

**KARBON DOKUMA KUMAŞ TAKVİYELİ KOMPOZİT
MALZEMELERİN FİZİKSEL ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ**

Erdal GÜLCAN



T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KARBON DOKUMA KUMAŞ TAKVİYELİ KOMPOZİT MALZEMELERİN
FİZİKSEL ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Erdal GÜLCAN

Orcid ID: 0000-0002-9637-2487

Prof. Dr. Aslı HOCKENBERGER

Orcid ID: 0000-0001-5186-9716

(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
TEKSTİL MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2019

TEZ ONAYI

Erdal GÜLCAN tarafından hazırlanan “KARBON DOKUMA KUMAŞ TAKVİYELİ KOMPOZİT MALZEMELERİN FİZİKSEL ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tekstil Mühendisliği Anabilim Dalı’nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. Aslı HOCKENBERGER

Başkan : Prof. Dr. Aslı HOCKENBERGER
Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi,
Tekstil Mühendisliği Anabilim Dalı
Orcid ID: 0000-0001-5186-9716

İmza

Üye : Prof. Dr. Murat YAZICI
Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi,
Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı
Orcid ID: 0000-0002-8720-7594

İmza

Üye : Prof. Dr. Hasan Basri KOÇER
Bursa Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa
Bilimleri Fakültesi,
Lif ve Polimer Mühendisliği Anabilim Dalı
Orcid ID: 0000-0003-2612-6712

İmza

Yukarıdaki sonucu onaylarım

Prof. Dr. Hüseyin Aksel EREN
Enstitü Müdürü

22.10.2024

U.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

16/09/2019

Erdal GÜLCAN

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

KARBON DOKUMA KUMAŞ TAKVİYELİ KOMPOZİT MALZEMELERİN FİZİKSEL ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Erdal GÜLCAN

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Tekstil Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Aslı HOCKENBERGER

Son yıllarda geliştirilen yeni üretim metotları ile kompozit malzemelerin kullanım alanları giderek artmaktadır. Karbon elyafların kompozit malzemelerde takviye elemanı olarak kullanımı ise yeni üretim metotları ile birlikte hızla yaygınlaşmaktadır. Kompozit malzemelerde kullanılan takviye elemanı, yapının mekanik ve dinamik özelliklerini belirleyen ana etmendir. Karbon dokuma kumaşların takviye elemanı olarak kullanıldığı bu deneysel çalışmada, karbon takviyeli kompozit malzemelerin üretimi ve fiziksel özelliklerinin incelenmesi hedeflenmiştir.

Bu çalışmada; farklı gramajlarda ve farklı örgü tiplerinde olan %100 karbon dokuma kumaşlar kullanılarak VARTM (Vakum Destekli Reçine Transfer Kalıplama) yöntemi ile tek ve çift katlı kompozit plakaların üretimi gerçekleştirilmiştir. Bu numuneler Dimi-Dimi, Bez ayağı-Bez ayağı ve Dimi-Bez ayağı hibrit olacak şekilde oluşturulmuştur. Üretilen kompozit levhalara ilgili ASTM standartlarına göre üç nokta eğilme, çekme ve çentik darbe testleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar ile örgü tipi ve kumaş gramajına bağlı olarak kompozit yapının fiziksel özelliklerinde meydana gelen değişimler incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Karbon dokuma kumaş, kompozit, darbe, çekme, üç nokta eğilme, VARTM

2019, vii + 50 sayfa.

ABSTRACT

MSc Thesis

EXAMINATION OF COMPOSITE PROPERTIES OF CARBON FABRIC REINFORCED STRUCTURES

Erdal GÜLCAN

Bursa Uludağ University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Textile Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Ashi HOCKENBERGER

With new production methods developed in recent years, the usage areas of composite materials are increasing. The use of carbon fibers as reinforcement elements in composite materials is rapidly spreading with new production methods. The reinforcement is used in composite materials. In this experimental study, where carbon woven fabrics are used as reinforcements, it is aimed to examine the production and physical properties of carbon reinforced composite materials.

In this study; Production of single and double-layer composite plates was carried out with VARTM (Vacuum Assisted Resin Transfer Moulding) method using 100% carbon woven fabrics in different weights and different weave types. These samples are made to be a twill-twill, plain-plain and twill-plain hybrid. Three point bending, tensile and notch impact tests were performed according to the relevant ASTM standards for the composite sheets produced. With the results obtained, the changes in the physical properties of the composite structure depending on the knitting type and fabric weight were examined.

Key words: Carbon woven fabric, composite, tensile, notch impact, three point bending, VARTM
2015, vii + 50 pages.

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimime başlamam için beni teşvik eden ve tez çalışmalarımın her aşamasında bilgi, deneyim ve yönlendirmeleriyle bana desteğini esirgemeyen danışman hocam Prof. Dr. Aslı HOCKENBERGER' e teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez çalışmasının konusu, uzun yıllardır çalışmanı olmaktan kıvanç duyduğum İŞIKSOY TEKSTİL A.Ş.'nin teknik tekstiller alanında yapacağı yeni yatırım projelerine bilimsel bir temel oluşturması için özellikle seçilmiştir. Bu alanda yüksek lisans eğitimi almam için olanak tanıyan ve sağladıkları maddi manevi tüm destekler ile her zaman yanımda olan başta genel müdür Mustafa İŞIK olmak üzere İŞIKSOY TEKSTİL A.Ş. yönetim kuruluna teşekkürlerimi sunarım.

Karbon dokuma kumaşların tedarik edilmesinde sağladığı yardımlarından dolayı BlackSun Partners genel müdürü Dr. Adalberto HORAK'a teşekkürlerimi sunarım.

Kompozit plakaların üretiminde sağladığı imkân ve yardımlar için ES APARAT genel müdürü Ertuğrul DOĞAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Erdal GÜLCAN
16/09/2019

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ.....	v
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	vii
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Kompozit Malzeme Nedir?.....	1
1.2 Kompozit Yapımında Kullanılan En Yaygın Elyaf Türleri.....	3
1.2.1 Cam Elyaf.....	3
1.2.2 Aramid Elyaf.....	3
1.2.3 Karbon Elyaf.....	4
1.3 Tekstil Takviyeli Kompozit Malzeme Çeşitleri.....	7
1.4 Tekstil Takviyeli Kompozitlerin Yapım Teknikleri (Üretim Yöntemleri).....	7
1.4.1 El Yatırması Yöntemi.....	7
1.4.2 Püskürtme Yöntemi.....	8
1.4.3 Filament Sarma Yöntemi.....	9
1.4.4 Pultruzyon Yöntemi (Profil Çekme).....	10
1.4.5 Bant Serme yöntemi.....	11
1.4.6 Reçine Transfer Kalıplama Yöntemleri.....	12
2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	15
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	19
3.1 Malzeme.....	19
3.2 Yöntem.....	20
3.3 Kompozit Malzemelere Uygulanan Testler.....	26
3.3.1 Çekme Testi.....	27
3.3.2 Üç Nokta Eğilme Testi.....	28
3.3.3 Darbe Testi.....	29
4. BULGULAR (BULGULAR ve TARTIŞMA).....	31
4.1 Çekme Testi Sonuçları.....	31
4.2 Üç Nokta Eğilme Testi Sonuçları.....	40
4.3 İzod Çentikli Darbe Test Sonuçları.....	43
5. SONUÇ (TARTIŞMA ve SONUÇ).....	45
KAYNAKLAR.....	48
ÖZGEÇMİŞ.....	50

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
⁰ C	Santigrat
GPa	Giga Paskal
Pas	Paskal Saniye
cP	Centipoise
MPa	Mega Paskal

Kısaltmalar	Açıklama
RTM	Reçine Transfer Kalıplama
LRTM	Hafif Reçine Transfer Kalıplama
HP-RTM	Yüksek Basıncılı Reçine Transfer Kalıplama
VARTM	Vakum Destekli Reçine Transfer Kalıplama
PAN	Poliakrilonitril
UHM	Ultra Yüksek Modüllü Karbon Elyafı
HM	Yüksek Modüllü Karbon Elyafı
IM	Orta Modüllü Karbon Elyafı
HT	Yüksek Gerilime Dayanımlı Karbon Elyafı
HS	Yüksek Mukavemetli Karbon Elyafı
ATP	Otomatik Bant Yerleştirme Makinası

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 1.1. PAN'den karbon elyaf üretiminin şematik gösterimi	5
Şekil 1.2. El yatırması yöntemi ile kompozit üretimi	8
Şekil 1.3. Püskürtme yöntemi ile kompozit üretimi.....	9
Şekil 1.4. (a) Filament sarma yöntemi şematik gösterimi. (b) Filament sarma yöntemi ile basınçlı kap üretimi şematik gösterimi	10
Şekil 1.5. Profil çekme yönteminin şematik gösterimi	10
Şekil 1.6. a) Otomatik bant serme makinası, b) ATP ile serilmiş karbon bant şeritleri, c) pres ile şekillendirme sonrası elde edilen araç koltuğu arkası mamul kompozit malzeme	11
Şekil 1.7. VARTM metodu ile kompozit yapımının şematik gösterimi	14
Şekil 1.8. Çeşitli RTM proseslerinin şematik gösterimi	14
Şekil 3.1. İlk yapılan ön deneme çalışmasına ait resimler. a-b) el yatırması metoduna göre reçine uygulaması, c) vakum öncesi torbalama, d) vakum sonrası torbalama.....	22
Şekil 3.2. İkinci denemeye ait vakum öncesi vakum torbalama sistemi.....	23
Şekil 3.3. İkinci denemeye ait reçine uygulaması sonrası vakum torbalama sistemi	24
Şekil 3.4. Kompozit plakaların üretim aşamalarına ait resimler.....	26
Şekil 3.5. Çekme test cihazı	27
Şekil 3.6. Üç nokta eğilme test düzeneği	28
Şekil 3.7. Ceast Notchvis çentik açma cihazı	30
Şekil 3.8. Zwick darbe test cihazı	30
Şekil 4.1. Çekme testi öncesi deney numunesi, b) çekme testi sonrasında saçaklı kırılan kompozit numune, c) çekme testi sonrasında düz kırılan kompozit numune	33
Şekil 4.2. Üç nokta eğilme testinde maksimum eğim anında kırılmayan plaka.	42
Şekil 4.3. Üç nokta eğilme testi sonrasında kompozit malzemede meydana gelen hasar	43
Şekil 4.4. Izod çentikli darbe testi resimleri a) darbe öncesi deney numunesi, b) darbe sonrası deney numuneleri.....	44

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 1.1. Karbon elyafların sınıflandırılması.....	6
Çizelge 1.2. Kompozit malzemelerde en çok kullanılan elyafların genel özellikleri	6
Çizelge 3.1. Kompozit yapımında kullanılan karbon dokuma kumaşlar.....	19
Çizelge 3.2. Kompozit yapımında kullanılan epoksi reçine özellikleri.....	20
Çizelge 3.3. Kompozit yapımında kullanılan reçine sertleştirici özellikleri.....	20
Çizelge 3.4. Üretilen kompozit plakaların kumaş kombinasyonları.....	21
Çizelge 4.1. Kompozit plakalara uygulanan Çekme test sonuçları	31
Çizelge 4.2. Kompozit plakaların çekme testi, Elastik Modül (E_T) (MPa) grafiği.....	32
Çizelge 4.3. Kompozit plakaların çekme testi Çekme Mukavemeti (σ_M) grafiği	32
Çizelge 4.4. Kompozit plakaların kopma uzaması (ϵ_{TB}) grafiği.....	33
Çizelge 4.5. 1 No'lu plakaya (B2) ait gerilme-gerinim grafiği.....	34
Çizelge 4.6. 2 No'lu plakaya (D2) ait gerilme-gerinim grafiği	34
Çizelge 4.7. 3 No'lu plakaya (B6) ait gerilme-gerinim grafiği.....	35
Çizelge 4.8. 4 No'lu plakaya (D6) ait gerilme-gerinim grafiği	35
Çizelge 4.9. 5 No'lu plakaya (B2B2) ait gerilme-gerinim grafiği.....	36
Çizelge 4.10. 6 No'lu plakaya (D2D2) ait gerilme-gerinim grafiği	36
Çizelge 4.11. 7 No'lu plakaya (B2D2) ait gerilme-gerinim grafiği.....	37
Çizelge 4.12. 8 No'lu plakaya (B6D6) ait gerilme-gerinim grafiği.....	37
Çizelge 4.13. 9 No'lu plakaya (D6D6) ait gerilme-gerinim grafiği	38
Çizelge 4.14. 10 No'lu plakaya (B6D6) ait gerilme-gerinim grafiği.....	38
Çizelge 4.15. 11 No'lu plakaya (D2D6) ait gerilme-gerinim grafiği	39
Çizelge 4.16. 12 No'lu plakaya (B2B6) ait gerilme-gerinim grafiği.....	39
Çizelge 4.17. Kompozit plakalara uygulanan üç nokta eğilme testi sonuçları	40
Çizelge 4.18. Üç nokta eğilme testi gerilme modülü sonuçları	41
Çizelge 4.19. Üç nokta eğilme testi gerilme mukavemeti sonuçları.....	41
Çizelge 4.20. Üç nokta eğilme testi esneme uzaması grafiği	42
Çizelge 4.21. Izod çentik darbe testi sonuçları	43
Çizelge 4.22. Darbe testi kırılma enerjileri grafiği	44

1. GİRİŞ

1.1 Kompozit Malzeme Nedir?

İki veya daha fazla malzemenin, üstün özelliklerini bir araya toplamak ya da ortaya yeni bir özelliği çıkarmak için, mikro, mezo veya makro seviyede heterojen birleştirilmesi sonucu oluşturulan malzemelere Kompozit Malzeme denir (Park 2015).

Kompozit malzemeler farklı yapılarıdaki matris (reçine) ve takviye bileşenlerinden oluşurlar. Bu bileşenler birbirleri içinde çözünmezler veya karışmazlar. Kompozit malzemelerde takviye malzemeleri genellikle metaller, seramikler ve polimerlerdir. Takviye elamanlarının gömüldüğü ana malzemeye matris malzemesi denir. Kompozit malzemeleri oluşturmak için, metaller, seramikler ve polimerler gibi tekli malzemelerden çeşitli birleşimlerin oluşturulması ve değişik uygulama metotlarının bulunması ile modern malzeme sistemleri geliştirilmiş, malzeme bilimi ve mühendisliğinde sürdürülebilir gelişmeler elde edilmiştir (Chawla 2013).

Elyaf takviyeli kompozit malzemelerde takviye elamanları; sertlik, sağlamlık gibi yapısal özellikleri, matris ise yükün elyaf arasında dağılmasını sağlar. Matris, yükleri fiber ağı üzerinden transfer eden bir bağlayıcı olarak işlev görür. Lif yönelimini ve lifleri çevresel etkilerden korur, tek bir lif koptuğu zaman yükü, çevreleyen liflere yeniden dağıtır. Bir reçine türü belirlenirken göz önünde bulundurulması gereken önemli kriterler verim, son kullanıma bağlı nihai kuvvetler ve tokluk özellikleridir. Termal özellikler, işleme kolaylığı, maliyet, bulunabilirlik ve sağlık sorunları gibi diğer faktörler de büyük önem taşımaktadır (Chung 2010 ve Park 2015).

Kompozit malzemelerin geleneksel malzemelere kıyasla üstün özellikleri olarak;

- Düşük yoğunluk
- Yüksek gerilme dayanımı
- Yüksek sertlik
- Yüksek sıcaklıklarda yüksek gerilme dayanımı
- Yüksek korozyon direnci
- Yüksek yorulma direnci

- Düşük sürtünme katsayısı
- Yüksek kimyasal aşınma dayanımı

verilebilir. Ayrıca esnek tek parça üretilebilmeleri, estetik görünümleri ve ürün biçiminin belirlenmesi açısından sağladıkları geniş olanaklar nedeniyle endüstriyel ürünlerde giderek yaygınlaşan bir kullanım alanı oluşmaktadır. Kompozit kullanımının diğer bir avantajı ise anizotropik özelliği sayesinde katmanların dayanım özelliklerinin ayarlanabilmesidir. (Chung 2010)

Kompozit malzemeler kullanılan reçine türüne bağlı olarak termoset ve termoplastik olmak üzere ikiye ayrılırlar. Termoset reçineler, polimerik zincirlerin çapraz bağlanmasını içeren bir sertleştirme reaksiyonuna girerler bu nedenle ısı art işlemlerle yeniden işlenemezler. Termoplastik reçineler ise ısı ve basınç uygulaması altında akan polimerlerdir, yani ısıtıldıklarında yumuşarlar, oda sıcaklığına tekrar soğutulduklarında yeniden sertleşirler. Termoplastiklerin, termosetlere göre farklı davranışları, moleküler yapı ve şekillerinden, moleküler boyut veya bağ miktarından kaynaklanmaktadır (Chawla 2013).

Termoset polimerler, iyi mekanik ve termal özelliklerinden, donatıya iyi bağlanma, düşük maliyet, düşük viskozite ve işlem kolaylığından dolayı yapısal kompozit uygulamalarda matrisler olarak baskındır. Termoplastiklere ilgi, tokluk, potansiyel işlem avantajları, geri dönüştürülebilirlik ve düşük uçucu emisyonlar gibi avantajlarından dolayı artmaktadır.

Kompozit malzemelerde matris olarak kullanılan en yaygın termoset reçineler, doymamış poliesterler, poliimidler, epoksiler ve vinil esterlerdir. Bu reçineler, RTM gibi sıvı işleme teknikleri için iyi işlenebilirlik sunarlar (Chawla 2013).

Tekstil takviyeli kompozitler özellikle ikinci dünya savaşından sonra yaygın olarak mühendislik uygulamalarında kullanılmaya başlanmıştır. Günümüzde bu yapıdaki kompozitlerin uçaklar, insansız hava araçları, uzay gemileri, uydular, savunma sanayi, ev aletleri ve iş ekipmanları, yüksek kalitede spor malzemeleri, alt yapı sistemleri, basınçlı kaplar, kimyasal işlem donanımları, inşaat sektörü, gıda sektörü, korozyona

dayanıklı ürünler, denizcilik sektörü, tıbbi protez ekipmanları ve otomotiv sektörü gibi çok çeşitli alanlarda kullanımı oldukça artmıştır.

1.2 Kompozit Yapımında Kullanılan En Yaygın Elyaf Türleri

Kompozit malzemelerde takviye elamanı olarak kullanılan en yaygın lifler cam, aramid ve karbondur. Cam elyaf polimer matrisli kompozit yapılarda kullanılan en yaygın takviye elamanı olmuştur. 1960'lardan itibaren ticari olarak piyasaya sürülen aramid lifi, cam lifinden çok daha sert ve hafiftir. Kevlar, Du Pont firmasına ait aramid lifinin ticari markası iken Twaron ise Teijin Aramid tarafından yapılan aramid lifinin ticari ismidir. Yüksek sertliği, yüksek performansla birleştiren bir diğer lif çeşidi ise karbondur. Bu liflerin tamamı yirminci yüzyılın ikinci yarısında geliştirilmiştir. On dokuzuncu yüzyılın sonlarında Thomas Edison, pamuk elyafındaki selülozu karbon elyafa dönüştürerek akkor lambalarda kullanmaya başlamıştır fakat modern zamanlarda yüksek modüllü karbon elyafını Japonya'da Shindo'nun (1961) PAN'den başlayarak ürettiği söylenmektedir (Chawla 2013). Bu liflerin takviye elamanı olarak kullanım amacı ise üretilecek kompozit parçanın dayanımını artırmaktır.

1.2.1 Cam Elyaf

Tekstil takviyeli kompozit malzemelerde genel olarak kullanımı en yaygın olan elyaflar cam elyaflardır. Cam elyafların çekme mukavemeti ve özgül mukavemeti oldukça yüksektir ve diğer liflere nazaran maliyeti daha düşüktür. Cam elyafları çoğunlukla silikat (SiO_2) bazlı olup muhteviyatında kalsiyum, sodyum, alüminyum, bor ve demir oksitleri bulunmaktadır. İçerdiği kimyasal bileşimlere göre cam elyaflar E camı, C camı, S camı gibi değişik isimlerle ifade edilirler. E camı iyi bir elektrik yalıtkanıdır, C camı kimyasal korozyona karşı diğer cam tiplerine göre daha fazla direnç gösterirken, S camının ise daha yüksek sıcaklıklara dayanımını sağlayan silikat içeriği fazladır. Kompozit malzemelerin yapımında takviye elemanı olarak genellikle E camı tercih edilmektedir.

1.2.2 Aramid Elyaf

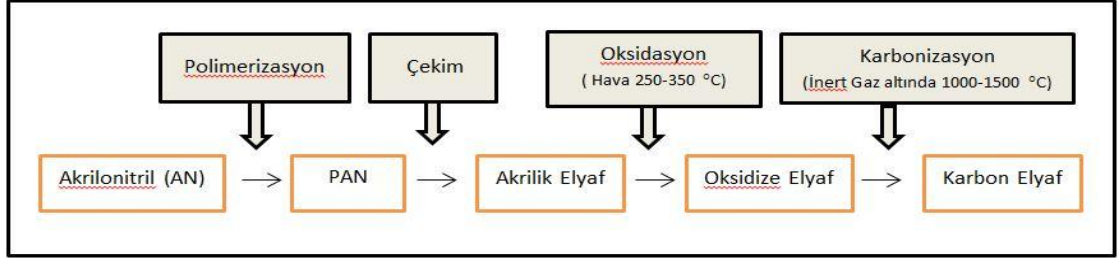
Amid bağlantılarının en az % 85'i doğrudan iki aromatik halkaya bağlı olan uzun zincirli aromatik poliamid lifleri genel olarak aramid lifleri olarak tanımlanmaktadır.

Aramid liflerinin anizotropik yapılarından dolayı lif eksenine boyunca çok iyi mekanik özellikler elde edilirken, lif eksenine dik doğrultuda lifin oldukça kolay bir şekilde büküldüğü görülmektedir. Aramid lifleri iyi titreşim sönümlenme özelliklerine sahiptir. Aramid liflerinin piyasada bilinen en yaygın iki türü Kevlar 49 ve Kevlar 29'dur. Kevlar 29 liflerinin modülü, Kevlar 49'un yarısı kadar olduğu halde gerilme dayanımı iki kat fazla olmasından dolayı küçük silahlara karşı korunmak için balistik yelek yapımına uygundur. Bütün bu özelliklerinin yanı sıra aramid liflerinin bazı dezavantajları bulunmaktadır. Ultraviyole ışığına maruz kaldığında, aramid liflerinin mekanik özellikleri zayıflayarak zamanla kaybolmaktadır. Aramid lifleri basınç altında zayıf özellikler gösterdiklerinden dolayı sıkıştırma kuvvetleri içeren uygulamalar için uygun değildir.

1.2.3 Karbon Elyaf

Karbon elyaflar, yüksek mukavemetli malzemelerin yeni bir cinsidir. Karbon elyaflar, ağırlıkça en az %90 oranında karbon içeren elyaflardır. Edison'un elektrik lambalarında kullanılmak üzere karbon filamentlerin üretim süreci için patent aldığı 1879'dan yaklaşık 80 yıl sonra ticari olarak piyasaya sürülen ve çoğunlukla PAN, zift ve rayonun kontrollü bir şekilde ısıtma ve germe işlemleriyle pirolizi sonucu sentezlenmeye başlanan karbon elyaflar endüstride büyük önem kazanmıştır.

Karbon elyafların üretimi için uygun fiberler, ilk olarak oksijenli ortamda 200-400 °C sıcaklık aralığında gerilerek oksidasyon işlemi yapılmakta, ardından 800-1.600 °C aralığında oksijensiz ortamda lif içeriğinde bulunan hidrojen, oksijen, azot ve diğer karbon dışı elementler lif yapısından uzaklaştırılarak lifin karbonizasyonu gerçekleştirilmektedir. Karbon fiberlerin belli bir kristallik derecesine ulaşması için, karbonizasyon işleminden sonra, sıcaklık artırılarak 2.300-3.000 °C gibi daha yüksek bir sıcaklıkta ısıl işlem olan grafitizasyon yapılabilmektedir. PAN'den, tipik olarak karbon elyaf elde edilmesini gösteren basitleştirilmiş proses şeması Şekil 1'de verilmiştir. Elde edilen karbon fiberlerin sahip olduğu üstün fiziksel özellikleri; kristal dağılımlarını, karbon içeriklerini ve moleküler yönelimlerini belirleyen karbonizasyon derecesine bağlıdır (Chawla 2013 ve Park 2015).



Şekil 1.1. PAN'den karbon elyaf üretiminin şematik gösterimi

Ticari olarak üretimine başlandığı 1960'lı yıllarda, havacılık endüstrisinin, özellikle de askeri uçaklar için daha iyi ve hafif malzeme ihtiyacını karşılamak üzere kullanılan karbon elyaflar, günümüzde genel mühendislik, sivil havacılık, otomotiv sektörü, kimya endüstrisi, savunma sanayi, nükleer enerji, inşaat, spor, denizcilik ve ulaştırma pazarlarında geniş uygulamalar bulmaktadır.

Karbon elyaflar, kompozit malzemelerde yüksek mukavemet ve sertlik gibi çeşitli doğal özellikleri nedeniyle çok önemli bir rol oynamaktadır. Boyutsal kararlılık, düşük termal genişleme katsayısı, yüksek iletkenlik, biyolojik uyumluluk, yüksek yorulma direnci, düşük yoğunluk, yüksek sıcaklık dayanımı, kimyasal inertlik gibi üstün fiziksel ve kimyasal özellikleri ile karbon elyaflar, yüksek sönümlenmenin önemli olduğu uygulamalar, adsorbanlar, moleküler elekler, elektrotlar dahil bir çok kompozit malzemenin üretiminde takviye elamanı olarak kullanılmaktadırlar (Chawla 2013 ve Park 2015).

Karbon elyaflar, polimer ve seramik matrislerin iletken olmayan doğasının aksine, elektriksel ve termal olarak iletken olduklarından sadece bir takviye elamanı olarak değil, aynı zamanda elektriksel veya termal iletkenliği arttırmak için bir katkı maddesi olarak da işlev görmektedir. Yüksek termal iletkenlik ve düşük termal genişleme kombinasyonu, uzay yapılarında kullanılan elektronik ünitelerin ısı alıcıları ve boyutsal kararlılık gerektiren uygulamaları için faydalı olmaktadır (Chawla 2013 ve Park 2015).

Karbon elyafların en büyük dezavantajları yüksek maliyetidir. Bununla birlikte lif ekseninde boyunca karbon liflerinin modül, dayanım, elektrik iletkenliği ve termal iletkenliği yüksek olmasına rağmen, enine doğru lif özelliklerinin, aksenel olanlardan daha düşük olduğu bilinmektedir (Chawla 2013 ve Park 2015).

Karbon elyaflar, lif yapısına ve kristal oryantasyon derecesine göre Çizelge 1'deki gibi genel olarak ultra yüksek modüllü (UHM), yüksek modüllü (HM), orta modüllü (IM), yüksek gerilme dayanımlı (HT) ve izotropik karbon lifleri olmak üzere sınıflandırılmaktadır. Bu sınıflandırmada; UHM ve HM karbon elyafları yüksek oranda grafitlenmiş ve yüksek bir modül ile karakterize edilen elyaflardır. HM karbon elyafları, 300 GPa'dan daha büyük bir modül ile karakterize edilirken, UHM karbon elyafları, 500 GPa'dan daha büyük bir modül ve % 1'den daha az bir kuvvet-modül oranı ile karakterize edilmektedir. IM Karbon elyafları, 300 GPa'ya kadar bir modül, HT karbon elyafı, 3 GPa'dan daha büyük modüllüdür (Park 2015).

Çizelge 1.1. Karbon elyafların sınıflandırılması

Karbon Elyaf Tipi	Isıl İşlem Sıcaklığı (°C)	Kristal Oryantasyonu	Uzun Mesafe Durumu	Sınıfı
Tip 1 Yüksek Modül	>2000	Genellikle lif eksenine paralel	Çok	UHM
				HM
Tip 2 Yüksek Gerilim	~1500	Genellikle lif eksenine paralel	Az	UM
				HT
Tip 3 İzotropik	<1000	Rastgele	Çok az	İzotropik

Kompozit malzemelerde en çok kullanılan elyaf türleri olan cam, aramid ve karbon elyafların genel özellikleri Çizelge 1.2'de verilmiştir. (Chawla 2013)

Çizelge 1.2. Kompozit malzemelerde en çok kullanılan elyafların genel özellikleri

Karakteristik Özellik	HM Karbon Elyaf	HS Karbon Elyaf	Aramid Elyaf (Kevlar49)	Cam Elyaf (E camı)
Çap (µm)	7-10	7.6-8.6	12	8-14
Yoğunluk (g/cm ³)	1.95	1.75	1.45	2.55
Young's Modülü (GPa) Lif eksenine doğrultusunda	390	250	125	70
Gerilme Direnci (GPa)	2,2	2.7	2.8-3.5	1.5-2.5
Kopma Uzaması(%)	0.5	1.0	2.2-2.8	1.8-3.2
Elektiriksel Uzama Katsayısı (10 ⁻⁶ K ⁻¹) Lif eksenine doğrultusunda	-0.5-0.1	0.1-0.5	-2-5	4.7

1.3 Tekstil Takviyeli Kompozit Malzeme Çeşitleri

Kompozit malzemelerde kullanılan tekstil takviye elemanlarının tamamı genel anlamda elyaf olarak adlandırılmasına rağmen bu takviye elemanlarının hepsi gerçekte elyaf formunda değildir. Kompozitlerde kullanılan takviye elemanları, çok çeşitli proseslere ve son ürün gereksinimlerine uygun olacak şekilde öğütülmüş elyaf, fitil, kesikli kısa lifler, sürekli uzun filamentler, şerit bantlar, dokusuz yüzeyler veya dokuma kumaş formunda olabilirler. Takviye elemanları ürün gereksinimlerine ve üretim sürecine bağlı olarak önceden şekillendirilebilirler. Kullanılacak takviye elemanın formu, kompozit malzemenin üretim yöntemi ve uygulanacak reçine ile uyumlu olmalıdır (Park 2015). Kompozit malzeme de kullanılan takviye elemanı ister iplik, ister dokuma kumaş formunda olsun sadece kullanılan elyaf türünün adıyla anılır. Örneğin karbon şerit bantların kullanıldığı ya da karbon dokuma kumaşların takviye elemanı olarak kullanıldığı her iki kompozit malzemeye de karbon elyaf takviyeli kompozit malzeme denmektedir.

Bu çalışmada, atkısı ve çözgüsü karbon filament ipliklerden oluşan, % 100 karbon dokuma kumaşlar tekstil takviye elemanı olarak kullanılmış ve nihayetinde karbon elyaf katkılı kompozit malzemeler üretilmiştir.

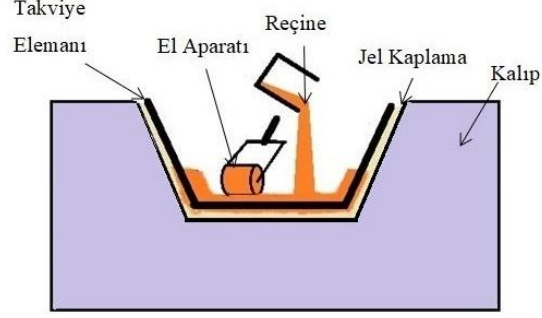
1.4 Tekstil Takviyeli Kompozitlerin Yapım Teknikleri (Üretim Yöntemleri)

Kompozit malzemeleri imal etmek için kullanılan çoğu yöntem; elyafın kompozit yapımında takviye elemanı olarak kullanılmasından kaynaklanan teknik zorlukları aşmak için özel olarak geliştirilmiştir. Bu nedenle belirli bir parça için bir üretim yönteminin seçimi, kullanılacak olan elyaf cinsine, parça tasarımına ve son kullanım alanına bağlıdır. Elyaf takviyeli kompozitlerin üretiminde kullanılan en yaygın yöntemler el yatırması, püskürtme, filament sarma, pultrüzyon (profil çekme), bant serme ve reçine transfer kalıplamadır.

1.4.1 El Yatırması Yöntemi

Termoset kompozitler için en temel imalat yöntemi el yatırması yöntemidir. Bu yöntemde takviye elemanı olarak kullanılacak olan kumaşlar kuru ya da yaş olabilirler. Yöntemin esası, tipik olarak kuru kumaşların önceden hazırlanmış bir kalıba katmanlar

halinde serilmesi ve döşeme tamamlandıktan sonra kuru katlara bir el aparatı vasıtasıyla reçine uygulanmasıdır. Islak döşeme olarak bilinen diğer varyasyonda ise, her kumaş katı ilk olarak reçine ile kaplanır ve hazırlanan kalıba yerleştirildikten sonra sıkıştırılır. El yatırması yöntemine ait şematik gösterim Şekil 1.2’de verilmiştir.

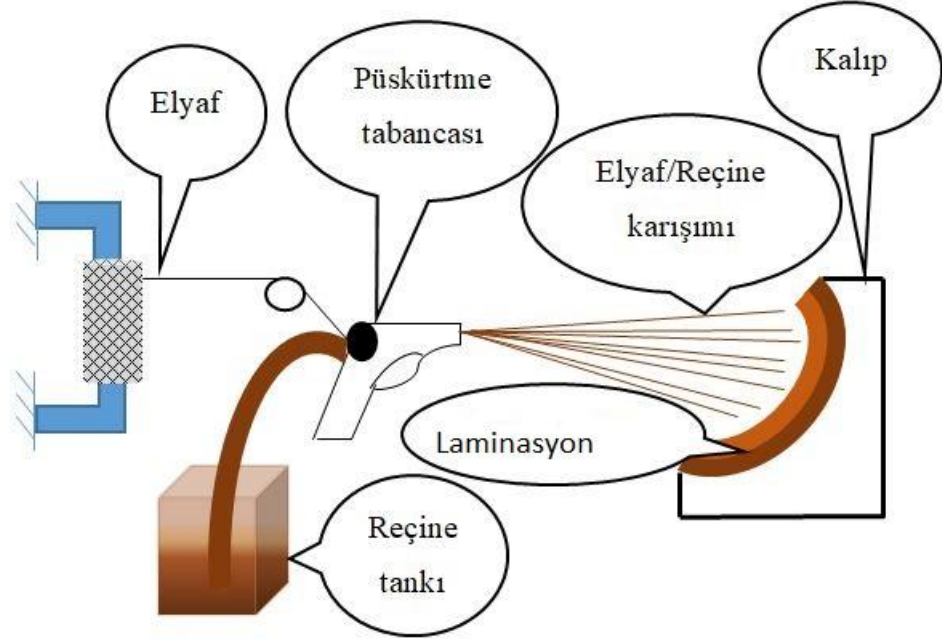


Şekil 1.2. El yatırması yöntemi ile kompozit üretimi

1.4.2 Püskürtme Yöntemi

Püskürtme yöntemi tek taraflı kalıplarda açık temasla kompozit ürünler yapmak için düşük maliyetli, yaygın bir işlemdir. Tipik olarak tekne gövdeleri ve platformları, kamyon kabinleri ve çamurlukları, kaplıcalar, küvetler, duş kabinleri ve karmaşık olmayan şekiller için uygundur.

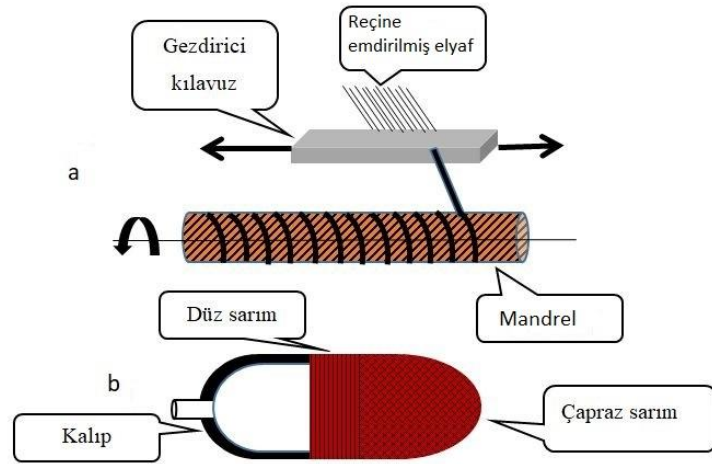
Bir püskürtme uygulamasında, kalıp önce kalıp ayırma yağı ile muamele edilir. Ayırma yağı yerine kalıbın önceden bir jel ile kaplanarak kullanılması da mümkündür. Jel, ilk olarak kalıba püskürtülür, daha sonra kürlenir ve kalıp imalat için başlamaya hazır hale getirilir. Püskürtme işleminde, sürekli elyafı kısa uzunluklarda kesen bir kıyıcı tabanca kullanılarak reçine ve kesik elyaf yağlanmış ya da jel ile kaplanmış kalıba püskürtülür. Püskürtme işleminin son adımlarında, yüzey silindirik el aparatı ile sıkıştırılır. Parça daha sonra sertleştirilir, soğutulur ve yeniden kullanılabilir kalıptan ¼ıkarılır. Püskürtme yöntemine ait şematik gösterim Şekil 1.3’de verilmiştir. (Park 2015).



Şekil 1.3. Püskürtme yöntemi ile kompozit üretimi

1.4.3 Filament Sarma Yöntemi

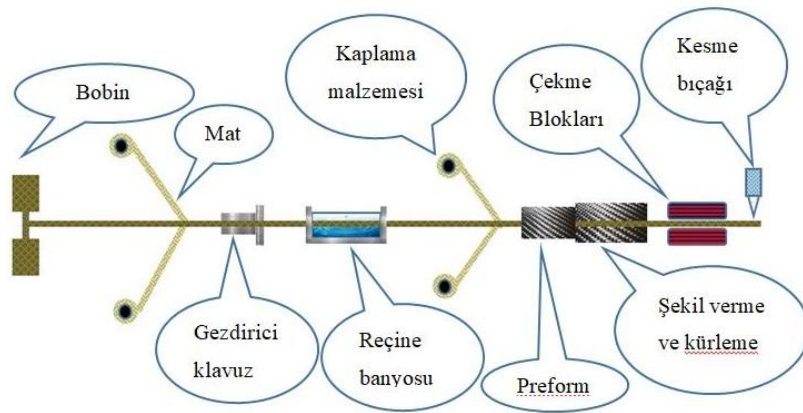
Filament sarma yöntemi, dönen veya sabit bir mandrel üzerine, filament ipliklerin ya da şerit bantların reçine banyosundan geçirildikten sonra sarıldığı çok yönlü bir tekniktir. Sarılacak olan filamentler, mandrel üzerine sarmal biçimde döşenmektedir. Üretilecek olan parçanın şekline bağlı olarak istenilen kalınlığa ulaşıncaya kadar sabit veya değişken helis açıları ile sarım yapılır, reçinenin sertleşmesi için yüksek sıcaklıkta kürlenir ve ardından mandrel çıkarılır. Genel bir filament sarma işlemi Şekil 1.4’de verilmiştir. Bu yöntem çok yüksek basınçlara dayanabilen çap genişliği yüksek borular, kimyasal tankerler, basınçlı hava tankları gibi çeşitli ürünlerin üretimi için idealdir.



Şekil 1.4. (a) Filament sarma yöntemi şematik gösterimi. (b) Filament sarma yöntemi ile basınçlı kap üretimi şematik gösterimi

1.4.4 Pultruzyon Yöntemi (Profil Çekme)

Profil çekme yöntemi esasen, aksnel olarak yönlendirilmiş elyaflara sahip kompozitlerin, kesintisiz filament ipliklerine, enine doğrultuda mukavemet sağlamaktadır. Cağlık üzerinden beslenen filament iplikler, katalizör içeren reçine banyosundan geçirilir ve bunlara mat veya çift eksenli kumaş eklenebilir. Reçine emdirilmiş filamentler kalıpta sertleştirilir ve kompozit dışarı çekilir. Hattın sonunda parça, bir testere ile sabit bir uzunlukta kesilir. Profil çekme işlemi, sürekli bir kalıplama olduğundan elyaf dağılımının sabit olmasına ve bükülmelere çok dikkat edilmesi gerekmektedir. Şekil 1.5’de bu sürecin bir şeması gösterilmiştir.



Şekil 1.5. Profil çekme yönteminin şematik gösterimi

1.4.5 Bant Serme yöntemi

Yüksek performanslı ipliklerden elde edilmiş şerit bantlar, otomatik bant yerleştirme makinası (ATP) ile düz zemin üzerine yatırılmış kağıt üzerine serilirler. Bilgisayar destekli tasarım (CAD) kullanan ATP, bant şeritlerini yan yana, istenilen uzunluklarda ve farklı eksenlerde yerleştirir. Bu otomatik bant döşeme makineleri, önceden yönlendirilmiş 75, 150 veya 300 mm genişliğindeki şerit bantları tasarıma uygun şekilde üst üste sererek, kat kat yüzey oluşumunu tamamlarlar. Kağıt üzerine serilmiş şerit bantlar daha sonra pres ile basınç altında sıkıştırılarak birleştirilir ve plaka haline getirilir, kağıt plakadan ayrılarak kompozit parçanın yapımı tamamlanır. Çoğunlukla termoplastik bantların kullanıldığı proseste nadirde olsa termoset bantların kullanılması mümkündür. Bu yöntem yatay düzlemler, motor kaportaları, uçak kuyruk kaplamaları ve gövde kaplamaları gibi çeşitli kompozit ürünlerin üretilmesi için pratiktir.



Şekil 1.6. a) Otomatik bant serme makinası, b) ATP ile serilmiş karbon bant şeritleri, c) pres ile şekillendirme sonrası elde edilen araç koltuğu arkası mamul kompozit malzeme

1.4.6 Reçine Transfer Kalıplama Yöntemleri

Gün geçtikçe üretim hızlarının artmasına olan talep, endüstriyi el üretiminin yerini alternatif üretim süreçleriyle değiştirmeye zorlamakta ve imalatçıları bu süreçleri olabildiğince otomatik hale getirmeye teşvik etmektedir. Bu amaçla çeşitli reçine transfer kalıplama metotları geliştirilmiştir. İsimleri farklı olsa da geliştirilen tüm metotların temeli hazırlanmış kalıp içerisinde takviye malzemesine basınç altında reçine emdirilmesidir. Bu metotlardan en yaygın olanları aşağıda açıklanmıştır.

Sıvı kalıplama olarak da adlandırılan reçine transfer kalıplama (RTM), oldukça basit, düşük basınçlı, kapalı kalıplama işlemidir. Metal veya kompozit malzemedan yapılmış uyumlu iki parçalı kalıbın her yüzeyi önce kalıp ayırıcı vaks ile muamele edilir ve kalıbın içerisine elyaf yerleştirilerek kalıp kapatılır. Reçine ile katalizör ölçülür ve dağıtma ekipmanında karıştırılır. Daha sonra enjeksiyon girişinden, kalıp boyunca önceden tasarlanmış yolları izleyerek düşük ila orta basınç altında kalıba pompalanır. RTM uygulamalarında, reçinenin kürleşmesinin başlamasından önce, elyafa hızlı ve iyice nüfuz etmesini sağlamak için son derece düşük viskoziteli reçine kullanılır. Polimer viskozitesi, liflerin kolayca ıslanabilmesi için yeterince düşük (<1 Pas) olmalıdır. Reçineye yüzey iyileştirici, alev geciktirici, hava koşullarına dayanıklılığı artıcı, sertleşme arttırıcı gibi çeşitli katkı maddeleri ilave edilebilir. Termoplastik reçinelerin, çok yüksek erime noktaları ve yüksek viskozitelerinden (>1 Pas veya 1,000 cP) dolayı RTM uygulamalarında kullanımı uygun olmadığından, termoset reçineler ile çalışmak uygundur. Hem kalıp, hem de reçine belirli uygulamalar için gerektiğinde önceden ısıtılabilir. Çoğu RTM uygulamasında reçine ve sertleştirici içeren iki parçalı epoksi reçine formülasyonu kalıba enjekte edilmeden hemen önce karıştırılır ve kürleşmeden enjekte edilir. Reçinenin kalıp içerisinde sertleşmesine ve katı bir kompozit oluşturmasına izin verilir. Kürleşme oda sıcaklığında gerçekleştiğinden otoklav kullanımına gerek duyulmaz.

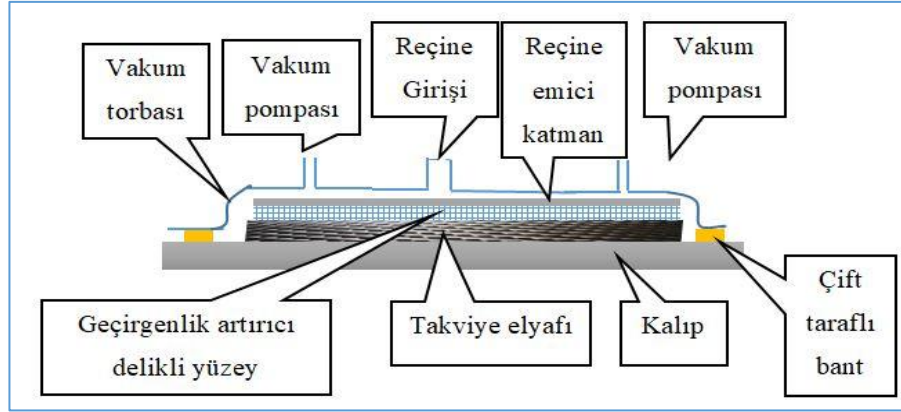
Genel olarak, RTM'de üretim sonrası art işlem gerektirmeyen, doğrudan kullanıma uygun, net şekle sahip parçalar üretebilir. Aynı zamanda, düzlemsel bir parça yerine iyi yüzey ayrıntısına sahip, boyutsal olarak hassas, üç boyutlu karmaşık parçalar üretmek

mümkündür. İşlem kapalı bir kalıp içerisinde gerçekleştiğinden el yatırması veya püskürtme tekniklerine kıyasla çok daha az emisyon üretir.

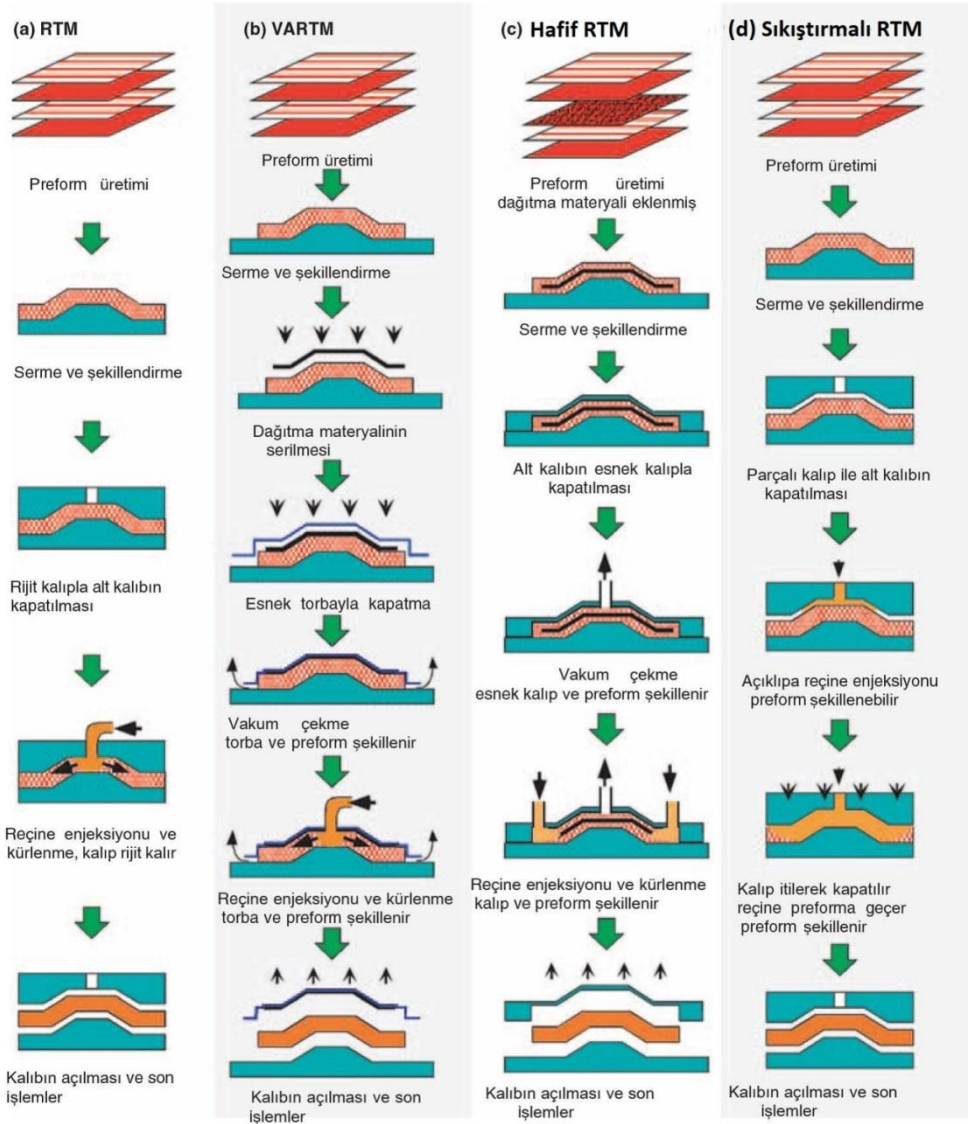
Hafif RTM (LRTM), uygulama alanı giderek artan bir RTM çeşididir. LRTM'de, RTM'e göre temel fark üst kalıp yerine çelik çerçeve ile güçlendirilmiş yarı saydam kompozit kabuk kullanılmasıdır. Bu sayede kalıp hazırlama süresi kısaltılabilir. Kalıp kapatıldıktan sonra atmosfer basıncında reçine kalıba enjekte edilir.

Yüksek basınçlı RTM (HP-RTM) olarak adlandırılan RTM'nin bir çeşidi, hızlı bir şekilde otomotiv parçaları üretme potansiyeline sahiptir. Tamamen otomatik bir sistemde tasarlanan HP-RTM elyaf, kapalı bir kalıp, pres ve reçine enjeksiyon sistemi içerir. Kalıp içerisine yerleştirilen elyafa reçine transferi gerçekleştirilirken aynı anda kalıp, pres altında sıkıştırılarak parça imalatı yapılır.

Vakum destekli reçine transfer kalıplaması (VARTM), hızlı büyüyen bir kalıplama teknolojisini temsil etmektedir. VARTM işleminde, kalıbın bir tarafı serttir ve kalıbın ikinci tarafı ise genellikle bir vakum torbasıdır. VARTM işlemi sırasında vakum pompası vasıtasıyla kalıp içerisindeki hava dışarı çekilir ve vakum torbası ile takviye malzemesi sıkıştırılır. Enjeksiyon atmosferik basınç tarafından yönlendirildiğinden, reçineyi elyaf yüzeyi üzerine dağıtan oldukça geçirgen bir tabaka olan dağıtma materyalinin kullanılması gereklidir. Bu da reçinenin elyaf boşluklarının içinden akmasına neden olur. VARTM tipi işlemler ve RTM arasındaki belirgin fark, VARTM'de, reçinenin, basınç altında pompalanmak yerine sadece bir vakum kullanımı yoluyla elyaf yüzeyine nüfuz ettirilmesidir. Kürleşme işleminden sonra vakum torbası, dağıtma materyali, borular vb. yardımcı elemanların kompozit malzemedan ayrılması ve atılması gerekmektedir. VARTM yüksek ısı veya basınç gerektirmez. Bu nedenle, VARTM düşük maliyetli aletlerle çalışır ve tek seferde büyük, karmaşık parçaların ucuza üretilmesini mümkün kılmaktadır.



Şekil 1.7. VARTM metodu ile kompozit yapımının şematik gösterimi



Şekil 1.8. Çeşitli RTM proseslerinin şematik gösterimi

2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI

Korkmaz (2014), karbon elyaf takviyeli dokuma kumaş içeren kompozit malzemelerin üretimi ve mekanik özelliklerinin incelenmesi üzerine gerçekleştirdiği çalışmada, kompozit malzemelerin üretimi için elle yatırma yöntemini kullanmıştır. Bu yöntem ile farklı lineer yoğunluk, çözgü ve atkı sıklığı, çözgü ve atkı numarası, dokuma kumaş konstrüksiyonuna sahip karbon elyaf takviyeli karbon nanotüp ile modifiye edilmiş epoksi kompozit malzemeler üretilmiştir. Üretilen malzemelerin mekanik ve termal özellikleri incelenmiş, kırılma yüzeylerinin karakterizasyonu sağlanmıştır. Elde edilen kompozit malzemelerin yoğunluk değerleri incelendiğinde malzemenin yoğunluğunun matris malzemesine yapılan yaklaşık % 0.3 oranındaki karbon nano tüp katkısı ile azaldığı tespit edilmiştir. Malzemenin mekanik ve termal özelliklerinde iyileşme meydana gelmiştir. Özellikle dik yöndeki çekme mukavemeti değerlerinde iyileşme sağlandığı tespit edilmiştir. TG-DTG analizi sonrası çok katmanlı karbon nanotüp modifikasyonu ile dokuma karbon elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin termal kararlılıkları ve dekompozisyon noktasında yine iyileşme meydana gelmiştir.

Li ve ark. (2015) karbon dokuma kumaş-epoksi reçine ile iki farklı oranda istifleyip laminasyon ile hazırladıkları örneklerde yıldırım simülasyonu sonucu meydana gelen etkileri araştırmışlardır. Bu simülasyonun meydana getirdiği etkiler görsel değerlendirme, görüntü analizi, ultrasonik tarama ve taramalı elektron mikroskobu ile incelenmiştir. Sonuç olarak yıldırım benzeri etkilere maruz kalacak malzemelerin üretimi için dokuma kumaş/epoksi laminasyonu ile üretilen kompozit yapıların oldukça uygun olduğu ortaya konmuştur.

Durgun ve ark. (2014) Üst segment otomobillerin imalatında karbon kompozit yapıların kullanımının yaygınlaşması üzerine gerçekleştirdikleri çalışmada, karbon-epoksi kompozit malzemelerin üretim yöntemlerinin parçaların mekanik ve kimyasal özelliklerine etkilerini araştırmışlardır. Söz konusu çalışmada hem kompoziti oluşturacak malzemelerin seçimi hem de üretim yönteminin aynı derecede öneme sahip olduğu ortaya konmuştur. Bu amaçla vakum torbalama ve infüzyon yöntemleri ile karbon elyaf-epoksi reçine esaslı kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini

karşılaştırmak için çekme ve üç nokta eğme testleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen test sonuçları değerlendirildiğinde, vakum infüzyon yöntemi ile üretilen kompozit yapıların % 2.5 daha yüksek dayanım sergiledikleri, elastisite modülünün de % 8.2 daha yüksek olduğu görülmüştür. Ayrıca bu iki yöntem karşılaştırıldığında vakum infüzyon yönteminde daha az hava boşluğu kaldığından elde edilen yapılar daha sıkı ve rijittir. Kalınlık değişimi de tüm parça boyunca homojen olarak elde edilmektedir. Tüm bunlara ek olarak infüzyonda daha az reçine kullanılması söz konusu olduğundan yapılar daha yoğun ve mukavimdir. Üç nokta eğilme deney sonuçları da çekme testi sonuçları ile örtüşmektedir. Vakum infüzyon yöntemi ile üretilen kompozit yapıların eğme gerilme değerleri vakum torbalamaya göre % 26.7, eğme modülü ise % 15.6 daha yüksek bulunmuştur. İnfüzyon yönteminde reçine elyaf içine tam olarak nüfuz etmekte böylece eğme test sonuçları daha yüksek çıkmaktadır.

Kaplan (2017), araçların hafiflemesi, enerji verimliliği ve CO₂ salınımının azaltılması konularına yoğunlaşan, bununla birlikte yeni nesil elektrikli ve hafif araçların geliştirilmesi üzerine çalışmakta olan otomotiv endüstrisinin, karbon elyaf takviyeli kompozit malzemelerin kullanımına yöneldiğini belirtmektedir. Bu araçların parçalarının seri şekilde üretilebilmesi için önemli yöntemlerden birisi de reçine transfer kalıplamadır. Reçine transfer kalıplama yöntemi otomotivin yanı sıra spor malzemeleri ve denizcilik uygulamalarında da tercih edilebilmektedir. Bu yöntemde karbonun yanı sıra cam ve aramid elyafdan üretilmiş dokuma, örme ya da dokusuz yüzeyler kullanılabilir. Yöntemin verimi, reçinenin en yüksek oranda elyafa nüfuz etmesine bağlıdır. Bu nedenle elyafın gözenekli yapıda olması önemlidir. Yöntemin verimi için diğer önemli parametre ise reçine kürleme süresinin kısıllığıdır.

Turhan (2011), 200 tex karbon lifi kullanarak iki farklı sıklıkta 1x1 rib örgü yapısında kumaşlar üreterek, bu kumaşlardan elle yatırma yöntemine göre elde ettiği kompozit plakaların çekme ve kayma mukavemet test sonuçlarını istatistiksel olarak yorumlanmıştır. Kopma mukavemeti için en yüksek değer düşük sıklıktaki kompozitin çubuk yönünde olduğu görülmüştür. Tüm sonuçlar genel olarak değerlendirildiğinde sıklık ve yönün kompozitin kopma mukavemetini etkilemekte olduğu ortaya konmuştur. Mukavemet ilmek yapısı ile yönlendirilmiş lifler doğrultusunda,

yanal doğrultudan daha yüksek ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlar lif yönünün, kompozit dayanımı ve liflerin taşımaya katkısının önemini göstermektedir. Kayma uzaması test sonuçları da kopma mukavemeti sonuçlarına benzerdir. Yön ise kayma uzamasını etkilememektedir.

Sevencan (2011), karbon ve cam elyafın kompozit alanında kullanımı ile ilgili gerçekleştirdiği çalışmada rib yapısında farklı sıklıklarda kumaşlar üreterek, ürettiği bu kumaşların farklı dizilimlerle birleştirilmesi ile hibrit kompozit yapılar elde etmiştir. Bu yeni hibrit kompozit yapıların mekanik özellikleri çekme ve kayma testleri uygulanarak incelenmiştir. Sıklık, kumaş dizilimleri ve uygulanan kuvvet yönünün mekanik özelliklerle olan ilişkisi araştırılmıştır. Cam elyaftan üretilen kumaşların sıklık parametreleri yüksek, orta ve düşük, sıra sıklığı 19, 20, 22 sıra/10 cm, çubuk sıklığı 29, 32 ve 48 çubuk/10 cm olarak belirlenmiştir. Karbon elyaftan üretilen kumaşlar için ise sıklık parametreleri yüksek ve düşük, sıra sıklığı 19 ve 26 sıra/10 cm, çubuk sıklığı ise 38 çubuk/10 cm olarak belirlenmiştir. Uygulamalar sonrası elde edilen sonuçlar genel olarak değerlendirildiğinde yön, sıklık ve kumaş dizilim özellikleri elastisite modülü, çekme dayanımı ve kayma uzaması üzerinde etkilidir. Kumaş yönünün çekme uzaması üzerinde etkisi bulunmamaktadır.

Eryılmaz (2017) karbon kumaşı, reçineler ve takviye edilmiş malzeme arasındaki bağlanma kuvvetini arttırmak için bağlama ajanı olan 3-aminopropil-trieoksisilan ile farklı oranlarda (0.25, 0.5 ve 1 % e.a.ü.) kaplamıştır. Kaplama işleminden sonra numuneler 100 °C'de 60 dakika kurutulmuştur. Elde edilen kaplanmış karbon kumaşlar epoksi matrisiyle bez ayağı ve dimi kumaşlarla takviye edilerek vakum infüzyon yöntemine göre kompozit haline getirilmiştir. Elde edilen kompozit yapıların darbe dayanımı ve çekme mukavemet test sonuçları incelenmiştir. Silan ajanının kütlece % 0.5'den fazla uygulanmasının mekanik özellikleri olumsuz etkilediği görülmüştür.

Durgun (2014) gerçekleştirdiği çalışmayla kompozit malzeme olarak üretilecek endüstriyel otomobil parçalarından beklenen performans özelliklerinin, kompozit üretim yönteminin seçimindeki en önemli kriterlerden biri olduğunu vurgulamıştır. Ayrıca üretim yönteminin kısa ve maliyetinin düşük olması beklenmektedir. Bu nedenle

günümüzde vakum infüzyon yöntemi en yaygın kompozit üretim yöntemlerinden biri olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu yöntemle göre otomobil motor kaputunun imalatı Ar-Ge çalışması olarak gerçekleştirilmiştir. Üretim maliyetinin ve süresinin yüksek olması nedeni ile optimizasyon çalışmaları devam etmektedir.

Türkmen ve Köksal (2013) cam elyaf takviyeli plastik kompozit malzemelerin hafif ve yüksek mukavemetli olmaları nedeni havacılık, uzay, otomotiv ve savunma endüstrisinde kullanılır hale gelmesinden yola çıkarak farklı cam elyaf katman sayısına sahip, el yatırması yöntemiyle üretilen kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Üretilen kompozit yapıların çekme, üç nokta eğme, düşük hızlı darbe testi sonuçları ile hasar bölgelerinden alınan görüntüleri değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar ışığında elyaf katman sayısına bağlı olarak kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin iyileştiği tespit edilmiştir. Ancak belli bir katman sayısından sonra mukavemetin beklenen oranda artmaya devam etmeyeceği açıktır.

Aral ve ark. (2009) tekstil atıklarının geri kazanımı amaçlayarak atık kumaşların takviye malzemesi olarak kullanıldığı polimer matrisli kompozit yapılar elde etmişlerdir. Bu kompozit malzemeler baskı kalıplama yöntemi ile üretilmiştir. Takviye malzemesi olarak biri % 100 pamuk diğer ikisi % 100 poliester hammaddeli üç farklı bez ayağı dokuma kumaş, matris malzemesi olarak ise doymamış poliester reçine kullanılmıştır. Plakalar şeklinde elde edilen yapıların darbe ve çekme testleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen veriler saf reçine değerleri ile karşılaştırılmıştır. Tüm plakalar darbe dayanımı kazancı sağlamıştır. Ancak kompozit plakalar daha yüksek uzama değerlerine sahiptir. Özellikle poliester kumaş takviyeli kompozitlerin uzama değerlerinin % 50'ye kadar varmakta olduğu görülmüştür. Kumaş kat sayılarının kompozit malzemelerin dayanım değerlerine etki etmekte olduğu düşünülmektedir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada karbon dokuma kumaşlardan, elyaf takviyeli termoset kompozit yapıların elde edilmesi ve mekanik özelliklerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Kompozit malzemeler VARTM metodu ile 50x50 cm ebatlarında plakalar halinde üretilmiştir. Elde edilen kompozit plakalar çekme, üç nokta eğilme ve çentik darbe testleri için ilgili ASTM standartlarına göre kesilmiştir.

3.1 Malzeme

Çalışmada takviye malzemesi olarak kullanılan karbon dokuma kumaşlar BlackSun Partners firmasından tedarik edilmiştir. İki farklı örgü tipi ve iki farklı gramajda olan toplam dört farklı kumaş seçilmiş olup bu kumaşlara ait teknik özellikler Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Kompozit yapımında kullanılan karbon dokuma kumaşlar

Kumaş No	Örgü tipi	Çözümlü Sıklığı (Adet/cm)	Atkı Sıklığı (Adet/cm)	Kumaş gramajı (gr/cm ²)	Atkı-Çözümlü ipliği Numarası	Kumaş Kalınlığı (mm)
1	Bez ayağı	5,2	5,2	200	3K-3K	0.26
2	Dimi	6	6	200	3K-3K	0.27
3	Bez ayağı	4	4	600	12K-12K	0.71
4	Dimi	3,6	3,6	600	12K-12K	0.67

Karbon fiber iplikler, piyasada 1000 filament sayısını ifade eden K ile ifade edilmektedir. 3K karbon elyaflar toplam 3000 filamentten, 12K ile ifade edilen karbon elyaflar 12000 filamentten oluşmaktadır. 3K karbon elyaflar 200 tex, 12K elyaflar ise 800 tex’tir.

Kompozit imalatında matris malzemesi olarak epoksi reçine kullanılmıştır. Hexion MGS L160 epoksi reçine ile Hexion Hardener MGD LH160 reçine sertleştiricisi Dost Kimya’dan tedarik edilmiştir. Kullanılan reçine ve reçine sertleştiriciye ait teknik

özellikler Çizelge 3.2 ve 3.3’de verilmiştir. Kullanılan reçine-reçine sertleştirici oranı ağırlıkça 100:25, hacimce 100:30’dur. Kalıp ayırıcı olarak Poliya firmasından tedarik edilen Polivaks 6 ve Polivaks sıvı PVA kullanılmıştır. Reçinenin yayılımını kolaylaştırmak ve vakum torbası ile karbon dokuma kumaşlar arasında ara faz oluşturmak amacıyla nonwoven polyester tela ile naylon elek bezi kullanılmıştır. Kalıp olarak cam panel, vakum torbası olarak polietilen poşet, sızdırmazlık elamanı olarak çift taraflı bant ile kâğıt bant kullanılmıştır. Vakum sağlamak amacıyla Value VE135N vakum pompası kullanılmıştır.

Çizelge 3.2. Kompozit yapımında kullanılan epoksi reçine özellikleri

Hexion MGS L160	
Yoğunluk (g/cm ³)	1,13-1,17
Viskozite (mPa.s)	700-900
Epoksi eküvalenti (g/eküvalent)	166-182
Epoksi değeri (eküvalent/100g)	0,55-0,60
Refraktif indeks	1,5480-1,5530

Çizelge 3.3. Kompozit yapımında kullanılan reçine sertleştirici özellikleri

Hexion Hardener MGD LH160	
Yoğunluk (g/cm ³)	0,96-1,00
Viskozite (mPa.s)	100-50
Amin miktarı (mg KOH/g)	550-650
Refraktif indeks	1,5200-1,5210

3.2 Yöntem

Kompozit malzemelerin imalatında vakum destekli reçine transfer kalıplama (VARTM) metodu kullanılmıştır. Karbon elyaf dokuma kumaşlardan tek katlı, aynı gramaj aynı örgü tipinde olan, aynı gramaj farklı örgü tipinde olan ve aynı örgü tipi farklı gramajlarda olan çift katlı olmak üzere toplam 12 adet kompozit plaka üretilmiştir. Üretilen plakaların kompozisyonu Çizelge 3.4’de verilmiştir.

Çizelge 3.4. Üretilen kompozit plakaların kumaş kombinasyonları

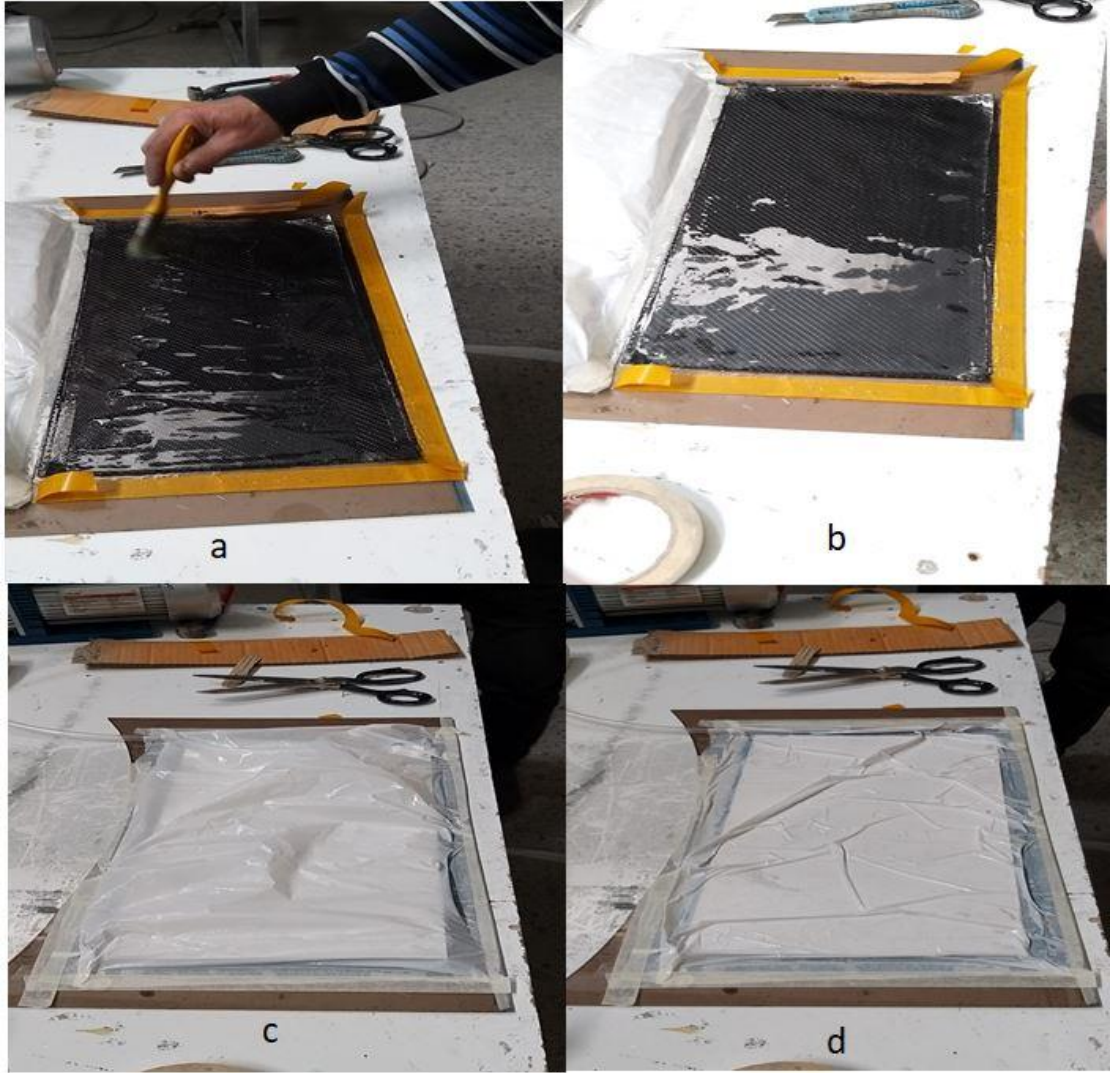
Kompozit Plaka No	Plaka Kodu	Kullanılan Kumaşlar	Örgü tipi	Kumaş Gramajları (g/m ²)
1	B2	1	Bez ayağı	200
2	D2	2	Dimi	200
3	B6	3	Bez ayağı	600
4	D6	4	Dimi	600
5	B2B2	1-1	Bez ayağı- Bez ayağı	200-200
6	D2D2	2-2	Dimi- Dimi	200-200
7	B2D2	1-2	Bez ayağı-Dimi	200-200
8	B6B6	3-3	Bez ayağı- Bez ayağı	600-600
9	D6D6	4-4	Dimi- Dimi	600-600
10	B6D6	3-4	Bez ayağı-Dimi	600-600
11	D2D6	2-4	Dimi- Dimi	200-600
12	B2B6	1-3	Bez ayağı- Bez ayağı	200-600

Kompozit malzemelerin en büyük dezavantajı, üretimin manuel sistemler ile düşük üretim hızlarında olmasıdır. Üretim metotlarının genelinde otomasyon sistemlerinin bulunmaması nedeniyle el işçiliği fazladır ve tekrar edilebilirlik çok zordur. Bu durum kompozit malzemelerin gelişiminde ki en büyük engeldir.

Bu çalışmada deneysel plakaların üretimi gerçekleştirilmeden önce bir dizi ön üretim çalışması yürütülmüş ve kompozit malzemenin üretimine etki eden faktörler en aza indirilmeye çalışılmıştır. Yapılan ön denemeler neticesinde minimum düzgünlüğün (elde edilen plakaların yüzey düzgünlüğü ve reçinenin kumaş üzerine düzgün dağılması) sağlandığı üretim şartları ile deney örneklerinin üretimine geçilmiştir. Ön denemeler deney plakalarının üretildiği aynı malzemeler ile yapılmıştır.

Yapılan ilk ön çalışmada çift kat takviye kumaşı el aparatı ile ayrı ayrı reçine ile ıslatıldıktan sonra el yatırması prensibine göre kalıp üzerine serilmiştir. Vakumlama hortumu üzerinde çeşitli yerlerden delikler açılmış ve hortuma hava girişinin muhtelif yerlerden olması sağlanmıştır. Vakumlama hortumu kalıbın bir köşesine yerleştirilerek kalıbın üzeri torba ile kaplanmış ve kalıp içerisindeki hava vakumlanarak reçinenin

kürleşmesi için 24 saat beklemeye bırakılmıştır. Kürleşme sonrasında yapılan incelemelerde; kompoziti oluşturan kumaş katlarının birbirleri ile tam olarak bağlanmadığı ve kolaylıkla iki parçaya ayrılabilirdiği görülmüştür. Ayrıca kumaş katları üzerinde muhtelif yerlerde reçine nüfus etmemiş bölgeler tespit edilmiştir. Bu bölgelerde reçinenin, havanın vakumlanması esnasında hava ile birlikte kumaş yüzeyinden ayrıldığı düşünülmektedir. Şekil 3.1’de ilk deneme çalışmasına ait fotoğraflar yer almaktadır.



Şekil 3.1. İlk yapılan ön deneme çalışmasına ait resimler. a-b) el yatırması metoduna göre reçine uygulaması, c) vakum öncesi torbalama, d) vakum sonrası torbalama

İkinci ön deneme çalışmasında hem kumaşa yeterli miktarda reçinenin yayıldığını hem de fazla reçinenin vakum ile kumaş yüzeyinden ayrılıp ayrılmadığını kontrol etmek amacıyla vakum pompası ile kalıp arasına reçine biriktirme havuzu eklenmiştir. Vakum hortumu iki noktadan bağlanarak reçinenin kumaş yüzeyine daha kolay yayılması sağlanmıştır. Vakum torbasının ebatları, vakum yönü doğrultusunda kalıptan % 20 fazla uzunlukta, vakum yönüne dik doğrultuda ise kalıp ile aynı ebatta olacak şekilde ayarlanmıştır. Ayrıca reçine uygulaması el yatırmasına göre değil, infüzyon metoduna göre uygulanmıştır. İnfüzyonu homojen olarak tatbik etmek için reçine yayma aparatı kullanılmıştır. Kullanılan aparat, U profil şeklinde plastik malzemedir ve yan yüzeyine çeşitli noktalardan çeltikler açılarak reçinenin vakum doğrultusunda çoklu noktadan beslenmesi sağlanmıştır. Şekil 3.2 ve 3.3’de ikincil ön denemelerde uygulanan vakum infüzyon metodu yer almaktadır.



Şekil 3.2. İkinci denemeye ait vakum öncesi vakum torbalama sistemi



Şekil 3.3. İkinci denemeye ait reçine uygulaması sonrası vakum torbalama sistemi

İkincil ön deneme çalışması sonrasında Şekil 3.3’de görülen reçine nüfuz etmemiş bölgelerin bulunduğu görülmüştür. Reçinenin daha iyi yayılımını sağlamak için aynı sistemde yapılan bir diğer deneme çalışmasında vakum torbasının ebatları vakum doğrultusunda kalıp ile aynı ölçüde, vakuma yönüne dik doğrultuda kalıptan % 20 fazla olacak şekilde uygulanmış fakat üretilen kompozit plaka üzerinde benzer kusurlu noktalar bulunduğu tespit edilmiştir. Vakum torbasının fazla olan kısımları karbon dokuma kumaş üzerine katlanarak başlangıçta reçinenin yayılması için yollar oluşturmakta fakat infüzyon süresince reçine viskozitesinin zamanla yükselmesi ile birlikte reçinenin yayılımını bir süre sonra engellemektedir.

Birinci ve ikinci grup ön deneme çalışmaları neticesinde vakum işleminin kumaşın her iki kenarından olmasına ve infüzyonun kalıbın ortasından yapılmasına karar verilmiştir. Vakum bölgelerinde vakumun kumaş kenarı boyunca homojen olmasını sağlamak için kumaş kenarlarına paralel olan iki adet vakum kanalı kullanılmıştır. Vakum kanalları u tipi plastik profildir ve vakum hortumları vakum kanalına her iki ucundan bağlanarak toplam 4 noktadan vakumlama yapılmıştır. Vakum torbasının ebatları her yönde kalıptan % 8 fazla olacak şekilde 54 cm boyunda ayarlanmıştır. Karbon dokuma

kumaşlar 50x50 cm abatlarda olacak şekilde bant ile işaretlenmiş ve kesilmiştir. Cam kalıp üzerine iç ölçüleri 50x50 cm olacak şekilde çift taraflı bant yapıştırılmıştır. Kalıp üzerine sırasıyla kompozit imalatında kullanılacak olan karbon kumaş, polyester nonwoven tela ve naylon elek bezi serilmiştir. Kumaş kenarlarına vakum aparatları ile kumaş ortasına infüzyon aparatı yerleştirildikten sonra vakum torbası çift taraflı bant üzerine yapıştırılmıştır. Bağlantı noktalarından vakum ve infüzyon hortumları bağlanarak çift taraflı bant ile hava kaçaklarının oluşması engellenmiştir. Kalıp genelinde hava kaçağının oluşmaması için vakum torbasının çevresi kâğıt bant ile tekrar bantlanmıştır. Hava kaçağı kontrolü yapıldıktan sonra infüzyon başlatılarak kompozit malzemelerin üretimi gerçekleştirilmiştir. Kumaşın tamamı reçine ile muamele edildikten sonra vakum ve infüzyon bağlantıları kapatılarak reçinenin kürleşmesi için 24 saat beklemeye bırakılmıştır. Kürleşme sonrasında vakum torbası, polyester tela ve naylon elek bezi kompozit üzerinden temizlenerek plakaların üretimi tamamlanmıştır. Şekil 3.4’de uygulanan vakum destekli reçine transfer sisteminin üretim çeşitli aşamalarına ait fotoğraflara yer verilmiştir.

Şekil 3.4 a’da üretilecek olan kompozit plakaya uygun ebatta kumaşın, dokuma kumaş topu üzerinde işaretlenerek ölçülerinin belirlenmesi, b’de bu toptan kesilen kumaş numunesi, c’de ölçüleri çift taraflı bant ile belirlenmiş cam kalıp, d’de kalıp içerisine yerleştirilen dokuma kumaş, polyester nonwoven tela, naylon elek bezi, vakum ve infüzyon aparatları, e’de vakum torbası montajı, f’de vakum sistemin vakum altındaki görünümü ve g’de reçine yayılımının başlamasından sonra kısmen ıslanmış karbon kumaş görülmektedir.



Şekil 3.4. Kompozit plakaların üretim aşamalarına ait resimler

3.3 Kompozit Malzemelere Uygulanan Testler

Vakum destekli reçine kalıplama metoduyla üretilen kompozit plakalara ASTM D3039 standardına göre çekme, ASTM D7264 standardına göre üç nokta eğilme ve ASTM D256 standardına göre çentik darbe dayanımı testleri yapılmıştır.

3.3.1 Çekme Testi

Çekme testi malzemelerin statik yük altındaki elastik ve plastik davranışlarını belirlemek için yapılmaktadır. Standartlara uygun ebatlarda kesilen numune, çekme test cihazının çeneleri arasına yerleştirilir. Çenelerden birisi sabit hızda hareket ettirilerek deney numunesine değişken miktarlarda çekme kuvveti uygulanır ve bu kuvvete karşılık gelen uzama kaydedilmektedir.

Çekme testleri Marmara Üniversitesi Malzeme ve Metalurji Mühendisliği Bölümünde yapılmıştır. Çekme testleri ASTM D3039 standardına göre Zwick Z010 çekme test cihazı ile yapılmıştır. Çeneler arası mesafe 55 mm, test hızı 2 mm/dk'dır. Deney numunelerinin ebatları 168x7 mm'dir. Her plakadan beşer adet numune test edilmiş olup ortalama test sonuçları hesaplanmıştır.



Şekil 3.5. Çekme test cihazı

3.3.2 Üç Nokta Eğilme Testi

Eğme: İki desteğe serbest olarak oturtulan, genellikle daire veya dikdörtgen kesitli düz bir deney parçasının, yön değiştirmeksizin ortasına bir eğme kuvveti uygulandığında oluşan biçim değiştirmesidir. Eğme deneyinde, deney numunesine bir kuvvet etki ettiğinde, numune kesitinin bir kısmında basma gerilmesi, kesitin geri kalan kısmında çekme gerilmesi meydana gelmektedir. Eğme deneyi malzemenin mukavemeti hakkında tasarım bilgilerini belirlemek ve malzemenin eğilmeye karşı mekanik özelliklerini tespit etmek için kullanılmaktadır.

Üç nokta eğilme testleri Marmara Üniversitesi Malzeme ve Metalurji Mühendisliği Bölümünde yapılmıştır. Zwick Z010 çekme test cihazı ile ASTM D7264 standardına göre yapılan üç nokta eğilme testleri için 90x7 mm boyutlarında deney numuneleri hazırlanmıştır. Destek çeneleri arasındaki mesafe 64 mm'dir. Cihazın ortadan basma hızı ise 1 mm/dk'dır. Üretilen her kompozit plaka için 5 tekrar uygulanmış ve ortalama sonuçlar hesaplanmıştır. Şekil 3.6'da cihazın üç nokta eğilme test düzeneği yer almaktadır.



Şekil 3.6. Üç nokta eğilme test düzeneği

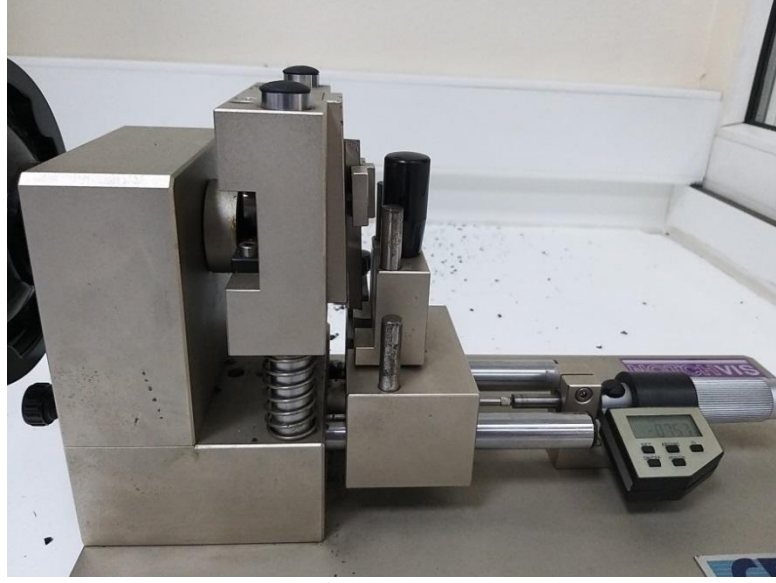
3.3.3 Darbe Testi

Darbe deneyi, gevrek kırılmaya neden olabilecek şartlar altında malzemelerin mekanik özelliklerinin saptanmasında kullanılmaktadır. Darbe deneyinin genel amacı, malzemenin dinamik zorlamalar altında kırılması için gerekli enerji miktarını tespit etmektir. Darbe deneyleri çentikli ve çentiksiz olmak üzere iki türde yapılabilmektedir. Çentikli darbe deneylerinde test öncesinde çekicinin numunenin üzerine darbe yapacağı bölgeye çentik açılmaktadır. Çentikli darbe deneyleri genel olarak Charpy çentikli darbe deneyi ve İzod çentikli darbe deneyi olmak üzere 2 türde yapılmaktadır.

1) Charpy darbe deneyi: Yatay ve basit kiriş halinde 2 mesnede yaslanan numunenin çentik tabanına bir sarkacın ucundaki çekiçle darbe yapılması ve çentik tabanında meydana gelen çok eksenli gerilimler etkisi ile numunenin kırılması için harcanan enerjinin tayin işlemidir.

2) İzod darbe deneyi: Dikey ve konsol halindeki bir kavrama çenesine tutturulan numunenin yüzeyine, kavrama çenesinden belirli yükseklikte, bir sarkacın ucundaki çekiçle darbe yapılması ve çentik tabanında meydana gelen çok eksenli gerilimler ile numunenin kırılması için sarf edilen enerjinin tayin edilmesidir.

İzod çentikli darbe testleri Marmara Üniversitesi Malzeme ve Metalurji Mühendisliği Bölümünde ASTM D256 standardına göre Zwick darbe test cihazı ile yapılmış olup numune ebatları 80x7 mm'dir. Sarkaç çekici 5.4 J çentik derinliği 2 mm'dir. Her plaka için 5 adet darbe testi uygulanmış olup ortalama sonuçlar hesaplanmıştır. Şekil 3.7'de Ceast Notchvis çentik açma cihazı ve Şekil 3.8'de Zwick darbe test cihazının resimlerine yer verilmiştir.



Şekil 3.7. Ceast Notchvis çentik açma cihazı



Şekil 3.8. Zwick darbe test cihazı

4. BULGULAR (BULGULAR ve TARTIŞMA)

Bu çalışmada üretilen dokuma kumaş takviyeli kompozit malzemelere ASTM standartlarına göre çekme, üç nokta eğilme ve çentikli darbe testleri yapılmıştır.

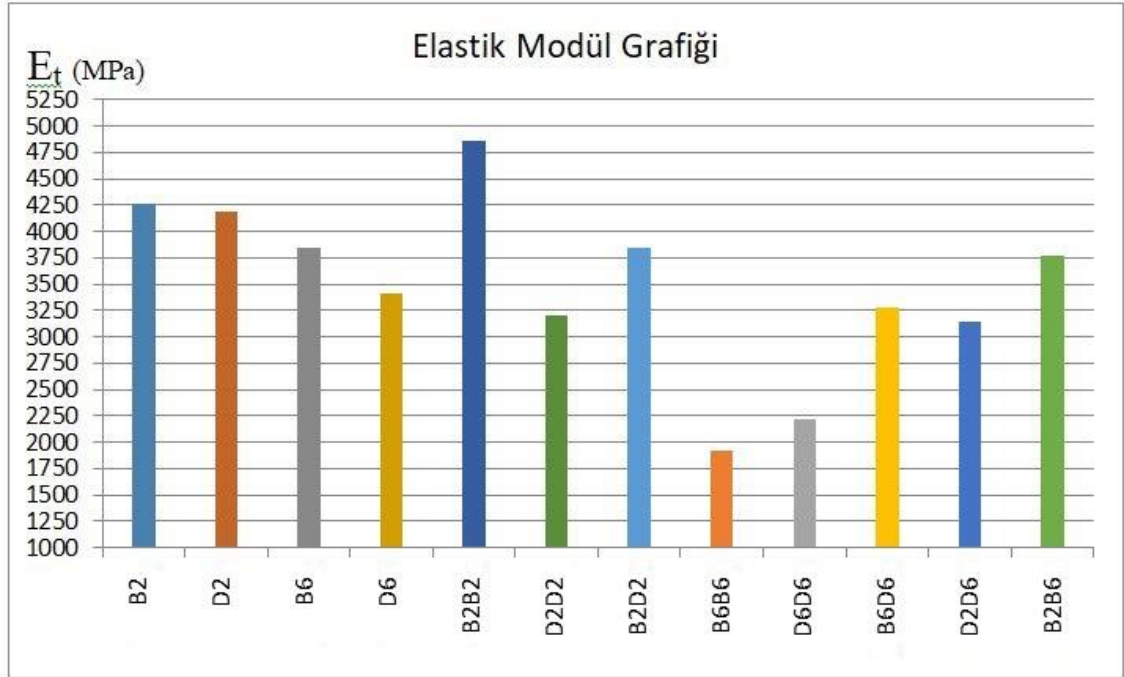
4.1 Çekme Testi Sonuçları

Çekme testleri ASTM D3039 göre yapılmış olup her plakaya 5 defa çekme testi uygulanmış ve ortalama değerler hesaplanmıştır. Elde edilen çekme testi sonuçları Çizelge 4.1’de verilmiştir.

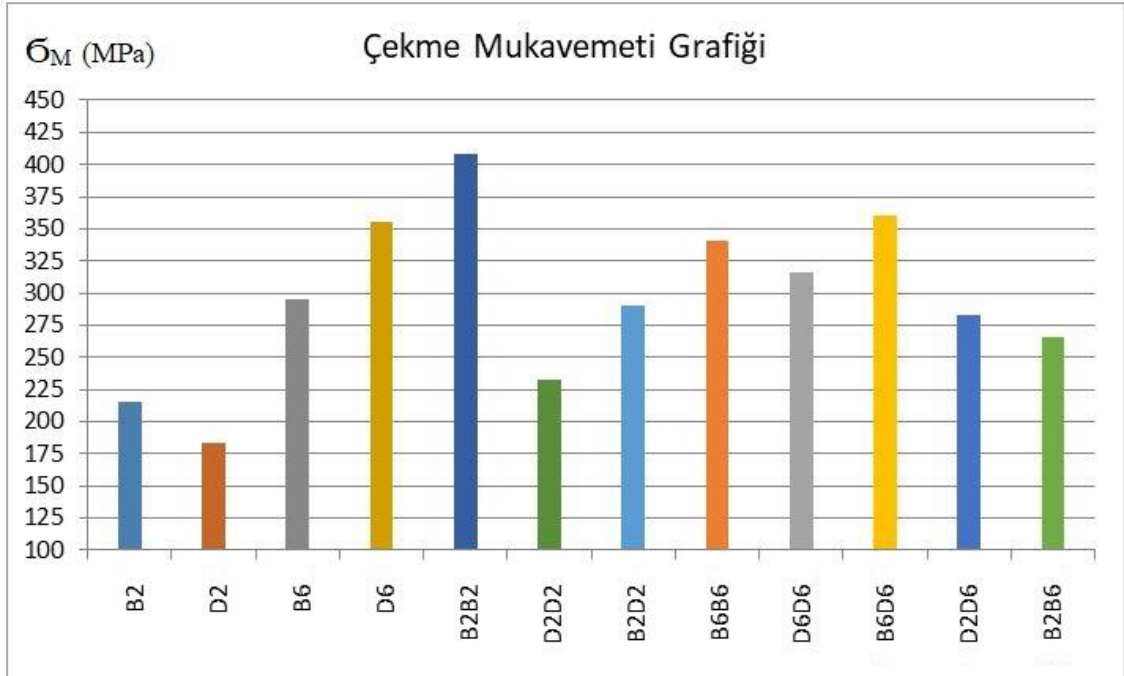
Çizelge 4.1. Kompozit plakalara uygulanan Çekme test sonuçları

Plaka No	Plaka Kodu	E_t (MPa)	$\bar{\sigma}_M$ (MPa)	ϵ_{tB} (%)
1	B2	4270	215	3.5
2	D2	4190	183	2.9
3	B6	3850	295	6.0
4	D6	3410	355	5.8
5	B2B2	4865	408	5.2
6	D2D2	3202	233	4.2
7	B2D2	3840	290	4.2
8	B6B6	1928	340	8.4
9	D6D6	2225	316	6.7
10	B6D6	3280	360	5.9
11	D2D6	3140	283	4.8
12	B2B6	3770	265	4.5

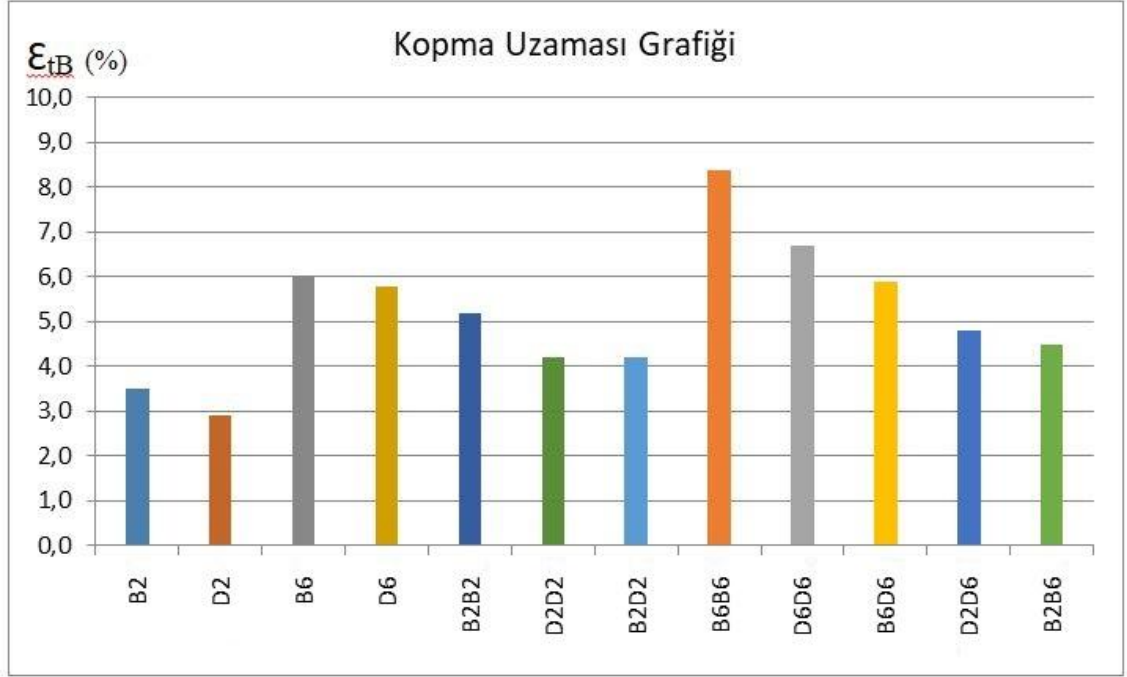
Çizelge 4.2. Kompozit plakaların çekme testi, Elastik Modül (E_t) (MPa) grafiği



Çizelge 4.3. Kompozit plakaların çekme testi Çekme Mukavemeti (σ_M) grafiği



Çizelge 4.4. Kompozit plakaların kopma uzaması (ϵ_{tB}) grafiği



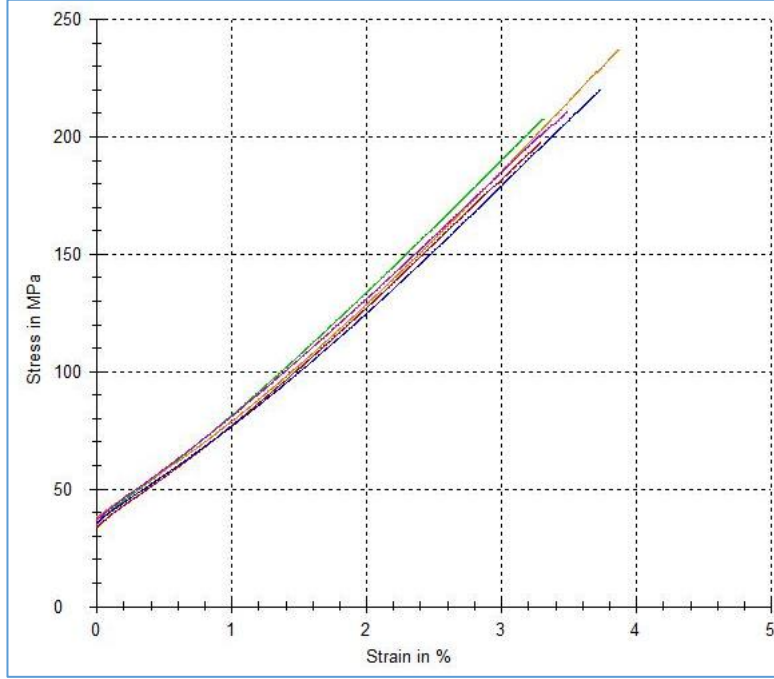
Çekme testi sonucunda bazı numunelerde düz kırılma meydana gelirken, bazı numunelerde saçaklı kırılmanın meydana geldiği görülmüştür. Çekme öncesi deney numunesi ve çekme testleri sonrasında görülen karakteristik kırılma tipleri Şekil 4.1 'de verilmiştir.



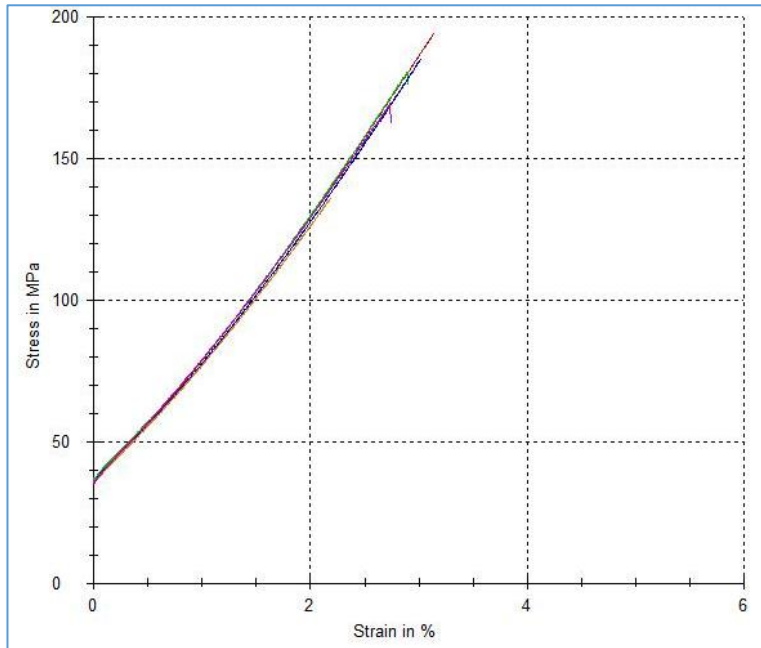
Şekil 4.1. Çekme testi öncesi deney numunesi, b) çekme testi sonrasında saçaklı kırılan kompozit numune, c) çekme testi sonrasında düz kırılan kompozit numune

Çekme testlerinde elde edilen gerilme gerinim grafikleri Çizelge 4.5-4.16'da verilmiştir.

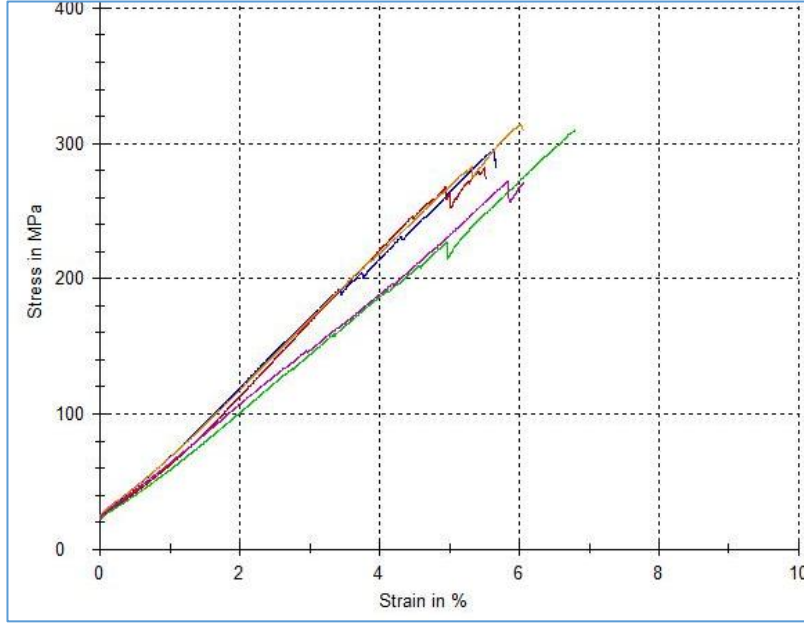
Çizelge 4.5. 1 No'lu plakaya (B2) ait gerilme-gerinim grafiği



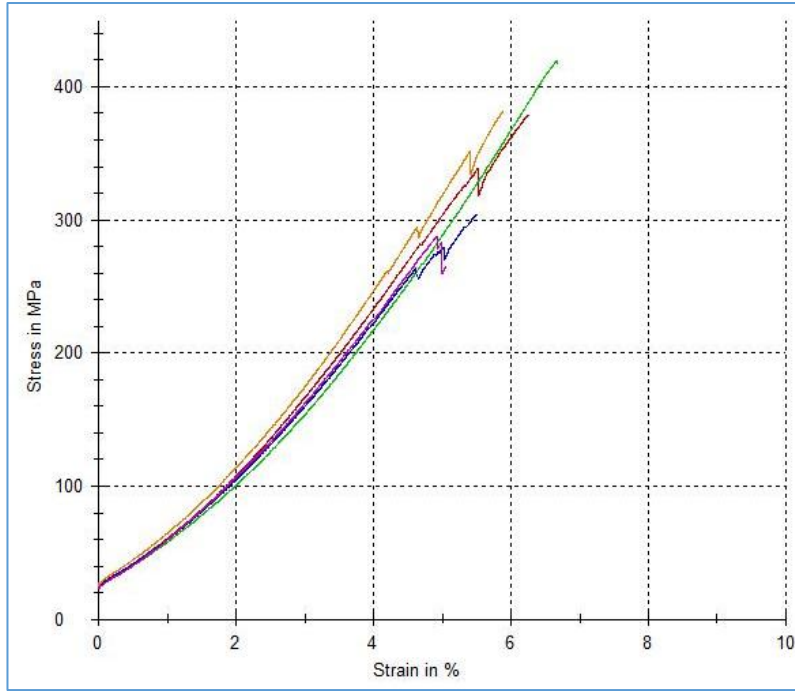
Çizelge 4.6. 2 No'lu plakaya (D2) ait gerilme-gerinim grafiği



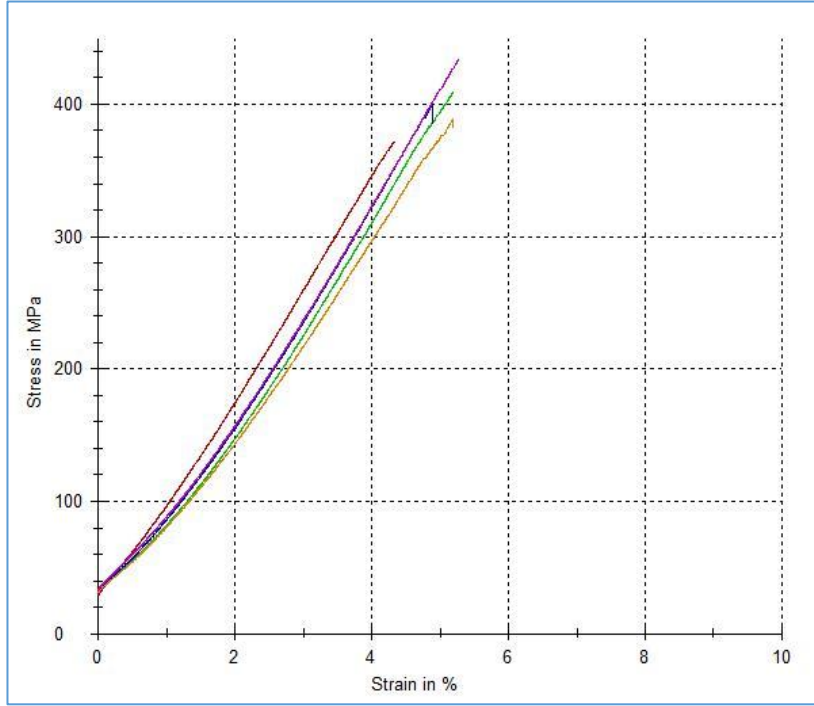
Çizelge 4.7. 3 No'lu plakaya (B6) ait gerilme-gerinim grafiği



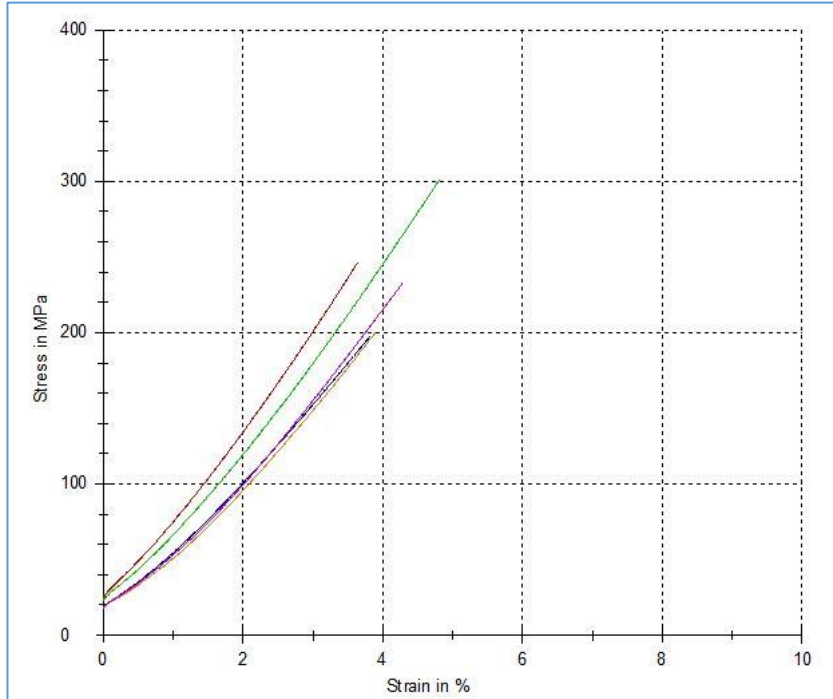
Çizelge 4.8. 4 No'lu plakaya (D6) ait gerilme-gerinim grafiği



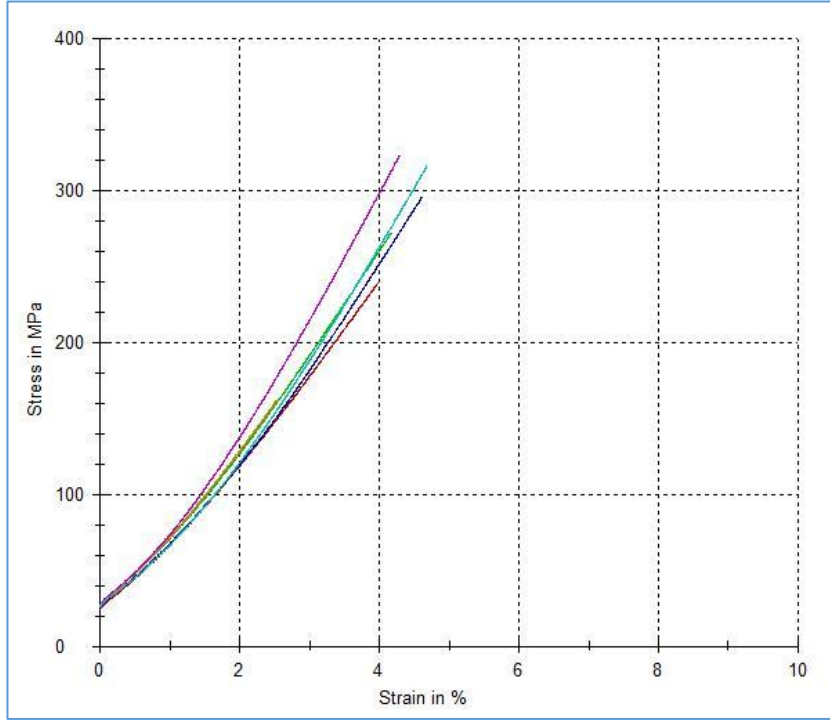
Çizelge 4.9. 5 No'lu plakaya (B2B2) ait gerilme-gerinim grafiği



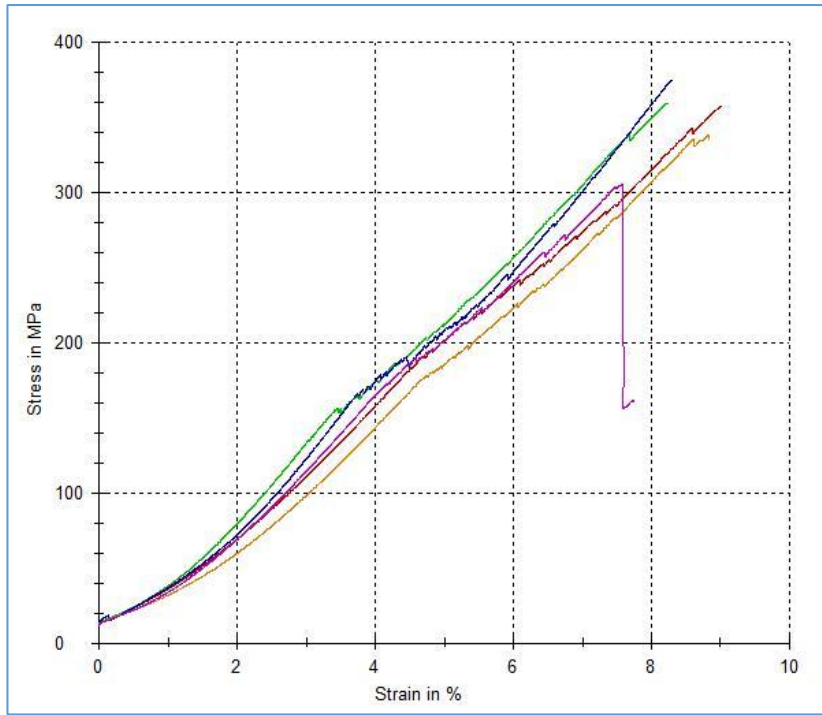
Çizelge 4.10. 6 No'lu plakaya (D2D2) ait gerilme-gerinim grafiği



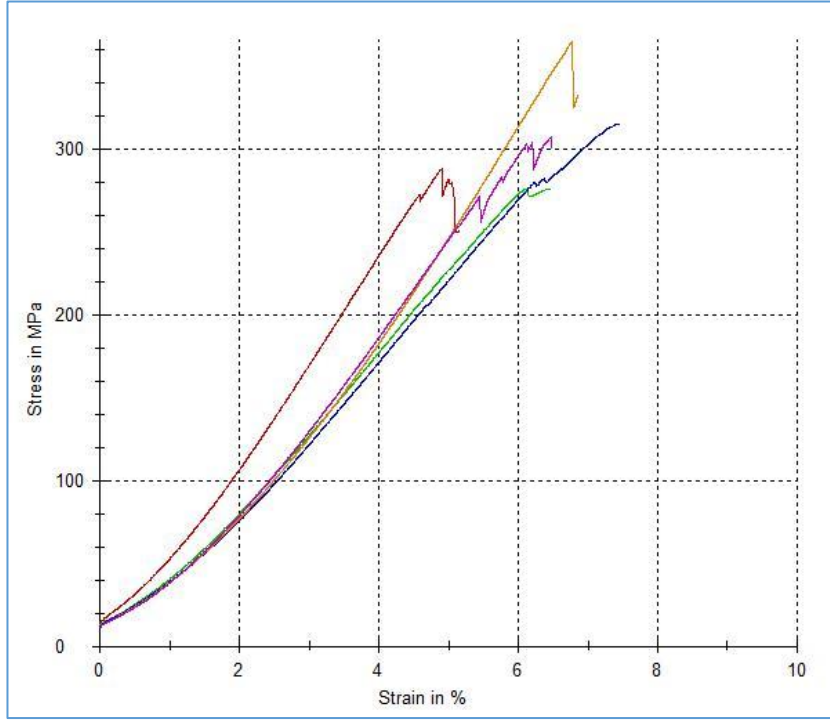
Çizelge 4.11. 7 No'lu plakaya (B2D2) ait gerilme-gerinim grafiği



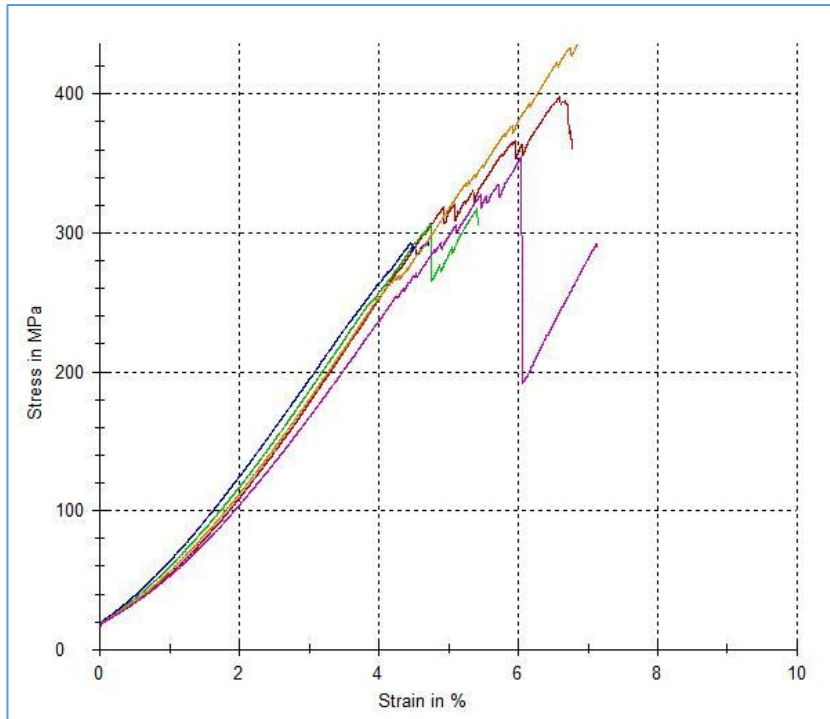
Çizelge 4.12. 8 No'lu plakaya (B6D6) ait gerilme-gerinim grafiği



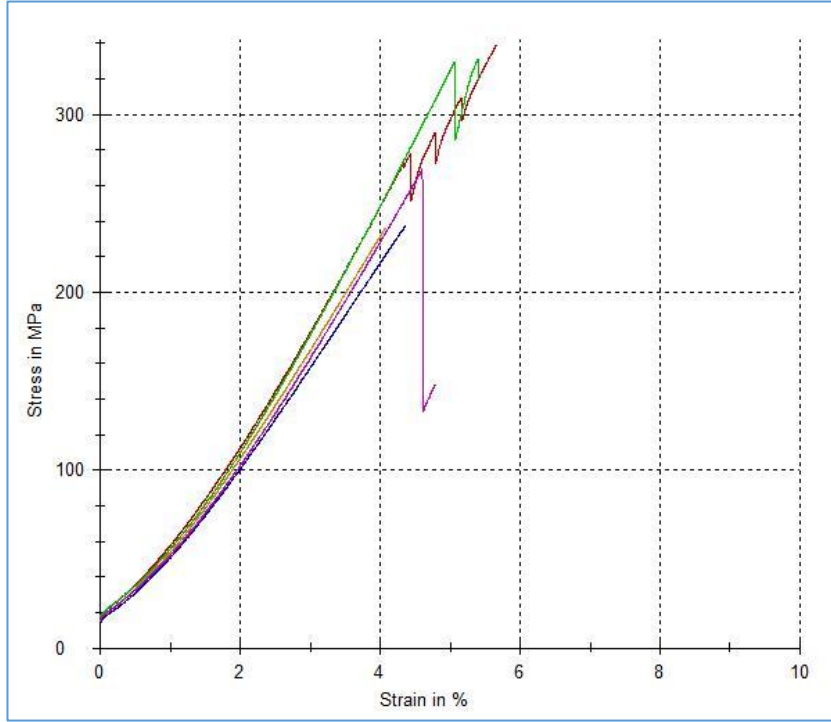
Çizelge 4.13. 9 No'lu plakaya (D6D6) ait gerilme-gerinim grafiği



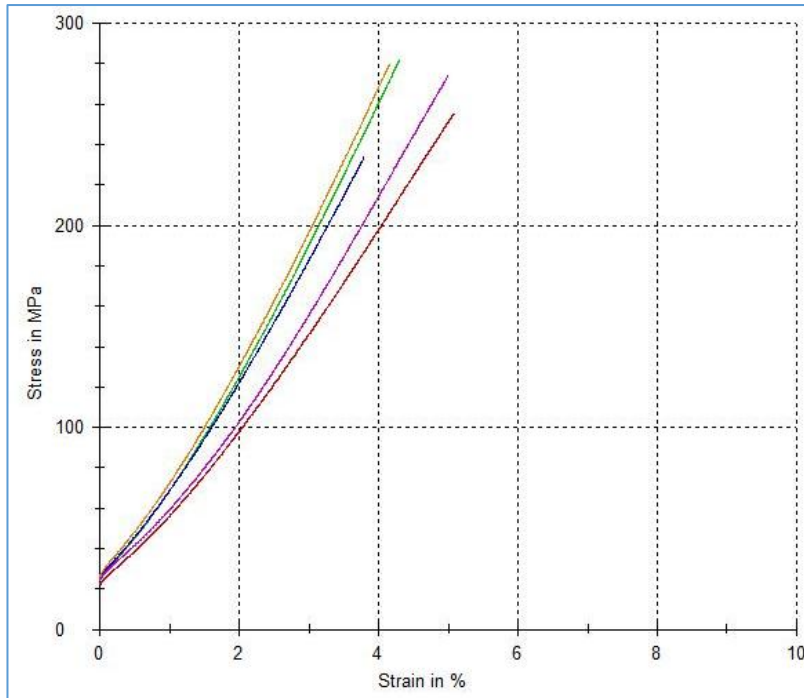
Çizelge 4.14. 10 No'lu plakaya (B6D6) ait gerilme-gerinim grafiği



Çizelge 4.15. 11 No'lu plakaya (D2D6) ait gerilme-gerinim grafiği



Çizelge 4.16. 12 No' lu plakaya (B2B6) ait gerilme-gerinim grafiği



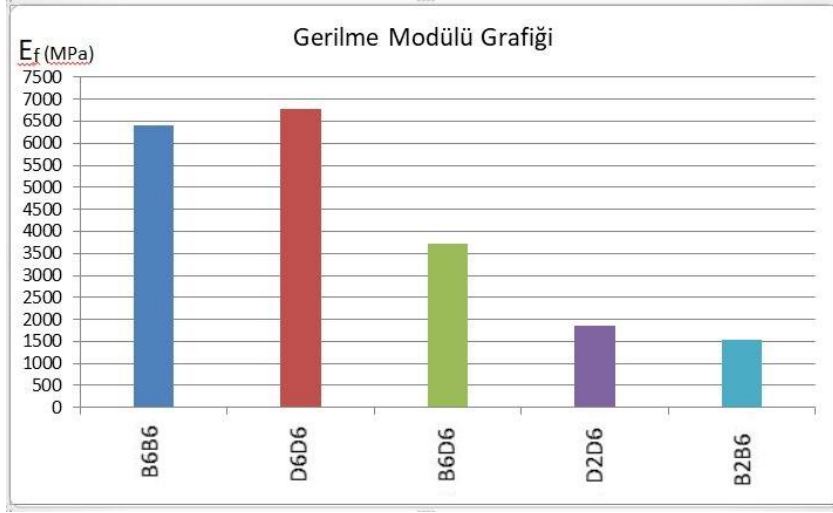
4.2 Üç Nokta Eğilme Testi Sonuçları

Üç nokta eğilme deneyi için her plakaya 5 defa üç nokta eğilme testi uygulanmış ve ortalama sonuçlar hesaplanmıştır. ASTM D7264 standardına göre yapılan üç nokta eğilme deneyinde 1, 2, 3, 4, 5, 6 ve 7 No'lu kompozit plakalardan alınan deney numunelerinin maksimum eğilme miktarına eriştiğinde kırılmadığı görülmüştür. 8, 9, 10, 11 ve 12 No'lu plakalardan alınan test numuneleri deney sonucunda kırılmış ve ortalaması hesaplanan test sonuçları Çizelge 4.17'de, bu testlere ait veri grafikleri ise Çizelge 4.18, 4.19 ve 4.20'de verilmiştir.

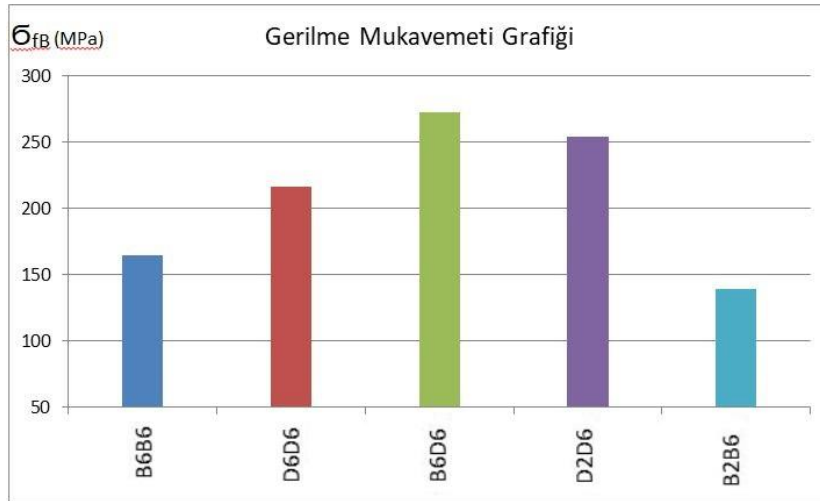
Çizelge 4.17. Kompozit plakalara uygulanan üç nokta eğilme testi sonuçları

Plaka No	Plaka Kodu	E_f (MPa)	σ_{fB} (MPa)	ϵ_{fM} (%)
1	B2	Kırılma Olmadı		
2	D2	Kırılma Olmadı		
3	B6	Kırılma Olmadı		
4	D6	Kırılma Olmadı		
5	B2B2	Kırılma Olmadı		
6	D2D2	Kırılma Olmadı		
7	B2D2	Kırılma Olmadı		
8	B6B6	6420	165	2.3
9	D6D6	6790	217	2.2
10	B6D6	3720	273	1,6
11	D2D6	1855	254	3,1
12	B2B6	1545	139	2,8

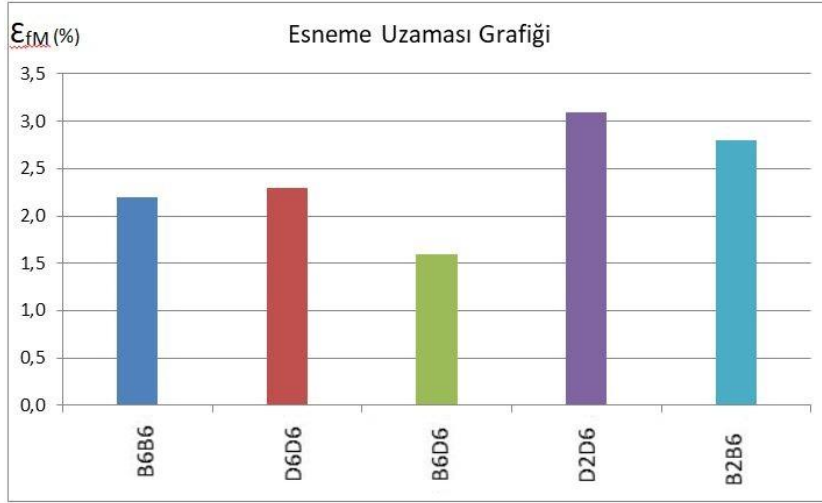
Çizelge 4.18. Üç nokta eğilme testi gerilme modülü sonuçları



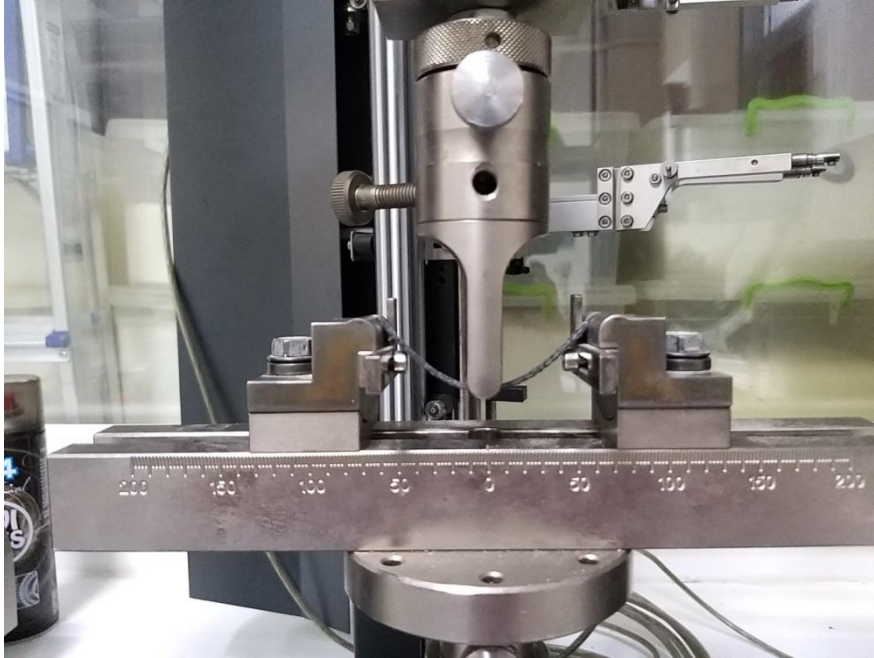
Çizelge 4.19. Üç nokta eğilme testi gerilme mukavemeti sonuçları



Çizelge 4.20. Üç nokta eğilme testi esneme uzaması grafiği



1-7 No'lu kompozit plakalar test standardına göre % 3,6 maksimum eğim miktarına ulaştığı halde hala kırılma gerçekleşmediğinden test sonlandırılmıştır. Maksimum eğim anında kompozit malzemenin kırılmadan aldığı geçici şekil değişimi Şekil 4.2'de görülmektedir. Baskı kuvveti ortadan kaldırıldığında test numuneleri orijinal haline geri dönmektedir.



Şekil 4.2. Üç nokta eğilme testinde maksimum eğim anında kırılmayan plaka.

Üç nokta eğilme testi sonucunda kompozit plakalarda kırılma sonrasında meydana gelen kalıcı deformasyon Şekil 4.3’de verilmiştir.



Şekil 4.3. Üç nokta eğilme testi sonrasında kompozit malzemede meydana gelen hasar

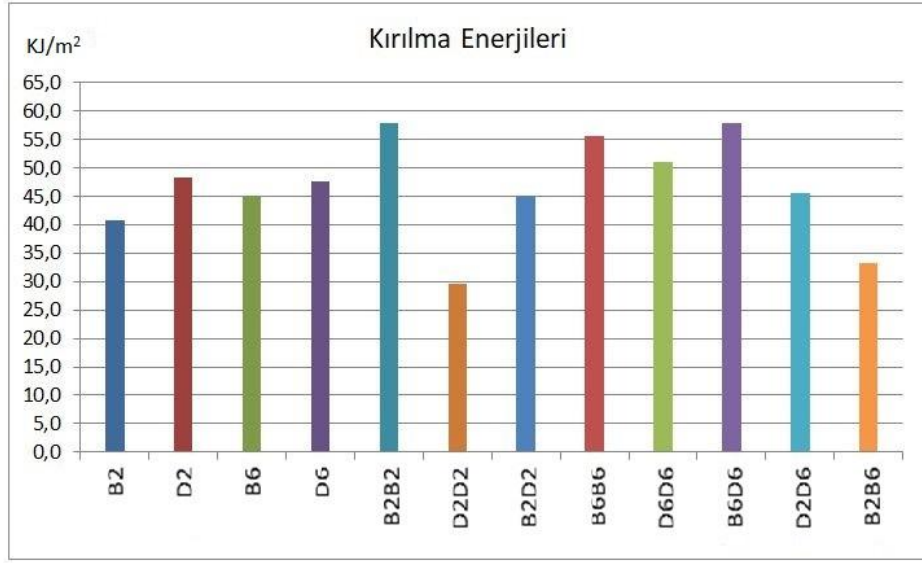
4.3 İzod Çentikli Darbe Test Sonuçları

Üretilen kompozit plakalara İzod darbe testleri beşer kez uygulanmış ve elde edilen sonuçların ortalamaları alınarak plakaların kırılma enerjileri hesaplanmıştır. 1 No’lu kompozit plaka numuneleri hariç diğer tüm plakalarda darbe sonrasında numunelerde parça kopması veya kırılma meydana gelmiştir. 1 No’lu kompozit plakaya ait numunelerde parça kopması veya kırılma meydana gelmemiş, plaka çekiç darbesini sönmüştür. Çizelge 4.21’de kompozit plakaların darbe test sonuçları ile Çizelge 4.22’de kompozit plakaların kırılma enerji grafiği verilmiştir.

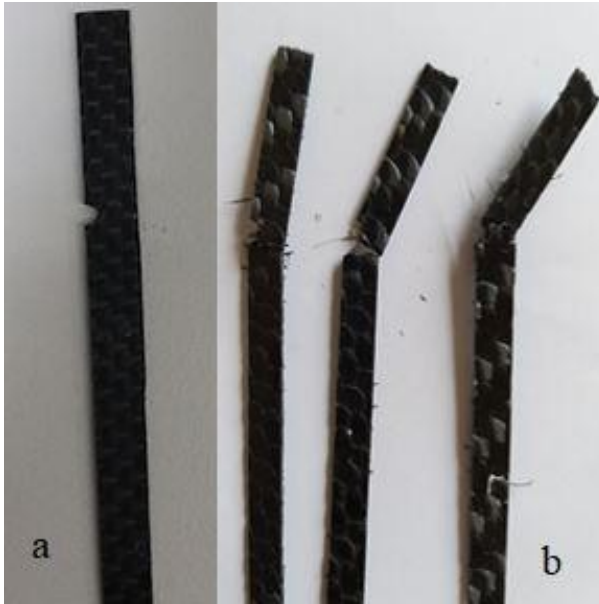
Çizelge 4.21. İzod çentik darbe testi sonuçları

Plaka No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Çentik Darbe Dayanımı (KJ/m ²)	40.9	48.3	44.8	47.6	58.0	29.6	45.2	55.7	51.0	57.9	45.5	33.3

Çizelge 4.22. Darbe testi kırılma enerjileri grafiği



Darbe testinde kullanılan deney numunesi ile darbe sonrasında numunede meydana gelen çeşitli deformasyon örnekleri Şekil 4.4’de gösterilmiştir.



Şekil 4.4. Izod çentikli darbe testi resimleri a) darbe öncesi deney numunesi, b) darbe sonrası deney numuneleri

5. SONUÇ (TARTIŞMA ve SONUÇ)

Bu deneysel tez çalışması sonucunda vakum destekli reçine transfer vakumlama metodu kullanılarak karbon dokuma kumaş takviyeli kompozit malzemelerin üretimi başarı ile gerçekleştirilmiştir.

Elde edilen kompozit malzemelerin mekanik özellikleri, çekme, üç nokta eğilme ve izod çentikli darbe testleri yapılarak belirlenmiştir.

ÇEKME DENEYİ

Bez ayağı kumaş en çok kesişmesi olan en yüksek örtme kabiliyeti olan ve isotropik(her yöne aynı) özellik gösterir. Dimi kumaş ise daha az kesişmesi olan ve daha açık yapıda anisotropik özellik gösterir. Bu nedenle dimi kumaşın içine daha çok reçine alması beklenir. Kompozit malzeme içerisinde takviye malzemesi oranı arttıkça mekanik özelliklerde iyileşme, matris oranı arttıkça mekanik özelliklerde gerileme beklenir.

1) 200 g/m² kumaşlarda bez ayağı kumaştan imal edilen kompozit malzeme (1 no'lu plaka), dimi kumaştan imal edilen 2 No'lu plakaya göre daha yüksek modül değeri göstermiştir. Aynı durum 600 g/m²'lik kumaşlar için de gözlemlenmiştir. 200 g/m² ve 600 g/m²'lik kumaşlar karşılaştırıldığında ise 200 g/m²'lik kumaşların daha yüksek modül değerine sahip olduğu görülmüştür. Bunun nedeni 200 g/m²'lik kumaşta atkı ve çözgü iplikleri üzerinde 3000 filament yer değiştirirken, 600 g/m²'lik kumaşta 12000 filament yer değiştirmektedir. Bu durum kırılğan yapıya sahip karbon elyaf için de avantaj oluşturmakta ve kompozit yapının modülünde azalmaya neden olmaktadır.

2) İki katlı kumaşlarda her iki yapının da 200 g/m² olduğu 5 No'lu plaka en yüksek modül değerini verirken, her ikisinin dimi olduğu 6 No'lu plaka en düşük modül değerini vermiştir. 7 No'lu plakada ise katlardan biri bez ayağı, diğeri dimi olan örgü tipinin etkisiyle 5 ve 6 No'lu plakalara göre orta dereceli modül değeri elde edilmiştir.

600 g/m²'lik iki katlı kumaşlar için ise 12000 filamentin yapı içerisinde hareket ediyor olması nedeniyle en iyi modül değeri 10 No'lu plakada elde edilirken en kötü modül değeri 8 No'lu plakada elde edilmiştir.

İki katlı kumaşlardan oluşan bu grup içerisinde en iyi modülü 5 No'lu plaka vermiştir.

3) İki farklı gramajlı kumaşlardan oluşan çift katlı kompozit yapılarda en iyi modül değerini 12 No'lu plaka vermiştir.

Uzama değerleri incelendiğinde; 12000 filamentli ipliklerin kullanıldığı 600 g/m²'lik kumaşlardan imal edilen kompozit plakaların, 3000 filamentli ipliklerden dokunmuş kumaşlardan imal edilen kompozit plakalara göre daha yüksek uzama değerine sahip olduğu görülmektedir. Bu durum reçinenin 12000 filament içerisine tam olarak nüfuz etmemesinden kaynaklanmakta ve filamentlerin daha serbest hareket ederek yapının uzama değerinin artmasına neden olmaktadır.

4) Şekil 4.1'de verilen kopma tipleri incelendiğinde tek katlı kumaşlarda a tipi düz kırılma, çift katlı kumaşlarda ise b tipi saçaklı kırılma şekli gözlemlenmiştir. Bu durum çekme esnasında çift katlı kumaşlarda her katın ayrı ayrı gerilmeye maruz kalmasından ve eş zamanlı olarak kırılmamasından kaynaklanmaktadır.

ÜÇ NOKTA EĞİLME TESTİ

Üç nokta eğilme deneyi sonuçlarına göre 1, 2, 3, 4, 5, 6 ve 7 No'lu plakalarda kırılma olmamıştır. 8, 9, 10, 11 ve 12 No'lu plakalarda kırılma meydana gelmiştir. Kumaş kalınlığı ve gramajı arttıkça kompozit malzemenin esneklik değeri azalmıştır. 200-600 g/m²'lik ve 600-600 g/m²'lik kumaşlardan yapılan kompozit plakaların esneklikleri ise tamamen ortadan kalkmıştır.

Üç nokta eğilmesinde en yüksek mukavemet değeri 10 No'lu plakada elde edilmiştir. Bunun nedeni 10 No'lu plakanın en yüksek kalınlığa ve gramaja sahip olmasıdır.

İZOD ÇENTİKLİ DARBE TESTİ

İzod çentikli darbe deneyleri sonuçlarına göre en iyi darbe dayanımı, çekme deneylerinde de en yüksek modüle sahip 5 No'lu kompozit yapıda elde edilmiştir.

Yapılan test sonuçları bir arada değerlendirildiğinde en iyi modül değerinin tek katlı bez ayağı örgüsünde olan kumaşlardan elde edilebileceği, kumaş kat sayısının artması ile modül değerinde azalmanın meydana geldiği tespit edilmiştir.

Kumaş gramajı ve kumaşta kullanılan karbon elyafın filament sayısı, elde edilmek istenilen kompozit yapının mekanik özellikleri üzerinde doğrudan etkilidir. Elastikiyetin önemli olduğu ve kuvvete maruziyet sonrasında kırılmanın istenmediği kompozit malzemelerde (ampüte sporcular için geliştirilen protez kol ve bacaklar gibi) tek katlı veya en fazla 200-200 katlama kumaşın kullanılmasın, darbe sonrasında enerjinin sönmülerek ani kırılmanın arzu edildiği (F1 tarzı yüksek hız otomobilleri) kompozit yapılarda ise 600 ve üzeri kumaşlardan yapılacak katlamalı imalatların faydalı olacağı düşünülmektedir.

Bu çalışma 3K ve 12K karbon elyafların kullanıldığı 200 ve 600 g/m² kumaşlar ile yürütülmüştür. Çalışmanın devamı olarak değişik gramajlarda 1K, 6K, 24K ve 48K'lık karbon elyafların kullanılması ile elde kompozit malzemenin mekanik özelliklerinde çeşitli iyileştirmelerin elde edilebileceği düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- Korkmaz, N. 2014.** Karbon elyaf takviyeli dokuma kumaş içeren kompozit malzeme üretimi ve mekanik özelliklerinin belirlenmesi üzerine bir çalışma. *Yüksek Lisans*, SDÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekstil Mühendisliği Anabilim Dalı, Isparta.
- Li, Y., Li, R., Lu, L., Huang, X. 2015.** Experimental study of damage characteristics of carbon woven fabric/epoxy laminates subjected to lightning strike. *Composites: Part A*, 79:164-175.
- Durgun, İ., Vatansever, O., Ertan, R., Yavuz, N. 2014.** Otomotiv sektöründe kullanılan kompozit parça imalat yöntemlerinin deneysel olarak karşılaştırılması. *Mühendis ve Makine*, 55(649):58-63.
- Kaplan, M. 2017.** Otomotiv endüstrisinde reçine transfer kalıplama (RTM): Güncel gelişmeler. *MÜTEB*, 5(1):47-53.
- Turhan, E. 2011.** 1x1 Örgü yapısındaki karbon elyafından elde edilen kompozit yapıların mekanik özelliklerinin incelenmesi. *Yüksek Lisans*, UÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekstil Mühendisliği Anabilim Dalı, Uşak.
- Sevencan, G. 2011.** 1x1 Örgü yapısındaki karbon ve cam elyafından elde edilen hibrit kompozit yapıların mekanik özelliklerinin incelenmesi. *Yüksek Lisans*, UÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekstil Mühendisliği Anabilim Dalı, Uşak.
- Eryılmaz, O. 2017.** Karbon lif takviyeli kompozit yapıların mekanik özelliklerinin geliştirilmesi. *Yüksek Lisans*, MÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekstil Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.
- Yaman, N., Öktem, T., Seventekin, N. 2007.** Karbon liflerinin özellikleri ve kullanım olanakları. *Tekstil ve Konfeksiyon*, 2:90-95.
- Durgun, İ. 2014.** Vakum infüzyon yöntemi ile kompozit parça üretimi, 7.Otomotiv Teknolojileri Kongresi, 26-27 Mayıs 2014, Bursa.
- Türkmen, İ., Köksal, N.S. 2013.** Cam elyaf takviyeli polyester matrisli kompozit malzemelerde (CTP) elyaf tabaka sayısına bağlı mekanik özellikleri ve darbe D-dayanımının incelenmesi. *CBÜ Fen Bilimleri Dergisi*, 8(2):17-30.
- Aral, N., Berkalp, Ö.B., Bakkal, M., Gök Sadıkoğlu, T. 2009.** Atık kumaş takviyeli polimer matrisli kompozitlerin darbe ve çekme davranışlarının incelenmesi. *Tekstil ve Konfeksiyon*, 2:139-144.
- Chawla, K.K., 2013** Composite materials science and engineering third edition. Springer, New York, USA, 542 pp.
- Yi, X.S. 2018.** An introduction to composite materials: Composite materials engineering volume 1 fundamentals of composite materials , Ed.: Yi, X.S., DU. S., Zhang. L. Springer, Beijing, China, pp:1-62.
- Park, S.J., Lee S.L., 2015.** History and structure of carbon fibers: Carbon fibers, Ed.: Park, S.J., Dordrecht, pp:1-62.
- Chung, D.D.L. 2010.** Composite material structure and processing: Composite materials science and applications second edition, Ed.: Chung, D.D.L. London, pp:1-4
- Anonim, 2019.** Conbility's tape placement applicator installed at Technical Center AIMEN in Spain, <https://www.compositesworld.com/news/conbilitys-tape-placement-applicator-installed-at-technical-center-aimen-in-spain> (Erişim tarihi:18.08.2019)
- Demir, O 2017.** Çentik darbe deney föyü. Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü, Bilecik.
- Anonim, 2016.** Üç nokta eğme deney föyü. Bursa Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü, Bursa.

Mehmet, Ç., Kaya, S. 2015. Eğilme dayanımı. Karadeniz teknik üniversitesi maden mühendisliği bölümü, Trabzon.

Mindivan, H., Sönmez. E. 2017. Mühendislikte deneysel metodlar dersi II ders notları. Bilecik şeyh edebali üniversitesi makine mühendisliği bölümü, Bilecik.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Erdal GÜLCAN
Doğum Yeri ve Tarihi : Ankara 24/12/1980
Yabancı Dil : İngilizce

Eğitim Durumu
Lise : Bursa Atatürk Lisesi 1999
Lisans : Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Kimya Bölümü 2004
Yüksek Lisans : Uludağ Üniversitesi Tekstil Mühendisliği Devam ediyor

Çalıştığı Kurum/Kurumlar : 2005-2006: Koza Tekstil LTD ŞTİ. Düz boya vardiya amiri.
2006-2008: Sönmez Filament A.Ş. Kalite Kontrol Şefi
2008-2009: Ekoçed Çevre Danışmanlık Teknik Bölüm Şefi
2009-2017: Işıksoy Tekstil A.Ş. Kalite Kontrol Şefi
2017-Devam ediyor: Işıksoy Tekstil A.Ş. Ar-Ge Merkezi
Müdürü

İletişim (e-posta) : erdal_gulcan@hotmail.com

Yayınları : Waterproof breathable functional application for polyester fabric. Sözlü Sunum. 2. Uluslararası İnovatif Tekstiller Kongresi Tekirdağ, ICONTEX 2019. 17-18 Nisan 2019, ISBN TK NO: 978-605-4265-58-9 p:207 - 213.
: Elastan İçeren Poliester Dokuma Kumaşların Boyanması. Poster sunum. 4. Uluslararası Bilimsel Araştırmalar Kongresi Yalova, UBAK 2019, ISBN TK No: 78-605-67945-7-5 p:382-389.
: Industrial Applications for Sustainable One-bath Pre-treatment and Dyeing of Lyocell Fabrics. Sözlü Sunum. 3. Uluslararası Akdeniz Bilim ve Mühendislik Kongresi Adana, IMSEC 2018. 24-26 Ekim 2018, ISBN TK NO: 978-605-67067-2-1 Cilt 1 s:680-684

ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ

TEZ ÇOĞALTMA VE ELEKTRONİK YAYIMLAMA İZİN FORMU

Yazar Adı Soyadı	ERDAL GÜLCAN
Tez Adı	Karbon Kumaş Takviyeli Kompozit Malzemelerin Fiziksel Özelliklerinin İncelenmesi
Enstitü	Fen Bilimleri
Anabilim Dalı	Tekstil Mühendisliği
Bilim Dalı	Tekstil Mühendisliği
Tez Türü	Yüksek Lisans
Tez Danışman(lar)ı	Prof. Dr. Aslı HOCKENBERGER
Çoğaltma (Fotokopi Çekim) İzni	<input checked="" type="checkbox"/> Tezimden fotokopi çekilmesine izin veriyorum <input type="checkbox"/> Tezimin sadece içindekiler, özet, kaynakça ve içeriğinin % 10 bölümünün fotokopi çekilmesine izin veriyorum <input type="checkbox"/> Tezimden fotokopi çekilmesine izin vermiyorum
Yayımlama İzni	<input checked="" type="checkbox"/> Tezimin elektronik ortamda yayımlanmasına izin veriyorum <input type="checkbox"/> Tezimin elektronik ortamda yayımlanmasının ertelenmesini istiyorum 1 yıl <input type="checkbox"/> 2 yıl <input type="checkbox"/> 3 yıl <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> Tezimin elektronik ortamda yayımlanmasına izin vermiyorum

Hazırlamış olduğum tezimin yukarıda belirttiğim hususlar dikkate alınarak, fikri mülkiyet haklarım saklı kalmak üzere Uludağ Üniversitesi Kütüphane ve Dokümantasyon Daire Başkanlığı tarafından hizmete sunulmasına izin verdiğimi beyan ederim.

Tarih: 22.10.2019

İmza: 