviyeli PP kompozitlerin balistik davranışını incelemiştir. Muralidhar ve diğ. (2012) keten lifinden bezayağı kumaş takviyeli epoksi kompozitlerin eğilme ve darbe testini, Houshyar ve diğ. (2005) PP elyafından bezayağı kumaş takviyeli propilen-etilen random kopolimer (PPE) kompozitlerin eğilme ve çekme testlerini, Park ve Jang (1998) PE-aramid elyaflarından hibrit vinilester kompozitlerin üç noktalı eğilme, tabakalar arası kayma mukavemeti ve darbe testlerini gerçekleştirirken, Saiman ve diğ. (2014) kenaf lifinden bezayağı kumaş takviyeli doymamış polyester reçine takviyeli kompozitlerin çekme testini gerçekleştirmişir.

2.1.2.2 Dimi Dokuma Kumaş Takviyeli Kompozitler

Dimi dokumalar, atkı ve çözgü ipliklerinin her birinin kendine dik yönde bulunan iki veya daha çok iplik üzerinden geçerek kesiştiği ve bu ipliklerin kumaş yüzeyinde bulunan uzunluklarının kumaşa göre çapraz yönde yan yana dizilmeleriyle oluşan yapılardır. Atkı ya da çözgü ipliklerinin kumaş yüzeyinde görülen parçalarına atlama denir. Atlama uzunluklarını değiştirerek dimi örgülerin çeşitli türlerini elde

etmek mümkündür (Başer 2004). Literatürde dimi dokuma kumaşların kompozit plakalarda kullanıldığı çalışmalarda hammadde ve uygulanan test metodu olarak; Zhang ve diğ. (2012) karbon elyafından 2/2 dimi kumaş ve cam elyafından bezayağı takviyeli kumaşların kullanıldığı hibrit epoksi kompozitlerin çekme, üç noktalı eğilme ve basma testlerini, Karahan (2011) karbon elyafından 2/2 dimi kumaş takviyeli epoksi kompozitlerin çekme testini, Ng ve diğ. (1998) karbon elyafından 2/2 dimi kumaş takviyeli epoksi kompozitlerin çekme testini ve ray sistemi metodu ile kayma analizini, Koricho ve diğ. (2014) cam elyafından 2/2 dimi kumaş takviyeli epoksi kompozitlerin çekme, kayma modülü ve dört noktalı eğilme yorulması testlerini, Houshyar ve diğ. (2005) PP elyafından 2/1 dimi kumaş takviyeli PPE kompozitlerin eğilme ve çekme testlerini, Valença ve diğ. (2015) aramid ve aramid/S-cam hibridi 2/2 dimi kumaş takviyeli epoksi kompozitlerin çekme, üç noktalı eğilme ve izod darbe testlerini gerçekleştirirken Saiman ve diğ. (2014) kenaf lifinden 4/4 dimi kumaş takviyeli doymamış polyester reçine takviyeli kompozitlerin çekme testini gerçekleştirmiştir.

2.1.2.3 Basket Dokuma Kumaş Takviyeli Kompozitler

Basket dokuma, bezayağı dokumaya benzemekle birlikte; çözgü ve atkı iplikleri iki veya daha fazla sayıda gruplaşarak bağlantı kurarlar (Başer 2004). Literatürde basket dokuma kumaşların kompozit plakalarda kullanıldığı çalışmalarda hammadde ve uygulanan test metodu olarak; Houshyar ve diğ. (2005) PP elyafından 2/2 basket kumaş takviyeli PPE kompozitlerin eğilme ve çekme davranışını incelerken, Saiman ve diğ. (2014) kenaf lifinden 4/4 basket kumaş takviyeli doymamış polyester reçine takviyeli kompozitlerin çekme testini gerçekleştirmişir.

2.1.2.4 Saten Dokuma Kumaş Takviyeli Kompozitler

Saten dokumaların belirgin özelliği, örgü birimindeki her bir ipliğin tek bir atlama yapması ve bu atlamaların olanak ölçüsünde dimi çizgileri oluşturmayacak şekilde birer noktada bağlanmalarıdır (Başer 2004). Literatürde saten dokuma kumaşların kompozit plakalarda kullanıldığı çalışmalarda hammadde ve uygulanan test metodu olarak; Houshyar ve diğ. (2005) PP elyafından 8-H saten kumaş takviyeli

PPE kompozitlerin eğilme ve çekme testlerini, Saiman ve diğ. (2014) kenaf lifinden 8/3 saten kumaş takviyeli doymamış polyester reçine takviyeli kompozitlerin çekme testini gerçekleştirirken, Militký ve Jabbar (2015) jüt lifinden 5-H saten kumaş takviyeli epoksi kompozitlerin sürünme davranışı ve üç noktalı eğilme modunda dinamik mekanik analizini gerçekleştirmiştir.

2.2 Dokuma ve/veya Örme Kumaş Takviyeli Kompozit Plakalarda Eğilme ve Çekme Davranışı

Bu bölümde dokuma ve/veya atkı örme kumaş takviye elemanı ve matris olmak üzere iki majör bileşenden oluşan, herhangi bir partikül, katkı ve dolgu maddesi içermeyen kompozit plakaların eğilme ve çekme testine ilişkin yapılan çalışmalardan bahsedilmiştir. Takviye elemanlarında kullanılan lif tipi olarak ise dokuma kumaşlar için sentetik lifler ve bu liflerin birbiri ile ya da doğal lifler ile hibritleşmesi üzerine yapılan çalışmalarda kullanılan lif tipleri esas alınmıştır.

Liu ve diğ. (2013) 13 katlı karbon dimi dokuma kompozitlerin çekme davranışının deneysel ve sayısal analizini karşılaştırdığı çalışmasında deneysel analiz sonucunda elastisite modülünü 53,69 GPa olarak gözlemiştir. Margabandu ve Subramaniam (2019) jüt ve karbon kumaş takviyelerinin 4 kat kullanıldığı hibrit kompozitlerin eğilme dayanımını incelediği çalışmasında en yüksek eğilme dayanımını 401,82 MPa ile jüt kumaşların merkezde, karbon kumaşların dış katmanda kullanıldığı kompozitlerde elde etmiştir. Zhang ve diğ. (2012) çalışmasında 8 katlı, 2/2 dimi karbon ve bezayağı cam kumaşların yalnızca tek tipini ve bu iki kumaşın çeşitli dizilim kombinasyonlarını takviye olarak kulllandığı kompozitlerin ASTM D3039-76 ve ASTM D790 standartlarına göre çekme ve eğilme testlerini gerçekleştirmiştir. En yüksek çekme dayanımı ve elastisite modülünü 420 MPa ve 38,39 GPa ile 8 katlı 2/2 dimi karbon kumaşın kullanıldığı kompozitte gözlemiştir. Aynı kompozit plakada aynı zamanda sırasıyla 455 MPa ve 29,03 GPa ile en yüksek eğilme dayanımı ve modül değerini elde etmiştir. Subagia ve diğ. (2014) 10 katlı karbon bezayağı dokuma, bazalt bezayağı dokuma ve bu kumaşların çeşitli dizilim varyasyonlarını kullanarak elde ettiği kompozit plakaların ASTM D970-07 standardına göre eğilme dayanımını incelediği çalışmasında en yüksek eğilme dayanımı ve modül değerini 860 MPa ve

54,172 GPa ile 10 katlı karbon bezayağı kumaşın kullanıldığı kompozit plakalarda elde etmiştir. Elanchezhian ve diğ. (2014) çalışmasında karbon ve cam elyafının ayrı ayrı takviye malzemesi olarak kullanıldığı kompozitlerin çeşitli mekanik özelliklerini incelemiştir. ASTM D638 standardına göre farklı sıcaklıklarda gerçekleştirdiği çekme testi sonucunda 35 ^{o}C'de 3,5 mm kalınlığındaki karbon takviyeli kompozitlerin sırasıyla 913,86 MPa ve %4,761 ile en yüksek çekme dayanımı ve uzama değerine sahip olduğunu gözlemlemiştir. ASTM D790 standardına göre gerçekleştirdiği eğilme testi sonucunda ise; 31,578 MPa ile 4,5 mm kalınlığındaki karbon takviyeli kompozitlerin eğilme dayanımının cam elyafı takviyeli kompozitlerden daha yüksek olduğunu gözlemlemiştir. Paiva ve diğ. (2009) çalışmasında F584 ve 8552 olmak üzere iki farklı epoksi matris ile karbon bezayağı dokuma ve karbon 8H saten konstrüksiyonunda iki farklı kumaşın kombinasyonları kullanılarak üretilen kompozitlerin ASTM D790 standardına göre eğilme testi, ASTM D3039 standardına göre ise çekme testini gerçekleştirmiştir. Karbon bezayağı dokuma kumaş içeren kompozitlerde sırasıyla 1288,5 MPa ve 1185,4 MPa ile en yüksek eğilme ve çekme dayanımını elde ederken en yüksek çekme modülünü 71,5 GPa ile 8H saten kumaşın kullanıldığı kompozitte elde etmiştir. Murugan ve diğ. (2014), çalışmasında cam/karbon dokuma kumaş takviyeli epoksi hibrit kompozitlerin ASTM D3039 ve ASTM D790 standartlarına göre çekme ve eğilme testlerini gerçekleştirmiştir. Çalışmada sırasıyla 0,612, 0,619, 0,617 ve 0,618 takviye oranlarında; 4 katlı cam kumaşın kullanıldığı kompozit (4G), 4 katlı karbon kumaşın kullanıldığı kompozit (4C), 2 adet karbon kumaşın merkezde olduğu 4 katlı kumaştan oluşan hibrit kompozit (H1) ve 2 adet cam kumaşın merkezde olduğu 4 katlı kumaştan oluşan hibrit kompozit numuneler (H2) kullanmıştır. 4C numunesinin 462,08 MPa ve 573,27 MPa ile en yüksek çekme ve eğilme dayanımına sahip olduğunu gözlemiştir. Sun ve diğ. (2018) çalışmasında 8 katlı karbon bezayağı ve bazalt bezayağı dokuma kumaşların ayrı ayrı ve birbiri ile kombinasyonundan oluşan hibrit kompozitlerin sırasıyla ASTM D3039 ve ASTM D 7264 standartlarına göre çekme ve eğilme testlerini gerçekleştirmiştir. Sadece karbon kumaş içeren kompozitin sırasıyla çekme dayanımı ve modülünü 504 MPa ve 50,38 GPa olarak gözlemiştir. Park ve Jang (1998) çalışmasında atkı ve çözgü grupları arasında 1:1 ve 3:1 oranında aramid/PE hibritleşmesi gösteren bezayağı kumaşların takviye olarak kullanıldığı kompozitlerin ASTM D790 standardına göre eğilme testini incelemiştir. Sırasıyla en yüksek eğilme dayanımı ve modülünü 140 MPa ve 11,5 GPa ile dört katlı yalnızca aramid kumaşın

kullanıldığı kompozit plakanın gösterdiği gözlenmiştir. Houshyar ve diğ. (2005) çalışmasında PP bezayağı, 2/2 basket, 2/1 dimi ve 8-H saten kumaşlarının takviye olarak kullanıldığı PP matrisli kompozitlerin sırasıyla çekme modülünü 1,95 GPa, 2,21 GPa, 2,45 GPa ve 1,58 GPa olarak, eğilme modülünü ise 0,82 GPa, 1,09 GPa, 1,25 GPa ve 1,58 GPa olarak gözlemiştir.

Komorek ve diğ. (2021) çalışmasında 2/2 dimi konstrüksiyonundaki Vectran, Vectran/aramid ve Vectran/karbon kumaş takviyeli epoksi matrisli sırasıyla 2 mm, 1,9 mm ve 2,2 mm kalınlığındaki kompozitlerin çekme ve eğilme testlerini gerçekleştirmiştir. En yüksek eğilme dayanımını, 985,33±82,28 MPa ile Vectran/karbon kompozitlerde gözlerken, en yüksek çekme dayanımını 484,34± 34,82 MPa ile yalnızca Vectran takviyeli kompozitlerde gözlemiştir. Khatkar ve diğ. (2020) 5 kat cam elyafından bezayağı kumaş takviyeli epoksi kompozitlerin sırasıyla ASTM D3039 ve ASTM D7264 standartlarına göre çekme ve eğilme testlerini gerçekleştirdiği çalışmasında çekme dayanımı ve modülünü 167±4,4 MPa ve 0,27±0,013 GPa, kopma uzamasını ise %9,2±0,57 olarak, aynı kompozitlerin eğilme dayanımı ise 204 MPa olarak gözlemlemiştir. Karahan (2011) 11 katlı karbon 2/2 dimi kumaş takviyeli epoksi kompozitlerin çözgü yönü ve çapraz yönde çekme testini gerçekleştirdiği çalışmasında; çekme dayanımını çözgü yönünde 739 MPa, çapraz yönde ise 199,25 MPa olarak elde etmiştir. Koricho ve diğ. (2014) cam elyafından 14 kat 2/2 dimi kumaş takviyeli 0^o ve 45^o serim açılı epoksi kompozilerin ASTM D3039 standardına göre çekme testini gerçekleştirdiği çalışmasında çekme dayanımını 0^o için 496,62 ± 4,98 MPa, 45^o açısı için ise 229,96 ± 12,26 MPa olarak gözlemlemiştir.

Literatürde, iki boyutlu karbon örme kumaşların takviye malzemesi olarak kullanıldığı kompozit plakaların çekme ve eğilme dayanımının deneysel analizinin incelendiği çok fazla çalışma bulunmamaktadır. Doğal veya sentetik lif tiplerinin kullanıldığı iki boyutlu veya üç boyutlu sandviç kumaşlarda kullanılan atkı örme kumaş takviyeli kompozitler üzerine olan çalışmaların bazıları ise şu şekildedir:

Muralidhar (2013) 1×1 rib konstrüksiyonundaki keten kumaşların takviye olarak kullanıldığı kompozit plakaların çekme testini gerçekleştirdiği çalışmasında çubuk yönünde en yüksek çekme dayanımını 35,59 MPa ile [0°/0°] serim açısına sahip 2 mm kalınlığındaki kompozitte, sıra yönünde ise 22,01 MPa ile 4 mm kalınlığındaki [0°/90°/90°/0°] serim açısındaki kompozitte elde etmiştir. En yüksek çekme modülünü

ise çubuk yönünde 1,98 GPa ile yine [0°/0°] serim açısına sahip 2 mm kalınlığındaki kompozitte elde ederken, sıra yönünde 3,621 GPa ile [0°/0°/0°/0°] serim açısına sahip 4 mm kalınlığındaki kompozitte gözlemlemiştir. Pandita ve diğ. (2002) cam elyafından 1×1 rib, milano, tam selanik ve interlok kumaş takviyeli epoksi kompozitlerin ASTM D3039-93 standardına göre çekme testini gerçekleştirdiği ve Tsai–Wu kriterini kullandığı çalışmasında en yüksek çekme dayanımını 111,7 MPa ile 1×1 rib kumaşın kullanıldığı kompozitte elde etmiştir. Leong ve diğ. (1998) cam elyafından üretilmiş milano-rib kumaşların 6,8 ve 12 kat sayılarında takviye olarak kullanıldığı epoksi kompozitlerin çekme dayanımlarını sırasıyla çubuk yönünde 87,6 MPa, 106.4 MPa ve 117,6 MPa; sıra yönünde ise 6 ve 8 kat sayısı için 76,8 MPa ve 99,2 MPa olarak gözlemlemiştir. Uzama değerlerinde ise çubuk yönünde 6, 8 ve12 kat sayıları için sırasıyla, %2,9, %4,4 ve %4,5; sıra yönünde ise 6 ve 8 kat için sırasıyla %2,5 ve %3,8 olarak gözlemlemiştir.

Yapılan çalışmaların çoğunluğunda; dokuma tekniği ile oluşturulmuş kumaşların takviye olarak kullanıldığı, örme kumaşlarda ise hammadde olarak cam elyafının ağırlıklı olduğu gözlenmiştir. Bununla birlikte, çalışmaların çoğunluğunda hibritleşmenin farklı iki tip lifin bir araya getirilmesi yoluyla sağlandığı tespit edilmiştir. Farklı konstrüksiyondaki takviye malzemelerinin aynı matriste hibritleşerek kullanıldığı çalışma sayısı ise oldukça azdır.

Muralidhar ve diğ. (2012) keten lifinden bezayağı ve rib örme kumaşların farklı kat sayısı ve serme açısı varyasyonlarının birbirleri ile çeşitli kombinasyonlarını kullandığı, kalınlıkları 2-4 mm arasında değişen kompozit plakaların ASTM D790 standardına göre eğilme davranışını incelediği çalışmasında; [$0^o/0^o$] serim açısındaki dört kat bezayağının alt katmanda, tek kat 1×1 rib kumaşın ise üst katmanda kullanıldığı kompozit plakanın 105 MPa/g.cm^3 ile en yüksek eğilme dayanımına sahip olduğunu gözlerken, 2,89 GPa/g.cm^3 ile en yüksek eğilme modülünü, [$90^o/0^o$] açısındaki 4 kat bezayağının üst katmanda, tek kat rib kumaşın ise alt katmanda konumlandığı plakada gözlemiştir. Kim ve diğ. (2012) çalışmasında, cam elyafından interlok ve bezayağı UD kumaş kullanılarak üretilen hibrit kompozitlerin ASTM D3039 standardına göre çekme testini gerçekleştirmiştir. Çekme dayanımı çubuk yönünde sırasıyla intelok, bezayağı UD ve hibrit kompozitler için 137 MPa, 379,6 MPa ve 315,2 MPa, sıra yönünde ise 48 MPa, 46,2 MPa ve 53,4 MPa olarak

gözlenmiştir. Çekme modülü ise çubuk yönünde 10,6 GPa, 15 GPa ve 12,8 GPa olarak gözlenirken, sıra yönünde 6,7 GPa, 6,7 GPa ve 7,6 GPa olarak gözlenmiştir. Ashraf ve diğ. (2017) kevlar ve cam elyafı kullanılarak üretilen dokuma/örme hibrit kompozitlerin çekme dayanımını incelediği çalışmasında kompozitlerdeki örme kumaş yüzdesinin artmasıyla çekme özelliklerinde bir gelişme sağlanamadığını gözlemiştir. En yüksek çekme dayanımı ve modül değerini 155,61 MPa ve 10152 MPa ile iki kat aramid dokumanın üstte, iki kat cam elyafından dokumanın ortada ve iki kat aramid dokumanın altta konumlandığı hibrit kompozitte elde etmiştir. Hu ve diğ. (2010) çalışmasında üst ve alt tabakalarda bazalt lifinden bezayağı dokuma kumaşlar ile orta tabakadaki düz, 1×1 rib, interlok ve milano konstrüksiyonlarındaki örme kumaşların aramid iplikler ile dikilerek elde edildiği üç boyutlu kumaş takviyeli kompozitlerin ASTM D3039 ve ASTM D790-3 standardına göre çekme ve eğilme testlerini gerçekleştirmiştir. İç katmanda interlok kumaşın kullanıldığı kompozit plakanın hem çözgü hem de atkı yönünde sırasıyla 617 MPa ve 247 MPa ile en yüksek çekme dayanımına sahip olduğunu gözlerken, çekme modülünde en yüksek değere hem çözgü hem de atkı yönünde sırasıyla 29,0 MPa ve 21,4 MPa ile düz örgünün kullanıldığı kompozit plakaların sahip olduğunu gözlemiştir. En yüksek eğilme dayanımını çözgü ve atkı yönünde sırasıyla 468 MPa ve 282 MPa ile iç katmanda interlok kumaşın kullanıldığı kompozit plakada elde ederken en yüksek eğilme modülünü düz örgünün kullanıldığı kompozit plakalarda çözgü ve atkı yönünde sırasıyla 0,5 GPa ve 21,01 GPa olarak gözlemlemiştir.

2.3 Kompozit Plakaların Mekanik Davranışında Rol Oynayan Kumaş Konstrüksiyon Parametreleri

Leong ve diğ. (2000), Ashraf ve diğ. (2017), Verpoest (1997), Wu ve diğ. (1993) ve Padaki ve diğ. (2006) örme kumaş takviyeli kompozit yapıların; mukavemet ve sertlik gibi mekanik özelliklerinin dokuma, saç örme ve tek yönlü (UD) gibi geleneksel preformların kullanıldığı kompozitlere göre daha zayıf olduğunu ifade etmektedir. Bu durumun potansiyel sebepleri; Wu ve diğ. (1993), Leong ve diğ. (2000), Ashraf ve diğ. (2017), Verpoest (1997) ve Padaki ve diğ. (2006) tarafından, ipliklerin yüksek oranda kavisli bir yapı olan ilmek konfigürasyonunda bulunması ve Wu ve diğ. (1993) tarafından bu kompozitlerin elyaf hacim oranının düşük olması

olarak ifade edilmektedir. Buna ek olarak, Leong ve diğ.'e (2000) göre; örme kumaş üretim mekanizmasında ilmek formu oluşumu; ipliklerin, ilmek başı olarak adlandırılan bölgeyi oluşturabilmesi için keskin bir yarıçap oluşturup yine keskin bir manevra ile ilmek bacağı olarak adlandırılan porsiyonu oluşturması yolundan geçmektedir. Bu durum kütlesel elyaf kırılmalarına ve bununla birlikte mekanik özelliklerde zayıflamaya yol açmaktadır. Padaki ve diğ. (2006) ise örme kumaş üretim teknolojisinde, çekme ve eğme kuvvetlerinin eşzamanlı olarak uygulanmasının elyaf kopuşlarına yol açtığını ifade etmektedir. Ashraf ve diğ. (2017) cam ve kevlar esaslı örme ve dokuma kumaş takviyeli hibrit kompozit plakaların çekme kuvveti altındaki mekanik davranışını incelediği çalışmasında; yalnızca cam elyafı içeren kompozitler arasında, kompozit plaka bütününde örme kumaş yüzdesinin artması ile çekme dayanımının düştüğünü gözlemiştir. Yalnızca cam elyafı içeren ve sırasıyla %40,55 ve %73,18 oranlarında örme kumaş barındıran plakaların çekme dayanımlarını sırası ile 92,495 MPa ve 54,503 MPa olarak gözlemiştir.

Kompozit plakaların mekanik özelliklerine etki eden faktörlerin; kumaş konstrüksiyonunu meydana getiren üretim kaynaklı alt parametrelere indirgenmesi durumunda, kumaş yönü-sıklık veya kumaş yönünden bağımsız olarak sıra/çubuk/atkı/çözgü sıklığı, yüzme uzunluğu, kıvrım oranı, iplik lineer yoğunluğu ve filament içerisindeki tel sayısı gibi faktörler devreye girmektedir. Örme kumaş kompozitlerde genellikle çubuk yönünde daha fazla lif bulunması ve bu yönde daha az iplik atlamasının oluşmasının; örme kumaş kompozitlerdeki anizotropik mekanik davranışın sebeplerinin başında geldiği düşünülmekle birlikte, çoğunlukla çubuk yönündeki çekme dayanımının sıra yönündeki çekme dayanımından daha yüksek olduğu gözlenmiştir (Khondker ve diğ. 2004; Kim ve diğ. 2012). Örme kumaş kompozitlerin çekme özelliklerinin tahminlenmesinde çeşitli metodolojileri kullanan Ramakrishna (1997) iplik lineer yoğunluğunun ve kumaştaki ilmek yoğunluğunun artması ile çekme özelliklerinin iyileştiğini ifade etmektedir. Khondker ve diğ. (2004) çalışmasında çubuk yönünde sıra yönüne göre daha fazla ilmeğin bulunduğu kumaşları takviye olarak kullandığı kompozitlerin çekme testi sonucunda çubuk yönünde çekme dayanımını 58,82 MPa olarak gözlerken sıra yönünde 22,41 MPa olarak gözlemiştir. Ramakrishna (1997) çalışmasında çubuk yönünde sıra yönüne göre daha fazla ilmek bulunan kumaşları takviye olarak kullandığı kompozitlerin çekme testi sonucunda çubuk yönünde çekme dayanımını 62,83 MPa olarak gözlerken sıra yönünde 35,5 MPa

olarak gözlemiştir. Hu ve diğ. (2010) oryante olmuş iplik sayısına göre mukavemetin arttığını; örnek olarak interlok ve düz örgüde, milano ve 1×1 rib örgüye göre çubuk yönünde daha fazla oryante olmuş iplik bulunduğu için çubuk yönünde dayanım değerinin daha yüksek elde edildiğini ifade etmektedir. Bununla birlikte aynı çalışmada oryantasyonun artması ile elastisite modülünün arttığı, uzamanın ise düştüğü belirtilmektedir. Sıklığın artması ile çekme ve eğilme özelliklerinin iyileştiğini belirten Houshyar ve diğ. (2005), dokuma kumaş takviyeli kompozitler üzerine yaptığı çalışmada sıklığın fazla olmasının; yük transferine olanak veren daha fazla lif-matris arafazı oluşumunu sağladığını ifade etmiştir. Kumaş takviyeli kompozitlerin mekanik davranışını etkileyen diğer faktörler ise dokuma kumaş takviyelerinde geçerli olan kıvrım oranı ve yüzme uzunluğudur. Causa ve Netravali (2008)'ye göre dimi ve saten dokuma kumaşların çekme dayanımı, yüzmelerden dolayı bezayağı kumaşlardan daha düşük olmakla birlikte; dimi dokuma kumaşlar gevşek yapıları ve düşük kıvrım oranına rağmen bezayağı kumaştan daha yüksek uzama göstermektedir. Jahan (2017) bezayağı kumaşların, düşük gözenekliliklerinden ve yüksek bağlantı sayılarından dolayı dimi kumaşlara göre çekme dayanımının daha yüksek olduğunu ifade etmektedir. Saiman ve diğ. (2014) ise ipliklerin düz ve kıvrımsız olduğu bir kumaşa yük uygulanması durumunda yükün tamamı toplam mukavemetteki gerilime dönerken, ipliklerin kıvrımlı olduğu bir kumaşta başlangıç yükünün bükülmüş towları düzgünleştirmek için tüketilmesiyle tamamlanması malzemenin düşük bir mukavemet değeri vermesine yol açtığını ifade etmektedir. Dokuma kumaş geometrisinin kompozit plakanın eğilme ve çekme modülü üzerindeki etkisini; cm^2'deki sıklık sayısı sırasıyla 60, 48, 36 ve 30 olan saten, dimi, basket ve bezayağı kumaşların kullanıldığı kompozitler üzerinden inceleyen Houshyar ve diğ. (2005) kıvrım açısı parametresinin kompozit davranışına olan etkisine üretim kaynaklı faktörler açısından yaklaşmıştır. Çalışmada, saten dokuma takviyeli kompozitin en yüksek modül değerine sahip olduğu gözlenmiş olup saten kumaşı takiben sırasıyla dimi, basket ve bezayağı dokuma takviyeli kompozit gelmiştir. Aynı koşullarda üretilen bu kompozitlerde kumaş geometrisinin değişimi ile birlikte boşluk oranının da arttığı gözlenmiştir. Saten ve dimi dokumanın kullanıldığı kompozitlerde boşluk oranının bezayağı ve basket kumaş içeren kompozitlerden düşük olduğu tespit edilmiştir. Bezayağı kumaşların daha yüksek bağlantı noktası içerip daha düşük yüzme uzunluğuna sahip olması; kıvrım açısının artmasına yol açmaktadır. Kıvrım açısındaki bu artışın, iplikler arasında hava hapsedilmesine sebep olduğunu ve saten ve dimi

kumaşlara kıyasla daha fazla boşluk üretimine yol açan sebeplerden birisi olduğunu ifade etmiştir. Sıklık sayısının fazla olup, bağlantı noktalarındaki boşlukların az olması saten kumaş takviyeli kompozitlerin en iyi özellikleri sergilemesinin sebeplerinden olduğu ifade edilmiştir. Kıvrım oranının elastisite modülüne olan etkisini inceleyen Ahmad ve diğ. (2021), kıvrım oranının artması ile elastisite modülünde düşme meydana geldiğini belirtmektedir. Baghaei ve diğ. (2015) 2/2 basket tek yönlü kumaş takviyeli kompozitin çekme dayanımı ve modülünün, 8H saten UD takviyeli kompozitten düşük olduğunu gözlemlemiştir. Baghaei ve diğ.'e (2015) göre kumaş dokuma prosesinin ardından kumaşta büzülmenin meydana gelmesi; yapının daha sıkışık bir form almasına yol açarken aynı zamanda bağlantı uç noktalarında boşluk oluşumuna neden olmaktadır. Kumaştaki bu boşluk, kompozit malzemede takviye malzemesinin bulunmadığı, reçine zengini bölgeleri meydana getirmektedir. 2/2 basket dokumanın yüzey alanında daha fazla bağlantının olması; malzemenin çekme yükü altındaki davranışını belirgin şekilde etkileyen, gerilimin yoğunlaştığı noktaların ve reçine zengini bölgelerin artışına neden olduğunu belirtmiştir. Daha sıkışık bir kumaş yapısının, reçinenin lifler arasına nüfuz etmesini zorlaştırdığını, saten kumaşta ise komşu ipliklerin farklı bağlantı noktalarına sahip olmasının reçine dağılımını kolaylaştıran daha küçük boşluk oluşumuna neden olduğunu ifade etmiştir. Aynı şekilde eğilme dayanımında da saten kumaş kompozitin daha az bağlantı noktası içermesinin, gerilim yoğunlaşma olasılığını da düşürdüğünden en iyi sonucu verdiği sonucuna ulaşmıştır. Ahmad ve diğ. (2021) 1×3 ve 1×2 konfigürasyonlarının takviye olarak kullanıldığı kompozitler arasında 1×3 kompozitinde bağlantı sayısının azalmasının çekme dayanımını arttırdığını ifade etmiştir. Eğilme dayanımında ise 1×1 konfigürasyonundaki kumaşın sıkı yapısından dolayı daha yüksek kıvrım yüzdesinde daha fazla bağlantı noktasına sahip olması, takviye malzemesindeki yük transferinin gerçekleşmesine izin veren köprüleme efektini meydana getirdiğinden bu kompozitlerin eğilme dayanımının, düşük kıvrım oranı içeren kumaş takviyeli kompozitlere göre daha yüksek olduğu sonucuna ulaşmıştır. Aynı çalışmasında Ahmad ve diğ. (2021) 1×1, 2×1 ve 3×1 konfigürasyonundaki düz dokuma kumaş takviyeli kompozitlerin çekme dayanımını kumaş yapısındaki eşzamanlı iplik sayısına bağlı olarak değerlendirdiğinde; yükün uygulandığı yönde eşzamanlı iplik sayısının artmasıyla çekme dayanımının arttığını ve bu durumun potansiyel sebebi olarak; yükün uygulandığı yöndeki eşzamanlı ipliklerin tek bir iplik gibi hareket ederek yük paylaşımında bulunduğunu ifade

etmiştir. Tohidi ve diğ. (2019) dokuma kumaş kompozitlerde mekanik özelliği etkileyen diğer bir faktör olan yüzme uzunluğunun artmasının, daha fazla bükülmenin meydana gelmesine neden olduğunu ifade etmektedir. Yüzme uzunluğunun fazla olduğu iplik grubunu içeren kumaş yönüne 90^{o}'lik açı yapmış olan iplik gruplarını barındıran kumaş yönünde çekme yükü uygulandığında takviye malzemesinde daha fazla bükülme meydana gelmektedir. Belirgin yüzme uzunluğu bulunan kumaş konstrüksiyonlarında, bükülme efektini serbest bırakabilmek adına gerilimin, bağlantı noktalarında daha fazla yoğunlaşması dengesiz yük dağılımına yol açmaktadır (Tohidi ve diğ. 2019). Elyaf hacim oranı, kompozit malzemelerin mekanik davranışlarını etkileyen kumaş üretim parametreleri kaynaklı önemli bir faktördür. Sıra/çubuk/atkı/çözgü sıklığı dışında, elyaf hacim oranını etkileyen faktörlerden bazıları; kumaş katsayısı ve iplik lineer yoğunluğudur (Ramakrishna 1997; Khondker ve diğ. 2005). Maruo ve diğ. (2015) 3K ve 12K karbon elyafı takviyeli kompozitlerin eğilme dayanımını incelediği çalışmasında, 12K karbon elyafının kullanıldığı kompozitin 464,23 ± 70,49 MPa ile en yüksek değeri verdiğini gözlemiştir. Bununla birlikte; karbon filamentteki tel sayısının dimi dokuma karbon kumaş takviyeli kompozitlerin mekanik davranışı üzerindeki etkisini inceleyen John ve diğ. (2020) çalışmasında 3000 ve 6000 filament sayısı ile çalışmıştır. Deneysel çalışmalar sonucunda filament sayısının artmasıyla çekme ve eğilme dayanımının azaldığı gözlemlenmiştir. Literatürde, örme kumaş kat sayısının artması ile darbe hasar dayanımı, kırılma tokluğu ve çekme davranışının geliştirildiğini ifade eden çalışmalar bulunmaktadır. Bunun sebebi ise elyaf hacim oranının artması ve komşu kumaş katmanlarının birbirine yakın ilmekleri arasındaki daha iyi bir kenetleme sağlamış olmasına atfedilmektedir.

3. MATERYAL ve METOT

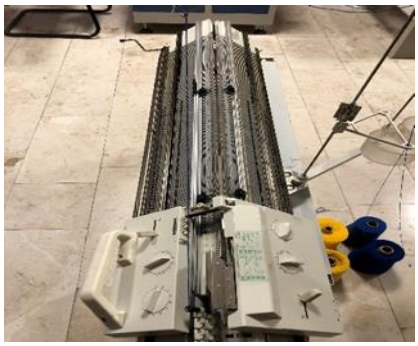
3.1 Materyal

Kompozit yapılarda takviye malzemesi olarak kullanılan dokuma kumaşlar, ayrı ayrı 200 Tex 3K ve 800 Tex 12K lineer yoğunluk-tel sayısındaki karbon elyafı kullanılarak üretilirken örme kumaş yalnızca 200 Tex 3K lineer yoğunluk-tel sayısındaki karbon elyafı kullanılarak üretilmiştir. Örme kumaş üretiminde kullanılan ve DowAksa firmasından temin edilen karbon elyafına ilişkin bilgiler Tablo 3.1'de verilmiştir. Tez çalışmasında kullanılan dokuma kumaşlar Spintex firmasından temin edilirken örme kumaşlar Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Tekstil Mühendisliği Bölümü İplik ve Örme Laboratuvarında, Şekil 3.1'de gösterilen, 6E makine inceliğindeki Passap Duomatic 80 örme makinesinde üretilmiştir.

Tablo 3.1: Çalışmada kullanılan karbon elyafına ait teknik bilgiler

	3K	**Kullanılan Standart (ISO)**
Çekme dayanımı (MPa)	3800	10618
Çekme modülü (GPa)	240	10618
Uzama (%)	1,6	10618
Yoğunluk (g/cm^3)	1,78	10119
Lineer kütle yoğunluğu (Tex)	200	1889

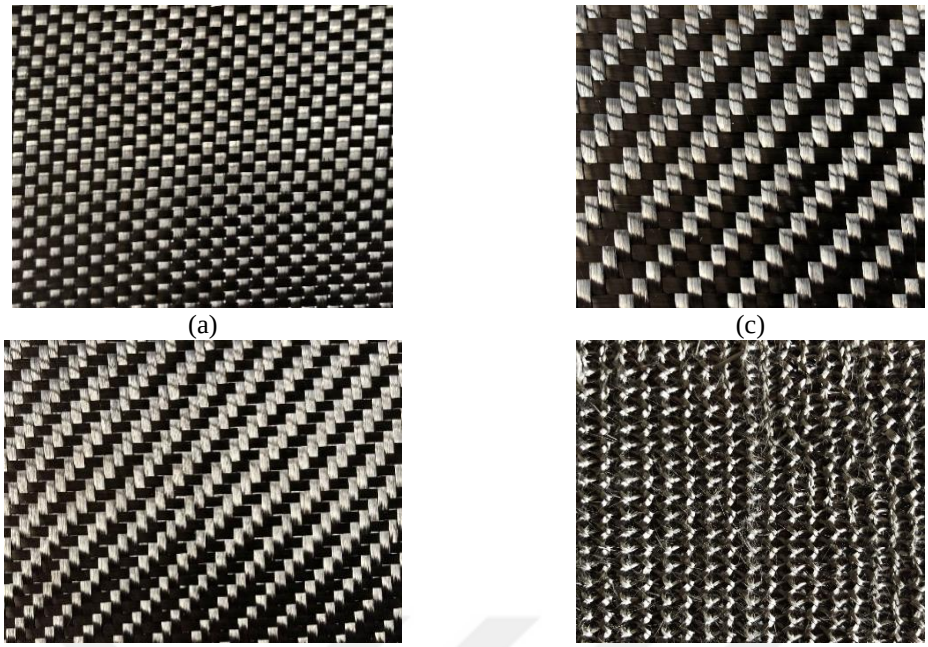
200 g/m^2 gramajındaki bezayağı ve 2/2 dimi ve 650 g/m^2 gramajındaki 2/2 dimi dokuma konstrüksiyonlarındaki kumaşlar ile 720 g/m^2 gramajındaki interlok (1×1 formunda) konstrüksiyonundaki örme kumaşın teknik bilgileri ve tezin ilerleyen bölümlerinde kumaşlar için kullanılacak olan kodlama yöntemi Tablo 3.2'de verildiği gibidir. Çalışmada kullanılan kumaşların, ön yüz görünümleri ise Şekil 3.2'de sunulmaktadır.



Şekil 3.1: Kumaşların üretildiği Passap Duomatic 80 örme makinesi

Tablo 3.2: Çalışmada kullanılan kumaşların teknik bilgileri

		200P	**200T**	**650T**	**720K**
Kumaş konstrüksiyonu		Bezayağı	2/2 Dimi	2/2 Dimi	İnterlok (1×1)
Gramaj (± %10) (gr/m^2)		200	200	650	720
İplik lineer kütle yoğunluğu (Tex)		200	200	800	200
Filament içerisindeki tel sayısı		3000	3000	12000	3000
Atkı sıklığı (atkı/cm)		5	5	4	-
Çözgü sıklığı (çözgü/ cm)		5	5	4	-
Sıra yönündeki ilmek sıklığı (ilmek/10 cm)		-	-	-	32
Çubuk yönündeki ilmek sıklığı (ilmek/10 cm)		-	-	-	45
Kıvrım oranı (%)	**Atkı**	1	1	1	-
	Çözgü	1	1	1	-
İlmek iplik uzunluğu (cm)		-	-	-	1,25
Sıkılık faktörü		-	-	-	1,13
İlmek yoğunluğu (ilmek/cm^2)		-	-	-	14,40
Kumaş kalınlığı (mm)		0,27	0,2	0,66	1,2
Kumaş hacim ağırlığı (g/cm^3)		0,74	0,95	0,98	0,6
Gözeneklilik (%)		58	44	45	66
Sertlik (cN)		1241	533	2846	2839



(a) (c)

(b) (d)

Şekil 3.2: Takviye kumaşlarının ön yüz görünümleri. (a) Bezayağı konstrüksiyonundaki kumaş (b) 200 g/m^2 gramajındaki 2/2 dimi konstrüksiyonundaki kumaş (c) 650 g/m^2 gramajındaki 2/2 dimi konstrüksiyonundaki kumaş (d) 720 g/m^2 gramajındaki interlok konstrüksiyonundaki kumaş

Tablo 3.2'de dokuma kumaşlar için verilen kıvrım oranı (*C*) Saiman ve diğ.'e (2014) göre eşitlik (3.1) yardmı ile hesaplanmıştır. Eşitlikteki *L* değeri ipliğin uzunluğunu, *S* değeri ise ipliğin kumaş üzerindeki uzunluğunu temsil etmektedir.

$$C = \frac{L-S}{S} \times 100 \tag{3.1}$$

Tablo 3.2'de interlok örme konstrüksiyonundaki 720K kumaşı için verilen ilmek iplik uzunluğu (*l*) (3.2) eşitliği yardımı ile hesaplanırken sıkılık faktörü *(T)* Eltahan'a (2016) göre (3.3) eşitliği kullanılarak hesaplanmıştır.[1, 2] (3.2) eşitliğindeki w_f değeri kumaş gramajını, $n_ç$ değeri çubuk sayısını, n_s değeri sıra sayısını, d_y değeri ise iplik lineer kütle yoğunluğunu temsil etmektedir.

$$l = \left(\frac{w_f}{\frac{2[(n_ç \times n_s) \times 100]}{d_y/1000}} \right) \times 100 \tag{3.2}$$

$$T = \frac{\sqrt{\text{Tex}}}{l} \tag{3.3}$$

[1] Eşitlik (3.2)'de kullanılan iplik lineer kütle yoğunluğu (d_y) Tex cinsinden alınmıştır.

[2] Eşitlik (3.3)'te kullanılan ilmek iplik uzunluğu (*l*) mm cinsinden alınmıştır.

Tablo 3.2'de tüm kumaşlar için verilen kumaş hacim ağırlığı (ρ_b) ve gözeneklilik (Φ) bilgileri Varshney ve diğ.'e (2010) göre sırasıyla (3.4) ve (3.5) eşitlikleri yardımı ile hesaplanarak elde edilmiştir. (3.4) eşitliğindeki w_f değeri kumaş gramajını, t değeri ise kumaş kalınlığını temsil ederken, (3.5) eşitliğindeki ρ_f değeri lif yoğunluğunu temsil etmektedir.

$$\rho_b = \frac{w_f}{t} \tag{3.4}$$

$$\Phi = 1 - \frac{\rho_b}{\rho_f} \tag{3.5}$$

Tablo 3.2'de verilen kumaş kalınlığı ölçümü EN ISO 5084:1996 standardına uygun şekilde Luis Schopper marka mikrometre ile gerçekleştirilirken, sertlik değerleri Prowhite Stifness Tester dijital kumaş sertliği ölçüm cihazında ASTM D4032-08 (2016) standardına göre belirlenmiştir.

3.2 Kompozit Plakaların Üretimi

Kompozit plakalar Denizli Safir Reklam'da üretilmiştir. Plaka üretiminde el yatırması yöntemi kullanılmıştır. Yüzeye serilen takviye malzemesi üzerine epoksi reçine ve sertleştirici karışımı sürülerek reçine ile emdirme sağlanmış olup, her bir kumaş katı seriminde işlem tekrarlanmıştır. Kumaş yığını üzerine jelatin, jelatin üzerine ise sızdırmaz bant ile vakum torbası sabitlenmiştir. Jelatin içerisindeki hava boşlukları minimum seviyeye düşene kadar vakumlama işlemi uygulanmıştır. Ardından 90 ºC'de 3-4 saat boyunca kürleme yapılmıştır. Kullanılan epoksi (Epakem EPX-100) 200 ºC alevlenme noktasına ve 1,15 g/cm^3 yoğunluğa sahiptir. Epoksi ve sertleştirici (epakem) 2:1 karışım oranında kullanılmıştır.

Kumaşların epoksi matriste takviye malzemesi olarak serimi, Tablo 3.2'de kodlama yöntemi ve teknik bilgileri verilmiş olan bezayağı ve dimi dokuma konstrüksiyonlarındaki kumaşlar ile 1×1 formundaki interlok konstrüksiyonundaki örme kumaşın ayrı ayrı veya birbirleri ile farklı kombinasyonları olacak şekilde saf veya hibrit formda tasarlanmıştır. Kompozit malzemelerin, takviye konstrüksiyonu tipine göre kendi içinde kıyaslanması; kompozit yapıda kullanılacak olan takviye

malzemesinin gramajı sabit tutularak gerçekleştirilecektir. Bu doğrultuda, matriste kullanılacak olan takviye malzemesi kat sayısı belirlenmesinde; 720 g/m^2 ile en yüksek gramaja sahip olan 720K kumaşı referans alınarak toplam kumaş gramajının her bir kompozitte eşit seviyeye ulaşması hedeflenmiştir.

Tezin ilerleyen bölümlerinde kompozit plakalar için kullanılacak olan kodlama yöntemi,

- Yedi katlı 200P kumaşının kullanıldığı kompozit plaka C1,
- Yedi katlı 200T kumaşının kullanıldığı kompozit plaka C2,
- İki katlı 650T kumaşının kullanıldığı kompozit plaka C3,
- İki katlı 720K kumaşının kullanıldığı kompozit plaka C4,
- Tek kat 650T ve tek kat 720K kumaşının kullanıldığı kompozit plaka C5,
- İki kat 200P kumaşının alt katmanda, tek kat 720K kumaşının merkezde, iki kat 200P kumaşının üst katmanda konumlandığı kompozit plaka C6,
- İki kat 200T kumaşının alt katmanda, tek kat 720K kumaşının merkezde, iki kat 200T kumaşının üst katmanda konumlandığı kompozit plaka C7 şeklinde belirlenmiştir.

3.3 Metot

Numunelerin Hazırlanması

Kalınlıkları Mitutoyo dijital mikrometre ile ölçülen her bir kompozit plakanın teorik olarak yoğunluk hesabı yapılmış olup, elyaf hacim oranı(v_f) Karahan'a (2011) göre (3.6) eşitliği yardımı ile belirlenmiştir. Eşitlikteki N_t değeri kompozitteki toplam kumaş kat sayısını, w_f değeri kumaş gramajını, ρ_f değeri lif yoğunluğunu, h değeri ise kompozit kalınlığını temsil etmektedir.

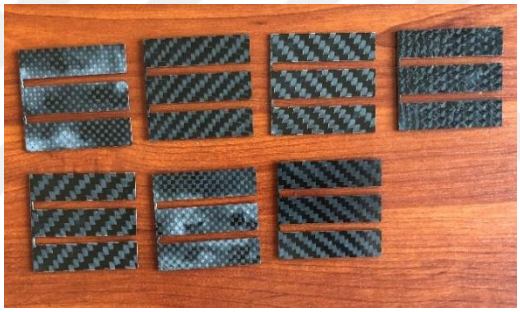
$$v_f = \frac{N_t x w_f}{\rho_f x h} \tag{3.6}$$

Kompozitlere ait kalınlık, yoğunluk ve elyaf hacim oranı(v_f) değerleri Tablo 3.3'te verilmektedir.

Tablo 3.3: Kompozitlere ait kalınlık, yoğunluk ve elyaf hacim oranı değerleri

Kompozit Kodu	Kalınlık (mm)	Yoğunluk (g/cm^3)	Elyaf hacim oranı (%)
C1	1,595	1,41	49
C2	1,847	1,45	44
C3	1,227	1,39	61
C4	1,792	1,34	45
C5	1,655	1,31	45
C6	1,708	1,50	50
C7	1,610	1,51	53

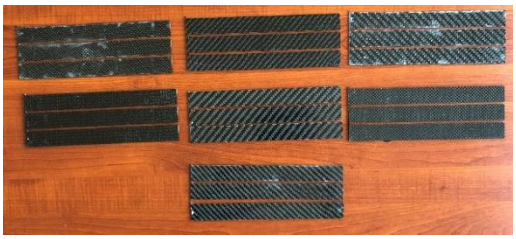
300 mm × 300 mm ebatlarında üretilmiş olan kompozit plakalar su jeti ile; hem atkı/sıra hem de çözgü/çubuk yönü olmak üzere iki farklı yönde testler gerçekleştirilirken esas alınacak standartlara göre kesilmiştir. Üç noktalı eğilme test numuneleri Şekil 3.3'te, çekme testi numuneleri ise Şekil 3.4'te verilmiştir.



(a)

(b)

Şekil 3.3: Üç noktalı eğilme testi numuneleri. (a) Atkı/sıra yönünde kesilen numuneler (b) Çözgü/çubuk yönünde kesilen numuneler



(a)

(b)

Şekil 3.4: Çekme testi numuneleri. (a) Atkı/sıra yönünde kesilen numuneler (b) Çözgü/çubuk yönünde kesilen numuneler

Çekme testi için kesilen numunelerin her iki yüzeyindeki tepe noktalarına, malzemenin çene bölgelerindeki kalınlığını arttırarak kırılmayı ölçüm sınırında gerçekleştirmek amacı ile aşındırılmış alüminyum parçalar yapıştırılmıştır (Şekil 3.5). Bu şekilde malzemenin dayanabildiği en yüksek kuvvetten daha düşük bir kuvvette kopmasının önüne geçilmesi amaçlanmıştır. 200 mm × 500 mm ebatlarında kesilen alüminyum parçalar, kompozit numunelerine teknik bilgileri Tablo 3.4'te verilen LOCTITE EA 3430 çift bileşenli yapıştırıcı ile yapıştırılmıştır. Uç bölgelerde gerilim yoğunlaşmasının önüne geçilmesi amacı ile alüminyum parçalar açılı olarak kesilmiştir.

Şekil 3.5: Alüminyum parça yapıştırma işlemi sırasında çekme testi numuneleri

Tablo 3.4: LOCTITE EA 3430 çift bileşenli yapıştırıcının teknik özellikleri

Kimyasal Türü	Epoksi
Bileşenler	İki bileşen - Reçine & Sertleştirici
Karışım oranı, hacimce **Reçine: Sertleştirici**	1:1
7 gün boyunca 22 °C' de kuruduktan sonra, 1,2 mm kalınlığındaki örnek için	
Isıl iletkenlik katsayısı, ISO 8302	0,3 W/(m·K)
Gerilme mukavemeti, ISO 527-3	36 N/mm²
Gerilme modülü, ISO 527-3	3,10 N/mm²
Sıkıştırma mukavemeti, ISO 604	65 N/mm²
Uzama, ISO 527-3	%2
Camsı geçiş sıcaklığı, ASTM E 1640	58 °C

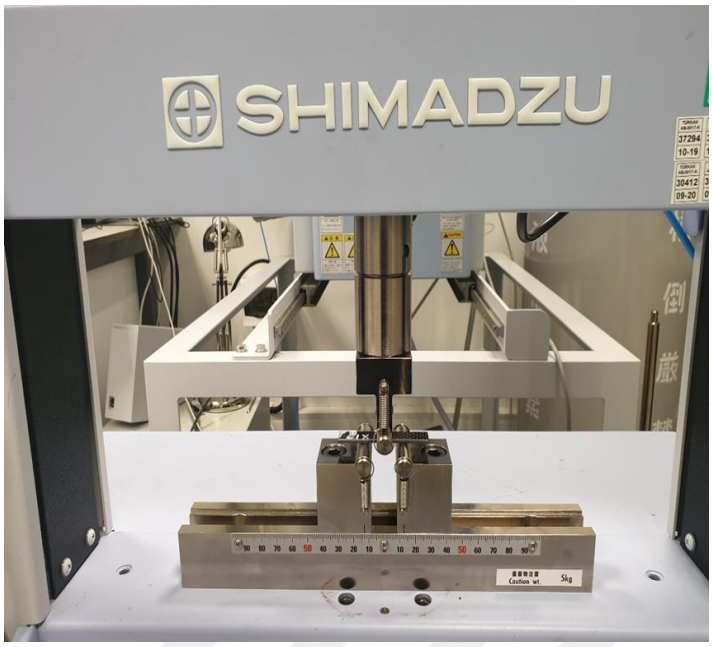
3.3.1 Test Metodu

Kompozit plakaların üç noktalı eğilme ve çekme testleri Bursa Teknoloji Koordinasyon ve Ar-Ge Merkezi'nde (BUTEKOM) gerçekleştirilmiştir. Testler, dokuma kumaşlar için atkı ve çözgü yönü, örme kumaşlar için çubuk ve sıra yönü, yine hibrit kompoztiler için de atkı/sıra ve çözgü/çubuk olmak üzere iki farklı yönde, 3'er test numunesi üzerinden gerçekleştirilmiştir.

Testlerin gerçekleştirildiği ortamda kondüsyon şartları 20,3 ºC ortam sıcaklığı ve %63,8 bağıl nem olarak sağlanmıştır.

3.3.1.1 Üç Noktalı Eğilme Testi

12,7 mm × 50,8 mm ebatlarındaki numunelerin eğilme yükü altındaki davranışları ASTM D790 standardına göre üç noktalı eğilme testi ile analiz edilmiştir. Test, 25,6 mm destek aralığında, 0,5 N ön yük uygulanarak 1 mm/dk test hızında Şekil 3.6'da verilen SHIMADZU test cihazında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.6: Üç noktalı eğilme testlerinin gerçekleştirildiği SHIMADZU test cihazı

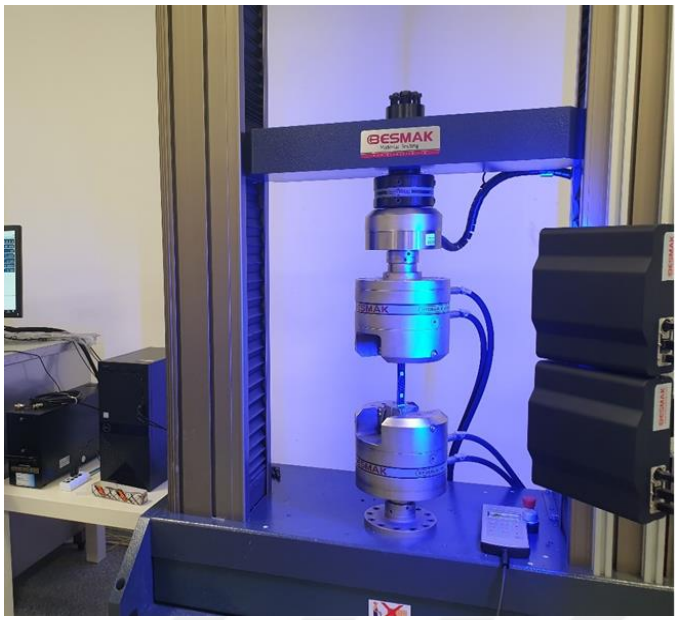
Üç noktalı eğilme testine ilişkin, özgül eğilme dayanımı (σ_{sb}) ve özgül modül (E_{sb}) değerleri Shivakumar ve diğ. (2006)'ne göre sırasıyla eşitlik (3.7) ve eşitlik (3.8) yardımı ile hesaplanmıştır. (3.7) eşitliğindeki σ_b değeri eğilme dayanımını temsil ederken (3.7) ve (3.8) eşitliklerindeki ρ_c değeri kompozit yoğunluğunu temsil etmektedir. (3.8) eşitliğindeki E_b değeri ise ise eğilme modülünü temsil etmektedir.

$$\sigma_{sb} = \frac{\sigma_b}{\rho_c} \tag{3.7}$$

$$E_{sb} = \frac{E_b}{\rho_c} \tag{3.8}$$

3.3.1.2 Çekme Testi

20 mm × 200 mm ebatlarındaki numunelerin çekme yükü altındaki davranışları 100 mm çeneler arası mesafesinde 2 mm/dk çene hızında 5 N ön yük uygulanarak ASTM D3039 standardına göre Şekil 3.7'de verilen cihazda gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.7: Çekme testinin gerçekleştirildiği cihaz

Çekme testine ilişkin, özgül çekme dayanımı (σ_{st}) ve özgül modül (E_{st}) değerleri Shivakumar ve diğ. (2006)'ne göre sırasıyla eşitlik (3.9) ve eşitlik (3.10) yardımı ile hesaplanmıştır. (3.9) eşitliğindeki σ_t değeri çekme dayanımını temsil ederken (3.9) ve (3.10) eşitliklerindeki ρ_c değeri kompozit yoğunluğunu temsil etmektedir. (3.10) eşitliğindeki E_t değeri ise ise eğilme modülünü temsil etmektedir.

$$\sigma_{st} = \frac{\sigma_t}{\rho_c} \tag{3.9}$$

$$E_{st} = \frac{E_t}{\rho_c} \tag{3.10}$$

4. BULGULAR

4.1 Üç Noktalı Eğilme Testi

Kompozit plakalara uygulanan üç noktalı eğilme testi sonucunda iki farklı yönde olmak üzere ayrı ayrı elde edilen; eğilme dayanımı (MPa), özgül eğilme dayanımı **(**MPa/(g/cm^3)), eğilme modülü (GPa), özgül eğilme modülü **(**GPa/(g/cm^3)) ve en yüksek uzama (%) değerlerinin üç tekrar sayısı üzerinden ortalama değerleri atkı/sıra yönü için Tablo 4.1'de, çözgü/çubuk yönü için ise Tablo 4.2'de sunulmaktadır.

Tablo 4.1: Kompozit numunelerinin atkı/sıra yönündeki eğilme yükü altındaki değerleri

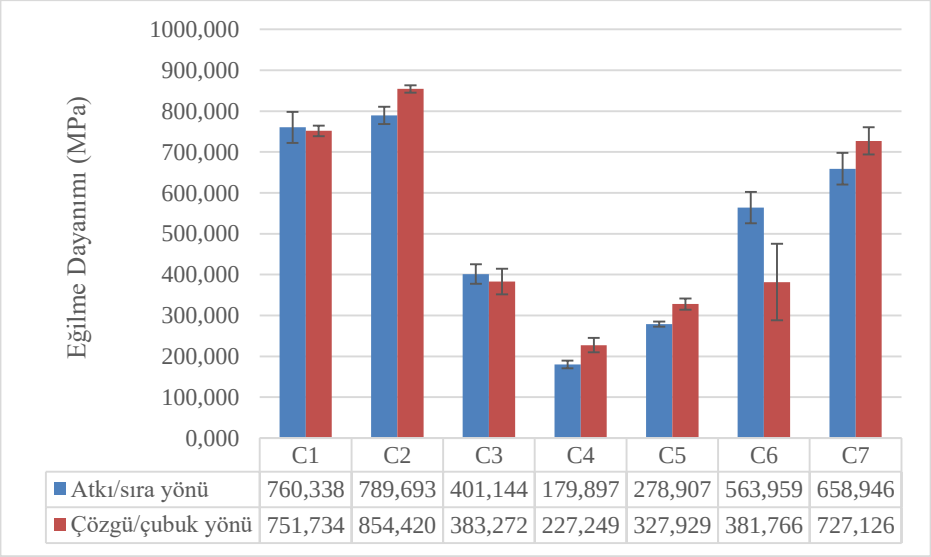
Kompozit Kodu	**Eğilme dayanımı (MPa)**	**Özgül dayanım [MPa/(g/cm^3)]**	**Eğilme modülü (GPa)**	**Özgül modül [GPa/(g/cm^3)]**	**En yüksek uzama (%)**
C1	760,338	539,468	44,529	31,581	1,775
C2	789,693	544,616	40,105	27,658	2,054
C3	401,144	288,593	35,586	25,601	0,854
C4	179,897	134,215	12,693	9,472	2,261
C5	278,907	212,906	17,102	22,527	4,368
C6	563,959	375,973	40,661	27,107	1,539
C7	658,946	449,633	42,992	28,472	1,576

Tablo 4.2: Kompozit numunelerinin çözgü/çubuk yönündeki eğilme yükü altındaki değerleri

Kompozit Kodu	Eğilme dayanımı (MPa)	Özgül dayanım [MPa/(g/cm^3)]	Eğilme modülü (GPa)	Özgül modül [GPa/(g/cm^3)]	En yüksek uzama (%)
C1	751,734	533,145	45,104	31,989	1,773
C2	854,420	589,255	47,952	33,070	1,896
C3	383,272	275,735	35,197	25,322	1,438
C4	227,249	169,589	18,798	14,028	2,116
C5	327,929	250,328	27,197	20,761	4,993
C6	381,766	254,511	30,110	20,073	1,535
C7	727,126	481,540	49,198	32,581	1,546

4.1.1 Eğilme Dayanımı

Hibrit kompozit plakaların, alternatif olarak hazırlanmış olan dokuma takviyeli ve örme takviyeli kompozitler ile ve tüm kompozitlerin kendi içinde kompozit yönüne göre eğilme dayanımı değerlerinin grafiksel olarak karşılaştırılması Şekil 4.1'de verilmektedir.



Şekil 4.1: Kompozit numunelerinin atkı/sıra ve çözgü/çubuk yönündeki eğilme dayanımı değerleri

Şekil 4.1'den görüldüğü üzere; yalnızca dokuma kumaş takviyesi kullanılan kompozitler arasında, 7 katlı 200 g/m^2 gramajındaki bezayağı konstrüksiyonundaki kumaş takviyesi içeren C1 kodlu kompozit, 7 katlı 200 g/m^2 gramajındaki 2/2 dimi

konstrüksiyonundaki kumaş takviyesi içeren C2 kodlu kompozit ve 2 katlı 650 g/m^2 gramajındaki 2/2 dimi konstrüksiyonundaki kumaş takviyesi içeren C3 kodlu kompozitlerin eğilme dayanımları atkı yönünde sırasıyla 760,338 MPa, 789,693 MPa ve 401,144 MPa olarak gözlenirken bu plakaların çözgü yönündeki eğilme dayanımları sırasıyla 751,734 MPa, 854,420 MPa ve 383,272 MPa olarak gözlenmiştir. C2 kompoziti her iki yönde de hem aynı kumaş gramajına sahip C1 kompozitinden hem de diğer tüm kompozitlerden daha yüksek eğilme dayanımına sahiptir. Değerlendirme; üretim koşullarından kaynaklı makro-boşluk oluşumu gibi kusurlardan bağımsız olarak, tekstil malzemesinin plakanın mekanik davranışına olan etkisine indirgendiğinde; dimi konstrüksiyonunun daha az bağlantı içermesi, plakadaki iplik bağlantı noktalarındaki hava hapsedilme oranını düşüreceğinden daha yüksek dayanım sağladığı düşünülmektedir. Houshyar ve diğ. (2005) kıvrım yüzdesinin düşük ve yüzme uzunluğunun yüksek olduğu kumaş takviyeli kompozit plakaların eğilme dayanımı ile diğer mekanik özelliklerinin geliştiğini belirtmektedir.

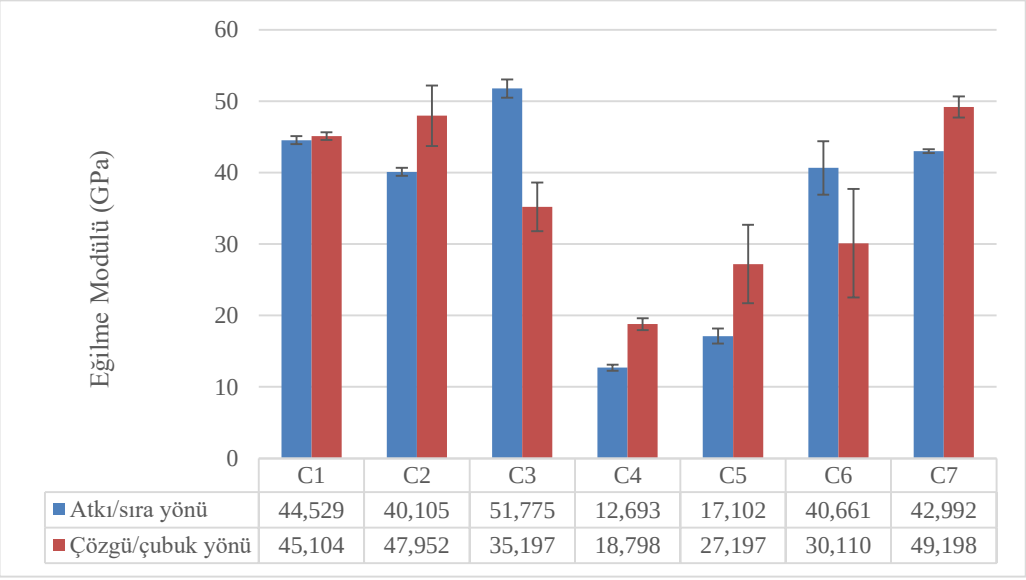
Dokuma kumaş takviyeli kompozitlerin dışında, C4 kodlu yalnızca iki kat interlok konstrüksiyonundaki örme kumaş takviyesi içeren kompozitin, çubuk sıra ve çubuk yönünde sırasıyla 179,897 MPa ve 227,249 MPa ile dokuma takviyeli alternatiflerine göre daha düşük eğilme dayanımına sahip olduğu belirlenmiştir. Dokuma kumaşlar birbirine paralel yönde çok sayıda iplik grubundan oluşurken örme kumaş yapısının tek bir iplik üzerinden oluşturulması ve Wu ve diğ. (1993) ve yaptığı çalışmada belirttiği gibi ipliklerin yüksek oranda kavisli bir yapı olan ilmek konfigürasyonunda bulunmasının C4 kodlu kompozitin eğilme dayanımının düşük çıkmasının sebeplerinden olduğu düşünülmektedir. Bir diğer etken ise Leong ve diğ. (2000) ve Padaki ve diğ.'in (2006) de belirttiği gibi; örme kumaş üretim mekanizmasında; ipliklerin ilmek bileşenlerine dönüşmesi yolunda gerilime maruz kalması dolayısıyla meydana gelen kütlesel elyaf kırılmalarının, kompozit plakanın mekanik özelliklerini olumsuz etkilemesi şeklinde açıklanabilir. Öte yandan, tez çalışmasında kullanılan örme kumaşların gözenekliliklerinin yüksek olması ve kompozit bütünündeki elyaf hacim oranının düşük olması, kompozit yapısındaki reçine yönünden zengin bölgelerin oluşumuna ve gerilimi taşıyacak lif-matris arafazı miktarının azalmasına yol açarken ilmeklerin kıvrımlı yapısı ve ilmek bağlantı şekillerinin yapıda mezo-boşluk oluşumuna yol açması bu kompozitlerin düşük mekanik özelliklerinin potansiyel sebeplerinden olduğu düşünülmektedir. C4

kompozitinin çubuk yönünde dayanımının daha yüksek olması, kumaş çubuk yönünde ilmek sıklığının ve oryante olmuş iplik sayısının daha fazla olmasından kaynaklı olduğu düşünülmektedir.

Atkı/sıra yönünde sırasıyla 278,907 MPa, 563,959 MPa ve 658,946 MPa; çözgü/çubuk yönünde ise 327,929 MPa, 381,766 MPa ve 727,126 MPa değerlerine sahip C5, C6 ve C7 kodlu dokuma ve örme kumaşların birlikte kullanıldığı hibrit kompozitlerde, hem atkı/sıra hem de çözgü/çubuk yönünde örme kumaş takviyesi; yalnızca dokuma takviyeli kompozitlere kıyasla eğilme dayanımının düşmesine yol açmıştır. Bununla birlikte hibrit kompozitlerin, bir diğer alternatif kompoziti olan iki kat interlok konstrüksiyonunun kullanıldığı C4 kompozitine göre daha yüksek eğilme dayanımı sergilediği gözlenmiştir.

4.1.2 Eğilme Modülü

Hibrit kompozit plakaların, alternatif olarak hazırlanmış olan dokuma takviyeli ve örme takviyeli kompozitler ile ve tüm kompozitlerin kendi içinde kompozit yönüne göre eğilme modülü değerlerinin grafiksel olarak karşılaştırılması Şekil 4.2'de verilmektedir.



	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
Atkı/sıra yönü	44,529	40,105	51,775	12,693	17,102	40,661	42,992
Çözgü/çubuk yönü	45,104	47,952	35,197	18,798	27,197	30,110	49,198

Şekil 4.2: Kompozit numunelerinin atkı/sıra ve çözgü/çubuk yönündeki eğilme modülü değerleri

Şekil 4.2'den görüldüğü üzere; yalnızca dokuma kumaş takviyesi kullanılan C1, C2 ve C3 kompozitlerinin eğilme modülleri, atkı yönünde sırasıyla 44,529 GPa,

40,105 GPa ve 51,775 GPa olarak gözlenirken bu plakaların çözgü yönündeki eğilme modülleri sırasıyla 45,104 GPa, 47,952 GPa ve 35,197 GPa olarak gözlenmiştir. Atkı/sıra yönünde hem bu üç kompozit plaka hem de bütün kompozitler arasında 12K karbon filamentinden üretilmiş 2/2 dimi konstrüksiyonunun kullanıldığı C3 kompozitinin eğilme modülünde en yüksek değere sahip olduğu gözlenmiştir. Çözgü/çubuk yönünde ise bu üç kompozit kendi arasında karşılaştırıldığında, C1 kompoziti ile aynı kumaş kat sayısına sahip olan fakat dimi konstrüksiyonunun kullanıldığı C2 kompozitinin en yüksek modül değerine sahip olduğu gözlenmiştir.

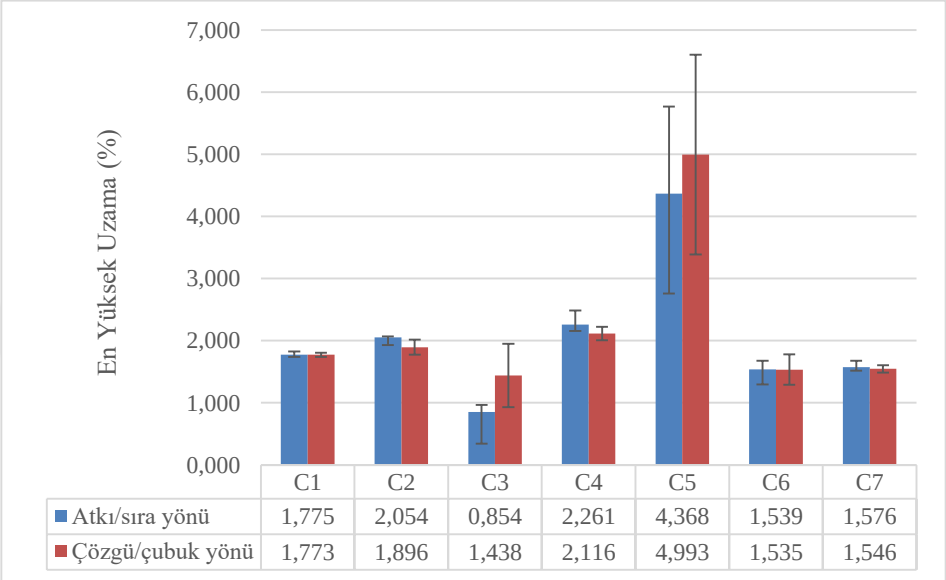
C4 kodlu kompozitin sıra ve çubuk yönünde sırasıyla 12,693 GPa ve 18,798 GPa ile her iki yönde de en düşük modül değerine sahip olduğu gözlenmiştir. Tablo 3.2'den görüleceği üzere, C4 kompozitinde kullanılan 720K kodlu kumaşın eğilme rijitliği C1 ve C2 kompozitlerinde kullanılan 200P ve 200T kumaşlarından daha yüksektir. Fakat örme kumaşın gözenekliliğinin yüksek olması, ilmeklerin kıvrımlı yapısı ve bu kompozitin düşük elyaf hacim oranına sahip olmasının, kompozitin eğilme dayanımında olduğu gibi eğilme modülünü de olumsuz etkilediği düşünülmektedir.

İnterlok ve dimi konstrüksiyonu olmak üzere yalnızca iki kat takviye malzemesinin kullanıldığı C5 hibrit kompozitinde; alternatifleri olan C1, C2 ve C3 kompozitlerine göre her iki yönde de eğilme modülünde düşme gözlense de bir diğer alternatifi olan iki kat interlok konstrüksiyonunun kullanıldığı C4 kompozitine göre her iki yönde de modül değerinde artış gözlenmiştir.

Alt ve üst katmanlarda ikişer kat dimi konstrüksiyonunun kullanıldığı C7 hibrit kompozitinin çözgü/çubuk yönünde; 49,198 GPa ile tüm kompozitler arasında en yüksek eğilme modülüne sahip olduğu belirlenmiştir. C6 hibrit kompozitinin eğilme modülünde ise yalnızca dokuma konstrüksiyonunun kullanıldığı alternatifleri olan C1 ve C2 kompozitlerine göre belirgin bir atış sağlanamamıştır.

4.1.3 En Yüksek Uzama

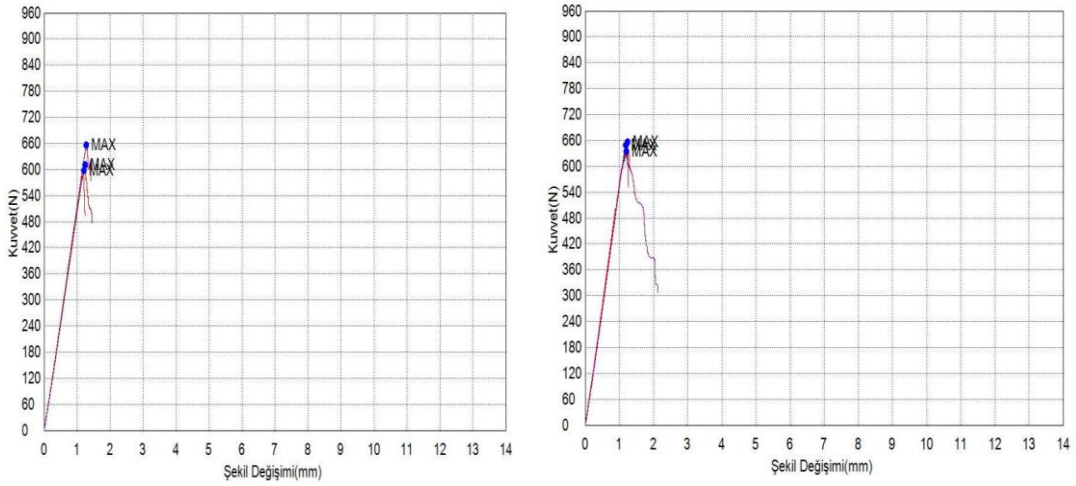
Hibrit kompozit plakaların, alternatif olarak hazırlanmış olan dokuma takviyeli ve örme takviyeli kompozitler ile ve tüm kompozitlerin kendi içinde kompozit yönüne göre en yüksek uzama değerlerinin grafiksel olarak karşılaştırılması Şekil 4.3'te verilmektedir.



	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
Atkı/sıra yönü	1,775	2,054	0,854	2,261	4,368	1,539	1,576
Çözgü/çubuk yönü	1,773	1,896	1,438	2,116	4,993	1,535	1,546

Şekil 4.3: Kompozit numunelerinin atkı/sıra ve çözgü/çubuk yönündeki en yüksek uzama değerleri

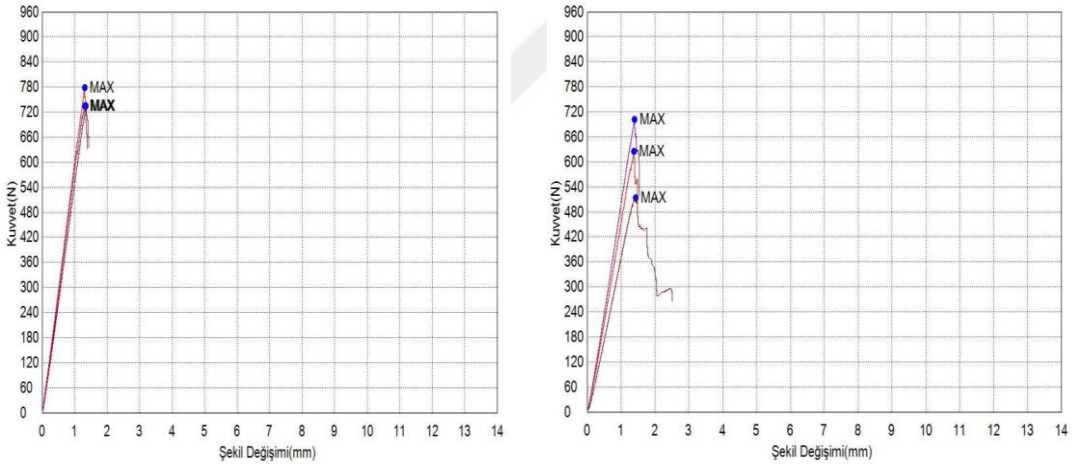
Kompozitlere ait eğilme yükü altındaki kuvvet-şekil değişimi eğrileri ise Şekil 4.4-Şekil 4.10'da verilmektedir.



(a) (b)

Şekil 4.4: C1 kodlu kompozitin (a) atkı ve (b) çözgü yönündeki kuvvet-şekil değişimi eğrileri

Şekil 4.3 ve Şekil 4.4 birlikte incelendiğinde; yalnızca 7 kat bezayağı dokuma kumaşın kullanıldığı C1 kodlu kompozitin en yüksek uzama değerinin her iki yönde de aynı olduğu görülmektedir.

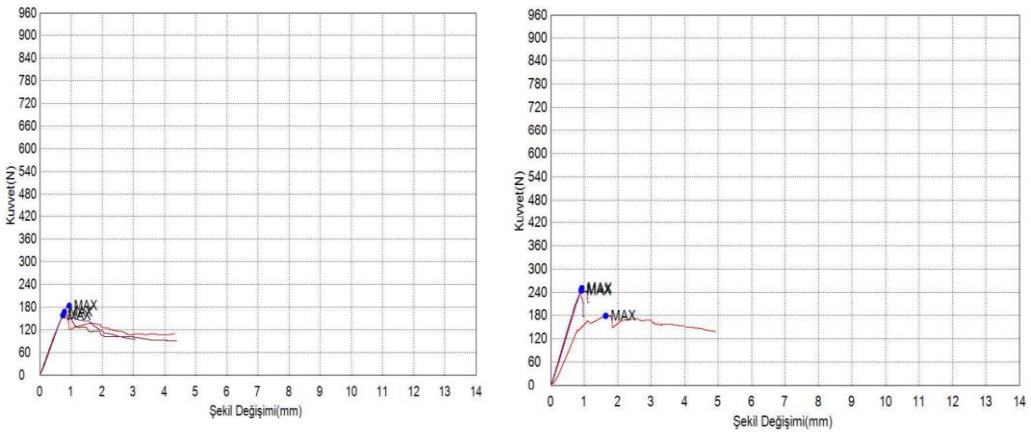


(a) (b)

Şekil 4.5: C2 kodlu kompozitin (a) atkı ve (b) çözgü yönündeki kuvvet-şekil değişimi eğrileri

Şekil 4.3 ve Şekil 4.5 birlikte incelendiğinde; yalnızca 7 kat 2/2 dimi dokuma kumaşın kullanıldığı C2 kodlu kompozitin en yüksek uzama değerinin atkı yönünde çözgü yönünden daha yüksek olduğu gözlenmiştir. C1 ve C2 kompoziti kıyaslandığında ise C2 kompoziti C1'den daha yüksek uzama sergileme potansiyeli göstermiştir. Literatürde Causa ve Netravali (2008) yaptığı çalışmada dimi konstrüksiyonunun gevşek yapısı ve düşük kıvrım oranına rağmen bezayağı kumaştan daha yüksek uzama gösterdiğini belirtmiştir. Takviye konstrüksiyonunun bu

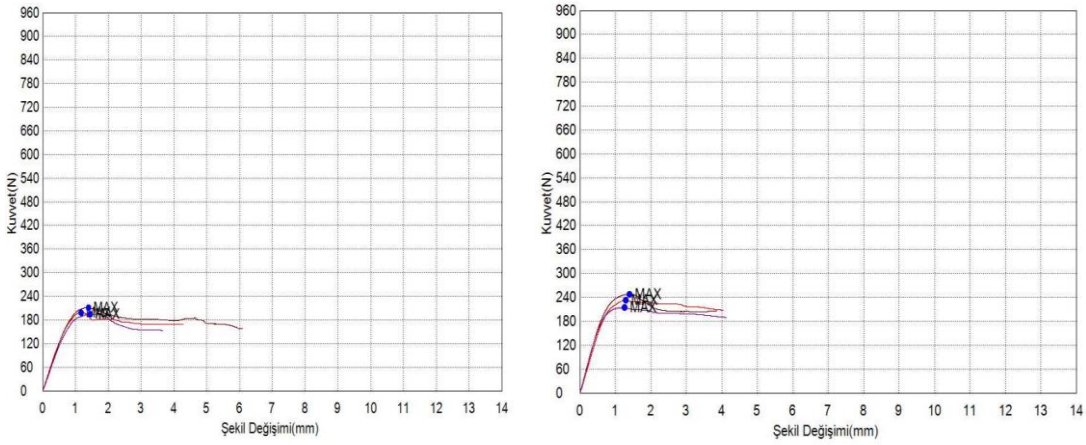
karakteristiğinin, kompozitlerin uzama davranışını da aynı doğrultuda etkilediği düşünülmektedir.



(a) (b)

Şekil 4.6: C3 kodlu kompozitin (a) atkı ve (b) çözgü yönündeki kuvvet-şekil değişimi eğrileri

Şekil 4.3 ve Şekil 4.6 birlikte incelendiğinde; yalnızca iki kat, 12K karbon elyafından üretilmiş 2/2 dimi dokuma kumaşın kullanıldığı C3 kodlu kompozitin; çözgü yönünde daha fazla uzama sergileme potansiyelinde olduğu gözlenmiştir. Buna ek olarak, eğilme dayanımı atkı yönünde daha yüksektir.

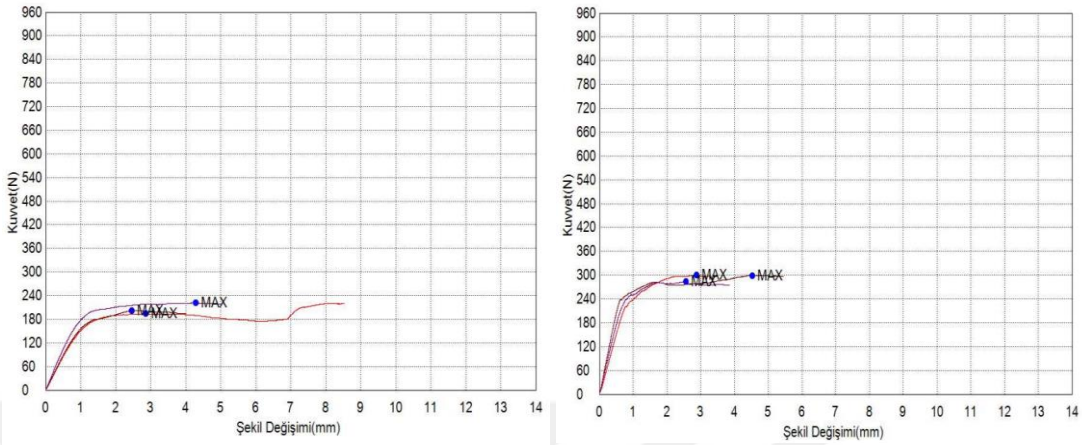


(a) (b)

Şekil 4.7: C4 kodlu kompozitin (a) sıra ve (b) çubuk yönündeki kuvvet-şekil değişimi eğrileri

Şekil 4.3 ve Şekil 4.7 birlikte incelendiğinde; yalnızca iki kat interlok kumaşın kullanıldığı C4 kodlu kompozitin çubuk yönünde nispeten daha fazla uzama sergileme potansiyelinde olduğu görülmektedir. Buna ek olarak, eğilme dayanımının sıra yönünde daha yüksek olduğu belirlenmiştir. C4 kodlu kompozit, sıra yönünde daha düşük kuvvete dayanıp, daha uzun süreli yük taşıma potansiyelinde iken, çubuk

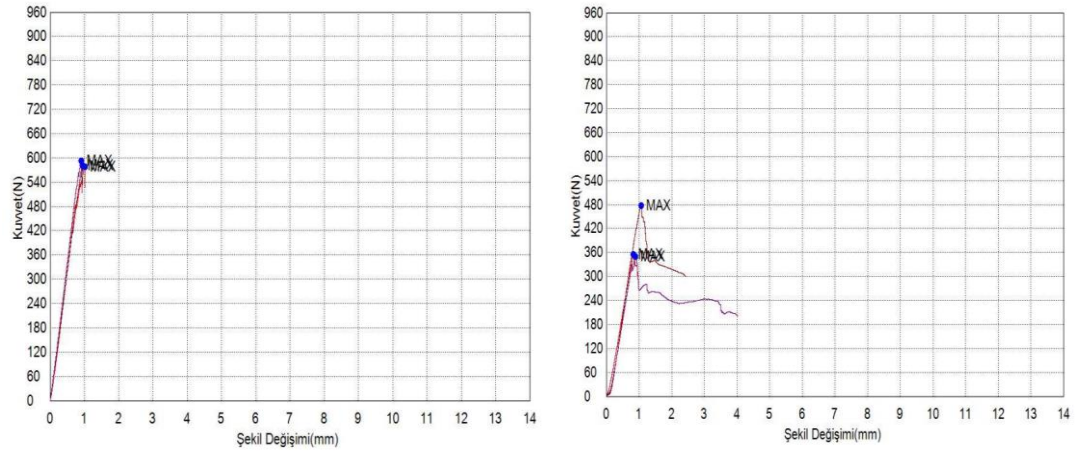
yönünde daha yüksek kuvvete dayanıp, uygulanan yükü daha kısa süreli taşıma potansiyeli göstermiştir. Bu durumun, takviye konstrüksiyonunun sıra yönünde ilmek sıklığının çubuk yönüne göre daha düşük olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.



(a) (b)

Şekil 4.8: C5 kodlu kompozitin (a) atkı/sıra ve (b) çözgü/çubuk yönündeki kuvvet-şekil değişimi eğrileri

Şekil 4.3 ve Şekil 4.8 birlikte incelendiğinde; tek kat interlok ve tek kat 2/2 dimi dokuma kumaş takviyesinin kullanıldığı C5 kodlu hibrit kompozitin, çözgü/çubuk yönünde daha fazla uzama gösterme potansiyelinde olduğu gözlenmiştir. Buna ek olarak eğilme dayanımının çözgü/çubuk yönünde daha yüksek olduğu belirlenmiştir.

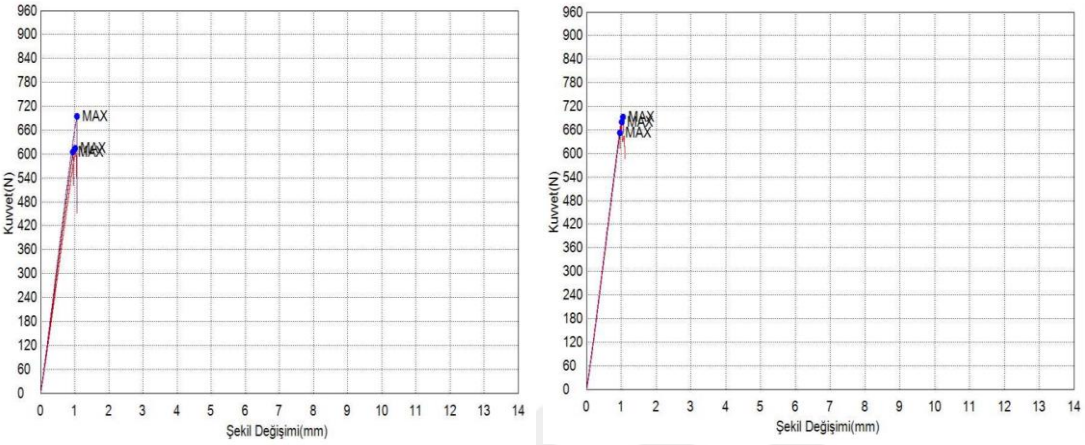


(a) (b)

Şekil 4.9: C6 kodlu kompozitin (a) atkı/sıra ve (b) çözgü/çubuk yönündeki kuvvet-şekil değişimi eğrileri

Şekil 4.3 ve Şekil 4.9 birlikte incelendiğinde; merkezde bir kat interlok kumaşın, dış katmanlarda ise 2'şer kat bezayağı dokuma kumaşın konumlandığı C6

kodlu hibrit kompozitin; atkı/sıra ve çözgü/çubuk yönünde sırasıyla hemen hemen aynı uzama değerine sahip olduğu görülürken atkı/sıra yönünde daha yüksek eğilme dayanımına sahip olduğu belirlenmiştir.



(a) (b)

Şekil 4.10: C7 kodlu kompozitin (a) atkı/sıra ve (b) çözgü/çubuk yönündeki kuvvet-şekil değişimi eğrileri

Şekil 4.3 ve Şekil 4.10 birlikte incelendiğinde; merkezde bir kat interlok kumaşın, dış katmanlarda ise 2'şer kat 2/2 dimi dokuma kumaşın konumlandığı C7 kodlu hibrit kompozit plakanın; atkı/sıra ve çözgü/çubuk yönünde uzama değerinde belirgin bir farkın olmadığı görülürken çözgü/çubuk yönünde daha yüksek eğilme dayanımına sahip olduğu belirlenmiştir.

4.2 Çekme Testi

Kompozit plakalara uygulanan çekme testi sonucunda iki farklı yönde olmak üzere ayrı ayrı elde edilen; çekme dayanımı (MPa), özgül çekme dayanımı **[**MPa/(g/cm^3)], çekme modülü (GPa), özgül çekme modülü [GPa/(g/cm^3)], akma uzaması (%), en büyük kuvvetteki uzama (%) ve kopma uzaması (%) değerlerinin üç tekrar sayısı üzerinden ortalama değerleri atkı/sıra yönü için Tablo 4.3'te, çözgü/çubuk yönü için ise Tablo 4.4'te sunulmaktadır.

Tablo 4.3: Kompozit numunelerinin atkı/sıra yönündeki çekme yükü altındaki değerleri

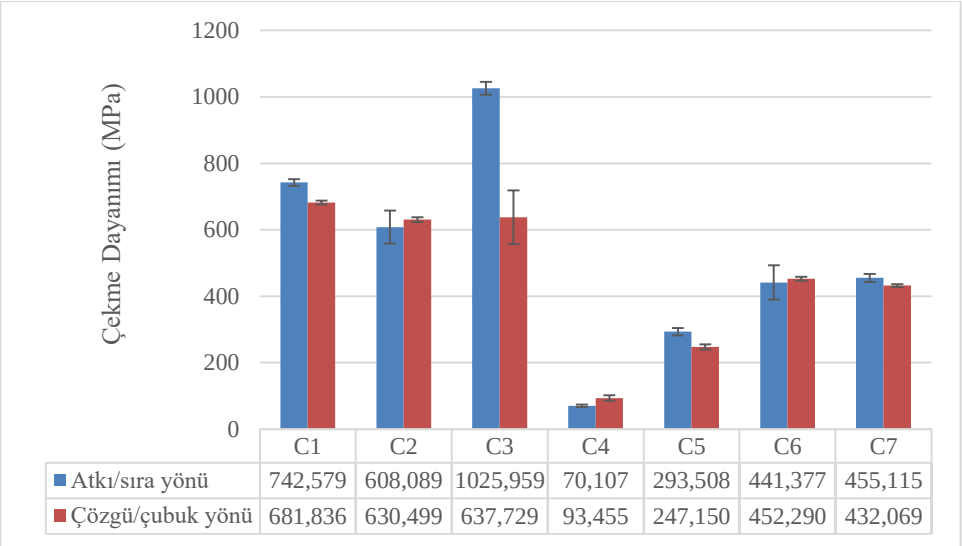
Kompozit Kodu	Çekme dayanımı (MPa)	Özgül dayanım [MPa/(g/cm^3)]	Çekme modülü (GPa)	Özgül modül [GPa/(g/cm^3)]	Akma uzaması (%)	En büyük kuvvetteki uzama (%)	Kopma uzaması (%)
C1	742,579	526,651	58,971	43,030	1,100	1,253	1,253
C2	608,089	419,372	46,411	32,008	0,850	1,240	1,243
C3	1025,959	738,101	39,781	28,626	0,910	1,823	1,877
C4	70,107	52,313	10,486	7,824	0,840	1,150	3,472
C5	293,508	224,053	23,854	18,209	1,467	1,560	1,574
C6	441,377	294,253	35,335	23,557	1,400	1,400	1,411
C7	455,115	301,404	38,146	25,265	1,190	1,190	1,192

Tablo 4.4: Kompozit numunelerinin çözgü/çubuk yönündeki çekme yükü altındaki değerleri

Kompozit Kodu	Çekme dayanımı (MPa)	Özgül dayanım [MPa/(g/cm^3)]	Çekme modülü (GPa)	Özgül modül [GPa/(g/cm^3)]	Akma uzaması (%)	En büyük kuvvetteki uzama (%)	Kopma uzaması (%)
C1	681,836	483,574	50,805	36,028	1,063	1,340	1,347
C2	630,499	434,827	46,845	32,310	0,743	1,290	1,287
C3	637,729	458,798	26,570	19,115	0,880	1,913	2,009
C4	93,455	69,732	17,160	12,805	0,743	0,827	2,510
C5	247,150	188,660	27,098	20,679	1,080	1,717	2,263
C6	452,290	301,527	37,205	24,800	1,370	1,370	1,37
C7	432,069	286,139	38,015	25,179	1,200	1,190	1,19

4.2.1 Çekme Dayanımı

Hibrit kompozit plakaların, alternatif olarak hazırlanmış olan dokuma takviyeli ve örme takviyeli kompozitler ile ve tüm kompozitlerin kendi içinde kompozit yönüne göre çekme dayanımı değerlerinin grafiksel olarak karşılaştırılması Şekil 4.11'de verilmektedir.



	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
Atkı/sıra yönü	742,579	608,089	1025,959	70,107	293,508	441,377	455,115
Çözgü/çubuk yönü	681,836	630,499	637,729	93,455	247,150	452,290	432,069

Şekil 4.11: Kompozit numunelerinin atkı/sıra ve çözgü/çubuk yönündeki çekme dayanımı değerleri

Şekil 4.11 incelendiğinde; C3 kodlu, 12K karbon elyafından üretilmiş 2/2 dimi konstrüksiyonundaki kumaşın iki katlı olarak kullanıldığı kompozitin atkı yönünde 1025,959 MPa ile en yüksek dayanıma sahip olduğu görülmektedir. Kompozit yapısındaki kumaş konstrüksiyonunun dimi olmasından dolayı ve teorik olarak bu tip kumaşların, diğer kumaş tiplerine göre düşük kıvrım oranına sahip olması nedeniyle bağlantı noktalarında hava hapsedilme ve mezo-boşluk oluşma ihtimalini düşürmesi beklenmektedir. Fakat C3 kompozitinin eğilme dayanımında C1 ve C2 kompozitine göre daha düşük bir performans sergilemesinden yola çıkılarak; çekme dayanımında, boşluk oluşumundan bağımsız olarak filament içerisindeki yüksek tel sayısının atkı yönündeki dayanım değerinde belirleyici faktör olduğu düşünülmektedir.

Aynı gramajdaki ve filament içerisinde birbiri ile eşit tel sayısı barındıran C1 ve C2 kompoziti kıyaslandığında; daha yüksek bağlantı sayısı ve kıvrım oranına sahip bezayağı kumaşın kullanıldığı C1'in daha yüksek dayanıma sahip olduğu gözlenmiştir. Bu durum kumaş yapısının, kompozit plakanın mekanik davranışına olan etkisi yönünden üretim koşullarından bağımsız olarak değerlendirildiğinde; bağlantı sayısı ve iplik-iplik sürtünmesinin yüksek olmasından dolayı beklenen bir durumdur. Eğilme dayanımında C2 kompozitinin C1 kompozitinden daha yüksek bir performans sergilemesinden dolayı, çekme dayanımında boşluk oluşumundan bağımsız olarak kumaş konstrüksiyonunun belirleyici faktör olduğu düşünülmektedir.

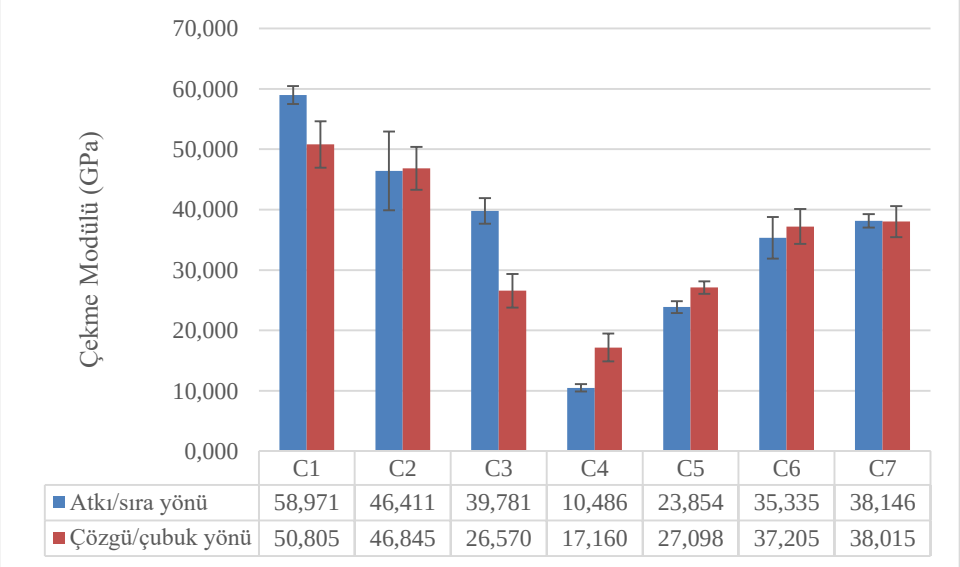
Yalnızca örme kumaş takviyesi içeren C4 kodlu kompozitin hem sıra hem de çubuk yönünde sırasıyla 70,107 MPa ve 93,455 MPa ile en düşük çekme dayanımına

sahip olduğu gözlenmiştir. Bu durumun başlıca sebeplerinden birisi ipliklerin yüksek oranda kavisli bir yapı olan ilmek konfigürasyonunda bulunması ve yapıdaki iplik-iplik sürtünmesinin düşük olmasıdır. Ek olarak, ilmek formunun, reçine yönünden zengin bölgelerin oluşumuna olanak vermesi ve kompozit bütününde elyaf hacim oranının düşük olması; örme kumaş takviyeli kompozitin çekme dayanımının düşük olmasının potansiyel sebeplerinden olduğu düşünülmektedir.

Yapısal hibritleşmenin bulunduğu, dokuma ve örme kumaşların birlikte kullanıldığı C5, C6 ve C7 kompozitlerinin yalnızca dokuma takviyeli kompozitlere kıyasla çekme dayanımlarında düşüş gözlenirken, iki katlı örme kumaşların takviye olarak kullanıldığı kompozite göre artış sağlandığı gözlenmiştir.

4.2.2 Çekme Modülü

Hibrit kompozit plakaların, alternatif olarak hazırlanmış olan dokuma takviyeli ve örme takviyeli kompozitler ile ve tüm kompozitlerin kendi içinde kompozit yönüne göre çekme modülü değerlerinin grafiksel olarak karşılaştırılması Şekil 4.12'de verilmektedir.



	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
Atkı/sıra yönü	58,971	46,411	39,781	10,486	23,854	35,335	38,146
Çözgü/çubuk yönü	50,805	46,845	26,570	17,160	27,098	37,205	38,015

Şekil 4.12: Kompozit numunelerinin atkı/sıra ve çözgü/çubuk yönündeki çekme modülü değerleri

Şekil 4.12 incelendiğinde; çekme modülünde atkı ve çözgü yönünde sırasıyla 58,971 GPa ve 50,805 GPa ile C1 kodlu kompozitin bütün kompozitler arasında üstün geldiği belirlenmiştir. Bu durumda birim alan başına en yüksek yükü taşıma kapasitesi

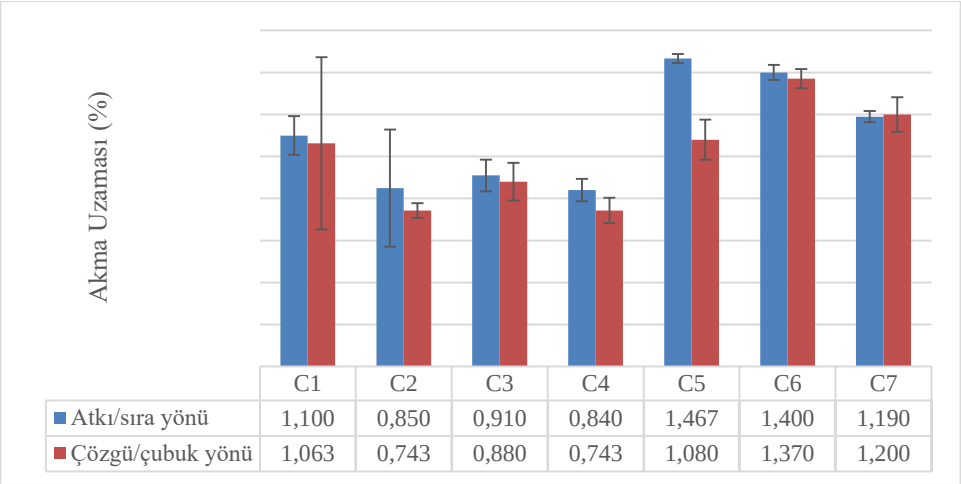
atkı yönünde C3 plakasında iken, birim uzamaya maruz kalabilmesi için en yüksek yük gerektiren ve boyutsal stabilitesini koruyan kompozit C1 kodlu kompozit olmuştur. Çözgü yönünde ise C1 kompozitinin hem en yüksek çekme modülüne hem de en yüksek çekme dayanımına sahip olduğu belirlenmiştir.

Yalnızca örme kumaş içeren C4 kompozitinin çekme modülü değerinde hem sıra hem de çubuk yönünde sırasıyla 10,486 GPa ve 17,160 GPa ile tüm kompozitler arasında en düşük değeri vermesi diğer kompozitlere göre, uzamaya karşı direncinin daha düşük olduğunu göstermektedir. Teorik olarak, örme kumaşların, doğası gereği iyi seviyede dökümlülüğe ve esneyebilirliğe sahip olması, dokuma kumaşların ise doğası gereği rijitliğinin yüksek olmasının, kompozitin çekme modülü ve uzama değerini de aynı doğrultuda etkilediği düşünülmektedir.

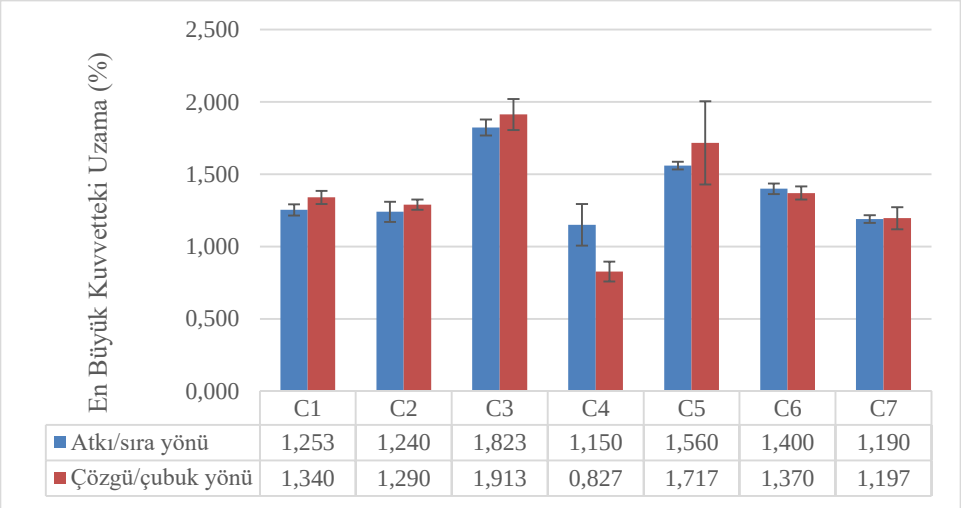
Yapısal hibritleşmenin bulunduğu, dokuma ve örme kumaşların birlikte kullanıldığı C6 ve C7 kompozitlerinin yalnızca dokuma takviyeli kompozitlere kıyasla her iki yönde de çekme modüllerinde düşüş gözlenirken, iki kat örme kumaşın takviye olarak kullanıldığı kompozite göre modül değerlerinde artış sağlandığı gözlenmiştir. Yalnızca, çözgü/çubuk yönünde; 27,098 GPa modül değerindeki C5 kompozitinin 26,570 GPa modüle sahip olan C3 kompoziti ile hemen hemen aynı değere sahip olduğu belirlenmiştir.

4.2.3 Akma Uzaması, En Büyük Kuvvetteki Uzama ve Kopma Uzaması

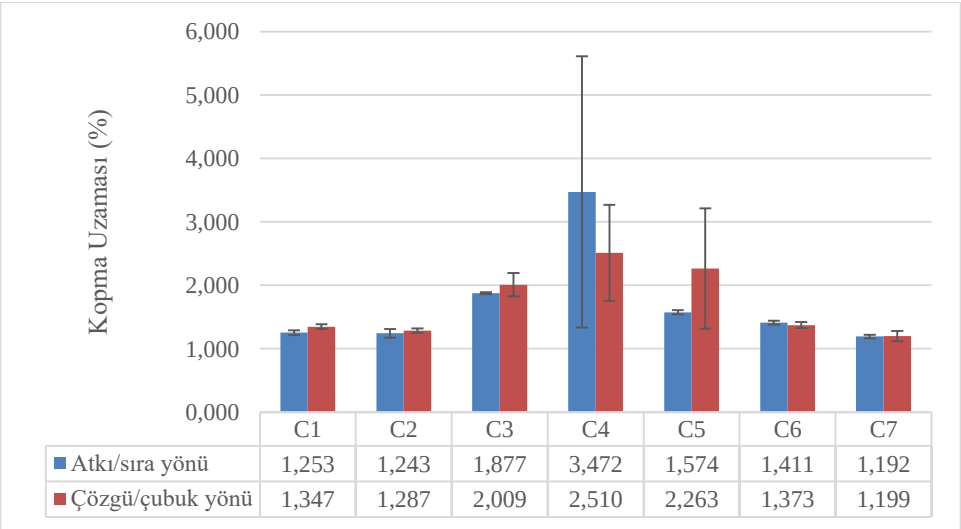
Hibrit kompozit plakaların, alternatif olarak hazırlanmış olan dokuma takviyeli ve örme takviyeli kompozitler ile ve tüm kompozitlerin kendi içinde kompozit yönüne göre akma uzaması, en büyük kuvvetteki uzama ve kopma uzaması değerlerinin grafiksel olarak karşılaştırılması sırasıyla Şekil 4.13, Şekil 4.14 ve Şekil 4.15'te verilmektedir.



Şekil 4.13: Kompozit numunelerinin atkı/sıra ve çözgü/çubuk yönündeki akma uzaması değerleri

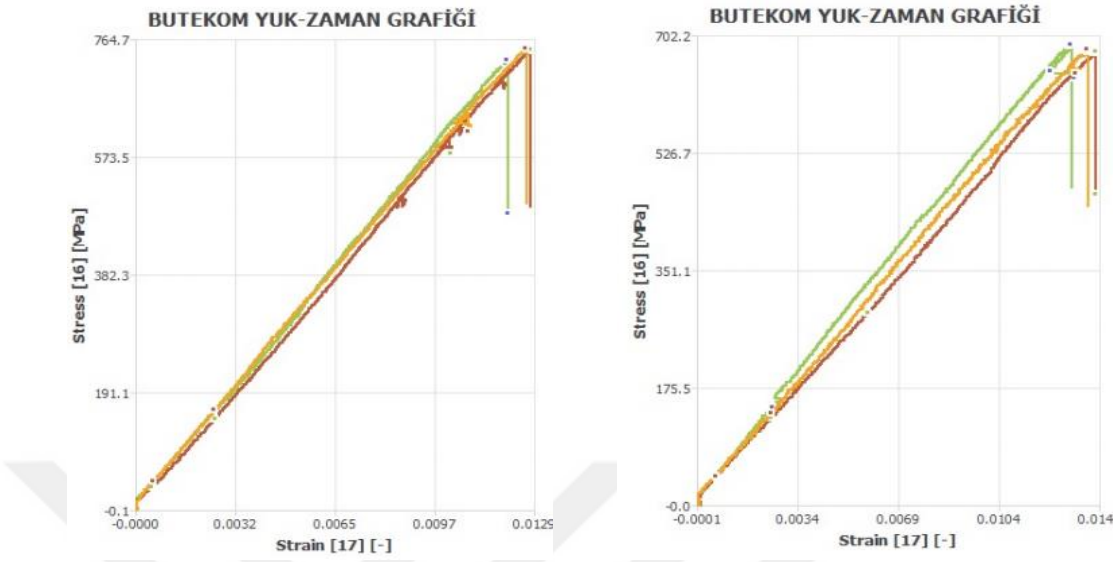


Şekil 4.14: Kompozit numunelerinin atkı/sıra ve çözgü/çubuk yönündeki en büyük kuvvetteki uzama değerleri



Şekil 4.15: Kompozit numunelerinin atkı/sıra ve çözgü/çubuk yönündeki kopma uzaması değerleri

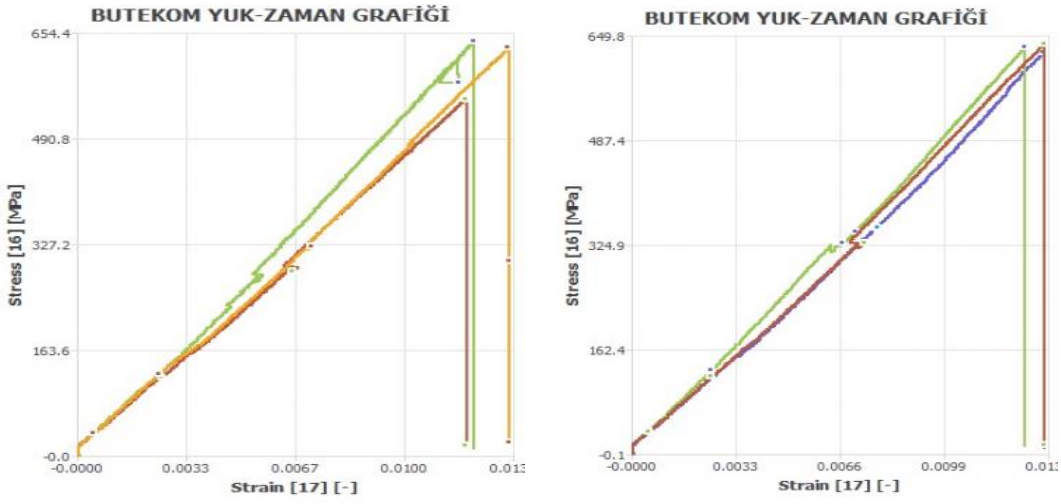
Tüm kompozitlerin çekme yükü altındaki gerilim-uzama eğrileri ise Şekil 4.16–Şekil 4.22'de gösterilmektedir.



(a) (b)

Şekil 4.16: C1 kodlu kompozitin (a) atkı ve (b) çözgü yönündeki gerilim-uzama eğrisi

Şekil 4.13-Şekil 4.15 ve Şekil 4.16 birlikte incelendiğinde; C1 kodlu kompozit, kopma meydana gelene kadar çok az plastik deformasyon göstermiş olup şekil değiştirme kabiliyeti oldukça kısıtlıdır. En büyük kuvvetteki uzama değerinin; plaka yönüne göre karşılaştırıldığında çözgü yönünde en yüksek olduğu gözlenmiştir.

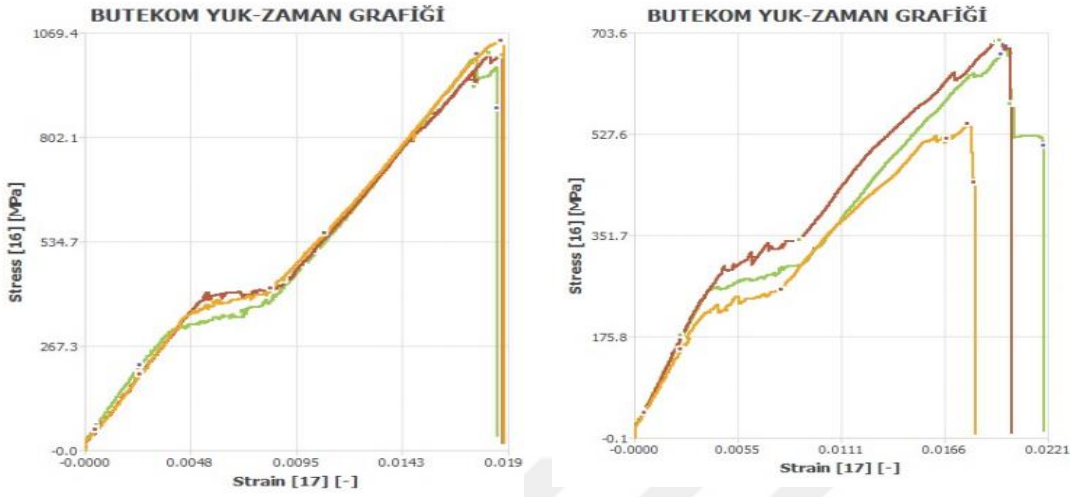


(a) (b)

Şekil 4.17: C2 kodlu kompozitin (a) atkı ve (b) çözgü yönündeki gerilim-uzama eğrisi

Şekil 4.13-Şekil 4.15 ve Şekil 4.17 birlikte incelendiğinde; C2 kodlu kompozit, kopma meydana gelene kadar çok az plastik deformasyon göstermiş olup şekil

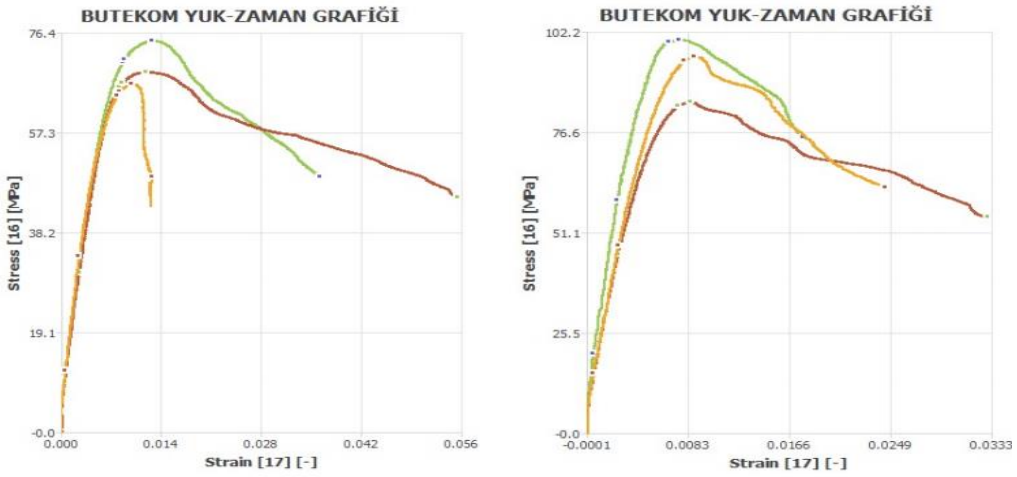
değiştirme kabiliyeti oldukça kısıtlıdır. En büyük kuvvetteki uzama değerinin; plaka yönüne göre karşılaştırıldığında çözgü yönünde en yüksek olduğu gözlenmiştir.



(a) (b)

Şekil 4.18: C3 kodlu kompozitin (a) atkı ve (b) çözgü yönündeki gerilim-uzama eğrisi

Şekil 4.13-Şekil 4.15 ve Şekil 4.18 birlikte incelendiğinde; C3 kodlu kompozit, kopma meydana gelene kadar çok az plastik deformasyon göstermiş olup şekil değiştirme kabiliyeti oldukça kısıtlı olsa da C1 ve C2 kompozitine göre daha yüksek oranda şekil değiştirme potansiyeline sahiptir. En büyük kuvvetteki uzama değerinin; plaka yönüne göre karşılaştırıldığında çözgü yönünde en yüksek olduğu gözlenmiştir.

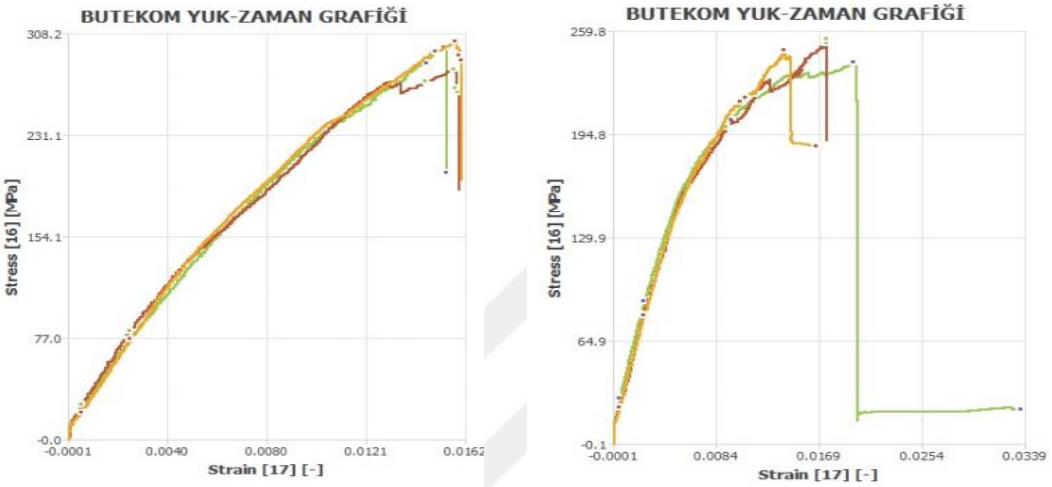


(a) (b)

Şekil 4.19: C4 kodlu kompozitin (a) sıra ve (b) çubuk yönündeki gerilim-uzama eğrisi

Şekil 4.13-Şekil 4.15 ve Şekil 4.19 birlikte incelendiğinde; C4 kodlu kompozitin, C1, C2 ve C3 ile benzer şekilde şekil değiştirme kabiliyeti kısıtlı olduğu görülse de nispeten daha yüksek kopma uzaması sergilemesi potansiyeli taşımasının;

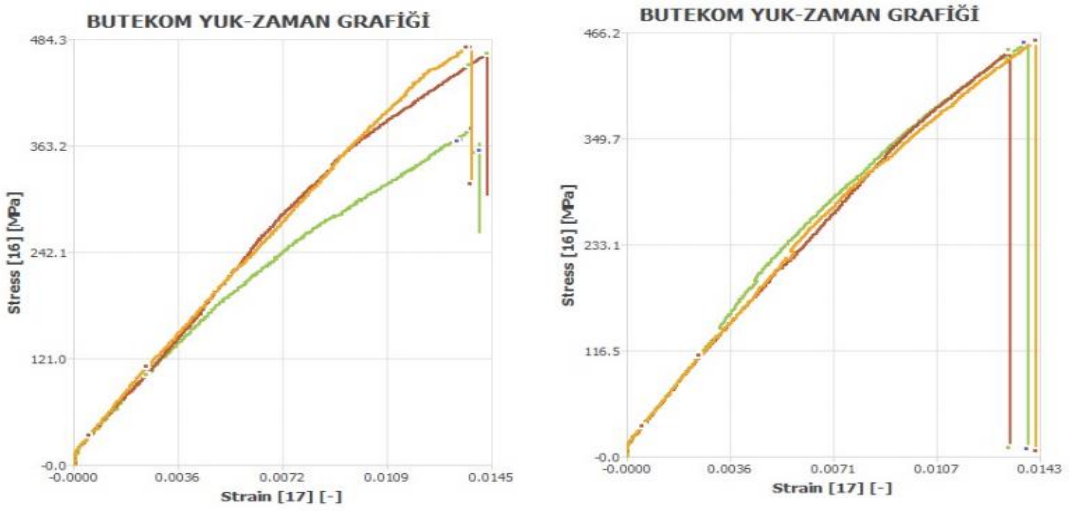
örme kumaşların doğası gereği dokuma kumaşlara göre uzama kabiliyetinin daha yüksek olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. En büyük kuvvetteki uzama değerinin; plaka yönüne göre karşılaştırıldığında sıra yönünde en yüksek olduğu gözlenmiştir. Bu durumun, örme kumaşların konstrüksiyonları dolayısıyla sıra yönünde daha az sıklığa sahip olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.



(a) (b)

Şekil 4.20: C5 kodlu kompozitin (a) atkı/sıra ve (b) çözgü/çubuk yönündeki gerilim-uzama eğrisi

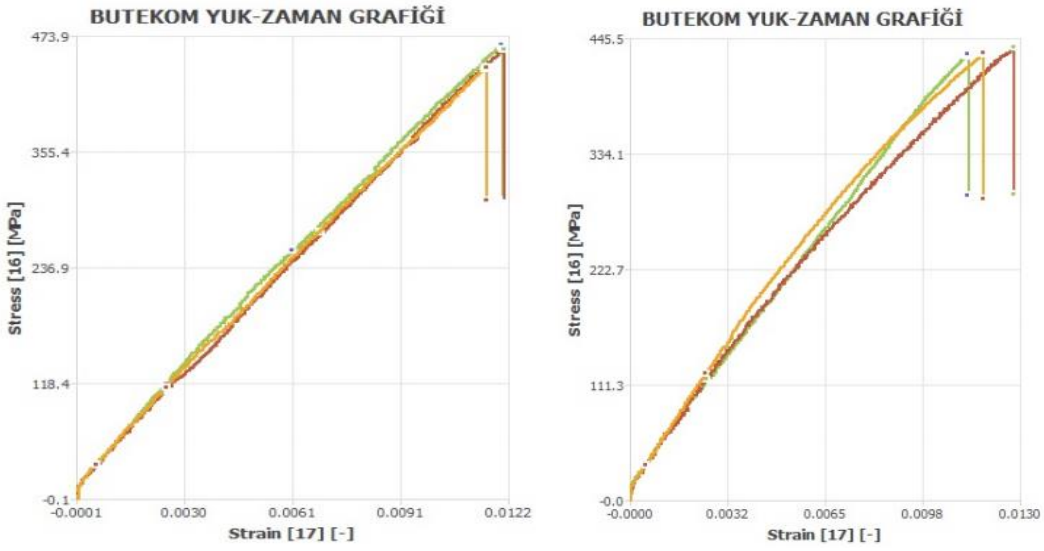
Şekil 4.13-Şekil 4.15 ve Şekil 4.20 birlikte incelendiğinde; C5 kodlu kompozit, kopma meydana gelene kadar kısıtlı plastik deformasyon gösterme potansiyeline sahip olup şekil değiştirme kabiliyeti oldukça kısıtlıdır. En büyük kuvvetteki uzama değerinin; plaka yönüne göre karşılaştırıldığında C1, C2 ve C3 kompozitleri ile benzer şekilde çözgü/çubuk yönünde en yüksek olduğu gözlenmiştir.



(a) (b)

Şekil 4.21: C6 kodlu kompozitin (a) atkı/sıra ve (b) çözgü/çubuk yönündeki gerilim-uzama eğrisi

Şekil 4.13-Şekil 4.15 ve Şekil 4.21 birlikte incelendiğinde; C6 kodlu kompozit, plakadaki esas takviye konstrüksiyonu olan bezayağı konstrüksiyonunun kullanıldığı C1 ile benzer uzama karakteristiği göstermiş olup, şekil değiştirme kabiliyeti oldukça kısıtlıdır. En büyük kuvvetteki uzama değerinin; plaka yönüne göre karşılaştırıldığında çubuk yönü olduğu gözlenmiştir.



(a) (b)

Şekil 4.22: C7 kodlu kompozitin (a) atkı/sıra ve (b) çözgü/çubuk yönündeki gerilim-uzama eğrisi

Şekil 4.13-Şekil 4.15 ve Şekil 4.22 birlikte incelendiğinde; C7 kodlu kompozit, plakadaki esas takviye konstrüksiyonu olan dimi konstrüksiyonunun kullanıldığı C2 ile benzer uzama karakteristiği göstermiş olup, şekil değiştirme kabiliyeti oldukça kısıtlıdır. En büyük kuvvetteki uzama değerinin; plaka yönüne göre karşılaştırıldığında

diğer kompozit plakalardan farklı olarak her iki yönde de birbirine oldukça yakın olduğu gözlenmiştir.

5. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında interlok konstrüksiyonundaki karbon örme kumaşların çeşitli dokuma kumaşlar ile aynı matriste kullanımı yoluyla elde edilen hibrit kompozitlerin eğilme ve çekme davranışı incelenmiştir. Örme kumaşların ilmek konfigürasyonu ve doğası gereği esneklik ve dökümlülük gibi karakteristiklerinin dokuma kumaşların yüksek dayanım ve rijitlik gibi karakteristikleri ile kombinasyonunun epoksi kompozitlerin mekanik davranışı üzerindeki etkisinin incelenmesi amaçlanmıştır.

Tez kapsamında gerçekleştirilen deneysel çalışmalar doğrultusunda; hibrit kompozitlerin eğilme yükü altında dayanımının, karbon dokuma kumaş takviyeli kompozitlerin literatürdeki belirlenmiş olan eğilme dayanımı değer aralığında olduğu fakat herhangi bir üstünlük sağlayamadığı sonucuna ulaşılırken, iki kat takviye kumaşı içeren hibrit kompozitin literatürdeki karbon dokuma kumaş takviyeli kompozitlerin değer aralığından daha düşük bir eğilme dayanımına sahip olduğu gözlemlenmiştir. Buna ek olarak, bütün hibrit kompozitlerin eğilme modülünün karbon dokuma kumaş takviyeli kompozitlerin literatürdeki belirlenmiş olan eğilme modülü değer aralığından daha düşük olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Bununla birlikte tüm hibrit kompozitlerin eğilme modülü, literatürdeki kullanımına en sık rastlanan hammadde tipi olan cam elyafından üretilmiş örme ve dokuma konstrüksiyonunun kullanıldığı hibrit kompozitlerden daha yüksek olarak belirlenmiştir.

Çekme yükü altında mekanik davranışı incelenen hibrit kompozitler arasında eğilme dayanımına benzer şekilde takviye kumaşı kat sayısının daha fazla olduğu iki kompozitin dayanım değerinin, karbon dokuma kumaş takviyeli kompozitlerin literatürdeki belirlenmiş olan çekme dayanımı değer aralığında olduğu fakat herhangi bir üstünlük sağlayamadığı sonucuna ulaşılırken, iki kat takviye kumaşı içeren hibrit kompozitin literatürdeki karbon dokuma kumaş kompozitlerin değer aralığından daha düşük bir çekme dayanımına sahip olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Fakat tüm hibrit kompozitlerin çekme dayanımının, literatürdeki cam elyafından üretilmiş örme ve dokuma konstrüksiyonunun kullanıldığı hibrit kompozitlerden daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.

Literatür ve deneysel araştırmalar doğrultusunda; tez kapsamında üzerinde çalışılan interlok konstrüksiyonunun ilmek iplik uzunluğunun düşürülmesiyle daha yüksek sıra/çubuk sıklığında ve düşük gözeneklilikte kumaş üretiminin mümkün olabileceği sonucuna ulaşılmıştır. Parametrelerdeki bu değişim ile, kompozit bütünündeki elyaf hacim oranında ideal seviyeye ulaşma ve lif-matris arafazı miktarında artma sağlanarak hem tek tip takviye malzemesi formu hem de hibrit takviye malzemesi formu kullanımı durumunda kompozit malzemenin mekanik özelliklerinde iyileşmenin gözlenebileceği öngörülmektedir.

6. KAYNAKLAR

Abd elzaher Eltahan, E., Sultan, M. and Mito, A. B., "Determination of loop length, tightness factor and porosity of single jersey knitted fabric", *Alexandria Engineering Journal*, 55(2), 851-856, (2016).

Agarwal, B. D., Broutman, L. J. and Chandrashekhara, K., *Analysis and performance of fiber composite*, John Wiley & Sons, (2017).

Ahmad, F., Yuvaraj, N. and Bajpai, P. K., "Influence of reinforcement architecture on static and dynamic mechanical properties of flax/epoxy composites for structural applications", *Composite Structures*, 255, (2021).

Aktaş, A., Aktaş, M. and Turan, F., "The effect of stacking sequence on the impact and post-impact behavior of woven/knit fabric glass/epoxy hybrid composites", *Composite Structures*, 103, 119-135, (2013).

Ashraf, W., Nawab, Y., Umair, M., Shaker, K. and Karahan, M., "Investigation of mechanical behavior of woven/knitted hybrid composites", *J. Text. Inst.*, 108(9), 1510-1517, (2017).

ASTM D3039/D3039M-08 Standard Test Method For Tensile Properties Of Polymer Matrix Composite Materials

ASTM D790-17 Standard Test Methods For Flexural Properties of Unreinforced And Reinforced Plastics And Electrical Insulating Materials

Baghaei, B., Skrifvars, M. and Berglin, L., "Characterization of thermoplastic natural fibre composites made from woven hybrid yarn prepregs with different weave pattern", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 76, 154-161, (2015).

Balani, K., Verma, V., Agarwal, A. and Narayan, R., "Physical, thermal, and mechanical properties of polymers", *Biosurfaces: A Materials Science and Engineering Perspective*, 329, (2015).

Balasubramanian, K., Sultan, M. T. and Rajeswari, N., *Sustainable Composites for Aerospace Applications*, Woodhead Publishing, 55-67, (2018).

Balcıoğlu, H. E. and Yalçın, D., "The determination of fracture characterization of knitted fabric reinforced composites using arcan test", *Fibers Polym*, 21(4), 849-863, (2020).

Başer, G., *Dokuma tekniği ve Sanatı Temel Dokuma Tekniği ve Kumaş Yapıları*, İzmir, (2004).

Biron, M., *Thermoplastics and thermoplastic* composites, William Andrew, (2018).

Brydson, J.A., *Plastics Materials*, 744-777, (1999).

Buckley, J., D. and Edie, D., D. (Eds.) *Carbon-carbon materials and composites*, William Andrew, (1993).

Carrillo, J. G., Gamboa, R. A., Flores-Johnson, E., A. and Gonzalez-Chi, P., I., "Ballistic performance of thermoplastic composite laminates made from aramid woven fabric and polypropylene matrix", *Polymer testing*, 31(4), 512- 519, (2012).

Causa, A. and Netravali, A., "Characterization and measurement of textile fabric properties", (ed: P. Schwartz) *Structure and Mechanics of Textile Fibre Assemblies*, Woodhead Publishing, 4-47, (2008).

Chand, S., "Review carbon fibers for composites", *Journal of materials science*, 35(6), 1303-1313, (2000).

Chawla, K. K., *Composite materials: science and engineering*, Springer Science & Business, (2012).

Chen, D., Luo, Q., Meng, M., Li, Q. and Sun, G., "Low velocity impact behavior of interlayer hybrid composite laminates with carbon/glass/basalt fibres", *Composites Part B: Engineering*, 176, 107191, (2019).

Chou, S. and Wu, C. J., “A study of the physical properties of epoxy resin composites reinforced with knitted glass fiber fabrics", *Journal of reinforced plastics and composites*, 11(11), 1239-1250, (1992).

Chou, S., Chen, H. C. and Lai, C. C., “The fatigue properties of weft-knit fabric reinforced epoxy resin composites”, *Composites science and technology*, 45(4), 283-291, (1992).

Chung, D. D. L. and Chung, D., *Carbon fiber composites*, Elsevier, (2012).

Clyne, T. W. and Hull, D., *An introduction to composite materials*, Cambridge university press, (2019).

Das, S., Hossain, M., Rony, M. S. H., Hashan, M. M., Haque, A. U. and Majumder, M. “Analyzing Technical Relationships among GSM, Count and Stitch Length of (1x1) Rib and (1x1) Grey Interlock Fabric”, *Int J Text Sci*, 6, 64-71, (2017).

Delavari, K. and Dabiryan, H. “Effect of Z-fiber orientation on the bending behavior of sandwich-structured composite: Numerical and experimental study”, *Composite Structures*, 256, (2021).

Donnet, J. B. and Bansal, R. C., *Carbon fibers*, Crc Press, (1998).

Dorey, G., Sidey, G. R. and Hutchings, J., “Impact properties of carbon fibre/Kevlar 49 fibre hydrid composites”, *Composites*, 9(1), 25-32, (1978).

Elanchezhian, C., Ramnath, B. V. and Hemalatha, J., “Mechanical behaviour of glass and carbon fibre reinforced composites at varying strain rates and temperatures”, *Procedia Materials Science*, 6, 1405-1418, (2014).

Gay, D., *Composite materials: design and applications*, CRC press**,** (2014).

Guenthner, A. J., Lamison K. R., Vij, V., Reams, J. T., Yandek, G. R. and Mabry1, J. M., “New insights into structure–property relationships in thermosetting polymers from studies of cocured polycyanurate networks”, *Macromolecules*, 45(1), 211, (2012).

Gustin, J., Joneson, A., Mahinfalah, M. and Stone, J., "Low velocity impact of combination Kevlar/carbon fiber sandwich composites", *Composite structures*, 69(4), 396-406, (2005).

Hasan, Z., "Tooling for Composite Aerospace Structures", *Composite materials*, 21-48, (2020).

Hoa, S. V., *Principles of the manufacturing of composite materials*, DEStech Publications, Inc. (2009).

Houshyar, S., Shanks, R. A. and Hodzic, A., "Influence of different woven geometry in poly (propylene) woven composites", *Macromolecular Materials and Engineering*, 290(1), 45-52, (2005).

Hu, H., Zhang, M., Fangueiro, R. and De Araujo, M., "Mechanical properties of composite materials made of 3D stitched woven-knitted preforms", *Journal of Composite Materials*, 44(14), 1753-1767, (2010).

Irving, P. E. and Soutis, C. (Eds.) *Polymer composites in the aerospace industry*, Woodhead Publishing, (2019).

Jahan, I., "Effect of fabric structure on the mechanical properties of woven fabrics", *Advance Research in Textile Engineering*, 2(2), 1018, (2017).

John, B. and Nair, C. R., *Handbook of thermoset plastics*, William Andrew Publishing, 511-554, (2014).

John, K. M., Kumaran, S. T., Kumar, K. S., Kumar, S. S., Aslan, M. and Alver, Ü., "Mechanical and Vibrational Behavior of Twill Woven Carbon Fiber Reinforced Composites", *International Polymer Processing*, 35(2), 203-210, (2020).

Júnior, C. P., De Carvalho, L. H., Fonseca, V. M., Monteiro, S. N. and d'Almeida, J. R. M., "Analysis of the tensile strength of polyester/hybrid ramie–cotton fabric composites", *Polymer Testing*, 23(2), 131-135, (2004).

Karahan, M., “Investigation of damage initiation and propagation in 2× 2 twill woven carbon/epoxy multi-layer composites”, *Textile Research Journal*, 81(4), 412-428, (2011).

Kashani, M. H., Hosseini, A., Sassani, F., Ko, F. K. and Milani, A. S., “Understanding different types of coupling in mechanical behavior of woven fabric reinforcements: A critical review and analysis”, *Composite Structures*, 179, 558-567, (2017).

Kenny, J, M. and Nicolais, L., “Science and Technology of Polymer Composites,” (eds: G. Allen, J. C. Bevington), *Comprehensive Polymer Science and Supplements*, Pergamon, 471-525, (1989).

Khatkar, V., Vijayalakshmi, A. S., Manjunath, R. N., Olhan, S. and Behera, B. K., “Experimental investigation into the mechanical behavior of textile composites with various fiber reinforcement architectures”, *Mechanics of Composite Materials*, 56(3), 367-378, (2020).

Khondker, O. A., Fukui, T., Inoda, M., Nakai, A. and Hamada, H.,“ Fabrication and mechanical properties of aramid/nylon plain knitted composites”, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 35(10), 1195-1205, (2004).

Khondker, O. A., Leong, K. H., Herszberg, I. and Hamada, H., “Impact and compression-after-impact performance of weft-knitted glass textile composites”, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 36(5), 638-648, (2005).

Kim, K. Y. and Ye, L., “Interlaminar fracture properties of weft-knitted/woven fabric interply hybrid composite materials”, *Journal of Materials Science*, 47(20), 7280-7290, (2012).

Kim, K. Y., Curiskis, J. I., Ye, L. and Fu, S. Y., “Mode-I interlaminar fracture behaviour of weft-knitted fabric reinforced composites”, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 36(7), 954-964, (2005).

Kimpara, I., “Use of advanced composite materials in marine vehicles.” *Marine structures*, 4(2), 117-127, (1991).

Komorek, A., Szczepaniak, R., Przybylek, P., Krzyzak, A., Godzimirski, J., Roskowicz, M. And Seremak, D., “Properties of multi-layered polymer composites with Vectran fiber reinforcement”, *Composite Structures*, 256, (2021).

Koricho, E. G., Belingardi, G. and Beyene, A. T., “Bending fatigue behavior of twill fabric E-glass/epoxy composite”, *Composite Structures*, 111, 169-178. (2014).

Kumar, B. and Thakur, S. (Eds.), *Textiles for Advanced Applications*, BoD–Books on Demand, (2017).

Kurbak, A. and Alpyildiz, T., “Geometrical models for balanced rib knitted fabrics part II: applications of 1× 1 rib model to presser-foot knitted 1× 1 rib, interlock and half Milano Rib”, *Textile Research Journal*, 79(6), 495-505, (2009).

Kurbak, A., “Geometrical models for balanced rib knitted fabrics part I: conventionally knitted 1× 1 rib fabrics”, *Textile Research Journal*, 79(5), 418- 435, (2009).

Leong, K. H., Falzon, P. J., Bannister, M. K. and Herszberg, I., “An investigation of the mechanical performance of weft-knit milano-rib glass/epoxy composites”, *Composites Science and Technology*, 58(2), 239-251, (1998).

Leong, K. H., Ramakrishna, S., Huang, Z. M. and Bibo, G. A., “The potential of knitting for engineering composites—a review”, *Composites Part A: applied science and manufacturing*, 31(3), 197-220, (2000).

Li, J., Fan, W., Ma, Y., Xue, L., Yuan, L., Dang, W. and Meng, J., “Influence of Reinforcement Structures and Hybrid Types on Inter-Laminar Shear

Performance of Carbon-Glass Hybrid Fibers/Bismaleimide Composites under Long-Term Thermo-Oxidative Aging", *Polymers,* 11(8), 1288, (2019).

Liu, Q., Lin, Y., Zong, Z., Sun, G. and Li, Q., "Lightweight design of carbon twill weave fabric composite body structure for electric vehicle", *Composite Structures*, 97, 231-238, (2013).

Long, A. C. (Ed.), *Design and manufacture of textile composites*, Elsevier, (2005).

Mallick, P. K. (Ed.), *Composites engineering handbook,* CRC Press, (1997).

Mallick, P. K., *Fiber-reinforced composites: materials, manufacturing, and design*, CRC press, (2007).

Margabandu, S. and Subramaniam, S. "Experimental evaluation and numerical validation of bending and impact behaviours of hybrid composites with various stacking arrangements", *Materials Research Express*, 6(12), 125305, (2019).

Maruo, Y., Nishigawa, G., Irie, M., Yoshihara, K. and Minagi, S., "Flexural properties of polyethylene, glass and carbon fiber-reinforced resin composites for prosthetic frameworks", *Acta Odontologica Scandinavica*, 73(8), 581-587, (2015).

Matthews, F. L. and Rawlings, R. D., *Composite materials: engineering and science*, CRC press, (1999).

May, C. (Ed.), *Epoxy resins: chemistry and technology*, Routledge, (2018).

Middleton, B. *Composites: Manufacture and Application, Design and Manufacture of Plastic Components for Multifunctionality: Structural Composites, Injection Molding, and 3D Printing*, 53, (2015).

Militký, J. and Jabbar, A., "Comparative evaluation of fiber treatments on the creep behavior of jute/green epoxy composites", *Composites Part B: Engineering*, 80, 361-368, (2015).

Mohd Nurazzi, N., Khalina, A., Sapuan, S. M., Dayang Laila, A. H. A. M., Rahmah, M. And Hanafee, Z., "A Review: Fibres, Polymer Matrices and Composites", *Pertanika Journal of Science & Technology*, 25(4), (2017).

Mottram, J. T., Geary, B. and Taylor, R., "Thermal expansion of phenolic resin and phenolic-fibre composites", *Journal of materials science*, 27(18), 5015- 5026, (1992).

Mouritz, A. P., *Introduction to Aerospace Materials*, Woodhead Publishing, UK; Cambridge, (2012).

Muralidhar, B. A., "Tensile and compressive behaviour of multilayer flax-rib knitted preform reinforced epoxy composites", *Materials & Design*, 49, 400- 405, (2013).

Muralidhar, B. A., Giridev, V. R. and Raghunathan, K., "Flexural and impact properties of flax woven, knitted and sequentially stacked knitted/woven preform reinforced epoxy composites", *Journal of reinforced plastics and composites*, 31(6), 379-388, (2012).

Murugan, R., Ramesh, R. and Padmanabhan, K., "Investigation on static and dynamic mechanical properties of epoxy based woven fabric glass/carbon hybrid composite laminates", *Procedia Engineering*, 97, 459-468, (2014).

Negawo, T. A., Polat, Y., Akgul, Y., Kilic, A. and Jawaid, M. "Mechanical and dynamic mechanical thermal properties of ensete fiber/woven glass fiber fabric hybrid composites" *Composite Structures*, 259, 113221, (2021).

Ng, S. P., Tse, P. C. and Lau, K. J., "Numerical and experimental determination of in-plane elastic properties of 2/2 twill weave fabric composites" *Composites Part B: Engineering*, 29(6), 735-744, (1998).

Nicolais L., Kenny J.M., Maffezzoli A., Torre L. and Trivisano A., "Science and Technology of Polymer Composites" (eds: G. Akovali) *The Interfacial Interactions in Polymeric Composites*, Springer, 321-357, Dordrecht, (1993).

Nunna, S., Blanchard, P., Buckmaster, D., Davis, S. and Naebe, M., "Development of a cost model for the production of carbon fibres" *Heliyon*, 5(10), (2019).

Padaki, N. V., Alagirusamy, R. and Sugun, B. S. "Knitted preforms for composite applications" *Journal of Industrial Textiles*, 35(4), 295-321, (2006).

Paiva, J. M. F. D., Santos, A. D. N. D. and Rezende, M. C., "Mechanical and morphological characterizations of carbon fiber fabric reinforced epoxy composites used in aeronautical field", *Materials Research*, 12(3), 367-374, (2009).

Palanikumar, K. "Analyzing surface quality in machined composites", *Machining Technology for Composite Materials*, 154-182, (2012).

Pandita, S. D., Falconet, D. and Verpoest, I., "Impact properties of weft knitted fabric reinforced composites", *Composites Science and Technology*, 62(7-8), 1113-1123, (2002).

Park, R. and Jang, J., "The effects of hybridization on the mechanical performance of aramid/polyethylene intraply fabric composites", *Composites science and technology*, 58(10), 1621-1628, (1998).

Peters, S. T. (Ed.), *Handbook of composites*, Springer Science & Business Media, (2013).

Pritchard G., *Coupling agents: Plastics Additives*, Springer, Dordrecht, (1998).

Quanjin, M., Rejab, M. R. M., Idris, M. S., Zhang, B. and Kumar, N. M. "Filament winding technique: SWOT analysis and applied favorable factors", *SCIREA Journal of Mechanical Engineering*, 3(1), 1-25, (2019).

Ramakrishna, S. and Hull, D., "Energy absorption capability of epoxy composite tubes with knitted carbon fibre fabric reinforcement", *Composites Science and Technology*, 49(4), 349-356. (1993).

Ramakrishna, S., “Energy absorption characteristics of knitted fabric reinforced epoxy composite tubes”, *Journal of reinforced plastics and composites*, 14(10), 1121-1141, (1995).

Rawal, S. P. and. Goodman, J. W., Composites for Spacecraft, (eds: A. Kelly and C. Zweben), *Comprehensive Composite Materials*, Pergamon, 279-315, (2000).

Rubino, F., Nisticò, A., Tucci, F. and Carlone, P. “Marine application of fiber reinforced composites: a review” *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(1), 26, (2020).

Rudd, C. D., Owen, M. J. and Middleton, V., “Mechanical properties of weft knit glass fibre/polyester laminates”, *Composites Science and Technology*, 39(3), 261-277, (1990).

Ryutoku, Y., Kiyotake, M., Akio, N., Yoshito, I. and Toshio, S., *Adhesion and bonding in composites*, CRC Press, (1990).

Saba, N., Jawaid, M. and Sultan, M. T. H., “Thermal properties of oil palm biomass based composites”, *Lignocellulosic Fibre and Biomass-Based Composite Materials*, 95-122, (2017).

Saiman, M. P., Wahab, M. S. and Wahit, M. U., “The effect of fabric weave on the tensile strength of woven kenaf reinforced unsaturated polyester composite” *Proceedings of the International Colloquium in Textile Engineering, Fashion, Apparel and Design*, Springer, Singapore, 25-29, (2014).

Shekarchizadeh, N., Jafari Nedoushan, R., Dastan, T. and Hasani, H., “Experimental and numerical study on stiffness and damage of glass/epoxy biaxial weft-knitted reinforced composites”, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 40(1-2), 70-83, (2021).

Shivakumar, K. N., Swaminathan, G. and Sharpe, M., "Carbon/vinyl ester composites for enhanced performance in marine applications" *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 25(10), 1101-1116, (2006).

Singh, T. J. and Samanta, S., "Characterization of Kevlar fiber and its composites: a review" *Materials Today: Proceedings*, 2(4-5), 1381-1387, (2015).

Spencer, D. J., *Knitting technology: a comprehensive handbook and practical guide*, Woodhead Publishing, (2001).

Subagia, I. A., Kim, Y., Tijing, L. D., Kim, C. S. and Shon, H. K., "Effect of stacking sequence on the flexural properties of hybrid composites reinforced with carbon and basalt fibers", *Composites Part B: Engineering*, 58, 251-258. (2014).

Sun, G., Tong, S., Chen, D., Gong, Z. and Li, Q., "Mechanical properties of hybrid composites reinforced by carbon and basalt fibers", *International Journal of Mechanical Sciences*, 148, 636-651, (2018).

Tanzi, M. C., Farè, S. and Candiani, G., *Foundations of biomaterials engineering*. Academic Press, (2019).

Tohidi, S. D., Rocha, A. M., Engesser, B., Dencheva, N. V. and Denchev, Z. "Micromechanical finite element parametric study of polyamide 6 based single polymer composites reinforced by woven textile structures", *Composite Structures*, 225, (2019).

Tong, L., Mouritz, A. P. and Bannister, M. K., *3D fibre reinforced polymer composites*, Elsevier, (2002).

URL_1 A guide to the principles and practical application of vacuum bagging for laminating composite materials with WEST SYSTEM® Epoxy 820 [online] (20 Aralık 2020) (2010).

Valença, S. L., Griza, S., de Oliveira, V. G., Sussuchi, E. M. and de Cunha, F. G. C., "Evaluation of the mechanical behavior of epoxy composite reinforced

with Kevlar plain fabric and glass/Kevlar hybrid fabric", *Composites Part B: Engineering*, 70, 1-8, (2015).

Vallittu, P. K., "High-aspect ratio fillers: fiber-reinforced composites and their anisotropic properties, *Dental materials*, 31(1), 1-7, (2015).

Varshney, R. K., Kothari, V. K. and Dhamija, S. "A study on thermophysiological comfort properties of fabrics in relation to constituent fibre fineness and cross-sectional shapes", *The Journal of The Textile Institute*, 101(6), 495-505, (2010).

Verma, D., Joshi, G., Dabral, R. and Lakhera, A., "Processing and evaluation of mechanical properties of epoxy-filled E-glass fiber–fly ash hybrid composites" (eds: M. Jawaid, M. Thariq and N. Saba), *Mechanical and Physical Testing of Biocomposites, Fibre-Reinforced Composites and Hybrid Composites*, Woodhead Publishing, (2019).

Verpoest, I. and Dendauw, J., "Mechanical properties of knitted glass fibre/epoxy resin laminates" *Proc. 37th International SAMPE Symposium and Exhibition*, 37, 369-377, (1992).

Verpoest, I., Gommers, B., Huysmans, G., Ivens, J., Luo, Y., Pandita, S. and Philips, D. "The potential of knitted fabrics as a reinforcement for composites", *Proceedings of ICCM-11*, Australia, 108-133, (1997).

Vinson, J. R. and Sierakowski, R. L., *The behavior of structures composed of composite materials*, Springer, 105, (2006).

Wagih, A., Sebaey, T. A., Yudhanto, A. and Lubineau, G., "Post-impact flexural behavior of carbon-aramid/epoxy hybrid composites", *Composite Structures*, 239, (2020).

Wang, F. "Carbon fibers and their thermal transporting properties" *Thermal transport in carbon-based nanomaterials*, 135-184, Elsevier, (2017).

Wang, R. M., Zheng, S. R. and Zheng, Y. G., *Polymer matrix composites and technology*, Elsevier, (2011).

Wu, W. L., Kotaki, M., Fujita, A., Hamada, H., Inoda, M. and Maekawa, Z. I., "Mechanical properties of warp-knitted, fabric-reinforced composites", *Journal of reinforced plastics and composites*, 12(10), 1096-1110, (1993).

Yilbas, B., S., *The Laser Cutting Process*, Elsevier, 205-297, (2018).

Zhang, J., Chaisombat, K., He, S. and Wang, C. H., "Hybrid composite laminates reinforced with glass/carbon woven fabrics for lightweight load bearing structures", *Materials & Design*, 36, 75-80, (2012).