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

KOMPOZİT PLAKA ÜRETİM PROSESİ ÜZERİNE ÇALIŞMALAR VE PARAMETRELERİN MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MEHMET GÜLNAR

BALIKESİR, HAZİRAN - 2016

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

KOMPOZİT PLAKA ÜRETİM PROSESİ ÜZERİNE ÇALIŞMALAR VE PARAMETRELERİN MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MEHMET GÜLNAR

Jüri Üyeleri : **Yrd. Doç. Dr. Raif SAKİN (Tez Danışmanı)**
Prof. Dr. İrfan AY
Doç. Dr. Mehmet AKTAŞ

BALIKESİR, HAZİRAN - 2016

KABUL VE ONAY SAYFASI

Mehmet GÜLNAR tarafından hazırlanan "**KOMPOZİT PLAKA ÜRETİM PROSESİ ÜZERİNE ÇALIŞMALAR VE PARAMETRELERİN MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİ**" 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 Araştırmalar Projesi Birimi tarafından BAP 2013/40 nolu proje ile desteklenmiştir.

ÖZET

KOMPOZİT PLAKA ÜRETİM PROSESİ ÜZERİNE ÇALIŞMALAR VE PARAMETRELERİN MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MEHMET GÜLNAR
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
(TEZ DANIŞMANI: YRD.DOÇ.DR.RAİF SAKİN)
BALIKESİR, HAZİRAN - 2016

Bu çalışmada, genel amaçlı cam-fiber takviyeli kompozit plaka üretimleri gerçekleştirilmiştir. Kapalı bir kalıp içerisinde iki yüzü düzgün kompozit plakalar elde edilmiştir. Kompozit plakalar için Vakum Destekli Reçine Transfer Kalıplama (RTM) yöntemi kullanılmıştır. RTM yönteminde, kapalı kalıp içindeki hava bir taraftan vakum pompası ile dışarı atılırken, diğer taraftan kalıba kontrollü reçine transferi yapılmıştır. Cam-fiber olarak, birim ağırlıkları 500 gr/m2 olan cam-dokumalar kullanılmıştır. Toplam 6 kat cam dokuma ile yaklaşık %44'lük fiber hacmi elde edilmiştir. Kullanılan reçine ise, ortoftalik esaslı, düşük viskozitede, CTP tipi doymamış Polipol 336 poliester'dir. Kompozitlerin-plakaların imalatı için, vakum destekli Reçine Transfer Kalıplama (RTM) üretim prosesi kurulmuştur. Öncelikle kapalı, ısıtma kontrollü bir kalıp imal edilmiştir. Daha sonra çift silindir-pistonlu (pompa), basınç ve hız kontrollü bir RTM makinesi imal edilmiştir. Ayrıca, kapalı kalıp içine reçine transferi bittikten sonra 5 ton kapasiteli loadcell ile kürlenme basıncı da ölçülerek parametrelere ilave edilmiştir. Üretilen plakalardan elde edilen numunelerle çekme ve eğilme testi yapılmış, prosesteki imalat parametrelerinin, kompozit plakanın mekanik özelliklerine etkisi araştırılmıştır.

Plaka üretim parametrelerinde vakum destekli RTM için optimum parametreler; teflon boru kullanılarak, 2-noktadan enjeksiyon, 4-noktadan vakumlama, stiren monomeri kullanılmadan, 2-defa reçine sirkülasyonu, ortalama 2.39 Bar enjeksiyon basıncı, 44.73 mm/dak.'lık enjeksiyon hızı, 45 °C kalıp ısısı, 136 KPa'lık kürlenme basıncı ve -700 mmHg vakum basıncı gibi değerlerde elde edilmiştir. Test sonuçlarının cam dokuma fiberlerinin açısı, tam ıslanıp ıslanmadığı, kürlenme ısısı, kürlenme basıncı, kürlenme süresi, stiren ve Metil Etil Keton Peroksit (MEKP) oranından etkilendiği görülmüştür.

ANAHTAR KELİMELER: Kompozit, Reçine Transfer Kalıplama (RTM), Cam-Dokuma, Kompozit Plaka, Üretim, Proses

ABSTRACT

THE STUDIES OF PRODUCTION PROCESS OF COMPOSITE-PLATE AND THE EFFECT OF PARAMETERS ON MECHANICAL PROPERTIES
MSC THESIS
MEHMET GÜLNAR
BALIKESIR UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE
MECHANICAL ENGINEERING
(SUPERVISOR: ASSIST.PROF.DR.RAİF SAKİN)
BALIKESİR, JUNE 2016

On this work, glass-fiber-reinforced composite plate, which has general usage, was produced. In a closed mold, two-regular-faced composite plates were obtained. Resin Transfer Molding (RTM) process was used for composite plates. In RTM process, while the air in the closed mold was being thrown out, controlled resin was transferred to the mold. As a glass-fiber, glass fabrics were used which have unit weight of 500 grams per square meter. 44% fiber volume with a total of 6 layers of glass fabric was obtained. And the resin that was used is ortophthalic based, low viscosity, GFRP type unsaturated Polipol 336 polyester. RTM process was set up for manufacturing composite plates. First, a closed and heat controlled mold; then, a double-cylinder-piston (pump), pressure and speed controlled RTM machine were manufactured. Also, after the end of resin transfer to the closed mold, curing pressure was measured with 5-tons capacity loadcell and the measurements were added to parameters. Tensile and flexural tests were made by using the samples of manufactured plates and, the effects of manufacturing parameters in process on mechanical properties of composite was searched.

Optimum parameters for plate production parameters in RTM process were obtain under following variables: using teflon pipes, 2-point injection, 4-point vacuuming, without using styrene monomer, 2-time resin circulation, the average injection pressure of 2,39 bar, the injection speed of 44,73 mm/min, mold heat of 45°C, curing pressure of 136 KPa and vacuum pressure of -700 mmHg. It was observed that the test results were affected by the angle of glass fabric fibers, getting fully wet or not, curing heat, curing pressure, curing time and the proportion of styrene and MEKP.

KEYWORDS: Composite, Resin Transfer Molding (RTM), Glass-Woven, Composite Plate, Production, Process

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET ..... **i**
ABSTRACT ..... **ii**
İÇİNDEKİLER ..... **iii**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **v**
TABLO LİSTESİ ..... **vii**
SEMBOL LİSTESİ ..... **viii**
ÖNSÖZ ..... **ix**
1. GİRİŞ **1**
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI **4**
3. KOMPOZİT MALZEMELER **12**
3.1 Giriş 12
3.2 Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması 13
3.2.1 Elyaflı Kompozitler 13
3.2.2 Parçacıklı Kompozitler 14
3.2.3 Tabakalı Kompozitler 14
3.2.4 Karma (Hibrid) Kompozitler 14
3.3 Kompozit Malzemelerin Bileşenleri 15
3.3.1 Matris Malzemeler 15
3.3.2 Takviye Elemanları 16
3.3.3 İnhibitörler 17
3.3.4 Promotörler (Hızlandırıcılar) 17
3.3.5 Katalizörler 17
3.3.6 Kalıp Ayırıcı 18
3.3.7 Jelkot 18
3.4 Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri 18
3.4.1 El Yatırma (Hand Lay Up) 18
3.4.2 Püskürtme (Spray Up) 18
3.4.3 Elyaf Sarma 19
3.4.4 Profil Çekme / Pultrüzyon (Pultrusion) 19
3.4.5 Hazır Kalıplama (Compression Molding SMC, BMC) 19
3.4.6 Hazır Kalıplama Pestili (Sheet Moulding Composites, SMC) 20
3.4.7 Hazır Kalıplama Hamuru (Bulk Moulding Composites, BMC) 20
3.4.8 Vakum Torbalama (Vacuum Bagging) 20
3.4.9 Otoklav (Autoclave Bonding) 20
3.4.10 Reçine Transfer Kalıplama (Resin Transfer Molding, RTM) 21
3.5 RTM'de Ürün Kalitesine Etki Eden Faktörler 23
3.5.1 Fiber Oranı 23
3.5.2 Enjeksiyon Basıncı 23
3.5.3 Enjeksiyon ve Havalandırma Yollukları 23
3.5.4 Kalıp Sıcaklığı 23
3.5.5 Vakum 24
3.5.6 Reçine Sıcaklığı 24
4. VAKUM DESTEKLİ REÇİNE TRANSFER KALIPLAMA (VARTM) CİHAZI TASARIMI VE İMALATI **25**
4.1 Giriş 25

4.2 RTM Metodunun Avantajları ... 26
4.3 VARTM Cihazı Tasarımı ve İmalatı ... 27
4.3.1 Ana Gövde ... 29
4.3.2 Kalıplar ... 29
4.3.3 Elektronik Kontrol Ünitesi ... 32
4.3.4 Reçine Basma Sistemi ... 34
4.3.5 Vakum Ünitesi ... 36
4.3.6 Kalıp Isıtma Sistemi ... 37
5. KOMPOZİT MALZEMELERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ ... 39
5.1 Giriş ... 39
5.2 Kompozit Malzemelerin Mekanik Davranışları ... 41
5.3 Tabakalı Kompozitlerde Çekme ve Eğilme ... 43
5.4 Mekanik Testler ... 44
5.4.1 Çekme Testi ... 44
5.4.2 Üç Noktadan Eğilme Testi ... 45
6. DENEYSEL ÇALIŞMA ... 46
6.1 Çalışmanın Amacı ... 46
6.2 Test Numunelerinin İmalatı ... 47
6.2.1 Kompozit Plaka Üretiminde Kullanılan Malzemeler ... 47
6.2.2 Kalıbın Hazırlanması ... 48
6.2.3 Reçinenin Hazırlanması ... 51
6.2.4 Reçine Enjeksiyonu ... 53
6.2.4.1 Tekrarlı Enjeksiyon (Sirkülasyon) Yöntemi ... 55
6.2.5 Kürlenme ... 56
6.2.6 Test Numunelerinin Kesilmesi ... 57
7. BULGULAR ... 59
7.1 Çekme Testleri ve Sonuçları ... 59
7.2 Eğilme Testleri ve Sonuçları ... 65
8. SONUÇ VE ÖNERİLER ... 75
9. KAYNAKLAR ... 77
10. EKLER ... 83

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 3.1: Reçine Transfer Kalıplama (RTM) ile kompozit parça üretim yöntemindeki adımlar 22
Şekil 4.1: Vakum Destekli Reçine Transfer Kalıplama Cihazı ve bileşenleri. ..28
Şekil 4.2: RTM cihazı ana gövde. 29
Şekil 4.3: Alt ve üst kalıp. 30
Şekil 4.4: Alt kalıp iç görüntüsü. 31
Şekil 4.5: Kalıbın ısıtılması için tasarlanan sıcak su kanalları. 31
Şekil 4.6: Bilgisayar ve DAQ ünitesi. 32
Şekil 4.7: Kontrol panosu. 32
Şekil 4.8: Pozisyon sensörü ve loadcell. 33
Şekil 4.9: Yazılımın ara yüzü. 33
Şekil 4.10: Motor-redüktör grubu, lineer vidalı modül ve hidrolik piston. 34
Şekil 4.11: Reçine basma sisteminin parçaları. 35
Şekil 4.12: Vakum pompası. 36
Şekil 4.13: Vakum taşma kabı. 36
Şekil 4.14: Sıcak su kazanı. 37
Şekil 4.15: Sirkülasyon pompası ve sıcak su boruları. 38
Şekil 5.1: Tabakalı kompozit malzemenin mekanik davranışı 43
Şekil 5.2: Çekme testi cihazı ve çekme eğrisi 44
Şekil 5.3: Üç noktadan eğilme testi 45
Şekil 6.1: Kalıp ayırıcı sürülmüş yüzey. 48
Şekil 6.2: Kalıplar arası sızdırmazlık işlemi. 48
Şekil 6.3: Cam elyaf dokumaların kalıp içine yerleştirilmesi. 49
Şekil 6.4: Kalıbın kapatılması. 49
Şekil 6.5: Kalıbın sıkıştırılması ve sızdırmazlık. 50
Şekil 6.6: Tekrarlı enjeksiyon sistemi şematik gösterimi. 54
Şekil 6.7: RTM makinesi şematik gösterimi. 55
Şekil 6.8: Farklı parametrelerde üretilen ve kesimi yapılacak plakalar. 57
Şekil 6.9: Çekme testi numuneleri. 57
Şekil 6.10: Eğilme testi numuneleri. 58
Şekil 6.11: Test numunelerinin CNC frezede kesilmesi. 58
Şekil 7.1: Zwick/Roell Z250 test cihazı. 59
Şekil 7.2: Farklı fiber oryantasyon açısına sahip test numunlerinin çekme dayanımları grafiği. 61
Şekil 7.3: Farklı fiber yönlenmesine sahip test numunlerinin çekme dayanımları eğrisi ve eğri denklemi. 61
Şekil 7.4: Farklı fiber oryantasyon açısına sahip test numunlerinin çekme modülleri grafiği. 63
Şekil 7.5: Farklı fiber yönlenmesine sahip test numunlerinin çekme modülleri eğrisi ve eğri denklemi. 63
Şekil 7.6: Farklı fiber oryantasyon açısına sahip çekme test numunelerinin deformasyon grafiği. 65
Şekil 7.7: Eğilme testi cihazı çene ve aparatları. 65
Şekil 7.8: Farklı fiber oryantasyon açısına sahip test numunlerinin eğilme dayanımları grafiği. 67

Şekil 7.9: Farklı fiber yönlenmesindeki test numunleri eğilme dayanımları eğrisi ve eğri denklemi. 67
Şekil 7.10: Farklı fiber oryantasyon açısına sahip test numunlerinin eğilme modülleri grafiği. 69
Şekil 7.11: Farklı fiber yönlenmesine sahip test numunlerinin eğilme modülleri eğrisi ve eğri denklemi. 69
Şekil 7.12: Farklı fiber oryantasyon açısına sahip eğilme test numunelerinin deformasyon grafiği. 71
Şekil 7.13: Fiber oryantasyon açısına bağlı olarak değişen gerilme-şekil değiştirme grafiği 71
Şekil 7.14: Çekme testine tabi tutulmuş farklı fiber oryantasyon açısındaki numuneler. 72
Şekil 7.15: Çekme testi uygulanmış $0/90^0$ fiber oryantasyon açısına sahip numunenin önden ve yandan görünüşü. 73
Şekil 7.16: Eğilme testi uygulanmış numunenin önden ve yandan görünüşü. . 74

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 4.1: Kalıp ölçüleri. 29
Tablo 6.1: İmal edilen test numunelerindeki elyaf ve reçine miktarları ile reçine karışım oranları. 47
Tablo 6.2: Kalıp teknik özellikleri. 50
Tablo 6.3: Poliya Polipol 336 RTM tipi reçinenin özellikleri 51
Tablo 6.4: Reçine karışım oranları. 52
Tablo 6.5: Reçine enjeksiyon parametreleri. 54
Tablo 6.6: Reçine kürlenme parametreleri. 57
Tablo 7.1: Farklı fiber oryantasyon açısına sahip test numunelerinin çekme dayanımları tablosu. 60
Tablo 7.2: Farklı fiber oryantasyon açısına sahip test numunelerinin çekme modülleri tablosu. 62
Tablo 7.3: Farklı fiber oryantasyon açısına sahip çekme test numunelerin deformasyon tablosu. 64
Tablo 7.4: Farklı fiber oryantasyon açısına sahip test numunelerinin eğilme mukavemeti tablosu. 66
Tablo 7.5: Farklı fiber oryantasyon açısına sahip test numunelerinin eğilme modülü tablosu. 68
Tablo 7.6: Farklı fiber oryantasyon açısına sahip eğilme test numunelerinin deformasyon tablosu. 70

SEMBOL LİSTESİ

RTM **:** Reçine Transfer Kalıplama

VARTM **:** Vakum Destekli Reçine Transfer Kalıplama

CTP **:** Cam-elyaf Takviyeli Polyester

BAP **:** Bilimsel Araştırma Projesi

σ **:** Gerilme

M : Eğilme momenti

F : Uygulanan yük

ε **:** Birim şekil değiştirme

E : Elastisite modülü

U_R : Rezilyans

σ_{ak} : Akma mukavemeti

$\sigma_{çek}$: Çekme mukavemeti

σ_{kop} : Kopma mukavemeti

σ_t : Çekme mukavemeti

E_t : Çekme modülü

ε_t : % uzama

σ_f : Eğilme mukavemeti

E_f : Eğilme modülü

ε_f : % uzama

R : Korelasyon katsayısı

ÖNSÖZ

Tez çalışmam süresince bilgi ve tecrübesi ile desteğini esirgemeyen, projenin ortaya çıkmasında bizden daha fazla emek ve gayret gösteren akademik danışmanım, değerli hocam Yrd.Doç.Dr. Raif SAKİN'e teşekkür ederim.

Yüksek lisansa başladığımız günden itibaren farklı konularda yardımcı olan Balıkesir Üniversitesi Makine Mühendisliğinde görevli Arş.Gör. Fatih BALIKOĞLU'na, RTM cihazının elektronik kontrol ünitesinin tasarım ve yazılımında yardımcı olan Balıkesir Üniversitesi Edremit Meslek Yüksekokulun'da görevli Elektronik ve Haberleşme Yük.Müh. Öğr.Gör. Akif Birol DUMANAY'a, projenin her aşamasında birlikte çalıştığımız kıymetli arkadaşım Mak.Müh. Yakup DABAN'a, mekanik testlerde yardımcı olan Balıkesir Üniversitesi Araştırma Laboratuvarları Uygulama ve Araştırma Merkezinde görevli Elektrik Teknisyeni Metin GÜL'e ve çalışmalarım esnasında maddi ve manevi olarak sürekli destek olan değerli eşim Nuray GÜLNAR'a ayrı ayrı olarak teşekkürlerimi sunarım.

1. GİRİŞ

Malzeme biliminde teknolojik gelişmelerin ilerleme hızı, belirli koşullarda birden fazla özelliği aynı anda sağlayabilecek malzemelerle sınırlıdır. Bu gerçek, yeni özellikleri içeren yüksek performanslı malzeme gereksinimi kavramını geliştirmiştir. Alışılagelmiş malzemeler, metal ve alaşımları bu çeşit istekler karşısında sınırlı cevap verme durumuna gelmişlerdir. Yeni geliştirilen malzeme grupları anılan yetersizliklere çözüm bulmuş ve kullanıma yeni boyutlar getirmiştir. Metallerle kıyaslandığında, mühendislikte kullanılan polimerlerin en belirgin problemi, sahip oldukları düşük rijitlikleri ve mukavemetleridir. Günümüzde bu problem matrise takviye edici partiküllerin veya elyafların ilavesiyle bir ölçüde bertaraf edilmiş durumdadır. Bu ilave sonucu elde edilen yeni malzeme, kompozit malzeme olarak adlandırılmakta olup bugün ileri seviyede birçok mühendislik yapılarında yaygın olarak kullanılır duruma gelmiştir [1].

Kompozit bir malzeme, kimyasal bileşenleri farklı birbiri içerisinde pratik olarak çözünmeyen iki veya daha fazla malzemenin, kullanım yerindeki aranan özellikleri verebilecek daha uygun malzeme oluşumu için makro seviyede birleştirilmesi sonucu meydana gelen malzemelerdir. Kompozit malzemelerde ana malzeme genelde metaller, seramikler, cam ve polimerler olmak üzere dört sınıfa ayrılabilirler. Fiber takviyeli kompozit malzemeler bu dört grup malzemeden herhangi birinin fiberle takviye edilmesiyle elde edilirler. Fiberlerin gömüldüğü ana malzemeye matris malzemesi denir. Kompozit malzemelerde matrisin üç temel fonksiyonu vardır. Bunlar, fiberleri bir arada tutmak, yükü fiberlere dağıtmak ve fiberleri çevresel etkilerden korumaktır. İdeal bir matris malzemesi, düşük viskoziteli yapıda iken daha sonra fiberleri sağlam ve uygun bir şekilde çevreleyebilecek katı forma kolaylıkla geçebilmelidir.

Mühendislik uygulamalarında özellikle imalat, montaj ve kullanım aşamasında dışarıdan gelebilecek herhangi bir darbeye karşı malzemeler üzerinde beklenmedik sonuçlar ortaya çıkabilir. Bunu engellemek için malzemenin bu tip etkiler karşısında davranışının nasıl olacağının bilinmesi istenir. Darbe testleri

malzemelerin hasar modlarının ve dinamik deformasyonların ölçülmesinde kullanılmaktadır. Darbe direnci, darbeye maruz kalan parçalarda tasarımcının göz önüne alması gereken en önemli faktörlerden biridir. Darbe direnci ile malzeme ömrü belirlenirken aynı zamanda malzeme güvenliğinin de belirlenmesi sağlanmaktadır. Günümüzde yaygın bir kullanım alanına sahip olan kompozit malzemelerde, çarpmanın türüne göre darbeye maruz kalan ve/veya kalmayan bölgede genellikle gözle görülemeyen veya çok zayıf şekilde görülebilen hasarlar meydana gelebilir. Bu tür hasarlar daha sonra malzemenin dinamik yük etkisi altında çalışma durumunda büyüyerek daha geniş çaplı hasarlara yol açabilir. Bu sebeple, tabakalı kompozit bir yapıda darbe etkisinin oluşturacağı hasarı önceden tahmin etmek üretim, tasarım ve kullanım açısından büyük önem arz etmektedir [2].

Metalik malzemelerle kıyaslandığında kompozit malzemelerin en belirgin üstünlükleri; malzemenin birim ağırlık başına düşen elastik modülünün ve mukavemetlerinin oldukça yüksek olmasıdır. Böylece kompozit malzemeler ileri mühendislik uygulamalarında, bilhassa yüksek rijitlik/ağırlık ve mukavemet/ağırlık oranlarının önemli olduğu havacılık ve otomobil endüstrisinde her geçen gün daha da yaygın bir kullanım alanı bulmaktadır. Diğer taraftan ucuz üretim yöntemi ve kolay imal edilebilmeleri de göz önünde bulundurulduğunda ekonomik açıdan tercih nedeni olan malzemeleri oluşturmaktadır [1].

Bunun yanında kompozitlerin korozyon dayanımları, çevre şartlarına karşı dirençleri, yorulma ömürleri daha yüksektir. Bu üstün avantajlarının aksine tabakalı kompozitlerin düzlem dışı yük taşıma kapasiteleri oldukça düşüktür [2].

İmalat sanayinde kullanılan tüm malzemelerin sağlıklı bir şekilde kullanılması için onların tüm karakteristik ve mekanik özelliklerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bilinmesi gereken bu mekanik özellikler, çekme dayanımı, basma dayanımı, eğilme dayanımı, kesme dayanımı, yorulma dayanımı, aşınma dayanımı korozyon dayanımı, yüksek sıcaklık özellikleri, ısıl iletkenlik, elektrik iletkenliği gibi başlıca özelliklerdir [1].

Kompozit malzemenin kullanımın giderek arttığı, havacılık, denizcilik ve otomotiv gibi sanayi dallarında oldukça geniş bir kullanım alanına sahip cam elyaf takviyeli polyester reçineli kompozitlerin üretimi için Balıkesir Üniversitesi Bilimsel

Araştırmalar Projesi kapsamında BAP 2013/40 numaralı proje ile Vakum Destekli Reçine Transfer Kalıplama Makinesi tasarlanmış ve imal edilmiş, imal edilen bu makinde farklı üretim parametrelerinde kompozit plaka üretimi gerçekleştirilmiştir. 50x50 cm ebatlarında üretilen kompozit plakalarda matris malzeme olarak Polipol 336 RTM tipi polyester reçine ve bağlayıcı olarak da 500 gr/m2'lik cam elyaf dokuma kullanılmıştır.

Dökümü yapılan kompozit malzemelerin mekanik özelliklerin belirlenmesi için, farklı parametrelerde üretilen kompozit plakaların her birinden beşer adet $0^0/90^0$, $15^0/75^0$, $30^0/60^0$ ve $45^0/45^0$ fiber oryantasyon açısına sahip çekme ve eğilme test numuneleri hazırlanmıştır. Hazırlanan test numunelerinin TS EN ISO 527-4 standardına göre çekme, ASTM D790 standardına göre de eğilme testleri yapılarak, en mukavemetli malzeme için en uygun üretim parametreleri ve en uygun fiber oryantasyon açısı belirlenmiştir.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

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 -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 (≈4000 MPa) en kuvvetli çeliğinkinden (≈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 azalmakta daha sonra artmaktadır. Bu oranın üst limiti, elyafın matris tarafından sarılabilmesi 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. Elyaflar tek yönde olduğu gibi, birbirine dik vaziyette veya rastgele yönlenmiş olabilirler. Lifler tek yönde yönlendiğinde, elyaf yönünde maksimum mukavemet elde edilir. Bu durumda, mekanik özellikler yöne göre büyük ölçüde değişmektedir [10]. Tabakalı kompozitlerde yapı sıkılaştıkça veya fiber oranı arttıkça, gerekli olan enjeksiyon basıncı da artmaktadır. Ayrıca kontrollü bir vakum desteği, daima hava boşluğu yüzdesini azaltmaktadır [11]. Kompozit parçaların kalitesi içerdiği makro/mikro hava boşluklarının yüzdesi ile de ilgilidir. Yapılan bazı

çalışmalarda enjeksiyon hızının artmasıyla mikro hava boşlukları artarken, makro hava boşlukları ise azalmaktadır [12].

Akgül, reçine transfer kalıplaması (RTM) yönteminde kalıp sıcaklığının ve vakumun etkilerini incelemiştir. Bu çalışmada kalıp sıcaklığının, reçine başlangıç sıcaklığının ve kalıp reçine çıkış kanallarına uygulanan vakumun Reçine Aktarım Kalıplaması (RTM) Yöntemi ile üretilen epoksi matriksli dokuma cam elyaf takviyeli kompozit numunelerin mekanik özelliklerine etkisinin araştırılması amaçlanmıştır. Bu amaç için, altı farklı kalıp sıcaklığı (25º, 40º, 60º, 80º, 100º ve 120°C), iki farklı reçine sıcaklığı (15º ve 28°C), vakumlu (0.03 bar) ve vakumsuz (~1 bar) koşulları kullanılmıştır. Üretilen numuneler ultrasonik muayene (C-Scan), mekanik testler (Çekme, Eğilme, Darbe), termal analizler (Yanma kaybı, TGA) ve tarama elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiştir.

Genel olarak, 60°C kalıp sıcaklığı ile üretilen numunelerin mekanik özelliklerinin en yüksek olduğu gözlemlenmiştir (örneğin çekme dayancı, Charpy darbe tokluğu ve eğilme dayancı değerleri sırasıyla %16, %43, ve %26 daha yüksek). Vakum uygulanmadığı zaman, mekanik özelliklerde düşüşe (Charpy darbe tokluğunda %26, çekme ve eğilme dayançlarında ise %5) neden olan "boşlukların" yüzdesinde artış olmuştur. Başlangıç reçine sıcaklığının düşmesinin mekanik özellikleri de (örneğin Charpy darbe tokluğunu %18, çekme dayancını ise %14) düşürdüğü belirlenmiştir[13].

Lee ve Wei, RTM yöntemi ile 10 kat EF420 dokuma tipi cam elyaf dokumadan oluşan 3 mm kalınlığında, 10 kat 1581 dokuma tipi cam elyaf dokumadan oluşan 2 mm kalınlığında, epoksi esaslı kompozit plakalarda; enjeksiyon basıncı, enjeksiyon sıcaklığı ve kumaş yapısının kompozit malzemenin mekanik performansına etkisi incelenmiştir. Kompozit plaka üretimi için imal edilen kalıp tasarımında bir noktadan enjeksiyon, dört noktadan vakum uygulanmıştır. Kompozit plakanın enjeksiyonunda 293-490 KPa aralığında enjeksiyon basıncı ve 150°C ve 160°C enjeksiyon sıcaklığı uygulanmıştır. Yapılan çalışmada 1581 dokuma tipi cam elyaf, 160°C reçine enjeksiyon sıcaklığı ve 392 KPa'lık enjeksiyon basıncında optimum fiziksel ve mekanik performansın elde edildiği görülmüştür[14].

Karabeyoğlu, plastik esaslı kompozit malzemelerin eksenel yükler altında özelliklerinin incelemiştir. Plastik esaslı kompozit malzemelere farklı oranlarda cam elyaf eklenmiş ve numune olarak hazırlanmıştır. Hazırlanan deney numuneleriyle çekme ve darbe testleri yapılmıştır. Alınan sonuçlar karşılaştırılıp takviye elemanının kompozit içerisindeki önemi ve mekaniksel özelliklere olan etkileri incelenmiştir. Yapılan deneyler sonucunda plastik esaslı kompozit malzeme içerisindeki takviye elemanı miktarı arttıkça o malzemenin mukavemet ve darbe dayanım değerleri artış göstermiş, fakat malzemenin sünekliği takviye elemanının miktarıyla ters oranda azalmıştır [15].

Turan, çözülebilen bağlantılı kompozit plakaların mekanik davranışlarını deneysel ve sayısal olarak araştırmıştır. Çift tesirli pim bağlantıların kullanıldığı çalışmada epoksi reçine matriksli ve tek yönlü karbon fiberler ile takviye edilmiş dört tabakalı kompozit levhalar kullanmıştır. Deneysel ve sayısal çalışmada fiber takviye açısının, tabaka diziliminin, geometrik parametrelerin (E/D, W/D) ve hasar yükünün değişimine bağlı olarak mekanik davranışları incelemiştir. Sayısal ve deneysel çalışmalar sonucunda mekanik davranışların geometrik parametrelere, fiber takviye açısına ve tabaka dizilimine bağlı olarak değiştiğini gözlemlemiştir. Hasar oluşumunu ve tipini etkileyen en önemli parametrenin geometrik parametre (E/D) olduğunu belirtmiştir [16].

Sakin, düzlemsel rasgele dağılımlı keçe elyafla takviyeli kompozit malzemede kırılma tokluğunun elyaf hacmi, elyaf yönlenmesi ve deformasyon hızının etkisi üzerine bir araştırma yapmıştır. Deneylerde matris malzeme olarak polyester reçinesi, takviye malzemesi olarak ise düzlemsel rastgele dağılımlı keçe elyafı kullanmıştır. Elyaflar için cam hacim oranları %24, %20, %16, %12, %8 ve %4 olarak belirlenmiştir. 10 mm kalınlıkta el yatırması yöntemiyle hazırladığı plakalardan ASTM-E399 uyarınca üç noktadan eğilme deney parçaları hazırlayarak deneyler yapmıştır. Deney parçalarındaki elyaf tabakalarının yönlerini 0, 30, 45, 60, 90 derece olarak almış ve bu şekilde her yön için ayrı ayrı kırılma toklukları saptamıştır. Ayrıca deneyler sırasında her bir numune için deformasyon hızıı 5, 25, 50 mm/dak olarak değiştirmiştir. Deneyler sonucunda; fiber yönlerinin kırılma tokluğuna etkisinin çok fazla olmadığını, elyaf oranına göre ise kırılma tokluğu arttığını ve deformasyon hızı ile kırılma tokluğunun değiştiğini gözlemlemiştir [1].

Sakin bu çalışmasında ise, bilgisayar destekli çok numuneli eğilme yorulması test cihazı tasarlamış ve cam-fiber takviyeli polyester kompozitlerde eğilme yorulması davranışını incelemiştir. Cam-fiber takviyeli polyester kompozitlerin eğilme yorulması davranışlarını incelemek için, 800, 500, 300 ve 200 gr/m^2'lik cam elyaf dokumalar ile 225, 450 ve 600 gr/m^2'lik rastgele cam keçe ve polyester reçinesi kullanmıştır. RTM yöntemi ile elde ettiği bu numuneleri, $0/90^0$ ve $45/45^0$ yönlerinde kesmiştir. Ayrıca RTM metodu için yeni bir kalıp tasarlamış ve cam fiberlerin tam ıslanması için bu kalıp üzerinde basit bir yöntem uygulamıştır. İmal edilen bu kalıpta orta noktadan kimyasal reçine enjeksiyonu yapmış ve kalıbın dört köşesinden reçineyi dışarı vermiştir. Bu şekilde reçinenin bütün noktalara aynı anda ve aynı oranda ulaşması ile daha iyi bir ıslanma gerçekleştirmiştir. Bu tasarım ile optimum enjeksiyon parametrelerine en kolay şekilde yaklaşım sağlamaya çalışmıştır. RTM metodunda cam fiberlerin tam ıslanması için "tekrarlı enjeksiyon-sirkülasyon" adı verilen yöntemi uygulamış ve birden fazla enjeksiyon çevrimi kullanılarak cam fiberlerin daha iyi ıslanmasını sağlamıştır.

Eğilme yorulması deneylerinin yanı sıra çekme ve üç noktadan eğilme testleri de gerçekleştirmiş ve sonuçları değerlendirmiştir. Yapmış olduğu test sonuçlarına göre en yüksek yorulma ömrü, 800 gr/m^2'lik cam dokuma kullanılan $0/90^0$ yönlü Kompozitlerde tespit etmiştir. Test sonuçlarının, cam dokuma fiberlerinin alansal yoğunluğu, açısı, geçirgenliği ve tam ıslanıp ıslanmamasından etkilendiğini gözlemlemiştir [17].

Sözer, TÜBİTAK destekli projesinde kompozit malzeme yöntemlerinden en çok kullanılanlarından birisi olan RTM üretim yöntemindeki sorunlara çözüm aramış ve RTM üretim yöntemi ile kompozit parça üretiminde karşılaşılan iki büyük soruna yanıt aramıştır. Bunların birincisinde, kalıp tasarımı ve üretim parametrelerinin simülasyon programı ile yapılması, ikincisinde üretim sırasındaki değişiklikleri enjeksiyon sırasında tespit edip, anında kontrol müdahaleleriyle kalıbın tamamen enjeksiyonunu sağlamıştır. Aynı zamanda otomasyon haline getirilmiş, fire oranı ve maliyeti düşük RTM yöntemi ile kompozit parça üretimi için gerekli teçhizat, algılayıcı, simülasyon sonuçları ve veri analizi ile entegre edilmiş bir kontrol sistemi geliştirmiştir [7].

Sözer, bu çalışmasında Reçine Transfer Kalıplama (RTM) üretim yöntemi ile kompozit parça üretiminde karşılaşılan iki büyük sorun olan kalıp tasarımı ve üretim parametrelerinin seçimine çözüm aramıştır. Sözer, kalıp içerisinde reçinenin akışını modelleyen simülasyon programı hazırlamıştır. Bu sayede üretim sırasındaki değişiklikleri enjeksiyon sırasında tespit edip, anında kontrol müdahaleleriyle (üretim parametrelerinde değişiklik yaparak) kalıbın tamamen dolumunu sağlamıştır. Bu amaçlar dâhilinde denenen ve geliştirilen üç tip algılayıcı sistemi (sıcaklık, dielektrik ve direnç prensipleriyle çalışan) ayrıntılı olarak sunmuştur. Bu algılayıcı sistemleriyle bütünleşmiş kalıp tasarımı ve RTM enjeksiyon makinası kullanarak, çeşitli sorunlu kalıp dolumu vakalarını ele almış, ve sorunsuz kompozit malzeme üretimine geçiş sağlayabilmiştir [8].

RTM üretim yöntemi ile el yatırması üretim yöntemine birlikte bakıldığında RTM üretim yöntemiyle elyaf reçine ile daha iyi ıslanmaktadır ve optimum değerde yapıya reçine alarak el yatırmasına göre daha hafif konstrüktif yapılar elde edilmektedir. Ayrıca el yatırması üretim metodu ile üretilen kompozit malzemelerin içyapısında çok sayıda ve büyük çapta hava boşlukları oluşmakta bu boşluklarda malzemenin dayanımını düşürmektedir.

Türkmen, cam elyaf takviyeli kompozit malzemelerde elyaf tabaka sayısına bağlı mekanik özellikleri ve darbe dayanımını incelemiştir. İncelemesinde genellikle elyaf katman sayısı, yani cam elyaf keçe miktarı arttıkça kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin iyileştiğini görmüştür. Tabakalar arası bölge, kompozit mukavemetinin olması gerektiğinden daha düşük değerlerde olmasına neden olduğu için belli bir elyaf katmanı sayısından sonra mukavemet artışı, elyaf katman sayısının artışına bağlı olarak istenilen artışı sağlayamadığını belirlemiştir [18].

Türkmen ve Köksal, farklı cam elyaf katman sayısına sahip, el yatırması yöntemiyle üretilmiş kompozit malzemelerin çekme ve üç nokta eğilme testlerini yaparak ortalama mukavemet değerlerini elde etmiş ve düşük hızlı darbe testi yaparak malzemelerin darbe dayanımlarını incelemişlerdir. Cam elyaf takviyeli (CTP) kompozit malzemelerin mekanik özellikleri incelendiğinde elyaf katman sayısına bağlı kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin iyileştiği görülmüştür. Impact test sonuçlarına bakıldığında ise elyaf katman sayısı artışı ile malzemelerin absorbe ettiği enerji değerlerinin yaklaşık lineer bir artış gösterdiği belirlenmiştir [2].

Koruvatan, farklı kür çevrimlerinde üretilen ve farklı geometrik ölçülere sahip cam elyaf-epoksi tabakalı kompozit plakaların pim/civata yükü altındaki bağlantı davranışını incelemiştir. Deneysel çalışmada kullanılan [0°/90°] fiber oryantasyon açısına sahip cam elyaf-epoksi kompozit plakaları dört farklı kür çevriminde (90°C sıcaklıkta ve 1,5 saat sürede, 90°C sıcaklıkta ve 4 saat sürede, 120°C sıcaklıkta ve 1,5 saat sürede, 120°C sıcaklıkta ve 4 saat sürede) üretmiştir. Deneysel çalışmada, yüksek sıcaklık ve yüksek sürede (120 ºC sıcaklık ve 4 saat süre) ürettiği pimli/civatalı bağlantılı tabakalı kompozit plakaların, diğer plakalardan daha yüksek yataklama mukavemetlerine sahip olduklarını tespit etmiştir [19].

Deniz, kompozit malzemelerin üretim yöntemleri ve ısıl işlemle presleme tekniğini kullanarak kompozit malzeme üretecek bir düzeneğin tasarım ve imalatı üzerine çalışma yapmıştır. Kompozit malzeme üretiminde kullanılabilecek bir hidrolik pres dizaynı, ayrıca presle birlikte çalışacak olan sıcak kalıbın dizayn ve imalatını gerçekleştirmiştir. Hidrolik prese ait piston, kumanda ünitesi, güç ünitesi ve bağlantı elemanlarının hesaplarını yapmış ve üretilecek olan kompozit malzeme için gerekli olan basınç, basma süresi, kalıp sıcaklığı konularını göz önünde bulundururarak uygun termokupul, termostat, kontaktör ve zaman sayacı cihazlarını seçmiştir. İmalatı yapılan ısı düzeneği ile yaklaşık olarak 600 ^{0}C sıcaklığa kadar üretim yapılabilen polimer ve metal matrisli kompozit malzemelerin üretimini gerçekleştirmiştir [20].

Biber, plastik matriksli kompozit malzemelerde akış analizi ve uygulamaları üzerinde çalışma yapmıştır. Çalışmasında RTM üretim prosesini inceleyerek son ürün performansını etkileyecek parametreler içerisinde en önemli adımın dolum safhası olduğunu ve yapılan çalışmaların büyük çoğunluğunun bu üretim adımının geliştirilmesi üzerine yapıldığını belirlemiştir. Ayrıca polimer matrisli kompozit üretim proseslerinin optimizasyonu için kullanılan modellemeleri sınıflandırarak ayrıntılı bir şekilde incelemiş, bir oluşturma çalışmasının ilkelerini açıklamış ve gerçek fiziksel duruma en yakın modellemenin elde edilmesi için deneysel çalışma ile modellerin sınanması gerektiğini saptamıştır [21].

Yüksek, cam lifi esaslı polyester reçineli çok eksenli çözgülü örme kompozit yapıların mekanik özelliklerinin geliştirilmesi üzerine çalışma yapmıştır. Çalışmasında, bu kompozit yapıların mekanik özelliklerinin arttırılması amacıyla

reçine ile takviye malzemesinin bağ yapma kuvvetinin arttırılması için γ−glisidoksipropil trimetoksi silan (GPS) farklı konsantrasyonlarda cam lifli kumaşın yüzeyine %0,10, %0,25, %0,50 ve %0,75'lik oranlarda kaplamıştır. Kaplama banyosundan çıkartılan kumaşları 10, 20 ve 30 dakikalık sürelerle 100 ^{0}C ve 110 ^{0}C'de fırınlamıştır. Daha sonra yüzey kaplama işlemi bitmiş kumaşları vakum-infüzyon yöntemi ile kompozit haline getirmiştir.

Genel olarak silan kaplanmış cam kumaşların fırınlama sıcaklıklarının artışı ile birlikte mekanik değerlerde düşüş olduğunu belirlemiştir. Yaptığı çekme testlerinde, optimum fırınlama sıcaklığının silan konsantrasyonunun düşük (%0,10, %0,25) olduğu numunelerde düşük fırınlama süresinde (10 dakika), silan konsantrasyonunun yüksek olduğu (%0,50 ve %0,75) numunelerde ise yüksek fırınlama süresinde (30 dakika) mukavemet artışının yüksek olduğunu tespit etmiştir. Bu grupta 20 dakikalık işlem süresinin uygun olmadığını gözlemlemiştir. Ayrıca sürekli liflerle takviye edilmiş kompozit yapıların mekanik dayanımlarının en iyi olduğu düzlemin liflere paralel uygulanan yükler olduğunu, lif eksenine dik uygulanan yüklerde ise kompozit yapı içerisinde bulunan liflerin çok fazla bir etkilerinin olmadığını tespit etmiştir [22].

Durgun, Vatansever, Ertan ve Yavuz, polimer esaslı elyaf takviyeli kompozit malzemelerde üretim tekniğinin mekanik özellikler üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Çalışmalarında, elyaf takviyeli polimer esaslı kompozit malzemelerin farklı üretim teknikleri kullanılarak çekme ve üç nokta eğilme deneyleri sonucundaki davranışlarını yorumlamışlardır. Elde ettikleri sonuçlar, üretim teknikleri açısından değerlendirildiğinde sırasıyla el yatırma, vakum torbalama ve vakum infüzyon yöntemlerinde dayanım artışı gerçekleşmiştir. Vakum torbalama ve vakum infüzyon yöntemlerinde kullanılan kapalı kalıp prosesi, reçine emisyonunu minimum düzeyde tutmuştur. Vakum torbalama yönteminde, el yatırma yöntemine göre daha az hava kabarcığı ve boşluklar meydana gelmiştir. Vakum sayesinde reçinenin liflerin arasına nüfuz etmesi kolaylaşmış ve basınç ile fazlalık reçine atılmıştır. Vakum infüzyonla elde edilen numunelerde reçinenin elyaf yüzeyine dağılımı ve emilimi aynı miktarda olduğu, kalıp içerisinde reçine birikmesi veya elyaf katlanmaları olmadığı, bunun da malzemenin yapısında ve görüntüsünde homojenlik sağladığı belirlenmiştir [23].

Karacaer, cam kumaş takviyeli delikli SMC kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini araştırmıştır. Kompozit malzemelerin dayanım artışını sağlayan malzemelerin takviyeler olduğunu, Dolayısıyla takviye elemanlarının kompozit malzeme içindeki oranı ve oryantasyonu değiştikçe çekme dayanımının da arttığını gözlemiştir [24].

Demirel, otoklav yöntemi ile üretilen tek yönlü karbon elyaf-epoksi reçineden oluşan kompozit malzemeler hazırlanarak, elyaf yatırma açısının tabakalı epoksi kompozit malzemeler üzerindeki etkileri incelemiştir. Yaptığı mekanik karakterizasyon çalışmalarında, elyaf yönlenmelerinin kompozitin mekanik dayanımında oldukça etkili olduğunu görmüştür. Çekme testi sonucunda, tek yönlü karbon elyaf-epoksi reçine prepreglerden eşit tabaka sayısında farklı yönlendirmelerle hazırlanan numune gruplarından en yüksek çekme dayanımı ve çekme modülü 0^0 yönlendirmeli numune grubu vermiştir. En düşük çekme dayanımı değerini ise 90^0 yönlendirmeli numune grubu vermiştir. Aynı zamanda çok yönlü numunelerde 0^0'li yönlendirme oranı arttıkça dayanım artmıştır. Bunun nedeni olarak da elyaf doğrultusunda çekmeye zorlanan numunenin elyafların çekme mukavemetinin fazla olması nedeniyle kolayca kopmamaları, buna karşılık ters yönde yapılan çekme yüklemesinde elyafların eğilmeye zorlanmaları sonucunda matristen kolayca ayrılmış olmasından kaynaklandığı değerlendirilmiştir [25].

3. KOMPOZİT MALZEMELER

3.1 Giriş

Malzemeler genellikle metaller, seramikler ve organik malzemeler olarak üç ana gruba ayrılırlar. Bu üç grubun birbirlerine göre üstün ve zayıf yönleri vardır. Dayanım ve tokluk özellik çiftinin en uygun olduğu grup olan metaller makine mühendisliğinde en yaygın olarak kullanılan malzeme türüdür.

Bu üç ana grubun yanında, aynı ya da farklı gruplardan iki ya da daha fazla malzemenin uygun olan özelliklerini tek malzemede toplamak, ya da yeni bir özellik ortaya çıkartmak amacıyla makro düzeyde birleştirilmesi ile oluşturulan malzemeler, kompozit malzemeler olarak adlandırılırlar. Atomsal ve molekülsel düzeyde birleştirilen malzemeler (örneğin alaşımlar) makroskobik olarak homojen olduklarından kompozit malzeme olarak sınıflandırılamazlar.

Diğer bir tanım ise şöyle yapılabilir; iki veya daha fazla malzemenin kullanım yerindeki aranan özellikleri verebilecek daha uygun bir malzeme oluşturmak için makro seviyede birleştirilmesi sonucu meydana gelen malzemelere kompozit malzemeler denir.

Kompozit malzeme üretiminin bilinçli olarak ele alınması ve bilimsel yaklaşımlarla yeni malzemelerin geliştirilmesi ancak 1940'lı yıllarda cam takviyeli plastiklerin kullanım ile başlamıştır. Önemli ilk uygulamalara örnek olarak radar kubbeleri gösterilebilir. Cam takviyeli plastikler (CTP) elektromanyetik geçirgenlik, hafiflik, atmosfer koşullarına dayanıklılık ve mekanik özellikleri nedeni ile bu amaç için kullanılabilecek en uygun malzemedir. Kompozit malzemelerde istenen mekanik özellikler, çevre şartlarına dayanıklılık, görünüm, maliyet vb. özellikler ile çok çeşitli olabilmekte ve hemen hemen her şartı karşılayabilecek uygun bir takviye-matris çifti oluşturabilmektedir.

Farklı malzemeler mikroskobik seviyede birleştirilebilirler. Fakat sonuçta metal alaşımlarında olduğu gibi makroskobik olarak homojendir. Kompozit

malzemeler ise makroskobik seviyede anizotropikdir. Kompozit malzemeler genellikle kendilerini meydana getiren bileşenlerin en iyi özelliklerini biraraya getirecek tarzda oluşturulurlar. İşte bu kompozit malzemelerin en büyük avantajıdır. Fazla ağırlık istenmeyen fakat fazla mukavim olması istenen yerlerde çelik ve benzeri metallerin yerine kompozit malzemeler kullanılmaktadır.

Kompozit malzeme oluşturma seçenekleri sonsuzdur, dolayısıyla bunları sınıflandırmak da oldukça güçtür. Sınıflandırma değişik açılardan yapılabilir [1].

3.2 Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Kompozit malzemeleri, yapısındaki bileşenlere göre ve yapılarını oluşturan malzemelerin türlerine göre olmak üzere iki şekilde sınıflandırmak mümkündür.

Kompozit malzemenin yapısındaki bileşenlere göre sınıflandıracak olursak:

- Elyaflı kompozitler,
- Parçacıklı kompozitler,
- Tabakalı kompozitler,
- Karma kompozitler başlıkları altında sıralanabilirler

Kompozit malzemenin yapısını oluşturan malzemenin türlerine göre ise:

- Polimer matrisli kompozitler
- Metal matrisli kompozitler
- Seramik kompozitler başlıkları altında sıralanabilirler.

3.2.1 Elyaflı Kompozitler

Bu kompozit tipi ince elyafların matris yapıda yer almasıyla meydana gelmiştir. Elyafların mukavemeti ve matris içindeki yerleşimi kompozit yapının mukavemetini etkileyen önemli unsurlardandır. Uzun elyafların matris içinde birbirlerine paralel şekilde yerleştirilmeleri ile elyaflar doğrultusunda yüksek mukavemet sağlanırken, elyaflara dik doğrultuda oldukça düşük mukavemet elde

edilir. İki boyutlu yerleştirilmiş elyaf takviyelerle her iki yönde de eşit mukavemet sağlanırken, matris yapısında homojen dağılmış kısa elyaflarla ise izotrop bir yapı oluşturmak mümkündür. Ayrıca, elyafların uzunluk/çap oranı arttıkça matris tarafından elyaflara iletilen yük miktarı artmaktadır.

3.2.2 Parçacıklı Kompozitler

Bir matris malzeme içinde başka bir malzemenin parçacıklar halinde bulunması ile elde edilirler. İzotrop yapılardır. Yapının mukavemeti parçacıkların sertliğine bağlıdır. En yaygın tip plastik matris içinde yer alan metal parçacıklardır. Metal parçacıklar ısıl ve elektriksel iletkenlik sağlar. Metal matris içinde seramik parçacıklar içeren yapıların, sertlikleri ve sıcaklık dayanımları yüksektir.

3.2.3 Tabakalı Kompozitler

Tabakalı kompozit yapı, en eski ve en yaygın kullanım alanına sahip olan tiptir. Farklı elyaf yönlenmelerine sahip tabakaların bileşimi ile yüksek mukavemet değerleri elde edilir. Metallere göre hafif ve aynı zamanda mukavemetli olmaları nedeniyle tercih edilen malzemelerdir. Uçak yapılarında yaygın bir kullanım alanı olan sandviç yapılar da tabakalı kompozit malzeme örneğidirler. Sandviç yapılar, yük taşımayarak sadece izolasyon özelliğine sahip olan düşük yoğunluklu bir çekirdek malzemenin alt ve üst yüzeylerine mukavemetli levhaların yapıştırılması ile elde edilirler.

3.2.4 Karma (Hibrid) Kompozitler

Aynı kompozit yapıda iki yada daha fazla elyaf çeşidinin bulunduğu yapılardır. Örneğin, kevlar ucuz ve tok bir elyaftır ancak basma mukavemeti düşüktür. Grafit ise düşük tokluğa sahip, pahalı ancak iyi basma mukavemeti olan bir elyaftır. Bu iki elyafın kompozit yapısında hibrid kompozitin tokluğu grafit kompozitden iyi, maliyeti düşük ve basma mukavemetide kevlar elyaflı kompozitden daha yüksek olmaktadır [26].

3.3 Kompozit Malzemelerin Bileşenleri

Lif takviyeli kompozit malzemelerin en önemli elemanları, takviyelendirme görevi yapan lifler ve bu lifleri bir arada tutan matristir. Bunların yanında kompozit içerisinde bağlama, kaplama ve dolgu elemanları da bulunmaktadır. Bağlama ve kaplama elemanlarının görevi liflerin ıslanmalarını ve lif-matris arasındaki yapışmayı artırmaktır. Dolgu elemanları ise bazı polimer matrislerle kullanılarak maliyeti düşürmek ve boyutsal stabilizeyi artırmak amacıyla kullanılır [27].

3.3.1 Matris Malzemeler

Kompozit yapılarda matrisin üç temel fonksiyonu vardır. Bunlar, elyafları bir arada tutmak, yükü elyaflara dağıtmak ve elyafları çevresel etkilerden korumaktır. İdeal bir matris malzemesi başlangıçta düşük viskoziteli bir yapıda iken daha sonra elyafları sağlam ve uygun bir şekilde çevreleyebilecek katı forma kolaylıkla geçebilmelidir [26].

Diğer taraftan, matris malzemesinin seçiminde, yüzeysel kayma gerilmesi, basma mukavemeti, kopma, yorulma ve darbe mukavemeti gibi mekanik özeliklerinde dikkate alınması bir zorunluluktur. Aynı zamanda matris malzemelerinin yeterli yüzeysel kayma katılığı sağlayabilmek için yüksek kayma modülüne sahip olması gerekir.

Matris malzeme seçiminde dikkat edilmesi gereken diğer bir hususta, matrisin su ve nem alma özelliğidir. Matrisin su alması demek hidrostatik genleşme demektir ki, buda iç gerilmelere neden olur. Böylece, lifler matris malzemeden ayrılırlar ve kompozit malzeme performansı azalabilir. Matris malzemesinin viskozite, erime noktası, yoğunluk, katılaşma süresi gibi özellikleri, lif takviyeli kompozit malzemelerin fiziksel özellikleri üzerinde etkilidir [27].

3.3.2 Takviye Elemanları

Lif takviyeli kompozit malzemelerde, temel eleman liflerdir. Kompozit yapı içerisinde, en büyük hacimsel orana sahiptirler ve yapıya uygulanan yükün büyük bir bölümünü de lifler karşılarlar. Lif seçimi, lif hacimsel oranı ve lif oryantasyonu kompozit yapının performansı açısından çok önemlidir.

Kompozit malzemelerde kullanılan elyafların fiziksel biçimleri, oluşturulan yeni malzemenin özellikleri üzerinde çok önemli bir faktördür. Takviyeler temel olarak 3 farklı biçimde bulunmaktadırlar; parçacıklar, süreksiz ve sürekli elyaflar.

Parçacık genelde küresel bir biçimde olmamasına rağmen her yönde yaklaşık olarak eşit boyutlardadır. Çakıl, mikro balonlar ve reçine tozu parçacık takviyelerine örnekler arasında sayılabilir.

Takviye malzemelerinin bir boyutu diğer boyutlarına göre daha fazla olduğunda elyaflardan bahsetmeye baslarız. Süreksiz elyaflar birkaç milimetreden birkaç santimetreye kadar değişen ölçülerde olabilmektedir.

Sürekli elyaflar ise tel sarma yöntemi gibi yöntemlerde kesilmeden ip seklinde kullanılmaktadır. Elyaflar en yüksek mekanik özelliklerini enlerinden daha çok boylarına gösteririler. Bu özellikler kompozit malzemelerin metallerde rastlanmayan aşırı anizotropik malzeme özelliği göstermelerine neden olur. Bu nedenle tasarım aşamasında elyafların reçine içindeki yerleşimleri ve geometrilerini göz önünde bulundurmak çok önemlidir.

Bazı durumlarda malzemenin dayanımı artırmak, tüm yönlerde eşit mukavemet elde etmek için elyaflar kumaş olarak dokunurlar.

Cam elyafının günümüzde en çok kullanılan ve geçerli takviye malzemesi olmasına rağmen gelişmiş kompozit malzemelerde genellikle saf karbon elyafı kullanılmaktadır. Karbon elyafı cam elyafına oranla daha güçlü ve hafif olmasına rağmen üretim maliyeti daha fazladır. Karbon elyafından daha güçlü ve aynı zamanda daha pahalı olan ise bor elyafıdır.

Polimerler matris olarak kullanılmalarının yanı sıra kompozitler için elyaf üretilmesinde de kullanılmaktadır. Kompozit malzemeye çok yüksek düzeyde sağlamlık katan ve sertlik kazandıran Kevlar (Aramid) bir polimer elyafıdır. Hafiflik ve güvenilir konstrüksiyon amaçlanan ürünlerdeki kompozit malzemelerde aramid kullanılır [27].

3.3.3 İnhibitörler

Bu gruptaki katkılar, polyester reçinelerin kullanımından önce polimerize olmasını önlemek amacı ile polyesterin reaktivitesini yavaşlatmak için kullanılır. İnhibitör, genellikle reçineye oranla milyonda bir mertebesinde kullanılır ve reçinenin sertleşmesini tamamen engellememesi için çok dikkatli bir şekilde dengelenmelidir.

3.3.4 Promotörler (Hızlandırıcılar)

Bu katkı maddeleri katalizör ile reaksiyona girerek, polimerizasyon reaksiyonunu hızlandırırlar. İnhibitörler reçineye belirli bir raf ömrü kazandırırken, promotörler (hızlandırıcılar), katalizörün ilave edilmesinden itibaren sertleşmeyi çabuklaştırır. Promotör (hızlandırıcı) ve inhibitör arasındaki denge çok hassastır ve herhangi bir katkının fazla konması dengeyi altüst edebilir.

3.3.5 Katalizörler

Katalizör (daha doğru deyişle başlatıcı/sertleştirici), kimyasal reaksiyonun bir parçası olmamakla beraber prosesin başlaması için gerekli enerjiyi sağlar.

Katalizörün ilave edilmesi ile promotör ve inhibitör arasındaki denge bozulur ve reaksiyon mertebesinin kontrolü katalizöre geçer. Katalizör oksijeni serbest bırakır (veya serbest radikalli moleküller oluşturur) ve polimerizasyon prosesi için yakıt gibi görülebilir. Yüksek sertleştirici oranı hızlı jel süresi verir [28].

3.3.6 Kalıp Ayırıcı

Kalıbın yüzeyine uygulandıktan sonra kalıp ile ürün arasında bariyer oluşturarak alınacak ürünün kalıba bağlanmasını-yapışmasını engelleyen vaks veya polimer esaslı madde.

3.3.7 Jelkot

Özel amaçlı polyester reçinesi esaslı, üstün özelliklere sahip, renkli veya şeffaf üst katmanı oluşturan maddedir. Jelkot kompozit ürünlerin en önemli bileşenidir. Jelkot kompozitin yüzeyinde bir kalkan olarak, ürünü sert kimyasallardan, hava koşullarından ve aşınmaya karşı korur. Ayrıca herhangi bir ürünün veya bir bölümün görünür yüzü olduğu için kozmetik açıdan önem taşımaktadır.

3.4 Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri

3.4.1 El Yatırma (Hand Lay Up)

Dokuma veya kırpılmış elyaflarla hazırlanmış olan takviye elemanlarını kalıp üzerine elle yatırılarak üzerine 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. Elle yatırma yoğun işçilik gerektirmesine rağmen düşük sayıdaki üretimler için çok uygundur.

3.4.2 Püskürtme (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 kırpılma işlemi tabanca üzerinde

bulunan ve bağımsız çalışan bir kırpıcı sayesinde yapılır. Püskürtülme işlemi sonrası yüzeyin bir rulo ile düzeltilmesiyle ürün hazırlanmış olur.

3.4.3 Elyaf Sarma

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. Yeterli sayıda elyaf katının sarılmasından sonra ürün sertleşir. Ardından döner kalıp ayrılır. Bu yöntemle yapılan ürünler genellikle silindirik, borular, araba şaftları, yat direkleri, dairesel basınç tanklarıdır.

3.4.4 Profil Çekme / Pultrüzyon (Pultrusion)

Pultrüzyon işlemi sürekli sabit kesitli kompozit profil ürünlerin üretilebildiği düşük maliyetli seri üretim yöntemidir. Pull ve Extrusion kelimelerinden türetilmiştir. Sisteme beslenen sürekli takviye malzemesi reçine banyosundan geçirildikten sonra 120-150 ºC'ye ısıtılmış şekillendirme kalıbından geçilerek sertleşmesi sağlanır. Sürekli elyaf kullanılmasından dolayı takviye yönünde çok yüksek mekanik mukavemet elde edilir. Enine yükleri karşılayabilmek için özel dokumalar kullanmak gerekmektedir.

3.4.5 Hazır Kalıplama (Compression Molding SMC, BMC)

Hazır kalıplama bünyesinde cam elyafı, reçine, katkı ve dolgu malzemeleri içeren kalıplamaya hazır, hazır kalıplama bileşimleri olarak adlandırılan kompozit malzemelerin (SMC,BMC) sıcak pres kalıplarla ürüne dönüştürülmesidir. Karmaşık şekillerin üretilebilmesi, metal parçaların bünye içine gömülebilmesi, farklı cidar kalınlıkları gibi avantajları bulunmaktadır. Ayrıca ürünün iki yüzüde kalıp ile şekillenmektedir. Diğer kompozit malzeme üretim tekniklerinin olanak vermediği delik gibi komplike şekiller elde edilebilmektedir. Kalıpları diğer üretim yöntemi

kalıplardan daha maliyetli olup, büyük parçaların üretimi için büyük ve pahalı preslere ihtiyaç vardır.

3.4.6 Hazır Kalıplama Pestili (Sheet Moulding Composites, SMC)

SMC takviye malzemesi olarak kırpılmış lif ile dolgu malzemesi içeren bir reçinenin önceden birleştirilmesi ile oluşan pestil biçiminde malzemedir. Sürekli lifler, 25-50 mm kırpılmış olarak ve kompozitin toplam ağırlığının %25-30 oranında kullanılır. Genellikle 1m genişliğinde ve 3mm. kalınlığında üretilir.

3.4.7 Hazır Kalıplama Hamuru (Bulk Moulding Composites, BMC)

BMC takviye malzemesi olarak kırpılmış lif ve dolgu malzemesi içeren bir reçinenin önceden birleştirilmesi ile oluşan hamur biçiminde malzemedir. Bu yöntem RTM'ye benzer bir yöntemdir. Farklılığı reçine/elyaf karışımın kalıp dışarısında karışmış ve eritilerek basınç altında boş kalıp içine enjekte ediliyor olmasındadır. Sadece düşük viskoziteye sahip termoset reçineler bu yöntemde kullanılabilir. Diğer yöntemlere göre daha hızlıdır.

3.4.8 Vakum Torbalama (Vacuum Bagging)

Kompozit malzeme (genellikle geniş sandviç yapılar) önce bir kalıba yerleştirilir, ardından bir vakum torbası en üst katman olarak yerleştirilir. İçerideki havanın emilmesiyle vakum torbası, yatırılan malzemenin üzerine 1 atmosferlik basınç uygulayarak aşağıya çekilir. Sonraki aşamada tüm bileşim bir fırına yerleştirilerek reçinenin kür işlemi için ısıtılır [29].

3.4.9 Otoklav (Autoclave Bonding)

Bu yöntemde önce üretimi yapılacak parça için laminasyon şemasına uygun olarak tabakalama ve vakum torbalaması yapılır. Daha sonra hazırlanan malzeme bir

otoklav fırınının içine yerleştirilerek sıcaklık ve basınç altında pişme ve katılaşma gerçekleşir. Otoklav fırınları iç basıncı ve sıcaklığı kontrol edilebilir basınç kaplar şeklinde dizayn edilirler. Otoklav içindeki basınç iki şekilde oluşturulabilir:

a. Vakumlu torbalamada olduğu gibi torbalanmış malzemeye iç vakum uygulanarak.

b. Otoklav içinde dış basınç oluşturarak.

Dış basınç oluşturmak için tankın içine dışarıdan hava veya azot gazı basılır. Böylece hem iç basınç hem de dış basınç oluşturarak istenen basınç değerleri oluşturulabilir [30].

3.4.10 Reçine Transfer Kalıplama (Resin Transfer Molding, RTM)

Bu kompozit üretim yönteminde iki parçalı kalıp kullanmak gereklidir. Takviye malzemesi kuru olarak keçe, kumaş veya ikisinin kombinasyonu kullanılır. Kalıp kapalı olduğu için gözeneksiz bir ürün elde edilebilir. Bu yöntemle karmaşık parçalar üretilebilir [29].

Şekil 3.1'de şematik olarak gösterildiği üzere, RTM yönteminde beş ana adım bulunmaktadır:

1. Dokuma rulolarından kesilerek hazırlanan katmanlar üst üste konur.

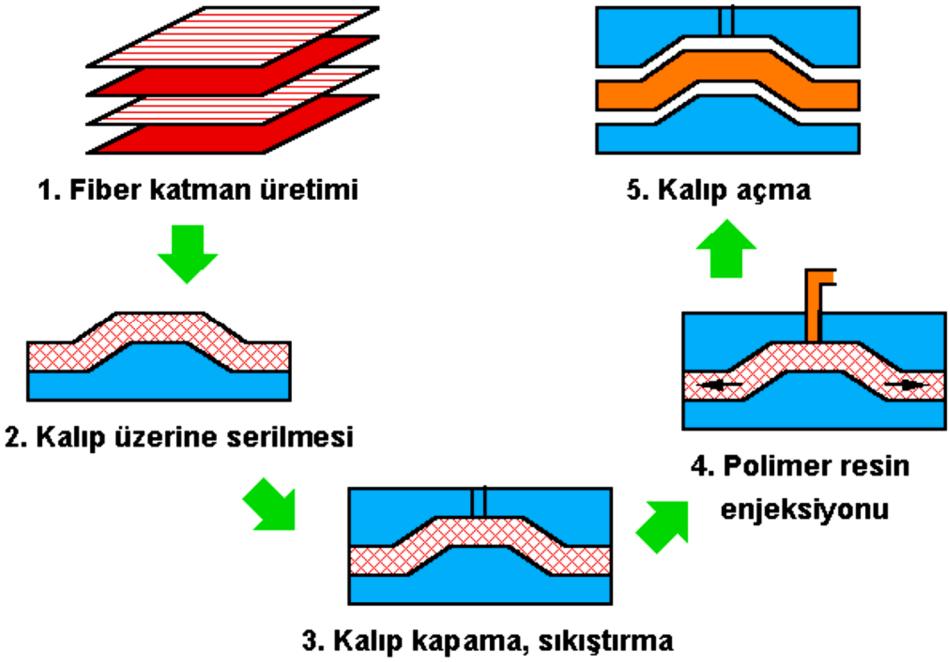
2. Hazırlanan dokuma katmanları, kalıbın alt parçası üzerine serilir.

3. Kalıp kapatılır ve dokuma sıkışır.

4. Enjeksiyon makinesiyle sabit basınçta veya sabit akış debisinde termoset polimer enjekte edilir. Polimer, kalıp içerisindeki elyafların arasından ilerlerken, kalıp içerisindeki havayı ventilasyon tüplerinden dışarı atar. Kalıp tamamen doldurulduktan sonra, polimerin kür olup sertleşmesi için beklenilir.

5. Kalıp açılarak kompozit parça dışarı çıkartılır.

Üretim süresini düşürmek amacıyla, polimer enjeksiyonunun en kısa sürede yapılması, kaliteyi arttırmak için de kalıbın tamamen doldurulması hedeflenmelidir. Tamamen doldurulamamış bir kalıp istenmeyen bir durumdur ve bu üretim yöntemindeki en büyük sorundur. Bunun sonucunda, elyaflar dış etkenlere karsı korumasız olacak ve ayrıca malzemenin mukavemeti düşük olacaktır.



Şekil 3.1: Reçine Transfer Kalıplama (RTM) ile kompozit parça üretim yöntemindeki adımlar [8].

Kalıp içerisine daha önceden yerleştirilmiş, süngerimsi ve geçirgen bir yapıya sahip olan dokuma katmanlarının arasından, polimer ilerlerken, dokuma polimerin akışına direnç gösterir. Polimer direnci düşük olan daha az sıkıştırılmış bölgelerden veya istenmeksizin yaratılan hava kanallarından öncelikle akacaktır. Polimer kalıptaki bütün ventilasyon noktalarına ulaştığında, eğer kalıp içerisinde hala ulaşamadığı kuru kalmış bölgeler varsa, buradaki hava sıkışacak ve enjeksiyona bir süre daha devam edilse bile kompozit parçanın içinde hapis olacak ve bu bölgedeki elyaflar kuru kalacaktır [8].

3.5 RTM'de Ürün Kalitesine Etki Eden Faktörler

3.5.1 Fiber Oranı

Fiber hacim oranı yüksek performanslı kompozitlerin mekanik gücünü etkileyen en önemli faktörlerden biridir. Kompozit malzeme içerisindeki fiber oranının artması ile kompozit malzemenin mekanik özellikleri artarken, daha fazla reçine malzemenin mekanik özelliklerinin zayıflamasına neden olmaktadır. Ancak daha fazla elyaf RTM işleminde reçine akış viskozitesinin azalmasına neden olabilir.

3.5.2 Enjeksiyon Basıncı

Enjeksiyon basıncı, fiberlerin oluşturduğu gözenekli ortamdaki reçinenin kalıbın içine akmasına ve boşluğu doldurmasına yardımcı olan pozitif basınçtır. Enjeksiyon basıncı reçinenin akış hızını ve bu şekilde, kalıp dolum süresini belirler. Reçine enjeksiyon basıncı; reçine viskozitesi, kalıp boyutu, gözenekli ortamın geçirgenliği ve reçinenin sertleşme kinetiklerine bağlıdır.

3.5.3 Enjeksiyon ve Havalandırma Yollukları

Kalıp içine enjekte edilen reçinenin ilerlemesi ve fiberlerin iyi ıslanması için içerideki havanın dışarı atılması gerekmektedir. Kalıp içindeki havanın dışarı atılması için açılan deliklere havalandırma yollukları denir. Kalıp içerisinde düzgün bir akış ve ıslanma için ventilasyon noktalarının yeri çok önemlidir.

3.5.4 Kalıp Sıcaklığı

Kalıp içerisindeki reçinenin kürlenmesi ve/veya kürlenmenin hızlanması için kalıbın belli bir sıcaklıkta olması gerekmektedir. Fakat kalıbın sıcaklığının artması reçinenin viskozitesinin değişmesine ve reçinenin erken jelleşmesine yol açacağından malzemenin mekanik özelliklerinde farklı etkileri olacaktır.

3.5.5 Vakum

Kalıp içerisindeki havanın yer değişimi ve reçine akışına yardımcı olmak için ventilasyon noktalarından vakum pompası ile uygulanan negatif basınçtır. Vakum aynı zamanda kalıbın hızlı dolmasına yardımcı olur. Yapılan araştırmalarda vakumun üretilen malzemedeki boşlukları azalttığı, bunun da malzemenin mekanik özelliklerinde iyileştirme sağladığı belirlenmiştir.

3.5.6 Reçine Sıcaklığı

Kalıba enjekte edilen reçinenin sıcaklığı ile viskozite değiştiğinden, buna paralel olarak fiberlerin ıslanması da değişmektedir [13].

4. VAKUM DESTEKLİ REÇİNE TRANSFER KALIPLAMA (VARTM) CİHAZI TASARIMI VE İMALATI

4.1 Giriş

Reçine transfer metodu, ıslak kalıplama ile soğuk pres yöntemi arasında bir yöntemdir. CTP ürünün her iki yüzünün de düzgün olmasını sağlar. Çift cidarlı bir kalıp içerisine cam elyafı yerleştirilir ve bir veya birkaç enjeksiyon deliğinden polyester, kalıp içine yaklaşık 1-4 atmosferlik basınçla verilir. Cam elyafının polyesterle ıslanması tamamlanınca reçine fazlası, tahliye borusundan atılır.

Bu yöntemde kullanılan cam elyafı ise ya bağlayıcısı geç çözünen keçe, devamlı elyaflı keçe ya da dokuma olmalıdır. Aksi halde enjeksiyon noktası etrafındaki cam elyafı, polyester ile birlikte sürüklenebilir.

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

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

Bu metotlarla 1 ile 4 atm arasında değişen düşük basınçlar kullanılır. Parça boyutuna ve kullanılan cam elyafı türüne bağlı olarak, 1,5 mm ile 20 mm arasında

cidar kalınlığı ile ağırlıkça %23 ile %68 arasında cam elyaf takviyesi oranı sağlanabilmektedir [17].

4.2 RTM Metodunun Avantajları

RTM metodunun en önemli avantajı kalıpların CTP ürünlerin her iki yüzünün de düzgün olarak elde edilebilmesidir. Bu avantajının yanı sıra;

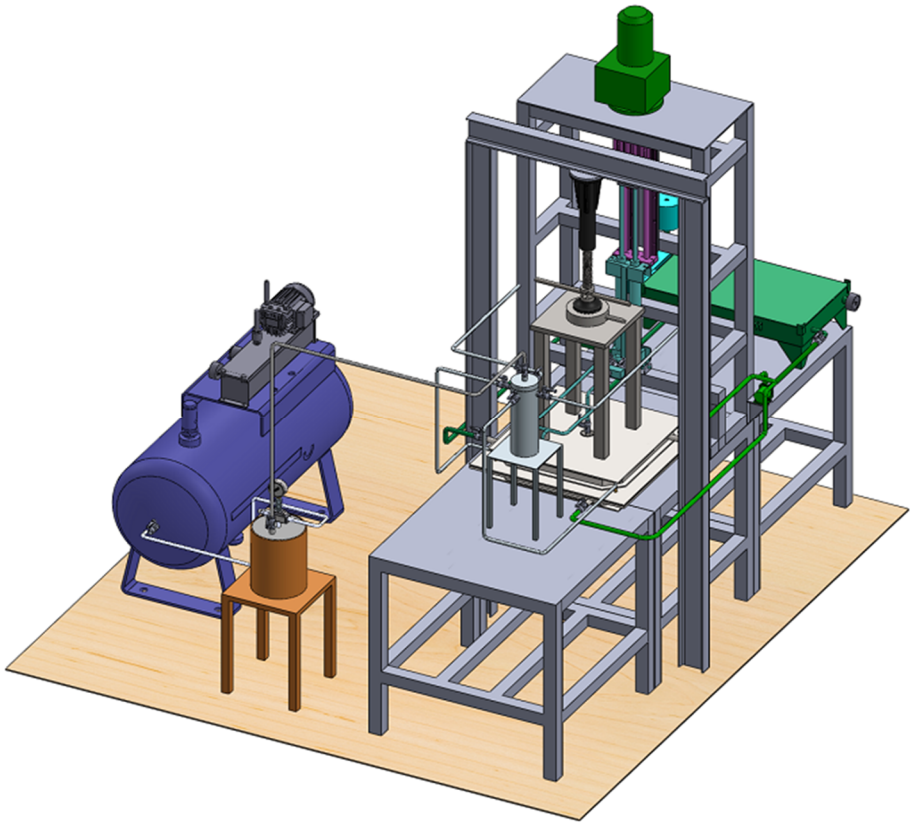
- Sabit şekil ve ağırlıkta ürün elde etme olanağı,
- Tek kalıpta üretilen ürünlerden daha kaliteli ürün elde etme olanağı,
- Takviye elemanları ve diğer parçaların tek işlemde eklenebilme olanağı,
- Kapalı kalıp kullanılması nedeni ile stiren buharlaşmasının azalması,
- Sertleşmenin ortam sıcaklığından fazla etkilenmemesi,
- Daha temiz çalışma ve az fire verme olanağı,
- İşçilik maliyetinde azalma,
- Gerek kalıp maliyeti, gerek kullanılan ekipmanın basit ve nispeten ucuz olmaları nedeniyle, ilk yatırım maliyetinin düşük olması,
- Uygun kalıp ve malzeme kullanıldığında, reçine zengin bir "A" sınıfı yüzey düzgünlüğünün sağlanabilmesi,
- Girift kalıplar içinde uygulanabilme olanağı,
- Büyük boyut ve karmaşık parçaların da kalıplanabilmesi,
- Ürünün kalıplanması sırasında, değişik bölgelerde farklı mekanik dayanım sağlamak amacıyla, farklı nitelikte, miktarda ve farklı yönlendirilmiş takviye elemanı kullanılabilmesi,
- Cam elyafı takviyesinin kalıp içinde sabit kalması sayesinde, kompozit içindeki dağılımın optimum olması,
- Kalıplama sırasında, bölgesel olarak ve/veya parçanın tamamında reçine/cam oranının ayarlanabilmesi ve kontrol altında tutulabilmesi,
- Ürünün farklı bölgelerinde farklı cidar kalınlıkları sağlanabilmesi, ayrıca gömme parçaların kolaylıkla ürün bünyesine alınabilmesi,
- Malzeme ölçümündeki hassasiyet sayesinde, malzeme fireleri azalmakta, özellikle endüstriyel boyuttaki kalıplamalarda büyük önem taşıyan "tekrarlanabilirlik" özelliği sağlanabilmektedir.

- Egzotermik reaksiyon sonucu, polyesterin sertleşmesi sırasında oluşan ısı, aynı zamanda kalıbı da ısıtacağından, enerji tasarrufu ile kalıplama süresince avantaj sağlamaktadır.
- Uygun pompa sistemi kullanılarak, polyester reçine ile kalıplama yapılabilmektedir.
- İster reçine enjeksiyonunda olduğu gibi iki parçalı kalıpla çalışılsın, ister kalıp ve film arasında vakum uygulansın, sistem kapalı olduğu için, kullanılan polyester içindeki stiren monomeri buharlaşacak bir ortam bulamamakta, dolayısı ile açık kalıplama metotlarında olduğu gibi ortam havası stiren ile kirlenmemektedir.
- Kalıplama sırasında kullanılan reçine içine özel katkılar ve dolgular katılarak, "alev geciktiricilik", "düşük çekme" gibi özellikler CTP ürüne kazandırılabilmektedir [17].

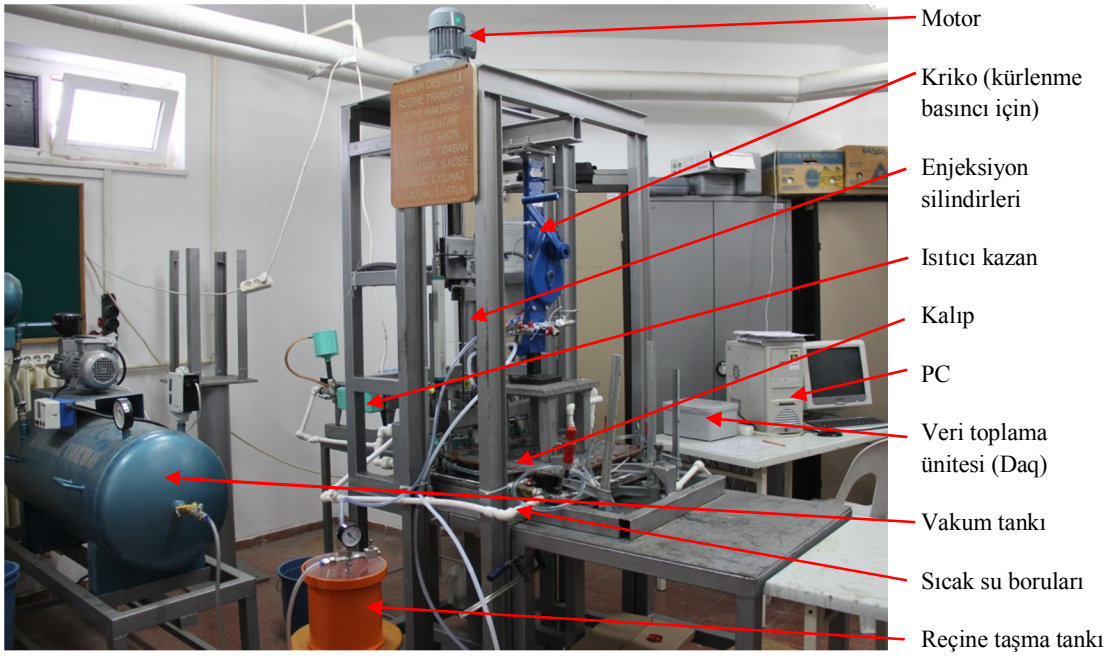
4.3 VARTM Cihazı Tasarımı ve İmalatı

Bu çalışma temelde üç kısımdan oluşmaktadır. Birincisi genel amaçlı kompozit-plaka üretimi yapacak RTM cihazını tasarlamak ve imal etmek, ikincisi imal edilen RTM cihazında farklı parametrelerde (reçine basma hızı, reçine basma basıncı, kalıp ısısı, vakum basıncı, stiren oranı, kürlenme basıncı vb.) kompozit plaka üretmek, üçüncüsü ise üretilen plakalardan elde edilecek numunelerle mekanik testler yapmaktır.

Çalışma aşamasında, kompozit plaka üretimi yapacak bir makine imalatı için Balıkesir Üniversitesi BAP birimi tarafından desteklenen bir proje gerçekleştirilmiştir. Projenin gerçekleşmesi için Edremit MYO müdürlüğü tarafından bir proje odası tahsis edilmiş, yine Edremit MYO makine atölyesi imkanları ve BAP desteği ile Kompozit-Plaka Üretim Prosesi olan Bilgisayar Kontrollü Vakum Destekli Reçine Transfer Makinesi (VARTM) tasarlanıp imal edilmiştir (Şekil 4.1).



a)



b)

Şekil 4.1: Vakum Destekli Reçine Transfer Kalıplama Cihazı ve bileşenleri, a) Montaj resmi, b) Cihaz resmi

4.3.1 Ana Gövde

Öncelikle RTM cihazının bütün ünitelerinin üzerine monte edileceği şasi imal edilmiştir (Şekil 4.2).

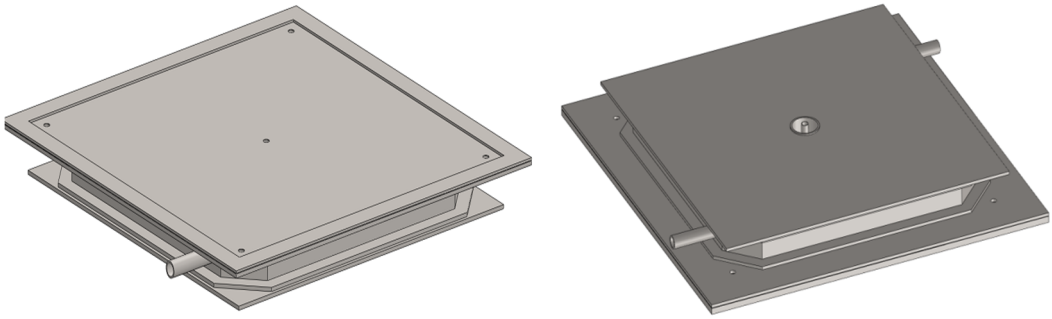
Şekil 4.2: RTM cihazı ana gövde.

4.3.2 Kalıplar

Tablo 4.1'de verilen ölçülerde alt-üst kalıp imal edilerek şasi üzerine yerleştirilmiştir (Şekil 4.3).

Tablo 4.1: Kalıp ölçüleri.

Kalıp içi eni	50	cm
Kalıp içi boyu	50	cm
Kalıp içi derinliği	0,3	cm
Kalıp alanı	2500	cm^2
Kalıp iç hacmi	750	cm^3

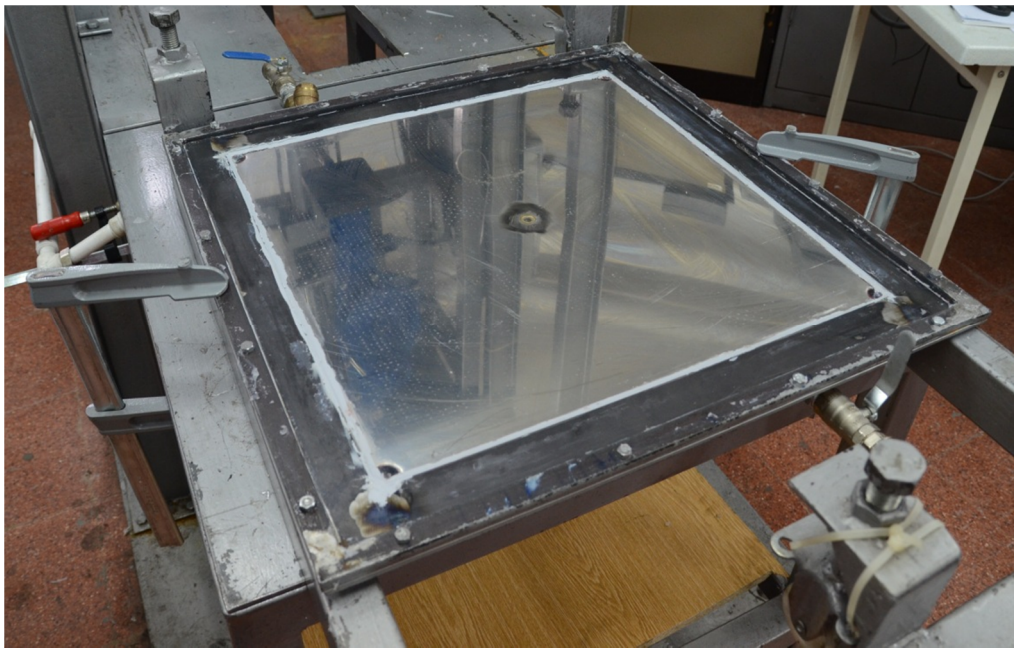


a) b)

c)

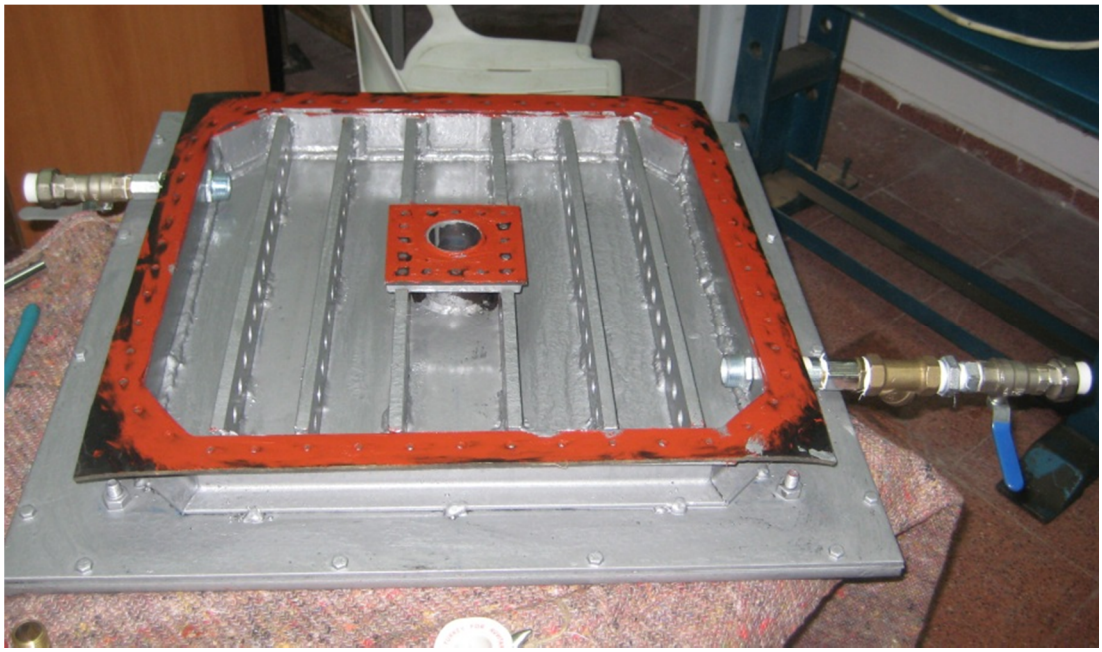
Şekil 4.3: Alt ve üst kalıp, a) Alt kalıp, b) Üst kalıp, c)Montajlanmış kalıp.

Kalıpların iç yüzeyi, sürtünmeyi azaltmak, düzgün yüzey kalitesi elde etmek ve reçinenin kalıptan kolay ayrılmasını kolaylaştırmak için paslanmaz çelik ile kaplanmıştır (Şekil 4.4).



Şekil 4.4: Alt kalıp iç görüntüsü.

Kürlenme ısısını kalıbın içine verebilmek, dolayısıyla sıcak suyun kalıbı ısıtması için, alt ve üst kalıplarda sıcak su kanalları oluşturulmuştur (Şekil 4.5).

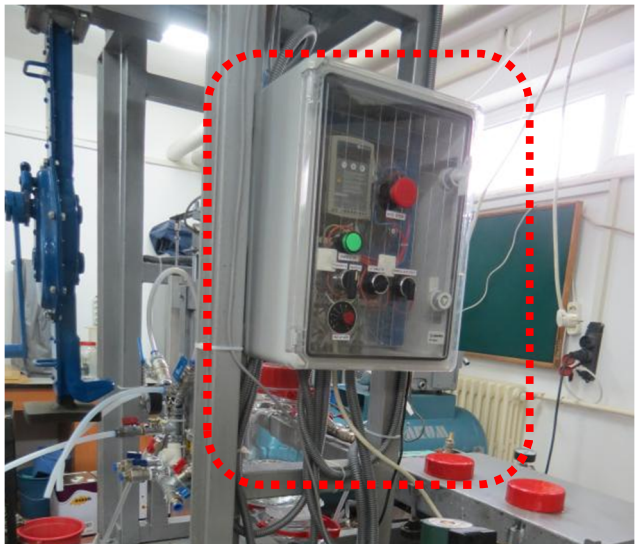


Şekil 4.5: Kalıbın ısıtılması için tasarlanan sıcak su kanalları.

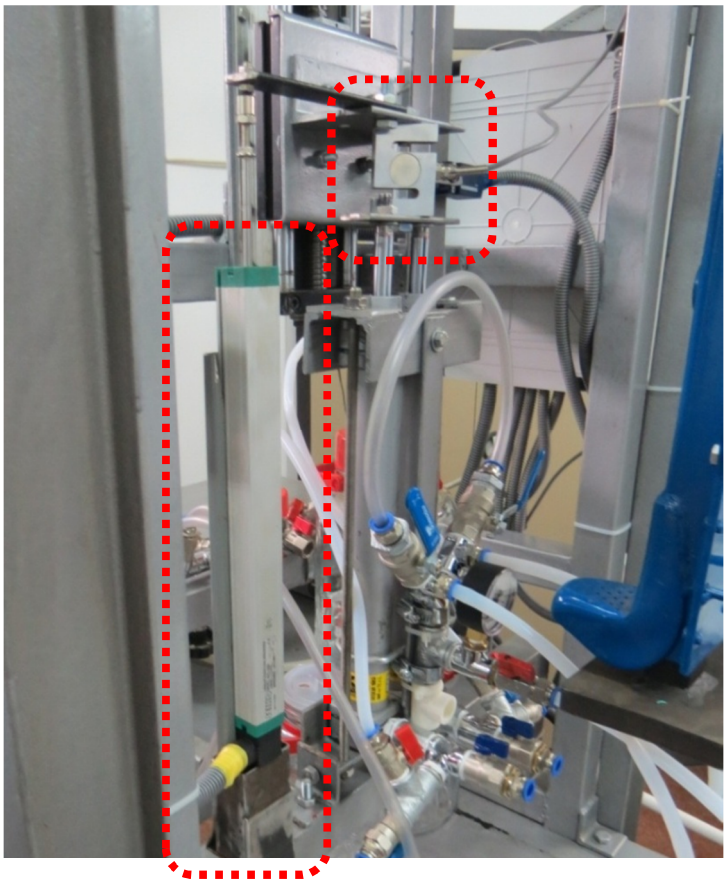
4.3.3 Elektronik Kontrol Ünitesi

Elektronik kontrol ünitesi; temel parametrelerin takibi ve kontrolünün yapıldığı programın yüklü olduğu bir bilgisayar, loadcell ve pozisyon sensöründen aldığı bilgileri bilgisayara aktaran veri toplama ünitesi (DAQ) (Şekil 4.6), kumanda kontrol panosu (Şekil 4.7), pozisyon sensörü ve hidrolik pistonlardaki yükü ölçen loadcell(Şekil 4.8) 'den oluşan birimdir. Hız ve basınç kontrolü sağlayan ve verileri toplayan bilgisayar programının ara yüzü Şekil 4.9'da görülmektedir.

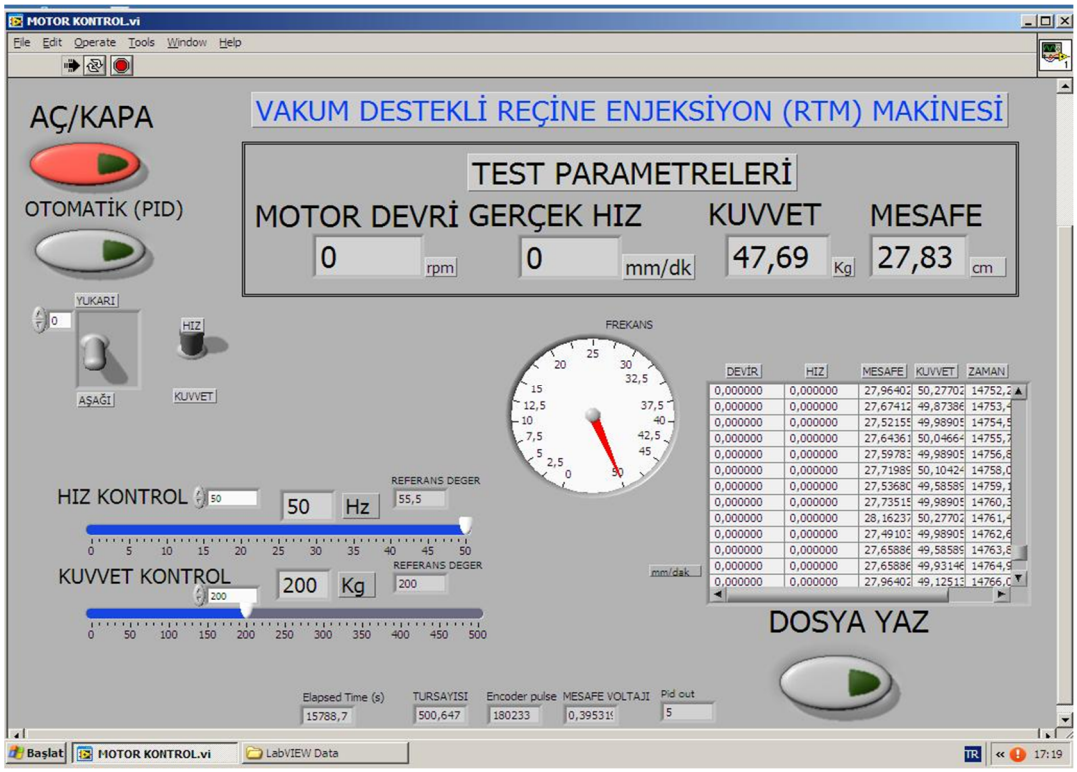
Şekil 4.6: Bilgisayar ve DAQ ünitesi.



Şekil 4.7: Kontrol panosu.



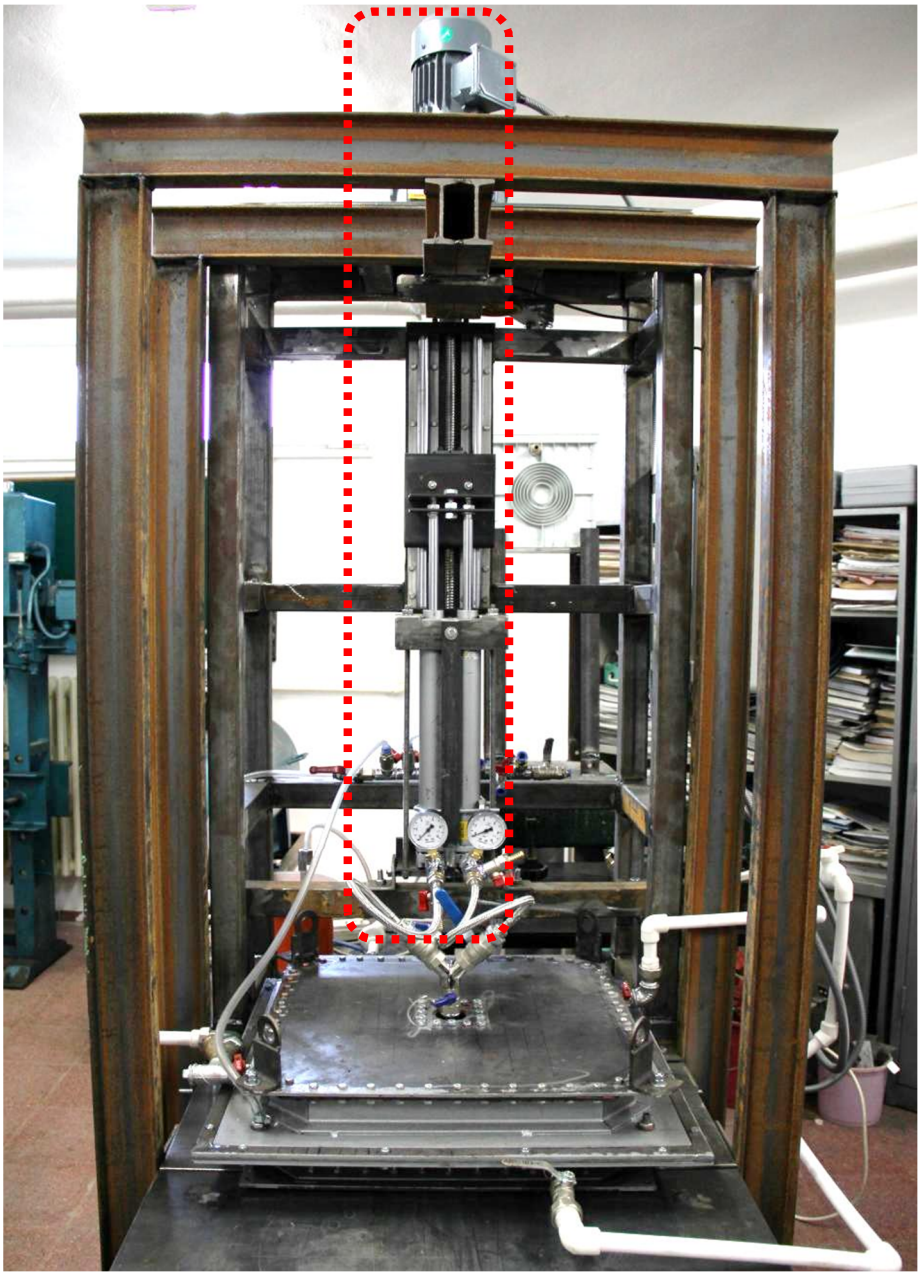
Şekil 4.8: Pozisyon sensörü ve loadcell.



Şekil 4.9: Yazılımın ara yüzü.

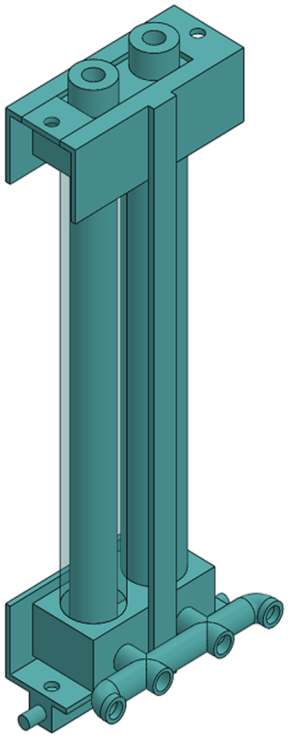
4.3.4 Reçine Basma Sistemi

Reçine basma sisteminde motor, redüktör, lineer vidalı modül, hidrolik piston, reçine enjeksiyon boruları ve bağlantı elemanlarından oluşmaktadır. Motor-redüktör grubu, frekans kontrol cihazı ile 0-50 Hz arasında kontrol edilmektedir. Redüktör 0-10 dev/dak arasında sistemi döndürmektedir. Motor-redüktör grubu tarafından tahrik edilen lineer vidalı modül 0-25 cm strok arasında düşey olarak çalışmaktadır. Lineer vidalı modül iki adet piston-silindire reçine emme ve reçine basma olarak hareket vermektedir (Şekil 4.10).

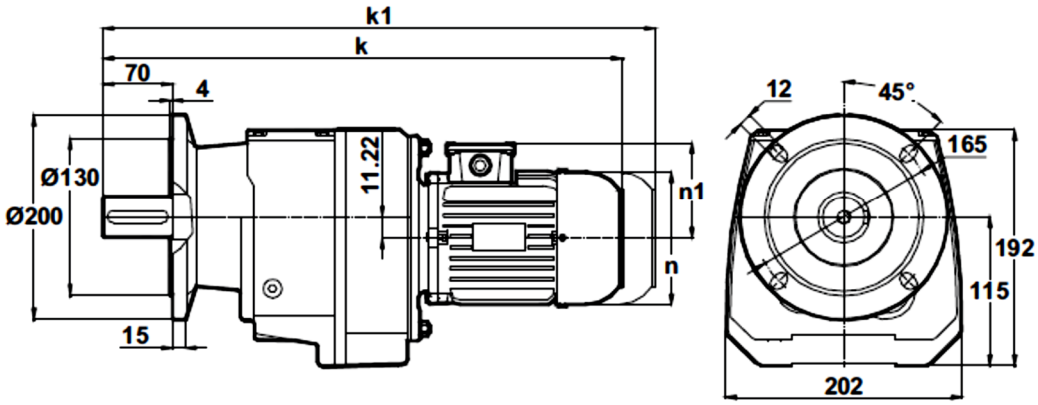


Şekil 4.10: Motor-redüktör grubu, lineer vidalı modül ve hidrolik piston.

a)



b)



c)

Şekil 4.11: Reçine basma sisteminin parçaları, a) Hidrolik piston, b) Pnömatik silindir, c) Redüktör.

Reçine enjeksiyonunda ilk tasarımda metal örgülü spiral hortum kullanılmış, daha sonra reçine akışını görebilmek için şeffaf pnömatik hortumlar kullanılmıştır. Hortumlardaki basıncı görebilmek için hidrolik piston çıkışlarına manometreler yerleştirilmiştir. Kullanılan şeffaf pnömatik hortumlar asetona karşı dayanıksız olduğu için bir kez kullanılıp atılmıştır. İlerleyen tasarımlarda ise sarf malzemeyi azaltmak ve akış hızını yükseltmek için, reçine enjeksiyonunda teflon borular kullanılmıştır.

4.3.5 Vakum Ünitesi

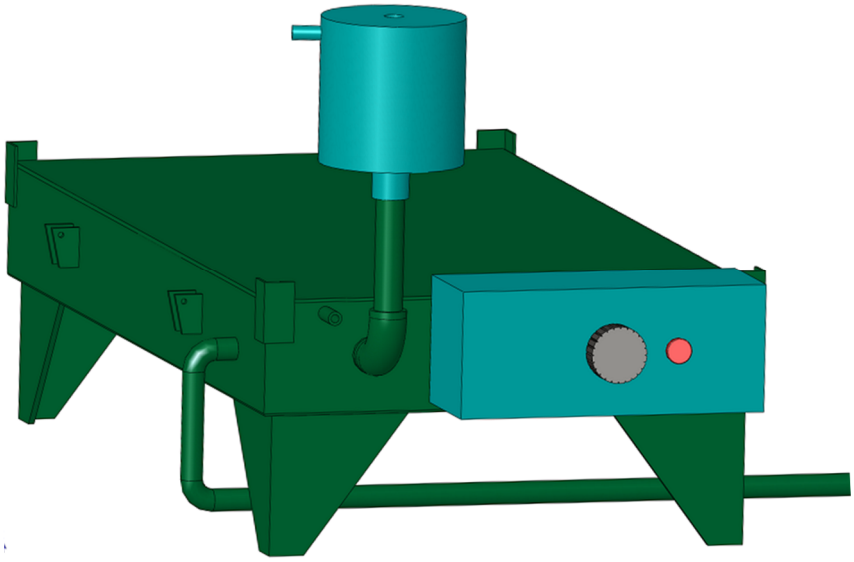
Vakum ünitesi; üretilen kompozit plakalarda mukavemeti düşüren ve çentik etkisi yapan hava boşluklarını azaltmak ve kapalı kalıp içerisindeki havayı tahliye etmek için oluşturulan, vakum pompası (Şekil 4.12), vakum taşma kabı (Şekil 4.13) ve vakum borularından oluşan gruptur.

Şekil 4.12: Vakum pompası.

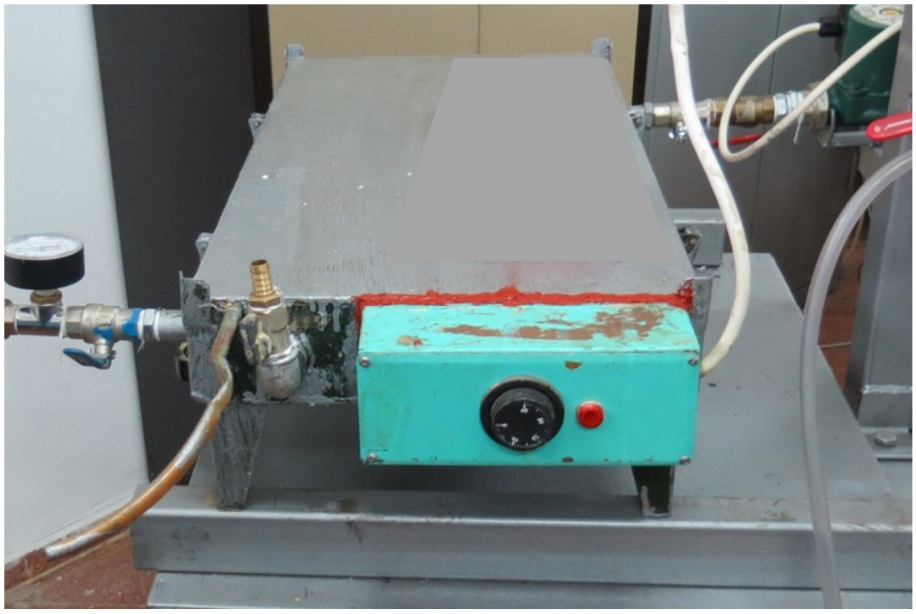
Şekil 4.13: Vakum taşma kabı.

4.3.6 Kalıp Isıtma Sistemi

Kalıp ısıtma sistemi; kalıp içerisine reçine enjeksiyonu tamamlandıktan sonra kürlenme için kalıba ısı verilmesini sağlayan gruptur. Sıcak su kazanı (Şekil 4.14), sirkülasyon pompası (Şekil 4.15) ve sıcak su borularından oluşan ısıtma sisteminde, sıcak su kazanı içerisinde ısıtılan su, sirkülasyon pompası yardımıyla kalıbın altındaki ve üstündeki su kanallarına basılarak kalıp ısıtılır.

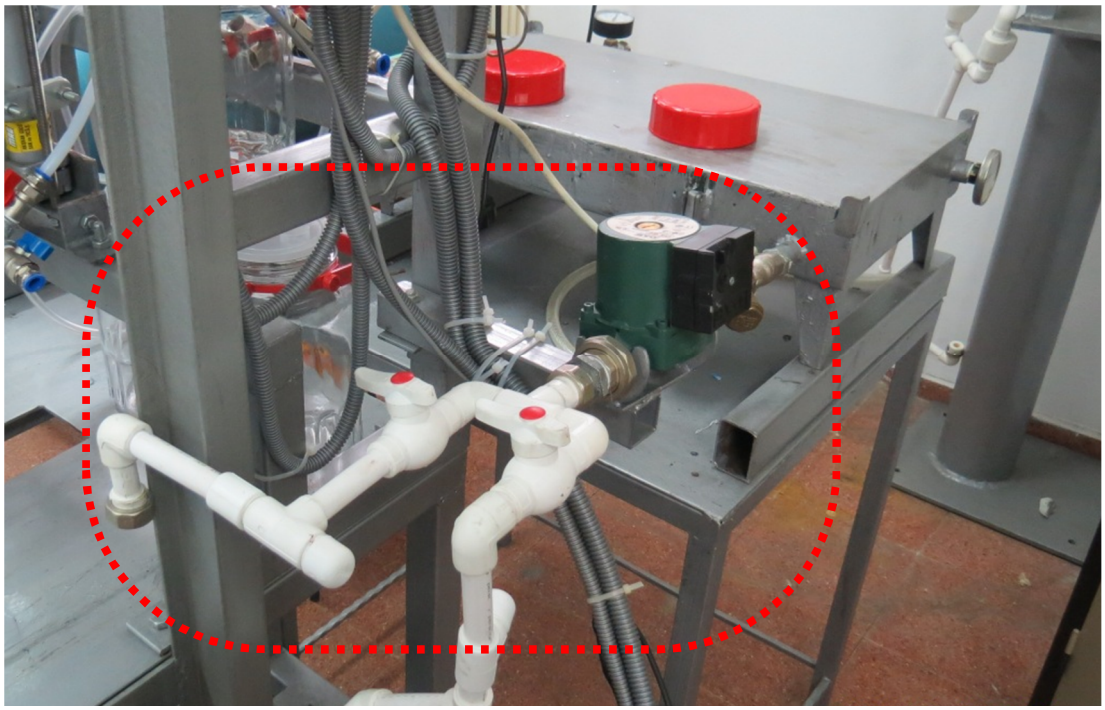


a)



b)

Şekil 4.14: Sıcak su kazanı, a) Kalıp ısıtıcı montaj resmi, b) Kalıp ısıtıcı resmi.



Şekil 4.15: Sirkülasyon pompası ve sıcak su boruları.

5. KOMPOZİT MALZEMELERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ

5.1 Giriş

Kompozit malzemeler özgül mukavemet değerlerinin metal malzemelere göre yüksek olmasından dolayı pek çok uygulama da ön planda olmuşlardır. Kompozitlerin özgül ağırlıklarının düşük oluşu hafif konstrüksiyon istenen kullanımlarda kendisine büyük bir avantaj sağlamaktadır.

Bunun yanında, fiber takviyeli kompozit malzemelerin korozyona dayanımları, ısı, ses ve elektrik izolasyonu sağlamaları da kullanım alanları için ayrı bir üstünlük vesilesidir.

Kompozitlerin çekme ve eğilme mukavemeti metalik malzemelere göre daha yüksektir. Ayrıca kalıplama özelliklerinden dolayı kompozitlere istenen yönde ve bölgede istenen mukavemet verilebilmektedir.

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.

Kompozitler, havadan, korozyondan ve çoğu kimyasal etkilerden zarar görmezler. Bu özelliklerinden dolayı kompozit malzemeler kimyasal tanklar, boru ve aspiratörler, tekne ve diğer deniz araçları yapımında güvenle kullanılmaktadır.

Isı iletim katsayısı düşük malzemelerden oluşabilen kompozitler yüksek ısı altında kullanılabilirler. Bazı özel katkı maddeleri ile kompozitlerin ısıya dayanımı arttırılabilir. Kompozit malzemeye, kalıplama esnasında ilave edilen pigmentler sayesinde malzemeye istenen renk verilebilir. Bu işlem ek bir masraf ve isçilik gerektirmez.

Bazı kompozit malzemeler yapılarında bulunan sünek matris sayesinde doğal bir titreşim sönümleme ve şok yutabilme özelliğine sahiptir.

Yükleme ve sınır koşullarına göre sınırsız çeşitlilikte kompozit malzemeler tasarlamak ve üretmek mümkündür.

Bütün bu olumlu yanların dışında kompozit malzemelerin bazı dezavantajları da vardır. Kompozit malzemelerdeki hava zerreciklerinin malzemenin yorulma özelliklerini olumsuz etkilediği görülmüştür. Kompozit malzemeler değişik doğrultularda değişik mekanik özellikler gösterirler. Aynı kompozit malzeme için çekme, basma, kesme ve eğilme mukavemet değerleri farklılıklar gösterir.

Kompozit malzemelerin delik delme, kesme türü operasyonları liflerde açılmaya neden olduğundan, bu tür malzemelerde hassas imalattan söz edilemez. Kompozitlerin özellikleri her zaman ideal değildir, kalınlık yönünde düşük dayanıklılık ve katlar arası düşük kesme mukavemetine sahiptirler.

Kompozit malzemelerde hasarın oluşması ve ilerlemesi metallerden farklıdır. Malzemeye, geometriye, tabakalarda kullanılan fiberlerin açısına ve uygulanan yükleme sekline bağlı olarak öncelikle mukavemet açısından zayıf tabakalarda matris yapısında kırılma meydana gelir. Bu durumda matris yük taşıyamaz ve tüm yük fiber malzemeye aktarılır.

Kompozit malzemeler metallere göre çok daha kırılgan bir yapıya sahiptirler. Bu özelliklerinden dolayı plastik deformasyon meydana gelmez. Dolayısıyla kompozit yapıların kırılması anlık olabilir. Metaller ise sünek yapıya sahip olduklarından, yükleme altında plastik deformasyon meydana gelebilir.

Kompozit malzemelerin anizotropik ve kırılgan olmalarından dolayı kompozit yapıların tasarımı metallerden oluşan yapıların tasarımına göre oldukça karmaşıktır ve detaylı çalışma gerektirmektedir [31]. Üretimi güç ve pahalıdır. Demir, alüminyum, bakır gibi madenlerle kıyaslandığında geri dönüşümleri sorunludur [32].

5.2 Kompozit Malzemelerin Mekanik Davranışları

Kompozit malzemeler mühendislik malzemelerinden daha farklı olan bazı karakterlere sahiptirler. Genel mühendislik malzemelerinin çoğu homojen ve izotropiktir. Buna karşın kompozit malzemeler hem heterojen hem de ortotropik veya anizotropikdir.

İzotropik malzemeler; ısıl veya mekanik yüklemelere karşı her doğrultu ve yönde aynı mekanik davranışı gösteren malzemelerdir. İçyapı dağılımı olarak homojen bir tane dağılımı gösterirler. Bütün saf metallerin yanısıra, alaşımlar izotropik malzemelerdir. Bunun yanısıra partikül takviyeli kompozitler, homojen bir dağılıma sahip ise izotropik malzeme olarak kabul edilirler [33].

Anizotropik malzemeler; ısıl veya mekanik yüklemelere karşı doğrultuya ve yöne göre farklı mekanik davranış gösteren malzemelerdir. İçyapı ve tane dağılımı olarak homojen değildirler. Fiber takviyeli kompozit malzemeler, aniztropik malzemelerin özel bir halidir. Aslında izotropik malzemeler, anizotropik malzemenin en özel halidir [34].

Ortotropik malzemeler; Birbirine dik üç düzleme göre malzeme simetrisi olan malzemelere ortogonalli anizotropik kelimelerinin kısaltılmışı olan ortotropik malzeme adı verilir.

Bir heterojen gövde; gövde üzerindeki her noktada sabit olmayan özelliklere sahiptir, yani özellikler gövde konumunun bir fonksiyonudur. Anizotropik bir gövde; gövde üzerindeki bir noktada karşılıklı üç dikey yönde (x.y.z) farklı olan malzeme özelliklerine sahiptir. Kompozit malzemeler, heterojenlikten dolayı mikromekanik ve makromekanik olmak üzere iki yönden incelenmektedir.

Mikromekanik; kompozit malzemelerde mikroskobik seviyede ölçülen malzeme özellikleri hakkında bilgi verir. Ortalaması alınamayan veya toplanamayan mukavemet, kırılma tokluğu ve yorulma ömrü gibi özelliklerin incelenmesinde önemlidir.

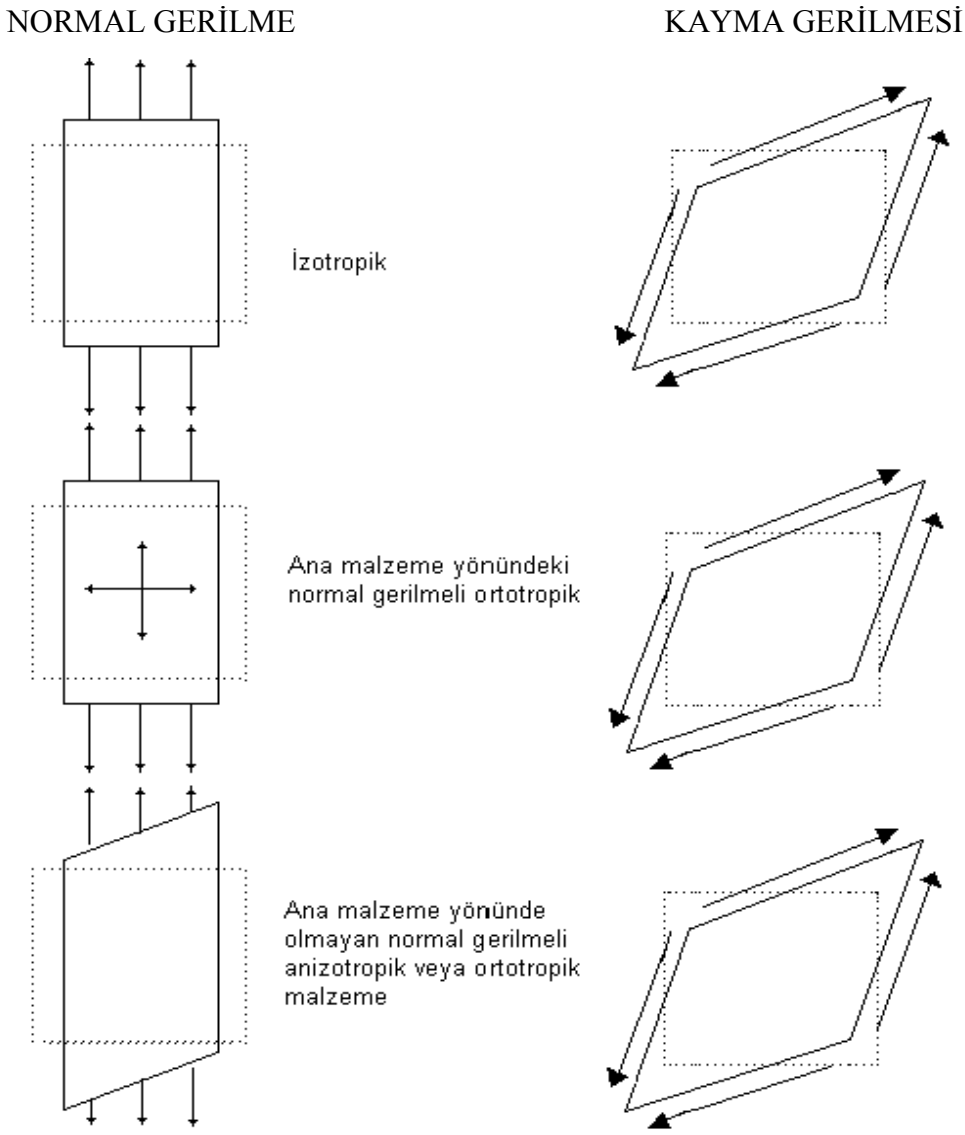
Makromekanik; tabaka seviyesinde malzeme her ne kadar anizotropik olsa da malzemeyi homojen kabul etmek ve analizde ortalama

özelliklerin kullanılmasına denir. Tek yönlü tabakayı değil de tüm tabakaların özelliklerini belirler. Tabakalandırma teorisi kullanılarak, sonlu elemanlar analizi yardımı ile her bir tabakadaki gerilme ve yapının genel davranışı analiz edilebilir ve malzemenin davranışı önceden tahmin edilip kontrol edilebilir.

İzotropik, ortotropik ve anizotropik malzemelerin davranışları, kayma gerilmesi ve normal gerilme etkisindeki yükler Şekil 5.1'de de gösterilmiştir. İzotropik malzemeler için, normal gerilme; boyda uzamaya ve ende büzülmeye sebep olur. Tek eksenli gerilme oluşacak şekilde yüklenen bir izotropik malzemede; yükleme yönünde eksenel şekil değiştirme oluşur. Kayma gerilmesi altında olan malzemede sadece kayma şekil değiştirmesi olur. Örneğin malzeme kare şeklinde ise kenar uzunlukları değişmeden eşkenar dörtgen olur.

Ortotropik bir malzeme tek eksenli bir gerilme ile yüklenirse izotropik malzemeye benzer bir şekil değiştirmeye uğrar. Malzeme kayma gerilmesi ile yüklenirse kayma şekil değiştirmesi oluşur. Kare olan malzeme kayma gerilmesi etkisi ile eşkenar dörtgen olur.

İzotropik malzemeler için, normal yükleme kayma şekil değiştirmesi oluşturmaz ve kayma yüklemesi de normal şekil değiştirme oluşturmaz. Tek eksenli yükleme altındaki ortotropik (anizotropik) bir malzeme ise eksenel şekil değiştirmeye, enine şekil değiştirmeye ve kayma şekil değiştirmesine uğrar. (Şekil 5.1) [33].



Şekil 5.1: Tabakalı kompozit malzemenin mekanik davranışı [25].

5.3 Tabakalı Kompozitlerde Çekme ve Eğilme

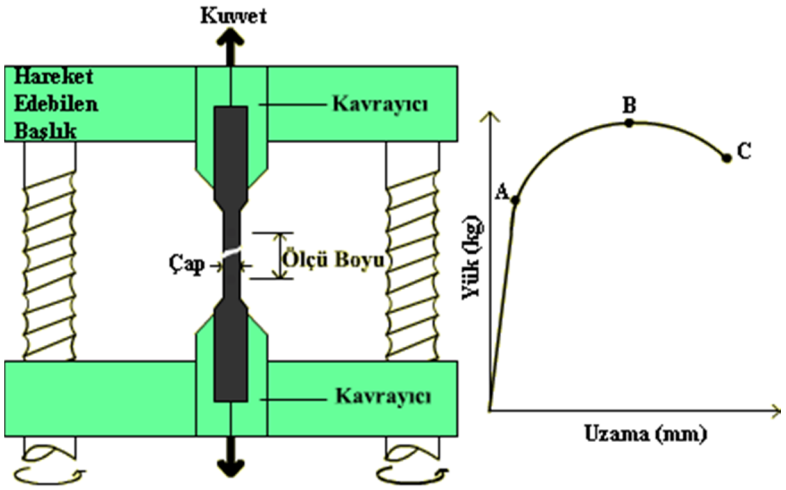
Kompozitlerin çekme deneyi tek eksenli olarak çekme dayancının saptanması amacıyla yapılır. Matris termoset plastik olduğundan gevrek tutum gösterir. E-camı fiberler zaten doğal olarak gevrek malzeme olduğundan kırılma gevrek kırılma biçiminde oluşur. Bu nedenle kopma uzamasından söz etmek anlamsız olur [35].

5.4 Mekanik Testler

5.4.1 Çekme Testi

Bu test malzemelerin yük altında dayanım değerlerini bulmak ve mekanik özelliklerini tespit etmek amacıyla yapılır. Önceden çekme deneyine tabi tutulacak numuneler standarda uygun olarak hazırlanır. Hazırlanan numuneler düşük bir hızda çekme işlemine tabi tutulur. Malzemeye hareketli bir kafa ile tek yönlü yük uygulanır. Deney genellikle, test numunesi kopuncaya kadar devam eder [36].

Çekme deneyi sonucu yük(kg)-uzama(mm) eğrisi elde edilir. Fakat bu değerler, kullanılan numunenin boyutlarına göre farklılık gösterdiğinden mühendislik açısından anlamlı değerler değildir. Bu yüzden yük, numune alanına bölünerek gerilme (σ) ve uzama, ilk boya bölünerek gerilme bir diğer deyişle birim şekil değiştirme (ε) değerleri kullanılmalıdır. Gerilme-gerinim eğrisi mühendislik açısından önem taşır, plastik davranışın başladığını belirtir. Mühendislik dizaynı ve hesaplarında kullanılır. Genellikle sünek malzemelerin adlandırılmasında kullanılır. [35].



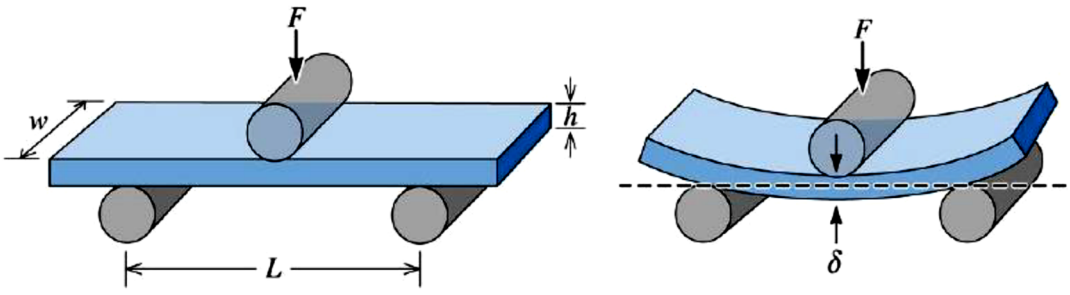
Şekil 5.2: Çekme testi cihazı ve çekme eğrisi [27].

Çekme deneyi sonucunda çıkan bu eğriden şu sonuçlar elde edilir.

Elastisite modülü (E)	$E = \sigma/\varepsilon$	(5.1)
Akma mukavemeti (σ_{ak})	$\sigma_{ak} = F_{ak} / A_0$	(5.2)
Çekme Mukavemeti ($\sigma_{çek}$)	$\sigma_{çek} = F_{çek} / A_0$	(5.3)
Rezilyans (U_R)	$U_R = \sigma^2_{ak} / 2E$	(5.4)
Kopma mukavemeti	$\sigma_{kop} = F_{kop} / A_0$	(5.5)
% uzama miktarı (% ε)	$\% \varepsilon = \Delta L / L_0 .100$	(5.6)

5.4.2 Üç Noktadan Eğilme Testi

Eğilme deneyinde malzemenin statik veya yavaş uygulanan yüke gösterdiği direnç ölçülür. Üç noktadan eğilme testinde önce numune hazırlanır. Malzeme iki ucundan desteklenir ve ardından numunenin orta kısmına yük uygulanır (Şekil 5.3). Eğilme testi ile özellikle gevrek malzemelerin kırılması için gerekli gerilim, eğilme miktarı, eğme mukavemeti ve elastisite modülü bulunur [35].



a) b)

Şekil 5.3: Üç noktadan eğilme testi, a) Uygulanan yük, b) Defleksiyon (δ) [27].

Maksimum eğilme momenti (M)	$M = F.L/4$	(5.7)
Gerilme (σ)	$\sigma = 3.F.L/2.w.h^2$	(5.8)

6. DENEYSEL ÇALIŞMA

6.1 Çalışmanın Amacı

Bu çalışmanın (projenin) amacı; genel amaçlı kompozit-plaka üretimi yapmak ve üretim prosesindeki parametrelerin mekanik özelliklere etkisini araştırmaktır. Ayrıca, vakum destekli RTM yöntemi ile elde edilen kompozitlerin tam ıslanması için gerekli optimum parametreleri elde etmektir. Bu prosesde ;

- Reçine basma hızı kontrolü (ortalama/maksimum hız) (mm/dak)
- Reçine basma kuvveti (basıncı) kontrolü (ortalama basınç, maksimum basınç) (Bar)
- Reçine basma debisi (mm^3/dak)
- Reçinenin kalıba giriş hızı (mm/dak)
- Toplam enjeksiyon süresi (dak.)
- Enjeksiyon esnasında kalıp üst baskı kuvveti (kuvvet var ve değeri / kuvvet yok) (N)
- Enjeksiyon sonrası kürlenme basıncı kontrolü (basınç var ve değeri / basınç yok) (N)
- Reçine sirkülasyonu sayısı (1 / 2 / 2,5 / 3)
- Kalıp sıcaklığı kontrolü (30-100 ºC)
- Vakum basıncı kontrolü (mmHg)
- Vakum sıralaması (ilk enjeksiyon öncesi / sonrası / vakum yok) (mmHg)
- Vakumlama noktaları sayısı (4 / 8 noktadan vakum / vakum yok)
- Enjeksiyon noktaları sayısı (tek veya çift noktadan enjeksiyon)
- Stiren monomeri yüzdesi (%0-7)
- Reçine karışımı (ayrı/bütün) (ml)

gibi parametreler kontrol edilebilmektedir.

6.2 Test Numunelerinin İmalatı

Kompozit plaka üretimi, imal edilen RTM cihazında, Edremit MYO müdürlüğü tarafından tahsis edilen proje odasında gerçekleştirilmiş olup, farklı üretim parametrelerinde toplam 10 adet plaka üretilmiştir.

6.2.1 Kompozit Plaka Üretiminde Kullanılan Malzemeler

Test numunelerinin imalatında, üretim parametrelerinin alt başlıklarından olan elyaf ve reçine miktarları ile reçine karışım oranlarını bilgileri Tablo 6.1'de verilmiş olup, detay bilgiler ilerleyen başlıklarda açıklanacaktır.

Tablo 6.1: İmal edilen test numunelerindeki elyaf ve reçine miktarları ile reçine karışım oranları.

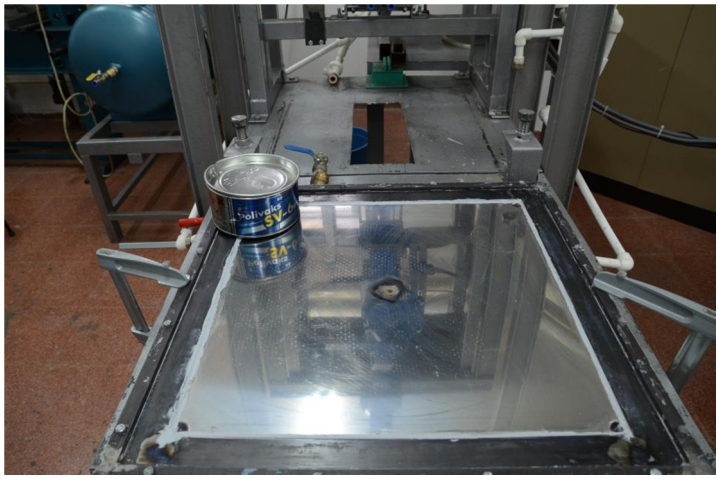
	A	B	C	D	E	F	G	H	J	K
Fiber Açısı (derece)	0/90	0/90	0/90	0/90	0/90	0/90	0/90	0/90	0/90	0/90
Kalıp Hacmi (cm3)	750	750	750	750	750	750	750	750	750	750
Fiber Ağırlığı (gr)	750	750	750	750	750	750	750	750	750	750
Fiber Hacmi (cm3)	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300
Toplam Fiber Yüzdesi (Teorik)(%)	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40
Top. Karışım Hacmi (cm3)	4300	1290	1290	1290	1505	1290	1490	1344	1000	1250
Top. Kull. Polyester Hacmi (cm3)	4000	1200	1200	1200	1400	1200	1400	1250	1000	1250
Top. Kull. Stren Hacmi (cm3)	300	90	90	90	105	90	90	94	0	0
Stren Yüzdesi (%)	7	7	7	7	7	7	6	7	0	0
Cobalt Hacmi (cm3)	2	0,66	0,66	0,66	0,77	0,66	0,66	1,38	0,55	0,69
Cobalt Yüzdesi (%)	0,047	0,051	0,051	0,051	0,051	0,051	0,044	0,102	0,055	0,055
MEK Peroksit Hacmi (cm3)	7,5	2,4	2,4	2,4	2,8	2,4	2,4	5	2	2,5
MEK Peroksit Yüzdesi (%)	0,174	0,186	0,186	0,186	0,186	0,186	0,161	0,372	0,200	0,200

6.2.2 Kalıbın Hazırlanması

Öncelikle kalıp reçine enjeksiyonuna hazır hale getirilmiştir. Bunun için;

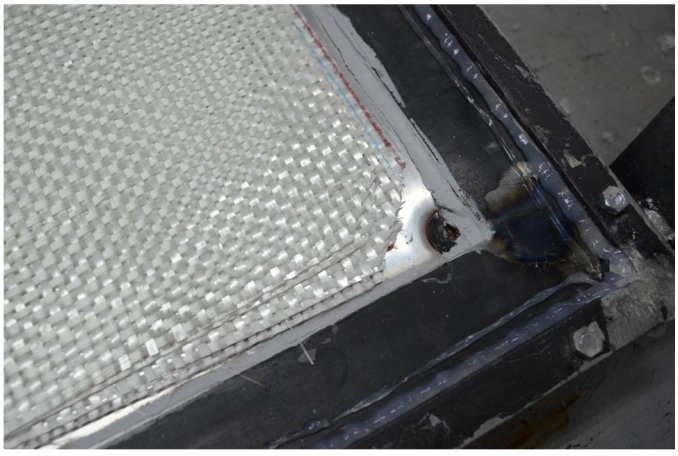
a. Paslanmaz çelik ile kaplanmış kalıbın iç yüzeyleri asetonla temizlenmiştir.

b. Düzgün bir yüzey elde etmek ve plakanın kalıptan kolay ayrılması için kalıbın iç yüzeylerine kalıp ayırıcı sürülmüştür. 3-4 dakikalık kurumanın ardından kalıp ayırıcı sürülmüş yüzey, temiz bir bez ile parlatılmıştır (Şekil 6.1). Bu işlem için Poliya Polivaks SV-6 kalıp ayırıcı kullanılmıştır.



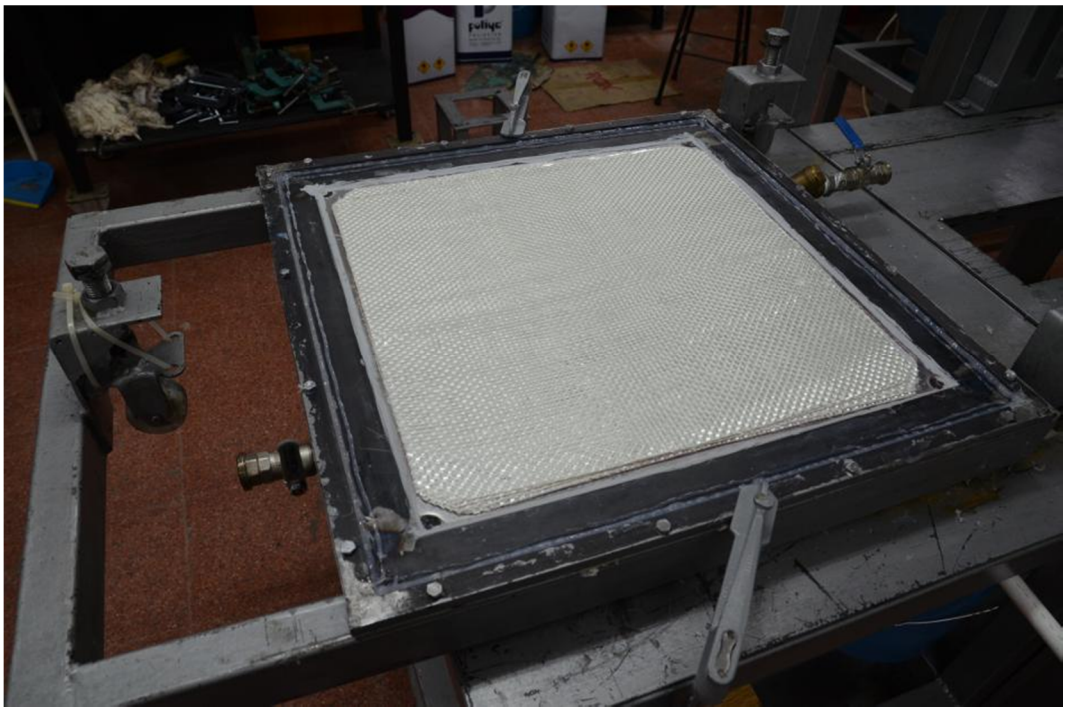
Şekil 6.1: Kalıp ayırıcı sürülmüş yüzey.

c. Enjeksiyon esnasında reçinenin kalıbın dışına çıkmasını engellemek, yani kalıp sızdırmazlığı için şeffaf silikon kullanılmıştır. Alt kalıba şeffaf silikon sürülerek 20-30 dakika kurumaya bırakılmıştır (Şekil 6.2).



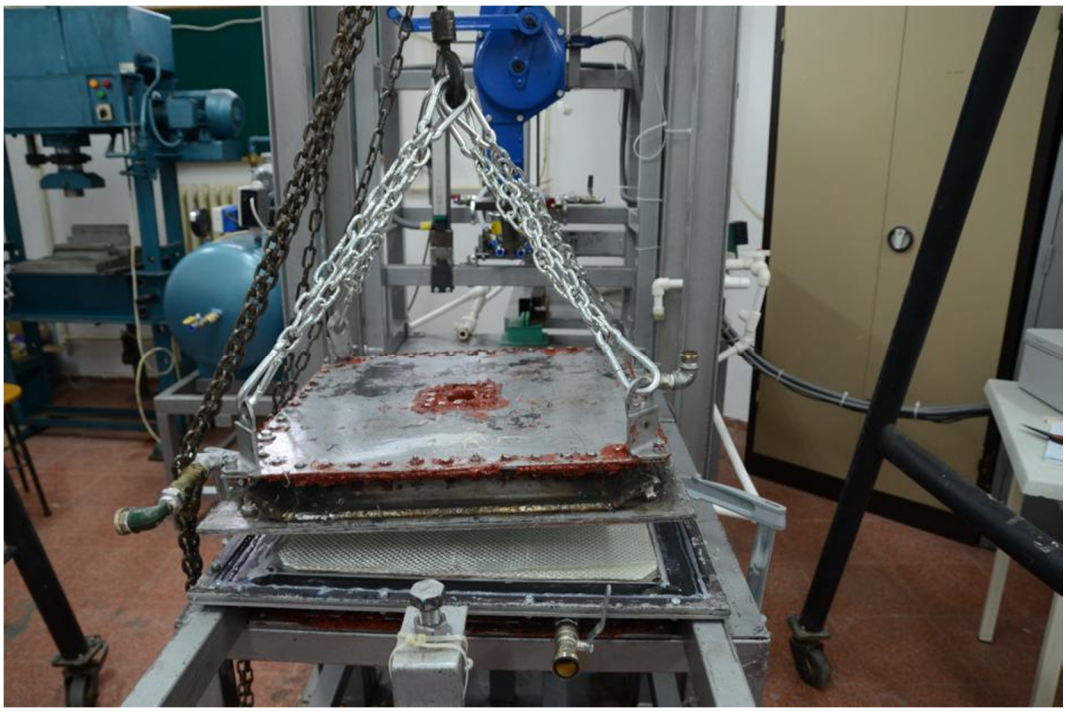
Şekil 6.2: Kalıplar arası sızdırmazlık işlemi.

d. 48X48 cm boyutlarında kesilen, 500 gr/m^2'lik 6 kat cam elyaf dokuma, $0/90^0$ 'lik açılarda kalıbın içine yerleştirilmiştir (Şekil 6.3).



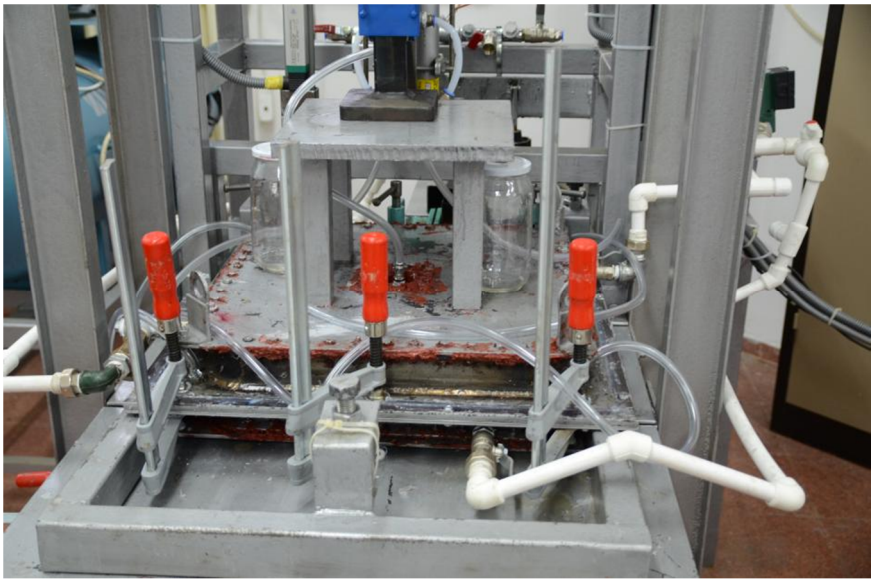
Şekil 6.3: Cam elyaf dokumaların kalıp içine yerleştirilmesi.

e. Silikonun kurumasının ardından üst kalıp kapatılmıştır (Şekil 6.4).



Şekil 6.4: Kalıbın kapatılması.

f. Kalıp kenarları emniyetli bir şekilde sıkılmış, kalıbın dışındaki birleşim noktalarına sızdırmazlık için şeffaf silikon sürülmüş ve 40-50 dakika kurumaya bırakılmıştır (Şekil 6.5).



Şekil 6.5: Kalıbın sıkıştırılması ve sızdırmazlık.

Zaman içerisinde karşılaşılan sorunlar ile cihazda güncellemeler yapılmıştır. İlk dört kompozit plaka üretiminde yalnızca üst kalıptan enjeksiyon yapıldığı için alt kalıpta vana kullanılmamıştır. Beşince plakadan itibaren alt ve üst kalıptan aynı anda enjeksiyon yapılmıştır. Enjeksiyon sonrası reçinenin kalıp dışına akmasını önlemek için, alt kalıpta öncelikle kullanım kolaylığı açısından mini küresel vana kullanılmıştır. Ancak mini küresel vana tekrarlı kullanıma çok uygun olmaması nedeniyle altıncı plakadan itibaren tamamı metalden üretilmiş, asetona dayanıklı ½" şiber vana kullanılmıştır (Tablo 6.2).

Tablo 6.2: Kalıp teknik özellikleri.

	A	B	C	D	E	F	G	H	J	K
Üst Kalıp Giriş Çapı (mm)	11,8	11,8	11,8	11,8	11,8	11,8	11,8	11,8	11,8	11,8
Alt Kalıp Giriş Çapı (mm)	yok	yok	yok	yok	11,8	11,8	11,8	11,8	11,8	11,8
Üst Kalıp Vanası	1/2" küresel	yok boru atıldı	yok boru atıldı	yok boru atıldı	yok boru atıldı	1/2" Şiber	1/2" Şiber	1/2" Şiber	1/2" Şiber	1/2" Şiber
Alt Kalıp Vanası	yok	yok	yok	yok	yok boru atıldı	1/2" Şiber	1/2" Şiber	1/2" Şiber	1/2" Şiber	1/2" Şiber

6.2.3 Reçinenin Hazırlanması

Kalıbın kapatılmasının ardından yapılması gerekli işlem reçine karışımının hazırlanmasıdır. İşlemler esnasında Polipol 336 polyester reçine kullanılmış olup, özellikleri Tablo 6.3'de verilmiştir.

Tablo 6.3: Poliya Polipol 336 RTM tipi reçinenin özellikleri [37], a) Reçine jelleşme süresi, b) Reçinenin sıvı haldeki mekanik özellikleri, c) Sertleşmiş reçinenin özellikleri, d) Sertleşmiş reçinenin mekanik özellikleri

a)

Sıcaklık ºC	**% MEK-P (Butanox M 60) Oranı**		
	1% MEK-P	**1,50% MEK-P**	**2% MEK-P**
10 ºC	19'	17'	13'
15 ºC	16'	12'	11'
20 ºC	11'	9'	7'
25 ºC	8'	7'	6'
30 ºC	6'	5'	4'

b)

Test	**Metot**		**Değer**
Renk	ISO 2221	-	max. 200 Hazen
Yoğunluk	ISO 1675	± %5	1094 gr/cm^3
Kırılma İndisi	ISO 0489	± %5	1,532
Asit Değeri	ISO 2114	± %10	20 mg KOH/gr
Viskozite Brookfield	ISO 2555	± %20	300 cp
Tiksotropi	-	± %30	N/A
Jel Süresi	ISO 2535	± %40	14'(*)
Monomer Oranı	-	± %10	39%
Parlama Noktası	Abel-Pernsky	-	34 ^{0}C
Raf Ömrü	-	-	6 ay

(*)(23 °C de, % 1 ml % 1 lik Co, % 1 ml Mek-p (Butanox M 60) ile ölçülmüştür)

c)

TEST	**Metot**		**Değer**
Yük Altında Eğilme Sıcaklığı (HDT)	ISO 0075-A ISO 0075-B	±%10	77 °C 91 °C
Su Absorbsiyonu	ISO 0062	±%10	%0,185
Barkol Sertliği (Barcol 934-1)	ASTM-D 2583	±%10	44
Toplam Hacimsel Çekme	ISO 3521	±%10	%9,04

d)

Test	Metot		Saf Reçine Değeri
Eğilme Dayanımı	ISO 0178	±%10	113 MPa
Elastiklik Modülü	ISO 0178	±%10	3110 MPa
Kopmadaki Uzama	ISO 0178	±%10	%4,3
Çekme Dayanımı	ISO 0527	±%10	64 MPa
Elastiklik Modülü	ISO 0527	±%10	2801 MPa
Kopmadaki Uzama	ISO 0527	±%10	%2,8
Izod Darbe Dayanımı	ISO 0180	±%10	9 kj/m^2

Yapılan ilk beş çalışmada (A,B,C,D,E) iki farklı reçine karışımı oluşturulmuştur. %7 stiren monomeri katılan reçine eşit iki kaba ayrılmıştır. Birinci kaptaki reçineye Cobalt, ikinci kaptaki reçineye MEK Peroksit karıştırılmıştır. Kürlenme başlamaması için Cobalt ve MEK-P içeren reçineler kalıbın girişinde statik mikserde karıştırılmıştır.

Yapılan diğer çalışmalarda (F,G,H,J,K) ise Reçine, Stiren monomeri, Cobalt ve MEK-P hepsi bir kapta karıştırılmıştır (Tablo 6.6).

Tablo 6.4: Reçine karışım oranları.

	A	B	C	D	E	F	G	H	J	K
Max. Vakum (mmHg)	580	700	700	700	700	700	700	700	700	YOK
Reçine Karışımı	AYRI	AYRI	AYRI	AYRI	AYRI	BÜTÜN	BÜTÜN	BÜTÜN	BÜTÜN	BÜTÜN
Reçine Hacmi (cm3)	485	485	485	485	485	485	474	485	474	474
Reçine Cobalt'lı (ml)	2000	600	600	600	700	1200	1400	1250	1000	1250
Reçine MEKP'li (ml)	2000	600	600	600	700					
Stiren (ml)	150	45	45	45	52,5	90	90	94	0	0
Stiren (%)	7	7	7	7	7	7	6	7	0	0
Cobalt (ml)	2	0,66	0,66	0,66	0,77	0,66	0,66	1,375	0,55	0,55
Cobalt (%)	0,047%	0,051%	0,051%	0,051%	0,051%	0,051%	0,044%	0,102%	0,055%	0,055%
MEKP (ml)	7,5	2,4	2,4	2,4	2,8	2,4	2,4	5	2	2,5
MEKP (%)	0,174%	0,186%	0,186%	0,186%	0,186%	0,186%	0,161%	0,372%	0,200%	0,200%

Hazırlanan karışım hidrolik pistonlara emdirilmiş, ardından da pistonların içindeki reçine kalıbın içine enjekte edilmiştir.

6.2.4 Reçine Enjeksiyonu

RTM yöntemiyle yüksek elyaf hacim oranına sahip kompozitler imal edilebilmektedir. Bu sistemde reçine, düşük yoğunlukta ve basınç altında elyafın bulunduğu kapalı kalıp bölgesine transfer edilmektedir.

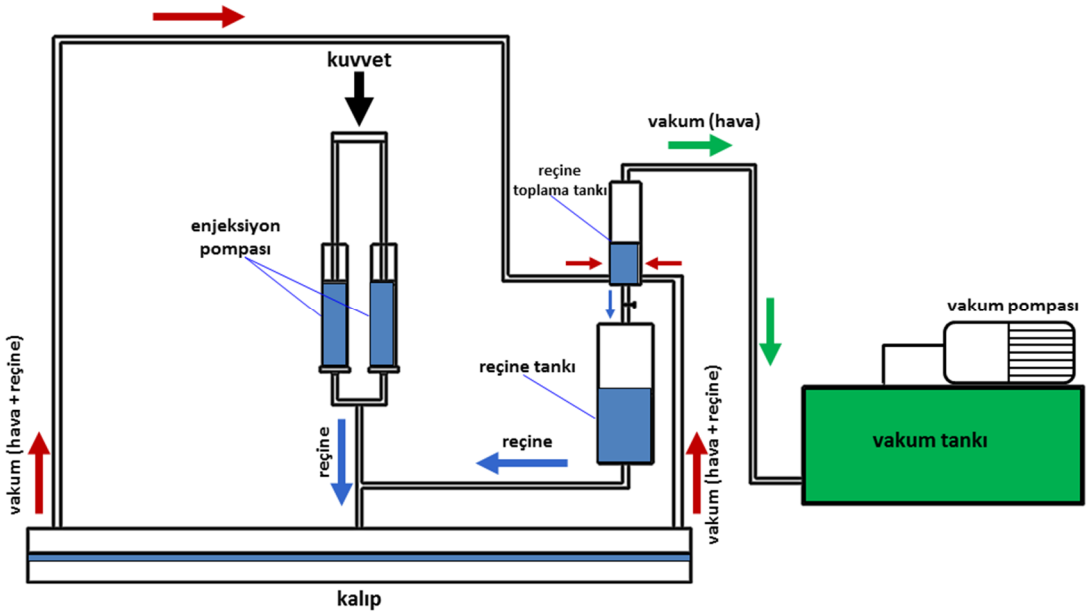
Tasarlanan elektronik kontrollü RTM cihazında birçok parametrenin kontrolü esas alınmış ve zaman içerisinde yapılan güncellemelerle cihazın işlerliği, üretim kolaylığı ve malzeme kalitesinin artışı hedeflenmiştir. Plaka üretiminde genellikle hız kontrollü ve vakum destekli enjeksiyon tercih edilmiştir. Üretilen ilk dört (A,B,C,D) plakada sadece üst kalıptan reçine enjeksiyonu yapılmış ve üst kalıbın köşelerindeki dört noktadan vakum uygulanmıştır. Beşinci plaka da ise alt ve üst kalıptan aynı anda reçine enjeksiyonu ile alt ve üst kalıptaki sekiz noktadan vakum uygulanmıştır. Yapılan kontrollerde, alt ve üst kalıptan aynı anda reçine enjeksiyonun kalıp içerisindeki akışa olumlu katkı yaptığı ve ıslanmanın iyileştiği gözlenirken sekiz noktadan enjeksiyona ihtiyaç olmadığı tespit edilmiştir. Bu tespitler neticesinde, son dört plaka üretiminde alt ve üst kalıptan aynı anda enjeksiyon yapılırken, yalnızca üst kalıptaki dört noktadan vakum uygulanmıştır.

Reçine enjeksiyonunda ilk beş (A,B,C,D,E) tasarımda reçine akışını görebilmek için şeffaf pnömatik hortumlar kullanılmıştır. Kullanılan şeffaf pnömatik hortumlar asetona karşı dayanıksız olduğu için bir kez kullanılıp atılmıştır. İlerleyen tasarımlarda ise sarf malzemeyi azaltmak ve akış hızını yükseltmek için, reçine enjeksiyonunda teflon borular kullanılmıştır. Teflon boruların kullanımı reçine basma hızını artırırken, sistemde oluşan basınç azalmıştır (Tablo 6.4).

Bu çalışmada kalıp içindeki cam dokumaların iyi ıslanabilmesi için, ilave olarak Şekil 6.6'da görülen çoklu sirkülasyon sistemi tasarlanmıştır. Bu sistemde kalıp içine reçine enjeksiyonu yapıldıktan sonra, kalıptan dışarı çıkan reçine toplama tankına gelir ve sisteme tekrar enjekte edilir. 1-3 kez tekrarlanan bu işleme "tekrarlı enjeksiyon sistemi" adı verilmiştir.

Tablo 6.5: Reçine enjeksiyon parametreleri.

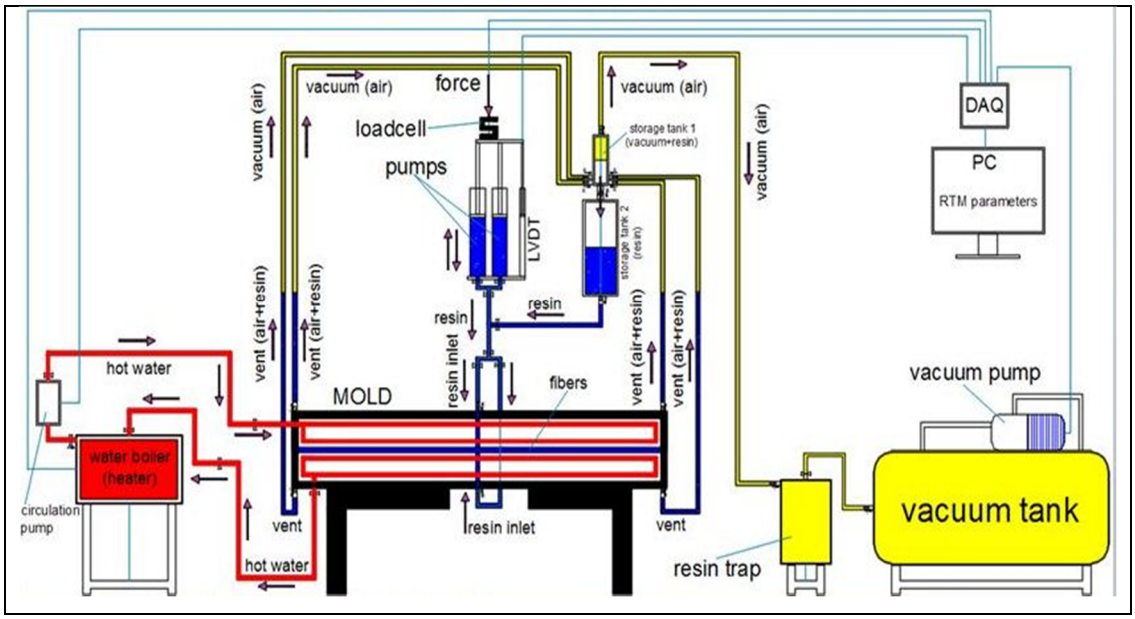
	A	B	C	D	E	F	G	H	J	K
Test Yöntem (kont.)	Hız	Yük	Hız	Hız	Hız	Hız+Yük	Hız	Hız	Hız	Hız
Yöntem (enj. nok.) (vakum nok.)	1 enj. + 4 vak.	1 enj. + 4 vak.	1 enj. + 4 vak.	1 enj. + 4 vak.	2 enj. + 8 vak.	2 enj. + 4 vak.	2 enj + 4 vak.	2 enj. + 4 vak.	2 enj. + 4 vak.	2 enj. + 4 vak.
Max. Vakum (mmHg)	580	700	700	700	700	700	700	700	700	yok
Vakum Sırası	ilk enj. öncesi	ilk enj. öncesi	ilk enj. öncesi	ilk enj. öncesi	ilk enj. öncesi	ilk enj. öncesi	ilk enj. sonrası	ilk enj. sonrası	ilk enj. öncesi	yok
Reçine Sirkilasyon Sayısı	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2,5
Basma Hortumu	Şeffaf 7x12	Şeffaf 7x12	Şeffaf 7x12	Şeffaf 7x12	Şeffaf 7x12	Pnömatik 6.5x10	Teflon 10x12	Teflon 10x12	Teflon 10x13	Teflon 10x14
Enjeksiyon Süresi (dak)	74	60	225	130	175	225	54	55	90	36
Ortalama Kuvvet (kg)	250	200	196	192	193	159	113	159	131	138
Max. Kuvvet (kg)	324,37	220,12	290,16	373,38	291,77	373,09	131,89	202,56	236,19	226,06
Ortalama Basınç (Bar)	5,50	5,08	4,90	4,76	4,83	3,46	1,67	3,47	2,39	2,64
Max.Basınç (Bar)	8,21	5,86	8,59	11,84	8,66	11,83	2,42	5,17	6,49	6,09
Ortalama Basma Hızı (mm/dak)	8,75	12,90	2,60	7,59	2,78	4,60	10,87	15,68	44,73	36,12
Basma Debisi mm^3/dak	21991	32421	6535	19076	6987	11561	27319	39408	112420	90779
Kalıba Giriş Hızı (mm/dak)	201	296	60	174	32	53	125	180	514	415



Şekil 6.6: Tekrarlı enjeksiyon sistemi şematik gösterimi.

6.2.4.1 Tekrarlı Enjeksiyon (Sirkülasyon) Yöntemi

Şekil 6.7'de şematik gösterimi sunulan RTM makinesi kalıbının dört köşesindeki sekiz noktadan vakum ve kalıbın alt-üst orta noktalarından reçine enjeksiyonu yapılabilmektedir. Burada amaç reçinenin kalıbın her bölgesine homojen dağılmasını sağlamak ve kalıp içerisinde sıkışan hava boşluğunu minimuma indirmektir. Kalıp içerisindeki sıkı fiberler arasında yüksek basınçla ilerleyen reçine, kalıp içerisinde makro ve mikro seviyede hava boşluklarının oluşmasına sebep olur. Oluşan hava boşluklarını azaltmak ve enjeksiyonu kolaylaştırmak için reçine enjeksiyonu esnasında kalıp içerisine vakum uygulanmıştır. Kalıp içerisindeki hava boşluklarının tahliye edilmesi için birden fazla (2-3 kez) reçine sirkülasyonu yapıldığında, hava boşluklarının kalıp içinden atıldığı ve cam-dokumaların daha iyi ıslandığı gözlenmiştir.



Şekil 6.7: RTM makinesi şematik gösterimi.

Sirkülasyon yöntemi işlem basamakları şu şekilde gerçekleştirilmiştir:

a. Kalıp içerisine cam elyaf dokumalar yerleştirilmiş, kalıbın sızdırmazlığı sağlanarak kalıp kapatılmıştır. Kalıbın köşelerindeki 4 veya 8 noktadan vakum uygulanarak tamamen doluncaya kadar reçine enjekte edilmiştir.

b. 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.

c. 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.

d. Reçine toplama tankında toplanan reçine emilerek çekilmiş ve tekrar kalıp içerisine enjekte edilmiştir. Kalıptan yükselmeye devam eden reçineler 1. reçine toplama tankına toplanmıştır.

e. Kalıptan çıkan vakum borularından hava çıkışı kesilinceye kadar bu çevrime devam edilmiştir. Bu çalışmada 2-3 çevrim sonrasında daimi akış (hava kabarcıksız reçine akışı) gözlenmiş ve sirkülasyon işlemi sonlandırılmıştır.

6.2.5 Kürlenme

Likit fazdaki bir malzemenin geriye dönülmeyecek şekilde katı veya yarı katı faza geçme durumuna kürlenme denir. Kürlenmeyi hızlandırmak ve proses sonu ürün kalitesini artırmak için basınç ve/veya sıcaklıktan yararlanılabilir. Malzemenin mekanik özellikleri kürlenme basıncı ve kürlenme sıcaklığından etkilenir.

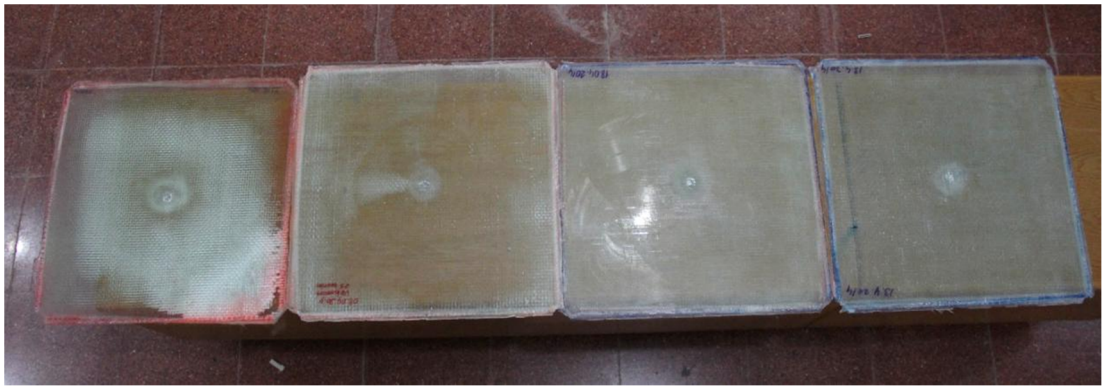
Üretilen kompozit plakalarda, enjeksiyon işlemi tamamlandıktan sonra kürlenme için iki yöntem bir arada kullanılmıştır. Öncelikle üst kalıp üzerine 5 tonluk mekanik kriko ile kürlenme basıncı uygulanmıştır. Kürlenme basıncı verildikten sonra ise, sıcak su kazanı devreye sokulmuş ve pano üzerinden sirkülasyon pompası çalıştırılarak alt-üst kalıbı homojen ısıtmak için sıcak su sirküle edilmiştir. Kalıplar bu yöntemle ısıtılarak, kalıp içindeki reçinenin 24-48 saatlik zaman aralığında kürlenmesi sağlanmıştır. Kürlenme parametreleri için uygulanan kalıp sıcaklığı ve kalıpta kalma süreleri Tablo 6.5'de verilmiştir.

Tablo 6.6: Reçine kürlenme parametreleri.

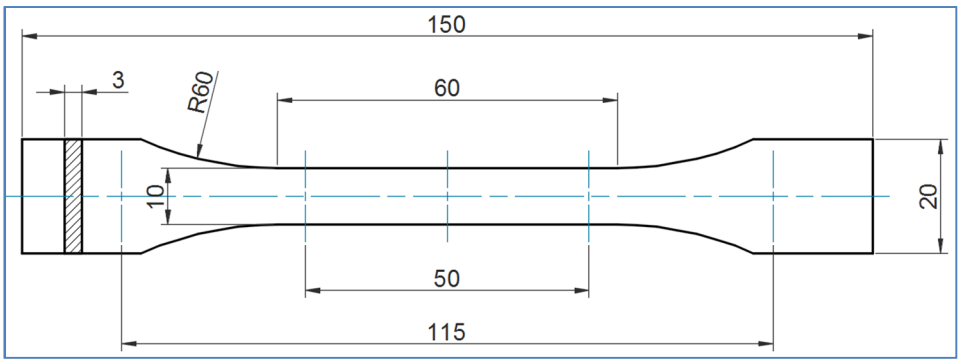
	A	B	C	D	E	F	G	H	J	K
Kalıpta Kalma (saat)	40,25	24,50	24,08	48,33	45,50	41,50	22,00	24,75	26,00	23,38
Enjeksiyon Sonrası Kürlenme Üst Baskı Kuvveti	VAR	VAR	VAR	VAR	VAR	VAR	VAR	VAR	VAR	VAR
Kalıp Sıcaklığı (C°)	40	40	40	40	40	40	50	50	45	45
Ortam SıcaklığI (C°)	13,5	16,0	18,0	15,7	15,3	16,3	19,1	15,5	18,8	19,8

6.2.6 Test Numunelerinin Kesilmesi

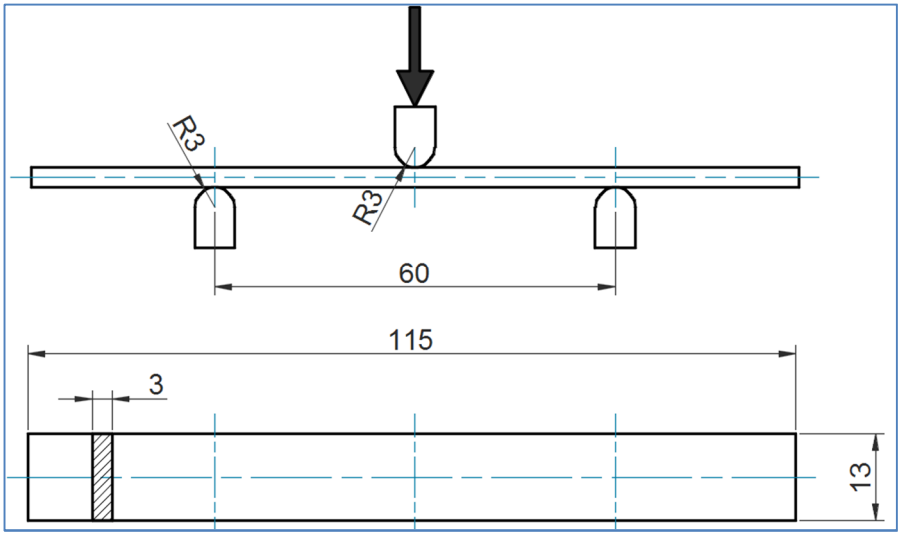
Kürleşen ve kalıptan çıkarılan plakalardan (Şekil 6.8), çekme testi numuneleri ve eğilme testi numuneleri kesilmiştir. Çekme testi için TS EN ISO 527-4 standardında belirtilen ölçülerde (Şekil 6.9) numuneler kesilerek toplam 50 adet test numunesi hazırlanmıştır. Üç nokta eğilme testi için ise numuneler ASTM D790'da belirtilen boyutlarda (Şekil 6.10) kesilmiştir. Bu işlem için 40X40 cm çalışma alanına sahip mini CNC freze kullanılmıştır (Şekil 6.11).



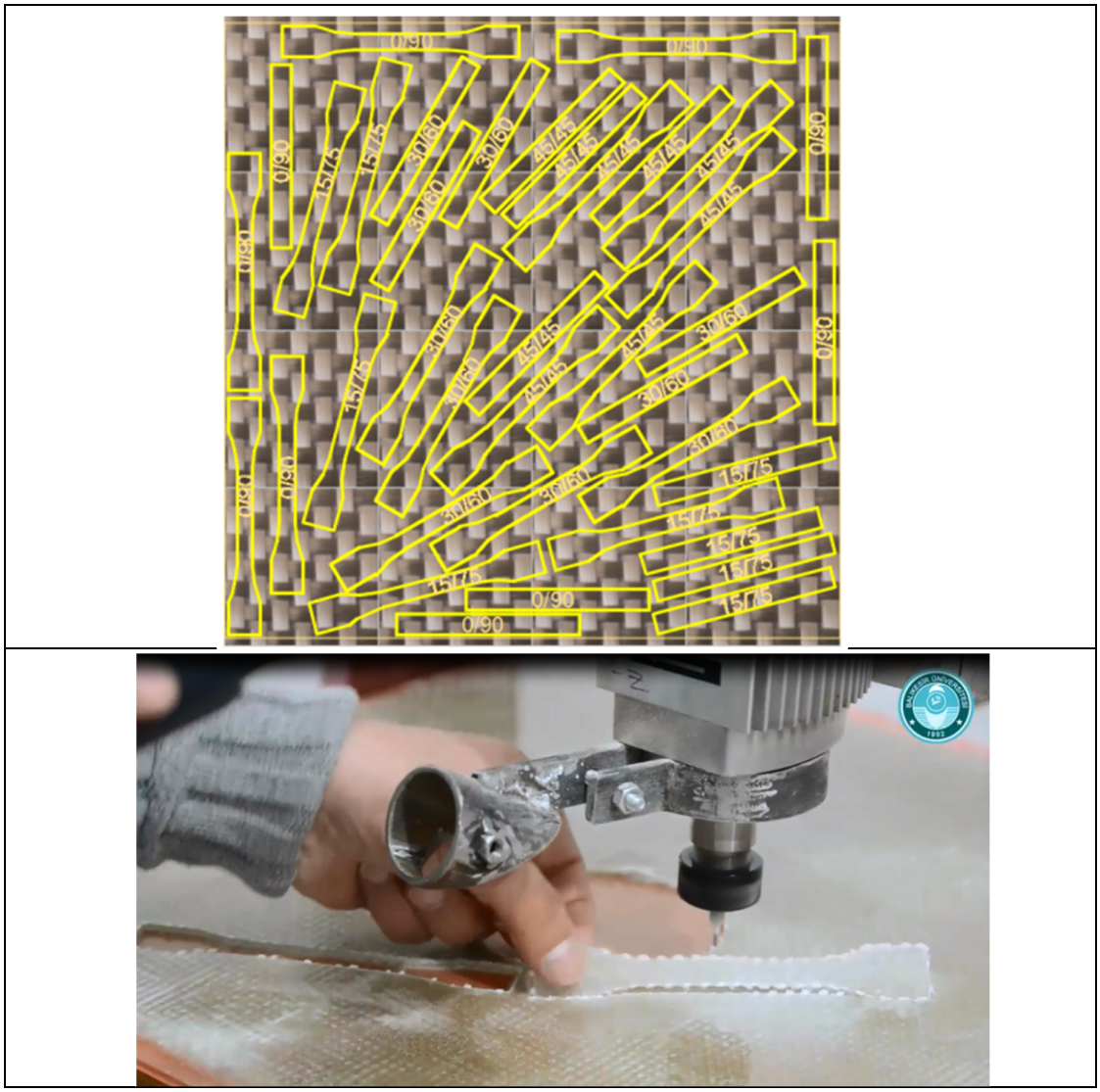
Şekil 6.8: Farklı parametrelerde üretilen ve kesimi yapılacak plakalar.



Şekil 6.9: Çekme testi numuneleri.



Şekil 6.10: Eğilme testi numuneleri.

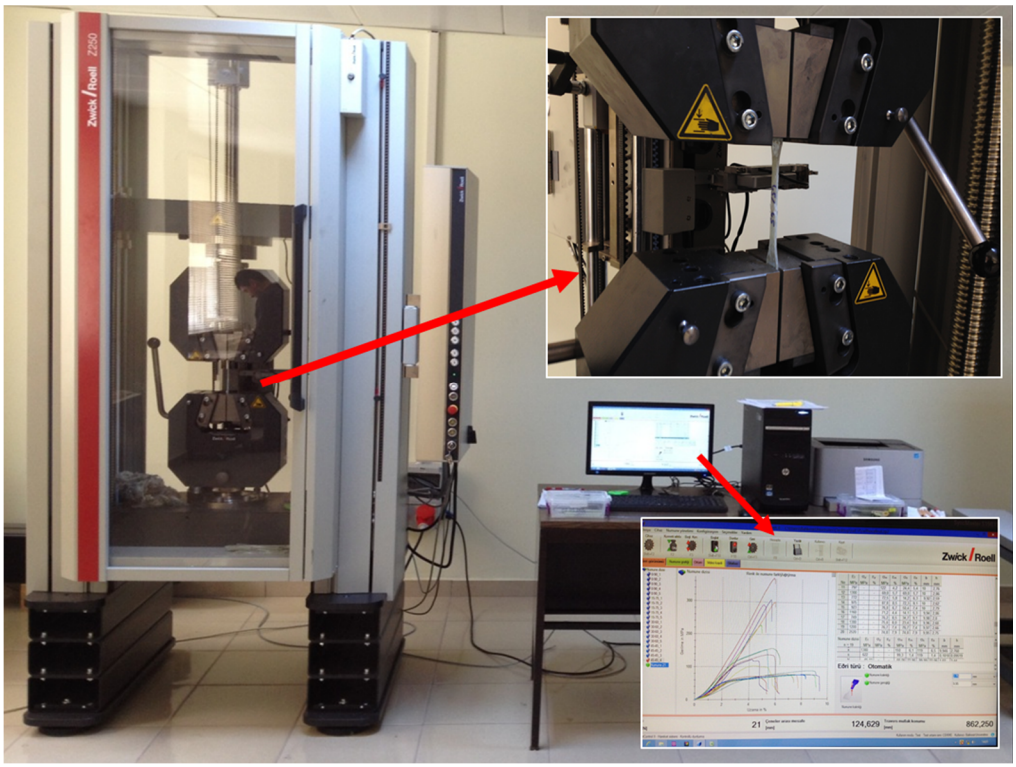


Şekil 6.11: Test numunelerinin CNC frezede kesilmesi.

7. BULGULAR

7.1 Çekme Testleri ve Sonuçları

Çekme testi için kesilen numuneler Şekil 7.1'deki Zwick Roell Z250 (250 kN) marka test cihazı ile TS EN ISO 527-4 standardına uygun olarak, oda sıcaklığında ve 1 mm/dak.'lık çekme hızında gerçekleştirilmiştir. Çekme testi, her numune tipi için 5 kez tekrarlanmış olup ortalama değer çekme dayanımı olarak kabul edilmiştir. Tüm numunelerin çekme testlerine ait Gerilme-Uzama eğrileri EK-A 'da verilmiştir.



Şekil 7.1: Zwick/Roell Z250 test cihazı.

Çekme testi sonucu elde edilen çekme mukavemeti değerleri Tablo 7.1'de, bunlara ait grafikler Şekil 7.2'de ve çekme dayanımları eğrisi ile eğri denklemi ise Şekil 7.3'de verilmiştir. Bu sonuçlar incelendiğinde,

a. $0^0/90^0$ fiber oryantasyon açısına sahip numunelerde en yüksek çekme mukavemeti (J) grubu numunelerde, en düşük çekme mukavemeti (B) grubu numunelerde,

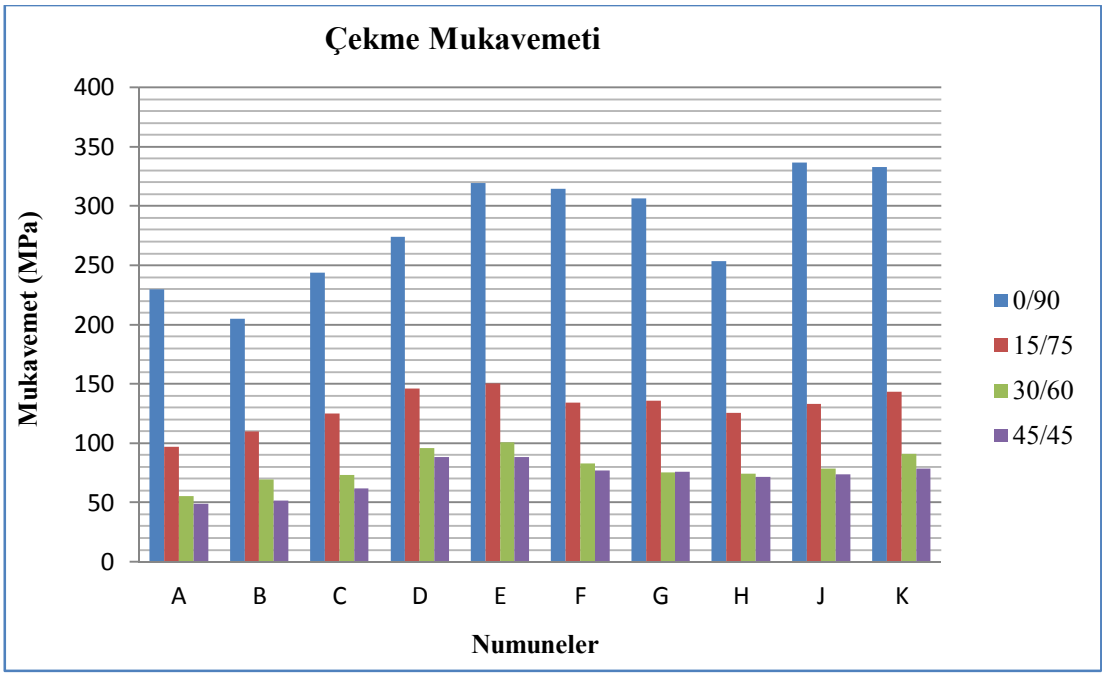
b. $15^0/75^0$ fiber oryantasyon açısına sahip numunelerde en yüksek çekme mukavemeti (E) grubu numunelerde, en düşük çekme mukavemeti (A) grubu numunelerde,

c. $30^0/60^0$ fiber oryantasyon açısına sahip numunelerde en yüksek çekme mukavemeti (E) grubu numunelerde, en düşük çekme mukavemeti (A) grubu numunelerde,

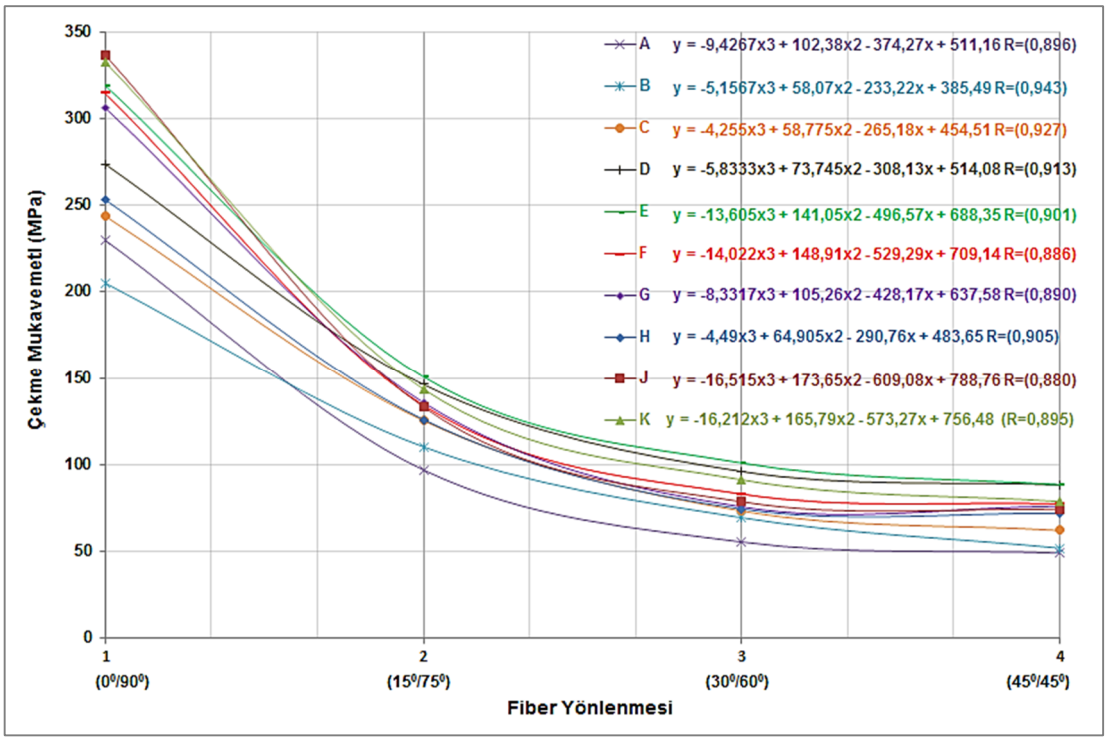
d. $45^0/45^0$ fiber oryantasyon açısına sahip numunelerde en yüksek çekme mukavemeti (E) grubu numunelerde, en düşük çekme mukavemeti ise (A) grubu numunelerde elde edilmiştir.

Tablo 7.1: Farklı fiber oryantasyon açısına sahip test numunelerinin çekme dayanımları tablosu.

Numune Adı	Çekme Mukavemeti (MPa)			
	$(0^0/90^0)$	$(15^0/75^0)$	$(30^0/60^0)$	$(45^0/45^0)$
A	229,84	96,72	55,24	48,84
B	205,18	110,07	69,22	51,69
C	243,85	125,21	73,06	61,87
D	273,86	146,13	95,89	88,14
E	319,23	150,59	100,80	88,23
F	314,74	134,03	82,88	77,16
G	306,34	135,63	75,46	75,84
H	253,30	125,82	74,27	71,71
J	336,81	133,07	78,45	73,86
K	332,79	143,42	91,10	78,56



Şekil 7.2: Farklı fiber oryantasyon açısına sahip test numunlerinin çekme dayanımları grafiği.



Şekil 7.3: Farklı fiber yönlenmesine sahip test numunlerinin çekme dayanımları eğrisi ve eğri denklemi.

Çekme testi numunelerinin çekme modülü değerleri Tablo 7.2'de, bunlara ait grafikler Şekil 7.4'de ve çekme modülü eğrisi ile eğri denklemi Şekil 7.5'de verilmiş olup;

a. $0^0/90^0$ fiber oryantasyon açısına sahip numunelerde en yüksek çekme modülü (E) grubu numunelerde, en düşük çekme modülü (K) grubu numunelerde,

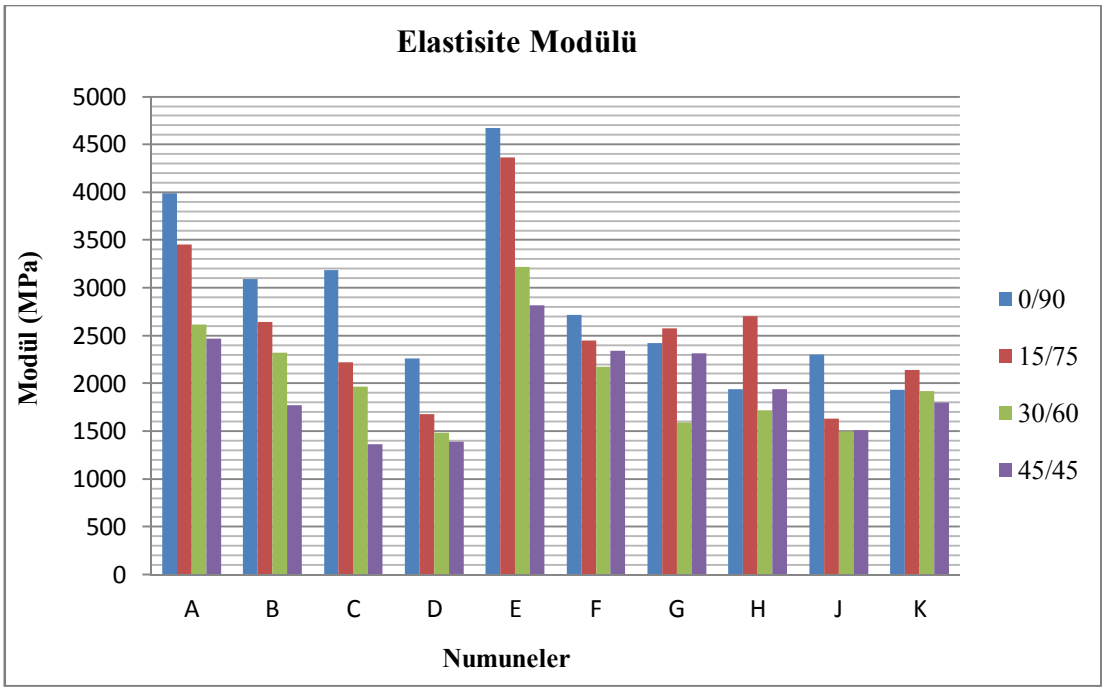
b. $15^0/75^0$ fiber oryantasyon açısına sahip numunelerde en yüksek çekme modülü (E) grubu numunelerde, en düşük çekme modülü (J) grubu numunelerde,

c. $30^0/60^0$ fiber oryantasyon açısına sahip numunelerde en yüksek çekme modülü (E) grubu numunelerde, en düşük çekme modülü (D) grubu numunelerde,

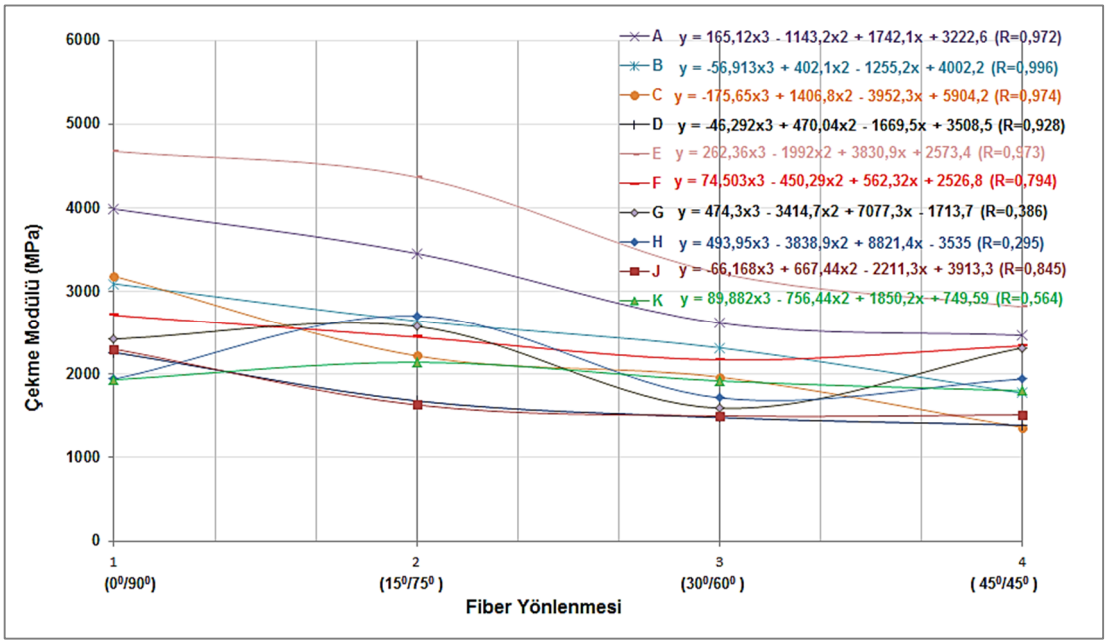
d. $45^0/45^0$ fiber oryantasyon açısına sahip numunelerde en yüksek çekme modülü (E) grubu numunelerde, en düşük çekme modülü ise (C) grubu numunelerde elde edilmiştir.

Tablo 7.2: Farklı fiber oryantasyon açısına sahip test numunelerinin çekme modülleri tablosu.

Numune Adı	Elastisite Modülü (MPa)			
	$(0^0/90^0)$	$(15^0/75^0)$	$(30^0/60^0)$	$(45^0/45^0)$
A	3987	3455	2619	2468
B	3092	2645	2319	1772
C	3183	2222	1966	1363
D	2263	1679	1480	1388
E	4675	4366	3222	2816
F	2713	2446	2173	2340
G	2423	2577	1592	2316
H	1941	2704	1716	1942
J	2303	1631	1500	1512
K	1933	2143	1919	1799



Şekil 7.4: Farklı fiber oryantasyon açısına sahip test numunlerinin çekme modülleri grafiği.



Şekil 7.5: Farklı fiber yönlenmesine sahip test numunlerinin çekme modülleri eğrisi ve eğri denklemi.

Çekme testi numunelerinin deformasyon değerleri Tablo 7.3'de ve bunlara ait grafikler Şekil 7.6'da verilmiş olup;

a. $0^0/90^0$ fiber oryantasyon açısına sahip numunelerde en yüksek deformasyon değeri (J) grubu numunelerde, en düşük deformasyon (A) grubu numunelerde,

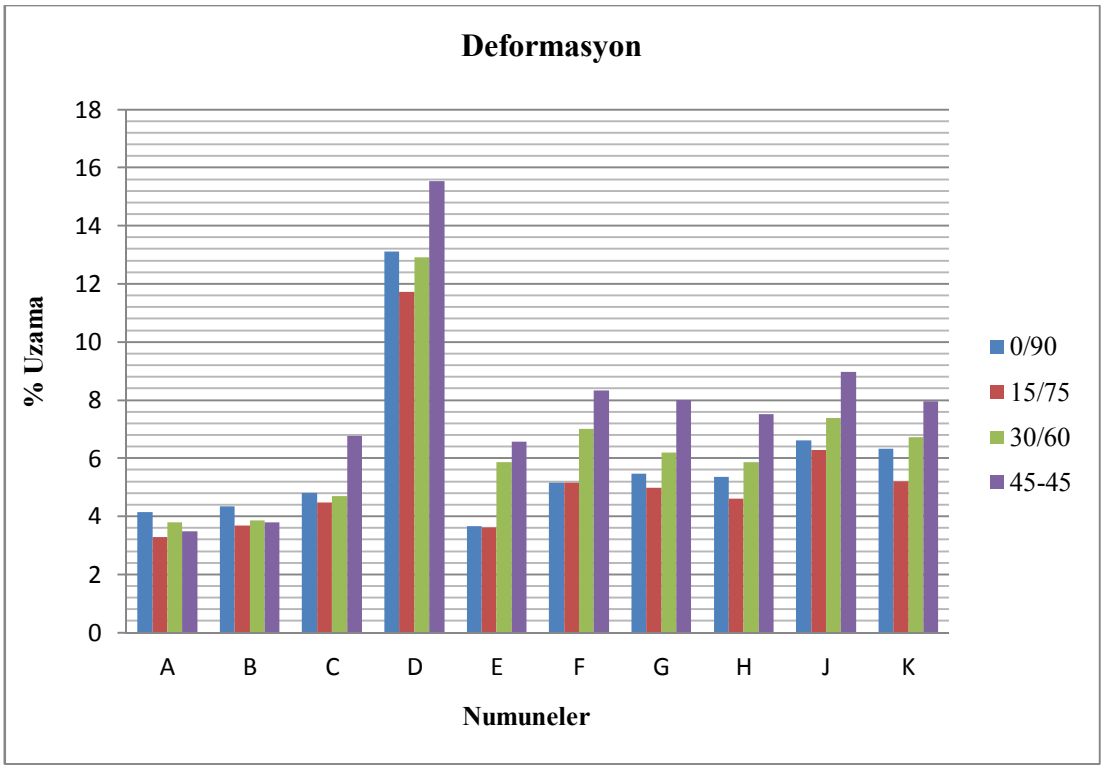
b. $15^0/75^0$ fiber oryantasyon açısına sahip numunelerde en yüksek deformasyon değeri (J) grubu numunelerde, en düşük deformasyon (A) grubu numunelerde,

c. $30^0/60^0$ fiber oryantasyon açısına sahip numunelerde en yüksek deformasyon değeri (J) grubu numunelerde, en düşük deformasyon (A) grubu numunelerde,

d. $45^0/45^0$ fiber oryantasyon açısına sahip numunelerde en yüksek deformasyon değeri (J) grubu numunelerde, en düşük deformasyon değeri ise (A) grubu numunelerde gözlenmiştir.

Tablo 7.3: Farklı fiber oryantasyon açısına sahip çekme test numunelerin deformasyon tablosu.

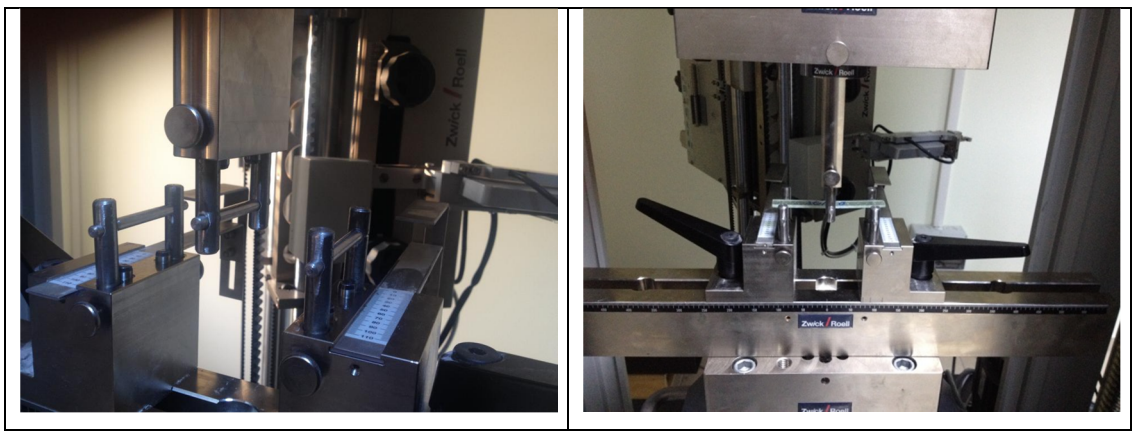
Numune Adı	Deformasyon (%)			
	$(0^0/90^0)$	$(15^0/75^0)$	$(30^0/60^0)$	$(45^0/45^0)$
A	4,15	3,28	3,80	3,49
B	4,35	3,68	3,86	3,79
C	4,81	4,47	4,69	6,78
D	13,11	11,71	12,91	15,54
E	3,66	3,62	5,87	6,58
F	5,15	5,16	7,02	8,32
G	5,46	4,98	6,20	7,99
H	5,35	4,61	5,85	7,51
J	6,61	6,28	7,37	8,96
K	6,33	5,19	6,73	7,95



Şekil 7.6: Farklı fiber oryantasyon açısına sahip çekme test numunelerinin deformasyon grafiği.

7.2 Eğilme Testleri ve Sonuçları

Üç nokta eğilme testi Zwick/Roell Z250 test cihazı ile ASTM D790'da belirtilen 1 mm/dak hız uygulanarak yapılmıştır. Eğilme testi, destekler arası açıklık 60 mm ve destek yarıçapları 3 mm olacak şekilde standarda uygun gerçekleştirilmiştir (Şekil 7.7). Tüm numunelerin eğilme testlerine ait Gerilme-Deformasyon eğrileri EK-B 'de verilmiştir.



Şekil 7.7: Eğilme testi cihazı çene ve aparatları.

Eğilme testi sonucu elde edilen eğilme mukavemeti değerleri Tablo 7.4'de, bunlara ait grafikler Şekil 7.8'de ve eğilme dayanım eğrisi ile eğri denklemi ise Şekil 7.9'da verilmiştir. Bu sonuçlar incelendiğinde,

a. $0^0/90^0$ fiber oryantasyon açısına sahip numunelerde en yüksek eğilme mukavemeti (F) grubu numunelerde, en düşük eğilme mukavemeti (A) grubu numunelerde,

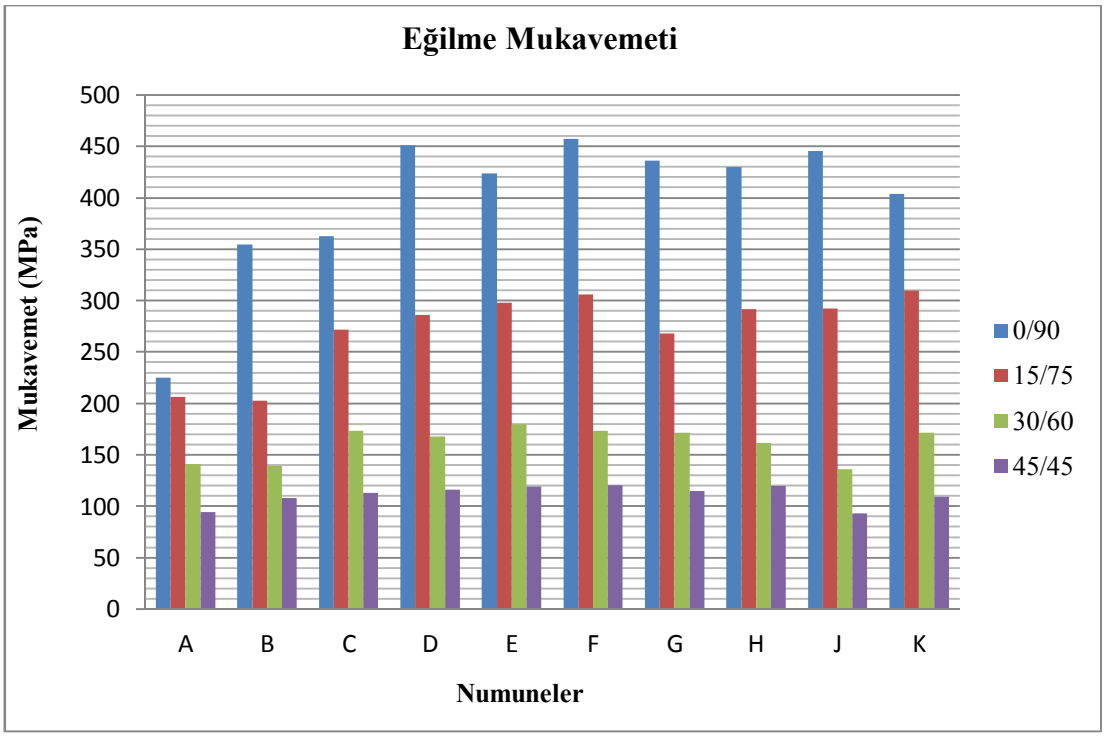
b. $15^0/75^0$ fiber oryantasyon açısına sahip numunelerde en yüksek eğilme mukavemeti (K) grubu numunelerde, en düşük eğilme mukavemeti (B) grubu numunelerde,

c. $30^0/60^0$ fiber oryantasyon açısına sahip numunelerde en yüksek eğilme mukavemeti (F) grubu numunelerde, en düşük eğilme mukavemeti (J) grubu numunelerde,

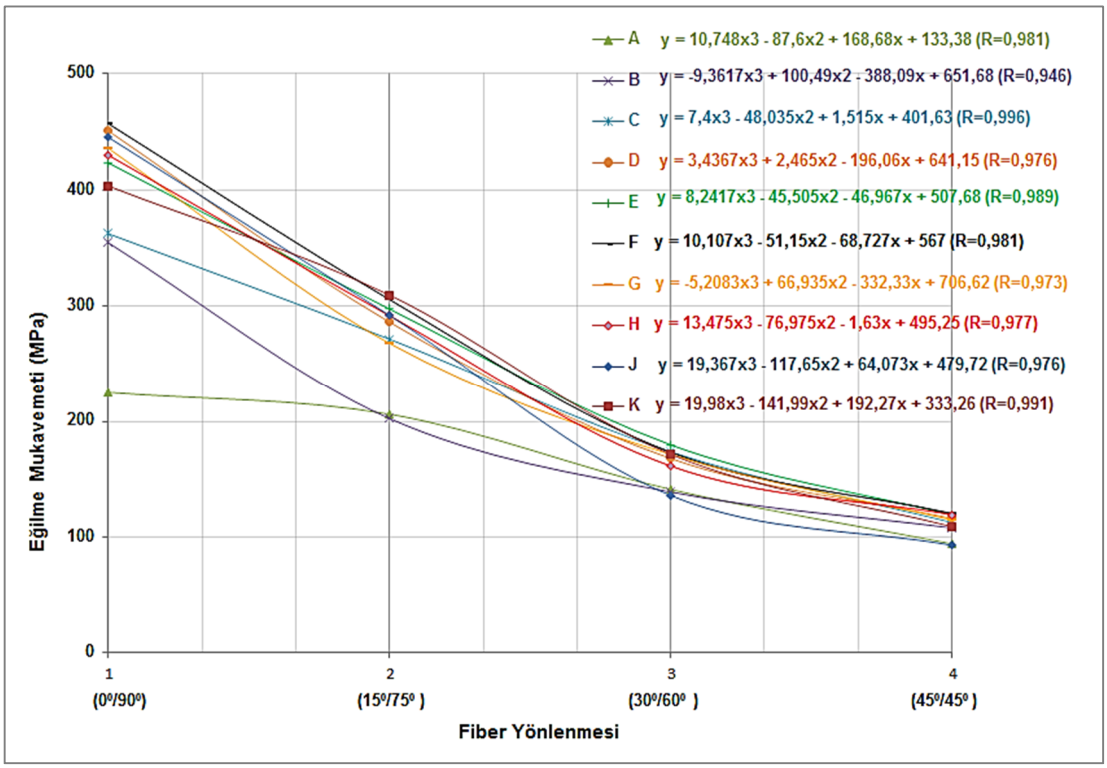
d. $45^0/45^0$ fiber oryantasyon açısına sahip numunelerde en yüksek eğilme mukavemeti (F) grubu numunelerde, en düşük eğilme mukavemeti ise (J) grubu numunelerde elde edilmiştir.

Tablo 7.4: Farklı fiber oryantasyon açısına sahip test numunelerinin eğilme mukavemeti tablosu.

Numune Adı	Eğilme Mukavemeti (MPa)			
	$(0^0/90^0)$	$(15^0/75^0)$	$(30^0/60^0)$	$(45^0/45^0)$
A	225,21	206,33	141,23	94,40
B	354,72	202,57	139,06	108,02
C	362,51	271,72	173,66	112,73
D	450,99	286,38	167,94	116,29
E	423,45	297,66	179,76	119,20
F	457,23	305,80	173,35	120,52
G	436,02	268,04	171,43	114,94
H	430,12	291,89	161,41	119,53
J	445,51	292,20	135,99	93,08
K	403,52	309,67	171,59	109,16



Şekil 7.8: Farklı fiber oryantasyon açısına sahip test numunlerinin eğilme dayanımları grafiği.



Şekil 7.9: Farklı fiber yönlenmesindeki test numunleri eğilme dayanımları eğrisi ve eğri denklemi.

Eğilme testi numunelerinin eğilme modülü değerleri Tablo 7.5'de ve bunlara ait grafikler Şekil 7.10'da ve eğilme modülleri eğrisi ile eğri denklemi Şekil 7.11'de verilmiş olup;

a. $0^0/90^0$ fiber oryantasyon açısına sahip numunelerde en yüksek eğilme modülü (D) grubu numunelerde, en düşük eğilme modülü (H) grubu numunelerde,

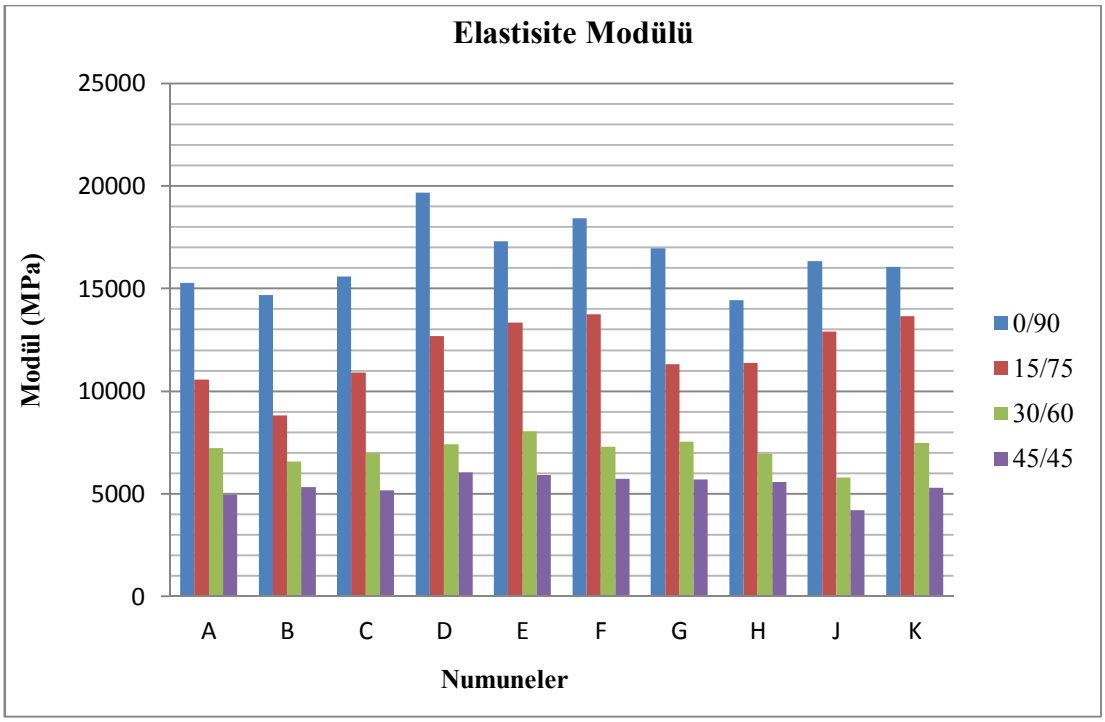
b. $15^0/75^0$ fiber oryantasyon açısına sahip numunelerde en yüksek eğilme modülü (F) grubu numunelerde, en düşük eğilme modülü (B) grubu numunelerde,

c. $30^0/60^0$ fiber oryantasyon açısına sahip numunelerde en yüksek eğilme modülü (E) grubu numunelerde, en düşük eğilme modülü (J) grubu numunelerde,

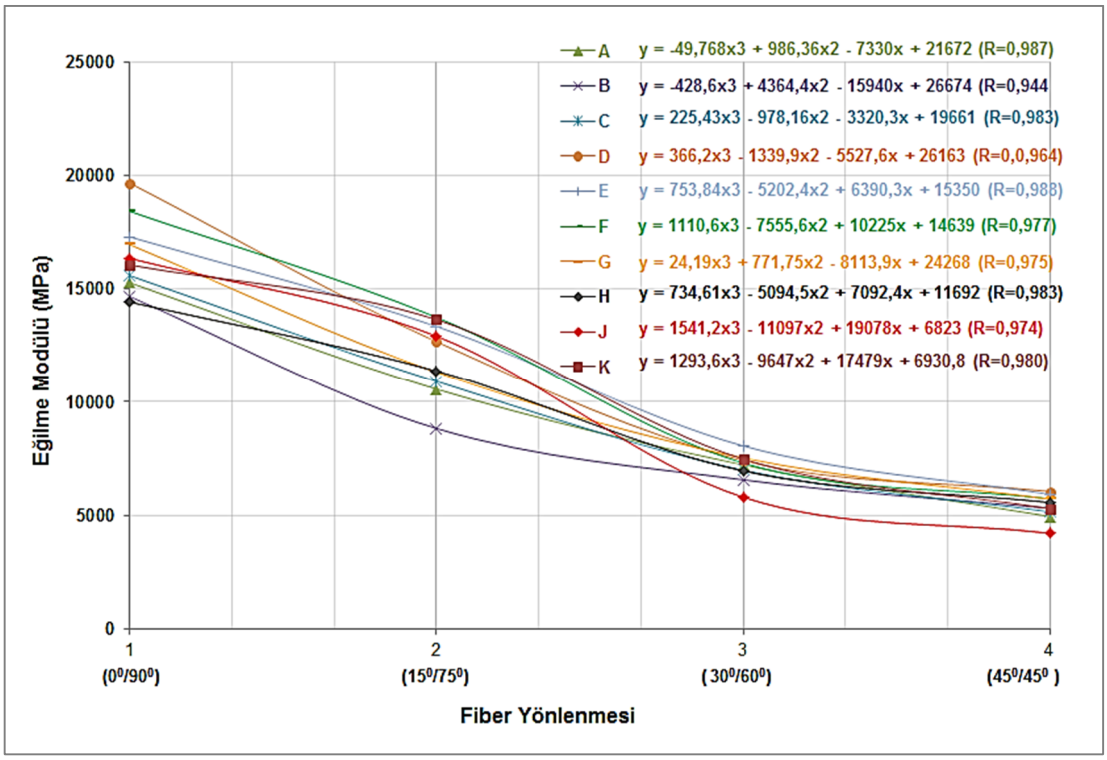
d. $45^0/45^0$ fiber oryantasyon açısına sahip numunelerde en yüksek eğilme modülü (D) grubu numunelerde, en düşük eğilme modülü ise (J) grubu numunelerde elde edilmiştir.

Tablo 7.5: Farklı fiber oryantasyon açısına sahip test numunelerinin eğilme modülü tablosu.

Numune Adı	Elastisite Modülü (MPa)			
	$(0^0/90^0)$	$(15^0/75^0)$	$(30^0/60^0)$	$(45^0/45^0)$
A	15279	10559	7216	4949
B	14669	8822	6560	5313
C	15588	10911	6983	5157
D	19662	12678	7409	6051
E	17292	13352	8053	5919
F	18419	13751	7300	5728
G	16950	11321	7526	5709
H	14424	11375	6953	5565
J	16345	12919	5792	4210
K	16057	13650	7474	5288



Şekil 7.10: Farklı fiber oryantasyon açısına sahip test numunlerinin eğilme modülleri grafiği.



Şekil 7.11: Farklı fiber yönlenmesine sahip test numunlerinin eğilme modülleri eğrisi ve eğri denklemi.

Eğilme testi numunelerinin deformasyon değerleri Tablo 7.6'da ve bunlara ait grafikler Şekil 7.12'de verilmiş olup;

a. $0^0/90^0$ fiber oryantasyon açısına sahip numunelerde en yüksek deformasyon değeri (K) grubu numunelerde, en düşük deformasyon (A) grubu numunelerde,

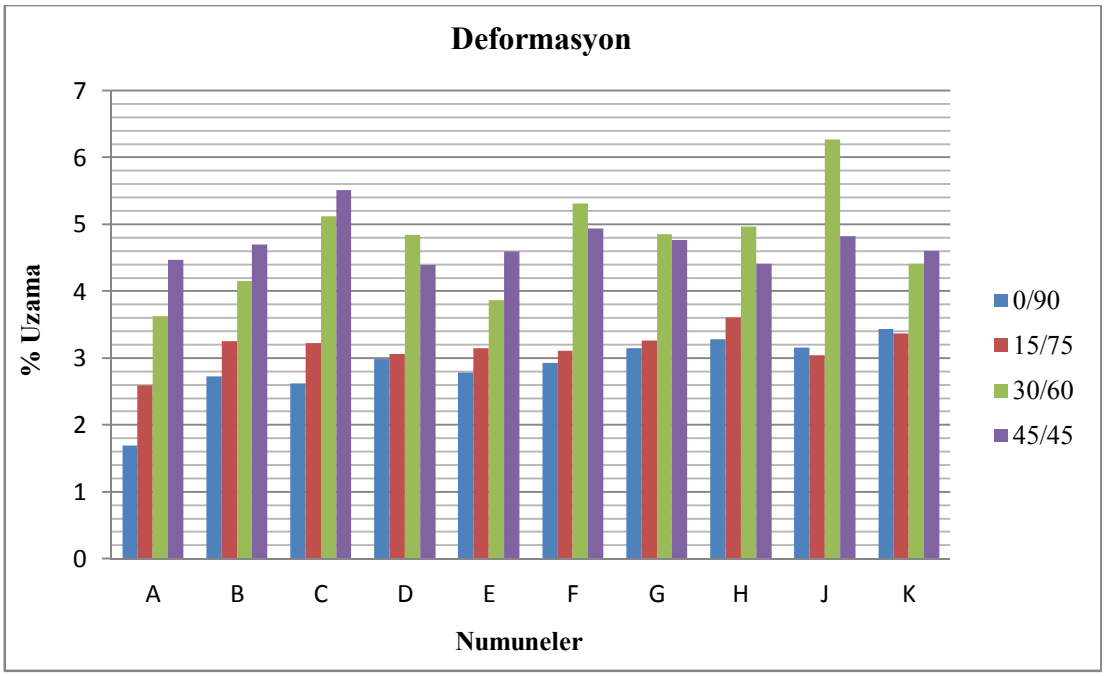
b. $15^0/75^0$ fiber oryantasyon açısına sahip numunelerde en yüksek deformasyon değeri (H) grubu, en düşük deformasyon (A) grubu numunelerde,

c. $30^0/60^0$ fiber oryantasyon açısına sahip numunelerde en yüksek deformasyon değeri (J) grubu, en düşük deformasyon (A) grubu numunelerde,

d. $45^0/45^0$ fiber oryantasyon açısına sahip numunelerde en yüksek deformasyon değeri (C) grubu, en düşük deformasyon değeri ise (D) grubu numunelerde gözlenmiştir.

Tablo 7.6: Farklı fiber oryantasyon açısına sahip eğilme test numunelerinin deformasyon tablosu.

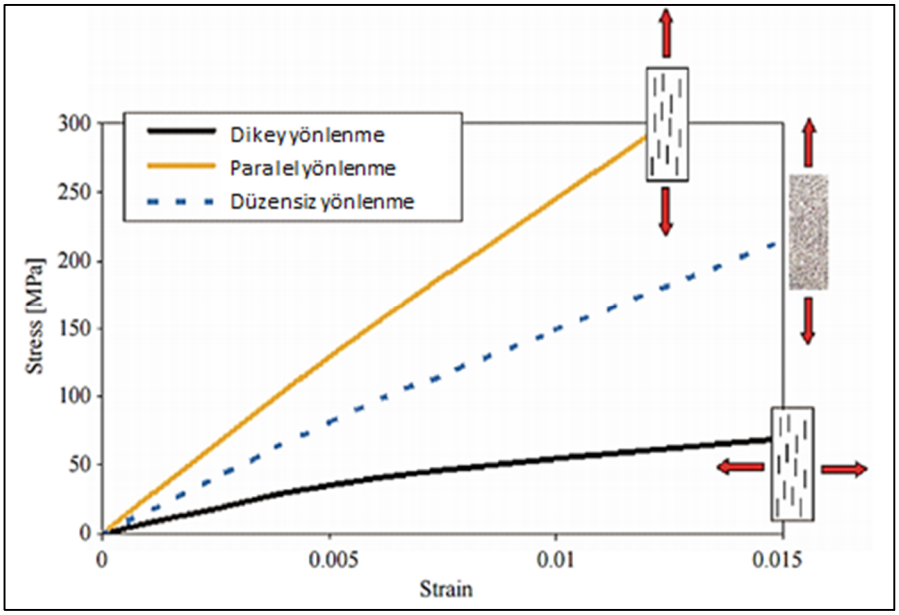
Numune Adı	Deformasyon			
	$(0^0/90^0)$	$(15^0/75^0)$	$(30^0/60^0)$	$(45^0/45^0)$
A	1,69	2,59	3,62	4,46
B	2,72	3,25	4,15	4,70
C	2,62	3,23	5,12	5,51
D	2,99	3,06	4,84	4,39
E	2,79	3,15	3,86	4,59
F	2,93	3,11	5,31	4,93
G	3,15	3,26	4,85	4,77
H	3,28	3,61	4,97	4,41
J	3,16	3,04	6,26	4,82
K	3,43	3,37	4,41	4,60



Şekil 7.12: Farklı fiber oryantasyon açısına sahip eğilme test numunelerinin deformasyon grafiği.

Elde edilen kompozit plakalar için çekme ve üç noktadan eğilme gibi temel mekanik özellikler incelenmiştir. Genel olarak aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

Tabakalı kompozit plakaların anizotropik yapıları nedeniyle Şekil 7.13'deki grafikte de örneklendirildiği gibi, farklı fiber oryantasyon açılarında farklı mukavemet değerleri gözlenmiştir.



Şekil 7.13: Fiber oryantasyon açısına bağlı olarak değişen gerilme-şekil değiştirme grafiği [38].

Tablo 7.1'deki verilere göre; J, K, E, F, G numunelerinin çekme mukavemeti değerleri, Tablo 7.4'deki verilere göre ise; F, D, J, G, H numunelerinin eğilme mukavemeti değerleri diğer numunelere göre yüksek çıkmıştır.

Şekil 7.14'te görüldüğü gibi, farklı açılardaki numunelerde farklı fiber kırılmaları oluşmuştur.

Şekil 7.14: Çekme testine tabi tutulmuş farklı fiber oryantasyon açısındaki numuneler.

Şekil 7.3 ve şekil 7.9 incelendiğinde, kompozit malzemelerin anizotropik yapıları nedeniyle, boyuna fiberlerin mukavemete katmış olduğu etki ile $0/90^0$ fiber oryantasyon açısına sahip numunelerin mukavemet değerleri, diğer fiber oryantasyon açısına sahip numunelere göre çok daha yüksektir. Güllü ve arkadaşlarıda [39], enjeksiyon tekniği ile ürettikleri cam elyaf takviyeli plastik matrisli kompozit malzemede aynı yönde yönlendirilmiş kısa elyaflarla doldurulmuş kompozit plakaların çekme kuvvetinin, uygulanan kuvvetle elyaf ekseni arasındaki açı arttıkça azaldığını tespit etmişlerdir.

Şekil 7.3'de görüldüğü gibi fiber açısı $0/90^0$ 'den $45/45^0$ 'e doğru düştükçe, doğru orantılı olarak çekme mukavemeti de düşmektedir. Solmaz ve Gür [40], farklı oryantasyon açılarına sahip tabakalı kompozit yapının, eksenel çekme yükü altındaki davranışlarını deneysel olarak belirlemek için yapmış oldukları çalışmada, matris

malzemesi olarak polyester reçine, takviye malzemesi olarak ise 0.3- 0.4mm çelik telden oluşan 2 farklı takviye malzemesi kullanılmış, deneysel çalışma sonucunda; fiberlerin oryantasyon açısı artıkça hem antisimetrik hem de simetrik dizilime sahip tabakalı kompozitlerde meydana gelen gerilme değerlerinde düşüş meydana geldiğini gözlemiştir.

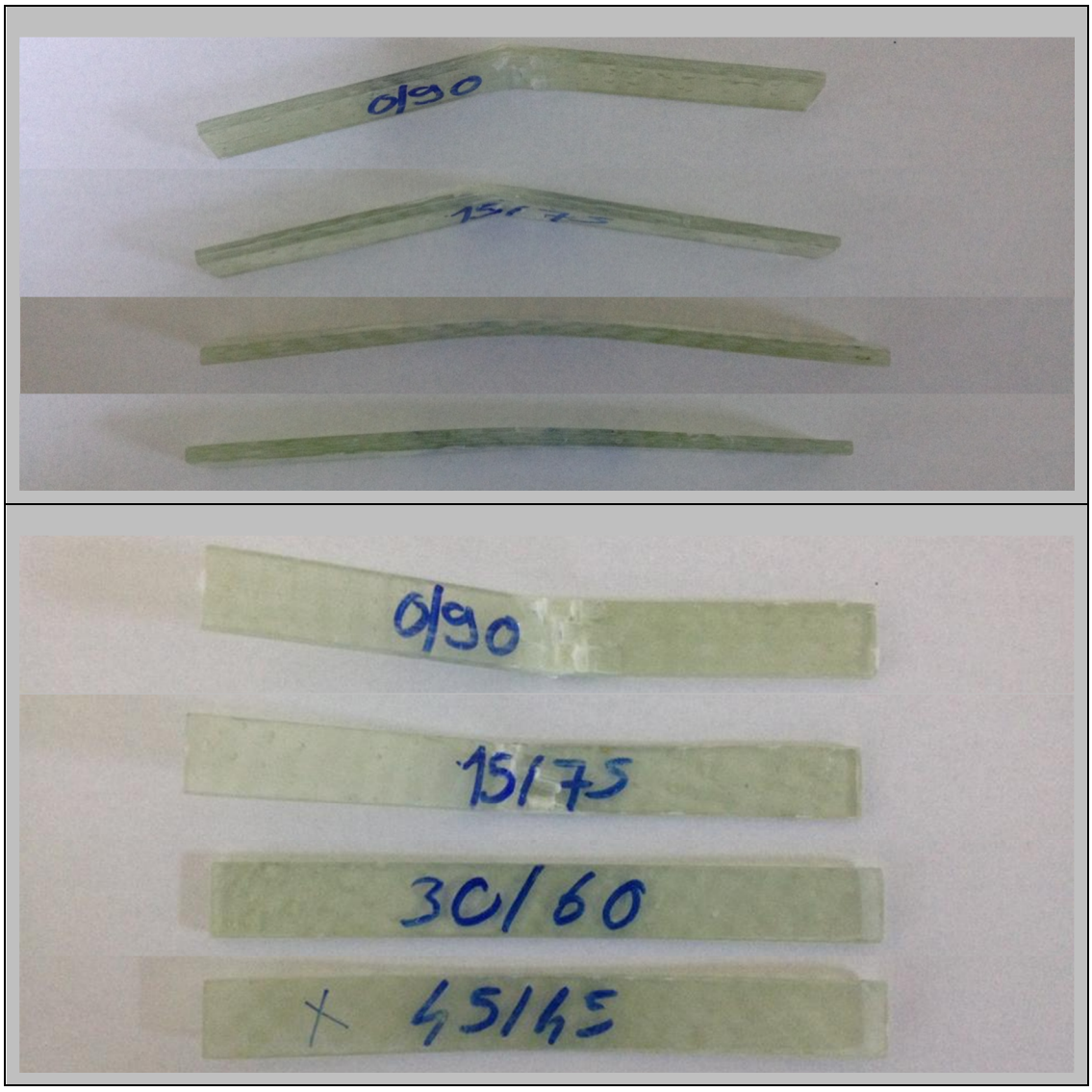
Şekil 7.2'de görüldüğü üzere, $30/60^0$ ile $45/45^0$ fiber oryantasyon açısına sahip numunelerin çekme mukavemetinde yüksek farklar oluşmamıştır.

$0/90^0$ fiber oryantasyon açısına sahip numunelerde, 0^0 boyuna fiberlerin mukavemeti artırması sayesinde kopma öncesi tabakalar arası ayrılma gerçekleşmiştir. (Şekil 7.15),

Şekil 7.15: Çekme testi uygulanmış $0/90^0$ fiber oryantasyon açısına sahip numunenin önden ve yandan görünüşü.

Testlerde elde edilen verilere göre $45/45^0$ fiber oryantasyon açısına sahip numunelerde, çekme yönünde fiberler arası bağ zayıf olduğu için matrisde kırılmanın çabuk gerçekleşmiş ve kopma hızlı olmuştur.

$0/90^0$ ve $15/75^0$ fiber oryantasyon açısına sahip test numunelerinde, eğilme esnasında matris ve fiberlerde gerçekleşen kırılma ile tabakalar arası ayrılma neticesinde kalıcı deformasyon gerçekleşmiştir. (Şekil 7.16)



Şekil 7.16: Eğilme testi uygulanmış numunenin önden ve yandan görünüşü.

8. SONUÇ VE ÖNERİLER

Optimum RTM parametrelerine, kullanım yeri ve maliyet de dikkate alınıp, test sonuçlara bakılarak karar verilebilir. Yapılan çalışmada aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

1. RTM prosesinde sabit yük kontrolü yerine sabit hız kontrolü yapıldığında daha iyi ıslanma ve mukavemet değerleri elde edilmiştir.

2. Reçine basma hızının artması kalıp içinde makro düzeydeki hava boşluklarını ve kalıp dolum süresini azaltmıştır.

3. Kalıp içerisine iki noktadan enjeksiyon yapılması cam-dokumalardaki ıslanmayı artırmış ve kalıp dolum süresini kısaltmıştır.

4. Uygulanan tekrarlı sirkülasyon ve vakum desteği kompozit plakanın mekanik özelliklerini arttırmıştır.

5. Reçinelerde polimerleşme reaksiyonu devam ederken viskozite arttıkça molekül ağırlığı artar. Molekül ağırlığı arttıkça eğme ve çekme dayanımı da yükselmektedir [41]. Stiren monomeri reçinenin viskozitesini azaltmakta dolayısıyla molekül ağırlığını azaltmakta, çekme ve eğme dayanımı da düşürmektedir. Stiren monomeri üretici firma bilgilendirmesinde de, inceltme amacıyla %10'dan fazla ilave edilen stirenin reçinenin özelliklerini kaybetmesine neden olacağı [42] belirtilmektedir. Benzer olarak, yapılan çalışmada da stiren kullanımının sonlandırılması mukavemeti artırmıştır.

6. Cobalt ve MEK-P oranlarının azaltılması mukavemet değerlerini artırmıştır.

7. Reçine enjeksiyonu için plastik pnömatik hortum yerine teflon boru kullanılarak sistemde oluşan iç basınç azaltılmıştır. Teflon boru ile enjeksiyon hızı artırılabilmiş, kalıp içi dolum süresi azaltılmış, tekrarlı sirkülasyon yapılmasına rağmen enjeksiyon süresi kısaltılmıştır.

8. Uygun parametre ve üretim koşullarında enjeksiyon basma hızı artırılırken, kürlenme süresi de azaltılabilmektedir.

9. Kalıba uygulanan vakum ile plakalardaki hava boşlukları azaltılarak daha düzgün plakalar elde edilebilmektedir.

10. Uygun deney koşullarında, Cobalt ve MEK-P içeren reçinelerin kalıbın girişinde statik mikserde karıştırılması yerine; Reçine, Cobalt ve MEK-P'in bir kapta karıştırılması ile daha homojen bir karışım elde edilirken, yapılanlar işlemi kolaylaştırılırken mukavemeti de artmıştır.

11. Yapılan testler arasında 45 ^{0}C'lik kalıp sıcaklığının en ideal kürlenme sıcaklığı olduğu belirlenmiştir.

12. Yapılan testlerde 45 ^{0}C kalıp sıcaklığında 24 saat içerisinde kürlenme gerçekleştiği görülmüştür.

13. Uygun parametre ve üretim koşullarında kürlenme süresinin azaltılabildiği gözlenmiştir.

Test sonuçları ve üretim parametreleri incelendiğinde vakum destekli RTM için optimum parametreler; teflon boru kullanılarak, 2-noktadan enjeksiyon, 4-noktadan vakumlama, stiren monomeri kullanılmadan, 2-defa reçine sirkülasyonu, ortalama 2.39 Bar enjeksiyon basıncı, 44.73 mm/dak.'lık enjeksiyon hızı, 45 °C kalıp ısısı, 136 KPa'lık kürlenme basıncı ve -700 mmHg vakum basıncı gibi parametrelerde elde edilmiştir.

9. KAYNAKLAR

[1] Sakin, R., "Düzlemsel Rasgele Dağılımlı Keçe Elyafla Takviyeli Kompozit Malzmede Kırılma Tokluğunun Elyaf Hacmi, Elyaf Yönlenmesi ve Deformasyon Hızı İle Değişiminin Saptanması", Yüksek Lisans Tezi, *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü,* Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Balıkesir, (1994).

[2] Türkmen, İ. ve Köksal, N.S., "Cam Elyaf Takviyeli Polyester Matrisli Kompozit Malzemelerde (CTP) Elyaf Tabaka Sayısına Bağlı Mekanik Özelliklerin ve Darbe Dayanımının İncelenmesi", *C.B.Ü. Fen Bilimleri Dergisi*, 8(2), (2013).

[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 İnfusion 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, (2008).

[5] Khashaba, U.A., "Fatigue and Reliability Analysis of Unidirectional GFRP Composites Under Rotating Bending Loads", *Journal of Composite Materials*, 37(4), (2003).

[6] Mallick, P.K., "*Composites Engineering Handbook*", Marcel Dekker Inc., New York, USA: CRC Press (1997).

[7] Sözer, M., "Simülasyonlarla Destekli Resin Transfer Kalıplama Metoduyla Kompozit Malzeme Üretimi Kontrolü", TÜBİTAK- MİSAG Projesi (Proje No:192), *TÜBİTAK Kimyasal Teknolojiler Malzeme ve İmalat Sistemleri Araştırma Grubu*, İstanbul, (2003).

[8] Sözer, M., "Resin Transfer Kalıplama (RTM) Yöntemiyle Kompozit Parça Üretiminde Karşılaşılan Sorunlara Çözüm Getirilmesi ve Üretimin Otomasyona Geçirilmesi", TÜBİTAK- MİSAG Projesi (Proje No: MAG 104M290), *TÜBİTAK MAG Araştırma Grubu ve Yürütme Komitesi*, İstanbul, (2009).

[9] Turhan, M., "CTP'lerin Mekanik Özelliklerine Elyaf Hacim Oranlarının Etkisinin Araştırılması", *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Y. Lisans Tezi, Sakarya, (2007).

[10] Aran, A., "Elyaf Takviyeli Karma Malzemeler", Ders Notu, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, (1990).

[11] Brocks, T., Shiino, M.Y., Cioffi, M.O.H., Voorwald, H.J.C., and Filho, A.C., "Experimental RTM Manufacturing Analysis of Carbon/Epoxy Composites for Aerospace Application: Non-crimp and Woven Fabric Differences", *Materials Research*, 16 (5): 1175-1182, (2013).

[12] Ruiz, E., Achim, V., Soukane, S., Trochu, F., and Breard, J., "Optimization of İnjection Flow Rate to Minimize Micro/Macro-Voids Formation in Resin Transfer Molded Composites", *Composites Science and Technology*, 66(3-4), (2006).

[13] Akgül, E., "Effects of Mold Temperature and Vacuum in Resin Transfer Molding", Master Thesis, *Middle East Technical University İnstitute of Science*, Metallurgical and Materials Engineering, Ankara, (2006).

[14] 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).

[15] Karabeyoğlu, S.S., "Plastik Esaslı Kompozit Malzemelerin Eksenel Yükler Altında Özelliklerinin İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü,* Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Edirne, (2007).

[16] Turan, K., "Çözülebilen Bağlantılı Kompozit Plakaların Mekanik Davranışlarının Analizi", Doktora Tezi, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü,* Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Elazığ, (2009).

[17] Sakin, R., "Bilgisayar Destekli Çok Numuneli Eğilme Yorulması Test Cihazı Tasarımı ve Cam-Fiber Takviyeli Polyester Kompozitlerde Eğilme Yorulması Davranışının İncelenmesi", Doktora Tezi, *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Balıkesir, (2004).

[18] Türkmen, İ., "Cam Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemelerde Elyaf Tabaka Sayısına Bağlı Mekanik Özelliklerin ve Darbe Dayanımının İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Manisa, (2012).

[19] Koruvatan, A., "Farklı Kür Sıcaklığı ve Sürelerinde Üretilen Tabakalı Kompozit Plakaların Pimli/Civatalı Bağlantılarının Hasar Analizinin İncelenmesi", Doktora Tezi, *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü,* Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Balıkesir, (2008).

[20] Deniz, M.E., "Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri ve Isıl İşlemle Presleme Tekniğini Kullanarak Kompozit Malzeme Üretecek Bir Düzeneğin Tasarım ve İmalatı", Yüksek Lisans Tezi, *Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü,* Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Şanlıurfa, (2005).

[21] Biber, E., "Plastik Matriksli Kompozit Malzemelerde Akış Analizi ve Uygulamaları", Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü,* Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, (2005).

[22] Yüksek, M., "Cam Lifi Esaslı Poliester Reçineli Çok Eksenli Çözgülü Örme Kompozit Yapıların Mekanik Özelliklerinin Geliştirilmesi", Doktora Tezi, *Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü,* Tekstil Eğitimi Ana Bilim Dalı, İstanbul, (2011).

[23] Durgun, İ., Vatansever, O., Ertan, R., Yavuz, N., "Polimer Esaslı Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemelerde Üretim Tekniğinin Mekanik Özellikler Üzerindeki Etkisi", *7. Otomotiv Teknolojileri Kongresi*, Bursa, (2014).

[24] Karacaer, Y., "Cam Kumaş Takviyeli Delikli SMC Kompozit Malzemelerin Mekanik Özelliklerinin Araştırılması", Yüksek Lisans Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü,* Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Konya, (2009).

[25] Demirel, A., "Karbon Elyaf Takviyeli Epoksi Kompozit Malzemelerin Karakterizasyonu", Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara, (2007).

[26] Ünal, O., "Yapı Malzemesi Ders Notları [online]", (15 Eylül 2014) http://teknolojikarastirmalar.com/e-egitim/yapi_malzemesi/icerik/kompozit.htm

[27] Alnak, Y., "Fiber Takviyeli Kompozit Malzemelerde İnterlaminar Kayma Gerilmelerinin Nümerik Analizi ve Dört Noktadan Eğme Testi ile İnterlaminar Kayma Mukavemetinin Belirlenmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sivas.

[28] Cam Elyaf Sanayii A.Ş., "CTP Teknolojisi [online]", (18 Kasım 2014), http://www.camelyaf.com.tr/images/pdf/CTPcamelyaf.pdf.

[29] Arıcasoy, O., " Kompozit Sektör Raporu", *İstanbul Ticaret Odası*, İstanbul, (2006).

[30] Ataş, C., "Kompozit Üretim Teknolojileri Ders Notları [online]", (18 Kasım 2014), http://kisi.deu.edu.tr/cesim.atas/.

[31] Koçer, L., "E-Cam/Epoksi Örgülü Kompozit Plakaların Analitik, Sayısal ve Deneysel Çözümlerinin Elde Edilmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Zonguldak, (2010).

[32] Öğrenci, H.D., "Mekanik Olarak Bağlanmış Kompozitlerin Dayanımı", Yüksek Lisans Tezi, *Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir, (2012).

[33] Aslan, N., "Kompozit Plaklar", Ders Notu, *Balıkesir Üniversitesi Makine Mühendisliği*, Balıkesir, (2012).

[34] Zor, M., Composite Materials [online], (03 Kasım 2014), http://kisi.deu.edu.tr//mehmet.zor/composite%20materials/4-aniztropic_elasticitiy.pdf

[35] Yıldız Teknik Üniversitesi, "Kompozit Deneyleri Deney Föyü [online]", (05 Ekim 2014), http://www.yarbis1.yildiz.edu.tr

[36] Ay, İ., "Malzeme Teknolojisi", Ders Notu, *Balıkesir Üniversitesi Makine Mühendisliği*, Balıkesir, (2009).

[37] Poliya Poliester ve Yardımcı Maddeleri Sanayi, "Polipol 336 RTM Tipi Poliester Ürün Teknik Bülteni" [online], (03 Kasım 2014), http://www.omniskompozit.com/files/upload/files/ctp_polyesterler/POLIPOL_336.pdf

[38] Shaharuddın, S.I.S., Salit, M.S. and Zainudin, E.S., "A Review of the Effect of Moulding Parameters on the Performance of Polymeric Composite Injection Moulding", *Universiti Putra Malaysia*, Department of Mechanical and Manufacturing Engineering, Selangor, (2005)

[39] Güllü, A., Özdemir, E. ve Demir, H., "Enjeksiyon Parametrelerinin Cam Elyaf Takviyeli Polipropilen (PP) ve Naylon 6 (PA6) Kompozitlerin Mekanik Özelliklerine Etkisinin Araştırılması", *Niğde Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, Cilt 5, Sayı 1., 11-19 (2001).

[40] Solmaz, M.Y. VE Gür., M., "Tabakalı Kompozit Plakalarda Takviye Malzemesi ve Oryantasyon Açısının Gerilme Analizine Etkisi", *Doğu Anadolu Bölgesi Araştırmaları Dergisi*, Cilt 6, Sayı 1, 16-25 (2007).

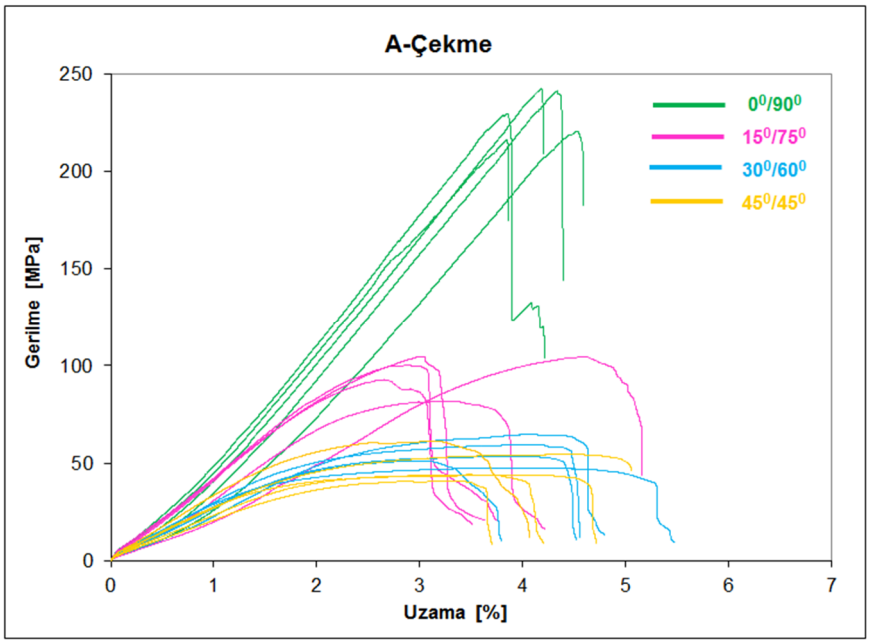
[41] Aslan, B.D., "Doymamış Polyester Reçinenin Özelliklerini Belirleyen Malzemeler", *I. Polimerik Kompozitler Sempozyumu ve Sergisi Bildiriler Kitabı*, 149-157 (2006).

[42] https://www.poliya.com/tr/products/chemicals/thinners_monomers/ [online] (17 Nisan 2014).

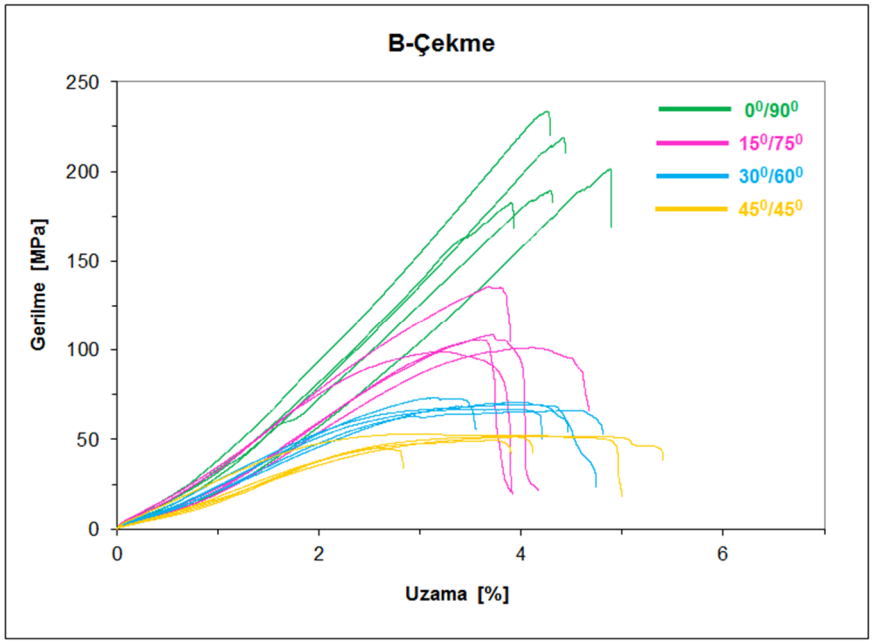
EKLER

10. EKLER

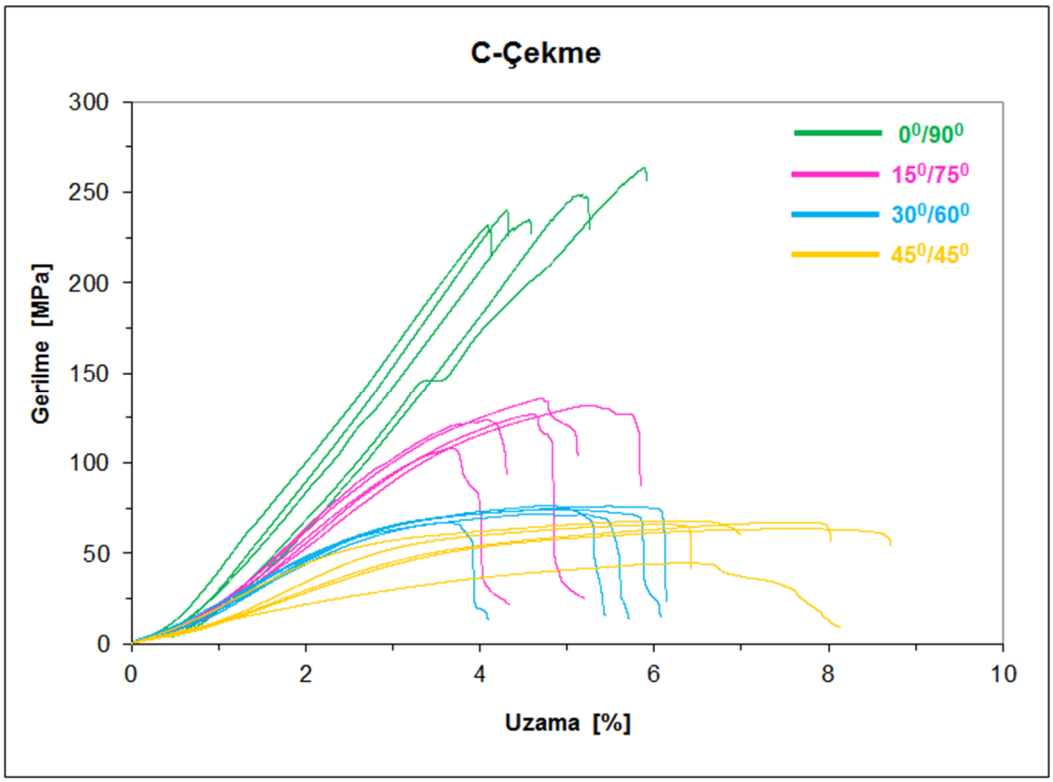
EK-A: Farklı Fiber Oryantasyon Açısına Sahip Çekme Testi Numunelerinin Gerilme-Uzama Eğrileri



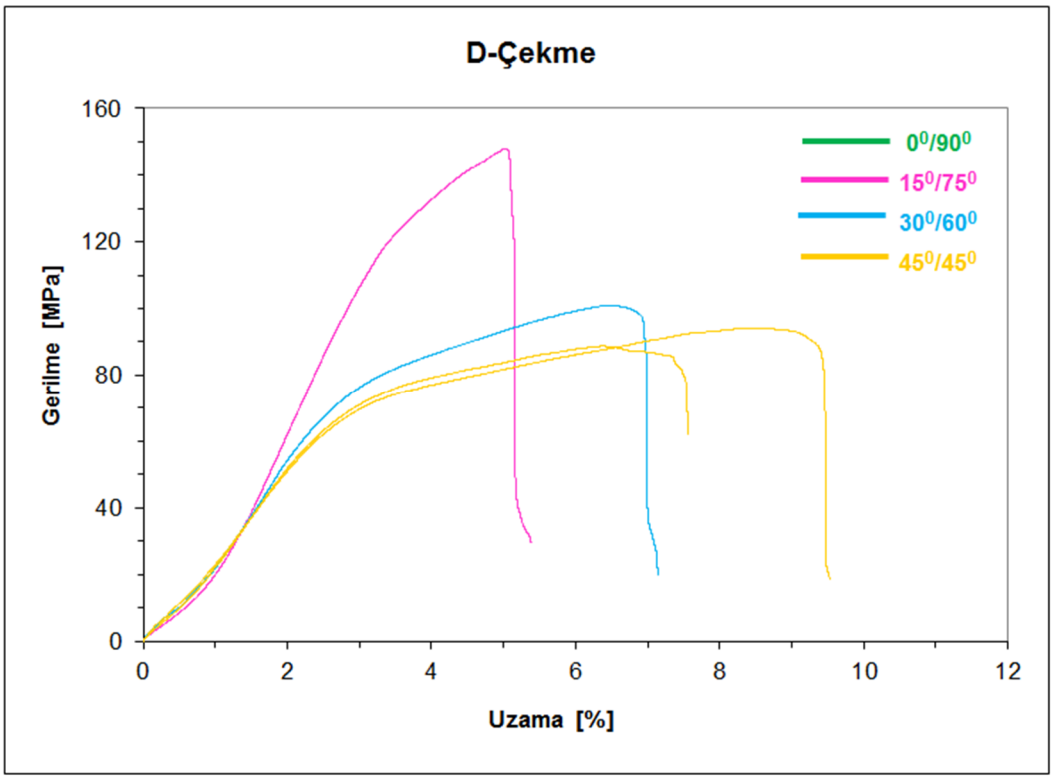
Şekil A.1: A numunesi çekme testi gerilme-uzama eğrileri



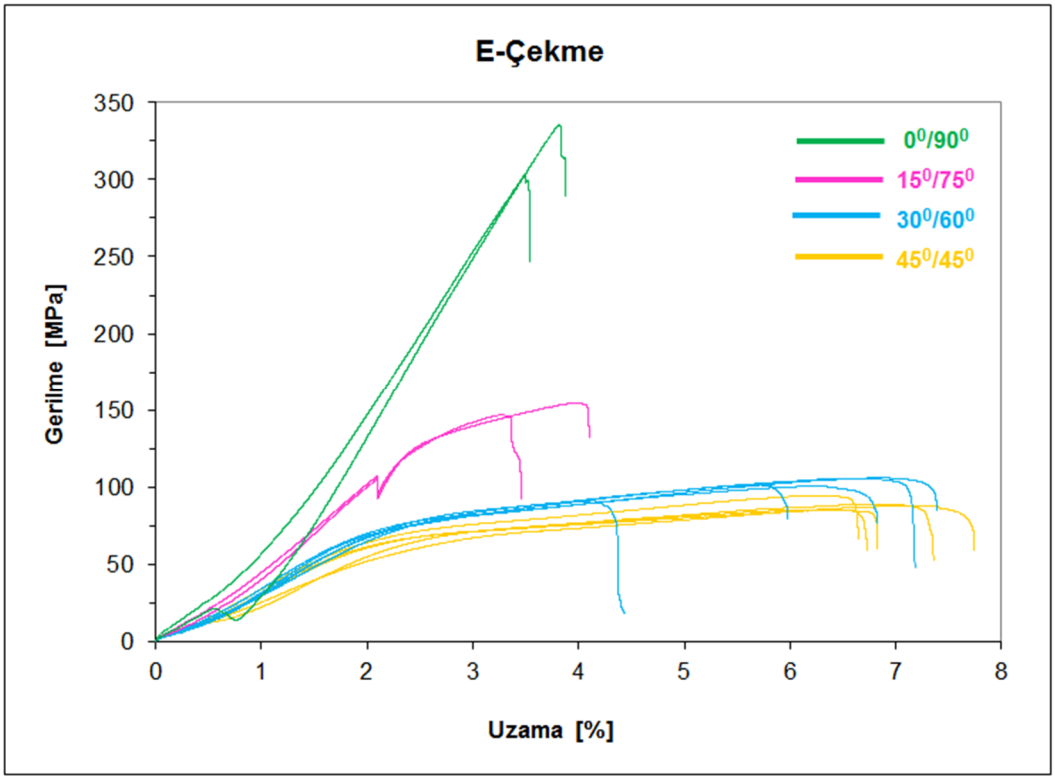
Şekil A.2: B numunesi çekme testi gerilme-uzama eğrileri



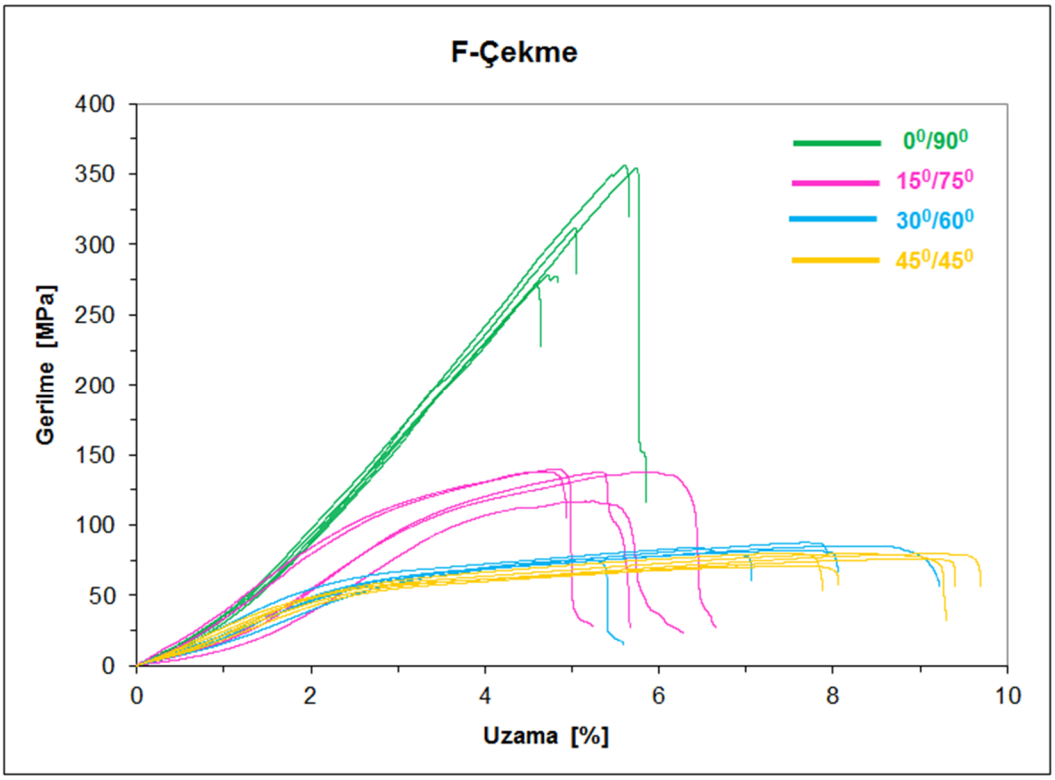
Şekil A.3: C numunesi çekme testi gerilme-uzama eğrileri



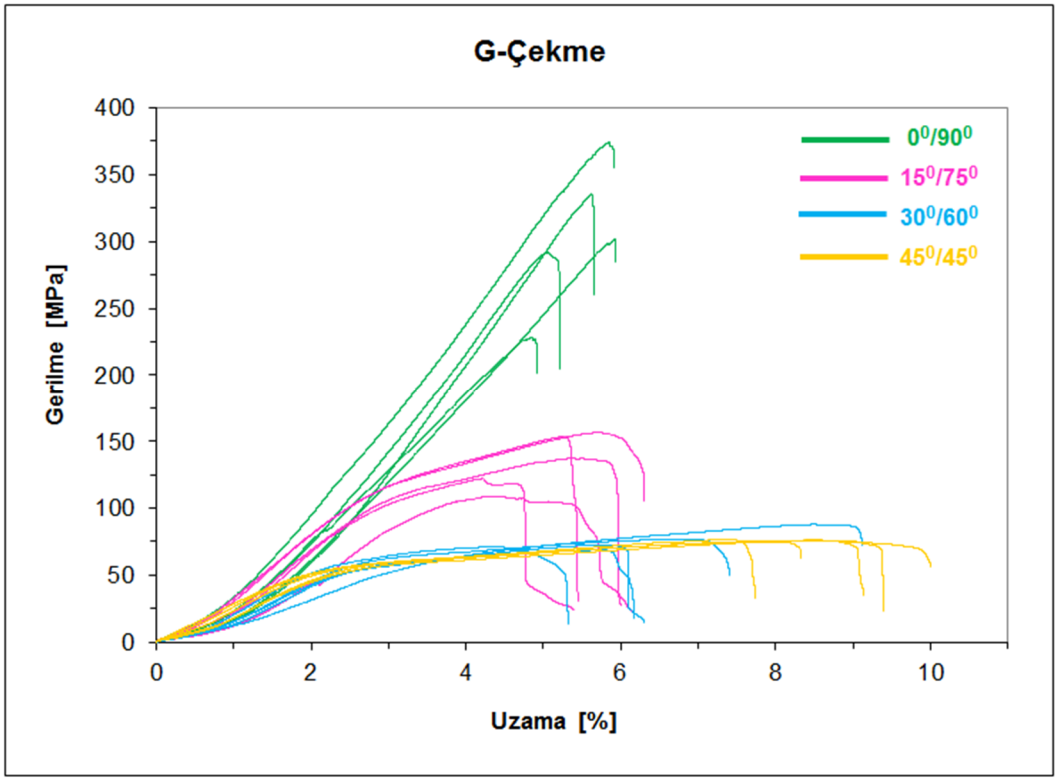
Şekil A.4: D numunesi çekme testi gerilme-uzama eğrileri



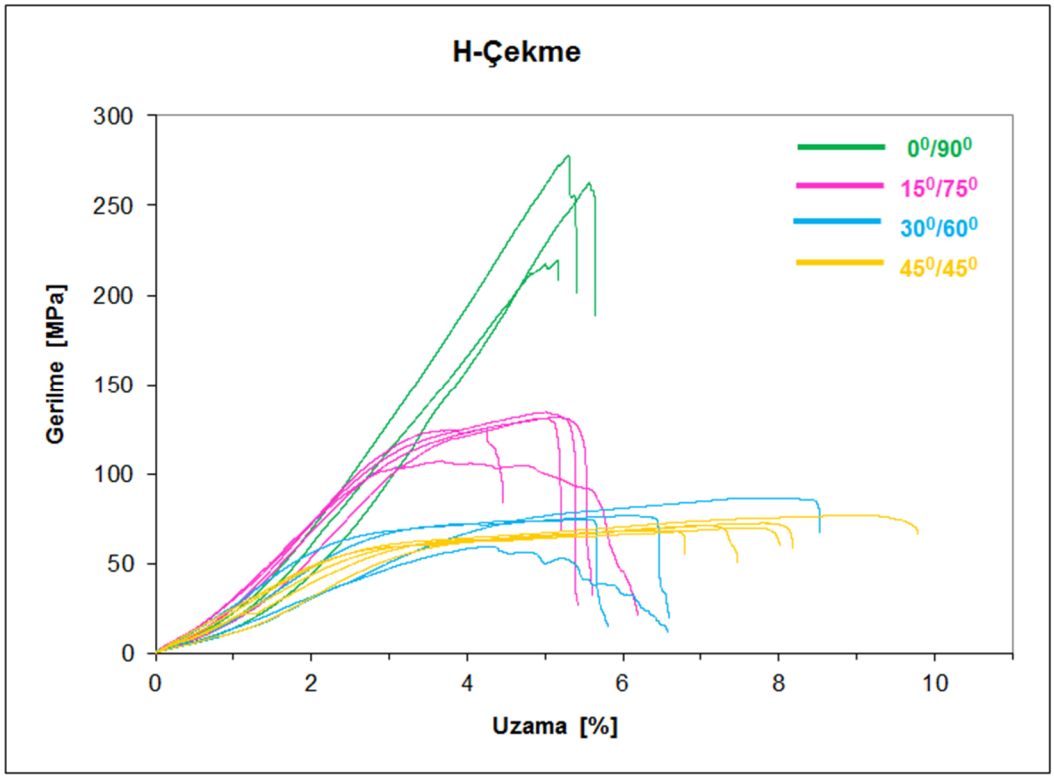
Şekil A.5: E numunesi çekme testi gerilme-uzama eğrileri



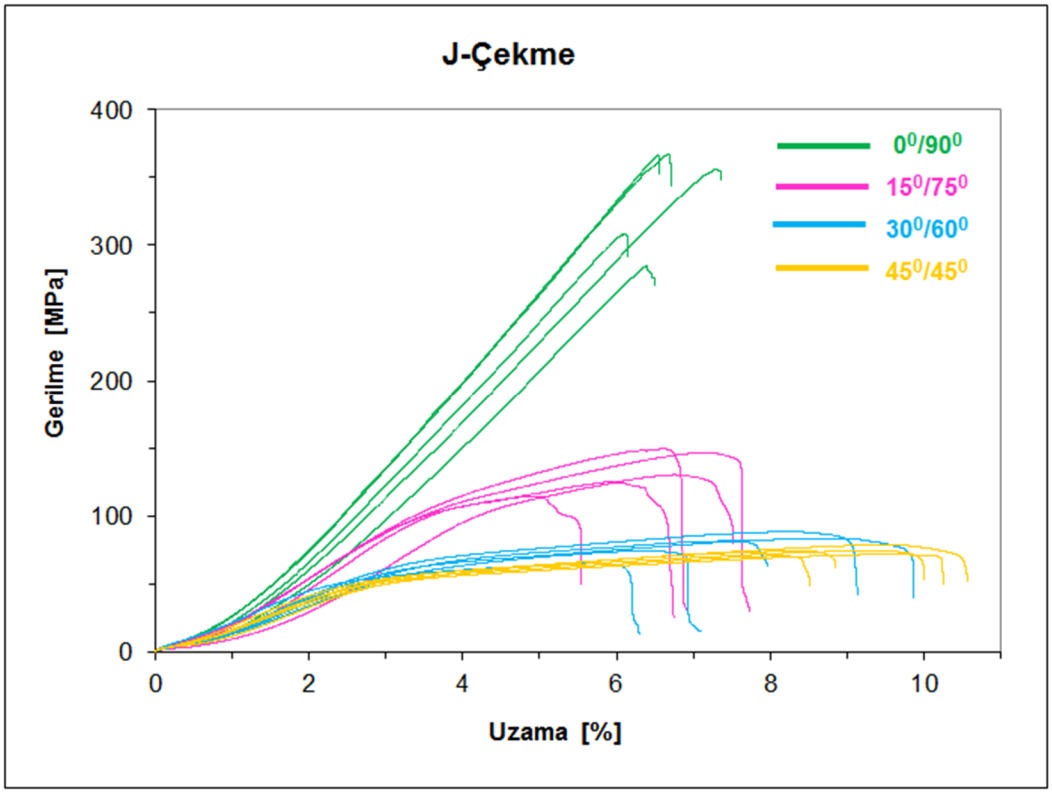
Şekil A.6: F numunesi çekme testi gerilme-uzama eğrileri



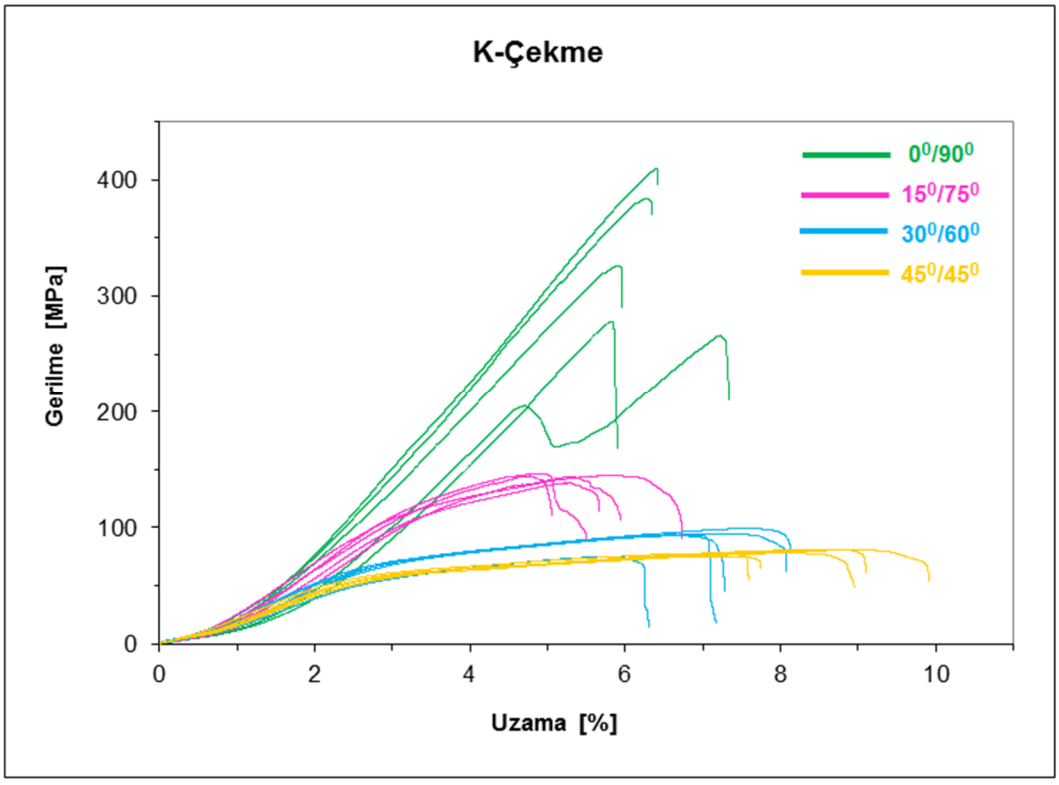
Şekil A.7: G numunesi çekme testi gerilme-uzama eğrileri



Şekil A.8: H numunesi çekme testi gerilme-uzama eğrileri

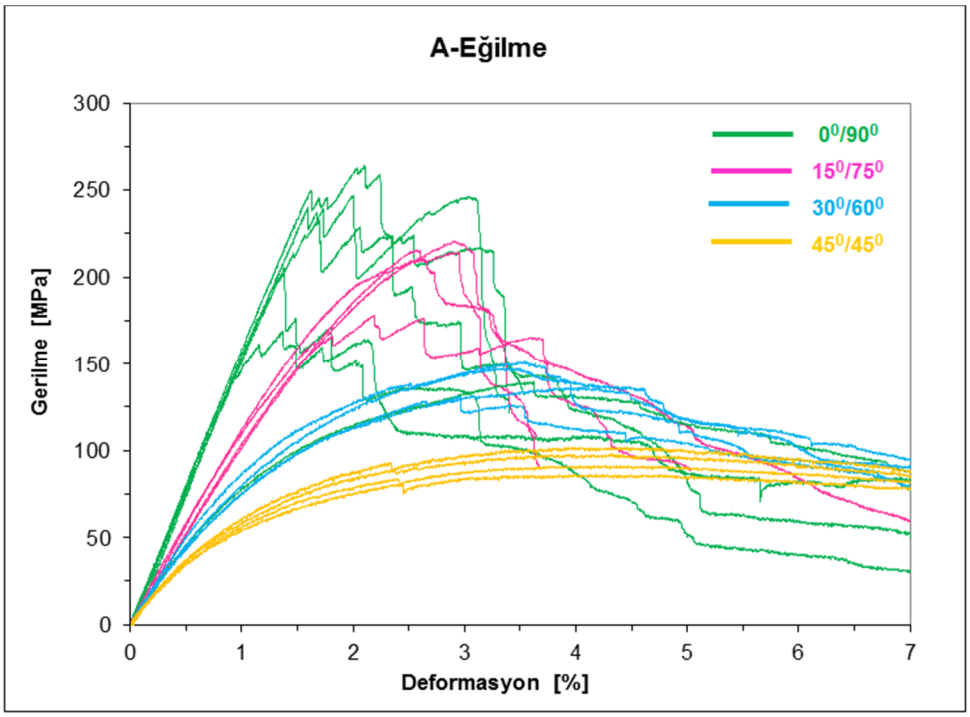


Şekil A.9: J numunesi çekme testi gerilme-uzama eğrileri

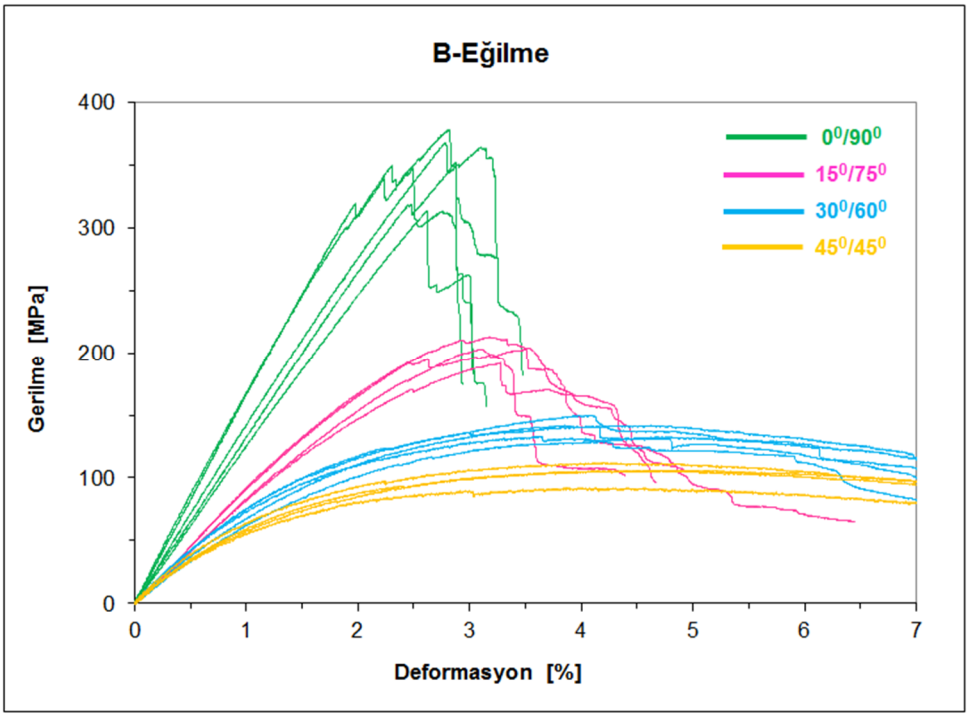


Şekil A.10: K numunesi çekme testi gerilme-uzama eğrileri

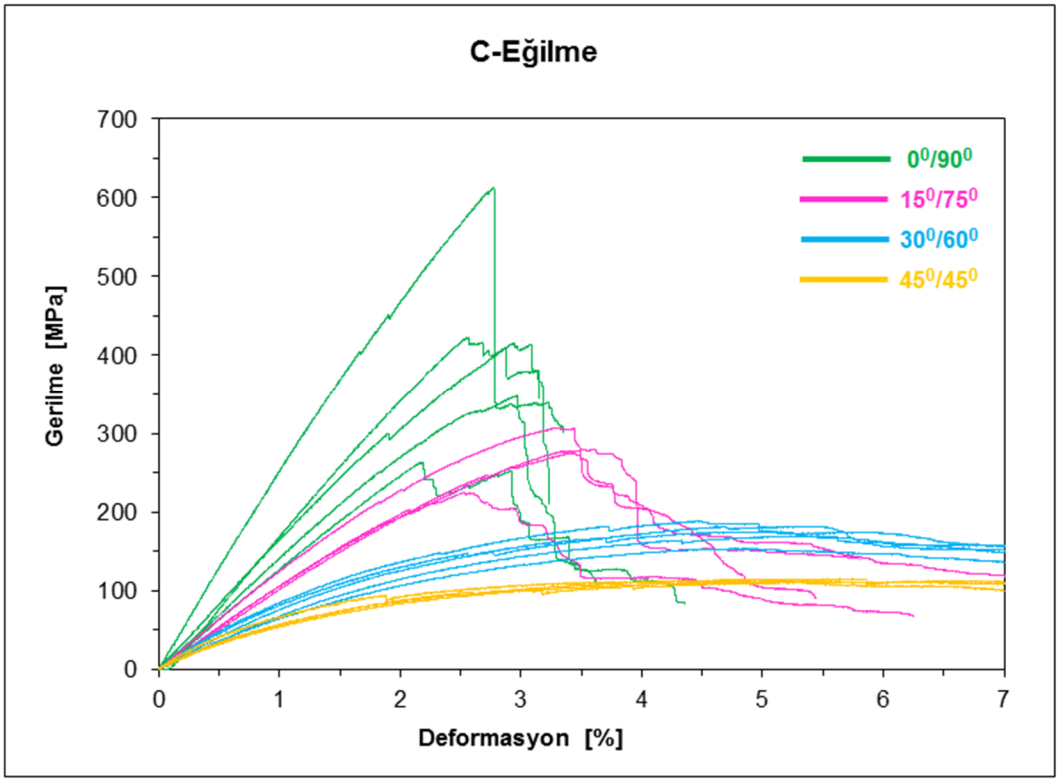
EK-B: Farklı Fiber Oryantasyon Açısına Eğme Çekme Testi Numunelerinin Gerilme-Uzama Eğrileri



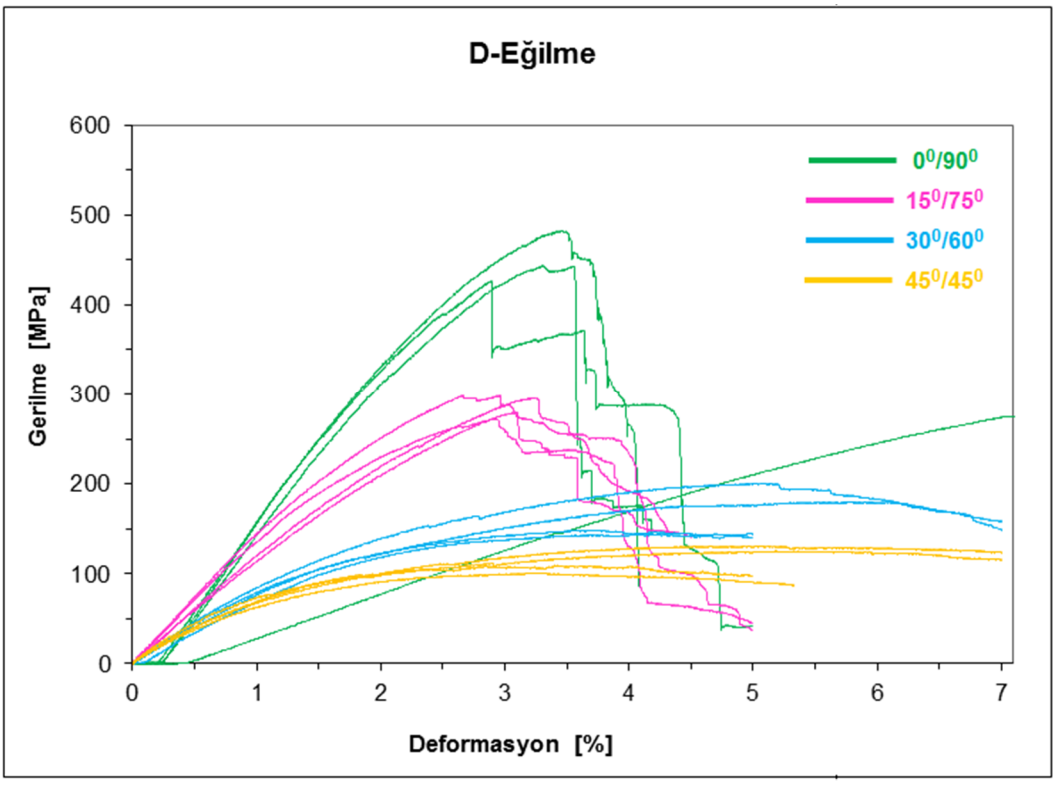
Şekil B.1: A numunesi eğilme testi gerilme-uzama eğrileri



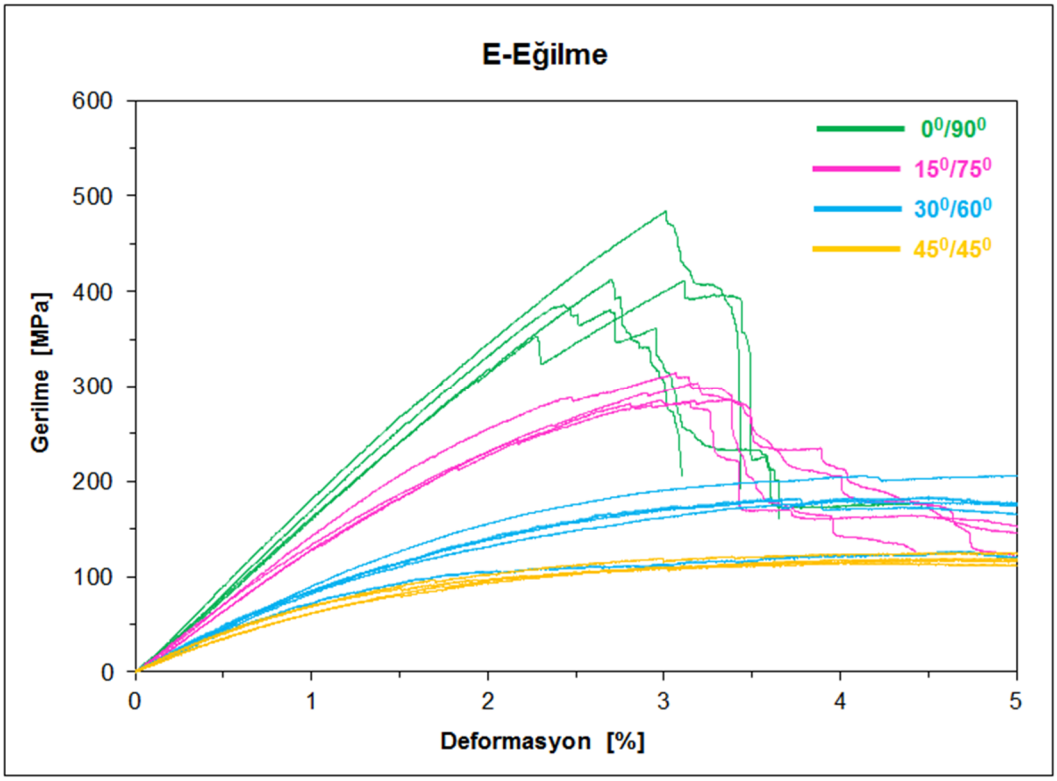
Şekil B.2: B numunesi eğilme testi gerilme-uzama eğrileri



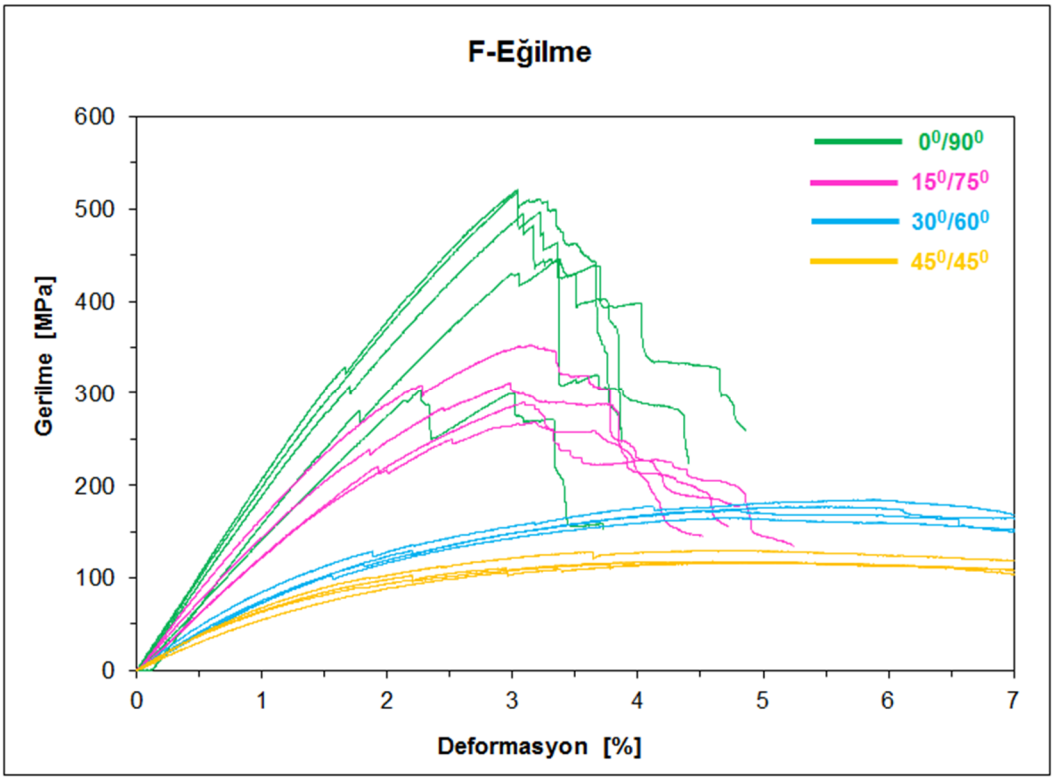
Şekil B.3: C numunesi eğilme testi gerilme-uzama eğrileri



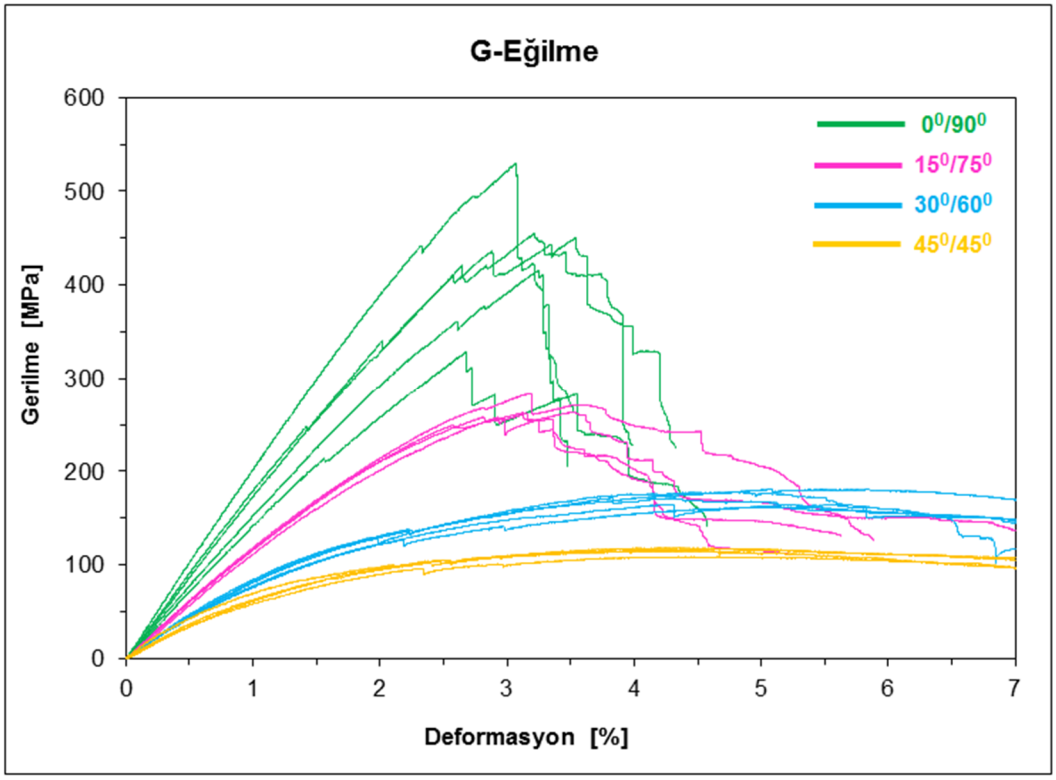
Şekil B.4: D numunesi eğilme testi gerilme-uzama eğrileri



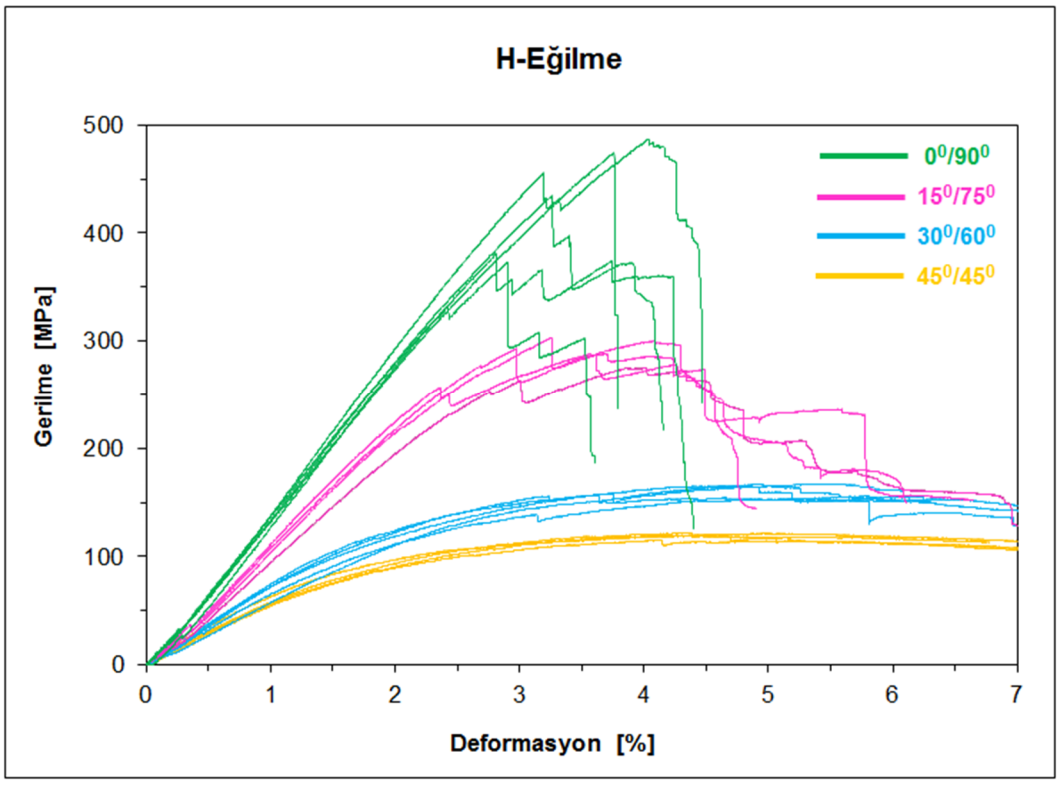
Şekil B.5: E numunesi eğilme testi gerilme-uzama eğrileri



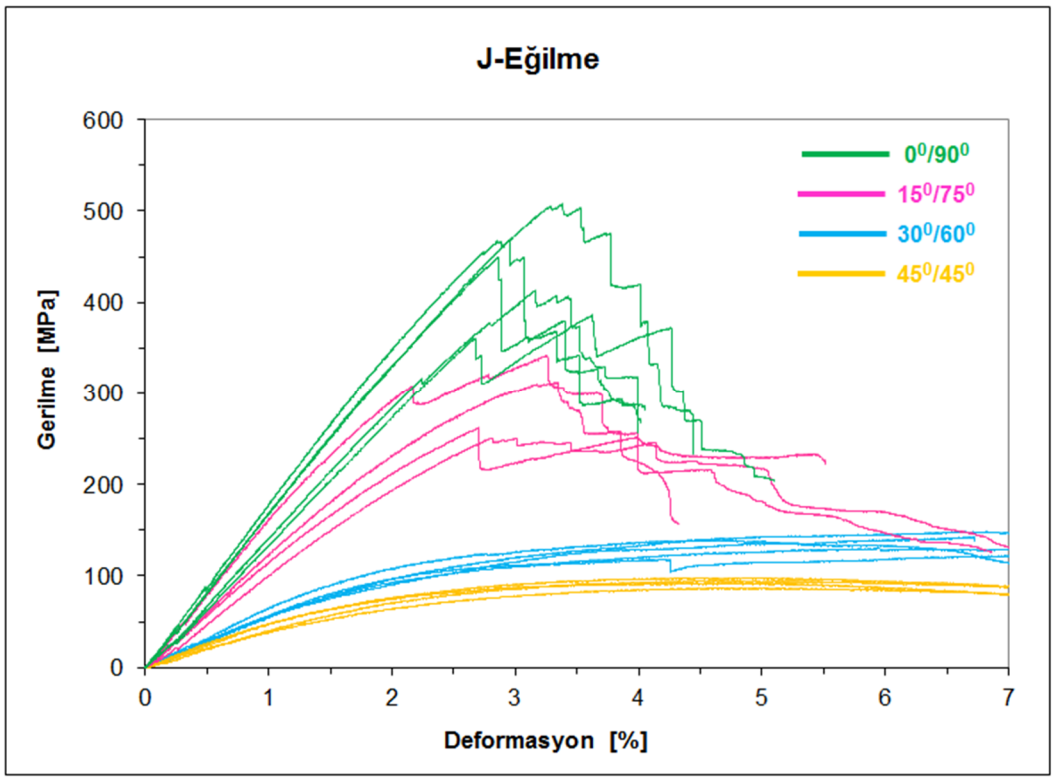
Şekil B.6: F numunesi eğilme testi gerilme-uzama eğrileri



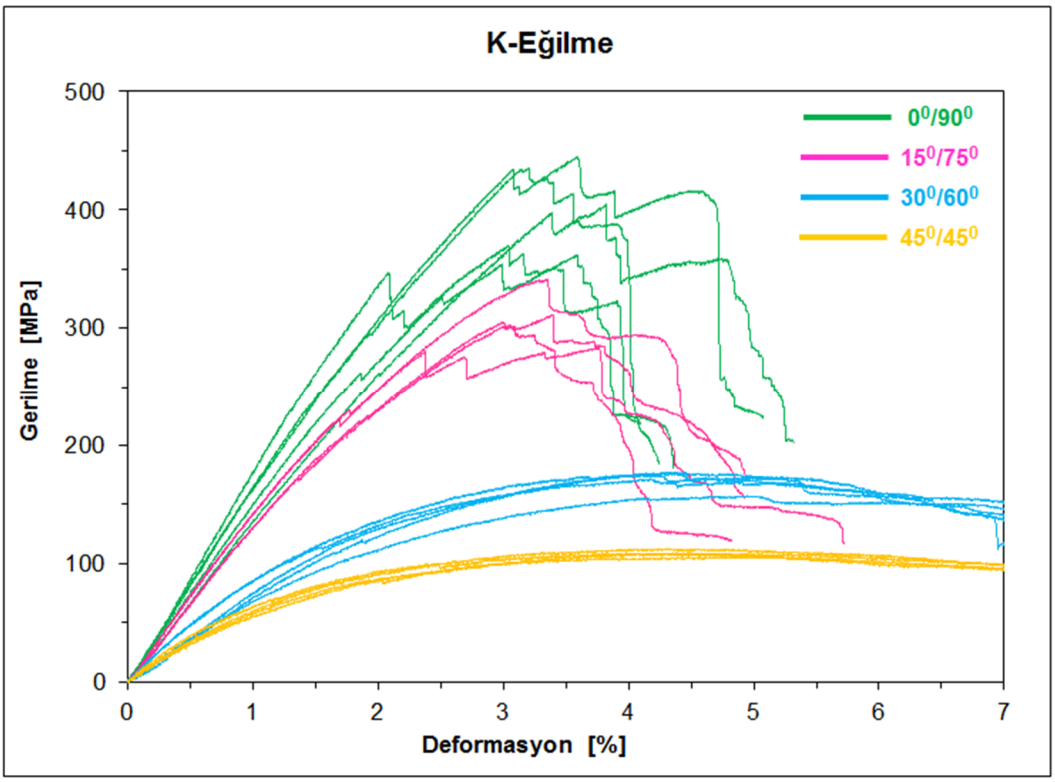
Şekil B.7: G numunesi eğilme testi gerilme-uzama eğrileri



Şekil B.8: H numunesi eğilme testi gerilme-uzama eğrileri



Şekil B.9: J numunesi eğilme testi gerilme-uzama eğrileri



Şekil B.10: K numunesi eğilme testi gerilme-uzama eğrileri