

**T.C.
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**



**KOMPOZİT PLAKALARDA FARKLI TABAKA SAYISI,
FARKLI YAPI VE İSTİFLEME SIRASINA BAĞLI OPTİMUM
MEKANİK ÖZELLİKLERİN BELİRLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

YAKUP DABAN

BALIKESİR, HAZİRAN - 2016

**T.C.
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**



**KOMPOZİT PLAKALARDA FARKLI TABAKA SAYISI,
FARKLI YAPI VE İSTİFLEME SIRASINA BAĞLI OPTİMUM
MEKANİK ÖZELLİKLERİN BELİRLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

YAKUP DABAN

Jüri Üyeleri : Yrd.Doç.Dr. Raif SAKİN (Tez Danışmanı)

Prof.Dr. İrfan AY

Doç.Dr. Mehmet AKTAŞ

BALIKESİR, HAZİRAN - 2016

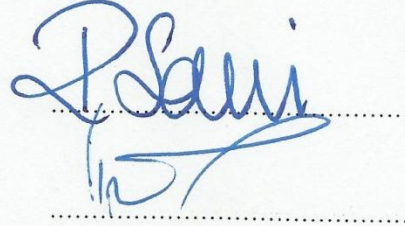
KABUL VE ONAY SAYFASI

Yakup DABAN tarafından hazırlanan “**KOMPOZİT PLAKALARDA FARKLI TABAKA SAYISI, FARKLI YAPI VE İSTİFLEME SIRASINA BAĞLI OPTİMUM MEKANİK ÖZELLİKLERİN BELİRLENMESİ**” adlı tez çalışmasının savunma sınavı 22.06.2016 tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Danışman
Yrd.Doç.Dr. Raif SAKİN



Üye
Prof.Dr. İrfan AY

Üye
Doç.Dr. Mehmet AKTAŞ



Jüri üyeleri tarafından kabul edilmiş olan bu tez Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca onanmıştır.

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Doç. Dr. Necati ÖZDEMİR

.....

Bu tez çalışması Balıkesir Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından 2013/17 nolu proje ile desteklenmiştir.

ÖZET

KOMPOZİT PLAKALARDA FARKLI TABAKA SAYISI, FARKLI YAPI VE İSTİFLEME SIRASINA BAĞLI OPTİMUM MEKANİK ÖZELLİKLERİN BELİRLENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

YAKUP DABAN

BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

(TEZ DANIŞMANI: YRD.DOÇ.DR. RAİF SAKİN)

BALIKESİR, HAZİRAN 2016

Bu çalışmada, kompozit plakalarda cam-dokuma tipi, istifleme sırası ve tabaka sayısı gibi parametrelerin mekanik özelliklere etkisi araştırılmıştır. Kompozit plakalar vakum destekli reçine transfer kalıplama (RTM) yöntemi ile üretilmiştir. Bu amaçla, laboratuvar ölçekli RTM prosesi kurulmuştur. Kalıbın alt ve üst yüzeylerinde parlatılmış paslanmaz çelik levhalar kullanılarak iki yüzü düzgün plakalar üretilmiştir. Kapalı kalıp içindeki hava -700 mmHg'lik basınç ile vakumlanırken, kalıp merkezinden farklı hız ve basınçlarda reçine enjeksiyonu yapılmıştır. Fiber olarak, ağırlıkları 800-500-300-200 gr/m² olan cam-dokumalar kullanılmıştır. Reçine ise, RTM'ye uygun Polipol-336 polyester'dir. On yedi farklı istifleme ve altı farklı tabaka sayısına sahip plakalar elde edilmiştir. RTM prosesinde cam-dokuma tipi ve artan tabaka sayısına bağlı olarak ıslanma sorunları ile başa çıkabilmek için 1-3 kez reçine sirkülasyonu uygulanmıştır. RTM sonrası kalıp üzerine ≈135 KPa'lık kürlenme basıncı uygulanmıştır. Elde edilen kompozit plakalar için çekme ve üç noktadan eğme gibi temel mekanik özellikler incelenmiştir. Tekrarlı enjeksiyon ile iyi ıslanana cam dokumalar, kompozit plakanın mekanik özelliklerini arttırmıştır. İstifleme sırasında reçine geçirgenliği en düşük olan 200 gr/m² dokumaların merkezde olması çekme mukavemetini düşürürken eğilme mukavemetini arttırmıştır. Sonuçta Yanıt Yüzey Yöntemi (YYY) kullanılarak optimum RTM parametreleri, istifleme sırası ve tabaka sayısı önerilmiştir.

ANAHTAR KELİMELER: Kompozit Plaka, Tabaka sayısı, Cam-Dokuma, İstifleme Sırası (Dizisi), Optimizasyon, Yanıt Yüzey Yöntemi, Mekanik Özellikler

ABSTRACT

THE EFFECT OF WOVEN-FABRIC DENSITY, STACKING SEQUENCE AND THE NUMBER OF LAYERS ON THE OPTIMUM MECHANICAL PROPERTIES OF GLASS/POLYESTER COMPOSITES PRODUCED BY RTM

MSC THESIS

YAKUP DABAN

BALIKESİR UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE

MECHANICAL ENGINEERING

(SUPERVISOR: ASSIST. PROF.DR. RAİF SAKİN)

BALIKESİR, JUNE 2016

The effects of Glass-Woven type, Stacking sequence and such as number of layer parameters on composite plates were investigated to mechanical properties in this study. Composite plates were manufactured with of vacuum assisted resin transfer molding (RTM) method. Laboratory RTM process has been established for this purpose. Two sides smooth plates were manufactured utilizing polished stainless steel plates on the top and bottom surfaces of the mold. While the air is vacuumed - 700 mmHg pressure inside of a covered mold, the injection of resin has been made from the center of the mold with different speed and pressure. 800 - 500 - 300 - 200 gr/m² weights Glass-Woven is used as fiber. The resin is the Polipol-336 polyester conveniently to RTM. Seventeen different Stacking and six different number of layer plates have been obtained. The resin circulation has been applied 1-3 times depending on glass-woven type and increasing number of layer to cope of wetting issues on RTM process. Post RTM, ≈135 KPa curing pressure has been applied on the mold. The tensile strength and three point bending as well as basic mechanical properties have been studied for the resulting composite plates. Well wetted glass-woven with repeated injection, increase mechanical properties of the composite plates. Resin permeability is the lowest 200 gr/m² to be at the center during stacking while decreasing tensile strength, increasing bending strength. As a result of using Response Surface Methodology (RSM) optimum RTM parameters, Stacking sequence and number of layer has been proposed.

KEYWORDS: Composite Plate, Number of Layer (laminate), Glass-Woven, Stacking Sequence, Optimization, Response Surface Method, Mechanical Properties

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER	iii
ŞEKİL LİSTESİ	v
ÖNSÖZ	viii
1. GİRİŞ	1
1.1 Literatür Araştırması.....	2
1.2 Tezin Amacı	3
2. KOMPOZİT MALZEMELER	4
2.1 Kompozit Malzemenin Tanımı.....	4
2.2 Kompozit Malzemenin Avantajları	4
2.3 Kompozit Malzemenin Dezavantajları	5
3. KOMPOZİT MALZEMELERİN SINIFLANDIRILMASI	7
3.1 Matris Malzemesine Göre Sınıflandırılması	7
3.1.1 Polimer Matrisli Kompozitler	7
3.1.2 Metal Matrisli Kompozitler.....	8
3.1.3 Seramik Matrisli Kompozitler.....	9
3.2 Takviye Şekline Göre Sınıflandırılması.....	9
3.2.1 Fiber Takviyeli Kompozit Malzemeler.....	9
3.2.2 Partikül Takviyeli Kompozit Malzemeler.....	10
3.2.3 Tabakalı Kompozit Malzemeler	10
4. FİBER TAKVİYELİ KOMPOZİTLER	13
4.1 Cam Fiber Takviyeli Plastik Malzemeler	13
4.1.1 Cam Elyaf Çeşitleri.....	13
4.1.1.1 Fıtil.....	13
4.1.1.2 Cam Elyafı İplik	14
4.1.1.3 Kumaşlar	14
4.1.1.4 Kırılmış Demetler	15
4.1.1.5 Öğütülmüş Lifler	15
4.1.2 Polyester Reçine Çeşitleri	16
4.1.3 Cam Elyaf Takviyeli Plastiklerin Üretim Yöntemleri	16
4.1.3.1 El Yatırması (Hand Lay Up)	17
4.1.3.2 Püskürtme Yöntemi (Spray-Up).....	18

4.1.3.3	Profil Çekme / Pultruzyon.....	18
4.1.3.4	Elyaf Sarma Yöntemi (Filament Winding).....	19
4.1.3.5	Reçine Transfer Metodu (RTM / Reçine Enjeksiyonu).....	20
4.2	Kompozit Plakaların Dayanımını Etkileyen Faktörler	23
4.2.1	Fiber Açısının Mukavemete Etkisi	23
5.	VAKUM DESTEKLİ RTM MAKİNESİ TASARIMI VE İMALATI.....	25
5.1	RTM Makinesinin Çalışma Prensibi.....	27
6.	DENEYSEL ÇALIŞMALAR	28
6.1	Çalışmanın Amacı	28
6.2	Kompozit Plaka İmalatı İçin Kullanılan Materyaller	28
6.2.1	Reçine	28
6.2.2	Hızlandırıcı (Katalizör).....	29
6.2.3	Sertleştirici	29
6.2.4	Kalıp Ayırıcı.....	30
6.2.5	Cam Elyaf.....	30
6.3	Kompozit Plakaların Üretiminin Aşamaları.....	30
6.3.1	RTM Metodu ile Plaka İmalatı.....	32
6.3.1.1	Fiber Malzemesinin Tam Islanması ile İlgili Yapılan Çalışmalar	36
6.3.2	Kalıptan Çıkan Plakaların Kesimi	40
7.	YÖNTEM VE BULGULAR.....	42
7.1	Malzeme Özelliklerinin Belirlenmesi	42
7.1.1	Tabakalı Kompozit Malzemenin Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi	42
7.1.1.1	Tabakalı Kompozit Malzemenin Çekme Özelliklerinin Belirlenmesi	43
7.1.1.2	Tabakalı Kompozit Malzemenin Eğilme Özelliklerinin Belirlenmesi	44
7.1.2	Test Sonuçlarının Değerlendirilmesi	49
7.2	OPTİMİZASYON	54
7.3	Yanıt Yüzey Yöntemi (Response Surface Method)	55
7.3.1	Yanıt Yüzey Yöntemi İçin Deney Tasarımının Oluşturulması.....	56
7.3.2	Parametrelerin Regresyon Denklemi ve Grafiği	59
7.3.3	RSM Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	63
8.	SONUÇ VE ÖNERİLER.....	64
9.	KAYNAKLAR.....	66
10.	EKLER.....	72

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 3.1: Dokuma ve tek yönlü elyafların farklı yönlerdeki özellikleri	11
Şekil 3.2: Tabakalarda yönlendirme şekilleri	11
Şekil 4.1: Direk sarma fitil ve bileşik fitil	13
Şekil 4.2: Cam elyafı iplik	14
Şekil 4.3: Kumaş dikim şekillerine göre elyaflar	14
Şekil 4.4: Kırpılmış elyaf.....	15
Şekil 4.5: Öğütülmüş lifler.....	16
Şekil 4.6: El yatırması yöntemi	17
Şekil 4.7: Püskürtme yöntemi	18
Şekil 4.8: Pultrüzyon yöntemi	19
Şekil 4.9: Elyaf sarma yöntemi	20
Şekil 4.10: RTM ile kompozit parça üretim yöntemindeki adımları	21
Şekil 4.11: RTM uygulama alanları.	22
Şekil 4.12: Mukavemete fiber açısının etkisi	24
Şekil 5.1: Vakum destekli RTM makinesi ve temel elemanları.	25
Şekil 5.2: RTM makinesi şematik gösterimi.....	26
Şekil 5.3: Temel parametrelerin takibi ve kontrolü.....	26
Şekil 5.4: RTM makinesinin çalışma prensibi.	27
Şekil 6.1: Dokuma elyafların kesimi.	32
Şekil 6.2: Kalıp ayırıcı sürülmesi.	33
Şekil 6.3: Dokuma elyafların kalıba yerleştirilmesi.	33
Şekil 6.4: Polyester reçinenin hazırlanışı.....	34
Şekil 6.5: Kütleme basıncının verilmesi.....	35
Şekil 6.6: Plakanın kalıptan çıkarılması.	36
Şekil 6.7: Elde edilen kompozit plaka numuneler.....	37
Şekil 6.8: Tekrarlı enjeksiyon sistemi.	38
Şekil 6.9: Tekrarlı enjeksiyon işlemi sırasında oluşan hava boşluğu.....	39
Şekil 6.10: Tekrarlı enjeksiyon sistemi şematik gösterimi.	39
Şekil 6.11: Kompozit plakanın kesimi.	40
Şekil 6.12: Deney numunelerinin farklı açılarda kesimi.	41
Şekil 7.1: Zwick Roell test cihazı.....	43
Şekil 7.2: Çekme numunesi ve ölçüleri.	44
Şekil 7.3: 2 ₂ 3 ₂ 5 ₄ numunesi çekme testi.	44
Şekil 7.4: Eğilme numunesi ölçüleri.	45
Şekil 7.5: 2 ₂ 3 ₂ 5 ₄ numunesi eğilme testi.....	45
Şekil 7.6: Eğilme testi.....	45
Şekil 7.7: 0/90 ⁰ Yönlü numunelerin çekme ve eğilme mukavemeti.	49
Şekil 7.8: 15/75 ⁰ Yönlü numunelerin çekme ve eğilme mukavemeti.	50
Şekil 7.9: 30/60 ⁰ Yönlü numunelerin çekme ve eğilme mukavemeti.	50
Şekil 7.10: 45/45 ⁰ Yönlü numunelerin çekme ve eğilme mukavemeti.	51
Şekil 7.11: Fiber açısının çekme mukavemetine etkisi.	53
Şekil 7.12: Fiber açısının eğilme mukavemetine etkisi.	54
Şekil 7.13: Yanıt Yüzey Yöntemi için işlem akışı	55
Şekil 7.14: Bağımsız değişkenlerin ve deney sonuçlarının paket programa girilmesi.	59

Şekil 7.15: Kuadratik model için ANOVA tablosu.....	59
Şekil 7.16: Çekme mukavemeti ile parametreler arasındaki ilişkinin yüzey grafikleri (3D görünümü).....	60
Şekil 7.17: Eğilme mukavemeti ile parametreler arasındaki ilişkinin yüzey grafikleri (3D görünümü).....	61
Şekil 7.18: Çekme ve eğilme mukavemeti için parametrelerin optimizasyonu.....	62
Şekil A.1: D1 grubu numunelerin çekme test sonuçları.....	72
Şekil A.2: D2 grubu numunelerin çekme test sonuçları.....	72
Şekil A.3: D3 grubu numunelerin çekme test sonuçları.....	73
Şekil A.4: D4 grubu numunelerin çekme test sonuçları.....	73
Şekil A.5: D5 grubu numunelerin çekme test sonuçları.....	74
Şekil A.6: D6 grubu numunelerin çekme test sonuçları.....	74
Şekil A.7: D7 grubu numunelerin çekme test sonuçları.....	75
Şekil A.8: D8 grubu numunelerin çekme test sonuçları.....	75
Şekil A.9: D9 grubu numunelerin çekme test sonuçları.....	76
Şekil A.10: D10 grubu numunelerin çekme test sonuçları.....	76
Şekil A.11: D11 grubu numunelerin çekme test sonuçları.....	77
Şekil A.12: D12 grubu numunelerin çekme test sonuçları.....	77
Şekil A.13: D13 grubu numunelerin çekme test sonuçları.....	78
Şekil A.14: D14 grubu numunelerin çekme test sonuçları.....	78
Şekil A.15: D15 grubu numunelerin çekme test sonuçları.....	79
Şekil A.16: D16 grubu numunelerin çekme test sonuçları.....	79
Şekil A.17: D17 grubu numunelerin çekme test sonuçları.....	80
Şekil B.1: D1 grubu numunelerin çekme test sonuçları.....	81
Şekil B.2: D2 grubu numunelerin çekme test sonuçları.....	81
Şekil B.3: D3 grubu numunelerin çekme test sonuçları.....	82
Şekil B.4: D4 grubu numunelerin çekme test sonuçları.....	82
Şekil B.5: D5 grubu numunelerin çekme test sonuçları.....	83
Şekil B.6: D6 grubu numunelerin çekme test sonuçları.....	83
Şekil B.7: D7 grubu numunelerin çekme test sonuçları.....	84
Şekil B.8: D8 grubu numunelerin çekme test sonuçları.....	84
Şekil B.9: D9 grubu numunelerin çekme test sonuçları.....	85
Şekil B.10: D10 grubu numunelerin çekme test sonuçları.....	85
Şekil B.11: D11 grubu numunelerin çekme test sonuçları.....	86
Şekil B.12: D12 grubu numunelerin çekme test sonuçları.....	86
Şekil B.13: D13 grubu numunelerin çekme test sonuçları.....	87
Şekil B.14: D14 grubu numunelerin çekme test sonuçları.....	87
Şekil B.15: D15 grubu numunelerin çekme test sonuçları.....	88
Şekil B.16: D16 grubu numunelerin çekme test sonuçları.....	88
Şekil B.17: D17 grubu numunelerin çekme test sonuçları.....	89

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 4.1: Takviye biçiminin özelliklere etkisi	23
Tablo 6.1: Sertleşmiş polyester reçine mekanik özellikleri	29
Tablo 6.2: Cam fiber mekanik özellikleri.	30
Tablo 6.3: GFRP kompozit plakanın özellikleri.	31
Tablo 6.4: Tabaka sayısı ve istifleme sırası.	31
Tablo 6.5: RTM parametreleri.	32
Tablo 7.1: 0/90 ⁰ yönlü numunelerin çekme ve eğilme testi sonuçları.	46
Tablo 7.2: 15/75 ⁰ yönlü numunelerin çekme ve eğilme testi sonuçları.	46
Tablo 7.3: 30/60 ⁰ yönlü numunelerin çekme ve eğilme testi sonuçları.	47
Tablo 7.4: 45/45 ⁰ yönlü numunelerin çekme ve eğilme testi sonuçları.	47
Tablo 7.5: Çekme mukavemetinin plaka kalınlığı ile kıyaslanması.	48
Tablo 7.6: Eğilme mukavemetinin plaka kalınlığı ile kıyaslanması.	48
Tablo 7.7: Plaka kalınlığı, çekme ve eğilme mukavemeti karşılaştırması.	52
Tablo 7.8: Kodlanmış parametrelerin gerçek değerleri.	56
Tablo 7.9: Bağımsız değişken parametreler.	57
Tablo 7.10: RSM için bağımsız değişkenler ve yanıt değerleri deneme deseni.	58

ÖNSÖZ

Yüksek lisans eğitimi boyunca bilgi ve birikimini benden esirgemeyen, ilgi ve alakasını her daim gösteren, insani ve ahlaki değerleri ile de örnek edindiğim değerli hocam Yrd. Doç. Dr. Raif SAKİN'e,

RTM Makinesinin yazılımı konusunda destek veren Balıkesir Üniversitesi Edremit Meslek Yüksekokulu'nda görevli Elektronik ve Haberleşme Yüksek Mühendisi Öğr.Gör. Akif Birol DUMANAY'a,

RTM Makinesinin imalatı aşamasında özverili çalışmaları ile destek veren Edremit Meslek Yüksekokulu öğrencilerine,

Proje sürecinin her aşamasında birlikte çalıştığım değerli arkadaşım Mak.Müh. Mehmet GÜLNAR'a,

Mekanik testler ile ilgili her konuda yardımcı olan teknisyen Metin GÜL ve Arş.Gör. Fatih BALIKOĞLU'na,

Tüm hayatım boyunca maddi ve manevi olarak hep yanımda bulunan ve beni bugünlere taşımada büyük rol alan anne ve babama,

Hayatımı beraber paylaştığım, acı tatlı anlarda yanımda olan sevgili eşim Büşra'ya,

Saygı, sevgi ve teşekkürlerimi sunarım.

1. GİRİŞ

Malzemeler genellikle metaller, seramikler ve organik malzemeler olarak üç ana gruba ayrılırlar. Bu üç grubun birbirlerine göre üstün ve zayıf yönleri vardır. Bu üç ana grubun yanında, aynı ya da farklı gruplardan iki ya da daha fazla malzemenin uygun olan özelliklerini tek malzemedeki toplamak, ya da yeni bir özellik ortaya çıkarmak amacıyla makro düzeyde birleştirilmesi ile oluşturulan malzemeler, kompozit malzemeler olarak adlandırılır. Kompozit malzemelere bir tür 'ısmarlama malzeme' gözü ile bakılabilir. Atomsal veya moleküler düzeyde birleştirilen malzemeler makroskobik olarak homojen olduklarından kompozit malzeme olarak sınıflandırılmazlar. Kompozit malzemelerin avantajı bileşenlerinin en iyi özelliklerini bir araya getirmesidir. Günümüzde çok gelişmiş olan ve sürekli gelişmekte olan kompozit malzemeler, aslında binlerce yıldan beri kullanılmaktadır. Örneğin, çamur içine karıştırılan saman çöpleri ile yapılan kerpiç, bir kompozit malzemedir. Ok yayı yapılırken üst üste konulan, özellikleri ve lif yönleri farklı ağaç levhalar kompozit bir malzeme oluştururlar. Ayrıca kompozit malzemeler doğada da değişik biçimlerde bulunmaktadır (ağaçlar, kemik, vs.) [1].

Kompozit malzeme üretiminin bilinçli olarak ele alınması ve bilimsel yaklaşımlarla yeni malzemelerin geliştirilmesi ancak 1940'lı yıllarda cam takviyeli plastiklerin kullanımı ile başlamıştır. Önemli ilk uygulamalara örnek olarak radar kubbeleri gösterilebilir. Cam takviyeli plastikler elektromanyetik geçirgenlik, hafiflik, atmosfer koşullarına dayanıklılık ve mekanik özellikleri nedeniyle bu amaç için kullanılabilir en uygun malzemedir. İlk CTP (Cam Takviyeli Plastik) tekne 1942'de yapılmış, ilk elyaf sarma patenti ise 1946'da A.B.D.'de alınmıştır. 1950'lerde ise uçak pervaneleri kompozit malzemedeki yapılmaya başlanmıştır. Bugün uçak endüstrisinde % 30'a varan oranlarda kullanılan kompozit malzemelere örnek olarak, çeşitli polimerler (plastikler), içerisine gömülmüş karbon lifleri, alüminyum içerisine dizilmiş boron lifleri veya 1000°C üzerindeki sıcaklıklarda çalışabilen malzemeler gösterilebilir [2].

1.1 Literatür Araştırması

Üretim teknolojisinde kullanılan kompozit malzemeler ve bunların kullanım alanları, gün geçtikçe yaygınlaşmaktadır. İyi özellik kombinasyonlarına sahip olması nedeniyle, elyaf takviyeli polimer kompozitler, özellikle otomotiv, uçak sanayi, uzay gemileri ve deniz araçları üretiminde oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır [3]. Bunun en önemli sebebi ise GFRP malzemeler metallere göre daha düşük yoğunluğa, daha yüksek özgül mukavemete (mukavemet/özgül ağırlık) ve özgül elastiklik modülüne sahip olmasıdır. GFRP'lerin özgül ağırlığı 1.4 ile 1.9 gr/cm³ arasında değişir. Bu değer alüminyumdan %30-50, karbon çeliğinden %75-80 daha düşüktür. Bu düşük yoğunluk özelliği GFRP'lere metallerle kıyaslandığında oldukça yüksek değerlerde özgül mukavemet ve özgül modül özelliği kazandırır [4-6].

Tek bir cam elyafının çekme mukavemeti (yaklaşık 4000 MPa) en kuvvetli çeliğinkinden (yaklaşık 1750 MPa) bile daha yüksektir. Ancak, demetlerin yapısına ve örüldüğü yapıya göre, genellikle imal edilen dokumaların çekme mukavemeti çeliğinkinden daha düşüktür, ya da aynı seviyededir. Kompozit parçayı oluşturan ikinci malzeme olan termoset polimerlerin çekme mukavemeti (35–170 MPa) ise metallere kıyasla çok düşüktür[7, 8]. Teorik olarak malzemenin elyaf hacim oranı arttıkça, mukavemetinin de artması gerekir. Oysa mukavemet belirli bir kritik hacim oranına kadar azalmakta daha sonra artmaktadır. Bu oranın üst limiti, elyafın matris tarafından sarılabilmesine bağlıdır. Teorik olarak bu oran, %91 denilmesine karşılık, pratikte %80 olarak uygulanır. Değişik çalışmalarda, hacim oranının malzemenin mekanik özelliklerine etkisi ele alınmıştır. Eğilme mukavemetinin, %10 elyaf ağırlık oranına kadar azaldığı, bu orandan sonra ise arttığı görülmüştür. Malzeme sertliğinin ise elyaf hacim oranı arttıkça, arttığı saptanmıştır [9]. Kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini etkileyen faktörlerden biri de elyaf yönlenmesidir. Elyaf tek yönde olduğu gibi, birbirine dik vaziyette veya rasgele yönlenmiş olabilirler. Lifler tek yönde yönlendiğinde, elyaf yönünde maksimum mukavemet elde edilir. Bu durumda, mekanik özellikler yöne göre büyük ölçüde değişmektedir [10].

Literatürde RTM proses parametrelerinin kompozit plakanın mekanik özelliklerine etkisi ile ilgili [11, 12], fiber tipi, istifleme sırası ve tabaka sayısının kompozit plakaların bazı mekanik özellikleri üzerine etkisi ile ilgili bazı çalışmalar yapılmıştır [13-16]. Akbulut M. ve Sönmez F.O. [17] ise minimum tabaka kalınlığı

veya tabaka ağırlığı için kompozit tabakalarının optimizasyonu ile ilgili çalışmışlardır. Manjunatha S.C. ve Gowda C.V. [18] el yatırması metodu ile elde ettikleri kompozit plakaların fiber oryantasyon açısının mekanik özelliklere etkisini araştırmışlardır. Mekanik özelliklerin, fiber açısı 90° de maksimum 45° de minimum olduğunu tespit etmişlerdir. Özdemir S. [19] farklı oryantasyon açısına sahip tabakalı ankastre kompozit kirişlerin mekanik analizini, sonlu elemanlar yöntemiyle yapılmış ve çıkan sonuçlar yanıt yüzey metodu ile değerlendirilmiştir. Ahmed K.S. ve Vijayarangan S. ise [20] jute-dokuma ve cam-dokuma ile hibrid olarak dizilmiş polyester kompozit plakaların çekme, eğilme gibi mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Tabaka istifleme sırası etkisinin çekmeden daha çok eğilme mukavemeti üzerinde etkili olduğunu tespit etmişlerdir.

Kompozit parçaların kalitesi öncelikle içerdiği makro/mikro hava boşluklarının yüzdesi ile ilgilidir. Yapılan bazı çalışmalarda enjeksiyon hızının artmasıyla mikro hava boşlukları artarken, makro hava boşlukları ise azalmaktadır [21]. RTM ile imal edilen tabakalı kompozitlerde yapı sıkılaştıkça veya fiber oranı arttıkça, gerekli olan enjeksiyon basıncı da artmaktadır. Ayrıca kontrollü bir vakum desteği daima hava boşluğu yüzdesini azaltmaktadır [22].

1.2 Tezin Amacı

Bu çalışmada vakum destekli RTM makinesi tasarlanmış ve yapılan çalışmalar neticesinde makine ile ilgili iyileştirmeler yapılmıştır. Vakum destekli RTM yöntemiyle farklı tabaka sayısı, farklı yapı ve istifleme sırasına bağlı olarak mekanik özelliklerin değişimini inceleyerek kompozit plakaların hangi parametlerden ne ölçüde etkilendiğinin bulunması ve buna bağlı olarak optimum parametrelerin belirlenerek mekanik özelliklerin en iyi olduğu sonuçlar bulunmaya çalışılmıştır. Çalışmada tabakalı kompozit plakaların dört farklı açıda kesilerek fiber oryantasyon açısının mekanik özellikler üzerindeki etkileri incelenmiştir.

2. KOMPOZİT MALZEMELER

2.1 Kompozit Malzemenin Tanımı

Kompozit malzemeler, iki ya da daha fazla sayıdaki, aynı veya farklı gruptaki malzemelerin en iyi özelliklerini, yeni ve tek bir malzemedeki toplamak amacıyla makro ölçüde birleştirilmesiyle oluşan malzemeler olarak adlandırılırlar. Kompozit malzemenin beklenen değişik fiziksel, mekaniksel veya kimyasal özellikler, bu özelliklere sahip bileşenler tarafından sağlanmaktadır. Makro ölçüde heterojen karakterli bir yapıya sahip olan kompozit malzemelerin içyapıları incelendiğinde yapı bileşenlerinin seçilip ayırt edilmesi mümkündür. Yapı bileşenlerinin farklı karakteristik özellikleri kompozit malzemenin yapısında bütünleşir. Bu nedenle kompozitin sahip olduğu özelliklerin tümünü tek bir yapı bileşeninde görmek mümkün değildir [23].

Bir malzemenin kompozit malzeme olabilmesi için;

- İnsan yapısı olması, dolayısıyla doğal bir malzeme olmaması,
- Kimyasal bileşenleri birbirinden farklı ve belirli ara yüzleri ayrılmaz en az iki malzemenin bir araya getirilmiş olması,
- Farklı malzemenin üç boyutlu olarak bir araya getirilmiş olması,
- Bileşenlerinin hiç birinin tek başına sahip olmadığı özellikleri taşıması, dolayısı ile bu amaçla üretilmiş olması [9].

2.2 Kompozit Malzemenin Avantajları

Kompozit malzemelerin birçok özelliklerinin metallerinkine göre çok farklılıklar göstermesinden dolayı, metal malzemelere göre önem kazanmışlardır. Kompozitlerin özgül ağırlıklarının düşük oluşu hafif konstrüksiyonlarda kullanımda büyük bir avantaj sağlamaktadır. Bunun yanında, fiber takviyeli kompozit malzemelerin korozyona dayanımları, ısı, ses ve elektrik izolasyonu sağlamaları da ilgili kullanım alanları için bir üstünlük sağlamaktadır.

- **Yüksek Mukavemet:** Kompozitlerin çekme ve eğilme mukavemeti birçok metalik malzemeye göre çok daha yüksektir. Ayrıca kalıplama özelliklerinden dolayı kompozitlere istenen yönde ve bölgede gerekli mukavemet verilebilir. Böylece malzemedan tasarruf yapılarak, daha hafif ve ucuz ürünler elde edilir.
- **Hafiflik:** Kompozitler birim alan ağırlığı bakımından, metallere ve plastiklere oranla daha yüksek mukavemet değerlerine sahiptir.
- **Elektriksel Özellikler:** Uygun malzemelerin seçilmesiyle çok üstün elektriksel özelliklere sahip kompozit ürünler elde edilebilir. Bugün büyük enerji nakil hatlarında kompozitler iyi bir iletken ve gerektiğinde de başka bir yapıda, iyi bir yalıtkan malzemesi olarak kullanılabilirler.
- **Korozyona ve Kimyasal Etkilere Karşı Mukavemet:** Kompozitler, hava etkilerinden, korozyondan ve çoğu kimyasal etkilerden zarar görmezler. Bu özellikleri nedeniyle kompozit malzemeler kimyevi madde tankları, boru ve aspiratörler, tekne ve diğer deniz araçları yapımında güvenle kullanılmaktadır.
- **Isıya ve Ateşe Dayanıklılığı:** Isı iletim katsayısı düşük malzemelerden oluşabilen kompozitlerin ısıya dayanıklılık özelliği, yüksek ısı altında kullanılabilmesine olanak sağlamaktadır. Bazı özel katkı maddeleri ile kompozitlerin ısıya dayanımı artırılabilir.
- **Kalıcı Renklendirme:** Kompozit malzemeye, kalıplama esnasında reçineye ilave edilen pigmentler sayesinde istenen renk verilebilir. Bu işlem ek bir masraf ve işçilik gerektirmez.
- **Titreşim Sönümlendirme:** Kompozit malzemelerde süneklik nedeniyle doğal bir titreşim sönümlenme ve şok yutabilme özelliği vardır. Çatlak yürümesi olayı da böylece minimize edilmiş olmaktadır [9].

2.3 Kompozit Malzemenin Dezavantajları

Üretilen kompozit malzemelerde, malzemenin herhangi bir olumsuz özelliği varsa bu özelliği üretilen kompozit malzemeye yansır. Kompozit malzemedeki oluşabilecek olumsuzlukları, zayıflıkları ortadan kaldırmak için günümüzde hala

çalışmalar yapılmaktadır. Bu olumsuzluklara bir örnek vermek gerekirse, kompoziti oluşturan matris organik çözücülere karşı dayanıksızsa, onun oluşturduğu kompozit de bu olumsuz özelliği taşır. Dolayısıyla bu kompozit malzemeler, organik çözücülerin bol miktarda bulunduğu ortamda kullanılmaması gerekir. Aynı mantık nem, sıcaklık vb. gibi kimyasal etkiler açısından da düşünülebilir.

Kompozit malzemelerde şu tür dezavantajlar görülmektedir:

- Kompozit malzeme içerisinde kalabilecek hava zerrecikleri, kompozit malzemenin yorulma direncini azaltıcı yönde olumsuz olarak etkiler,
- Kompozit malzemeler, farklı doğrultuda, farklı özellikler gösterebilirler,
- Üretiminin güç ve pahalı olması,
- Kompozit malzemelerde gerekli yüzey kalitesinin elde edilemeyişi,
- Demir, alüminyum, bakır gibi madenlerle kıyaslandığında geri dönüşümü sorunludur,
- İyi tanımlanmamış tasarım parametreleri varsa, bundan dolayı ham malzeme açısından yüksek imalat verimliliğine ulaşamaması bir dezavantajdır,
- Kompozit malzemeler metallere oranla çok daha kırılğan (gevrek) bir yapıya sahiptirler. Bu özelliklerinden ötürü plastik deformasyon meydana gelmez. Dolayısıyla kompozit yapıların kırılma olayı anlık olabilir. Metaller ise sünek bir yapıya sahip olduklarından, yükleme sırasında plastik deformasyon meydana gelebilir. Metallerdeki kırılma olayı belli süreçleri gerektirdiği için kırılmadan önce gerekli önlemlerin alınma şansı vardır [24].

3. KOMPOZİT MALZEMELERİN SINIFLANDIRILMASI

Kompozitin istenilen özelliğinin iyileştirilmesi amacıyla bileşenlerin malzemesi, şekli, boyutları ve kompozit yapının şeklinde değişikliklerin yapılması mümkündür. Dolayısıyla kompozitler fiberlerin geometrisine veya matris malzemesine göre sınıflandırılmaktadırlar [25].

Kompozitler;

1. Matris elemanlarına göre,

- Polimer matrisli kompozit,
- Metal matrisli kompozit,
- Seramik matrisli kompozit

2. Takviye Şekline Göre Sınıflandırılması

- Fiber Takviyeli Kompozit Malzemeler
- Partikül Takviyeli Kompozit Malzemeler
- Tabakalı Kompozit Malzemeler

3.1 Matris Malzemesine Göre Sınıflandırılması

3.1.1 Polimer Matrisli Kompozitler

Plastik-polimer gurubu matriks malzemelerin çoğunlukla elyaf formunda sert, dayanımlı malzemelerle takviye edilmeleri veya pekiştirmeleri kısaca bu gruptaki kompozit malzemeler grubunu oluşturmaktadır. En tipik örnek, artık günümüzde gelenekselleşmeye başlayan ve “fiberglas” olarak bilinen polyester esaslı reçinelerin cam elyafı ile takviyesiyle üretilen malzemelerdir. Ancak ileri kompozit grubunda daha üstün fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklere sahip elyaf kullanılmaktadır. Bu malzemeler yüksek dayanım (çekme ve basma dayanımı), yüksek elastik modülü ve yüksek tokluğa sahiptir [9].

Yüksek molekül ağırlıklı bileşiklerin, yani makro moleküllerin varlığı ilk Hermann Staudinger tarafından öne sürülmüş ve geçen kısa bir süre içinde polimerler günlük yaşamımızın hemen her safhasında kullanılır hale gelmiştir. Sahip oldukları üstün özellikleri nedeniyle polimerik malzemelerin kullanım alanları giderek yaygınlaşmaktadır. Polimerlerin başlıca avantajları, hafif oluşları, korozyona karşı dayanıklı oluşları ve kolay işlenebilirlikleridir. Yapı malzemeleri olarak polimerlerin çok büyük bir önemi vardır. Bugün dünyada üretilen polimerlerin yaklaşık %30' u her sene inşaat mühendisliği ve yapı endüstrisinde kullanılmaktadır. Polimerler monomer adı verilen küçük moleküllerin art arda dizilmesi ile oluşan uzun zincirli yapılardır. Tek bir polimer zincirinde binlerce ya da milyonlarca monomer bulunur. Polimer zincirini oluşturan monomerlerin özellikleri ve zincirlerin birbirleri ile olan etkileşimleri polimer malzeme özelliklerinde belirleyici olmaktadır. Genelde polimer denince ilk akla organik polimerler gelmesine rağmen inorganik polimerler de oldukça yaygındır. Polimer zincirleri doğrusal yani lineer olabildiği gibi dallanmış yapıda da olabilir, bu durumda ana zincirden yan dallar ayrılmaktadır. Yan dallar başka ana zincirlere bağlanıyorsa oluşan polimerlere çapraz bağlı polimerler denir ki, günümüzde kullanılan polimerlerin yarıya yakını çapraz bağlı yapıdadır. Çapraz bağlı polimerler hiçbir solventte çözünmezler ancak sıvıları emerek şişerler ve bir jel oluştururlar. Genelde polimerlerde kristal ve amorf bölgeler bir arada bulunmaktadır. Kristal bölgeler malzemeye sertlik ve kırılganlık, buna karşılık amorf bölgeler malzemeye tokluk verir. Dolayısıyla malzemenin kristallik derecesi mekanik özelliklerinde çok önemlidir. Düzenli yapılar ya da lineer zincirler kristal oluşumunu kolaylaştırır. Moleküller arası çekim kuvvetleri de kristallliği arttırmaktadır. Polimerlerin termal özellikleri onların erime ve camsı geçiş sıcaklıkları ile tanımlanır. Polimer zincirleri donmuş, kauçuksu yapıdadır. Bu sıcaklıkları yan gruplar ya da zincirin sertliği belirlemektedir. Polimerlerin mekanik özellikleri ise çekme-uzama testleri ile belirlenir [26].

3.1.2 Metal Matrisli Kompozitler

Bir metalik fazın bazı takviye malzemeleri ile eritme vakum emdirme, sıcak presleme ve difüzyon kaynağı gibi ileri teknikler uygulanarak Metal Matrisli Birleşik Malzemeler (MMC)' ler elde edilirler. MMC'ler daha çok uzay ve havacılık

alanlarında, mesela uzay teleskobu, platform taşıyıcı parçalar, uzay haberleşme cihazlarının reflektör ve destek parçaları vs. yerlerde kullanılır [27].

3.1.3 Seramik Matrisli Kompozitler

Bu amaçla yapısal ve fonksiyonel nitelikli yüksek teknoloji seramikleri kullanılmaktadır. Başlıcaları Al_2O_3 , SiC, Si_3N_4 , B_4C , CbN, TiC, TiB, TiN, AlN' dir. Bu bileşikler değişik yapılarda olup amaca göre bir ya da bir kaç beraber kullanılarak CMC'ler elde edilir. Sandviç zırhlar, çeşitli askeri amaçlı parçalar imali ile uzay araçları bu ürünlerin başlıca kullanım yerleridir [27].

Metal veya metal olmayan malzemelerin birleşiminden oluşan seramik kompozitler yüksek sıcaklıklara karşı çok iyi bir dayanım göstermekle birlikte, rijit ve gevrek bir yapıya sahiptirler, ayrıca elektriksel olarak çok iyi bir yalıtkanlık özelliği de gösterirler [28].

3.2 Takviye Şekline Göre Sınıflandırılması

Kompozit malzemeler yapı bileşenlerinin şekline göre;

- Fiber Takviyeli Kompozit Malzemeler
- Partikül Takviyeli Kompozit Malzemeler
- Tabakalı Kompozit Malzemeler

olmak üzere üç gruba ayrılır.

3.2.1 Fiber Takviyeli Kompozit Malzemeler

Elyaf takviyeli kompozitler, birçok özelliklerde artış sağlayan, yüksek etkinliği olan liflerin ilavesiyle elde edilirler. Mühendislikte kullanılan malzemelerin pek çoğu elyaf şeklinde üretildiklerinden mukavemet ve rijitlikleri kütle halindeki değerlerinden çok üst düzeyde olabilmektedir. Örneğin karbon elyafların çekme mukavemeti kütle halindeki grafitten 50 kat, rijitliği 3 kat daha yüksektir [23].

Takviye elemanları yapı içerisinde kesintisiz uzayan sürekli elyaflar veya uzun elyafların kesilmesiyle elde edilen süreksiz elyaf şeklinde olabilir. Elyaf takviyeli kompozitlerin mühendislik performansını etkileyen en önemli faktörler, elyafların şekli, uzunluğu, yönlenmesi, matriksin mekanik özellikleri ve elyaf-matriks ara yüzey özellikleridir [23].

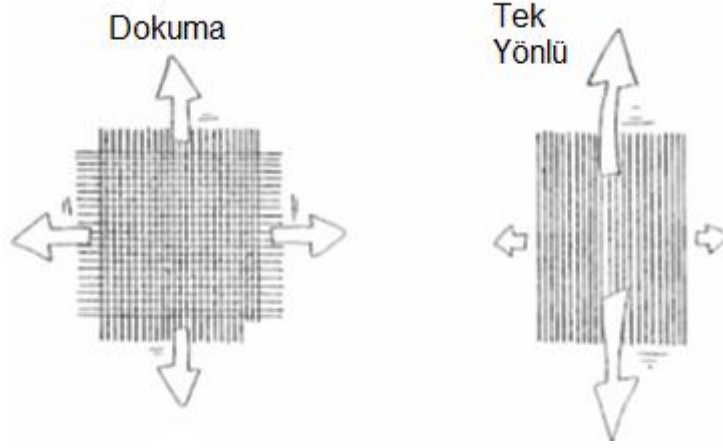
3.2.2 Partikül Takviyeli Kompozit Malzemeler

Bir matriks malzeme içinde başka bir malzemenin parçacıklar halinde bulunması ile elde edilirler. İzotropik yapılarıdır. Yapının mukavemeti parçacıkların sertliğine bağlıdır. En yaygın tip plastik matriks içinde yer alan metal parçacıklardır. Metal parçacıklar ısı ve elektrik iletkenliği sağlar. Metal matriks içinde seramik matriks içeren yapıların, sertlikleri ve yüksek sıcaklık dayanımları yüksektir. Bunlar kollar, kulplar, elektrik parçaları, muhafazalar vb. gibi küçük parçacıkların yapımında kullanılırlar [28].

3.2.3 Tabakalı Kompozit Malzemeler

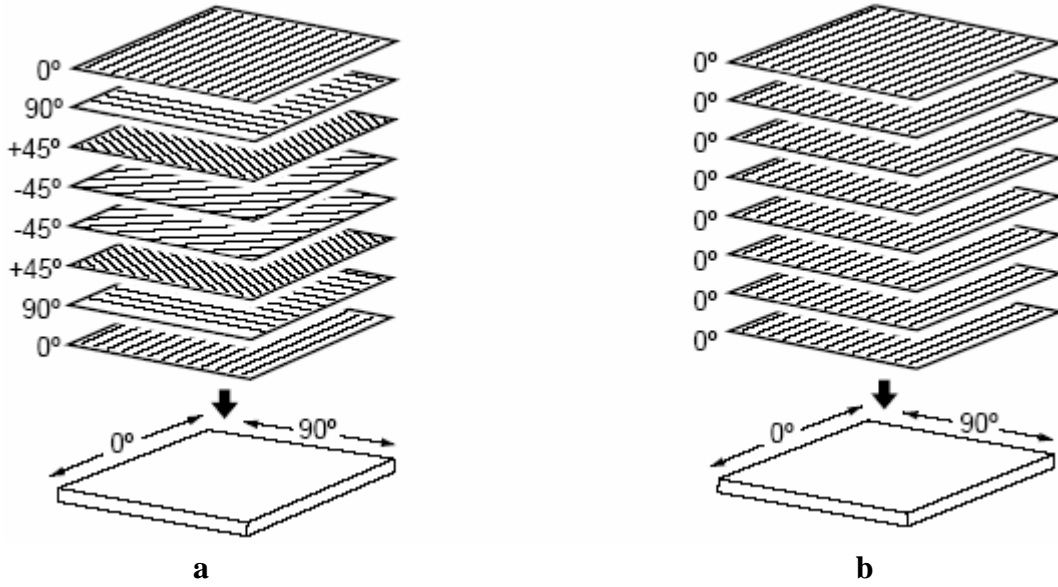
Tabakalı kompozitler, yapısal yönden taneli ve liflerle donatılı kompozit malzemedir farklılık göstermektedir. Çok değişik kombinasyonlarla tabakalanmış kompozitlerin üretimi mümkündür. Farklı özelliklere sahip en az iki tabakanın kombinasyonundan oluşur. Korozyon direnci zayıf metaller üzerine, daha yüksek dirençli metallerin veya plastiklerin kaplanmasıyla korozyon özelliğinin, yumuşak metallerin sert malzemelerle birleştirilmesiyle sertlik ve aşınma direncinin, farklı fiber yönlenmesine sahip tek tabakaların birleştirilmesiyle çok yönlü yük taşıma özelliğinin geliştirilmesi mümkün olmaktadır [29].

Tek yönlü kompozit malzemeler tek yönde daha üstün mekanik özelliklere sahiptir ve anizotropik (farklı yönlerde farklı özelliklerin sergilenmesi) özellik gösterir. İzotropik (bütün yön ve doğrultularda aynı özelliklere sahip olan malzeme) malzemeler (daha çok metaller) bütün doğrultularda eşit özellikler gösterir [29].



Şekil 3.1: Dokuma ve tek yönlü elyafların farklı yönlerdeki özellikleri [29].

Dokuma ve tek yönlü elyaflar için farklı yönlerdeki özellikler Şekil 3.1’de gösterilmiştir.



Şekil 3.2: Tabakalarda yönlendirme şekilleri [29].

Tabakalarda yönlendirme şekilleri (Şekil 3.2)

a) Yarı-izotropik yönlendirme

b) Tek yönlü yönlendirme

Tabakalı kompozit yapı, en eski ve en yaygın kullanım alanına sahip olan tiptir. Farklı elyaf yönlendirmelerine sahip tabakaların bileşimi ile çok yüksek mukavemet değerleri elde edilir. Isıya ve neme dayanıklı yapılardır. Metallere göre

hafif ve aynı zamanda mukavemetli olmaları nedeniyle tercih edilen malzemelerdir. Tabakalandırılmış fiber takviyeli kompozitlerin kullanım yerleri; Polaris füze kasaları, cam elyaf gemi kaplaması, raylı taşıt gövdeleri, tenis racketleri, vb. Ayrıca, uçak yapılarında yaygın bir kullanım alanı olan sandviç yapılar da tabakalı kompozit malzeme örneğidirler [29].

4. FİBER TAKVİYELİ KOMPOZİTLER

4.1 Cam Fiber Takviyeli Plastik Malzemeler

4.1.1 Cam Elyaf Çeşitleri

Elyafı yapılarına göre;

- Fitol
- Cam elyafı iplik
- Kumaşlar
- Kırpılmış demetler
- Öğütölmüş lifler

olmak üzere beş gruba ayırabiliriz [30].

4.1.1.1 Fitol

Devamlı yapıya sahip cam elyafı takviye malzemesidir. Çok sayıda delik içeren kovanlardan akan cam liflerinin doğrudan doğruya sarılması ile “Direkt Sarma Fitol” olarak üretilebildiği gibi, daha az sayıda delik içeren kovanlardan üretilen cam elyafı demetlerinin birbirine paralel olarak bükölmeden sarılması ile “Bileşik Fitol” olarakta üretilebilir (Şekil 4.1).



Şekil 4.1: Direkt sarma fitil ve bileşik fitil [30].

4.1.1.2 Cam Elyafı İplik

Cam elyafı demetlerinin bükümlü hale getirilmesi ile elde edilen takviye çeşididir (Şekil 4.2). Genellikle dokunmuş kumaş olarak plastiklerin takviyesinde kullanılır.



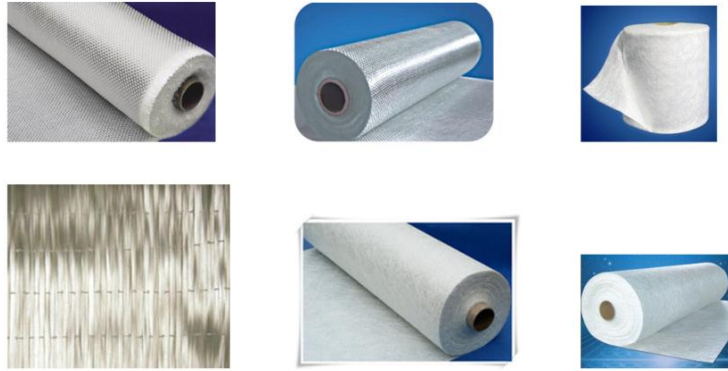
Şekil 4.2: Cam elyafı iplik [30].

4.1.1.3 Kumaşlar

Kumaşlar dikim şekillerine göre

- Dokunmuş fitiller
- Dokunmuş cam kumaş
- Dikilmiş kumaşlar
- Tek yönlü fitil kumaşlar
- Devamlı demetli keçe
- Kırpılmış demetten keçeler

olarak sınıflandırılabilir (Şekil 4.3).



Şekil 4.3: Kumaş dikim şekillerine göre elyaflar [30].

4.1.1.4 Kırpılmış Demetler

Cam elyafı demetlerinin 3-12 mm uzunluğunda kırpılmış şeklidir (Şekil 4.4). Termoplastik granüllerin ve termoset esaslı kalıplama yöntemlerinden, BMC üretiminde kullanılmaktadır.



Şekil 4.4: Kırpılmış elyaf.

4.1.1.5 Öğütülmüş Lifler

Öğütme işlemi sonucunda, uzunlukları, 0.1-0.2 mm'ye düşürülmüş cam elyafı takviye malzemesidir (Şekil 4.5). Bu liflerin çapları 10-17 mikron arasında değişir. Öğütülmüş liflerin başlıca kullanım alanı termoplastik reçinelerin ve poliüretan reçinenin takviyesidir. Kompozitin rijitlik, boyut stabilitesi ve darbe dayanımı gibi özelliklerini yükseltmek için öğütülmüş lif boyu çok kısa olduğundan, bu takviye malzemesi, diğer kompozitlerin takviyesinde kullanılmaz.



Şekil 4.5: Öğütülmüş lifler.

4.1.2 Polyester Reçine Çeşitleri

Polyester reçine iki ana grupta toplanır:

1. Doymuş polyester
2. Doymamış polyester

Doymuş polyester reçineler polietilen teraflat veya terilen gibi termoplastik özellik gösteren ve enjeksiyon kalıplamada ve elyaf üretiminde kullanılan reçinelerdir [31].

Doymamış polyester reçine ise, uygun bir katalizör ile cross-link (şebeke yapısı) oluşturan termoset özellikli reçinelerdir. Cam takviyeli plastik üretiminde genellikle doymamış polyester reçine kullanılır ve değişik amaçlar için, değişik özellikte doymamış polyester reçine türleri geliştirilmiştir [31]. Bu çalışmada “doymamış polyester reçine” terimi “polyester reçine” olarak ifade edilmiştir.

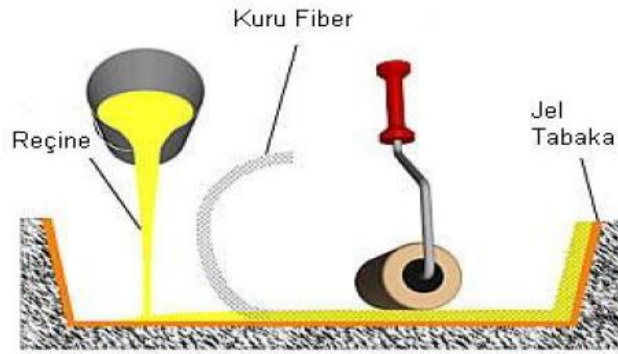
4.1.3 Cam Elyaf Takviyeli Plastiklerin Üretim Yöntemleri

Kompozitlerin üretiminde beklenen çeşitli ihtiyaçları karşılayabilmek için bir düzineden fazla bağımsız üretim yöntemi ve çok sayıda hibrid prosesi geliştirilmiştir.

Bu proseslerin her birinin kompozit üretiminde kullanılabilecek çeşitli avantajları ve spesifik faydaları bulunmaktadır.

4.1.3.1 El Yatırması (Hand Lay Up)

Düşük üretim düzeylerinde yaygın kullanımı olan bu kalıplama yöntemi, ilk zamanlardan beri endüstride sürekli gelişime açık olan ve üzerinde çalışılan üretim yöntemlerinden biri olmuştur. Birçok uygulama alanı vardır ve özellikle yüksek mukavemet gerektiren oldukça büyük parçaların üretiminde rahatlıkla kullanılabilir. Kompozit endüstrisi kalıplama yöntemleri arasında temel ve evrensel olarak en uygulanabilir yöntem olarak kabul edilmektedir [32]. El Yatırması yöntemi şematik olarak Şekil 4.6'da gösterilmiştir.

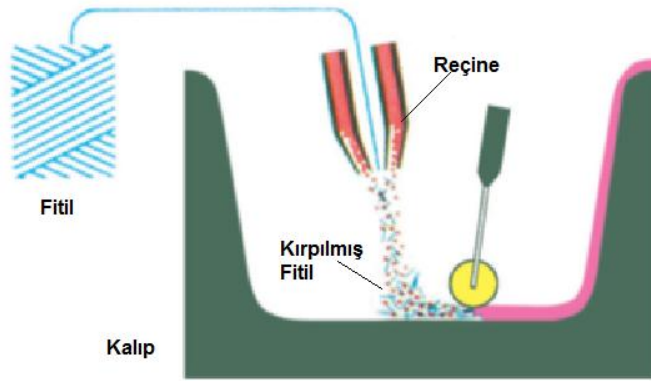


Şekil 4.6: El yatırması yöntemi [33].

Dokuma veya kırılmış elyaflarla hazırlanmış takviye kumaşları kalıp üzerine elle yatırılarak sıvı reçine elyaf katmanlarına emdirilir. Elyaf yatırılmadan önce kalıp temizlenerek jelkot sürülür. Jelkot sertleştikten sonra elyaf katları yatırılır. Reçine ise kompozit malzemenin hazır olması için en son sürülür. Bu işlemde elyaf kumaşına reçinenin iyi nüfuz etmesi önemlidir. El yatırma tekniğinde en çok kullanılan polyester ve epoksi'nin yanı sıra vinil ester ve fenolik reçineler de tercih edilmektedir. Elle yatırma yoğun işçilik gerektirmesine rağmen düşük sayıdaki üretimler için çok uygundur [34].

4.1.3.2 Püskürtme Yöntemi (Spray-Up)

Püskürtme yöntemi elle yatırma yönteminin aletli şekli olarak kabul edilebilir. Kırpılmış elyaflar kalıp yüzeyine, içine sertleştirici katılmış reçine ile birlikte özel bir tabanca ile püskürtülür. Elyafın kırılma işlemi tabanca üzerinde bulunan ve bağımsız çalışan bir kırpıcı sayesinde yapılır. Püskürtülme işlemi sonrası yüzeyin bir rulo ile düzeltilmesiyle ürün hazırlanmış olur (Şekil 4.7) [34].

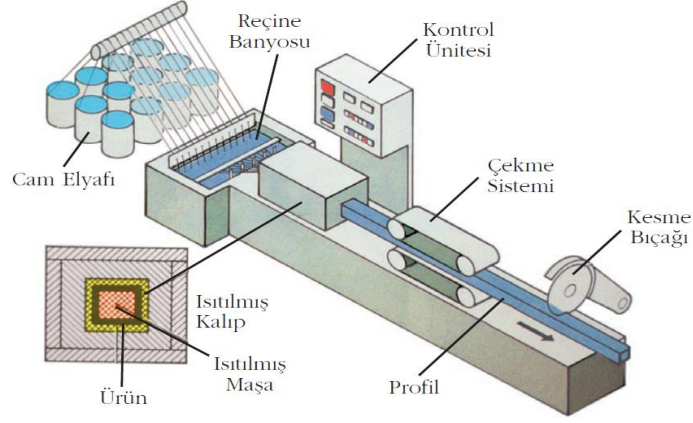


Şekil 4.7: Püskürtme yöntemi [32].

4.1.3.3 Profil Çekme / Pultrüzyon

Pultrüzyon işlemi sürekli sabit kesitli kompozit profil ürünlerin üretilebildiği düşük maliyetli seri üretim yöntemidir (Şekil 4.8). Pull ve Extrusion kelimelerinden türetilmiştir. Sisteme beslenen sürekli takviye malzemesi reçine banyosundan geçirildikten sonra 120-150 °C'ye ısıtılmış şekillendirme kalıbından geçilerek sertleşmesi sağlanır. Kalıplar genellikle krom kaplanmış parlak çelikten yapılmaktadır. Sürekli elyaf kullanılmasından dolayı takviye yönünde çok yüksek mekanik mukavemet elde edilir. Enine yükleri karşılayabilmek için özel dokumalar kullanmak gerekmektedir [34].

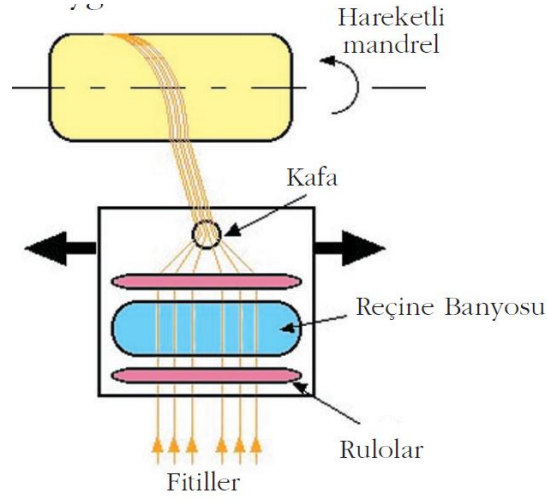
Profil çekme prosesi düşük maliyetli, yüksek üretim kapasiteli bir prosestir. Bu proseste, reçine emdirilmiş lifler, parça üretimi için bir kalıba gönderilir. Profil çekme prosesiyle sabit kesit ve sürekli uzunlukta parçalar üretilir [33].



Şekil 4.8: Pultruzyon yöntemi [32].

4.1.3.4 Elyaf Sarma Yöntemi (Filament Winding)

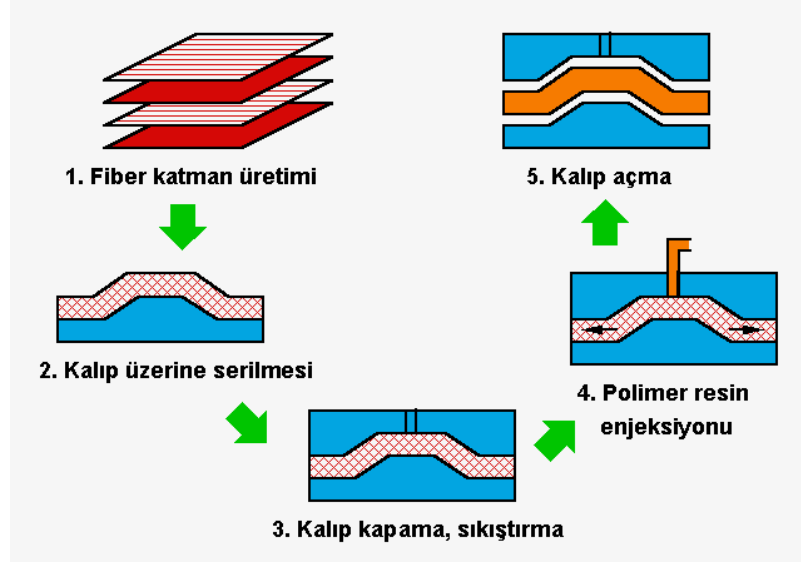
Elyaf sarma yöntemi üstün kalitede yüzeye sahip ürünlerin üretimi açısından bir devrim niteliği taşımaktadır [32]. Bu yöntem özel biçime sahip ürünlerin seri üretimine uygundur. Elyaf sarma yöntemi sürekli elyaf liflerinin reçine ile ıslatıldıktan sonra bir makaradan çekilerek dönen bir kalıp üzerine sarılmasıdır. Sürekli liflerin farklı açılarla kalıba sarılmasıyla farklı mekanik özelliklerde ürünler elde edilebilir (Şekil 4.9). Yeterli sayıda elyaf katının sarılmasından sonra ürün sertleşir. Ardından döner kalıp ayrılır. Bu yöntemle yapılan ürünler genellikle silindirik, borular, araba şaftları, uçak su tankları, yat direkleri, dairesel basınç tanklarıdır [35].



Şekil 4.9: Elyaf sarma yöntemi [32].

4.1.3.5 Reçine Transfer Metodu (RTM / Reçine Enjeksiyonu)

Geniş yüzeylerin kalıplanmasında el yatırması ve püskürtme yöntemlerinin hız ve ürün kalitesi olarak yetersiz kalması sebebiyle reçine enjeksiyonu yöntemi geliştirmiştir. Bu üretim metodunda, dişi ve erkek olmak üzere iki ayrı kalıp kullanılmak suretiyle, her iki yüzü düzgün ürünler elde edilmektedir. Reçine enjeksiyonu için üretilmiş olan özel keçe cam elyafı, kalıp üzerine yerleştirilmekte ve kalıplar kapatılmaktadır (Şekil 4.10). Önceden hazırlanmış olan bir kanal vasıtası ile basınç altında bağlayıcı, kalıp içine enjekte edilmektedir. Kalıpların yüksek basınca dayanabilecek ağır bir konstrüksiyon gerektirmemesi, enjeksiyon sırasında hava boşluklarının oluşmaması ve kalıp sızdırmazlığının sağlanabilmesi için düşük basınçlı bir pompa (1-4 atm basınç sağlayan) ile reçineyi kalıp içine aktarırken, diğer taraftan da vakum uygulayarak reçinenin kalıp içine yayılmasının sağlanması üretimin kalitesini oldukça arttırmaktadır. Özetle reçine enjeksiyonu metodu, el yatırması ve türevi yöntemlere göre oldukça seri ve ekonomik bir yöntem olmakta ve işçilik kalitesi çok yüksek ürün elde edilebilmektedir [9].



Şekil 4.10: RTM ile kompozit parça üretim yöntemindeki adımları [36].

Parça boyutuna ve kullanılan cam elyafına bağlı olarak, 1.5 mm-20 mm arasında cidar kalınlığı ve % 23-% 68 arasında takviye sağlanabilmektedir. Çoğunlukla keçe ya da dokuma tipi cam elyaf takviyesi kullanılan RTM (Resin Transfer Moulding) yönteminde, el yatırması ile hazırlanmış, düşük maliyetli CTP kalıplar tercih edilmektedir. Kalıplama işlemi sırasında, takviye ve reçinenin karışımını kolaylaştırmak ve üretim süresini azaltmak için düşük viskoziteli polyester reçineler kullanılmaktadır. Reçine enjeksiyonu yönteminde, kalıp maliyetlerinin düşük oluşu ve kullanılan ekipmanın nispeten basit ve ucuz oluşu ilk yatırım maliyetini düşürmektedir [37].

RTM kalıplama yönteminde ortoftalik ve izoftalik polyesterler, vinil ester reçineler kullanılmaktadır. Ayrıca, daha iyi bir yüzey görünümü sağlamak üzere özel olarak RTM için üretilmiş düşük çekmeli ve hassas profilli polyester reçineler de geliştirilmiştir. Bunların dışında, epoksiler, ürethanlar, bismaleimidler (BMI), akrilik/polyester hibridleri ve fenolik reçinelerde RTM de kullanılmaktadır. Bu tür yeni reçinelerin kullanımı için enjeksiyon ekipmanında ölçüm ve reçine şartlarında özelliklerine göre bazı değişiklikler yapılması gerekebilir.

RTM'de genellikle kontinü keçe ve kırılmış demetten ön şekillendirilmiş takviye malzemeleri (Preform) yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca, termoplastik bağlayıcı kullanılarak yapılmış özel keçeler, termoforming (Isı ile şekillendirme) işlemi ile kalıp şekline tam uyan ön şekillendirilmiş takviye malzemesi olarak

kullanılabilmektedir. Farklı dokunmuş ve dokunmamış cam elyafı ürünleri, iki ve üç yönlü keçeler, RTM prosesi için geliştirilmiştir. Karbon elyafı ve aramid gibi yüksek performanslı diğer takviye türleri de RTM kullanılarak yapılan kompozit parçalarda tek başına veya hibrid takviye biçiminde kullanılabilirler [38].

RTM yönteminin avantajları;

- Kompleks şekilli parçalar üretilebilir.
- Düşük boyutsal toleranslar ve düşük yüzey pürüzlülüğü elde edilebilir.
- Özellikle kalıp pres ile sıkıştırılırsa, parçadaki elyaf oranı yüksek olur (hacimsel %65-70), ve bunun sonucunda, yüksek mukavemet elde edilir.
- İsteğe bağlı olarak, parçanın değişik bölgelerinde değişik özellikler elde edilebilir (farklı dokuma ve/veya sıkıştırma ile) [38].

Başlıca RTM uygulamaları; kamyon gövde parçaları, otomobil gövde panelleri, otobüs panelleri, spoiler, gösterge panelleri, tıbbi cihazlar, depolama tankları, araç koltukları, kimyasal pompalar, küçük tekneler gibi denizcilik parçaları, rüzgar enerjisi tribün kanatları, uçak parçaları, mermi gövdeleri, bisiklet gövdeleri ve kapılardır (Şekil 4.11).



Şekil 4.11: RTM uygulama alanları.

4.2 Kompozit Plakaların Dayanımını Etkileyen Faktörler

Çok tabakalı bir levhanın dayanımını etkileyen başlıca faktörler şunlardır[39]:

- Tabakaların dayanımı
- Tabakaların rijitliği
- Tabaka kalınlıkları
- İstifleme geometrisi
- Tabakaların ısıl genleşme özelliği
- Matrisin sertleşme (cure) sıcaklığı

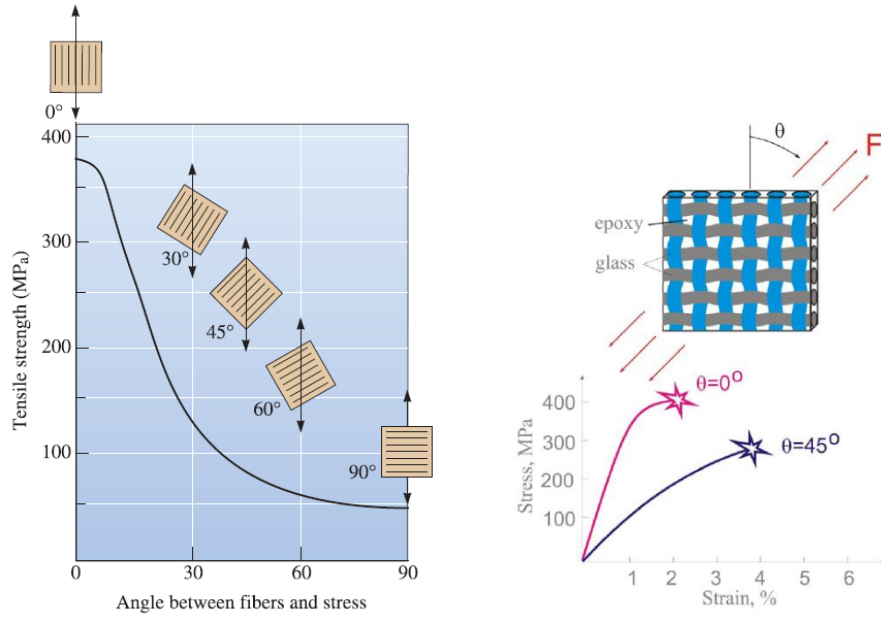
Bu çalışmada tabaka sayısı, farklı yapı, istifleme sırası ve fiber oryantasyon açıları üzerinde durulmuştur. Diğer parametreler ise mümkün olduğunca sabit tutulmaya çalışılmıştır.

4.2.1 Fiber Açısının Mukavemete Etkisi

Kompozit malzemelerde takviyelerin miktarı ve geometrik düzeni temel kullanım özelliklerini belirleyen en önemli faktördür. Genellikle elyaf yönünde en iyi dayanım özellikleri, buna dik yönde ise en düşük değerler elde edilir. Tablo 4.1’de görüldüğü gibi iki yönlü ve çok yönlü takviye durumunda özellikler daha dengelidir. ($0^{\circ}/90^{\circ}$) düzeninde 0° ve 90° doğrultularındaki dayanımlar en yüksek olup birbirine eşittir. 45° açı yapan doğrultuda ise en düşük dayanımlar elde edilir. Dokuma biçimindeki takviyelerde ise takviyenin etkisi biraz daha düşüktür[10].

Tablo 4.1: Takviye biçiminin özelliklere etkisi [10].

Takviye Biçimi	Tek yönlü 0°		İki yönlü $0^{\circ}/90^{\circ}$		Dokuma		Keçe çok yönlü
	0°	90°	0°	45°	0°	45°	her yönde
Çekme modülü (Gpa)	77	6	39	7	32	7	21
Çekme dayanımı (Mpa)	1400	28	644	98	525	210	200
Basma modülü (Gpa)	77	6	39	7	33	7	-
Basma dayanımı (Mpa)	280	140	203	126	175	126	-
Eğme modülü (Gpa)	77	-	-	-	28	-	19
Eğme dayanımı (Mpa)	630	-	-	-	350	-	249

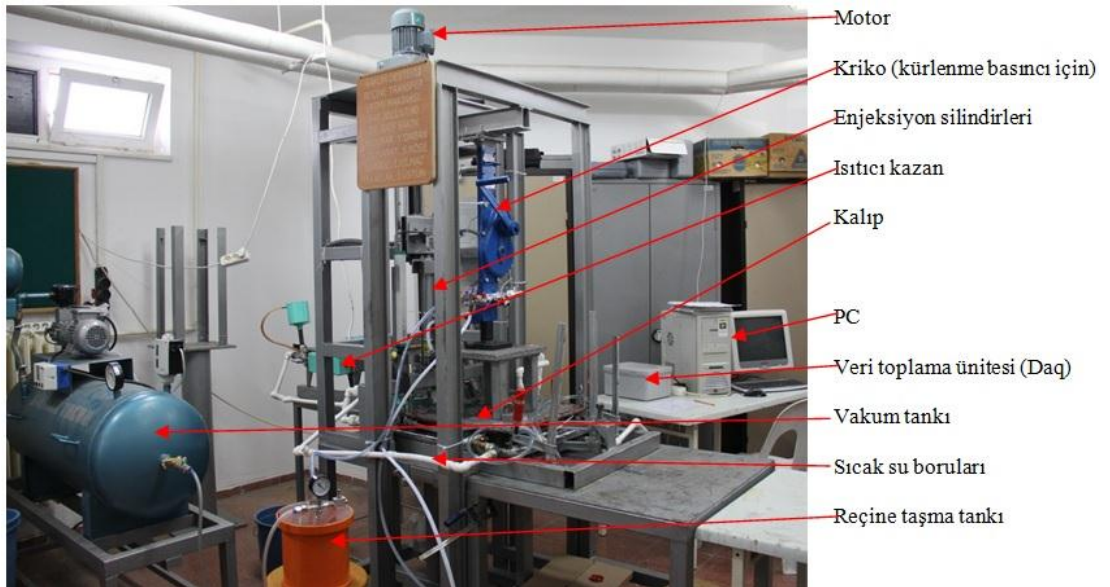


Şekil 4.12: Mukavemete fiber açısının etkisi [40, 41].

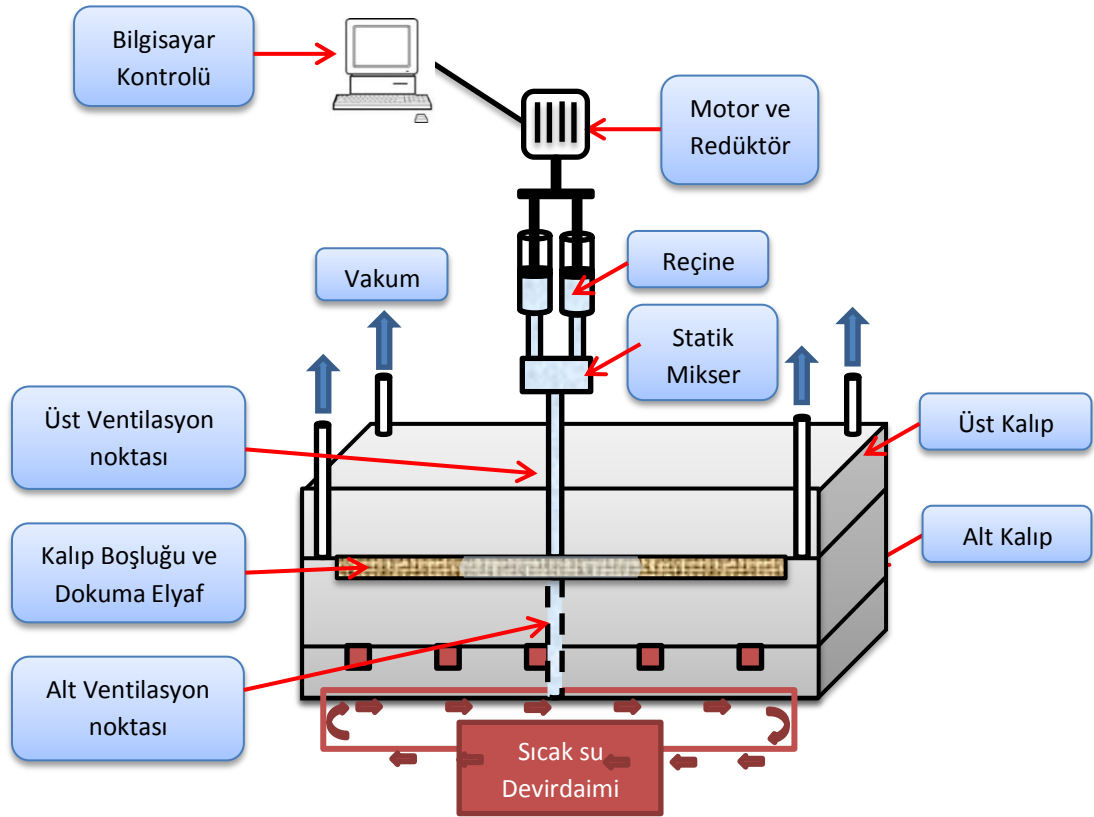
Kompozit plakaya uygulanan kuvvet elyaf doğrultusunda olduğu durumda maksimum dayanım elde edilirken elyaf doğrultusundan uzaklaştıkça kompozit plakanın mukavemeti düşer (Şekil 4.12) [41].

5. VAKUM DESTEKLİ RTM MAKİNESİ TASARIMI VE İMALATI

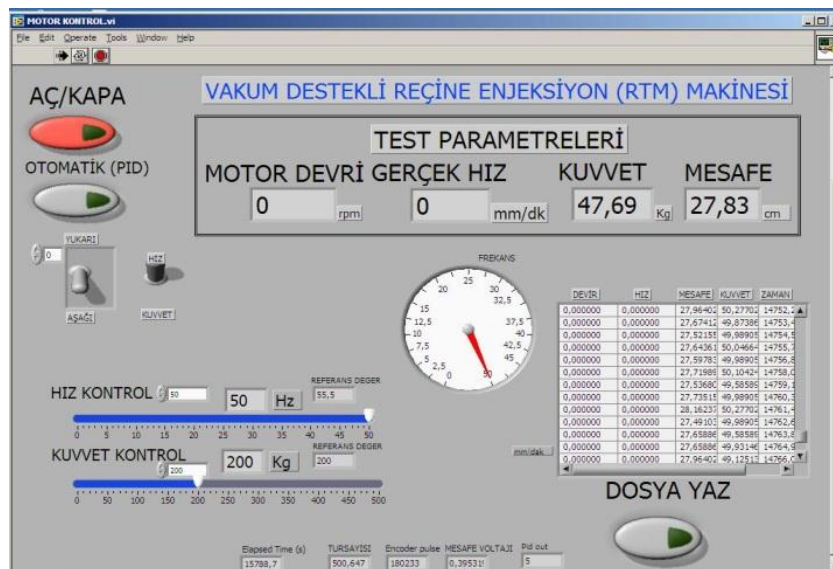
500x500x3mm boyutlarında kompozit plakaların imalatı için Şekil 5.1'de görülen vakum destekli RTM makinesi tasarlanmıştır. Şekil 5.2'deki şematik resimde görüldüğü gibi tasarlanan makinede kalıbın üst ve alt merkezinden olmak üzere iki noktadan reçine enjeksiyonu, kalıp köşelerindeki dört noktadan ise vakum yapılabilmektedir. RTM makinesinde, motor-redüktör grubu frekans kontrol cihazı ile 0-50Hz arasında kontrol edilmektedir. Redüktör 0-10 dev/dak arasında sistemi döndürmektedir. Reçine basma hızı ise 0-50 mm/dak. arasında değiştirilebilmektedir. Motor-redüktör grubu tarafından tahrik edilen lineer vidalı modül 0-250 mm strok sınırlarında çalışmaktadır. Lineer vidalı modül iki adet piston silindire reçine emme ve reçine basma olarak hareket vermektedir. Şekil 5.3'deki yazılımın ara yüzünden görüldüğü gibi bilgisayar destekli olarak reçine enjeksiyonu sabit hız kontrollü veya sabit yük (basınç) kontrollü olarak yapılabilmektedir. Ayrıca RTM çevriminin başından sonuna kadar bütün parametreler yazılım sayesinde PC'ye kaydedilmektedir.



Şekil 5.1: Vakum destekli RTM makinesi ve temel elemanları.

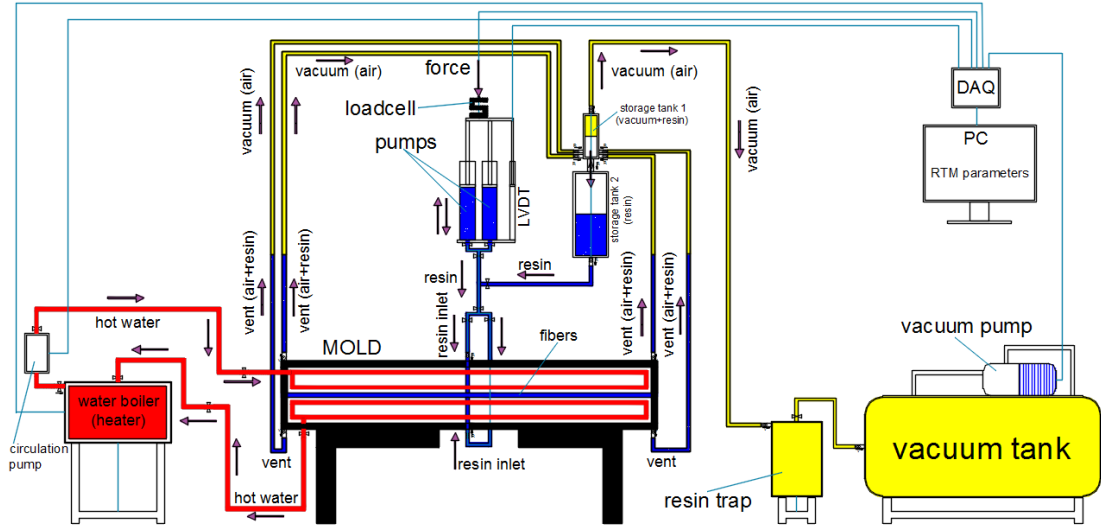


Şekil 5.2: RTM makinesi şematik gösterimi.



Şekil 5.3: Temel parametrelerin takibi ve kontrolü.

5.1 RTM Makinesinin Çalışma Prensibi



Şekil 5.4: RTM makinesinin çalışma prensibi.

Kompozit plaka imalatı için geliştirilmiş Şekil 5.4’de gözükten Vakum Destekli RTM Makinesinde, daha önceden hazırlanmış olan polyester reçine 2. tanka doldurulur ve hazırlanan reçine tanktan silindirler (pompa) içerisine alınmıştır. Silindirler içerisine alınan reçine, içerisindeki hava daha önceden vakum pompası ile boşaltılmış kalıba alt ve üst orta noktalardan bilgisayar programı vasıtasıyla sabit hız veya sabit basınçta enjekte edilmiştir. Kalıbın dolması ve vakumun etkisiyle birlikte reçine hava karışımı kalıp köşelerinde bulunan ventürü (boşaltma) noktalarından yükselerek reçine 1. toplama tankında toplanmış ve toplanan reçine 2. toplama tankına aktarılmıştır. Reçine, tekrar silindirlere alınarak sisteme enjekte edilir. Ventürü noktalarından yükselen reçinede daimi akış (yalnız reçine akışı) gözlenene kadar (2-3 kez sirkülasyon) reçine enjeksiyon işlemi devam eder. Enjeksiyon işlemi bitiminden sonra devirdaim pompası ile kalıp içerisinde sıcak su sirkülasyonu yapılarak kalıp sıcaklığı sabit tutulmuştur. . Vakum Destekli RTM makinesinin çalışması ile ilgili ayrıntılı bilgiye 6. Bölümde değinilmiştir.

6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

6.1 Çalışmanın Amacı

Genel amaçlı üretilecek olan kompozit plakaların maksimum dayanımı için en uygun cam-dokuma tipi, tabaka sayısı, tabaka sıralaması, fiber oryantasyon açısının belirlenmesidir.

6.2 Kompozit Plaka İmalatı İçin Kullanılan Materyaller

Balıkesir Üniversitesi Edremit M.Y.O. Makine Bölümü Atölyesi imkanları kullanılarak, üretilen Vakum Destekli RTM makinesi ile imal edilen kompozit plakaların imalatı için aşağıda temel özellikleri verilen materyaller kullanılmıştır.

6.2.1 Reçine

Poliya Poliester ve Yardımcı Maddeleri Sanayi'den temin edilen Polipol 336 RTM tipi polyester kullanılmıştır.

Polipol 336 polyester ortoftalik esaslı, düşük viskozitede, CTP tipi doymamış polyester reçinedir.

Başlıca otomotiv ve yapı sektöründe kullanılmaktadır. Polipol 336 polyester; RTM (reçine enjeksiyon yöntemi) veya soğuk pres (kapalı kalıp yöntemleri) ile iki yüzü düzgün, seri ürün almak için hazırlanmıştır. Sert ve mekanik değerleri yüksek bir polyester olmasına karşı dolgulandırıldığında hacimsel çekmesi düşüktür.

Polipol 336 RTM tipi polyesterin mekanik özellikleri Tablo 6.1'de verilmiştir.

Tablo 6.1: Sertleşmiş polyester reçine mekanik özellikleri [42].

TEST TEST	METOD METOD		SAF REÇİNE DEĞERİ PURE RESIN VALUE
Eğilme Dayanımı Flexural Strength	ISO 0178	±%10	113 Mpa
Elastiklik Modülü Flexural Modulus	ISO 0178	±%10	3110 Mpa
Kopmadaki Uzama Elongation at Break	ISO 0178	±%10	4,30%
Çekme Dayanımı Tensile Strength	ISO 0178	±%10	64 Mpa
Elastiklik Modülü Modulus of Elasticity in Tensile	ISO 0178	±%10	2801 Mpa
Kopmadaki Uzama Elongation at Break	ISO 0178	±%10	2,80%
İzod darbe Dayanımı Izod Impact Strength	ISO 0178	±%10	9 kJ/m ²

6.2.2 Hızlandırıcı (Katalizör)

Hızlandırıcı olarak Poliya Poliester ve Yardımcı Maddeleri Sanayi'den temin edilen Cobalt (%1'lik) kullanılmıştır. Bu uygulamada %0,11 oranında Cobalt kullanılmıştır.

6.2.3 Sertleştirici

Sertleştirici olarak Poliya Poliester ve Yardımcı Maddeleri Sanayi'den temin edilen MEK-PEROXIDE (Methyl Ethyl Ketone Peroxide) kullanılmıştır. Bu uygulamada %0,4 oranında Cobalt kullanılmıştır.

Kullanılacak hızlandırıcı (Cobalt), sertleştirici (MEK-P) ve diğer katkı maddeleri için firmalar tam ve kesin değerler belirlememektedir. Çünkü uygulamalarda RTM metodu ile kalıplama yapılırken değişik polyester hazırlama formülasyonu kullanılabilir. En uygun formülasyon, kalıplama koşullarına bağlı olarak, deneme yanılma metodu ile üretici tarafından saptanmalıdır [31].

6.2.4 Kalıp Ayırıcı

Kalıp ayırıcı olarak, Poliya Poliester ve Yardımcı Maddeleri Sanayi'den temin edilen Poliya Polivaks kullanılmıştır. Sisteme ait küçük ve detaylı parçalarda kalıp ayırıcı olarak Poliya Polivaks Eko PVA sıvı kalıp ayırıcı kullanılmıştır. Kalıp ayırıcı olarak genellikle kullanım kolaylığı ve daha etkili olduğu gözlemlenen Poliya Polivaks tercih edilmiştir.

6.2.5 Cam Elyaf

Matriks malzemesi olarak, 200, 300, 500, 800 gr/m² 'lik cam dokuma fiberler FİBROTEKS A.Ş.'den temin edilmiştir. Fiberlerin cinsi "E" camı elyafıdır. Cam elyafın yaklaşık mekanik özellikleri Tablo 6.2'te verilmiştir.

Tablo 6.2: Cam fiber mekanik özellikleri [31].

Malzeme Tipi	Çekme Mukavemeti (MPa)	Çekme Modülü (GPa)	Tipik Yoğunluk	Spesifik Modül
Cam fiber-E camı	2400	69	2,5	27

6.3 Kompozit Plakaların Üretimin Aşamaları

Kompozit plakaların üretiminde Bölüm 4'te anlatılmış olan Vakum Destekli RTM metodu kullanılmıştır. Kalıp ve enjeksiyon makinesi Balıkesir Üniversitesi Edremit MYO imkanları kullanılarak imal edilmiştir.

İstenilen parametreleri sabit tutabilmek veya değiştirebilmek için Vakum Destekli Reçine Transfer Makinesi tasarlanmıştır. Bu proseste kalıp içerisinde sıcak su sirkülasyonu yapılarak değişken hava sıcaklığından minimum etkilenmesi ve kalıp sıcaklığının istenilen sıcaklığa getirilebilmesi amaçlanmıştır. Bilgisayar destekli kontrol sayesinde sabit basınçta veya sabit hızda reçine enjeksiyonu yapılabilmektedir.

GFRP plakaların imalatı için Tablo 6.3’de verilen malzemeler kullanılmıştır. Cam-dokuma fiberler kalıp boşluğuna Tablo 6.4’de verildiği gibi toplam ağırlığı 750 gr. olacak şekilde dört farklı dokuma tipi ve 17 farklı istifleme sırası kullanılmıştır. Böylece, RTM yöntemi kullanılarak 500x500x3mm boyutlarında 17 farklı grup plaka elde edilmiştir. Bu prosesinde kullanılan sabit ve değişken parametreler Tablo 6.5’de verilmiştir.

Tablo 6.3: GFRP kompozit plakanın özellikleri.

Matris
Reçine : Polipol-336 polyester reçine (yoğunluk 1.094 gr/cm ³ , viskozite 300 cP) Katalizör : Cobalt Naphthenate (matris hacminin %0.06) Sertleştirici : Methyl Ethyl Ketone Peroxide (MEKP) (matris hacminin %0.15)
Takviye Fiberler
Cam-Dokuma : • Yoğunluk : 2.5 g/cm ³ ; Birim ağırlıklar : 800, 500, 300, 200 gr/m ²

Tablo 6.4: Tabaka sayısı ve istifleme sırası.

Grup Adı, Gösterim	Tabaka sayısı	Toplam ağırlık (gr)	İstifleme Sırası
D1	5	750	300/800/800/800/300
D2	5	750	800/300/800/300/800
D3	6	750	500/500/500/500/500/500
D4	6	750	800/500/200/200/500/800
D5	6	750	200/500/800/800/500/200
D6	6	750	800/200/800/200/800/200
D7	7	750	300/500/300/800/300/500/300
D8	7	750	500/300/300/800/300/300/500
D9	8	750	200/300/500/500/500/500/300/200
D10	8	750	500/500/300/200/200/300/500/500
D11	8	750	200/200/300/800/800/300/200/200
D12	8	750	800/300/200/200/200/200/300/800
D13	8	750	500/300/200/500/500/200/300/500
D14	9	750	200/300/500/300/500/200/500/300/200
D15	9	750	500/300/200/300/500/200/200/300/500
D16	10	750	500/300/200/300/200/200/300/200/300/500
D17	10	750	200/300/200/300/500/500/300/200/300/200

Tablo 6.5: RTM parametreleri.

Sabit Parametreler	Değişken Parametreler
<ul style="list-style-type: none">• Kalıp sıcaklığı kontrolü (45 °C)• Ortam sıcaklığı (ort. 24 °C)• Kalıpta kalma süresi (24 saat)• Vakum basıncı (700 mmHg)• Kürlenme basıncı (135 kPa)	<ul style="list-style-type: none">• Hız kontrollü enjeksiyonda<ul style="list-style-type: none">• sabit hız 16.7 - 54.8 mm/dak• değişken basınç 1.95 - 4.29 Bar• Yük (basınç) kontrollü enjeksiyonda<ul style="list-style-type: none">• sabit basınç 4.38 - 5.05 Bar• değişken hız 6.59 - 42.65 mm/dak• Toplam enjeksiyon süresi (dak.)• Reçine çevrim sayısı (1 / 2 / 2.5 / 3)

6.3.1 RTM Metodu ile Plaka İmalatı

1. Cam dokuma elyaflar, 48x48 cm ölçülerinde kesilerek hazırlanmıştır. Kesilen dokuma-elyafların dokuma yapılarının bozulmaması için kesme işlemi öncesinde kesilecek olan yerler bir bant ile yapıştırılmıştır (Şekil 6.1).



Şekil 6.1: Dokuma elyafların kesimi.

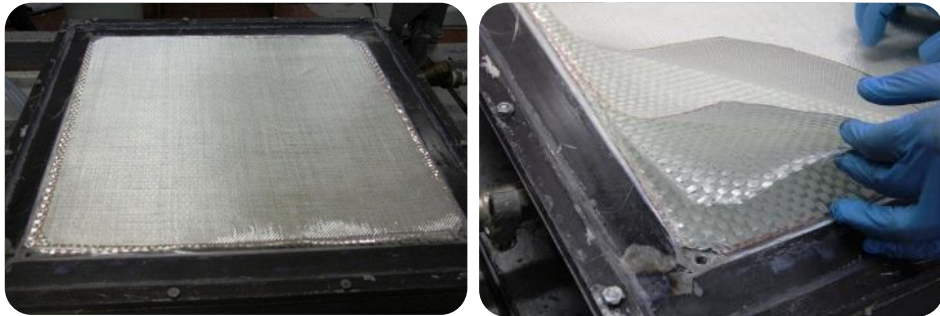
2. Paslanmaz çelikten yapılmış olan kalıp iç yüzeyleri asetonla temizlenmiştir.

3. Alt ve üst kalıbın iç kısımlarına yeterli miktarda polivaks kalıp ayırıcı sürülmüş ve bir süre beklendikten sonra kalıp ayırıcının fazlalıkları temiz bir bez ile silinerek parlatılmıştır (Şekil 6.2).



Şekil 6.2: Kalıp ayırıcı sürülmesi.

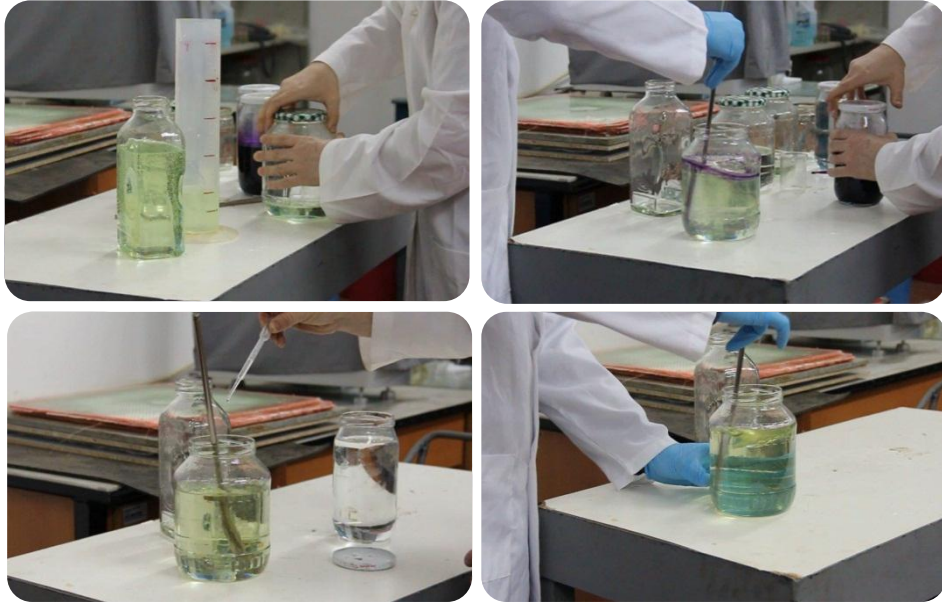
4. Daha önceden kesilerek hazırlanmış olan dokuma-elyaflar oryantasyon açısı $0/90^0$ derece olacak şekilde kalıbın içerisine Şekil 6.3'deki gibi yerleştirilmiştir. Dokuma-elyafların kalıba yerleştirilmesi sırasında dokuma yapısının bozulmadan yerleştirilmesi önemlidir.



Şekil 6.3: Dokuma elyafların kalıba yerleştirilmesi.

5. Kalıp sızdırmazlığını sağlamak için kalıbın kenar kısımlarına yeteri kadar şeffaf silikon sürülmüştür.
6. Şeffaf silikonun daha iyi sızdırmazlık sağlaması için yaklaşık 60 dk beklenmiş ve üst kapak kapatılmıştır. Üst kalıp kenarlarından mngeneler ile emniyetli bir şekilde sıkılmıştır.

7. Dört noktadan vakum boruları takılarak kelepçeleri sıkılmıştır. Daha sonra alt ve üst enjeksiyon boruları takılmıştır.
8. Kalıp kenarlarında bulunan derzlere tekrar şeffaf silikon sürülerek silikonların kuruması için yaklaşık 60 dakika beklenmiştir.
9. Reçine enjeksiyonu yapmadan önce kalıba vakum uygulanarak kalıbın ve sistemin sızdırmazlığı kontrol edilmiştir.
10. Ölçülü beher ile 1500 ml'lik polyester reçine, karışım için ayrı bir kaba dökülmüştür.
11. 1500 ml polyester reçine içerisine % 0,11 oranında cobalt (%1'lik) hızlandırıcısı katılarak karışım iyice karıştırılmıştır.
12. Polyester+cobalt karışımına %0,4 oranında MEK-P sertleştirici karıştırılmıştır ve karışım hava kabarcıklarının azalması için yaklaşık 10 dk dinlendirilmiştir (Şekil 6.4).



Şekil 6.4: Polyester reçinenin hazırlanışı.

13. Enjeksiyon için hazır olan karışım emme vanaları açılarak silindirler içerisine çekilmiştir.
14. Silindirlerin tamamının dolması ile birlikte emme vanaları kapatılmış ve basma vanaları açılmıştır. Silindirlere uygulanan itme kuvveti bilgisayar programı vasıtası ile loadcell'den aldığı verileri kullanarak sabit kuvvetle veya konum kontrollü olarak sabit hızda enjeksiyon işlemi yapılmıştır. Enjeksiyon süresi dokuma tipine ve dokuma

- sıralamasına göre değişiklik göstermiştir. Sıkı düzene sahip dokumalarda enjeksiyon süresi artmıştır.
15. Silindir içerisinde reçinenin bitmesi ile birlikte basma vanaları kapatılmış ve emme vanaları açılmıştır. Daha sonra silindirlere tekrar reçine çekilmiş ve enjeksiyon işlemine devam edilmiştir.
 16. Kalıp kenarında bulunan ventüri noktalarından reçine hava karışımı yükselmeye başlamıştır. Kalıp içerisindeki havanın minimuma inmesi için ilerleyen bölümde daha detaylı anlatılacak olan Tekrarlı Enjeksiyon (çevrim) adını verdiğimiz yöntem kullanılarak kalıp içerisine enjekte edilen reçine vakum boruları ile çevrim kabına toplanmış ve reçine tekrar silindirlere alınarak reçinenin kalıp içerisinde sirkülasyonu yapılmıştır.
 17. Silindirlere reçine emme işlemi esnasında vakum vanaları kapatılmıştır. Vakumu bu süreçte kesmemizin sebebi enjeksiyon işlemi durduğu için kalıbın içinde bulunan reçineyi boşaltmasını engellemektir. Son çevrimin bitimine yakın ise hiç vakum uygulanmamıştır.
 18. Yapılan her çevrimde hava kabarcıklarının azaldığı, genellikle 2-3 çevrimde reçinede daimi akış (sadece reçine akışı) olduğu hava kabarcıklarının neredeyse tamamının kaybolduğu gözlemlenmiştir.
 19. Reçine enjeksiyon işlemi bitiminden sonra alt ve üst enjeksiyon vanalarını kapatıp kalıp üzerine Şekil 6.5'deki jack vasıtası ile yaklaşık 3 ton'luk bir kütleme basıncı uygulanmıştır.



Şekil 6.5: Kütleme basıncının verilmesi.

20. Kalıp sıcaklığını termostat vasıtası ile 45 °C'ye getirip sirkülasyon pompası çalıştırılmıştır. Bu sayede sıcaklığın kalıbın her yerinde sabit değerde kalması sağlanmıştır.
21. Enjeksiyon işlemi bitiminden hemen sonra borular ve silindirler içerisinde bulunan reçineyi temizlemek için sisteme reçine emme işleminde olduğu gibi aseton emme işlemi yaparak reçine kalıntılarını arındırılmıştır.
22. Kalıp içerisine enjekte edilen polyster reçinenin kürleşmesi istenilen oranda hızlandırmak için kalıp sıcaklığı 45 °C'de sabit tutularak yaklaşık 24 saat bekledikten sonra kalıp açılmıştır (Şekil 6.6).



Şekil 6.6: Plakanın kalıptan çıkarılması.

6.3.1.1 Fiber Malzemesinin Tam Islanması ile İlgili Yapılan Çalışmalar

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

ve yeterince soğuyup sertleştikten sonra kalıp üst kapağı açılıp parçalar çıkartılır [31].

RTM metodunda karşılaşılan en önemli sorunlardan birisi üretilen numunenin içerisinde hava kabarcıkları kalması ve fiberlerin tam olarak ıslanmamasıdır. Bu çalışmada hava kabarcıklarını minimuma düşürmek ve fiber ıslanma probleminin önüne geçmek için Tekrarlı Enjeksiyon Sistemi adını verdiğimiz yöntemi kullandık.

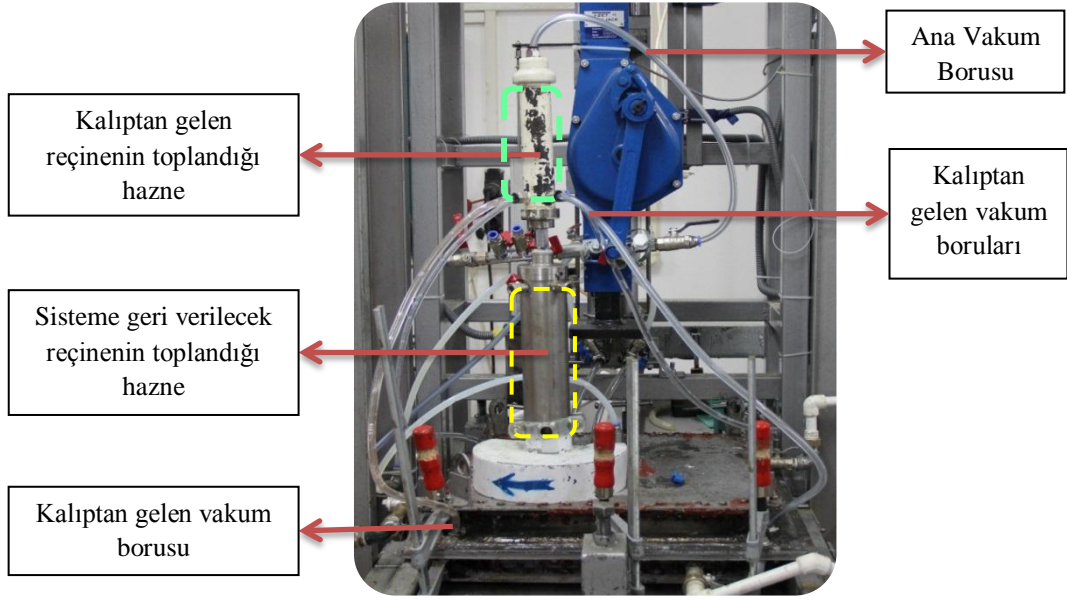
6.3.1.1.1 Tekrarlı Enjeksiyon (Sirkülasyon) Yöntemi

İmal ettiğimiz kalıpta, kalıbın dört köşesinden vakum desteği ile birlikte alt ve üst orta noktalardan reçine enjeksiyonu yapılmıştır. Burada amacımız reçinenin kalıbın her bölgesine homojen dağılmasını sağlamak ve kalıp içerisinde bulunan havayı minimuma indirmektir

Kalıp boşluğuna yerleştirilen cam-dokumaların yapısının sıkı düzende olması reçinenin ilerlemesini oldukça zorlaştırmıştır. Dolayısıyla reçinenin yüksek basınçta enjekte edilmesini zorunlu kılmıştır. Sıkı düzende bulunan elyaf içerisinde yüksek basınçta ilerleyen reçine kalıp içerisinde makro ve mikro seviyede hava boşluklarının oluşmasına sebep olmuştur. Oluşan hava boşluklarını azaltmak ve enjeksiyonu kolaylaştırmak için reçine enjeksiyonu esnasında kalıp içerisine vakum uygulanmıştır. Kalıp içerisindeki hava boşluklarının uzaklaştırılması için birden fazla (2-3 kez) reçine sirkülasyonu yapıldığında hava boşluklarının kalıp içinden atıldığı ve cam dokumaların daha iyi ıslandığı gözlenmiştir. Şekil 6.7'de görüldüğü gibi vakum desteğinin olmadığı ve reçine sirkülasyonunun yapılmadığı şartlarda kalıp içerisinde daha fazla hava boşluğunun kaldığı görülmüştür.



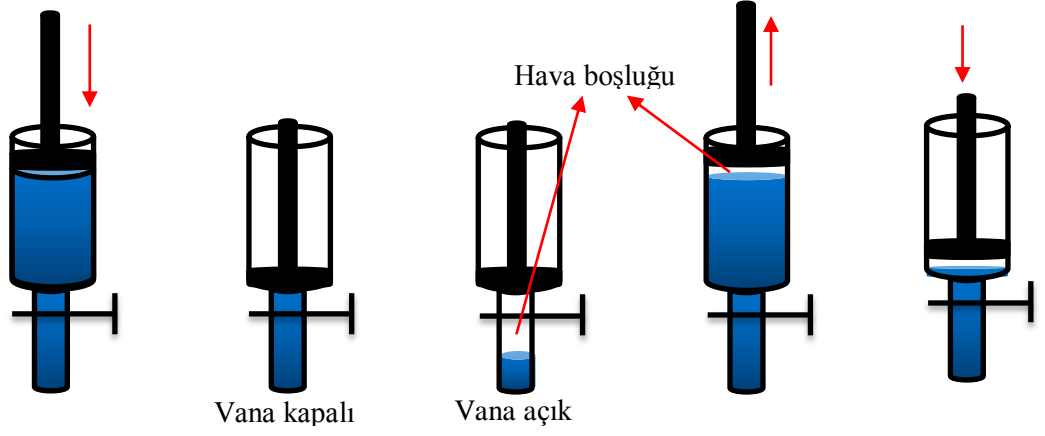
Şekil 6.7: Elde edilen kompozit plaka numuneler.



Şekil 6.8: Tekrarlı enjeksiyon sistemi.

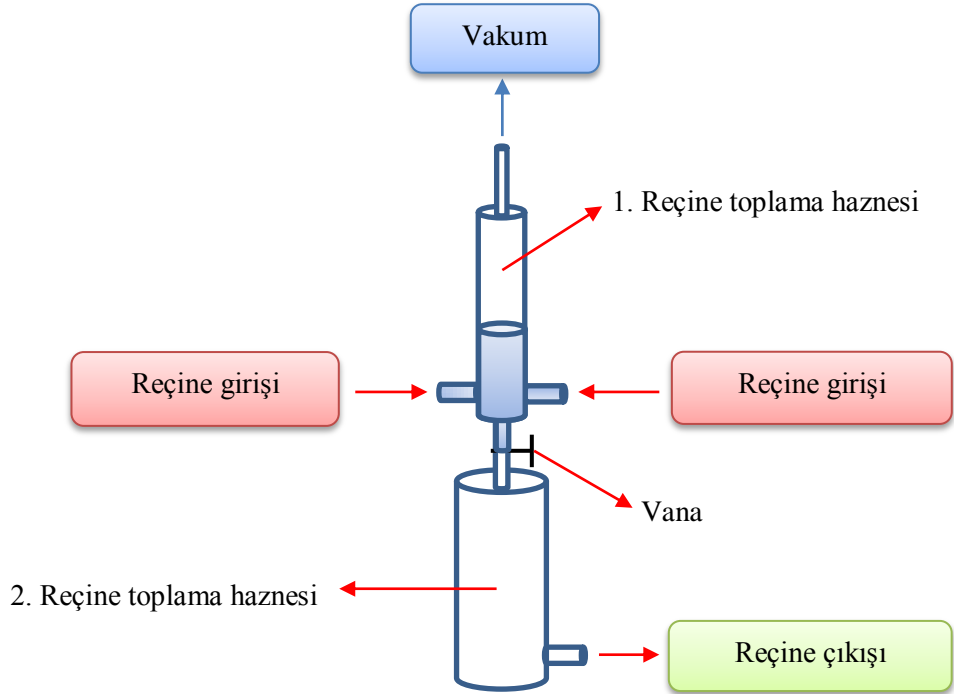
Tekrarlı enjeksiyon sistemi Şekil 6.8’de gösterilmiştir. Tekrarlı enjeksiyon yöntemi işlem basamakları;

1. İçerisine cam dokuma elyaf yerleştirilmiş ve sızdırmazlığı sağlanarak kapatılmış olan kalıp dört köşeden vakum yapılarak tamamen doluncaya kadar reçine enjeksiyonu yapılmıştır.
2. Enjeksiyon esnasında silindirler içerisinde bulunan reçinenin bitmesi üzerine silindirden çıkan enjeksiyon borusu üzerindeki vanalar kapatılmış ve emme yapacak borular üzerindeki vanalar açılmıştır. Emme vanalarının açılması ile birlikte silindirler içerisinde bulunan basınçtan ve ilk emme işleminde borulardaki havanın silindir içerisine alınmasından dolayı emme borularının içerisinden bir miktar reçinenin geri boşaldığı gözlenmiştir. Borularda oluşan bu hava boşluğunun kalıba verilmemesi için ikinci ve daha sonraki enjeksiyonlarda silindirler sonuna kadar indirilmeden enjeksiyon işlemi yapılmıştır. Bu sayede silindir içerisine alınan hava silindirin üst kısmında kalmış ve kalıp içerisine hava verilmemiştir (Şekil 6.9).



Şekil 6.9: Tekrarlı enjeksiyon işlemi sırasında oluşan hava boşluğu.

3. Kalıp reçine dolduktan sonra, enjeksiyon işlemine devam edilmiştir. Kalıp içerisinde bulunan reçine ve hava kalıp köşelerinde bulunan ventüri (boşaltma) noktalarından reçine-hava karışımı yükselerek 1. reçine toplama tankına gelmiş ve 1. reçine toplama haznesinde artan reçineler toplanırken beraberinde vakum işlemine de devam edilmiştir.
4. Reçine toplama tankı dolduktan sonra vakum işlemi durdurulmuş ve 1. reçine toplama tankı altındaki vana açılmıştır. Bu şekilde 1. tanktaki reçineler 2. reçine toplama tankına aktarılmıştır (Şekil 6.10).



Şekil 6.10: Tekrarlı enjeksiyon sistemi şematik gösterimi.

5. Reçine toplama tankında toplanan reçine emilerek çekilmiş ve tekrar kalıp içerisine enjekte edilmiştir. Kalıptan yükselmeye devam eden reçineler 1. reçine toplama tankına toplanmıştır.
6. Kalıptan çıkan vakum borularından hava çıkışı kesilinceye kadar bu devridaim (çevrim) işlemine devam edilmiştir. Bu çalışmada 2-3 çevrim sonrasında daimi akış (hava kabarcıksız reçine akışı) gözlenmiş ve sirkülasyon işlemi sonlandırılmıştır.

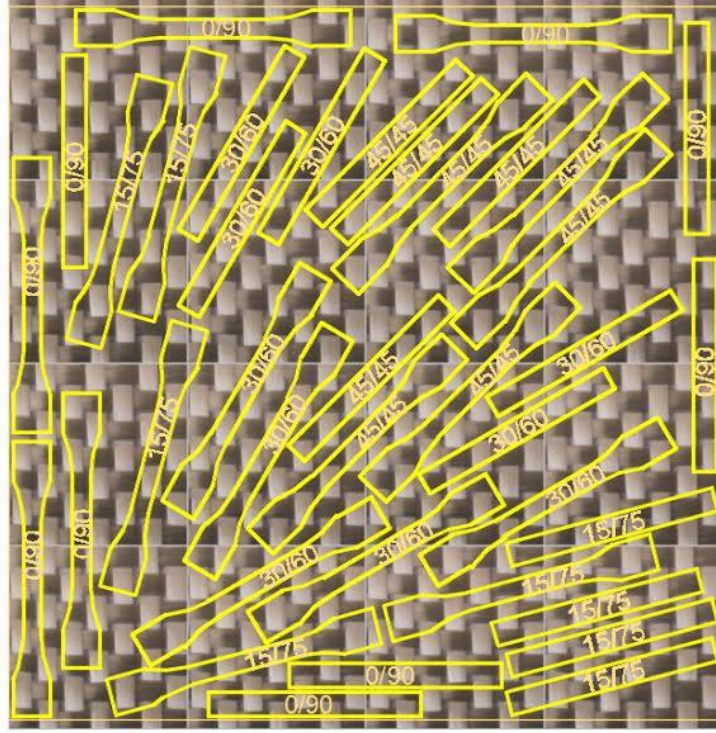
6.3.2 Kalıptan Çıkan Plakaların Kesimi

Kalıptan çıkan numuneler, Balıkesir Üniversitesi Edremit MYO'da bulunan 500x500 mm ebatlarında çalışabilen Şekil 6.11'deki CNC router ile kesilmiştir.



Şekil 6.11: Kompozit plakanın kesimi.

Bu çalışma için 17 farklı plaka imal edilmiştir. İmal edilen bu plakalardan dört farklı fiber oryantasyon açısında ($0/90^\circ$, $15/75^\circ$, $30/60^\circ$, $45/45^\circ$) her açı için her bir plakadan beş numune olmak üzere toplam 340 çekme numunesi ve 340 eğilme numunesi elde edilmiştir. $0/90^\circ$ yönünde olan bu plakalardan Şekil 6.12'deki gibi farklı açılarda kesilerek 4 farklı fiber oryantasyon açısına sahip numuneler elde edilmiştir.



Şekil 6.12: Deney numunelerinin farklı açılarda kesimi.

Plakalar ve numuneler adlandırılırken plaka içerisinde kullanılan dokuma fiberlerin adları (800 gr/m², 500 gr/m², 300 gr/m², 200 gr/m²) kısaltılarak kullanılmıştır. Örneğin: yapısında 4 adet 500 gr/m², 2 adet 300 gr/m², 2 adet 200 gr/m²'lik elyaf tabaka bulunan 500/300/200/500/500/200/300/500 plaka kısaca 5₄3₂2₂ veya 5/3/2/5/5/2/3/5 şeklinde ifade edilmiştir.

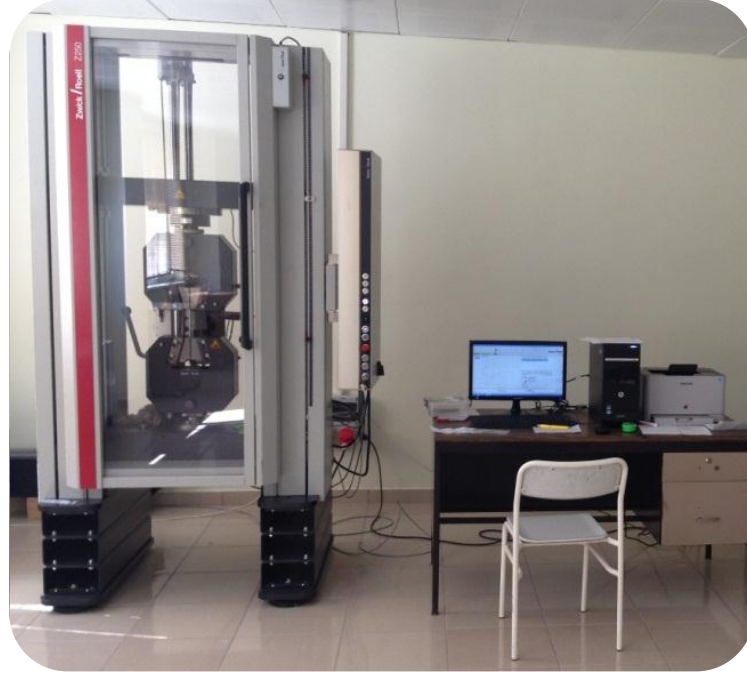
7. YÖNTEM VE BULGULAR

7.1 Malzeme Özelliklerinin Belirlenmesi

Bu bölümde, elyaf takviyeli tabakalı kompozit malzemenin mekanik özelliklerinin deneysel olarak belirlenmesinde kullanılan test yöntemleri hakkında bilgi verilmiştir. Kompozit malzemelerin davranışı hakkında bilgilerin birçoğu genellikle deneysel gözlemlerden elde edilmektedir. Kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin ölçülmesi, kompozitlerin ve yapıların üretimleriyle birleştirilmiş kalite kontrol ve kalite güvence yöntemlerinin önemli bir elemanıdır. Kompozitlerin izotropik olmayan malzeme özelliğine sahip olmaları ve hasar şekillerinin çeşitliliği gibi özel karakteristik özelliklerinden dolayı geleneksel metalik malzemeler için kullanılan çoğu test prosedürleri ve numune geometrileri kompozit malzemelere uygulanamayabilir. Bu nedenle kompozit malzemeler için test metotlarının geliştirilmesi ve değerlendirilmesi gerekmektedir. Geliştirilen test metotlarının birçoğu Amerikan Test ve Malzeme Şirketi (ASTM) tarafından kabul edilmiş standartlara göre geliştirilmiştir [23].

7.1.1 Tabakalı Kompozit Malzemenin Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi

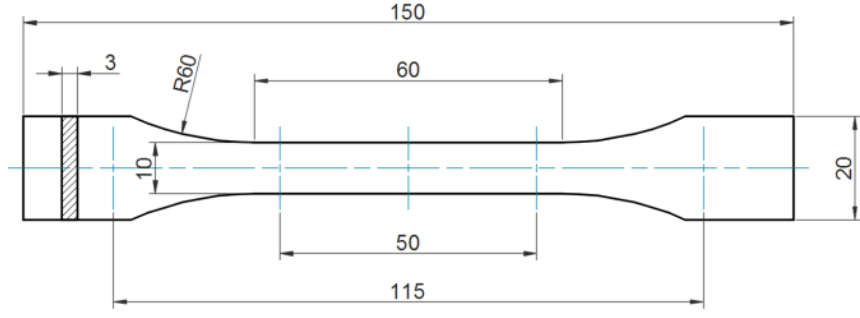
Kompozit numunelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi için çekme ve eğilme testleri, Balıkesir Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mekanik Laboratuvarında Şekil 7.1'deki 250 kN yük kapasiteli Zwick Roell Z250 Test cihazında yapılmıştır.



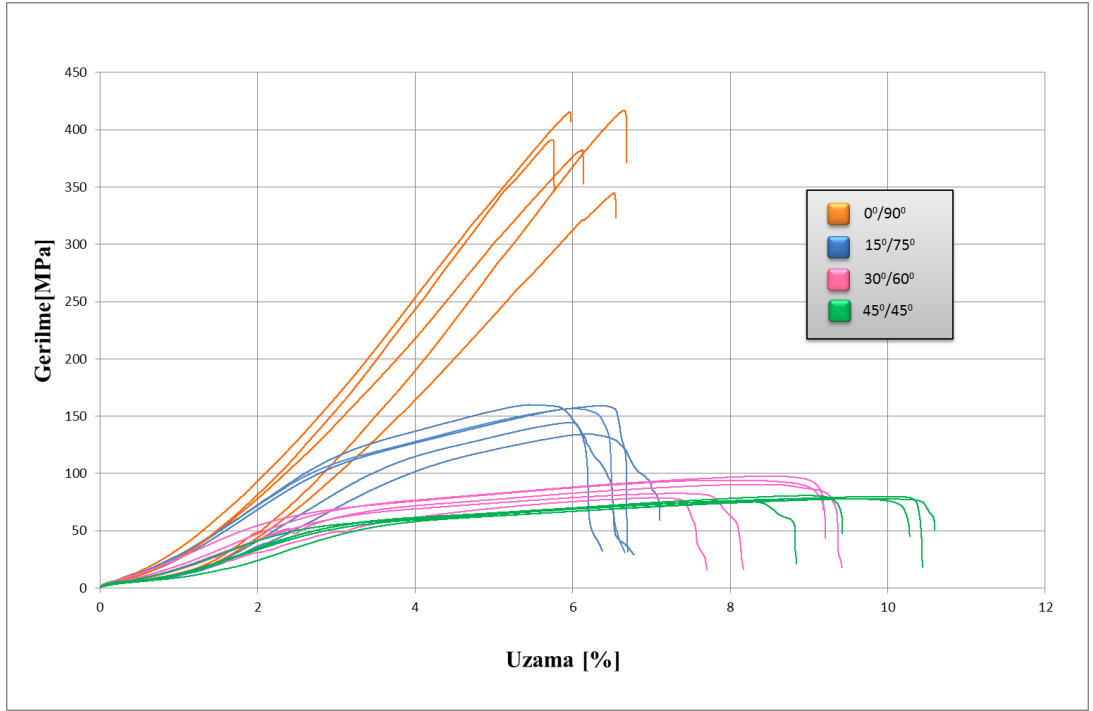
Şekil 7.1: Zwick Roell test cihazı.

7.1.1.1 Tabakalı Kompozit Malzemenin Çekme Özelliklerinin Belirlenmesi

Cam dokumaların farklı istifleme sırası ve tabaka sayısı ile kalıba yerleştirilmesinden dolayı plakalarda yapısal değişiklikler olmuştur. Üretilen plakalardaki yapı değişikliğinden kaynaklanan mekanik özelliklerin değişimi ve mekanik testler sonucunda numunelerde oluşacak hasarları belirlemek amacıyla öncelikle çekme testleri yapılmıştır. Çekme testi için TS EN ISO 527-4 standardında belirtilen Şekil 7.2'deki ölçülerde kesilerek toplam 340 adet test numunesi hazırlanmıştır. Çekme testleri, standarda uygun olarak 1 mm/dak çekme hızında gerçekleştirilmiştir. Çekme testi her numune tipi için 5 kez tekrarlanmış olup, ortalama değer çekme dayanımı olarak kabul edilmiştir. Her numune grubu için çekme dayanımı sonuç grafikleri bilgisayar yazılımı aracılığı ile Şekil 7.3'deki gibi çizdirilmiştir.



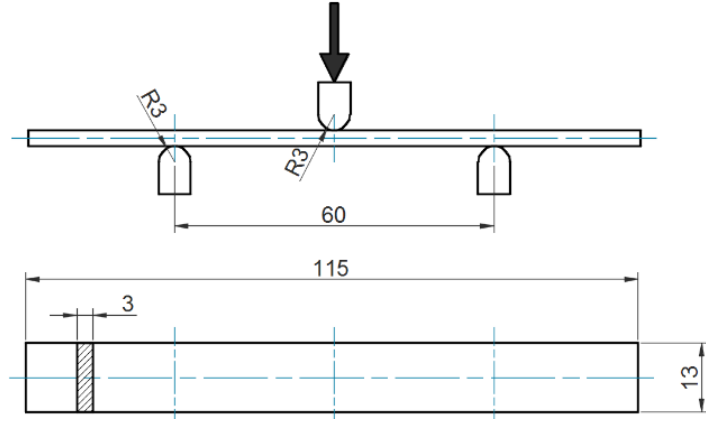
Şekil 7.2: Çekme numunesi ve ölçüleri.



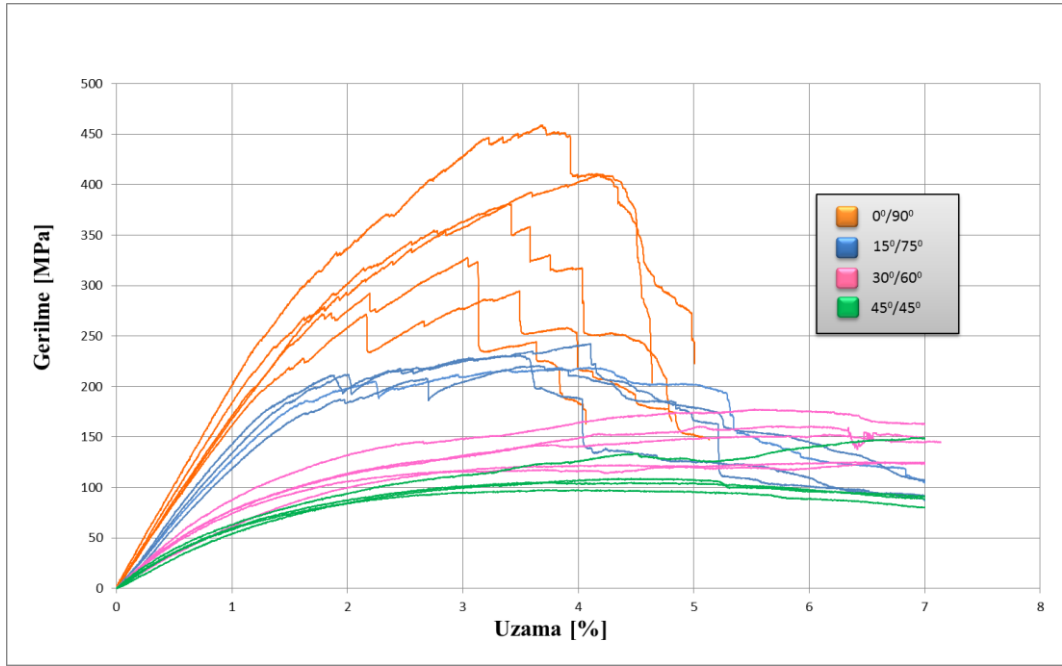
Şekil 7.3: 2₂3₂5₄ numunesi çekme testi.

7.1.1.2 Tabakalı Kompozit Malzemenin Eğilme Özelliklerinin Belirlenmesi

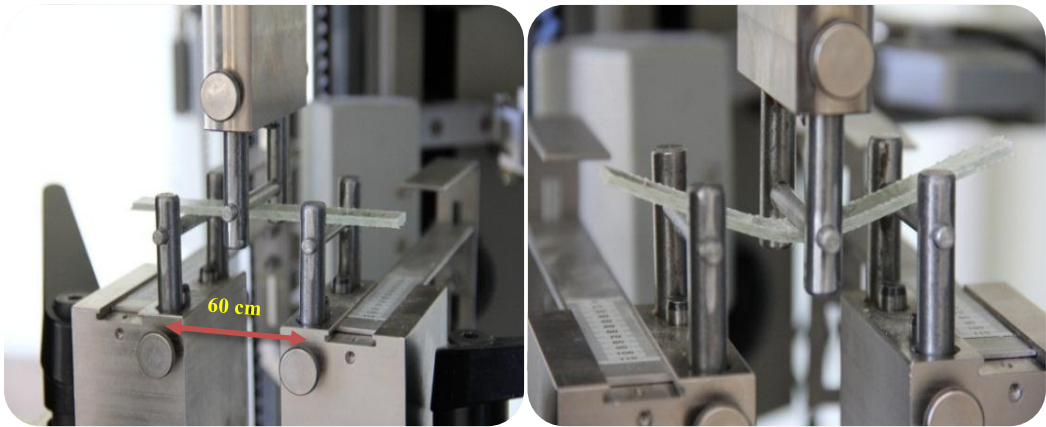
Üç nokta eğme testi için numuneler ASTM D790'da belirtilen hız ve ASTM D7264'de belirtilen boyutlarda kesilerek 1 mm/dakika hızda eğilme testleri yapılmıştır. Eğilme testleri, destekler arası açıklık 60 mm ve destek yarıçapları 3mm olacak şekilde standarda uygun olarak yapılmıştır (Şekil 7.4, Şekil 7.6). Her numune grubu için eğilme dayanımı sonuç grafikleri bilgisayar yazılımı aracılığı ile Şekil 7.5'deki gibi çizdirilmiştir.



Şekil 7.4: Eğilme numunesi ölçüleri.



Şekil 7.5: 2,3,2,5,4 numunesi eğilme testi.



Şekil 7.6: Eğilme testi.

Tablo 7.1: 0/90⁰ yönlü numunelerin çekme ve eğilme testi sonuçları.

Grup Adı, Gösterim	Çekme			Eğilme		
	Mukavemet (σ_t) - MPa	E. Modülü (E_t) - MPa	% Uzama (ϵ_t)	Mukavemet (σ_f) - MPa	E. Modülü (E_f) - MPa	% Uzama (ϵ_f)
D1	307,63	6378	5,36	410,25	16196	3,55
D2	271,41	7079	4,76	441,35	16429	3,38
D3	336,81	5882	6,61	445,51	16379	3,2
D4	303,49	6575	5,46	456,5	17688	3,24
D5	366,8	7753	5,44	380,61	17875	5,88
D6	353,87	7717	5,61	441,76	17732	3,18
D7	292,22	6838	5,86	405,41	15993	3,24
D8	302,61	6198	5,24	499,82	22869	2,82
D9	390,18	7652	6,2	374,52	17589	3,58
D10	332,61	6613	6,15	422,55	18438	3,4
D11	273,71	6213	5,55	330,88	15288	3,94
D12	249,43	5980	5,44	394,23	14609	3,2
D13	235,04	4949	5,41	393,03	13264	3,72
D14	323,16	6630	5,64	342,29	16496	3,4
D15	319,73	6410	6,98	436,92	15318	3,14
D16	293,48	5879	6,1	378,1	14919	3,2
D17	226,19	5435	5,07	341,68	13615	3,04

Tablo 7.2: 15/75⁰ yönlü numunelerin çekme ve eğilme testi sonuçları.

Grup Adı, Gösterim	Çekme			Eğilme		
	Mukavemet (σ_t) - MPa	E. Modülü (E_t) - MPa	% Uzama (ϵ_t)	Mukavemet (σ_f) - MPa	E. Modülü (E_f) - MPa	% Uzama (ϵ_f)
D1	137,79	4428	4,27	302,77	13326	3,41
D2	130,56	5004	3,97	294,33	12886	3,4
D3	133,07	3579	6,27	292,2	12978	3,08
D4	131	3817	4,93	312,7	15244	3,27
D5	130,81	4109	4,37	314,58	15016	3,34
D6	152,88	4905	4,41	337,73	15995	2,99
D7	143,81	3832	7,62	291,33	12127	3,36
D8	156,19	5444	4,24	362,51	18375	2,8
D9	150,96	4294	6,99	228,35	13355	3,84
D10	145,07	4360	5,76	270,73	12636	3,14
D11	132,72	4340	4,27	241,73	11231	3,6
D12	140,14	3514	3,29	277,82	11542	3,29
D13	121,21	4131	5,18	261,52	10159	3,38
D14	139,3	4108	5,38	244,17	12056	3,61
D15	141,53	3961	6,22	290,62	11555	3,68
D16	136,33	3065	7,28	274,25	11845	3,2
D17	119,93	3302	5,87	235,67	10193	3,4

Tablo 7.3: 30/60⁰ yönlü numunelerin çekme ve eğilme testi sonuçları.

Grup Adı, Gösterim	Çekme			Eğilme		
	Mukavemet (σ_t) - MPa	E. Modülü (E_t) - MPa	% Uzama (ϵ_t)	Mukavemet (σ_f) - MPa	E. Modülü (E_f) - MPa	% Uzama (ϵ_f)
D1	86,68	2479	5,3	159,69	6696	5,08
D2	77,51	2732	4,62	167,4	7831	4,35
D3	78,45	2101	7,37	135,99	5838	6,27
D4	79,52	2785	5,71	170,37	8237	4,02
D5	84,83	2753	6,02	149,17	6666	5,87
D6	95,46	3283	5,86	172,85	8275	5,44
D7	93,39	1870	8,64	155,47	5507	6,49
D8	90,68	3234	6,54	174,11	6905	5,34
D9	88,67	2363	7,79	148,33	6944	6,11
D10	83,97	2268	7,54	145,13	6524	4,66
D11	86,44	2359	6,09	153,95	6335	4,92
D12	91,77	2019	7,02	158,44	7062	4,92
D13	91,14	1757	9,32	147,53	6037	5,07
D14	89,96	2426	8,33	151,09	7261	4,41
D15	87,32	1978	8,56	154,65	5535	5,96
D16	86,85	1771	10,64	135,55	5230	6,62
D17	76,31	1692	9,34	144,72	5964	5,03

Tablo 7.4: 45/45⁰ yönlü numunelerin çekme ve eğilme testi sonuçları.

Grup Adı, Gösterim	Çekme			Eğilme		
	Mukavemet (σ_t) - MPa	E. Modülü (E_t) - MPa	% Uzama (ϵ_t)	Mukavemet (σ_f) - MPa	E. Modülü (E_f) - MPa	% Uzama (ϵ_f)
D1	79,07	2444	6,46	121,52	6337	4,59
D2	68,47	2197	4,42	125,63	6607	4,18
D3	73,86	1827	8,96	93,08	4247	4,79
D4	76,24	2154	7,32	130,06	6654	4,12
D5	79,11	2386	7,3	103,52	5487	3,89
D6	86,35	2982	6,58	123,38	7267	3,95
D7	84,72	1701	10,95	99,92	4863	4,65
D8	85,93	3081	9,45	112,06	5250	4,84
D9	78,48	2167	9,19	115,39	5328	4,78
D10	74,99	2202	8,74	101,35	4824	4,99
D11	76,34	2190	6,69	114,21	5250	4,87
D12	80,54	2033	6,76	106,39	5107	4,83
D13	76,08	1452	10,34	105,61	4798	5,29
D14	77,21	2213	9,05	101,48	4858	4,54
D15	82,87	2037	10,25	101,18	4518	4,87
D16	77,1	1590	11,36	84,78	4236	4,36
D17	67,59	1393	11,98	92,4	4355	5,07

Tablo 7.5: Çekme mukavemetinin plaka kalınlığı ile kıyaslanması.

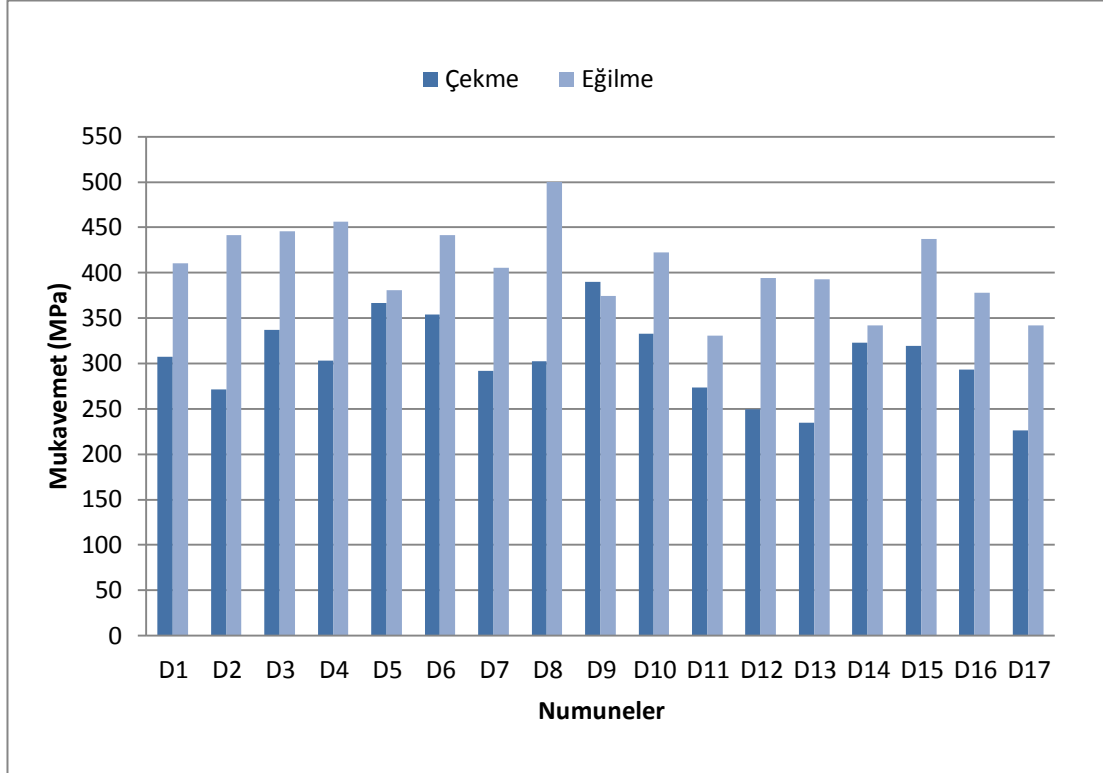
Grup Adı, Gösterim	Tabaka Sayısı	Ortalama Plaka Kalınlığı (mm)	Çekme Mukavemeti (σ_t) - MPa			
			Fiber Oryantasyon Açısı			
			0/90	15/75	30/60	45/45
D1	5	2,91	307,63	137,79	86,68	79,07
D2	5	2,94	271,41	130,56	77,51	68,47
D3	6	2,78	336,81	133,07	78,45	73,86
D4	6	2,91	303,49	131	79,52	76,24
D5	6	2,58	366,8	130,81	84,83	79,11
D6	6	2,51	353,87	152,88	95,46	86,35
D7	7	2,96	292,22	143,81	93,39	84,72
D8	7	2,86	302,61	156,19	90,68	85,93
D9	8	2,53	390,18	150,96	88,67	78,48
D10	8	2,92	332,61	145,07	83,97	74,99
D11	8	3,09	273,71	132,72	86,44	76,34
D12	8	3,01	249,43	140,14	91,77	80,54
D13	8	3,13	235,04	121,21	91,14	76,08
D14	9	2,84	323,16	139,3	89,96	77,21
D15	9	3,09	319,73	141,53	87,32	82,87
D16	10	2,99	293,48	136,33	86,85	77,1
D17	10	3,12	226,19	119,93	76,31	67,59

Tablo 7.6: Eğilme mukavemetinin plaka kalınlığı ile kıyaslanması.

Grup Adı, Gösterim	Tabaka Sayısı	Ortalama Plaka Kalınlığı (mm)	Eğilme Mukavemeti (σ_f) - MPa			
			Fiber Oryantasyon Açısı			
			0/90	15/75	30/60	45/45
D1	5	2,91	410,25	302,77	159,69	121,52
D2	5	2,94	441,35	294,33	167,4	125,63
D3	6	2,78	445,51	292,2	135,99	93,08
D4	6	2,91	456,5	312,7	170,37	130,06
D5	6	2,58	380,61	314,58	149,17	103,52
D6	6	2,51	441,76	337,73	172,85	123,38
D7	7	2,96	405,41	291,33	155,47	99,92
D8	7	2,86	499,82	362,51	174,11	112,06
D9	8	2,53	374,52	228,35	148,33	115,39
D10	8	2,92	422,55	270,73	145,13	101,35
D11	8	3,09	330,88	241,73	153,95	114,21
D12	8	3,01	394,23	277,82	158,44	106,39
D13	8	3,13	393,03	261,52	147,53	105,61
D14	9	2,84	342,29	244,17	151,09	101,48
D15	9	3,09	436,92	290,62	154,65	101,18
D16	10	2,99	378,1	274,25	135,55	84,78
D17	10	3,12	341,68	235,67	144,72	92,4

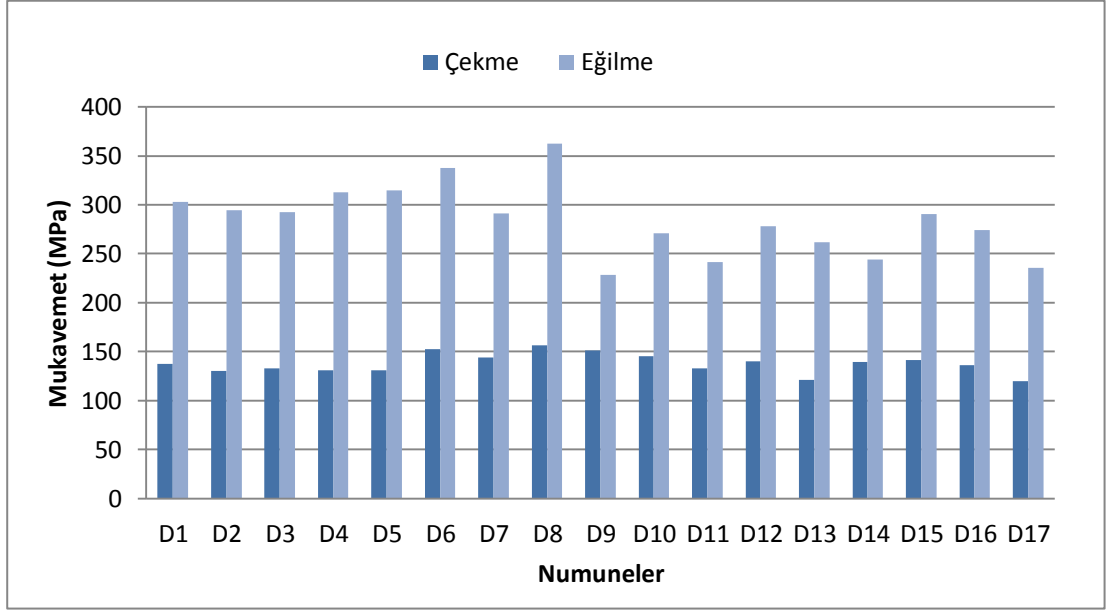
7.1.2 Test Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Cam-dokuma tipi, istifleme sırası ve tabaka sayısı farklı olarak üretilen on yedi farklı dizilimi olan tabakalı kompozit plaka için elde edilen çekme ve eğilme testi sonuçları Şekil 7.7'deki grafikte karşılaştırılmalı olarak gösterilmiştir.



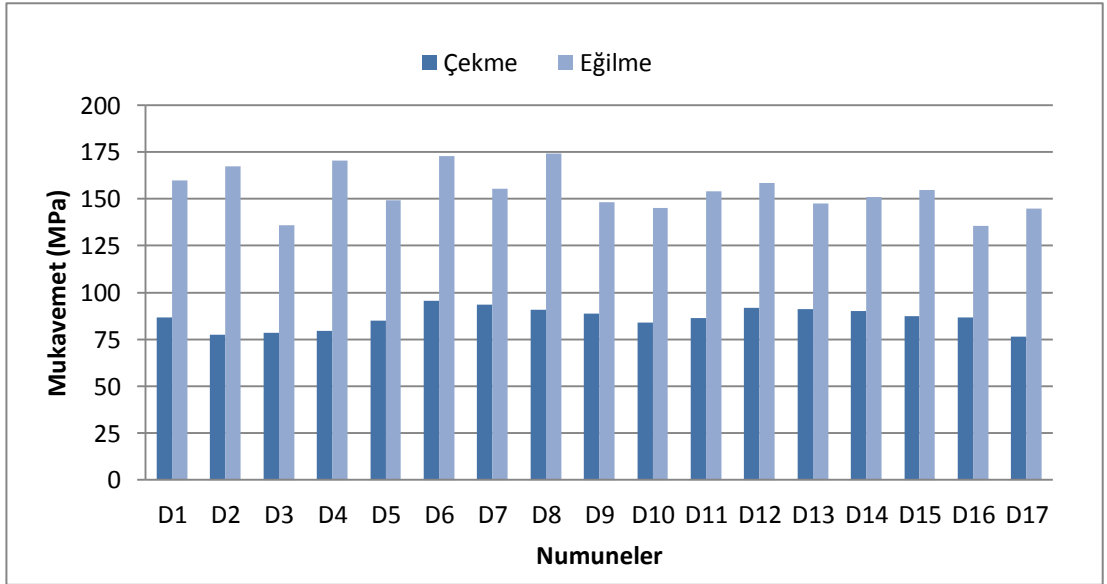
Şekil 7.7: 0/90° Yönlü numunelerin çekme ve eğilme mukavemeti.

Fiber yönlendirmesi 0/90° olan numunelerde en yüksek çekme mukavemeti sekiz tabakalı 2₂3₂5₄ grubu numunelerde, en düşük çekme mukavemeti ise on tabakalı 2₄3₄5₂ plakalarda elde edilmiştir. İstifleme sırasında reçine geçirgenliği en düşük olan 200 gr/m² dokumaların merkezde olması ve tabaka sayısının artması reçine geçirgenliğini olumsuz yönde etkilemiştir. Reçine geçirgenliğinin düşmesi çekme mukavemetinin düşmesine neden olmuştur. En yüksek eğilme mukavemeti yedi tabakalı 5₂3₄8₁ plakalarda elde edilirken, en düşük eğilme mukavemeti ise sekiz tabakalı 2₄3₂8₂ plakalarda elde edilmiştir.



Şekil 7.8: 15/75⁰ Yönlü numunelerin çekme ve eğilme mukavemeti.

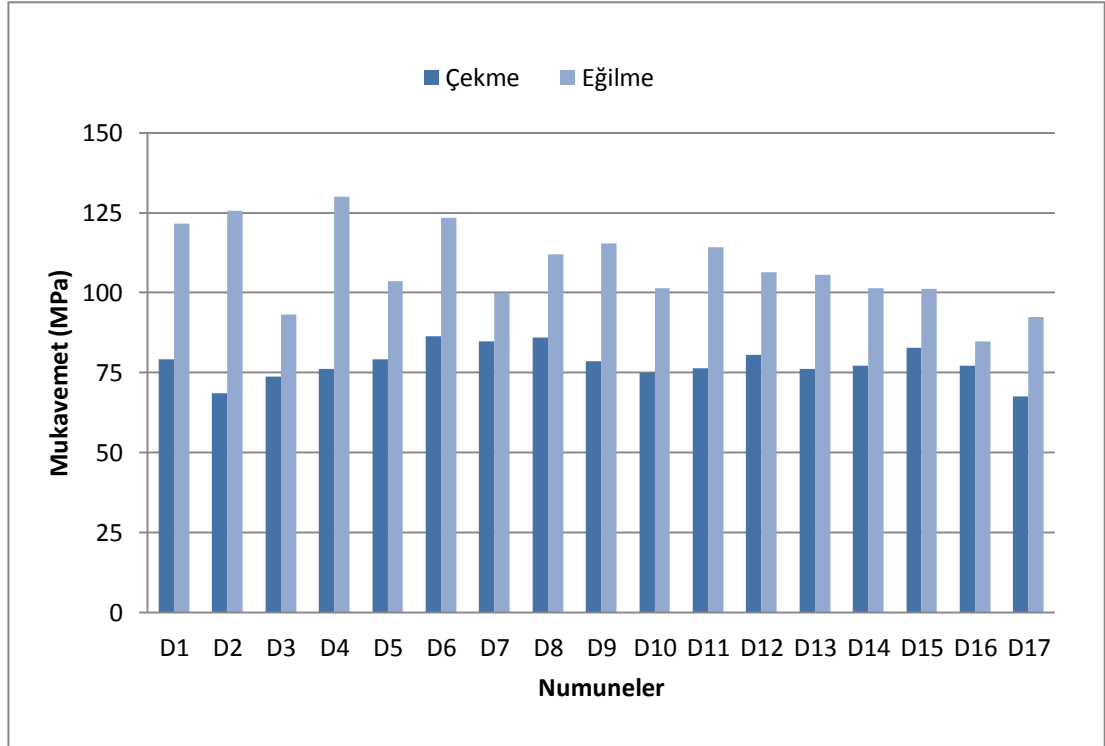
Fiber yönlendirmesi 15/75⁰ olan numunelerde en yüksek çekme ve eğilme mukavemeti yedi tabakalı 5₂3₄8₁ grubu numunelerde, en düşük çekme mukavemeti ise on tabakalı 2₄3₄5₂ grubu plakalarda elde edilmiştir. En düşük eğilme mukavemeti ise sekiz tabakalı 2₂3₂5₄ grubu plakalarda elde edilmiştir (Şekil 7.8).



Şekil 7.9: 30/60⁰ Yönlü numunelerin çekme ve eğilme mukavemeti.

Fiber yönlendirmesi 30/60⁰ olan numunelerde en yüksek çekme mukavemeti altı tabakalı 8₃2₃ grubu numunelerde, en düşük çekme mukavemeti ise on tabakalı 2₄3₄5₂ grubu plakalarda elde edilmiştir. En yüksek eğilme mukavemeti yedi tabakalı

5₂3₄8₁ grubu plakalarda elde edilirken, en düşük eğilme mukavemeti on tabakalı 5₂3₄2₄ grubu plakalarda elde edilmiştir. (Şekil 7.9).



Şekil 7.10: 45/45⁰ Yönlü numunelerin çekme ve eğilme mukavemeti.

Fiber yönlendirmesi 45/45⁰ olan numunelerde en yüksek çekme mukavemeti altı tabakalı 8₃2₃ grubu numunelerde, en düşük çekme mukavemeti ise on tabakalı 2₄3₄5₂ grubu plakalarda elde edilmiştir. En yüksek eğilme mukavemeti altı tabakalı 8₂5₂2₂ grubu plakalarda elde edilirken, en düşük eğilme mukavemeti ise on tabakalı 5₂3₄2₄ grubu plakalarda elde edilmiştir (Şekil 7.10).

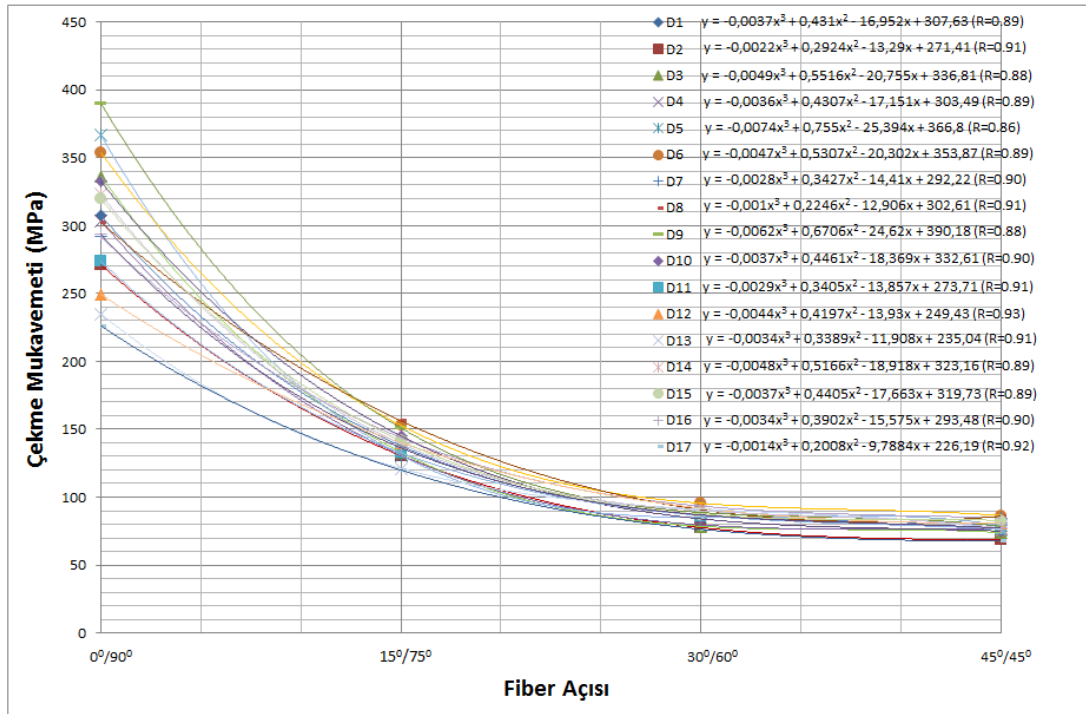
Tablo 7.7: Plaka kalınlığı, çekme ve eğilme mukavemeti karşılaştırması.

Grup Adı, Gösterim	Tabaka sayısı	Kalınlık mm	Fiber Hacmi %	İstifleme Sırası	0/90		15/75		30/60		45/45	
					Mukavemet		Mukavemet		Mukavemet		Mukavemet	
					Çekme MPa	Eğilme MPa	Çekme MPa	Eğilme MPa	Çekme MPa	Eğilme MPa	Çekme MPa	Eğilme MPa
D1	5	2,91	41,24	3/8/8/8/3	307,63	410,3	137,79	302,8	86,68	159,7	79,07	121,5
D2	5	2,94	40,82	8/3/8/3/8	271,41	441,4	130,56	294,3	77,51	167,4	68,47	125,6
D3	6	2,78	43,17	5/5/5/5/5/5	336,81	445,5	133,07	292,2	78,45	136	73,86	93,08
D4	6	2,91	41,24	8/5/2/2/5/8	303,49	456,5	131	312,7	79,52	170,4	76,24	130,1
D5	6	2,58	46,51	2/5/8/8/5/2	366,8	380,6	130,81	314,6	84,83	149,2	79,11	103,5
D6	6	2,51	47,81	8/2/8/2/8/2	353,87	441,8	152,88	337,7	95,46	172,9	86,35	123,4
D7	7	2,96	40,54	3/5/3/8/3/5/3	292,22	405,4	143,81	291,3	93,39	155,5	84,72	99,92
D8	7	2,86	41,96	5/3/3/8/3/3/5	302,61	499,8	156,19	362,5	90,68	174,1	85,93	112,1
D9	8	2,53	47,43	2/3/5/5/5/5/3/2	390,18	374,5	150,96	228,4	88,67	148,3	78,48	115,4
D10	8	2,92	41,10	5/5/3/2/2/3/5/5	332,61	422,6	145,07	270,7	83,97	145,1	74,99	101,4
D11	8	3,09	38,83	2/2/3/8/8/3/2/2	273,71	330,9	132,72	241,7	86,44	154	76,34	114,2
D12	8	3,01	39,87	8/3/2/2/2/2/3/8	249,43	394,2	140,14	277,8	91,77	158,4	80,54	106,4
D13	8	3,13	38,34	5/3/2/5/5/2/3/5	235,04	393	121,21	261,5	91,14	147,5	76,08	105,6
D14	9	2,84	42,25	2/3/5/3/5/2/5/3/2	323,16	342,3	139,3	244,2	89,96	151,1	77,21	101,5
D15	9	3,09	38,83	5/3/2/3/5/2/2/3/5	319,73	436,9	141,53	290,6	87,32	154,7	82,87	101,2
D16	10	2,99	40,13	5/3/2/3/2/2/3/2/3/5	293,48	378,1	136,33	274,3	86,85	135,6	77,1	84,78
D17	10	3,12	38,46	2/3/2/3/5/5/3/2/3/2	226,19	341,7	119,93	235,7	76,31	144,7	67,59	92,4

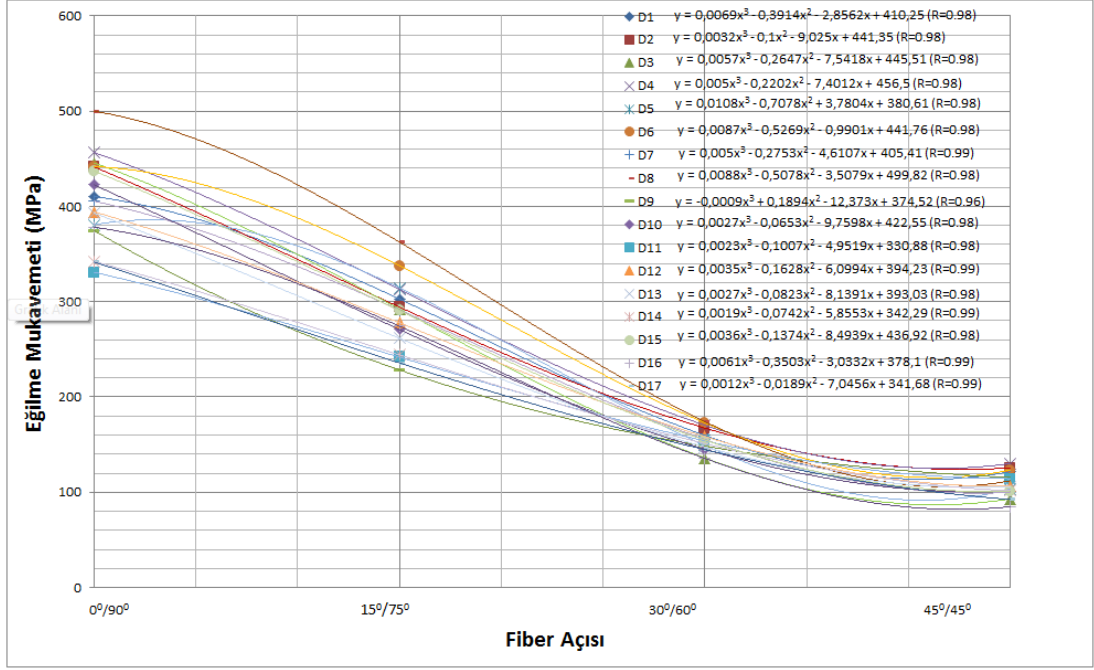
Test numunelerinin ortalama kalınlığı hesap edilmiş ve plaka kalınlığı olarak kabul edilmiştir. Sonuçların daha iyi gözükebilmesi için plaka kalınlıkları ve mukavemet değerleri Tablo 7.7’de sayısal değerlerine göre renkli olarak gösterilmiştir. Yeşil renk en yüksek mukavemet değerlerini ve en düşük plaka kalınlığını ifade etmektedir. Kırmızı renk ise en düşük mukavemet değerini ve en yüksek plaka kalınlığını ifade etmektedir. Plaka kalınlıkları ve tabaka sayısına göre çekme ve eğilme mukavemeti incelendiğinde plaka kalınlığı arttıkça mukavemet değerlerinin düştüğü gözükmemektedir. Tabaka sayısının artması ise plaka kalınlığının genellikle artmasına neden olmaktadır.

Plakaların içerisinde bulunan birim alandaki fiber ağırlığı 3 kg/m^2 sabit olduğu için plaka kalınlığının azalması fiber oranının artmasını ve mukavemet değerlerinin daha yüksek çıkmasını sağlamıştır. Elde edilen sonuçlar literatür araştırmasını destekler niteliktedir.

Test sonuçları incelendiğinde, tabaka sayısı 6-8 arası, tabaka kalınlığı ise 2,5-2,7 mm arası değerler en iyi sonuçları vermiştir.



Şekil 7.11: Fiber açısının çekme mukavemetine etkisi.



Şekil 7.12: Fiber açısının eğilme mukavemetine etkisi.

Kompozit plakaların çekme ve eğilme mukavemet değerleri fiber açısından etkilendiği Şekil 7.11 ve Şekil 7.12’de net olarak gözükmektedir. En yüksek mukavemet değerleri elyaf yönlendirilmesi 0/90° olan numunelerde en düşük mukavemet değerleri ise 45/45° numunelerde elde edilmiştir.

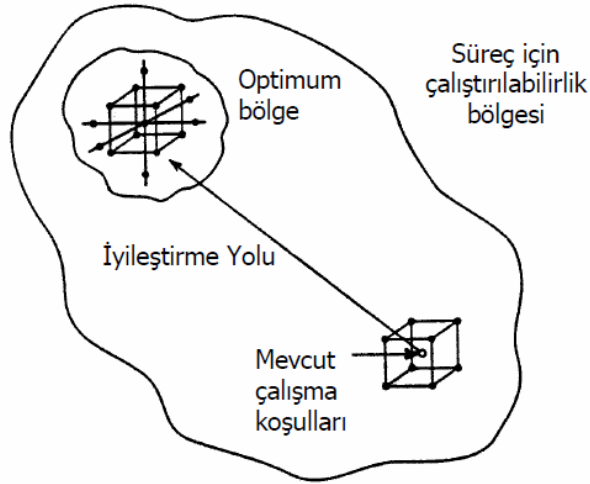
7.2 OPTİMİZASYON

Optimizasyon, prosesin belirlenen hedefler (yanıtlar) doğrultusunda, bağımsız değişkenlerin birbirleriyle olan etkileşimleri ve bu bağımsız değişkenlerin hedefe (yanıt) olan etkileri de göz önünde bulundurularak bir araya getirilip uygulanması işlemidir. Herhangi bir optimizasyon prosedürü, genellikle hedef fonksiyonu adı verilen önceden tanımlanmış kriterleri maksimize veya minimize etmek için (örneğin; ürün kalitesi veya kâr) karar (bağımsız) değişkenleri adı verilen belirlenen koşulların değiştirilmesini içerir. Bugün, rekabete dayalı piyasada optimizasyon teorisinin ve tekniklerinin uygulanması gereklidir. Optimizasyon proses tasarımlarını verimli hale getirmek (üretimi ve kaliteyi iyileştirmek ve maliyeti minimize etmek) için kullanılmaktadır. Bilgisayar yazılımlarında matematiğin, sayısal analizin ve mühendisliğin uygulanması ile son yirmi yılda optimizasyon teori ve tekniklerinde çok fazla ilerleme kaydedilmiştir [43].

7.3 Yanıt Yüzey Yöntemi (Response Surface Method)

Yanıt Yüzey Yöntemi (YYY), “Denemelerin Optimum Koşullara Ulaşması” ismi ile 1951 yılında Box ve Wilson tarafından geliştirilmiş ve tanımlanmıştır. İlk olarak kimya endüstrisine uygulanmıştır. Myers ve Montgomery yanıt yüzey yöntemini, proseslerin geliştirilmesi ve optimizasyonu için gerekli istatistiksel ve matematiksel tekniklerin birlikte kullanıldığı bir yöntem olarak tanımlamıştır [44].

Yanıt Yüzey Yöntemi, ilgilenilen tepkinin birkaç değişken tarafından etkilendiği ve amacın bu tepkiyi optimize etmek olduğu problemlerin modellenmesi ve analizi için kullanılan istatistiksel tekniklerin ve matematiksel ifadelerin birleşimidir. RSM yeni bir ürünün formülasyonunda, var olan ürün tasarımının iyileştirilmesinde, süreç optimizasyonunda, sürecin geliştirilmesinde ve iyileştirilmesinde yaygın olarak kullanılır [45]. YYY metodu için işlem akışı Şekil 7.13’te verilmiştir.



Şekil 7.13: Yanıt Yüzey Yöntemi için işlem akışı [43].

Gerçek tepki fonksiyonunun biçimi bilinmediğinden tepki ve bağımsız değişkenler arasındaki gerçek fonksiyonel ilişki için uygun bir yaklaşım bulunmalıdır. Sistemin yanıtı, bağımsız değişkenin bir lineer fonksiyonu olarak iyi bir uyum veriyorsa, yaklaşım birinci dereceden bir modeldir (Denklem 7.1) [45];

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \epsilon \quad (7.1)$$

Eğer sistemin yanıt yüzeyinde bir eğrilik varsa, ikinci dereceden bir model daha uygun olabilir (Denklem 7.2);

$$y = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j x_j + \sum_{j=1}^k \beta_{jj} x_j^2 + \sum_{i<j=2}^k \sum_{i=1}^k \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (7.2)$$

Bu eşitlikte;

y = tepki değişkeni

$\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$ = bilinmeyen regresyon parametreleri

x_i, x_j = süreç (karar) değişkenleri ($i = 1, 2, \dots, k$) ve ($j = 1, 2, 3, \dots, k$)

ε = hata terimi ile gösterilir [43].

7.3.1 Yanıt Yüzey Yöntemi İçin Deney Tasarımının Oluşturulması

Bu çalışmada fiber takviyeli kompozit plakanın optimum mekanik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla Yanıt Yüzey Yöntemi (RSM) kullanılmıştır.

Değişken parametre olarak tabaka sayısı, fiber açısı, istifleme sırası incelenmiştir. Fiber açısı ve istifleme sırası kodlanmış olarak ifade edilmiştir (Tablo 7.8). Bağımsız değişkenler, kodlanmış ve gerçek değerleri ile Tablo 7.9'da gösterilmiştir.

Tablo 7.8: Kodlanmış parametrelerin gerçek değerleri.

Faktörler	Faktör Seviyeleri							
	Kodlanmış Değer				Gerçek Değer			
Fiber Açısı	1	2	3	4	0/90 ⁰	15/75 ⁰	30/60 ⁰	45/45 ⁰
İstifleme Sırası	1	2	3	-	Sıkı yapı dışta	Sıkı yapı içte	Karma yapı	-

Tablo 7.9: Bağımsız değişken parametreler.

Faktörler	Faktör Seviyeleri					
Tabaka Sayısı (x_1) (gerçek değer)	5	6	7	8	9	10
Fiber Açısı (x_2) (kodlanmış değer)	1	2	3	4	-	-
İstifleme Sırası (x_3) (kodlanmış değer)	1	2	3	-	-	-

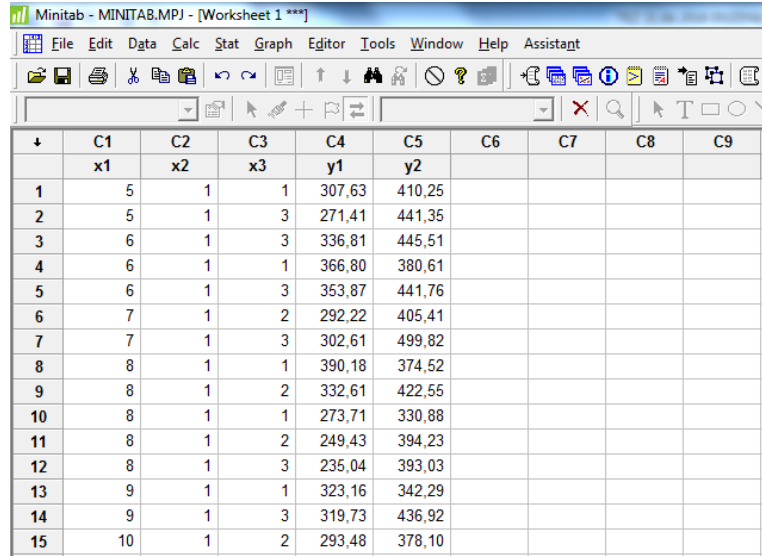
Kompozit plakanın maksimum mukavemet değerlerini aldığı değişkenlerinin değerinin belirlenmesi amacıyla, elde edilen deney sonuçları Tablo 7.10'da verilmiştir. Bağımsız değişkenler tabaka sayısı x_1 , fiber açısı x_2 , istifleme sırası x_3 , yanıt değerleri, çekme mukavemeti y_1 eğilme mukavemeti y_2 olarak ifade edilmiştir. Tabaka sayısı, bir plakada kullanılan dokuma sayısını, fiber açısı, kompozit plakada bulunan dokuma fiberin yönlendirilmesini, istifleme sırası ise plakada bulunan dokuma fiberlerin reçine geçirgenliğine göre sıralamasını ifade eder. Reçine geçirgenliği düşük olan yapılar (200 gr/m^2 ve 300 gr/m^2 dokuma) için sıkı yapı ifadesi kullanılmıştır.

Tablo 7.10: RSM için bağımsız değişkenler ve yanıt değerleri deneme deseni.

x_1	x_2	x_3	y_1	y_2
5	1	1	307,63	410,25
5	1	3	271,41	441,35
6	1	3	336,81	445,51
6	1	1	366,8	380,61
6	1	3	353,87	441,76
7	1	2	292,22	405,41
7	1	3	302,61	499,82
8	1	1	390,18	374,52
8	1	2	332,61	422,55
8	1	1	273,71	330,88
8	1	2	249,43	394,23
8	1	3	235,04	393,03
9	1	1	323,16	342,29
9	1	3	319,73	436,92
10	1	2	293,48	378,1
10	1	1	226,19	341,68
5	2	1	137,79	302,77
5	2	3	130,56	294,33
6	2	3	133,07	292,2
6	2	2	131	312,7
6	2	1	130,81	314,58
6	2	3	152,88	337,73
7	2	3	156,19	362,51
8	2	1	150,96	228,35
8	2	2	145,07	270,73
8	2	1	132,72	241,73
8	2	2	140,14	277,82
8	2	3	121,21	261,52
9	2	1	139,3	244,17
9	2	3	141,53	290,62
10	2	2	136,33	274,25
10	2	1	119,93	235,67

x_1	x_2	x_3	y_1	y_2
5	3	1	86,68	159,69
5	3	3	77,51	167,4
6	3	3	78,45	135,99
6	3	2	79,52	170,37
6	3	1	84,83	149,17
6	3	3	95,46	172,85
7	3	2	93,39	155,47
7	3	3	90,68	174,11
8	3	1	88,67	148,33
8	3	2	83,97	145,13
8	3	1	86,44	153,95
8	3	3	91,14	147,53
9	3	1	89,96	151,09
9	3	3	87,32	154,65
10	3	2	86,85	135,55
10	3	1	76,31	144,72
5	4	1	79,07	121,52
5	4	3	68,47	125,63
6	4	3	73,86	93,08
6	4	2	76,24	130,06
6	4	1	79,11	103,52
6	4	3	86,35	123,38
7	4	2	84,72	99,92
7	4	3	85,93	112,06
8	4	1	78,48	115,39
8	4	2	74,99	101,35
8	4	1	76,34	114,21
8	4	2	80,54	106,39
8	4	3	76,08	105,61
9	4	3	82,87	101,18
10	4	2	77,1	84,78
10	4	1	67,59	92,4

Elde edilen deney sonuçları için Minitab 16.1 paket programı kullanılarak istatistiksel analizler yapılmıştır (Şekil 7.14).



	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
	x1	x2	x3	y1	y2				
1	5	1	1	307,63	410,25				
2	5	1	3	271,41	441,35				
3	6	1	3	336,81	445,51				
4	6	1	1	366,80	380,61				
5	6	1	3	353,87	441,76				
6	7	1	2	292,22	405,41				
7	7	1	3	302,61	499,82				
8	8	1	1	390,18	374,52				
9	8	1	2	332,61	422,55				
10	8	1	1	273,71	330,88				
11	8	1	2	249,43	394,23				
12	8	1	3	235,04	393,03				
13	9	1	1	323,16	342,29				
14	9	1	3	319,73	436,92				
15	10	1	2	293,48	378,10				

Şekil 7.14: Bağımsız değişkenlerin ve deney sonuçlarının paket programa girilmesi.

Response Surface Regression: y1 versus x1; x2; x3					Response Surface Regression: y2 versus x1; x2; x3				
The analysis was done using uncoded units.					The analysis was done using uncoded units.				
Estimated Regression Coefficients for y1					Estimated Regression Coefficients for y2				
Term	Coef	SE Coef	T	P	Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	547,627	99,487	5,505	0,000	Constant	614,499	90,535	6,787	0,000
x1	18,748	22,262	0,842	0,403	x1	-17,425	20,258	-0,860	0,394
x2	-300,001	23,353	-12,846	0,000	x2	-184,179	21,252	-8,667	0,000
x3	-36,550	37,836	-0,966	0,338	x3	38,212	34,431	1,110	0,272
x1*x1	-2,106	1,374	-1,533	0,131	x1*x1	0,005	1,250	0,004	0,997
x2*x2	39,806	3,159	12,602	0,000	x2*x2	18,273	2,874	6,357	0,000
x3*x3	3,710	7,443	0,498	0,620	x3*x3	-2,218	6,773	-0,327	0,745
x1*x2	2,904	1,872	1,552	0,127	x1*x2	2,175	1,704	1,277	0,207
x1*x3	1,635	2,479	0,660	0,512	x1*x3	2,167	2,256	0,961	0,341
x2*x3	3,069	3,397	0,903	0,370	x2*x3	-12,519	3,091	-4,050	0,000
S = 25,2205 PRESS = 50224,5 R-Sq = 93,96% R-Sq(pred) = 91,16% R-Sq(adj) = 92,95%					S = 22,9511 PRESS = 37624,6 R-Sq = 96,86% R-Sq(pred) = 95,84% R-Sq(adj) = 96,33%				

Şekil 7.15: Kuadratik model için ANOVA tablosu.

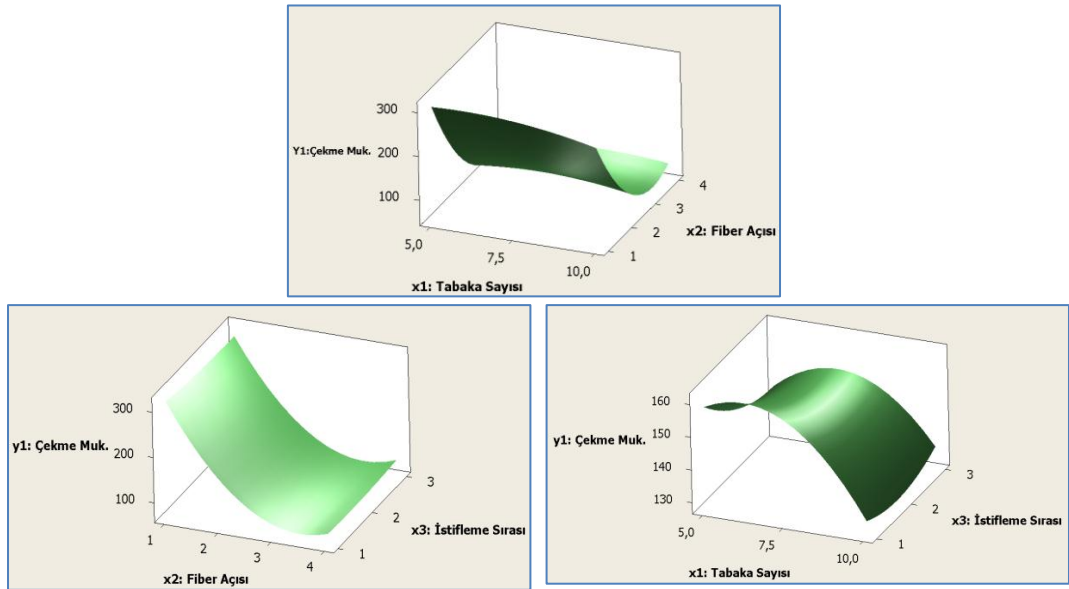
7.3.2 Parametrelerin Regresyon Denklemi ve Grafiği

Çıkan sonuç incelendiğinde tabaka sayısı x_1 , fiber açısı x_2 , istifleme sırası x_3 parametrelerinin mukavemet için önemli derecede etkili olduğu görülmüştür (Şekil 7.15). Bu ilişkiyi gösteren regresyon modeli denklem 7.3 ve denklem 7.4'te verilmiştir.

$$y_1 = 547,627 + 18,748x_1 - 300,001x_2 - 36,550x_3 - 2,106x_1^2 + 39,806x_2^2 + 3,710x_3^2 + 2,904x_1 \cdot x_2 + 1,635x_1 \cdot x_3 + 3,069x_2 \cdot x_3 \quad (7.3)$$

$$y_2 = 614,499 - 17,425x_1 - 184,179x_2 + 38,212x_3 + 0,005x_1^2 + 18,273x_2^2 - 2,218x_3^2 + 2,175x_1 \cdot x_2 + 2,167x_1 \cdot x_3 - 12,519x_2 \cdot x_3 \quad (7.4)$$

Kurulan modelin R^2 değeri, çekme mukavemeti için % 93,96 eğilme mukavemeti için % 96,86 olarak hesaplanmıştır (Denklem 7.3 ve 7.4). Buna göre ikinci dereceden kurulan bu modelde yer alan terimler toplam değişkenliği % 94-97 oranında tanımlamaktadır. Bu sonuç kurulan matematiksel modelin çıktıya uygun olduğunu göstermektedir.



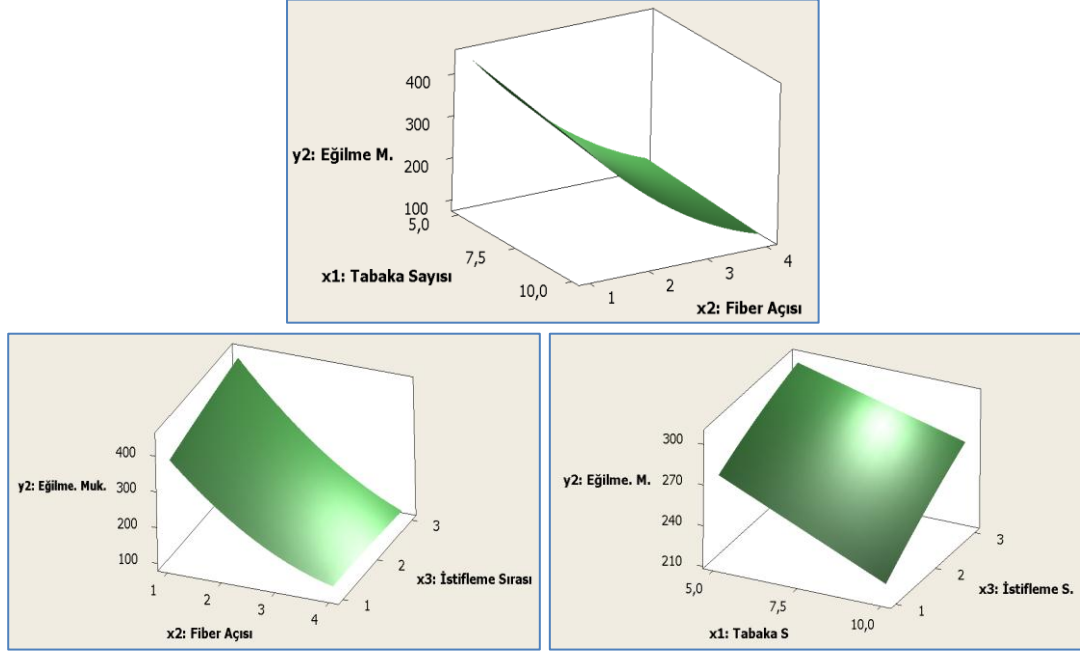
Şekil 7.16: Çekme mukavemeti ile parametreler arasındaki ilişkinin yüzey grafikleri (3D görünümü).

Kompozit plakanın çekme mukavemeti, hangi parametreden ne ölçüde etkilendiği gözükmemektedir (Şekil 7.16). En etkili parametrenin fiber oryantasyon açısı olduğu en az ise istifleme sırasından etkilendiği gözükmemektedir.

Şekil 7.16 incelendiğinde çekme mukavemeti;

- Fiber açısı, $0/90^0$ den $45/45^0$ dereceye doğru gidildikçe azalmakta,
- Tabaka sayısı 6-7 civarında maksimum seviyeye ulaşmakta 7 ve 8 tabakalardan sonra düşmekte,

- İstifleme sırasında en iyi değer sıkı yapının içte olduğu durumda görülmüştür. Reçine geçirgenliği düşük olan sıkı yapıları dokumaların dışta olması çekme mukavemetini düşürmektedir.



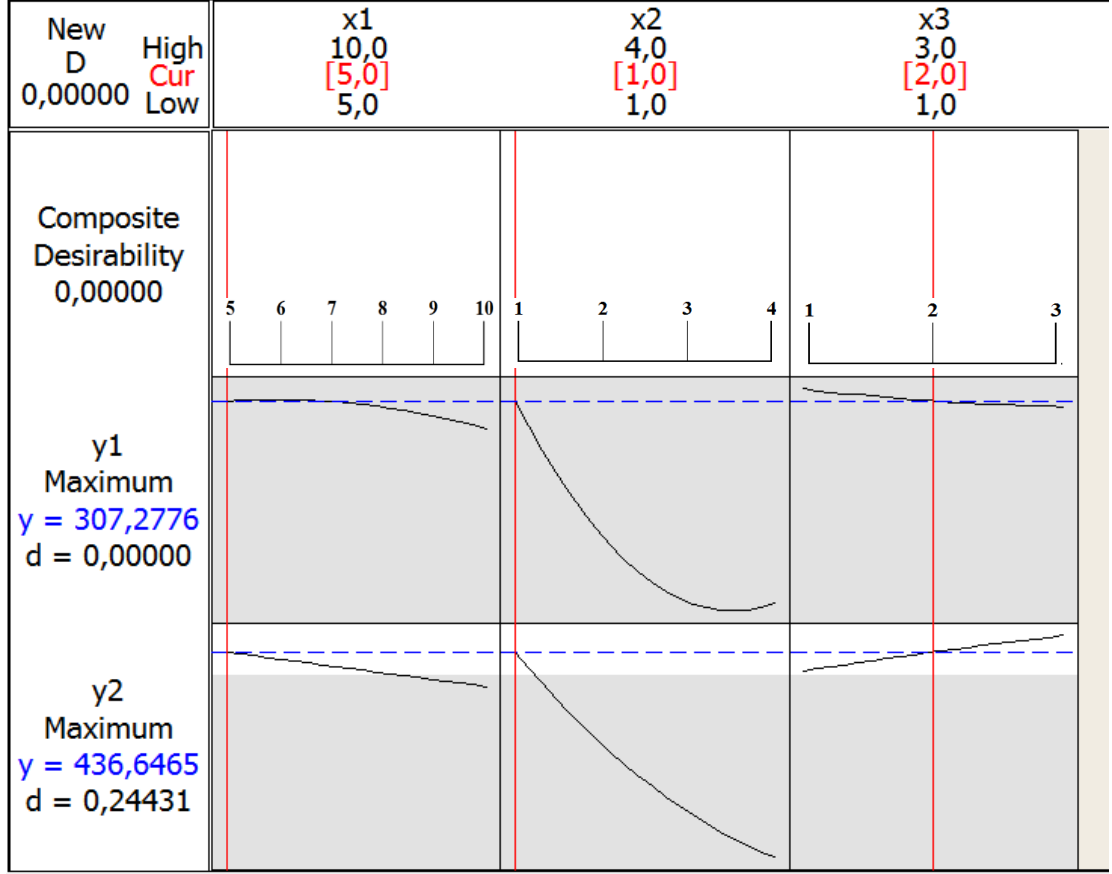
Şekil 7.17: Eğilme mukavemeti ile parametreler arasındaki ilişkinin yüzey grafikleri (3D görünümü).

Kompozit plakanın eğilme mukavemeti, hangi parametreden ne ölçüde etkilendiği gözükmemektedir (Şekil 7.17). En etkili parametrenin fiber oryantasyon açısı olduğu, istifleme sırası ve tabaka sayısının ise birbirine yakın seviyede etkili olduğu gözükmemektedir.

Şekil 7.17 incelendiğinde eğilme mukavemeti;

- Fiber açısı, $0/90^0$ den $45/45^0$ dereceye doğru gidildikçe azalmakta,
- Tabaka sayısının artması eğilme mukavemetini düşürmekte,
- İstifleme sırasında, en iyi mukavemet değerleri sıkı yapının plaka içerisinde homojen dağıldığı karma yapıda görülmektedir. En düşük eğilme mukavemeti ise sıkı yapının dışta olduğu durumda görülmektedir.

Yapılan çalışmanın bir sonraki adımında, geliştirilen optimizasyon modeli çalıştırılarak, optimum işlem koşulları belirlenmiştir.



Şekil 7.18: Çekme ve eğilme mukavemeti için parametrelerin optimizasyonu.

Sonuç olarak, Şekil 7.18'deki veriler incelendiğinde çekme ve eğilme mukavemeti için,

- **Tabaka sayısı x_1 :** çekme mukavemeti için 6 da optimum seviyeye geldiği eğilme mukavemetinde ise tabaka sayısının artması mukavemeti düşürdüğü,
- **Fiber açısı x_2 :** çekme ve eğilme mukavemeti için $0/90^0$ en yüksek, $45/45^0$ en düşük sonuçları verdiği,
- **İstifleme sırası x_3 :** bu parametre de ise çekme ve eğilme mukavemet değerleri birbiri ile zıt olarak değiştiği görülmüştür. Sıkı yapının dışta olması çekme mukavemetini düşürürken eğilme mukavemetini artırmıştır. Karma yapı çekme mukavemetini düşürürken eğilme mukavemetini artırmıştır.

7.3.3 RSM Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Bağımsız değişkenlerin bağımlı değişkenler üzerine etkisini belirlemede Varyans Analizi (ANOVA) için Yanıt Yüzey Yöntemini (Response Surface Methodology) kullanılmıştır. Değişkenler arasındaki ilişkiyi gösteren regresyon denklemleri R^2 si %95 olarak belirlenmiştir. Deneysel tasarım için bağımsız değişkenler tabaka sayısı, fiber açısı, istifleme sırası olarak belirlenmiştir. İncelenen bağımsız değişkenlerin kompozit plaka üzerinde anlamlı etkileri olduğu görülmüştür.

8. SONUÇ VE ÖNERİLER

Elde edilen kompozit plakalar için çekme ve üç noktadan eğilme gibi temel mekanik özellikler incelenmiştir. Test verilerine dayanarak optimum cam-dokuma tipi, istifleme sırası ve tabaka sayısı plakanın kullanım yerine göre sonuçlara bakılarak karar verilebilir. Genel olarak aşağıda verilen sonuçlar elde edilmiştir.

- İstifleme sırasında reçine geçirgenliği en düşük olan 200 gr/m² cam dokumaların merkezde bulunması çekme mukavemetini düşürürken eğilme mukavemetini artırmıştır.
- Tekrarlı enjeksiyon ve vakum desteği ile iyi ıslanan cam dokumalar, kompozit plakanın mekanik özelliklerini arttırmıştır.
- Test sonuçlarının, cam-dokuma tipinin yanı sıra, reçine geçirgenliği, istifleme sırası ve tabaka sayısından da etkilendiği görülmüştür.
- Tabaka sayısının artması mukavemet ve modülleri düşürmüş, kalıp doldurma zamanını ise arttırmıştır.
- Tabaka kalınlığının azalması buna bağlı olarak fiber oranının ve mukavemet değerlerinin artmasını, tabaka kalınlığının artması ise mukavemet değerlerinin düşmesine sebep olmuştur. Bu sonuç kürleşme basıncının artmasının mukavemetin artmasında olumlu etkisinin olduğunu ortaya koymuştur.
- 8₃2₃ grubu plaka, en yüksek basma hızı (54.8 mm/dak) ve 2-defa reçine sirkülasyonu yapılmasına rağmen en düşük kalıp doldurma zamanına (17 dak.) sahiptir.
- Sabit hız ile reçine enjeksiyonu yapılmış olan 8₃2₃ grubu numuneler çekme ve eğme testlerinde en iyi sonuçları vermiştir.
- Tabaka sayısı 6-8 arası, tabaka kalınlığı ise 2,5-2,7 mm arası olduğu değerler en iyi sonuçları vermiştir.
- Vakum destekli RTM için optimum parametreler; hız kontrollü RTM prosesinde 9-10 tabakalı plakalarda 28.7 mm/dak basma hızı ve 3-defa reçine sirkülasyonu önerilir. 7-8 tabakalı plakalarda ortalama 31.7 mm/dakika reçine basma hızı ve 2-defa reçine sirkülasyonu önerilir. 6 ve

daha az tabakalı plakalarda ise 43.7 mm/dakika basma hızı ve 1-1.5 defa reçine sirkülasyonu önerilir.

- Yük (basınç) kontrollü RTM prosesinde ise ortalama 4.7 bar enjeksiyon basıncı ve 3-defa reçine sirkülasyonu önerilir.
- RTM prosesinde sabit yük (basınç) kontrolü yerine sabit hız kontrolü yapıldığında daha iyi ıslanma ve mukavemet değerleri elde edilmiştir. Özellikle reçine basma hızının artması kalıp içinde makro seviyedeki hava boşluğunu azaltmış ve kalıp dolum süresini de düşürmüştür.
- Çekme ve Eğilme Mukavemet değerleri fiber açısından ciddi olarak etkilenmiştir. Bkz. Şekil 7.11 ve Bkz. Şekil 7.12'de görüldüğü gibi fiber açısı $0/90^0$ den $45/45^0$ ye doğru düştükçe doğru orantılı olarak mukavemet değerleri düşmektedir.
- Parametrelerin optimizasyonu için Yanıt Yüzey Yöntemi (Response Surface Methodology) kullanılmıştır. Çekme mukavemeti için % 93,96, eğilme mukavemeti için %96,86 doğrulukta regresyon modeli elde edilmiştir.

9. KAYNAKLAR

- [1] Ataş, A., "Dokuma Fiber Takviyeli Paralel Pim Delikli Tabakalı Polyester Kompozit Plakaların Statik Yük Altındaki Davranışlarının İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Balıkesir, (2007).
- [2] Temiz, Ş., "Tabakalı Kompozit Plaklarda Sonlu Eleman Yöntemiyle Elastik Gerilme Analizi", *Makine-İmalat Teknolojileri Sempozyumu*, Konya, (1999).
- [3] Çivi, C., Ünlü, B.S., Türkmen, İ., Sütçüoğlu, N., and Atik, E., "Investigation of change of mechanical properties of carbon-fiber reinforced composites produced by vacuum infusion method depending on number of layer and direction", *14th International Materials Symposium (IMSP'2012)*, Denizli, (2012).
- [4] Sakin, R., Kumru, N., and Ay, İ., "Design of Apparatus for the Stress-Controlled, Multi-Specimen Bending Fatigue Test and an Application for Composites", *12th International Materials Symposium (IMSP'2008)*, Denizli, 531-541, (2008).
- [5] Khashaba, U.A., "Fatigue and Reliability Analysis of Unidirectional GFRP Composites Under Rotating Bending Loads", *Journal of Composite Materials*, 37, (4), 317-331, (2003).
- [6] Mallick, P.K., *Composites Engineering Handbook*, New York, USA: CRC Press, (1997).
- [7] Sözer, M., "Simülasyonlarla Destekli Resin Transfer Kalıplama Metoduyla Kompozit Malzeme Üretimi Kontrolü", *TUBİTAK-MİSAG-192 Projesi*, Türkiye, (2003).
- [8] Sözer, M., "Resin Transfer Kalıplama (RTM) Yöntemiyle Kompozit Parça Üretiminde Karşılaşılan Sorunlara Çözüm Getirilmesi ve Üretimin Otomasyona Geçirilmesi", *TUBİTAK-MAG 104M290 Projesi*, Türkiye, (2009).

- [9] Turhan, M., "Ctp'lerin Mekanik Özelliklerine Elyaf Hacim Oranlarının Etkisinin Araştırılması", Yüksek Lisans Tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Sakarya*, (2007).
- [10] Aran, A., *Elyaf Takviyeli Karma Malzemeler Ders Notu*, İstanbul: İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, (1990).
- [11] Lee, C.L. and Wei, K.H., "Effect of Material and Process Variables on the Performance of Resin-Transfer-Molded Epoxy Fabric Composites", *Journal of Applied Polymer Science*, 77, 2149–2155, (2000).
- [12] Lee, C.L. and Wei, K.H., "Resin Transfer Molding (RTM) Process of a High Performance Epoxy Resin. II: Effects of Process Variables on the Physical, Static and Dynamic Mechanical Behavior", *Polymer Engineering & Science*, 40 (4), 935-943, (2000).
- [13] Amico, S.C., Angrizani, C.C., and Drummond, M.L., "Influence of the Stacking Sequence on the Mechanical Properties of Glass/Sisal Hybrid Composites", *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 29, (2), 179-189, (2008).
- [14] Schmidt, T.M., Goss, T.M., Amico, S.C., and Lekakou, C., "Permeability of Hybrid Reinforcements and Mechanical Properties of their Composites Molded by Resin Transfer Molding", *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 28, (23), 2839-2850, (2008).
- [15] 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).
- [16] Ary Subagia, I.D.G., 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).
- [17] Akbulut, M. and Sonmez, F.O., "Optimum design of composite laminates for minimum thickness", *Computers & Structures*, 86, (21-22), 1974-1982, (2008).

- [18] Manjunatha, S.C., "Analysis of Angel Ply Laminated Composite and Validation", *International Journal of Advances in Production and Mechanical Engineering (IJAPME)*, (2015).
- [19] Özdemir, S., "Sonlu Elemanlar Analizinde İstatistiksel Metotların Kullanılması", Yüksek Lisans Tezi, *Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir, (2010).
- [20] Ahmed, K.S. and Vijayarangan, S., "Tensile, flexural and interlaminar shear properties of woven jute and jute-glass fabric reinforced polyester composites", *Journal of Materials Processing Technology*, 207, (1-3), 330-335, (2008).
- [21] Ruiz, E., Achim, V., Soukane, S., Trochu, F., and Breard, J., "Optimization of injection flow rate to minimize micro/macro-voids formation in resin transfer molded composites", *Composites Science and Technology*, 66, (3-4), 475-486, (2006).
- [22] Brocks, T., Shiino, M.Y., Cioffi, M.O.H., Voorwald, H.J.C., and Caporalli Filho A., "Experimental RTM manufacturing analysis of carbon/epoxy composites for aerospace application", *Materials Research*, 16, (5), 1175-1182, (2013).
- [23] Koruvatan, A., "Farklı Kür Sıcaklığı ve Sürelerinde Üretilen Tabakalı Kompozit Plakaların Pimli/Civatalı Bağlantılarının Hasar Analizinin İncelenmesi", Doktora Tezi, *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Balıkesir, (2008).
- [24] Öğrenci, H.D., "Mekanik Olarak Bağlanmış Kompozitlerin Dayanımı", Yüksek Lisans Tezi, *Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir, (2012).
- [25] Kaw, A.K., *Mechanics of composite materials*, USA: CRC press, (2005).
- [26] Kovan, V., "Plastik Malzeme Türleri ve Bunların Fiziksel Özelliklerinin Belirlenmesi İçin Kullanılan Deney ve Yöntemler", Yüksek Lisans Tezi, *Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimler Enstitüsü*, Denizli, (2002).
- [27] Ünal, O., *Yapı Malzemeleri Ders Notları*, Afyonkarahisar: AK Ü. Teknik Eğitim Fak., (2006).

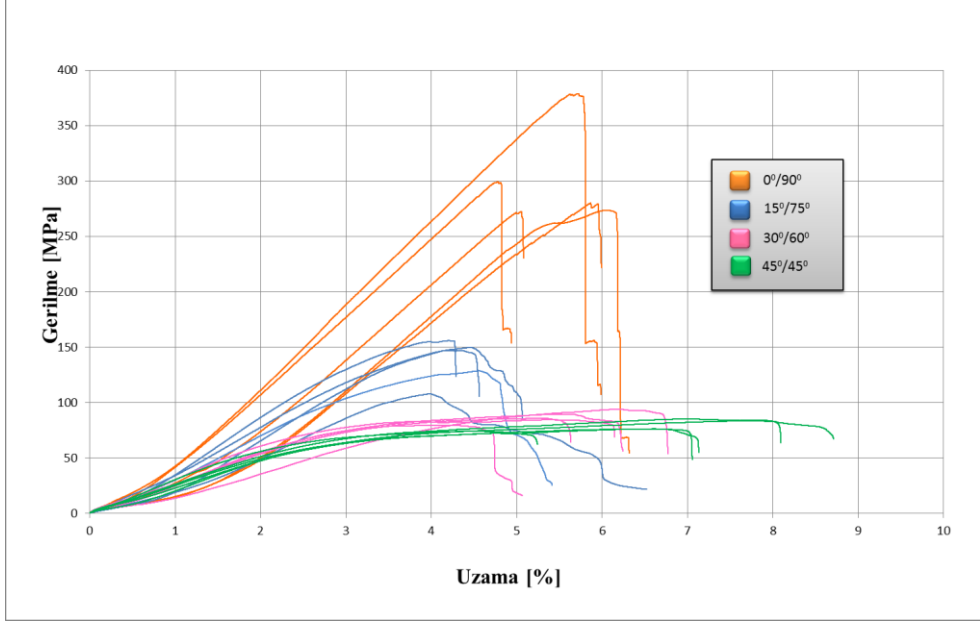
- [28] Şahin, M., "Burkulmaya Maruz Tabakalı Kompozit Plakların Deneysel ve Nümerik Analizi", Yüksek Lisans Tezi, *Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sivas, (2008).
- [29] Demirel, A., "Karbon Elyaf Takviyeli Epoksi Kompozit Malzemelerin Karakterizasyonu", Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, (2007).
- [30] (5 Aralık 2015) <http://www.camelyaf.com.tr/>, (2015).
- [31] Sakin, R., "Bilgisayar Destekli, Çok Numuneli Eğilme Yorulması Test Cihazı Tasarımı ve Cam-Fiber Fiber Takviyeli Polyester Kompozitlerde Eğilme Yorulması Davranışının İncelenmesi ", Doktora Tezi, *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Balıkesir, (2004).
- [32] Kut, A. (ed.), *CTP Teknolojisi*, Cam Elyaf Sanayii AŞ, İstanbul, (2006).
- [33] Hüner, Ü., "Plastik Esaslı Kompozit Malzemelerin Sıcak Birleştirme İşlemlerinin İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Tarıkya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü* Edirne, (2008).
- [34] Arıcasoy, O., "Kompozit Sektörü Raporu", *İstanbul Ticaret Odası*, İstanbul, (2006).
- [35] Eşnici, A., "Gemi ve Yat yapımında Kompozit Malzemelerin Kullanımı", *Gemi ve Deniz Teknolojisi*, Sayı 178, (2008).
- [36] Guclu, G.T., "Mold Design in Resin Transfer Molding (RTM) Process Using Point-Voltage Sensors", Master of Science, *Koc University Mechanical Engineering*, İstanbul, (2007).
- [37] Harper, C.A., *Modern Plastics Handbook: handbook*, Maryland: McGraw-Hill Professional, (2000).
- [38] Sözer, M., "Resin Transfer Kalıplama (RTM) Yöntemiyle Kompozit Parça Üretiminde Karşılaşılan Sorunlara Çözüm Getirilmesi ve Üretimin Otomasyona Geçirilmesi", *TÜBİTAK MAG 104M290 Projesi*, (2009).

- [39] Aran, A., "Elyaf Takviyeli Karma Malzemeler", Ders Notu, İstanbul, Türkiye, (1990).
- [40] Kokcharov, I., *Structural Integrity Analysis*, Part 9, (2014).
- [41] Bagherpour, S., *Fibre Reinforced Polyester Composites*, InTech, (2012).
- [42] (7 Ocak 2016), <http://www.polya.com>, (2015).
- [43] Sağbaşı, A. and Yılmaz, F.B., "RSM Tekniğı Uygulanarak Derlin Malzemesinin Optimum Aşınma Değeriinin Tahmin Edilmesi", *TİMAK-Tasarım İmalat Analiz Kongresi*, (2006).
- [44] Subaşı, A., "Yanıt Yüzey Yöntemi Yardımı ile Isı Değıştirici Optimizasyonu", Yüksek Lisans Tezi, *Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Erzurum, (2010).
- [45] Kılıçkap, E. and Hüseyinođlu, M., "Tepki Yüzey Modeli ve Genetik Algoritma Kullanılarak AISI 316' nın Delinmesinde Oluşan Çapak Yüksekliđinin Modellenmesi ve Optimizasyonu", *Dicle Üniversitesi Mühendislik Dergisi*, (2010).

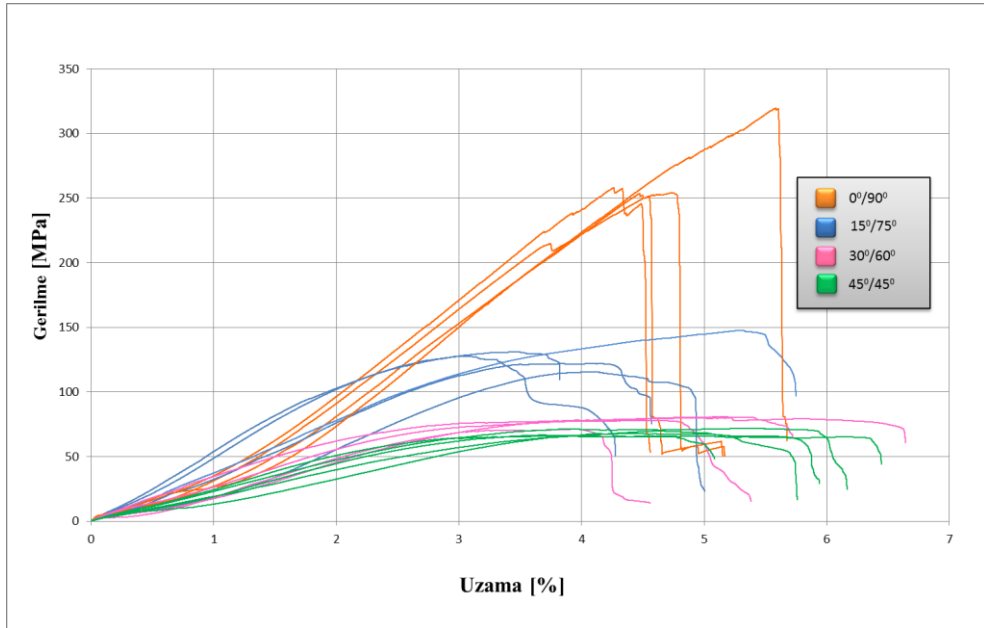
EKLER

10. EKLER

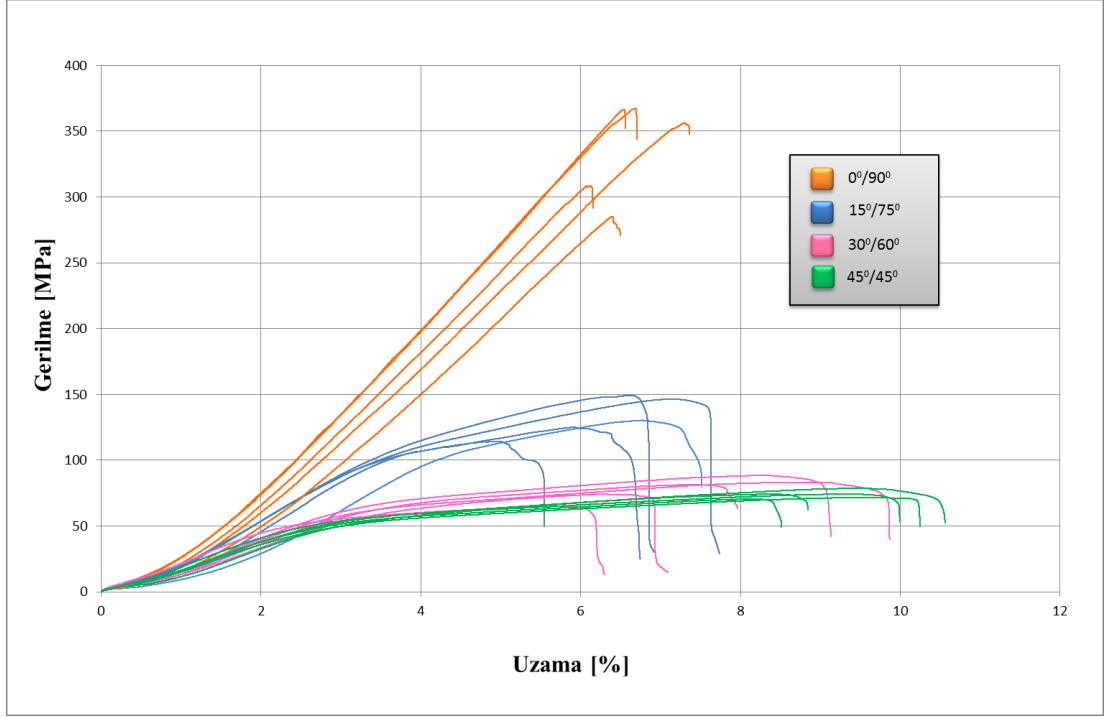
EK A Çekme Test Sonuçları



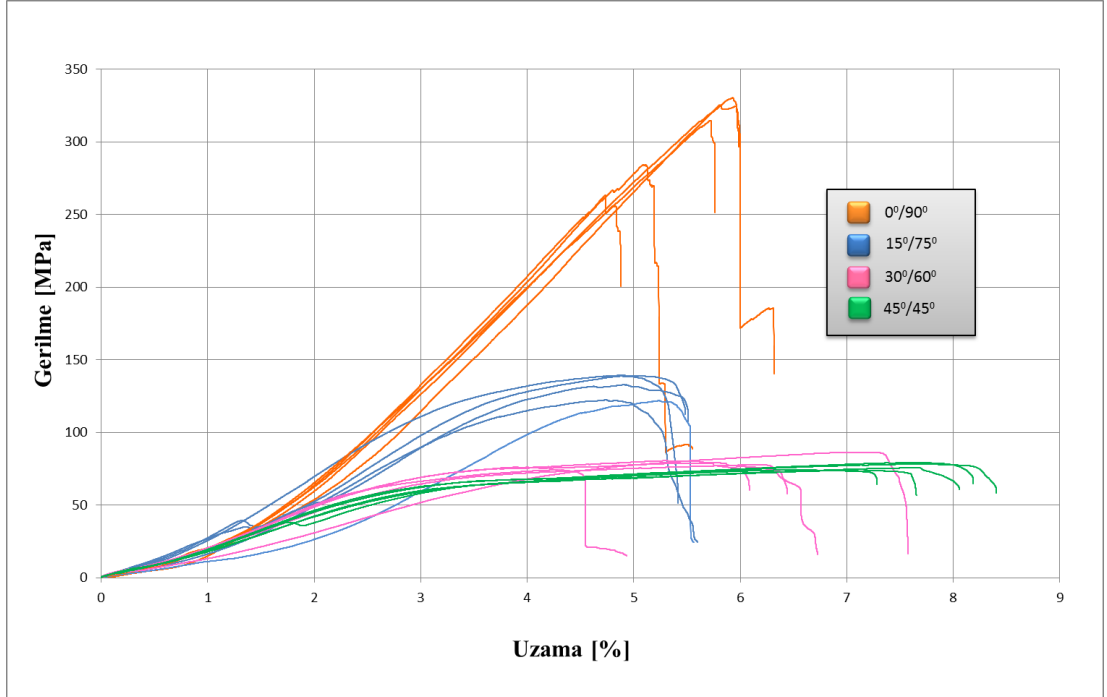
Şekil A.1: D1 grubu numunelerin çekme test sonuçları.



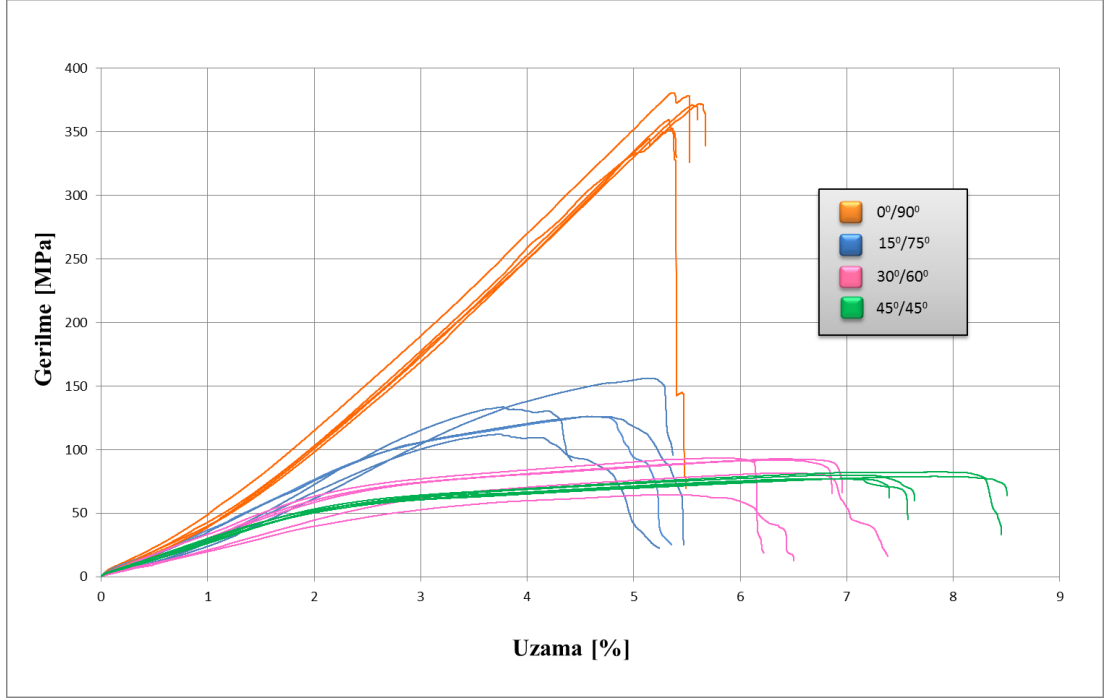
Şekil A.2: D2 grubu numunelerin çekme test sonuçları.



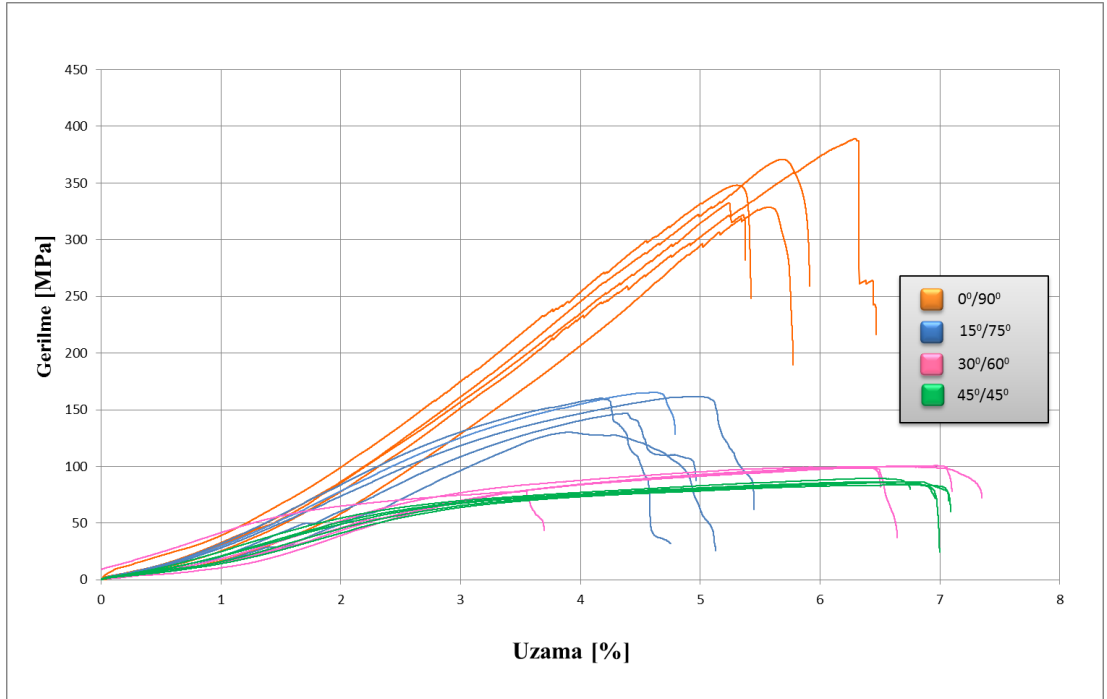
Şekil A.3: D3 grubu numunelerin çekme test sonuçları.



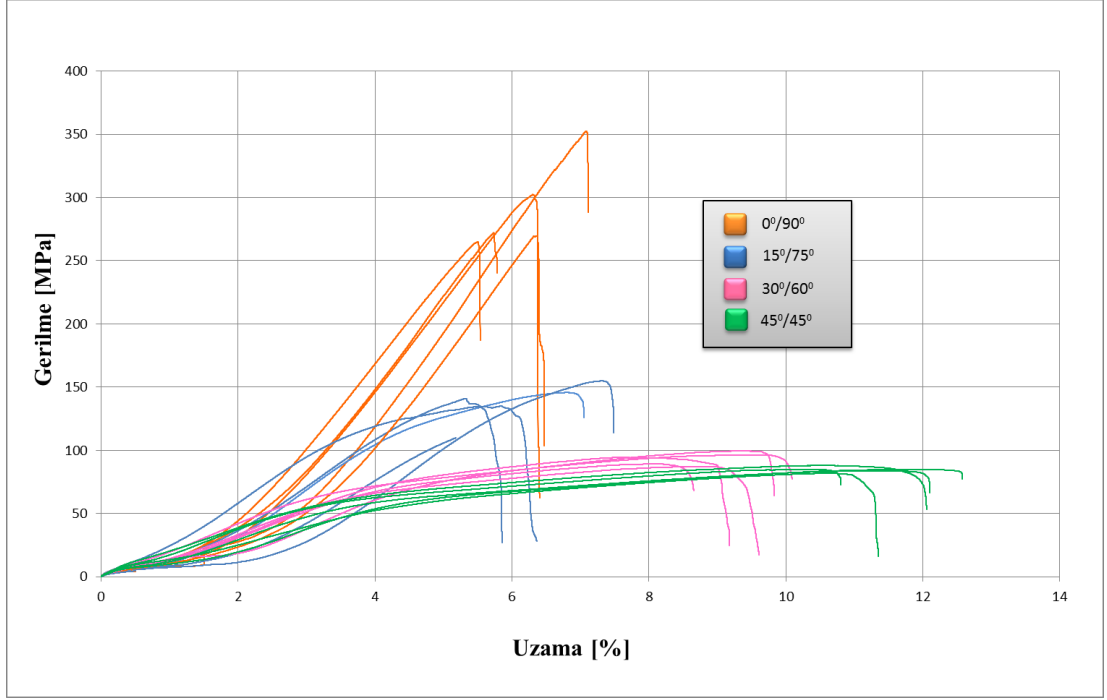
Şekil A.4: D4 grubu numunelerin çekme test sonuçları.



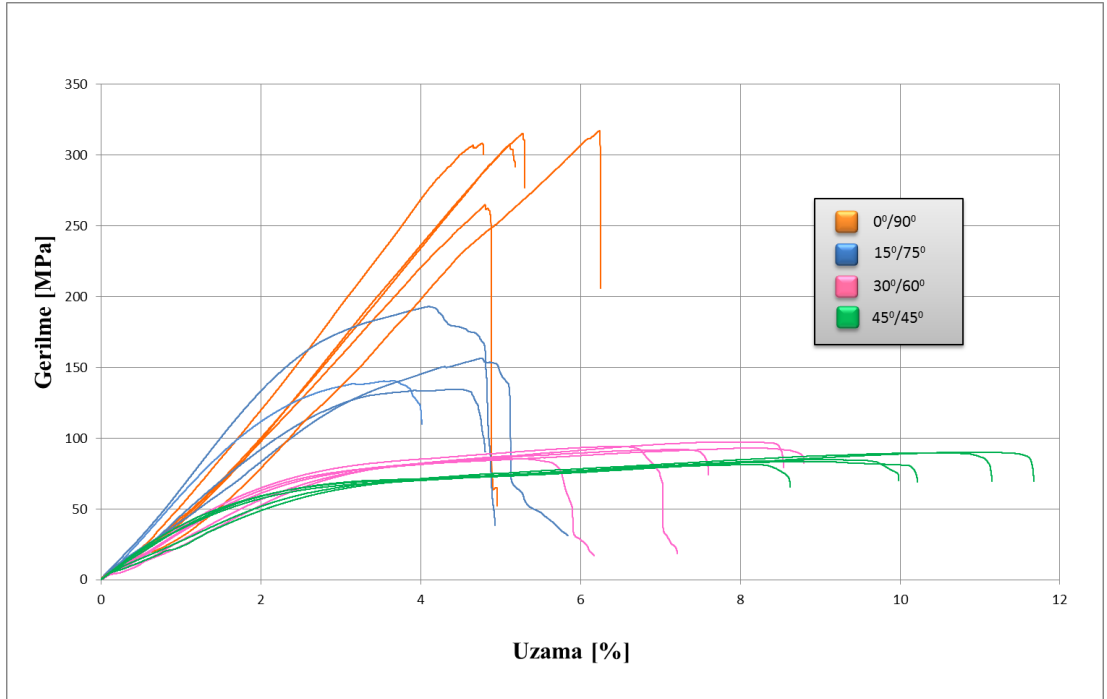
Şekil A.5: D5 grubu numunelerin çekme test sonuçları.



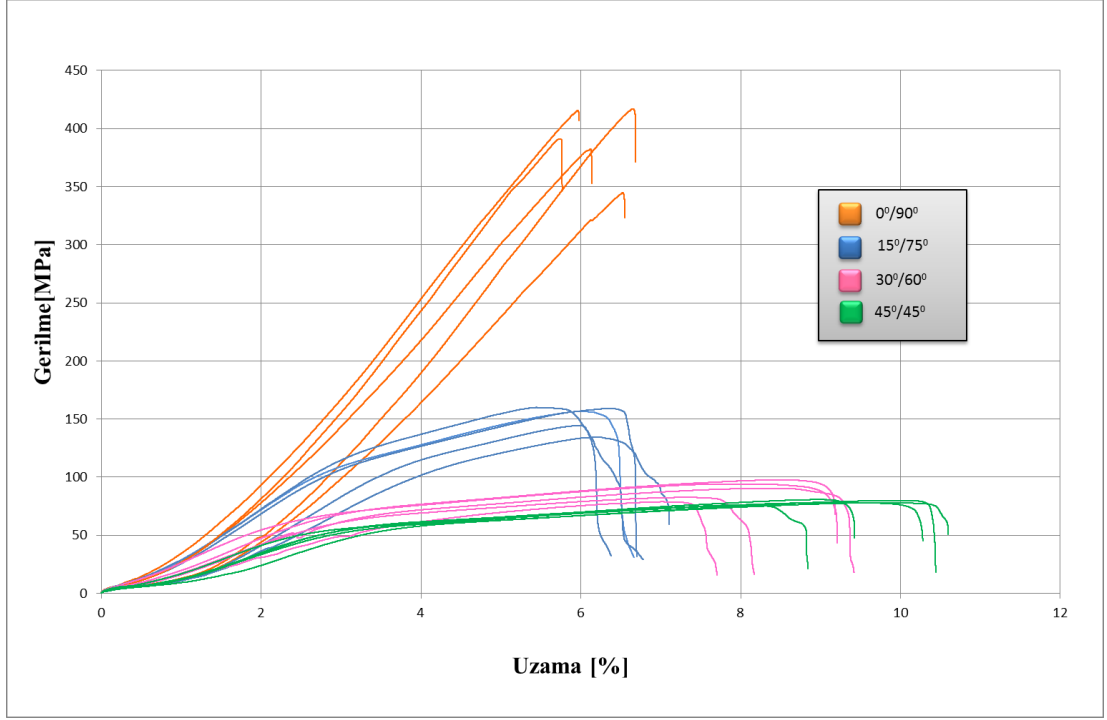
Şekil A.6: D6 grubu numunelerin çekme test sonuçları.



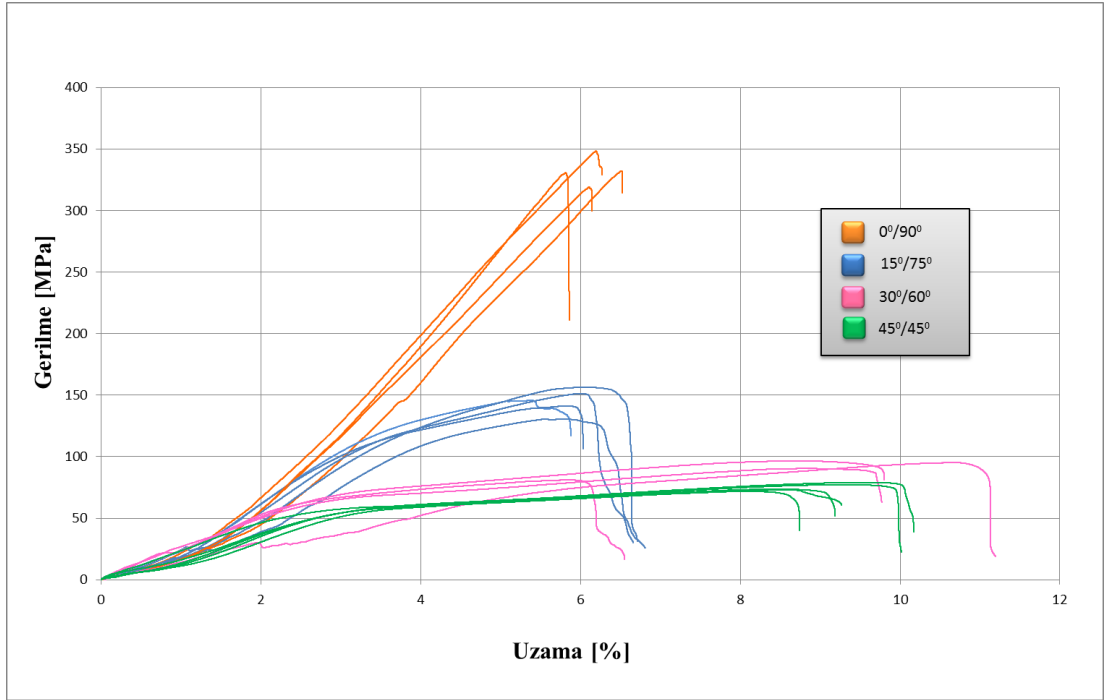
Şekil A.7: D7 grubu numunelerin çekme test sonuçları.



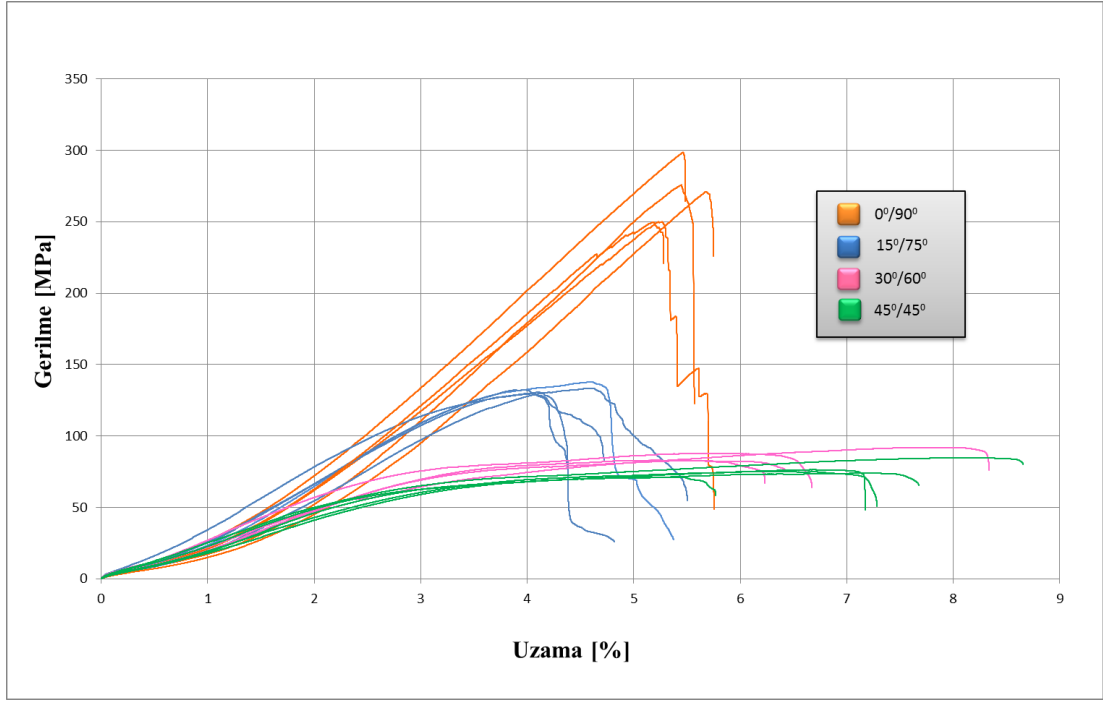
Şekil A.8: D8 grubu numunelerin çekme test sonuçları.



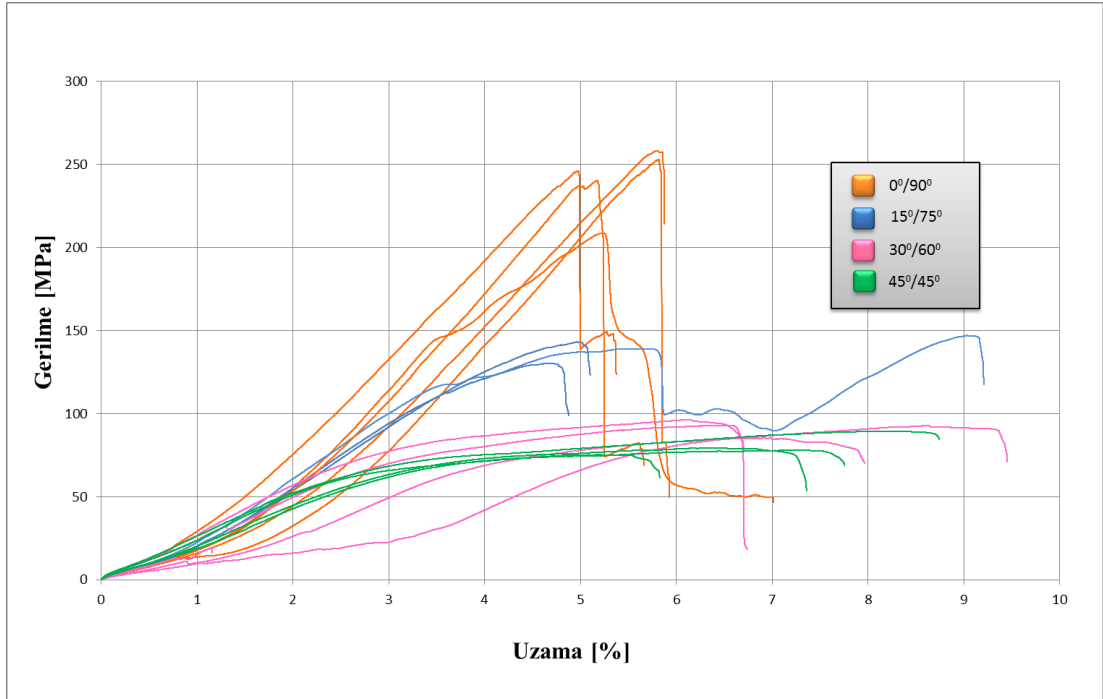
Şekil A.9: D9 grubu numunelerin çekme test sonuçları.



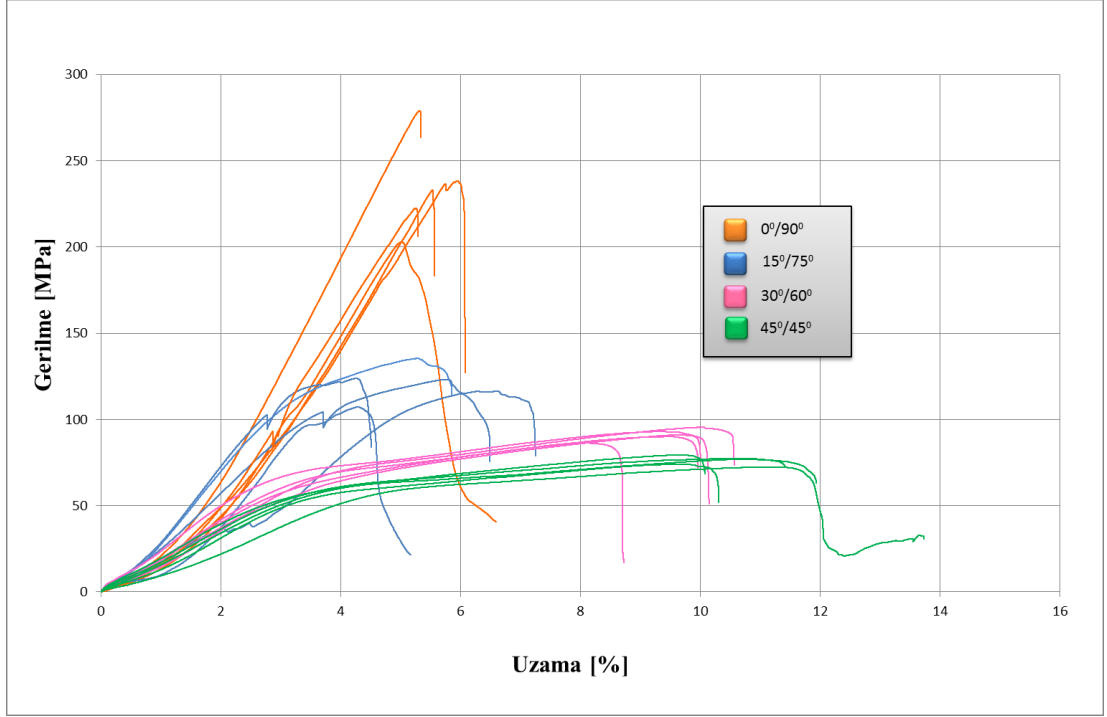
Şekil A.10: D10 grubu numunelerin çekme test sonuçları.



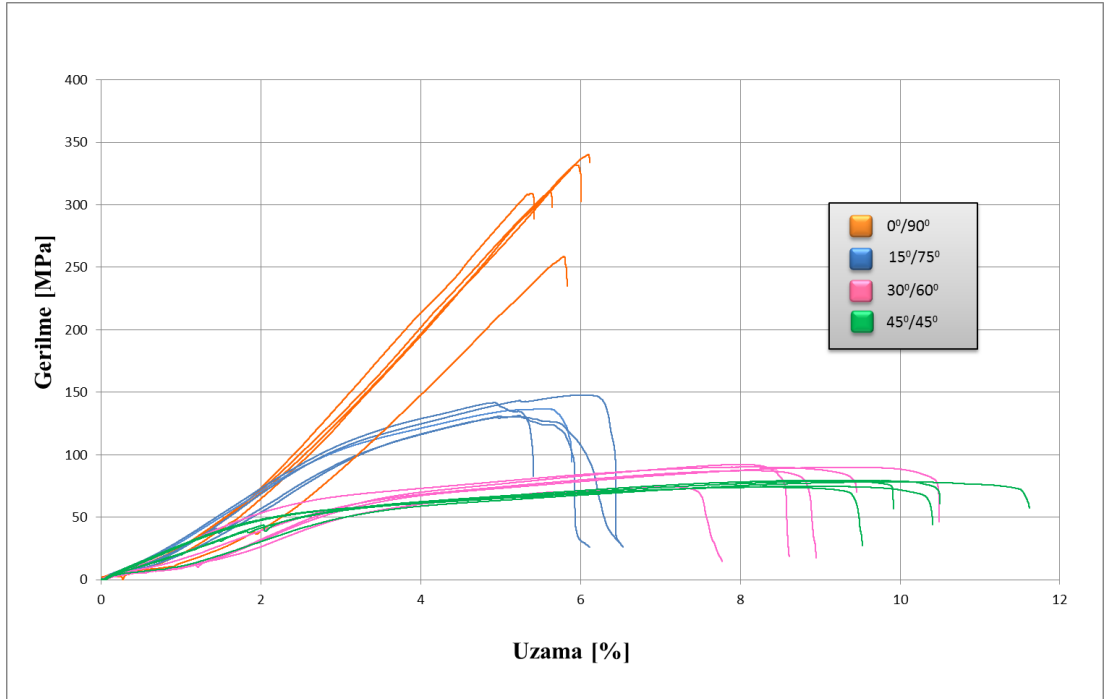
Şekil A.11: D11 grubu numunelerin çekme test sonuçları.



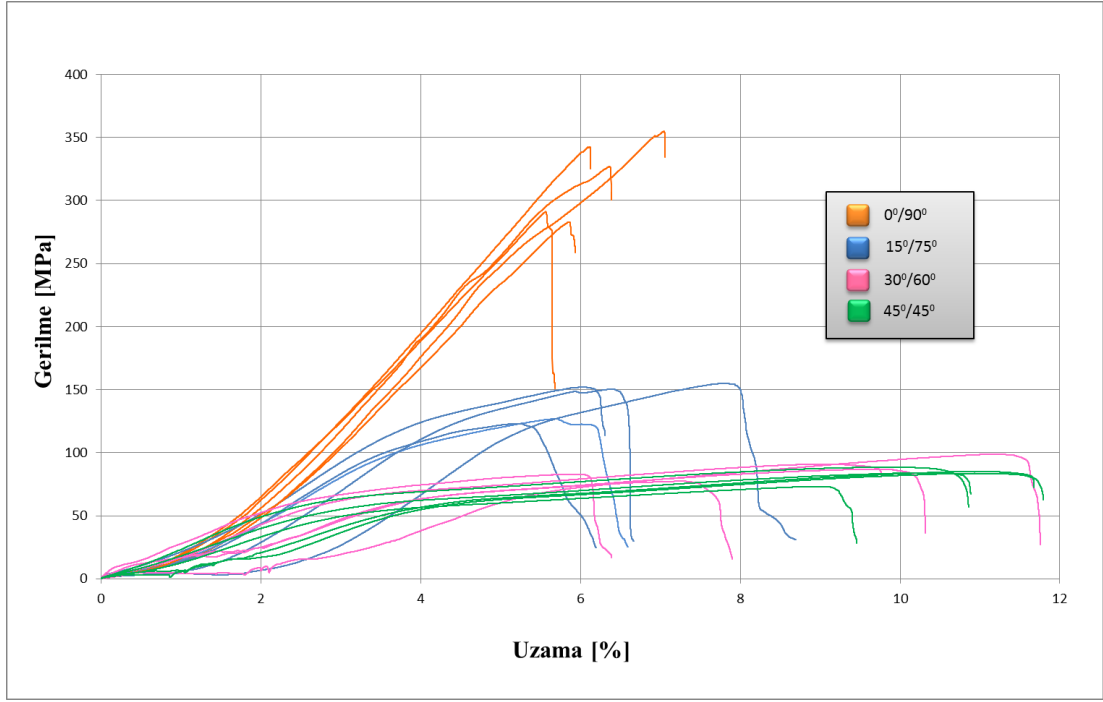
Şekil A.12: D12 grubu numunelerin çekme test sonuçları.



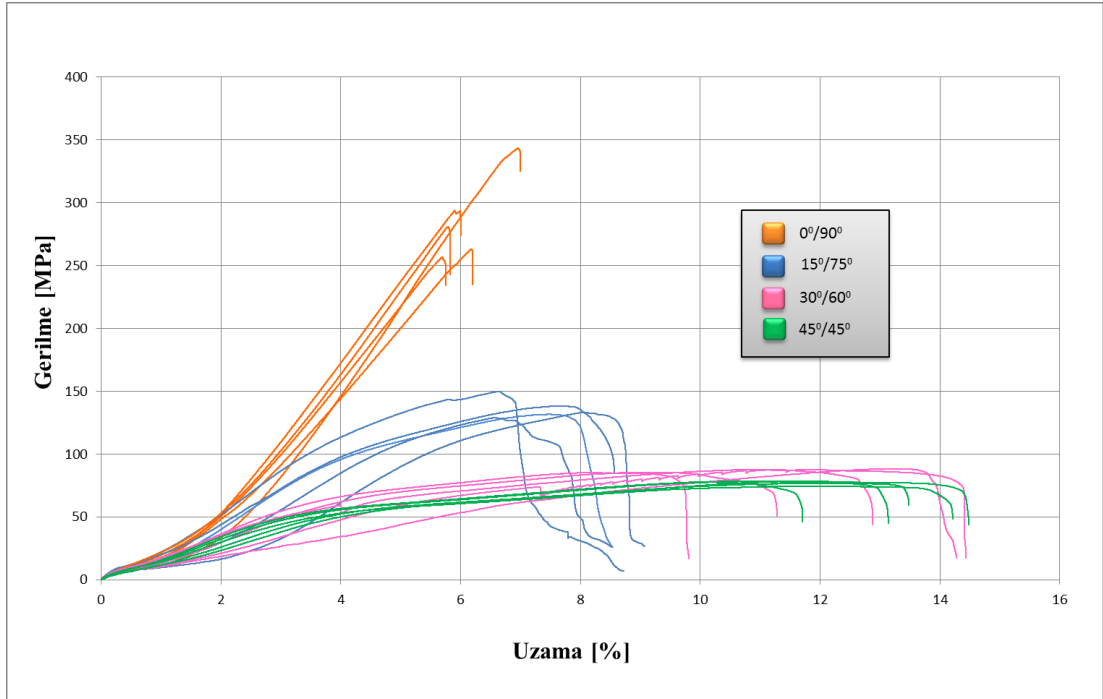
Şekil A.13: D13 grubu numunelerin çekme test sonuçları.



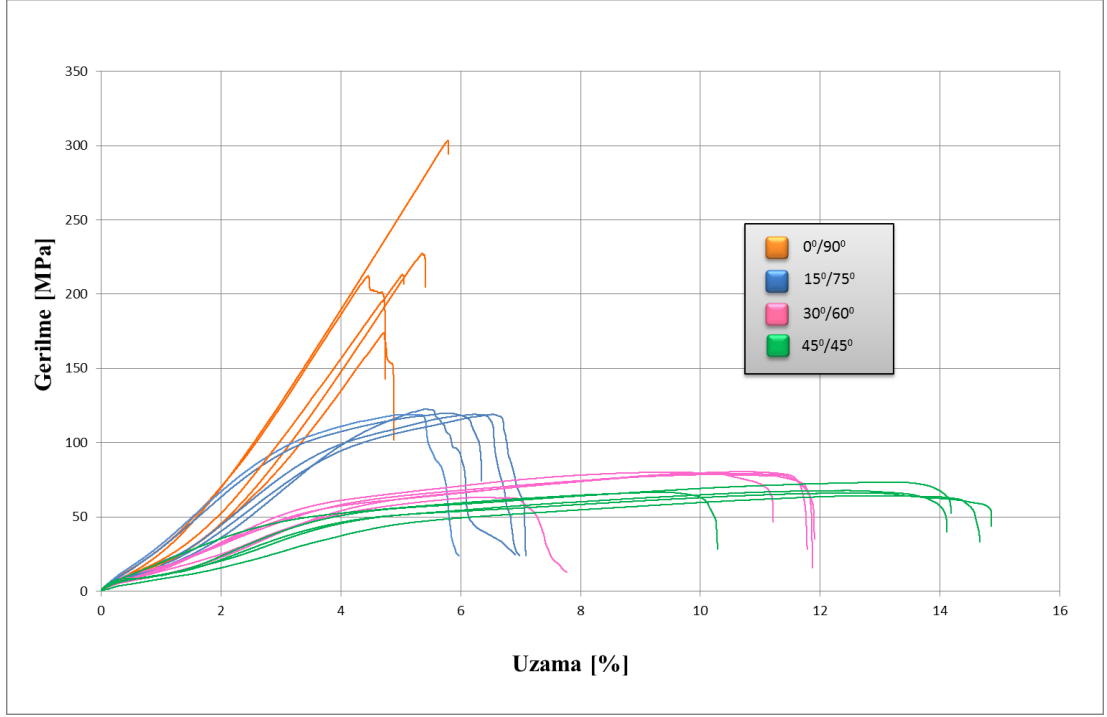
Şekil A.14: D14 grubu numunelerin çekme test sonuçları.



Şekil A.15: D15 grubu numunelerin çekme test sonuçları.

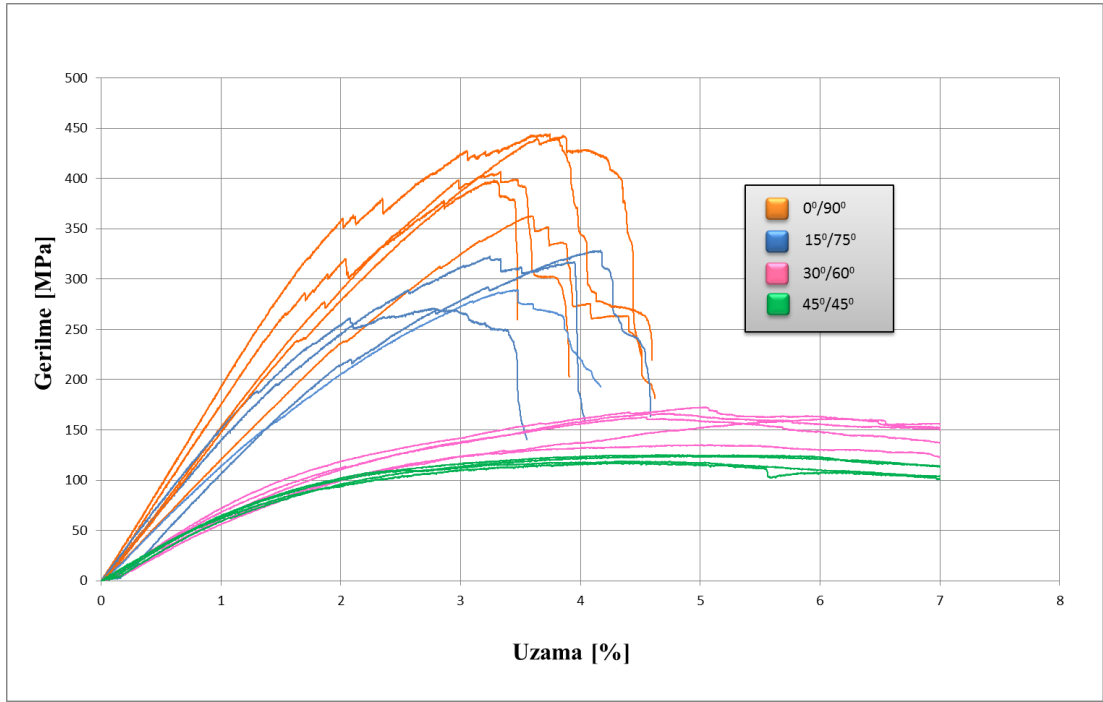


Şekil A.16: D16 grubu numunelerin çekme test sonuçları.

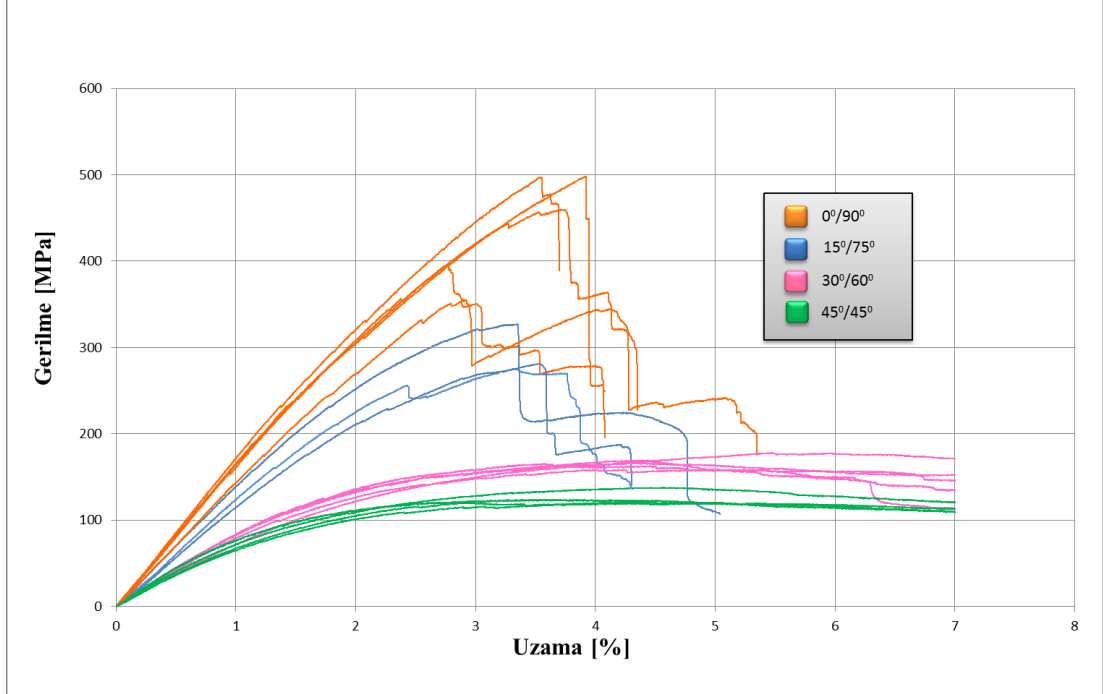


Şekil A.17: D17 grubu numunelerin çekme test sonuçları.

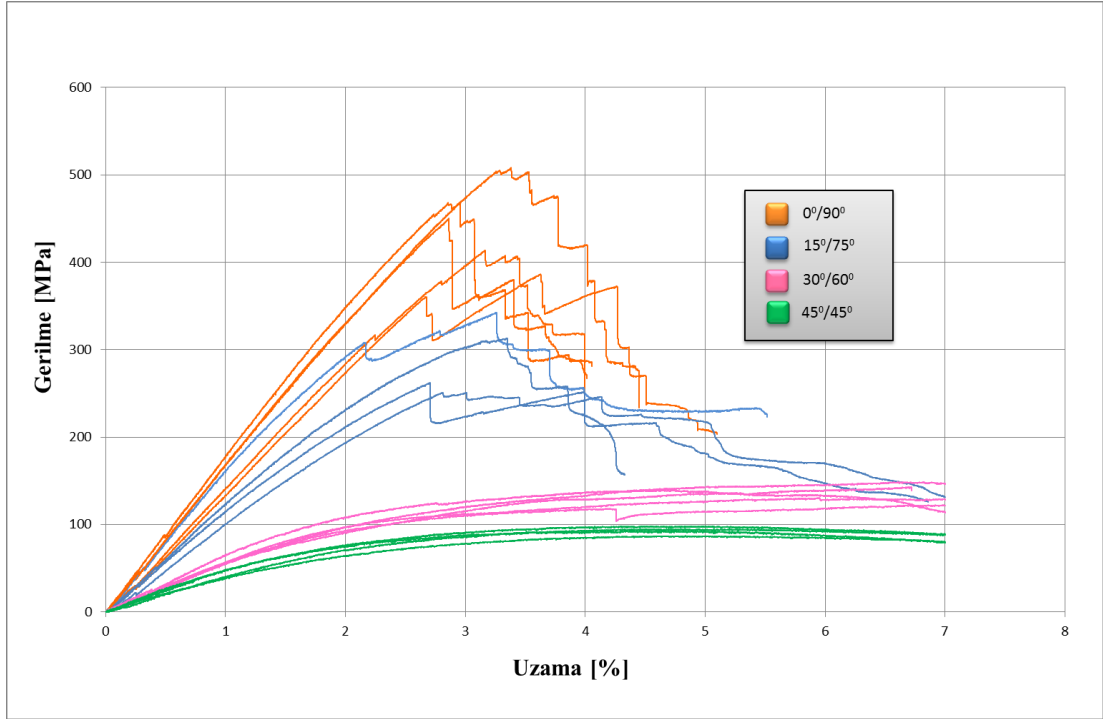
EK B Eğilme Test Sonuçları



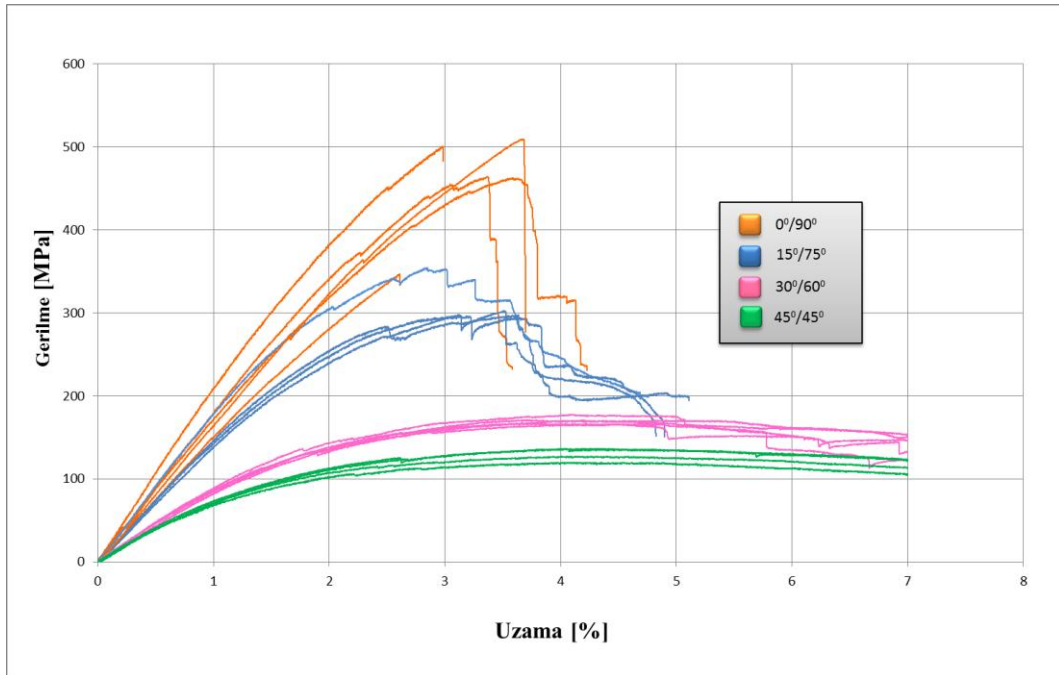
Şekil B.1: D1 grubu numunelerin eğilme test sonuçları.



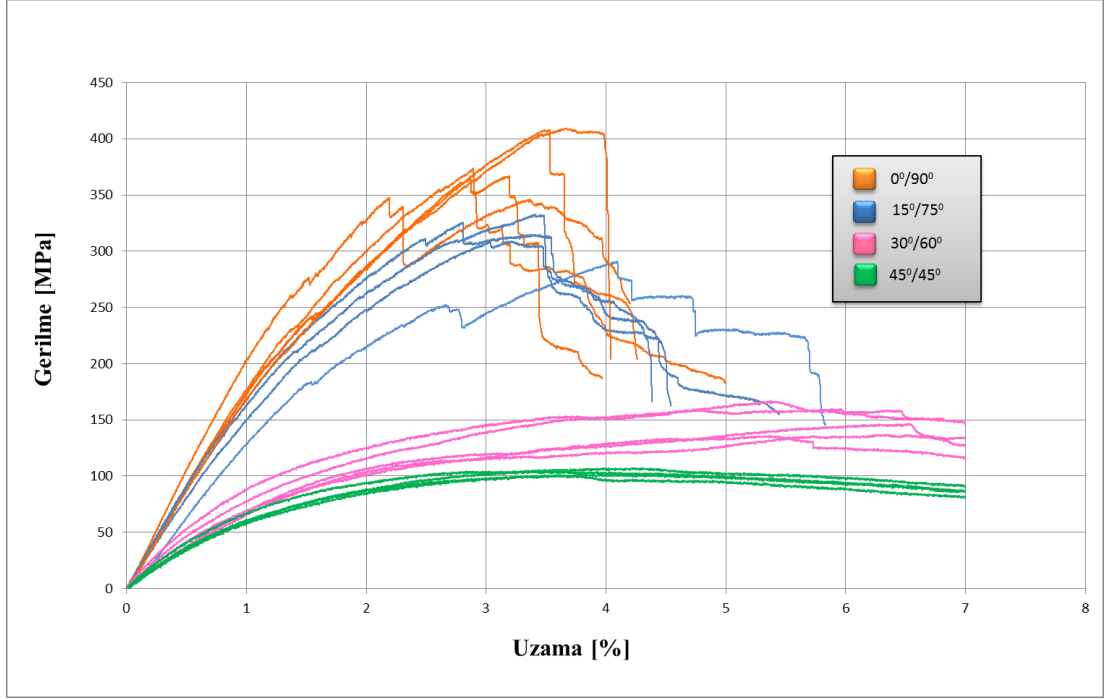
Şekil B.2: D2 grubu numunelerin eğilme test sonuçları.



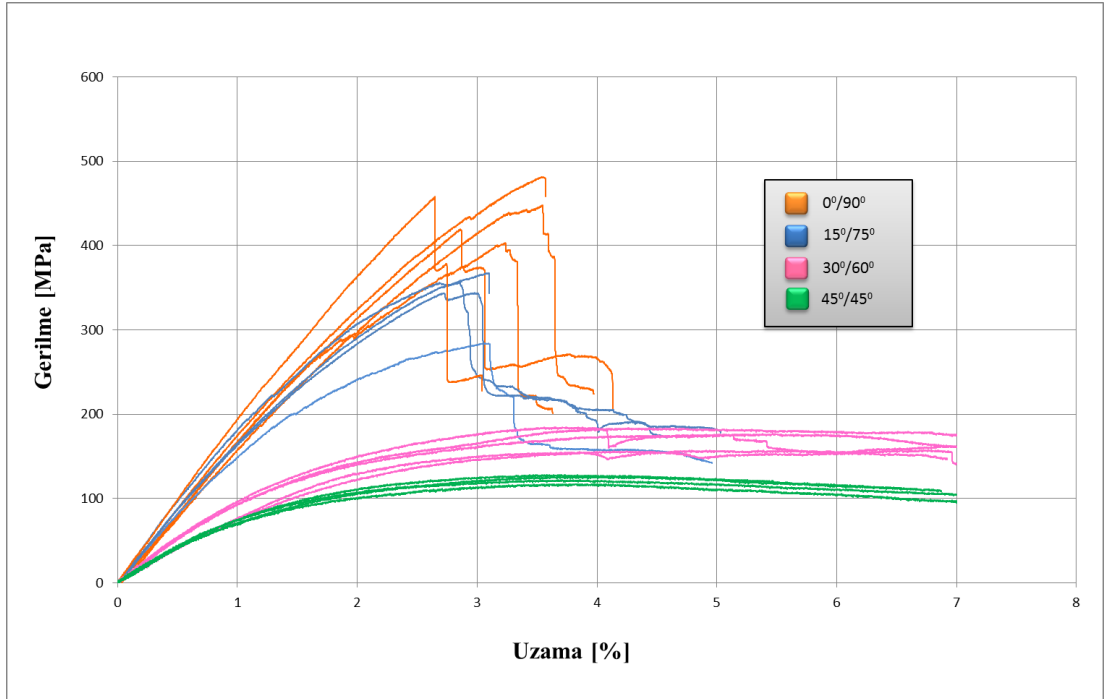
Şekil B.3: D3 grubu numunelerin eğilme test sonuçları.



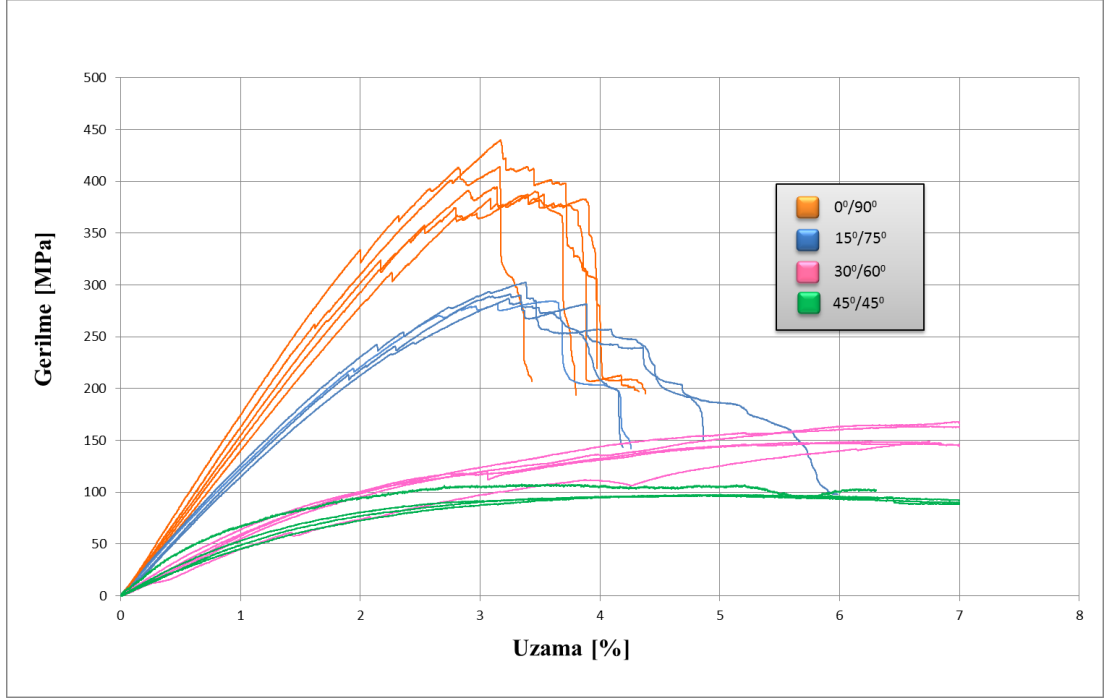
Şekil B.4: D4 grubu numunelerin eğilme test sonuçları.



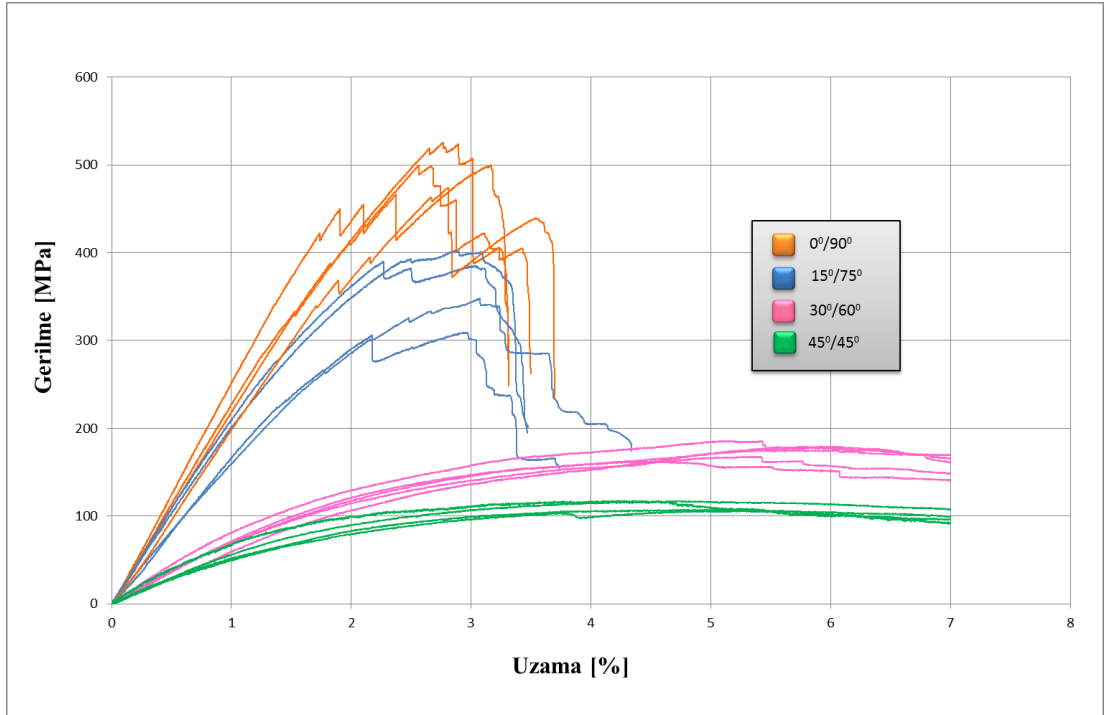
Şekil B.5: D5 grubu numunelerin eğilme test sonuçları.



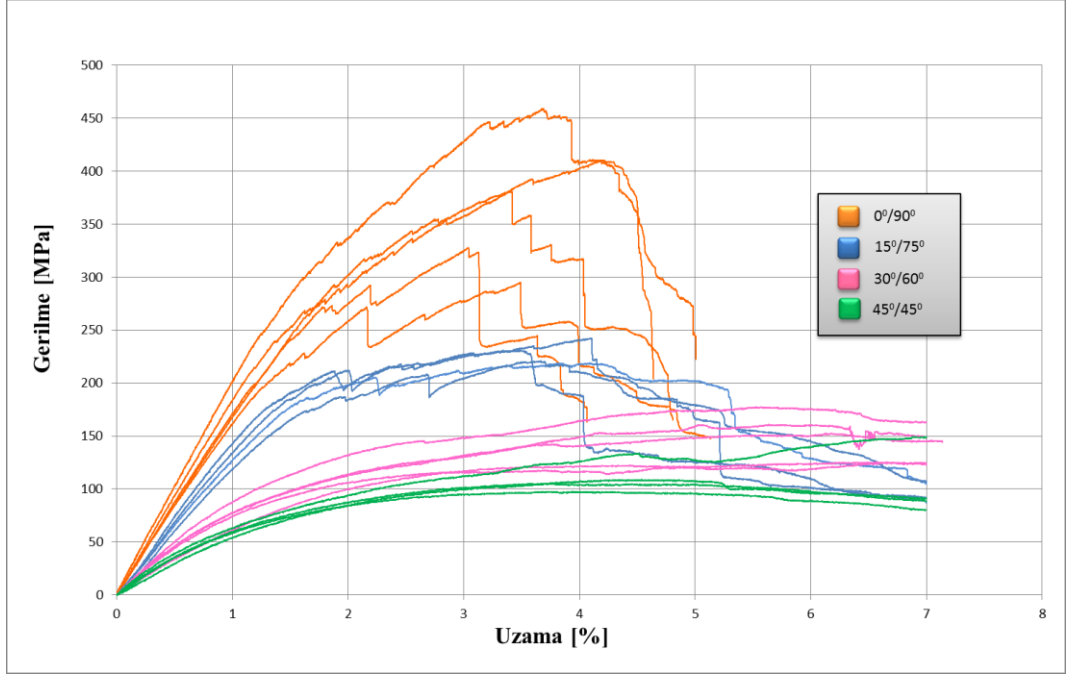
Şekil B.6: D6 grubu numunelerin eğilme test sonuçları.



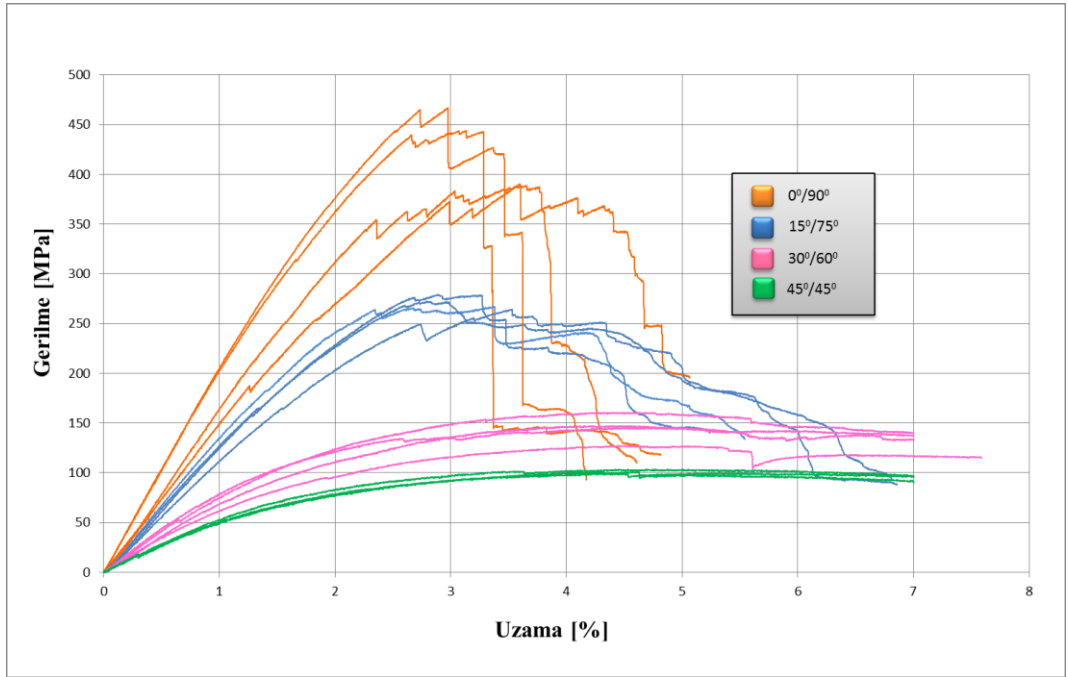
Şekil B.7: D7 grubu numunelerin eğilme test sonuçları.



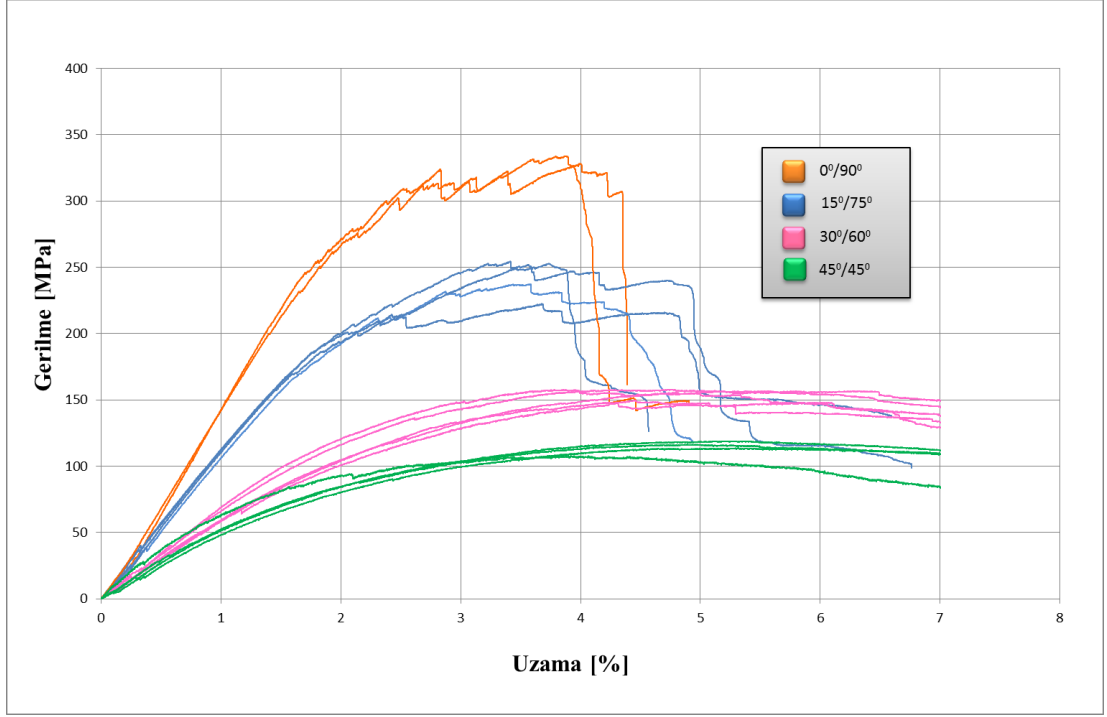
Şekil B.8: D8 grubu numunelerin eğilme test sonuçları.



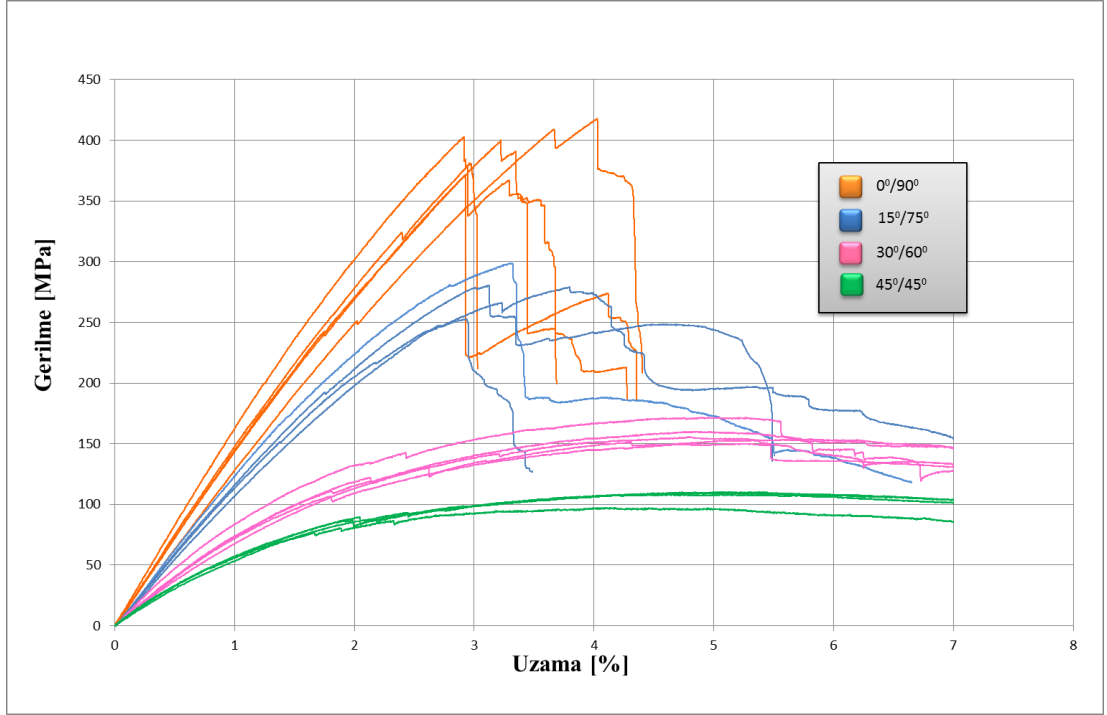
Şekil B.9: D9 grubu numunelerin eğilme test sonuçları.



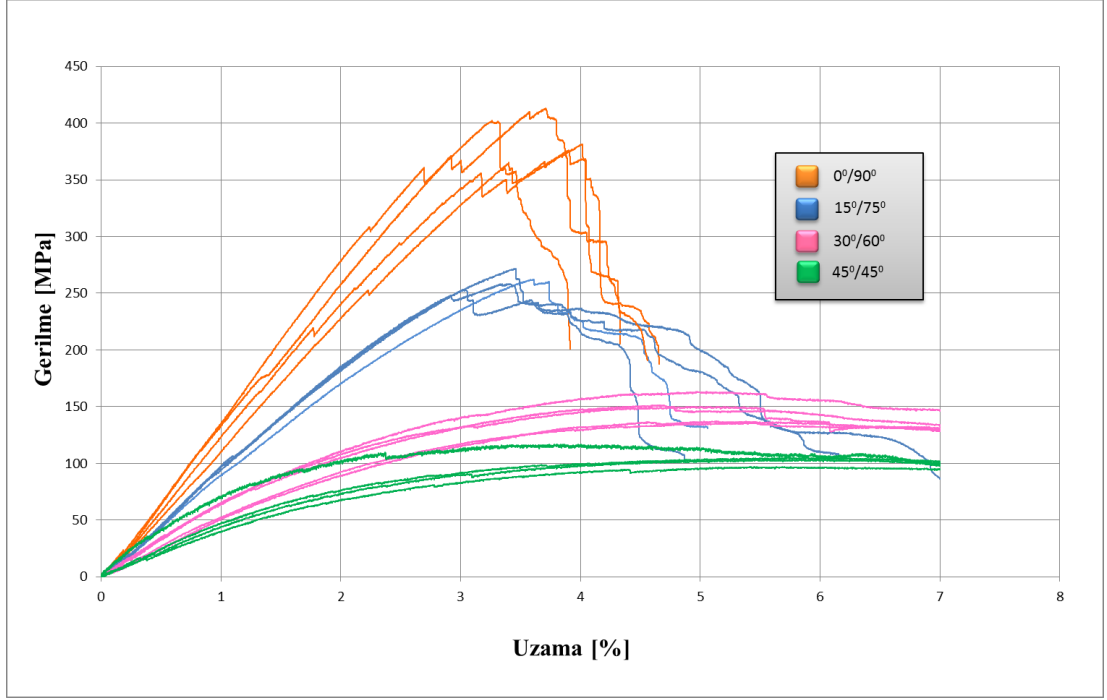
Şekil B.10: D10 grubu numunelerin eğilme test sonuçları.



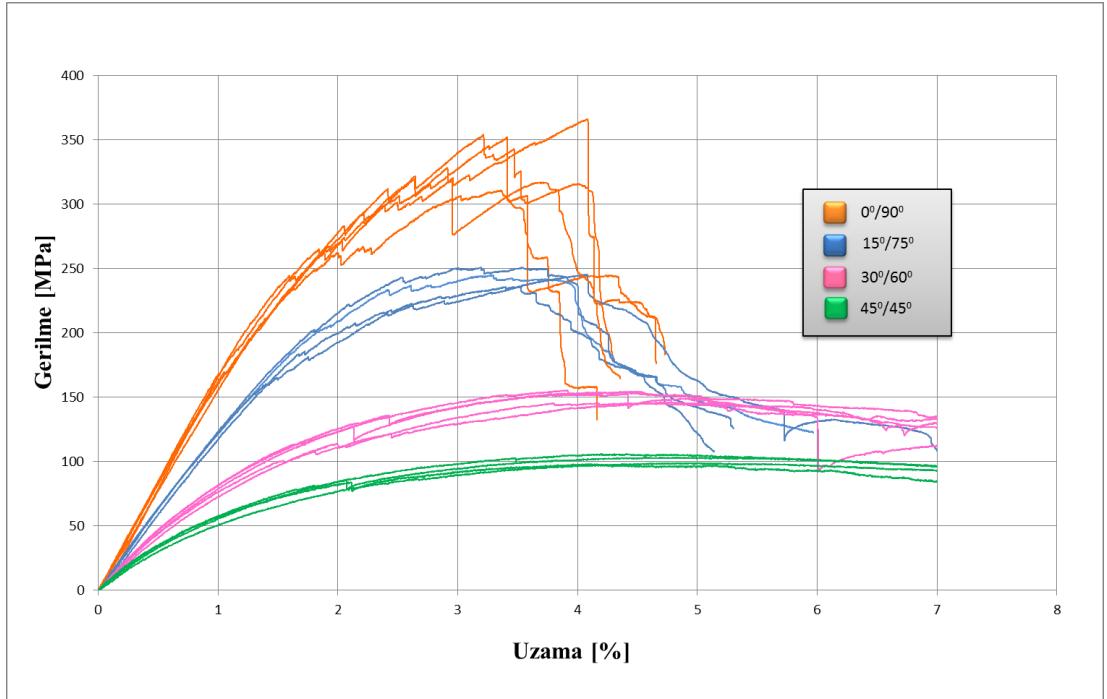
Şekil B.11: D11 grubu numunelerin eğilme test sonuçları.



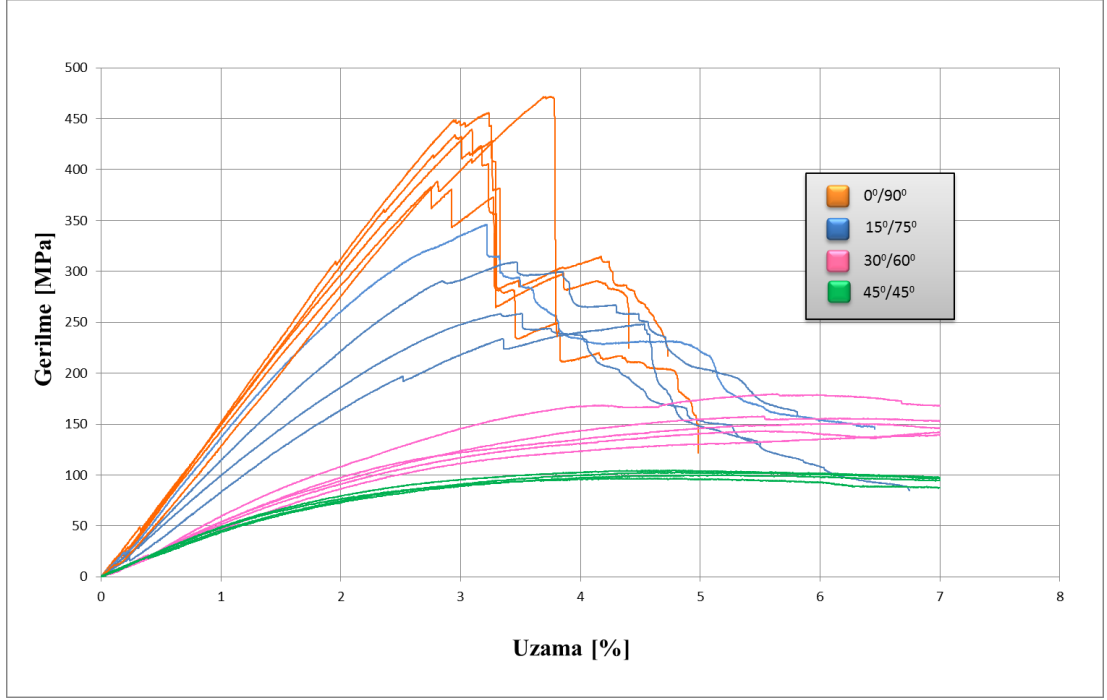
Şekil B.12: D12 grubu numunelerin eğilme test sonuçları.



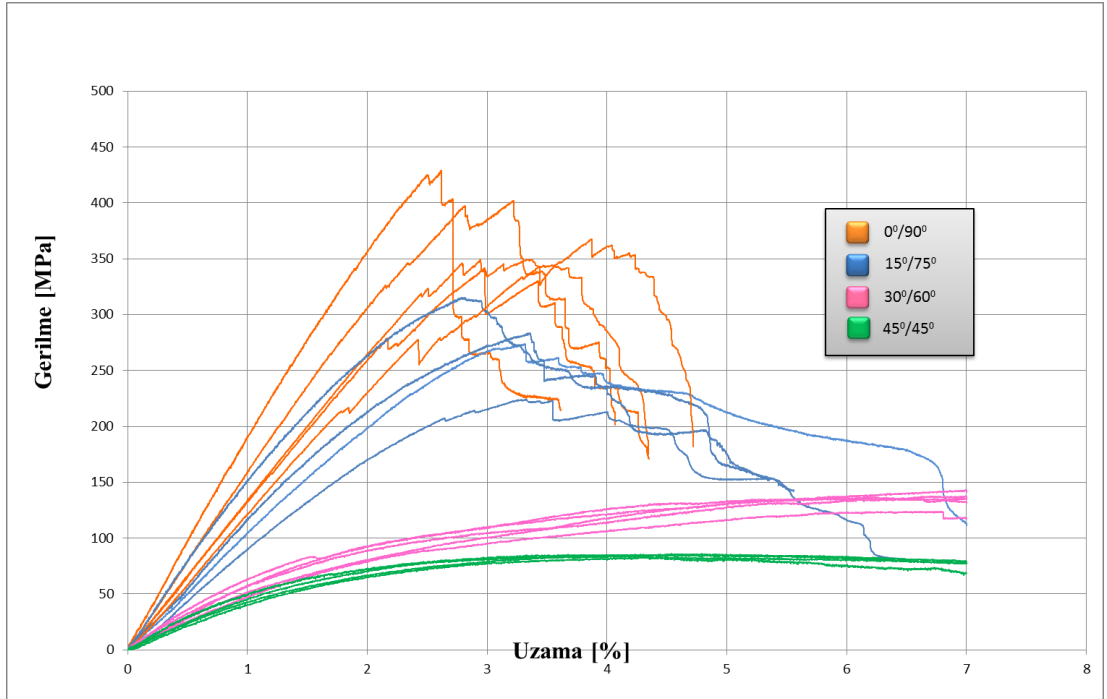
Şekil B.13: D13 grubu numunelerin eğilme test sonuçları.



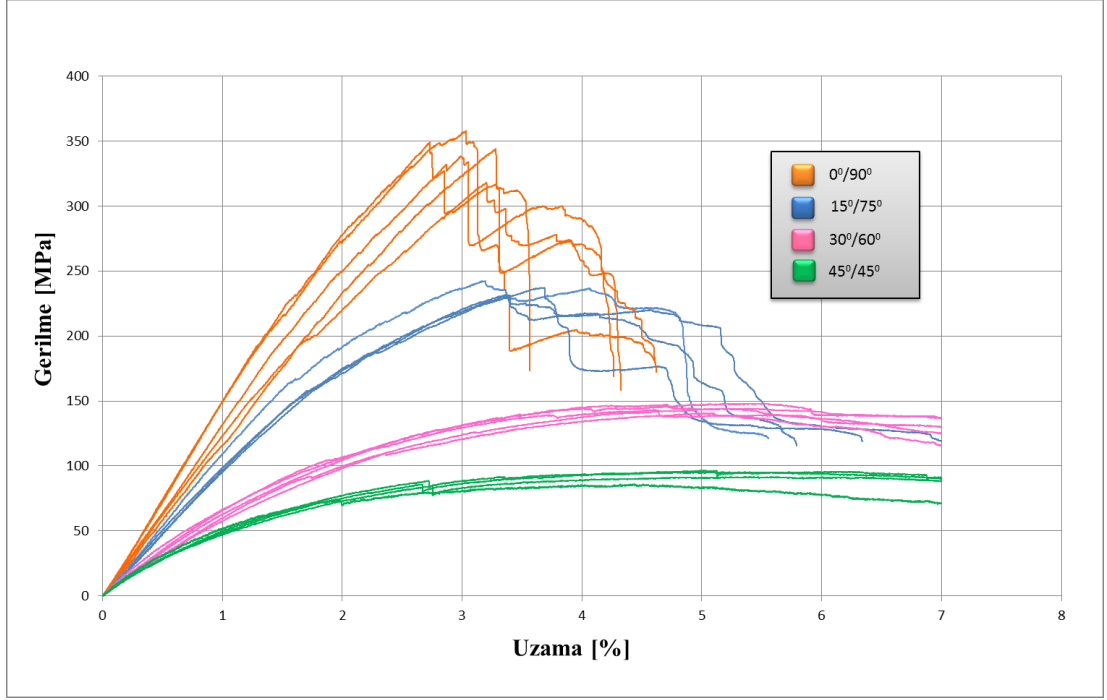
Şekil B.14: D14 grubu numunelerin eğilme test sonuçları.



Şekil B.15: D15 grubu numunelerin eğilme test sonuçları.



Şekil B.16: D16 grubu numunelerin eğilme test sonuçları.



Şekil B.17: D17 grubu numunelerin eğilme test sonuçları.