

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KOMPOZİT ÜRETİMİNDE OTOMATİK
FİBER SERME YÖNTEMİNİN
ARAŞTIRILMASI VE DENEYSEL
KARAKTERİZASYONU

Mustafa OLGUN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Mekatronik Mühendisliği Programı

Danışman

Doç. Dr. HATİCE MERCAN

Haziran, 2025

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KOMPOZİT ÜRETİMİNDE OTOMATİK FİBER SERME
YÖNTEMİNİN ARAŞTIRILMASI VE DENEYSEL
KARAKTERİZASYONU**

Mustafa OLGUN tarafından hazırlanan tez çalışması 19.06.2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Mekatronik Mühendisliği Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Hatice MERCAN
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Hatice MERCAN, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Kemal Mert DOĞAN, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Şebnem ÖZÜPEK, Üye
Boğaziçi Üniversitesi

Danışmanım Doç. Dr. Hatice MERCAN sorumluluğunda tarafımda hazırlanan “Kompozit Üretiminde Otomatik Fiber Serme Yönteminin Araştırılması ve Deneysel Karakterizasyonu” başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Mustafa OLGUN



Aileme

ve

eşime

TEŞEKKÜR

Çalışmam boyunca bana gerekli tüm desteği veren çok değerli danışmanım Doç. Dr. Hatice MERCAN hocama, tez çalışmasında kullanılması gereken malzeme temini, testlerin gerçekleştirilmesi için laboratuvar kullanımı konularında her türlü imkanı sağlayan şirketim Türk Havacılık Uzay Sanayii' ne, her türlü manevi destekleri için canım eşime ve sevgili aileme teşekkürlerimi borç bilirim.

Mustafa OLGUN

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ	viii
KISALTMA LİSTESİ	ix
ŞEKİL LİSTESİ	x
TABLO LİSTESİ	xii
ÖZET	xiii
ABSTRACT	xv
1 GİRİŞ	1
1.1 Litreratür Özeti.....	1
1.2 Tezin Amacı	4
2 KOMPOZİT MALZEME YAPISI	6
2.1 Kompozit Malzeme Nedir?	6
2.2 Kompozit Malzemelerin Tarihçesi.....	12
2.3 Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması	13
2.4 Kompozit Malzeme Uygulama Alanları	20
2.5 Otomatik Fiber Serme Yönteminde Kullanılan Kompozit Malzemeler	23
2.5.1 Termoset Kompozit Malzemeler	24
2.5.2 Termoplastik Kompozit Malzemeler	24
2.5.3 Kuru Fiber Kompozit Malzemeler	24
3 KOMPOZİT ÜRETİM YÖNTEMLERİ	25
3.1 El ile Serim Yöntemi.....	25
3.2 Vakumlu Torbalama Yöntemi	26

3.3	Reçine Aktarımlı Kalıplama Yöntemi.....	27
3.4	Vakum Destekli Reçine Aktarımlı Kalıplama Yöntemi	28
3.5	Otoklav Prosesi Yöntemi	28
3.6	Filament Sarma Yöntemi	30
3.7	Aynı Nitelikli Reçine Aktarımlı Kalıplama Yöntemi	31
3.8	Tezgah ile Serim Yöntemi.....	32
4	OTOMATİK FİBER SERME PROSESİ	34
4.1	Otomatik Fiber Serme Sistemi Nedir?	34
4.2	Otomatik Fiber Serme Sistemi Temel Bileşenleri	35
4.2.1	Fiber Serim Kafası Bölümleri	35
4.2.2	Robotik Kol veya Köprülü Sistem Bölümü	38
4.2.3	Mandrel veya Kalıp Bölümü.....	39
4.2.4	Bilgisayar Destekli Tasarım ve İmalat Yazılımları.....	40
5	OTOMATİK FİBER SERME ÜRETİMİNDE YAŞANAN SORUNLAR	42
5.1	Açısal Sapma.....	47
5.2	Boşluk ve Üst Üste Binmeler.....	48
5.3	Kıvrılmış Fiber.....	50
5.4	Köprü ve Köşe Oluşumu.....	51
5.5	Eksik- Yanlış Hizalandırılmış Fiber	53
5.6	Yabancı Madde.....	54
5.7	Reçine Birikintileri.....	55
6	DENEYSEL KURULUM	56
6.1	Test Tanımlamaları.....	56
6.2	Kullanılan Malzeme Tanımı.....	59
6.3	Çentiksiz Çekme Testi (ASTM D3039).....	60
6.4	Çentiksiz Basma Testi (ASTM D3410)	64

6.5 Delikli Çekme Testi (ASTM D5766).....	68
6.6 Delikli Basma Testi (ASTM D6484)	71
6.7 Literatürde Bulunan Deneysel Çalışmalar	73
7 SONUÇ	83
7.1 Çentiksiz Çekme Testi (ASTM D3039).....	83
7.2 Çentiksiz Basma Testi (ASTM D3410)	86
7.3 Delikli Çekme Testi (ASTM D5766).....	88
7.4 Delikli Basma Testi (ASTM D6484)	90
7.5 Sonuçlar ve Gelecekteki Çalışmalar	92
KAYNAKÇA	95
A ÖRNEK TEST NUMUNELERİ DENEY PARAMETRELERİ	103
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR	142

SİMGELİSTESİ

T_g	Camsı geçiş sıcaklığı
M	ubuk kütlesi (kg)
L	ubuk uzunluğu (m)
CV	Değışim katsayısı
d	Delik apı
ε	Gerinim
x_i	İ' inci terimin sonucu
A	Kesit alanı (m^2)
σ_{ult}	Malzeme mukavemeti
w	Numune genişliği
t	Numune kalınlığı
n	Numune sayısı
$\bar{x}$	Ortalama
s_{n-1}	Standart sapma
ΔL	Uzama miktarı
g	Yerçekimi ivmesi
u	Yer değıştirme
ρ	Yoğunluk (kg/m^3)
E	Young elastisite modülü
P	Yük (N)

KISALTMA LİSTESİ

ANRAK	Aynı Nitelikli Reçine Aktarımlı Kalıplama (SQRTM)
AÖÖ	Açılı, Ölçüm alanı, Orta hasar tipi
ASTM	Amerikan Test ve Malzeme Topluluğu (American Society for Testing and Materials)
BDİ	Bilgisayar Destekli İmalat (Computer Aided Manufacturing)
BDT	Bilgisayar Destekli Tasarım (Computer Aided Design)
ÇBT	Çentiksiz Basma Testi (Unnotched Compression Test)
ÇÇT	Çentiksiz Çekme Testi (Unnotched Tensile Test)
DBT	Delikli Basma Testi (Open Hole Compression Test)
DÇT	Delikli Çekme Testi (Open Hole Tensile Test)
IITRI	Teknoloji Araştırma Enstitüsü'nün Illinois Enstitüsü (Illinois Institute of Technology Research Institute)
KKÜ	Kalınlık boyunca, Kavrama/Tırnak, Üst hasar tipi
KPD	Kompozit Dizayn (Composites Design)
NK	Nümerik Kontrol (Numerical Control)
OFS	Otomatik Fiber Serme (Automated Fiber Placement)
PVA	Polivenil Alkol
RAK	Reçine Aktarımlı Kalıplama
SÖÖ	Süpürgelenmiş, Ölçüm alanı, Orta hasar tipi
VDRAK	Vakum Destekli Reçine Aktarımlı Kalıplama
YÖÖ	Yanal, Ölçüm alanı, Orta hasar tipi

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1	Kompozit malzeme bileşenleri.....	6
Şekil 2.2	Sıklıkla kullanılan mühendislik malzemelerinin bazı özelliklerinin karşılaştırılması	7
Şekil 2.3	Boeing 787' nin malzeme dağılımı.	8
Şekil 2.4	Airbus A350XWB akıllı gövde malzeme dağılımı	8
Şekil 2.5	Yıllara göre kullanılan mühendislik malzemeleri ve spesifik mukavemet değerlerinin karşılaştırılması.....	10
Şekil 2.6	Havacılık sanayide kullanılan polimer matrisler.....	16
Şekil 2.7	Çok yönlü kompozit lamine (0°,90°,0°,90°,0°).....	18
Şekil 3.1	El ile serim yöntemi şematik ve gerçek görünümü	25
Şekil 3.2	Vakumlu torbalama yönteminin şematik görünümü	26
Şekil 3.3	Reçine aktarımlı kalıplama yönteminin şematik görünümü.....	27
Şekil 3.4	Vakum destekli reçine aktarımlı kalıplama yönteminin şematik görünümü.	28
Şekil 3.5	Kompozitin otoklav istasyonunda kürlenmesi ve çeşitli aşamaları.....	29
Şekil 3.6	Filament sarma prosesinin gösterimi.....	30
Şekil 3.7	a) Geleneksel kompozit üretimi b) Net şekilli kompozit üretimi	31
Şekil 3.8	ANRAK yönteminin şematik gösterimi	31
Şekil 3.9	ANRAK ve otoklavda kürlenme döngülerinin karşılaştırmalı gösterimi.	32
Şekil 3.10	Yatay köprülü tip(a), dikey köprülü tip(b), robot kolu tip(c) OFS makinesi	33
Şekil 4.1	Otomatik fiber serme gelişmelerinin zaman çizelgesi	34
Şekil 4.2	Otomatik fiber serim kafası şematik gösterimi	35
Şekil 4.3	Fiberlerin gösterilmesi.....	36
Şekil 4.4	Fiber kesim mekanizması gösterilmesi	36
Şekil 4.5	Serim silindirin gösterilmesi	37
Şekil 4.6	Isıtma sisteminin gösterilmesi	37
Şekil 4.7	Otomatik fiber serme makinesi şematik gösterimi.....	38
Şekil 4.8	Otomatik fiber serim robotu gösterilmesi	39
Şekil 4.9	Serim kalıp bölümü gösterilmesi.....	39

Şekil 5.1 OFS yönteminde üretim kaynaklı sorunların gösterilmesi.....	42
Şekil 5.2 Referans eğri ile fiberlerin yönlendirilmesi gösterimi.	47
Şekil 5.3 Boşluk ve üst üste binmelerin gösterilmesi.....	48
Şekil 5.4 a) %0 Boşluk-Üst üste binme stratejisi, b) %50 Boşluk-Üst üste binme stratejisi, c) %100 Boşluk-Üst üste binme stratejisi	49
Şekil 5.5 Kıvrılmış fiber gösterilmesi.....	51
Şekil 5.6 Köşe oluşumu gösterilmesi.	52
Şekil 5.7 Köprü oluşumu gösterilmesi.	52
Şekil 5.8 Eksik-Yanlıs hizalanmış fiber gösterilmesi.....	53
Şekil 5.9 En küçük kesim mesafesi gösterilmesi.....	54
Şekil 5.10 Yabancı madde gösterilmesi.	54
Şekil 5.11 Reçine birikintileri oluşumu gösterimi.....	55
Şekil 6.1 Instron mekanik test cihazı ve üniteleri.....	59
Şekil 6.2 Hexcel malzemesi otoklav kürleme parametreleri	60
Şekil 6.3 ASTM D3039 Çekme testi plaka serim simülasyonu	61
Şekil 6.4 Çekme testi plaka serimi	62
Şekil 6.5 Çekme testi; a) Test düzeneği b) Test plaka numune boyutları	62
Şekil 6.6 ÇÇT deneyi numuneleri ve deney sonrası numune kırılması.....	63
Şekil 6.7 Basma testi; a) Test düzeneği b) Test plaka numune boyutları.....	64
Şekil 6.8 Basma test fikstürü (IITRI Fikstürü).....	65
Şekil 6.9 ÇBT test numunesi hasar tip ve kodlarının gösterilmesi.....	66
Şekil 6.10 ÇBT deneyi numuneleri ve deney sonrası numune kırılması.....	67
Şekil 6.11 ASTM D5766 DÇT plaka serim simülasyonu	68
Şekil 6.12 Delikli çekme testi plaka serimi	69
Şekil 6.13 Delikli çekme testi; a) Test düzeneği b) Test plaka boyutları.....	69
Şekil 6.14 DÇT test numunesi hasar tip ve kodlarının gösterilmesi	70
Şekil 6.15 DÇT deneyi numuneleri ve deney sonrası numune kırılması	71
Şekil 6.16 Delikli basma testi; a) Test düzeneği b) Test plaka boyutları	71
Şekil 6.17 DBT Boeing Fikstürü (a) Şematik görünüm (b) Gerçek resim.....	72
Şekil 6.18 DBT deneyi numuneleri ve deney sonrası numune kırılması	73
Şekil 6.19 Aymen ve arkadaşları tarafından yapılan DBT deney konsepti.....	81
Şekil 7.1 Çentiksiz çekme testi “Çekme gerilimi – Yer değiştirme” grafiği.....	84
Şekil 7.2 Çentiksiz basma testi “Basma gerilimi – Yer değiştirme” grafiği	86
Şekil 7.3 Delikli çekme testi “Çekme gerilimi – Yer değiştirme” grafiği.....	89
Şekil 7.4 Delikli basma testi “Basma gerilimi – Yer değiştirme” grafiği	91

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1	Bazı mühendislik malzemelerinin mukavemetsel karşılaştırılması.....	11
Tablo 2.2	Havacılık sanayide kullanılan bazı kompozit malzemeler ve uygulama alanları	21
Tablo 2.3	OFS yönteminde kullanılan malzeme türlerinin özellikleri.....	23
Tablo 5.1	Üretim hata türlerinin ve ilişkili kategorilerinin listesi.....	43
Tablo 5.2	Laminatlardaki kusurlar ile mekanik özellikler arasındaki bağlantıları inceleyen literatürdeki çalışmalar	45
Tablo 6.1	Gerçekleştirilen deney tasarımı özeti.....	57
Tablo 6.2	ASTM standartları deney tasarımı özeti	58
Tablo 6.3	HexPly® M91/34%/UD194/IM7 malzeme özellikleri.....	60
Tablo 6.4	Falcó ve arkadaşları literatür test sonuçları	74
Tablo 6.5	Croft ve arkadaşları literatür test sonuçları	74
Tablo 6.6	Deepak ve arkadaşları literatür test sonuçları	76
Tablo 6.7	Lan ve arkadaşları literatür test sonuçları	77
Tablo 6.8	Guin ve arkadaşları literatür test sonuçları	78
Tablo 6.9	Woigk ve arkadaşları literatür test sonuçları	79
Tablo 6.10	Turoski tarafından yapılan test sonuçları	80
Tablo 6.11	Norvan tarafından yapılan test sonuçları	80
Tablo 6.12	Aymen ve arkadaşları tarafından yapılan DBT test sonuçları	82
Tablo 7.1	Çentiksiz çekme testi numuneleri detaylı sonuçları	84
Tablo 7.2	Çentiksiz basma testi numuneleri detaylı sonuçları.....	86
Tablo 7.3	Delikli çekme testi numuneleri detaylı sonuçları	89
Tablo 7.4	Delikli basma testi numuneleri detaylı sonuçları.....	91
Tablo 9.1	Çentiksiz çekme testi örnek numune test parametreleri	103
Tablo 9.2	Çentiksiz basma testi örnek numune test parametreleri.....	115
Tablo 9.3	Delikli çekme testi örnek numune test parametreleri	123
Tablo 9.4	Delikli basma testi örnek numune test parametreleri.....	128

KOMPOZİT ÜRETİMİNDE OTOMATİK FİBER SERME YÖNTEMİNİN ARAŞTIRILMASI VE DENEYSEL KARAKTERİZASYONU

Mustafa OLGUN

Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Doç. Dr. Hatice MERCAN

Kompozit malzemelerin havacılık ve savunma sanayiinde kullanımının artması ile birlikte kompozit imalat yöntemleri üzerine çalışmalar ve gelişmeler yaşanmıştır. El ile serim yönteminde rastlanan düşük tekrarlanabilirlik, üretim hızı düşüklüğü, büyük ve kompleks yapıların imalatının zorluğu, hurda malzeme oranının fazla olması gibi sorunlar sebebiyle otomatik fiber serme yöntemi gibi yenilikçi imalat yöntemleri geliştirilmiştir. Otomatik fiber serme yöntemi bir çok avantajı olmasının yanında makine ve üretilen geometrilerden kaynaklı bazı sorunlar da ortaya çıkarmaktadır. Bu çalışmada otomatik fiber serme yöntemi detaylı olarak anlatılmıştır. Bu yöntem ile üretilen yapılardaki imalat kaynaklı hatalar ve çözümleri incelenmiştir. Otomatik fiber serme yöntemi ile üretilmiş test plakalarından elde edilmiş delikli ve deliksiz numuneler çentiksiz çekme testi, çentiksiz basma testi, delikli çekme testi, delikli basma testi olmak üzere 4 farklı yöntem ile deneyler yapılmış ve literatürde aynı malzeme ile gerçekleştirilen deneysel çalışma olmadığından üretici firmanın paylaştığı sayısal değerler ile karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada kompozit imalat sürecinin tüm safhaları detayları

ile açıklanmıştır. Üretim kalitesinin yükseltilebilmesi imalat aşamalarının anlaşılması ile mümkün olacaktır. Literatür araştırmasında deneylerde kullanılan aynı malzeme ile yapılan çalışma bulunamamıştır ve deney sonuçları doğrudan üretici firma tarafından paylaşılan sayısal değerleri ile değerlendirilmiştir. Deney sonuçlarında çentiksiz çekme testi ve çentiksiz basma testi sonuçları üretici firmanın paylaştığı sayısal değerlerden düşük ölçülmüştür ve sonuçlar bölümünde paylaşılmaktadır. Deney sonuçlarında delikli çekme testi ve delikli basma testi değerleri üretici firma tarafından paylaşılan sayısal sonuçlarla tutarlılık göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Otomatik fiber serme, çentiksiz çekme testi, çentiksiz basma testi, delikli çekme testi, delikli basma testi

ABSTRACT

RESEARCH AND EXPERIMENTAL CHARACTERIZATION OF AUTOMATIC FIBER PLACEMENT METHOD IN COMPOSITE PRODUCTION

Mustafa OLGUN

Department of Mechatronics Engineering

Master of Science Thesis

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Hatice MERCAN

With the increasing use of composite materials in the aviation and defense industries, there have been studies and developments on composite manufacturing methods. Due to the problems encountered in the hand layup method such as low repeatability, low production speed, difficulty in manufacturing large and complex structures, and high scrap material rate, innovative manufacturing methods such as the automatic fiber placement method have been developed. Although the automated fiber placement method has many advantages, it also causes some problems due to the machine and the produced geometries. In this study, the automated fiber placement method is explained in detail. Manufacturing-related errors and their solutions in the structures produced with this method were examined. Test plates produced by automated fiber placement method; Experiments were carried out with 4 different methods: unnotched tensile test, unnotched compression test, open hole tensile test, open hole compression test, and were compared with the numerical values shared by the manufacturer, since there

is no experimental study conducted with the same material in the literature. In this study, all stages of the composite manufacturing process are explained in detail. Improving production quality will be possible by understanding the manufacturing stages. In the literature search, no study was found with the same material used in the experiments, and the experimental results were evaluated directly with the numerical values shared by the manufacturer. In the experimental results, the unnotched tensile test and the unnotched compression test results were measured lower than the numerical values shared by the manufacturer and they are shared in the results section. In the experimental results, the open hole tensile test and the open hole compression test are consistent with the numerical results shared by the material manufacturer.

Keywords: Automated fiber placement, unnotched tensile test, unnotched compression test, open hole tensile test, open hole compression test

1.1 Literatür Özeti

Havacılık ve uzay endüstrileri, sivil ve askeri hava araçları sürekli olarak performans artışına ihtiyaç duymaktadır. Bu nedenle yeni yapısal malzemelerin geliştirilmesi bu amaca yönelik bir zorunluluktur. Yapısal malzemelerin havacılık ve uzay endüstrisi için yüksek özgül sertlik ve tolerans değerlerine sahip olması gerekmektedir. Kompozit malzemelerin bu alanlarda kullanımı oldukça yaygındır ve yakın gelecekte çok daha önemli hale gelecektir. Bunun temel nedeni kompozitlerin, yüksek performanslı polimerlerden oluşan matris yapıları nedeniyle, havacılık, savunma, enerji, elektronik ve otomotiv endüstrilerinde geleneksel polimerlere göre daha avantajlı olmasıdır [1]. El ile serim yöntemi ile başlayan geleneksel kompozit üretim yöntemleri tecrübeli teknisyenler ve yoğun bir çalışma gerektirmektedir. Geleneksel kompozit üretimi yöntemleri bu alanda önemli ilerlemelerin kaydedilmesini engellemektedir. Norvan [2] tarafından yapılan çalışmada gelişmiş kompozit üretim yöntemlerinden biri olan otomatik fiber serme (OFS) yöntemi, karmaşık kompozit malzemelerin üretimini mümkün kıldığı belirtilmektedir. Geleneksel yöntemlerle karşılanamayan birçok endüstriyel ihtiyacı karşılayabilen bu yöntem; yüksek doğruluk, yüksek tekrarlanabilirlik, düşük hurda oranı ve yüksek üretim hızı gibi avantajlar sunduğu ve bu sayede firmaların rekabet gücünün arttığı belirtilmektedir. Brasington ve arkadaşları [3] tarafından yapılan çalışmada OFS üretiminin bütün döngüsü hakkında genel bir anlayış oluşturmak için kompozit tasarımından üretilen parçanın denetimine kadar tüm OFS sürecini özetlemeyi amaçlamaktadır. OFS sisteminin tarihsel gelişiminin incelendiği çalışmada başlangıç çalışmalarının 1960'lı yıllara dayandığı belirtilmektedir. Yıllar içerisinde gerçekleştirilen çalışmalar sayesinde en son endüstriyle ilgili OFS araştırma konuları, yüksek verimli OFS ve minimum kusurlu

serimlerden oluşmaktadır [3]. OFS yöntemi birçok avantaj içermesine rağmen üretimden ve zor parça geometrilerinden kaynaklanan üretim hataları meydana gelmektedir. Harik ve arkadaşları [4] tarafından yapılan çalışmada oluşan hataların kompozit yapının mukavemeti üzerinde etkileri araştırılmaktadır. Üretim kaynaklı oluşan hata tipleri bir tablo halinde özetlenmiş ve hata tipi, hatanın sebebi ve oluşan hatanın kompozit yapı üzerindeki önemi açıklanmıştır. Bu tabloya ek bir sütun olarak üretimde yaşadığımız tecrübelerden faydalanarak muhtemel çözüm önerileri bölümü eklenmiştir. Heinecke ve arkadaşları [5] tarafından yapılan çalışmada ise OFS' nin geleneksel üretim yöntemlerine göre benzer veya daha iyi performans gösteren parçalar ürettiği belirtilmektedir, ayrıca imalat sırasında ortaya çıkan kusurları detaylı olarak açıklandığı çalışmada ve bu kusurların nihai ürün üzerindeki etkilerini ayrıntılı olarak ele almaktadır. Ayrıca, Shouzheng ve arkadaşlarının [6] yaptığı çalışmada, laminatlardaki kusurları inceleyen literatür taramasına yer verilmiştir ve literatürde yapılan deneysel araştırmalar bir araya getirilmiştir. Bu çalışmada, söz konusu kusurların deneysel testleri ve simülasyonları ayrıntılarıyla anlatılmaktadır. Literatürde gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda bu hatalar test plakalarına uygulanarak Amerikan Test ve Malzeme Topluluğu (ASTM) standartlarına uygun olarak testler gerçekleştirilmektedir. Croft ve arkadaşları [7] tarafından yapılan çalışmada OFS yönteminde üretim sırasında oluşabilen dört temel kusur türüne (boşluk, üst üste binme, yarım boşluk/üst üste binme ve bükülmüş elyaf) odaklanılmıştır. Bu kusurların nihai dayanım üzerindeki etkisi deneysel olarak değerlendirilmiştir. Çalışmada, kusurların hem lamine seviyesindeki (çentiksiz çekme, çentiksiz basma ve düzlem içi kesme) hem de laminat seviyesindeki (delikli çekme ve delikli basma) mekanik performans üzerindeki etkileri karşılaştırılmıştır. Deney sonuçlarına göre, tekil ve izole kusurlar mekanik performansı sınırlı düzeyde etkilemektedir: lamina seviyesinde yaklaşık %5, laminat seviyesinde ise yaklaşık %13'e kadar azalma gözlemlenmiştir. Delikli çekme testinde (DÇT) kusurların etkisi maksimum azalma %1 (boşluk) olmuştur ve ihmal edilebilir düzeyde bulunmuştur. Gelecekteki çalışmalarda birden fazla kusurun birleşik etkilerinin incelenmesi gerektiği belirtilmiştir. Deepak [8] ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada OFS yöntemi kullanılarak kompozit uçak gövdesi kaplaması üretimi için bir mandrelin tasarımına, analizine ve üretimine odaklanılmaktadır. Üretilen mandrelin dayanımını değerlendirmek amacıyla çekme ve basma testleri yapılmıştır. Bu testler, formlu OFS laminatları,

düz OFS laminatları ve el ile serim laminatları arasında karşılaştırma yapmak için kullanılmıştır. Düz OFS laminatları ve el ile serim laminatlarının çekme ve basma mukavemetlerinde neredeyse özdeş sonuçlar gözlenmiştir. Formlu OFS laminatlarının nihai basma mukavemeti, düz laminatlara göre %1.6 ile %8.7 daha yüksek bulunmuştur. Formlu OFS laminatının çekme mukavemetindeki farklar ise %0.137 düşük ile %4.65 yüksek arasında değişmektedir. Sonuçlar OFS ile üretilen düz ve formlu laminatların geleneksel el ile serim yöntemleriyle üretilen laminatlara göre benzer veya daha iyi mekanik özelliklere sahip olduğunu göstermektedir; bu da OFS' nin havacılık endüstrisinde üretim verimliliği ve hassasiyetindeki avantajlarını vurgulamaktadır. Falcó ve arkadaşları [9] tarafından yapılan çalışmalarda OFS teknolojisi kullanılarak üretilen kompozit laminatların üretim kaynaklı kusurlara karşı dayanıklılığı araştırılmaktadır. Özellikle, kurslar arasında oluşan serim açısı sapmaları, boşluklar ile üst üste binmelerin, gerilim altındaki kompozitlerin mekanik performansı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çalışma özellikle çentiksiz numunelerde kusurların önemli bir etkisi varken, delikli numunelerde deliğin kendisinin neden olduğu stres konsantrasyonunun kusurlardan daha baskın bir faktör olduğunu ortaya koymaktadır. Bu çalışmada ayrıca serim katmanları arasında yanallı kaydırma yapılması ve %0 boşluk stratejisi ile serim yapılmasının üretim kaynaklı hataların etkisini azaltmada etkili bir çözüm olduğu belirtilmiştir. Guin ve arkadaşları [10] tarafından yapılan çalışmalarda OFS yöntemiyle üretilen kompozit laminatlarda en yaygın kusurlardan biri olan kurslar arasındaki boşlukların kompozitin mekanik performansı üzerindeki etkileri incelenmektedir. Bu boşlukların çekme ve basma gibi farklı yükleme koşulları altındaki davranışları deneysel olarak analiz edilmiştir. Sonuçlar kurslar arasındaki boşlukların mukavemet değerleri üzerinde etkisi olduğunu ve özellikle ftüm katmanlarda boşluk bulunduğunda çekme ve basma mukavemetinde önemli düşümlere yol açtığını göstermektedir. Bununla birlikte, boşluklar sadece 90° katmanlarda bulunduğunda mekanik özelliklerin etkilenmediği tespit edilmiştir, bu da OFS üretim operasyonlarında belirli bir boşluk toleransının kabul edilebilir olabileceğini düşündürmektedir. Woigk ve arkadaşları [11] tarafından yapılan çalışmalarda OFS yöntemiyle üretilen kompozit laminatlardaki boşluklar ve üst üste bindirmeler gibi kusurların etkisi deneysel olarak araştırılmıştır. Bu kusurların özellikle çekme ve basma mukavemeti üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çalışma, kusurların numunelerin nihai mukavemetini ve arıza modlarını nasıl değiştirdiğini

vurgulamakta ve bu bulguları literatürdeki diğer ilgili araştırmalarla karşılaştırmalı olarak açıklamaktadır. Özellikle "boşluk ve üst üste bindirmeler" olarak adlandırılan birleşik kusur konfigürasyonunun, tekli kusurlara kıyasla mukavemette daha önemli azalmalar gösterdiği belirtilmektedir.

Aymen ve arkadaşları [12] tarafından yapılan çalışmalarda OFS üretim süreçlerinde oluşan boşlukların ve üst üste binmelerin kompozit yapıların delik içi basma mukavemeti üzerindeki etkisini deneysel ve sayısal olarak araştırmaktadır. Çalışma, bu üretim kusurlarının konum ve tipine bağlı olarak mukavemeti olumlu, olumsuz veya ihmal edilebilir şekillerde etkileyebileceğini göstermektedir. Bulgular, delik kenarındaki gerilim yoğunluğunun kusur yapılarına bağlı olduğunu ve numune genişliği gibi parametrelerin de delik içi basma mukavemetindeki değişimleri etkilediğini ortaya koymaktadır.

Bu çalışmada, OFS sistemi tüm bileşenleri ve çalışma prensipleri ile birlikte ayrıntılı olarak incelenmiştir. OFS sürecinde karşılaşılan üretim kaynaklı hatalar ve bu hatalara ilişkin teknik bilgiler detaylı olarak sunulmuştur.

Çalışma kapsamında, ASTM standartlarına uygun olarak deney numuneleri OFS yöntemi kullanılarak üretilmiştir. Üretilen kompozit test plakalarının çekme ve basma dayanımları, serim açısı ve serim kat sayısı gibi farklı serim parametreleri göz önünde bulundurularak değerlendirilmiştir. Numunelerin yapısal davranışlarını daha kapsamlı bir şekilde analiz edebilmek amacıyla hem çentiksiz hem de delikli konfigürasyonlarda farklı mekanik testler gerçekleştirilmiştir: çentiksiz çekme testi, çentiksiz basma testi, delikli çekme testi ve delikli basma testi. Bu testler sayesinde OFS yöntemiyle üretilen kompozit malzemelerin çeşitli yükleme durumları altındaki davranışları ayrıntılı biçimde incelenmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar kapsamında, kullanılan test prosedürleri, deney numunelerinin geometrik özellikleri ve uygulanan test standartları şekiller ve tablolar aracılığıyla görsel olarak desteklenmiştir.

1.2 Tezin Amacı

Bu tezde, savunma sanayii ve havacılık gibi ileri teknoloji gerektiren alanlarda yaygın olarak kullanılan kompozit malzemelerin üretiminde tercih edilen otomatik fiber serme tekniğinin araştırılması ve bu yöntemle üretilen kompozit plakaların

deneysel karakterizasyonunun belirlenmesi amaçlanmaktadır. OFS yöntemi oldukça detaylı bir disiplin olduğundan sadece kompozit üretimi ve testlerin gerçekleştirilmesini değil aynı zamanda üretim kaynaklı hatalar, testlerin yapıldığı standartlar ve literatürdeki çalışmaların bu alanlardaki yaklaşımlarını da içerir. Bundan dolayı OFS sisteminin bölümleri, üretim kaynaklı hatalar, bu yöntemde kullanılan tasarım ve imalat yazılımları, test standartları ve test sonuçları ayrıntılı olarak sunulmaktadır.

Bölüm 2' de kompozit malzemenin yapısı tanımlanmaktadır. Kompozit malzemelerin tarihçesi, sınıflandırması, uygulama alanları hakkında bilgiler sunulmaktadır. Son olarak OFS yönteminde kullanılan kompozit malzemeler bir tablo halinde özetlenmekte ve her biri ayrıca detaylı olarak açıklanmaktadır.

Bölüm 3'te kompozit üretim yöntemleri hakkında detaylı bilgiler içermektedir. El ile serim yöntemi ile başlayan yöntemler, vakumlu torbalama yöntemi, reçine aktarımlı kalıplama yöntemi, vakum destekli reçine aktarımlı kalıplama yöntemi, otoklav prosesinin incelenmesi, filament sarma yöntemi, aynı nitelikli reçine aktarımlı kalıplama yöntemi hakkında bilgiler içermektedir. Son olarak tezgah ile serim yöntemi açıklanmaktadır.

Bölüm 4'te OFS yöntemi tanımlanmakta ve temel sistem bileşenleri açıklanmaktadır. Fiber serim kafası bölümü, robotik kol veya köprülü sistem bölümü, mandrel veya kalıp bölümü ve bilgisayar destekli tasarım ve imalat yazılımları hakkında bilgiler paylaşılmaktadır.

Bölüm 5'te OFS yönteminde yaşanan üretim kaynaklı hatalar incelenmektedir. Açısal sapma, boşluk ve üst üste binmeler, kıvrılmış fiber, köprü ve köşe oluşumu, eksik- yanlış hizalandırılmış fiber, yabancı madde kusuru ve reçine birikintileri hakkında bölümler içerisinde bilgiler içermektedir.

Bölüm 6' da gerçekleştirilen çentiksiz çekme testi, çentiksiz basma testi, delikli çekme testi ve delikli çekme testine ait standartlar ayrı bölümler halinde detaylı olarak açıklanmaktadır. Ayrıca literatürde bulunan OFS yöntemi kullanılarak üretilen numunelerde gerçekleştirilen deneysel çalışmalar listelenmektedir.

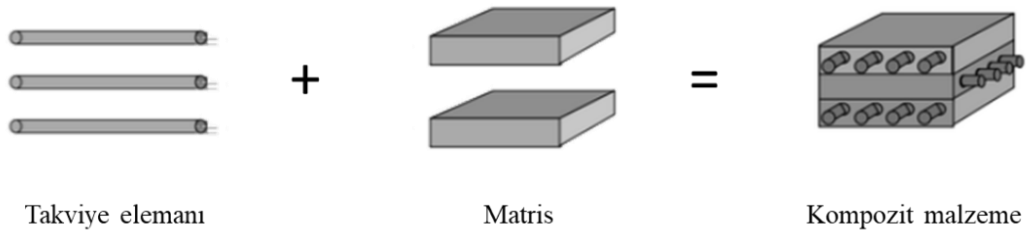
Bölüm 7'de OFS yöntemiyle üretilen test plakaları üzerinde gerçekleştirilen çentiksiz çekme testi, çentiksiz basma testi, delikli çekme testi ve delikli basma testi sonucunda elde edilen deneysel veriler grafiksel olarak sunulmaktadır.

2

KOMPOZİT MALZEME YAPISI

2.1 Kompozit Malzeme Nedir?

Kompozit malzeme; aynı veya farklı gruptan iki ya da daha fazla malzemenin üstün özelliklerini tek bir malzemede toplamak amacıyla makro düzeyde (birbiri içerisinde çözünmeyecek şekilde) birleştirilmesiyle oluşturulan malzemedir. Şekil 2.1’de gösterildiği gibi kompozit malzeme bir matrisin takviyelerle kombinasyonu ile sonuçlanmaktadır. Matris, kompozit malzemelerde takviye malzemesini bir arada tutan maddeye verilen addır. Takviye malzemelerini bir arada tutan ve yükleri aktaran sürekli faz bölgesi olarak tanımlanmaktadır. Takviye elemanları ise, malzemeye mukavemet ve sertlik kazandıran kesikli fazdır. Fiberlerin ve de matrisin özellikleri (mukavemet ve modül) aynı olmadığından, kompozit malzemelerin sonuçtaki özellikleri bu iki malzemenin bir karışımıdır. Kompozit malzeme kullanmanın amaçlarından biri, belirli bir uygulama için özelleştirilmiş bir malzeme oluşturmaktır. Tasarım gereksinimlerini karşılarken, fiber yönelimi gücü, sertliği ve titreşim tepkisini en üst düzeye çıkaracak şekilde uyarlanabilir. Bu nedenle, her katın bağımsız olarak yönlendirilmesine olanak tanıyan, matris ve takviyeden oluşan üst üste bindirilmiş birkaç ince katmandan oluşan bir kompozit malzeme oluşturulur. Bu katman oluşumuna laminat denilmektedir [1].



Şekil 2.1 Kompozit malzeme bileşenleri

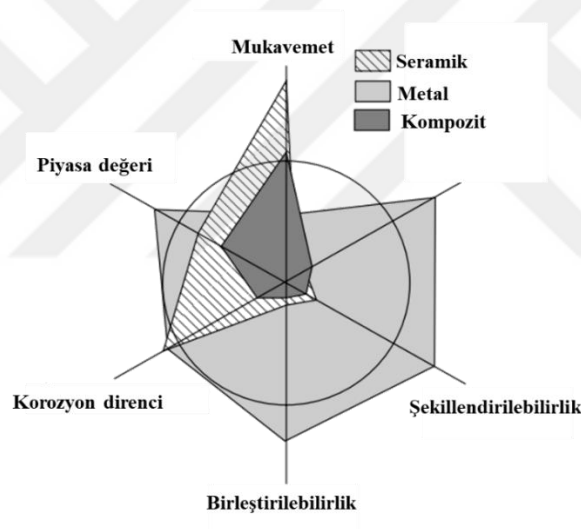
Kompozit malzemeler, aşağıdakiler de dahil olmak üzere mühendislik biliminde çeşitli avantajlar sunmaktadır.

Artan mukavemet ve sertlik: Kompozit malzemeler, bileşen malzemelerinden çok daha güçlü ve daha sert olabilmektedir.

Hafiflik: Kompozit malzemeler, metal veya ahşap gibi geleneksel malzemelerden çok daha hafif olarak üretilmektedir.

Gelişmiş dayanıklılık: Kompozit malzemeler, korozyona, aşınmaya ve malzeme yorgunluğuna karşı bileşenlere ve geleneksel malzemelere göre daha dayanıklı olmaktadır. Şekil 2.2' de [1] sıklıkla kullanılan mühendislik malzemelerinin karşılaştırılması verilmiştir.

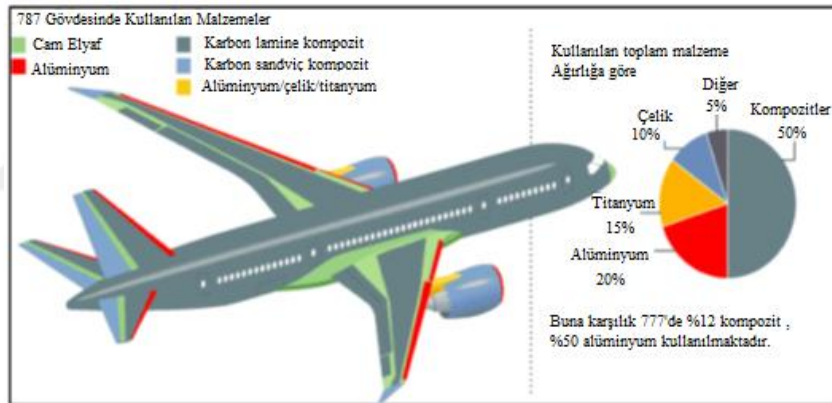
Tasarım esnekliği: Kompozit malzemeler, çeşitli şekil ve boyutlarda üretilmektedir.



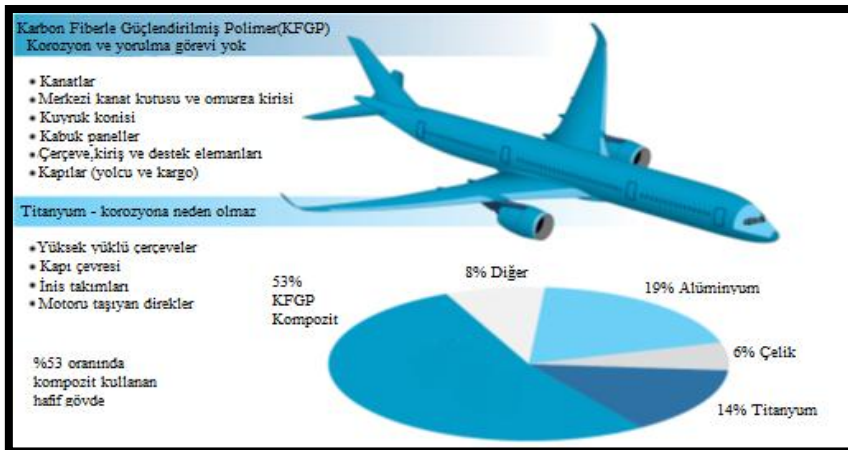
Şekil 2.2 Sıklıkla kullanılan mühendislik malzemelerinin bazı özelliklerinin karşılaştırılması

Günümüzde kullanılan monolitik metaller ve alaşımları, ileri teknoloji isterlerini karşılamakta zorlanmaktadır. İstenilen yüksek performans değerler, monolitik metaller yerine birkaç malzemenin birleşmesiyle karşılanabilmektedir. Bu duruma en iyi örnek uydularda kullanılan kafes kirişleridir. Uzayda -160°C ile 94°C dereceleri arasında, stabil genişlemenin sabit olması istenmektedir, ancak geleneksel mühendislik malzemeleri ile bu isterlerin sağlanması imkansızdır. Isıl genişleme katsayısı problemi sebebi ile, monolitik metaller yerine, daha verimli bir mühendislik malzemesi olan grafit/epoksi malzemesi kullanılmaktadır [13].

Bir diğer örnek ise, hızlı bir şekilde gelişmeye devam eden, hava aracı yapılarındaki isterlerdir. Yapısal parçaların mukavemetsel olarak yüksek isterlere bağlı olduğu havacılık sektöründe, yakıtın optimum seviyelerde kullanılması için yapısal parçaların ağırlıklarının azalması ve mukavemetsel olarak güçlenmesi gerekmektedir. Bu gereksinim kompozit malzemelerin kullanımı ile mümkün hale gelmektedir. Kompozit malzeme maliyetleri yüksek olsa bile montajdaki parça sayısının azalması ve yakıt maliyetlerindeki tasarruf onları daha karlı hale getirmektedir. Ticari bir uçakta ağırlığın 0.5 kg azaltılması, yılda yaklaşık 1360 litre kadar yakıt tasarrufu sağlamaktadır [13]. Yakıt giderleri ticari bir havayolunun toplam işletme maliyetlerinin %25'ini oluşturduğu varsayılır ise, kompozit malzemelere yapılan araştırma geliştirme maliyetleri, havacılık sektöründe önemli bir kar endeksi barındırmaktadır. Şekil 2.3 [14] ve 2.4' de [15] küresel havacılık firmalarının ürünlerindeki malzeme dağılımları gösterilmiştir.



Şekil 2.3 Boeing 787' nin malzeme dağılımı



Şekil 2.4 Airbus A350XWB akıllı gövde malzeme dağılımı

Kompozit malzemelerin ilgili avantajlarının yanı sıra, dezavantajları da bulunmaktadır.

Fiyatlarının yüksek olması: Kompozit malzemelerin üretim maliyetlerinin yüksek olmasının başlıca nedenleri arasında hammadde fiyatları, üretim süreçlerinin karmaşıklığı ve iş gücü gereksiniminin fazla olması yer almaktadır. Ayrıca, özel ekipmanlar ve hassas üretim teknikleri gerektirdiği için otomasyon zordur ve üretim süresi uzundur. Bu durum, enerji tüketimini ve işçilik maliyetini artırır. Sonuç olarak, kompozitlerin sunduğu üstün mekanik özelliklere rağmen, maliyetleri geleneksel malzemelere kıyasla daha yüksektir [16].

Üretimin zor olması: Kompozit bir yapının mekanik karakterizasyonu metal bir yapınınkinden daha karmaşıktır. Kompozit malzemeler metallerden farklı olarak izotropik değildir, yani özellikleri her yönde aynı değildir. Bu nedenle daha fazla malzeme parametresine ihtiyaç duyarlar. Örneğin, tek bir grafit/epoksi kompozit katmanı, mekanik analizin gerçekleştirilmesi için dokuz sertlik ve mukavemet sabiti gerektirir [17]. Çelik gibi yekpare bir malzeme söz konusu olduğunda yalnızca dört sertlik ve mukavemet sabitine ihtiyaç duyulur. Bu karmaşıklık, yapısal analizi hesaplamalı ve deneysel olarak daha karmaşık ve yoğun hale getirir. Ayrıca basınç dayanımı gibi bazı kompozit özelliklerin değerlendirilmesi ve ölçülmesi teknikleri de halen tartışılmaktadır.

İyi yüzey kalitesi elde etmenin zor olması: Kimyasal bir bağ yerine fiziksel bağ ile birlikte olan kompozit malzemeler, monolitik metallere göre daha kötü yüzey kalitesine sahiptir. Ayrıca, kompozitlerin tamir işlemleri metallerle karşılaştırıldığında basit bir işlem değildir.

İşlenmesinin zor olması: Serim yönleri, işleme sırasında kesici takımın her yerde aynı tip direnç ile karşılaşmaması gibi sebepler dolayısı ile kompozit malzemelerin işlenmesi monolitik metallere göre daha zordur. Kompozit malzemelerin, geleneksel mühendislik malzemelere göre mekanik olarak avantajlarının karşılaştırılması, en basit hali ile spesifik modül ile gösterilmektedir. Spesifik modülün kompozit malzemelerde hesaplanması ise şöyle tasvir edilebilir. Prizmatik bir çubuğun eksenel yük altında yer değiştirmesi (u) belirli bir yük (P) altında gerçekleşir.

$$u = \frac{P \cdot L}{A \cdot E} \quad (2.1)$$

P : yük (N), L : çubuk uzunluğu (m), A : Kesit alanı (m^2) E : Young elastisite modülü

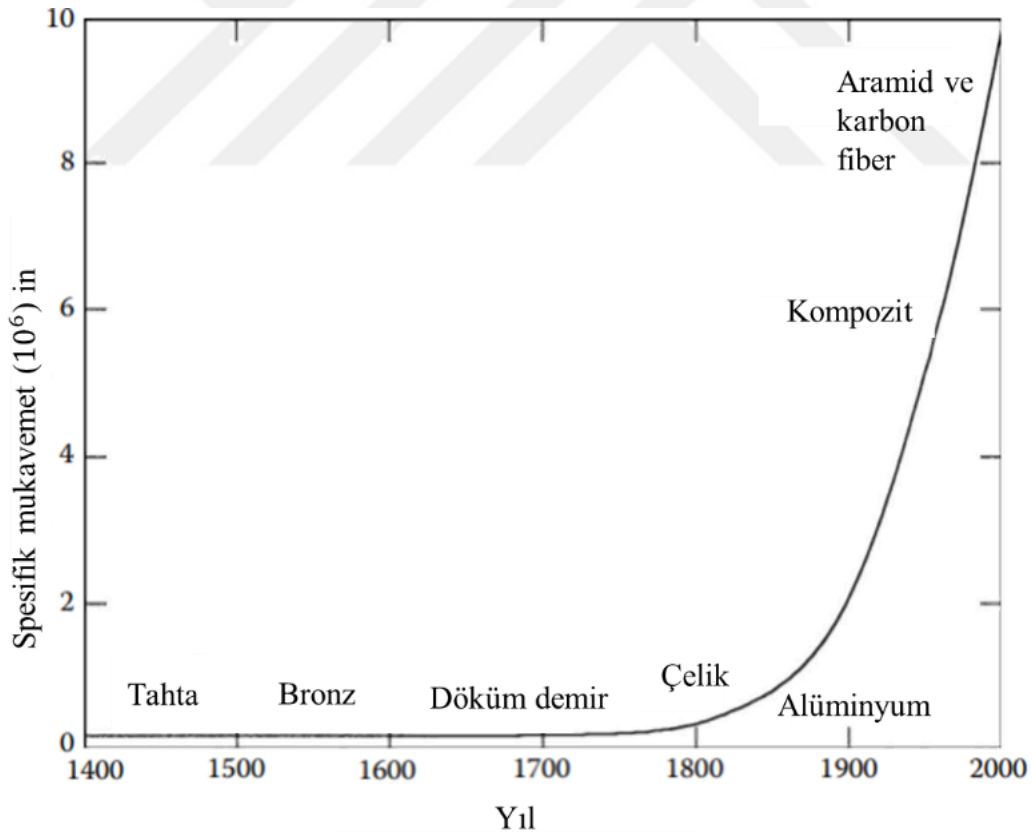
Çubuk kütlesi (kg): $M = \rho \cdot A \cdot L$, ρ : yoğunluk (kg/m^3)

$$M = \frac{\rho \cdot P \cdot L^2}{u \cdot E} \quad (2.2)$$

Bu, belirli bir yük altında belirtilen yer değiştirme için en hafif maddenin, en yüksek (E/ρ) değerine sahip olduğu anlamına gelir. Böylece, mekanik avantajı ölçmek için (E/ρ) oranı hesaplanır ve spesifik modül (Young modülü (E) ile malzemenin yoğunluğu (ρ) arasındaki oran) olarak adlandırılır. Diğer parametre ise spesifik mukavemet olarak adlandırılır ve malzemenin mukavemeti (σ_{ult}) ile yoğunluğu (ρ) arasındaki oran olarak tanımlanır [13];

Spesifik modül: $\frac{E}{\rho \cdot g}$ ve spesifik mukavemet: $\frac{\sigma_{ult}}{\rho \cdot g}$, g : yerçekimi ivmesi

Şekil 2.5’ de [1] geleneksel mühendislik malzeme türleri ve gelişmiş kompozit malzemelerin fiber çeşitlerinin spesifik mukavemet değerleri gösterilmiştir.



Şekil 2.5 Yıllara göre kullanılan mühendislik malzemeleri ve spesifik mukavemet değerlerinin karşılaştırılması

İlk bakışta grafit, aramid ve cam gibi fiberlerin spesifik modülü, çelik ve alüminyum gibi metallerin birkaç katıdır. Bu, kompozitlerin mekanik avantajları hakkında yanlış bir izlenim vermektedir. Çünkü kompozit malzemeler yalnızca fiberlerden değil, aynı zamanda fiber ve matris birleşiminden oluşmaktadır. Matrisler genellikle fiberlerden daha düşük elastiklik modülüne ve böylece daha düşük mukavemete sahiptir. Tek yönlü serim ile birleşimi sağlanan kompozit malzemeler, fiberler kadar yüksek değerde olmasa da geleneksel mühendislik malzemelerden oldukça yüksek mukavemet değerlerine sahiptir. Ancak, tek yönlü kompozitlerin spesifik modülü ve spesifik mukavemet parametrelerinin metallerle karşılaştırılması malzeme bilimi için yeterli değildir. Bunun sebeplerinden ilki, tek yönlü kompozit yapılar yalnızca tek eksenli çekme veya saf bükülme gibi basit yükleri taşımak için kullanılmaktadır. Karmaşık yükleme ve sertlik gereksinimleri olan yapılarda açılı katlar içeren kompozit yapılar gerekli olacaktır. Liflere dik olan mukavemet ve elastik modüller çok daha azdır. Tablo 2.1’ de geleneksel mühendislik malzemelerinin mukavemet karşılaştırmaları paylaşılmaktadır.

Tablo 2.1 Bazı mühendislik malzemelerinin mukavemetsel karşılaştırılması

Malzeme	Young modülü (GPa)	Maksimum mukavemet (MPa)	Özgül katsayı (GPa – m³/kg)	Özgül mukavemet (MPa – m³/kg)
Grafit fiber	230.00	2067	0.1278	1.148
Aramid fiber	124.00	1379	0.0886	0.985
Cam fiber	85.00	1550	0.0340	0.620
Tek yönlü grafit/epoksi	181.00	1500	0.1131	0.9377
Tek yönlü cam/epoksi	38.60	1062	0.0214	0.5900

Tablo 2.1 Bazı mühendislik malzemelerinin mukavemetsel karşılaştırılması
(devamı)

Çapraz-katlı grafit/epoksi	95.98	373.0	0.0600	0.2331
Çapraz-katlı cam/epoksi	23.58	88.25	0.0131	0.0490
Yarı-eş yönlü grafit/epoksi	69.64	276.48	0.0435	0.1728
Yarı-eş yönlü cam/epoksi	18.96	73.08	0.0105	0.0406
Çelik	206.84	648.1	0.0265	0.0831
Alüminyum	68.95	275.8	0.0265	0.1061

2.2 Kompozit Malzemelerin Tarihçesi

Kompozit malzemeler, insanlık tarihinde uzun bir geçmişe sahiptir. Kilden yapılmış ve samanla güçlendirilmiş tuğlaları kullanan ilk insanlar, kompozit uygulamalarının erken bir örneği olarak tanımlanabilir. Tek başına kullanılan kil ve saman bileşenleri, istenilen işlevleri yerine getiremezdi, ancak bir araya getirildiklerinde işe yaradı. Bazı insanlar samanı, kilin çatlamasını önlemek için kullandı, ancak diğer insanlar kuru kildeki keskin çatlakları körelttiğini öne sürerek bu işlevi kullanmaktaydı. İlk kompozitler, muhtemelen M.Ö. 15.000 civarında, kil ve saman karıştırılarak yapılan kerpiçti. Kerpiç, günümüzde hala bazı bölgelerde bir yapı malzemesi olarak kullanılmaktadır. M.Ö. 3000 civarında, eski Mısırlılar, ahşap ve taş takviyeli kil tuğlalardan oluşan kompozit bir malzeme olan kerpiç kullanmaya başladılar [18]. Kerpiç, piramitler ve diğer anıt yapılar dahil olmak üzere birçok yapıda kullanılmıştır. Orta Çağ'da, kompozit malzemeler Avrupa'da da yaygın olarak kullanılmaya başladı. Ahşap kirişler ve kirişlerle takviyeli taş

duvarlardan oluşan yığma inşaat, kiliseler ve kaleler gibi birçok yapıda kullanılmıştır. 19. yüzyılda, sanayi devrimi, yeni kompozit malzemelerin geliştirilmesine yol açtı. Bunlardan en önemlisi, Port Land çimentosu ve çelik takviyesinden oluşan betonarmedir. Betonarme, 20. yüzyılda gökdelenler, köprüler ve diğer büyük altyapı projeleri dahil olmak üzere birçok yapıda kullanılmıştır.

20. yüzyılın sonlarında, fiberglas ve karbon fiber gibi yeni takviye malzemeleri geliştirildi. Bu malzemeler, plastik ve diğer reçinelerle birlikte, havacılık, otomotiv ve spor ekipmanları dahil olmak üzere birçok yeni uygulamada kullanılan kompozitler oluşturmak için kullanılmıştır. Günümüzde kompozit malzemeler, geniş bir yelpazede uygulamalarda kullanılmaktadır. Araştırmacılar, daha güçlü, daha hafif ve daha dayanıklı kompozitler geliştirmek için sürekli olarak çalışmaktadır. Gelecekte, kompozitlerin metal ve ahşap gibi geleneksel malzemelerin yerini alması muhtemeldir.

Kompozit malzemelerin tarihçesinde önemli kilometre taşları [13];

M.Ö. 15.000: Kerpiç (çamur ve saman karışımı)

M.Ö. 3000: Kerpiç (ahşap ve taş takviyeli kil tuğlalar)

Orta Çağ: Yığma inşaat (ahşap kirişler ve kirişlerle takviyeli taş duvarlar)

19. yüzyıl: Betonarme (Port Land çimentosu ve çelik takviyesi)

20. yüzyılın sonları: Fiberglas ve karbon fiber takviyeli kompozitler

Günümüz: Çeşitli uygulamalarda geniş bir yelpazede kompozit malzeme kullanımı.

Kompozit malzemelerin tarihi, insanlığın yenilikçi malzemeler geliştirme ve kullanmadaki uzun geçmişinin bir kanıtıdır. Kompozitler, gelecekte birçok yeni ve heyecan verici uygulamada kullanılmaya devam edecektir.

2.3 Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Kompozit malzemeler, çeşitli kriterlere göre sınıflandırılabilir. En yaygın sınıflandırma yöntemleri şunlardır:

Matris fazına göre sınıflandırma;

Polimer Matrisli Kompozitler (PMK): Polimer, bir veya daha fazla tekrar eden, birbirleri ile kovalent olarak bağlanmış atomik birimlere (monomer) sahip uzun

zincirli moleküllere denir. Bir polimer malzemede aynı kimyasal yapıya sahip polimer moleküllerinden çok sayıda bulunur. En yaygın kompozit türleridir. Polimer matrisler, düşük yoğunluk, düşük maliyet ve kolay işlenebilirlik gibi avantajlara sahiptir. Fiberglas, karbon fiber ve aramid fiber gibi takviyeler ile kullanılırlar. Termoset ve termoplastik kompozit malzemeler olmak üzere ikiye ayrılırlar.

Termoset polimerlerde polimer molekülleri birbirleri ile güçlü kovalent bağlar ile çaprazlanmaktadır. Bu nedenle, termoset polimerleri deformasyona uğratmak zordur. Polimer zincirlerinin herhangi bir simetri ile dizilmesi mümkün olmadığı için bütün termoset polimerler amorfudur. Amorf polimerler iyi uzama, tokluk ve darbe dayanımı gösterirler. Amorf polimerler artan sıcaklıkla doğrusal bir yumuşama gösterirken, yarı kristalin polimerler ani bir şekilde ergirler. Genel olarak, camsı geçiş sıcaklığı ve ergime sıcaklığı, zincir uzunluğu, zincirler arası çekim kuvveti, moleküler rijitlik ve kristallik arttıkça artar. Termoset malzemeler için ise camsı geçiş sıcaklığının (T_g) çaprazlanma yoğunluğu ile artar [19].

Termoplastik polimerlerde polimer molekülleri birbirleri ile zayıf van der Waals ya da hidrojen bağları ile bağlanırlar. Artan sıcaklık ile bu zayıf bağlar daha da zayıflar ve bu tip malzemeler sıcaklıkla kolay şekillendirilebilir. Camsı geçiş sıcaklığının (T_g) üzerindeki sıcaklarda istenildiği gibi şekillendirilebilirler. Teorik olarak termoplastik malzemeleri sınırsız defa yeniden şekillendirmek mümkün olsa da her bir ısıtma-soğutma işleminde bazı de-polimerizasyon ya da bozulma reaksiyonları meydana gelebilmektedir.

%100 kristalin bir polimer üretmek mümkün değildir (maksimum %98). Kristallik arttıkça yoğunluk ve solvent direncinin yanında dayanım, rijitlik, sürünme dayanımı ve yüksek sıcaklık dayanımı artarken, tokluk düşer. Yarı kristalin polimerler opak ya da yarı saydam iken bütün saydam polimerler amorfudur. Kompozitlerde matris olarak kullanılan polimerler genellikle %20 ile %35 arasında kristallik derecesine sahiptir [20].

Termoplastik polimerlerin termosetlere kıyasla en önemli avantajı yüksek darbe emilimi/dirençleridir. Bu durum daha fazla hasarı tolere edebilecek yapılar geliştirilmesine olanak tanır. Termoplastik kompozitlerde mikro çatlak oluşma olasılığı azdır. Termoplastik kompozitlerin geliştirilmesi eriyiklerin veya

solüsyonlarının yüksek viskozitelerin nedeniyle oldukça yavaştır. Herhangi bir dış basınç uygulamadan fiberler üzerinde iyi bir ıslatma sağlamak mümkün değildir. Bu nedenle, sürekli fiber takviyeli termoplastik kompozitler çok yaygın değildir. Endüstride, sıklıkla polimer matrisli kompozit malzemeler tercihe edilmektedir. Polimer matrisli malzeme seçiminde,

Birinci ve en önemli kriter üretilecek parçanın servis sıcaklığıdır. Bu kriter için camsı geçiş sıcaklığı önemli bir belirleyicidir. En temel kural maksimum servis sıcaklığının en az 25°C üzerinde T_g seçmektir. Ancak, polimer malzemelerin çoğu nem absorbladığı için ve bu durum T_g 'yi düşürdüğü için maksimum servis sıcaklığının en az 50°C üzerinde T_g seçilmelidir. Genellikle yüksek T_g 'ye sahip polimerler kırılgandır ve hasar toleransları düşüktür. Tokluğu arttırıcı katkı malzemeleri eklenerek bu durumun önüne geçilebilmektedir ancak bu katkılar da T_g 'yi düşürmektedir [21].

Diğer bir önemli seçim kriteri istenilen mekanik özelliklerdir. Oda sıcaklığında çalışacak parçalar için en önemli kriterdir. Çatlak oluşumunu engellemek için basma dayanımı gerektiren yerlerde yüksek elastisite modülüne, çekme dayanımı gerektiren yerlerde yüksek çekme dayanımına sahip polimerler seçilmelidir. İyi tokluk özelliğine sahip bir matris malzemesi çatlak ilerlemesini ve delaminasyonu kontrol etmekte daha avantajlıdır. Bazı polimerler fiberleri daha iyi ıslatıp, daha iyi tutunurlar ve kimyasal ve/veya mekanik bağlar oluştururken, diğerleri oluşturamayabilir. Bu durum matristen fibere yük transferinde son derece önemlidir.

Reçinelerin raf ömrü: Daha ucuz maliyetler elde etmek ve üretilen bütün ürünlerin benzer özelliklere sahip olmasını güvence altına almak için reçineler büyük miktarlarda temin edilmektedir. 2 parçalı termoset reçineler kapalı ortam kutularında oda sıcaklığında 2 yıl kadar saklanabilirken, Termoset hazır matrisler dondurucuda saklanır ve 6 – 12 ay raf ömürleri vardır.

Viskozite: Prosese bağlı olarak viskozite koşulları değişebilmektedir. Genel olarak, viskozite düştükçe ıslatabilirlik artar ve işlem kolaylaşır.

Kürleme süresi: Termoset reçinelerde üretim hızını belirleyen en önemli parametredir. Genel olarak, yüksek T_g 'ye sahip polimerlerin kürleme işlemi uzun sürer. Birçok uygulama için kürleme sonrası işlem de gereklidir. Kürleme sonrası

işlem gerektirmeyen malzemeler seçmek üretim maliyetini önemli oranda düşürmektedir [19].

Nem ve solvent dayanımı: Kullanılacak malzeme ortamda bulunan nem ile ya da çeşitli çözücüler ile etkileşime girmemeli, çözünmemeli, şişmemeli, çatlamamalı veya bozunmamalıdır.

Şekil 2.6'da havacılık sanayide kullanılan polimer matrisler detaylı olarak paylaşılmaktadır [13,22,23,24].

Termosetler				Termoplastikler
Isınma sonrası çapraz bağ oluşumu gerçekleşir				Kimyasal değişim gerçekleşmez
Epoksi	Fenolik	Polyester	Poliimid	PPS,PEEK
• En popüler tür • Toplam kompozit malzemelerin %80'i • Yüksek sıcaklıklara dayanıklı • Nispeten pahalı • Düşük büzülme (2-3%) • Kırılma sırasında uçucu madde salınımı olmaz • Çeşitli yapı, morfoloji ve çok çeşitli özellikler sağlayan çeşitli yollarla polimerize edilebilir • Prepregleri yapmak için iyi saklama stabilitesi • Yüksek sıcaklık özelliklerinin şişmesine ve bozulmasına neden olan mutlak nem (%5-6) • Ayrıca uzun vadede ultraviyole bozulması • Yoğunluk (g/cm³) 1,1-1,4 • Çekme modülü 2,7-5,5 GPa • Çekme mukavemeti 40-85 MPa	• Daha ucuz • Daha düşük viskozite • Kullanımı kolay • Yüksek sıcaklıkta kullanım • Kaliteli kompozitler elde etmek zordur • Daha fazla çekme • Kırılma sırasında uçucu maddenin salınması • Termal oksidasyon için doğal stabilite. • İyi yangın ve alev geciktirici • Epoksilerden daha kırılma • Daha az depolama kararlılığının önceden hazırlanması zordur • Nemi emer ancak çalışma servis aralığında nemin önemli bir etkisi yoktur • Yoğunluk (g/cm³) 1,2-1,4 • Çekme modülü 2,7-4,1 GPa • Çekme mukavemeti 35-60 MPa	• Ucuz • Kullanımı kolay • Oda sıcaklığındaki genel uygulamalar için popülerdir • Yüksek büzülme (%7-8) • İyi kimyasal direnç • Geniş özellik yelpazesine sahiptir ancak Epoksilerden daha düşüktür. • Kırılma • Düşük Tg • Ön hazırlık zor • Neme karşı Epoksilerden göre daha az duyarlıdır • Yoğunluk (g/cm³) 1,1-1,4 • Çekme modülü 1-3-4,1 GPa • Çekme mukavemeti 40-85 MPa	• Yüksek sıcaklık uygulaması 300°C • İşlenmesi zor • Kırılma	• İyi hasar toleransı • 300-400°C'lık yüksek sıcaklık gerektirdiğinden işlenmesi zordur • Sonsuz depolama ömrü. Ama önceden hazırlanması zor • Nem emilimi yok • Yoğunluk (g/cm³) 1,3-1,4 • Çekme modülü 3,5-4,4 GPa • Çekme mukavemeti 100 MPa

Şekil 2.6 Havacılık sanayide kullanılan polimer matrisler

Metal Matrisli Kompozitler (MMK): Yüksek sıcaklık ve mukavemet gerektiren uygulamalarda kullanılırlar. Alüminyum, titanyum ve magnezyum gibi metal matrisler ile seramik, grafit ve bor karbür gibi takviyeler kullanılırlar. Yüksek servis sıcaklığı gibi daha zorlu ortam koşullarında polimerler yerine metal malzemeler matris olarak kullanılmaktadır.

Buna ek olarak, metallerin dayanımları ve rijitlikleri polimerlere göre daha yüksektir. Süneklik ve tokluk değerleri, özellikle termoset polimerlerden daha iyidir.

Seramik Matrisli Kompozitler (SMK): Yüksek sıcaklık ve aşınma direnci gerektiren uygulamalarda kullanılırlar. Silikon karbür, alüminyum oksit ve zirkonyum oksit gibi seramik matrisler ile karbon fiber, grafit ve seramik elyaflar gibi takviyeler kullanılırlar.

Karbon/Karbon Kompozitler (K/K): Yüksek sıcaklık ve termal iletkenlik gerektiren uygulamalarda kullanılırlar. Karbon matris ve karbon fiber takviye kullanılır.

Takviye fazına göre sınıflandırma;

Partikül Takviyeli Kompozitler: Matris içinde dağılmış küçük partiküller içerir. Partiküller, malzemenin sertliğini ve mukavemetini artırır.

Lif Takviyeli Kompozitler: Matris içinde gömülü lifler içerir. Lifler, malzemeye yüksek mukavemet ve çekme dayanımı kazandırır.

Levha Takviyeli Kompozitler: Matris içinde gömülü levhalar içerir. Levhalar, malzemeye yüksek basınç dayanımı ve rijitlik kazandırır.

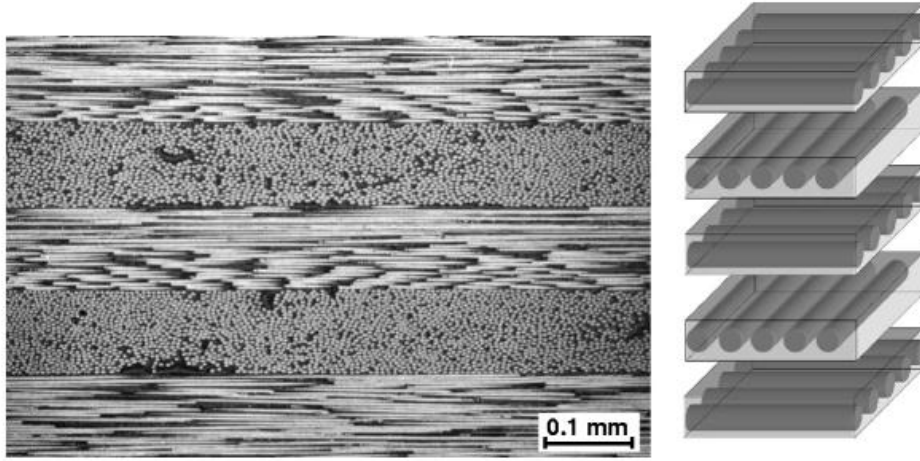
Takviye geometrisine göre sınıflandırma;

Tek Yönlü Takviyeli: Takviyeler tek bir yönde uzanır.

Çift Yönlü Takviyeli: Takviyeler iki yönde uzanır. Şekil 2.7' de çok yönlü kompozit lamine örneği gösterilmektedir.

Dokuma Takviyeli: Takviyeler bir doku şeklinde düzenlenmiştir.

Rastgele Takviyeli: Takviyeler rastgele bir şekilde dağılmıştır.



Şekil 2.7 Çok yönlü kompozit lamine ($0^\circ, 90^\circ, 0^\circ, 90^\circ, 0^\circ$).

Üretim Yöntemine Göre Sınıflandırma (Elyaf Takviyeli);

El ile serim yöntemi: Takviyeler, matris reçinesi ile elle yerleştirilir. El ile serim en basit kompozit üretim yöntemlerinden biridir. Daha önceden hazırlanan kalıp içerisine elyaf veya keçe yerleştirilerek reçine rulo ve fırça gibi el aletleriyle elyafın üzerine sürülür. Planlanan kalınlık oluşana kadar bu işleme devam edilir. Dolayısıyla tabakalı yapıda bir kompozit malzeme üretilmiş olur.

El ile serim yöntemine en uygun reçineler, epoksi ve polyesterdir. Estetik görünüm elde etmek, tutuşmayı engellemek ve hafiflik için reçineye dolgu maddeleri katılmaktadır. Reçinelerin kalıp yüzeyine yapışmasını engellemek için polivenil alkol (PVA), silikon, madeni yağlar ve vaks gibi kalıp ayırıcılar kullanılmaktadır. Rüzgâr türbin kanatları, tekne gövdeleri, ev dekorasyon malzemeleri el ile serim yöntemi kullanılarak üretilen kompozit malzemelerden bazılarıdır [20].

Püskürtme: Püskürtme yöntemi çalışma metodu el yatırma yöntemi gibidir. Bu yöntemde kırılmış elyaf kullanılır. Elyaf kırılma işlemi tabanca üzerinde bulunan bir kırıcı aracılığı ile yapılır. Kırılmış elyaflar uygun hızda kalıp yüzeyine, sertleştirici ilaveli reçine ile birlikte özel bir tabanca kullanılarak püskürtülür. Püskürtme işlemi uygun hızda yapılmalı ve püskürtme açısı kalıba dik yönde olmalıdır. Bu sayede gereksiz elyaf kullanımından kaçınılmaktadır. Islatma operasyonu bu yöntemde önem arz etmektedir. Islatmanın tam gerçekleşmesi için kullanılan elyaf miktarı %35 oran ile sınırlı olmalıdır [13]. Püskürtme işleminden sonra hava kabarcıklarını engellemek için bir rulo yardımı ile elyaf üzerinde gezilir.

Püskürtme yöntemi ile karmaşık geometrili malzemeler üretilebilir. Fakat hızlı bir üretim yöntemi olmasına karşın, maliyeti yüksektir.

Kalıplama: Takviyeler ve matris reçinesi bir kalıba yerleştirilir ve kürlenir. Reçine transfer kalıplama yöntemi için dişi ve erkek olmak üzere iki parçalı kalıp kullanmak gerekir. Bu yöntem hızlı, uzun ömürlüdür ve elde edilen ürünlerin her iki yüzeyi de düzgündür. Takviye malzemesi olarak kuru keçe veya kumaş kullanılabilir. Bu yöntemde takviye malzemesi önceden kalıp boşluğu doldurulacak şekilde kalıba yerleştirilir ve kalıp kapatılır. Matris içinde geç çözünen reçineler ile elyafın sürüklenmesi önlenir. Reçine basınç altında kalıba pompalanır. Matris enjeksiyonu en çok 80°C'ye kadar ısıtılmış kaplarda uygulanabilir. Küçük veya karmaşık geometrili uçak ve otomobil parçaları bu yöntem uygulanarak üretilmektedir [18].

Sıkıştırma Kalıplama: Takviyeler ve matris reçinesi yüksek basınç altında kalıplanır. Bu yöntemde, cam elyaf, reçine, katkı ve dolgu malzemeleri içeren ve hazır kalıplama bileşimi denen kompozit malzemeler, sıcak pres kalıplarla üretilmektedir. Üretimin basınç altında gerçekleşmesi sebebiyle bu yöntemde delikli ve karmaşık geometrili ürünler üretilebilmektedir. Basınçlı kalıplama yönteminde ürün ret oranı çok düşüktür [18].

Pultrüzyon: Takviyeler ve matris reçinesi sürekli bir profil oluşturmak için çekilir. Bu yöntem seri üretim şartlarına uygundur. Sabit kesitli profil ürünlerin üretilmesinde başvuru maliyetli bir yöntemdir. Sistemde takviye malzemesi reçine banyosundan geçirildikten sonra, 120°-150°C'ye kadar ısıtılmış şekillendirme kalıbından geçirilerek sertleştirilir. Islatmanın düzgün olması sebebiyle %60-65 oranında elyaf kullanılır. Enine yük taşıyacak kompozitlerde özel dokuma metotlarına başvurulur. Bu yöntemle genellikle çubuk ve boru şekilli ürünler üretilir. Profil çekme yöntemi, yönlenmiş elyaf, uzunlamasına mukavemetin fazlalığı, otomasyon kullanılması, işletme ve yatırım maliyeti gibi avantajlara sahiptir [18].

Kompozit malzemelerin sınıflandırılması, malzemenin özelliklerini ve kullanım alanlarını belirlemede önemlidir.

2.4 Kompozit Malzemelerinin Uygulama Alanları

Kompozit malzemeler, çeşitli avantajlar sunan çok yönlü bir malzeme sınıfıdır. Hafif, güçlü, dayanıklı ve çeşitli şekil ve boyutlarda üretilebilirler. Bu nedenle, aşağıda detaylı olarak paylaşılan çok çeşitli uygulamalarda kullanılırlar;

Havacılık ve Uzay: Kompozit malzemeler, uçak ve uzay aracı gövdeleri, kanatlar ve diğer bileşenler için yaygın olarak kullanılır. Tablo 2.2' de [13,25] havacılık sektöründe kullanılan kompozit malzemelerin uygulama alanları paylaşılmıştır. Kompozitler, özellikle de polimer matrislerde karbon veya aramid lifleri kullanan gelişmiş fiber takviyeli kompozitler, aşağıda verilen bu özelliklerin birçoğunu sunar:

- Yüksek özgül mukavemet ve sertlik,
- Hafiflik,
- Yorulma direnci ve korozyon direnci,
- Yüksek derecede optimizasyon yeteneği;
- Yön mukavemeti ve sertliğinin uyarlanması;
- Parça sayısını ve montaj sürelerini azaltarak büyük karmaşık şekilleri küçük çevrim süresinde kalıplama yeteneği. İnce duvarlı veya cömertçe kavisli yapılar için iyidir;
- Uzay ortamında boyutsal ve hizalama stabilitesini koruma yeteneği;
- Radar şeffaflığında düşük dielektrik kaybı olasılığı;
- Düşük radar kesitine ulaşma imkânı.
- Bu kompozit malzemelerin ayrıca bazı doğal zayıflıkları da vardır:
- Zayıf ara yüzlere sahip lamine yapı: düzlem dışı çekme yüklerine karşı zayıf direnç;
- Çarpma hasarına karşı hassasiyet ve iç hasarın fark edilmeme ihtimalinin yüksek olması;
- Nem emilimi ve bunun sonucunda yüksek sıcaklık performansında bozulma;
- Olası üretim hatalarının çokluğu ve malzeme özelliklerindeki değişkenlik.

Tablo 2.2 Havacılık sanayide kullanılan bazı kompozit malzemeler ve uygulama alanları

Malzeme sistemi	Uygulama alanı
175°C’de kürlenen yüksek mukavemetli karbon-epoksi, -Yüksek mukavemetli karbon-epoksi, -Sıfır sızıntı (düzgün reçine içeriği) UD prepregli, -Yüksek tokluk, iyi kullanım ömrü ve raf ömrü	Savaş uçağı ve helikopterlerin yapısal bileşenleri, ör. kanat kaplamaları, direkler, kanatçık, dümen, yükseltiller, kapılar vb.
175°C'de kürlenen ara modüllü karbon, epoksi + BMI/siyanat - ester, -Sıfır kanamalı (düzgün reçine içeriği) UD prepregleri -5HS veya 8HS çift yönlü kumaş ön prepreg -yüksek tokluk, iyi kullanım ömrü ve raf ömrü -Düşük çevresel bozulma	Çerçeveler, takviyeler, rotor kanatları

Tablo 2.2 Havacılık sanayide kullanılan bazı kompozit malzemeler ve uygulama alanları (devamı)

120°C kürlenen HS-karbon-epoksi -Sıfır kanamalı (düzgün reçine içeriği) UD prepregleri -5HS veya 8HS yüksek yönlü kumaş ön prepreg -tokluk, iyi kullanım ömrü ve raf ömrü	Helikopterlerin veya nakliye uçaklarının yapısal bileşenleri; direkler, kanatçık, dümen, yükselteler, kapılar vb. Çerçeveler, takviyeler
Epoksi reçinelerde E-cam kumaş -Yüksek sıcaklıkta kürlleme -RT/orta sıcaklıkta kürlleme	Savaş uçağı kaplamaları, kanatçık kaportası, düşme tankları Küçük nakliye uçağının yapısal bileşenleri: Gövde, kanat, diğer
Düşük kayıplı polyester/siyanat esterlerdeki aramit elyaf	Radom (Uçak burnu)

Otomotiv: Kompozit malzemeler, arabalar, kamyonlar ve otobüsler için gövde panelleri, tamponlar, şasiler ve diğer bileşenler için kullanılır. Hafiflikleri, araçların daha az yakıt tüketmesine ve daha çevre dostu olmasına yardımcı olur.

İnşaat: Kompozit malzemeler, binalar, köprüler ve diğer yapılar için kirişler, kolonlar, döşemeler ve diğer bileşenler için kullanılır. Güçleri ve dayanıklılıkları, yapıların daha uzun ömürlü ve daha güvenli olmasına yardımcı olur.

Denizcilik: Kompozit malzemeler, tekneler, gemiler ve diğer deniz taşıtları için gövdeler, güverteler, direkler ve diğer bileşenler için kullanılır. Hafiflikleri ve su dirençleri, teknelerin daha hızlı ve daha verimli olmasına yardımcı olur.

Spor: Kompozit malzemeler, golf sopaları, tenis raketleri, bisiklet çerçeveleri ve diğer spor ekipmanları için kullanılır. Hafiflikleri ve güçleri, sporcuların performanslarını artırmaya yardımcı olur.

Kompozit malzemelerin kullanımının gelecekte artması muhtemeldir. Araştırmacılar, daha güçlü, daha hafif ve daha dayanıklı kompozitler geliştirmek için sürekli olarak çalışmaktadır.

2.5 Otomatik Fiber Serme Yönteminde Kullanılan Kompozit Malzemeler

OFS üretimi için kullanılan üç ana malzeme türü vardır; bunlar termoset, termoplastik ve kuru fiberdir (reçine emdirilmemiş). Termosetler ve termoplastikler "önceden emprenye edilmiş" anlamında "prepreg" olarak adlandırılırlar. Aşağıdaki Tablo 2.3, OFS yönteminde kullanılan malzemelerin temel özelliklerini içeren bir özet sunmaktadır.

Tablo 2.3 OFS yönteminde kullanılan malzeme türlerinin özellikleri

Malzeme	İşleme sıcaklığı	Depolama	Kürleme
Termoset	Düşük	Dondurulmuş	Otoklav/Fırın
Termoplastik	Yüksek	Oda sıcaklığı	İnfüzyon/Otoklav
Kuru fiber	Yüksek	Oda sıcaklığı	İnfüzyon

2.5.1 Termoset Kompozit Malzemeler

Termoset prepregler, fiberlerin ve termoset reçinelerin bir kombinasyonunu kullanır. Termoset reçineler nispeten düşük viskoziteye sahip polimer reçinelerdir ve kürlendiğinde sert bir yapı oluşturur [26]. Termoset malzemer en yaygın kullanılan OFS malzemesidir çünkü serim işlemi için gereken nispeten düşük sıcaklığı nedeniyle üretimi nispeten kolaydır [27]. Termoset malzemenin serime hazır hale ulaşması için gereken işlem sıcaklığı oda sıcaklığına yakın olduğundan, daha az ısı gerekli olur ve bu da imalatın daha kolay olmasını sağlar. Malzemenin içindeki termoset reçine nedeniyle kürlleme reaksiyonunu yavaşlatmak için malzemenin donmuş halde tutulması gerekir. Ek olarak, termoset bantlar otoklav konsolidasyonu gibi ikincil bir işlem adımı gerektirir, bu da işlem süresini ve maliyetini artırmaktadır [28].

2.5.2 Termoplastik Kompozit Malzemeler

Termoplastik prepregler, fiberlerin ve termoplastik reçinenin bir kombinasyonunu kullanır. Bu tür reçineler yüksek viskoziteye sahiptir ve ısıtıldıklarında kimyasal olarak birleşmezler veya sertleşmezler, bu da birçok kez katı ve sıvı dönüşümlerinden geçebilecekleri anlamına gelir [26]. Termoplastikler, geri dönüştürülebilirlik, yeniden işlenebilirlik, yüksek sıcaklık performansı, yüksek darbe direnci ve oda sıcaklığında uzun raf ömrü gibi termosetlere göre birçok avantaja sahip oldukları için faydalıdır [28].

2.5.3 Kuru Fiber Kompozit Malzemeler

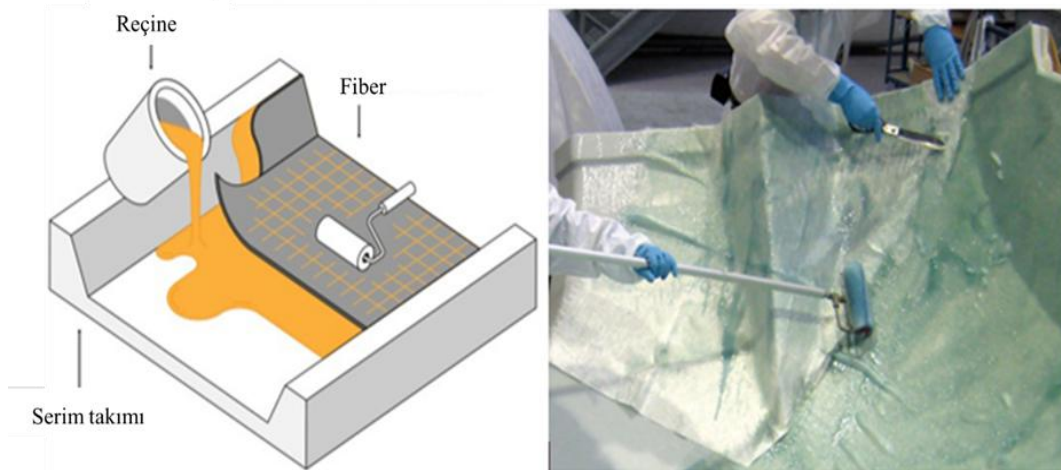
Kuru fiber (Dry-Fiber) kompozit malzemeler, görüldüğü gibi bir reçine matrisi içermez. Termoplastiklere benzer şekilde, kuru elyaf serim işlemi termoset malzemelere göre daha yüksek sıcaklıklar gerektirir [29]. Kuru fiber, oda sıcaklığında uzun süreli bir raf ömrüne sahiptir. Ayrıca fiberleri sınırlayan, towun bükülmesine veya kesilmesine izin veren bir matris olmadığından serim uygulamalarında kolaylıkla kullanılabilir [30]. Bununla birlikte, kuru fiberler yapışkan bir yapıya sahip değildir, dolayısıyla fiberlerin serimini gerçekleştirmek için bir perde (ince termoplastik katman) gereklidir [31]. Malzemede reçine bulunmaması, serim kafasındaki reçine oluşumunu azaltarak tezgah bakım aralıklarının daha uzun olmasını sağlamaktadır [32]. Bu malzemenin, üretim bitiminde parçaya reçinenin aşılması ihtiyacından dolayı bir dezavantajı vardır.

3

KOMPOZİT ÜRETİM YÖNTEMLERİ

3.1 El ile Serim Yöntemi

Gelişmiş hava araçları kompozit yapılarının imalatı için en yaygın ve en eski yöntem el ile serim yöntemidir. Bu işlem diğer yöntemlere göre basittir ancak yoğun emek isteyen bir işlemdir açık form lu kalıplarda uygulanabilir ve düşük hacimli parça üretimleri için uygundur. Kırpılmış iplik veya elyaf kumaşlar gibi takviye malzemeleri açık kalıba elle yerleştirilir ve reçine takviye malzemelerinin üzerine püskürtülür veya dökülür ve bunların emdirilmesi elle sağlanır. Şekil 3.1 el ile serim işleminin şematik görünümünü göstermektedir.



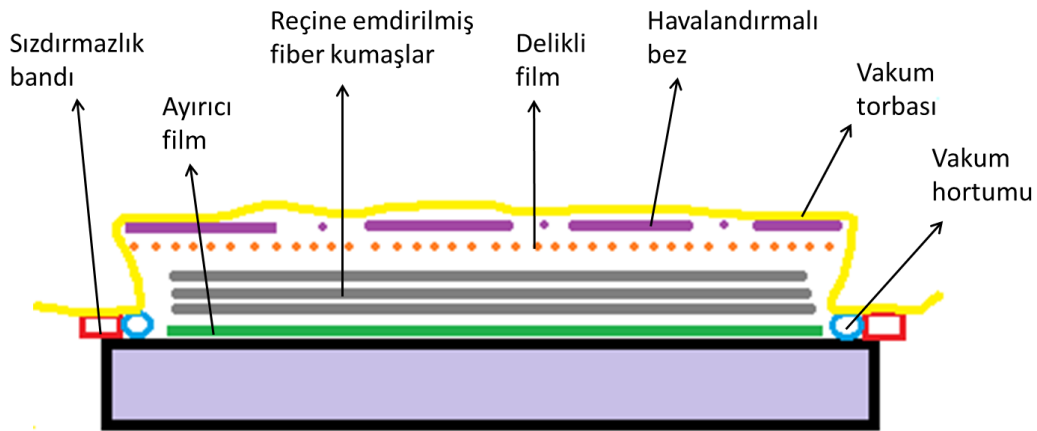
Şekil 3.1 El ile serim yöntemi şematik ve gerçek görünümü.

Gerekli kürlenme süresi oda sıcaklığında 24–48 saattir. Sertleştirici adı verilen bir katalizör ve hızlandırıcı, kürlenmeyi sağlamak için uygun bir oranda reçineye karıştırılır [33]. Karışım, hem matris içinde boşluk oluşumunu önlemek hem de homojen matris malzemesi elde etmek için dikkatlice karıştırılır.

Elle serimin avantajı, bu yöntemin pahalı ekipman gerektirmemesi ve deneyimli bir operatörün karmaşık şekilli parçalar üretebilmesidir. Ana dezavantajı ise parça kalitesinin operatörün deneyimine bağlı olması ve bu yöntemin tezgah ile serime göre nispeten yavaş olmasıdır.

3.2 Vakumlu Torbalama Yöntemi

Vakumlu torbalama yönteminde, serim sırasında katmanlar arasında oluşan hava ve biriken fazla reçine vakum yardımıyla uzaklaştırılmaktadır. Serim başlamadan önce hazırlık aşamasında takım temizleme ve ayırıcı film yerleştirme işlemleri tamamlandıktan sonra, kompozit laminatın serimi gerçekleştirilmektedir. Laminattan fazla reçineyi emmek için ayırma katmanının üzerine havalandırmalı bir bez yerleştirilir. Son olarak, tüm sistem bir vakum torbasıyla kapatılır ve kalıp çevresi Şekil 3.2'de gösterildiği gibi sızdırmazlık bandıyla kaplanır. Daha sonra torbanın altındaki kompozit malzemeye vakum uygulanır [33].



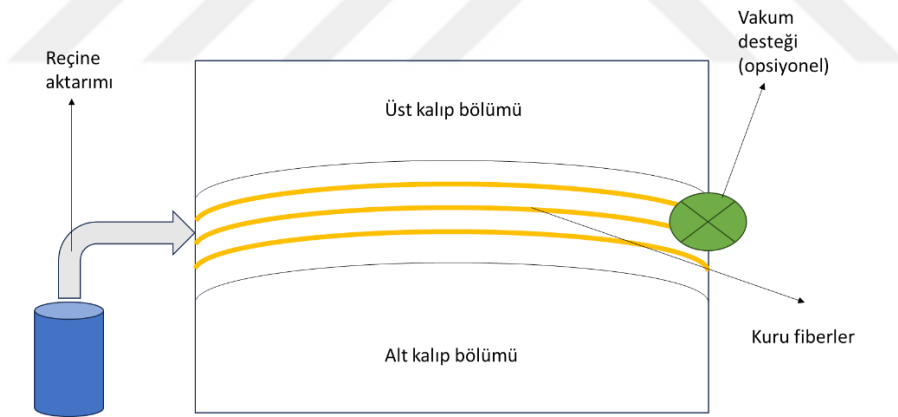
Şekil 3.2 Vakumlu torbalama yönteminin şematik görünümü

Bu işlemin laboratuvar ve temiz oda gibi özelleştirilmiş alanlarda gerçekleştirilmesi daha uygundur. Elyaf hacim oranının artırılması ile yüksek takviye sağlar ve el ile serim işlemine kıyasla kompozit katmanlar arasındaki yapışma bağı mukavemetini iyileştirir. Çünkü uygulanan vakum havanın ve uçucu maddelerin çoğunu laminattan uzaklaştırmaktadır [34]. El ile serim yöntemiyle karşılaştırıldığında, daha yüksek elyaf içeriği, daha iyi elyaf ıslanması, daha düşük boşluk oluşumu ve azaltılmış uçucu emisyonlar gibi önemli avantajlara sahiptir. Havacılık

endüstrisinde, yüksek üretim adedi öncelikli olarak dikkate alınmadığından bu yöntem yoğun olarak uygulanmaktadır. Ancak, işlemin yoğun emek, tecrübe ve beceri gerektirmesi, sarf malzemeleri ve ihtiyaç duyulan ekipmanlar nedeniyle işlem maliyeti gibi bazı dezavantajları vardır [35,36]. Buna ek olarak, Mehdikhani ve arkadaşları [37] polimer kompozit malzemelerdeki boşlukların nedenlerini araştırdı. Kompozitlerdeki boşluk içeriği bağıl nemle birlikte arttığını tespit ettiler. Vakumlu torbalama ve otoklav yöntemleriyle elde edilen kompozit malzeme boşluk içeriği % 60 bağıl neme kadar benzer olsa da, bağıl nem %60 dan yukarı çıktığında, vakumlu torbalama yönteminde boşluk oranının arttığı sonucuna ulaşırlar [33].

3.3 Reçine Aktarımlı Kalıplama Yöntemi

Reçine aktarımlı kalıplama (RAK) yöntemi kapalı bir kalıpta gerçekleşmektedir. Nispeten orta ve yüksek hacimli üretimler için uygundur. İşlem esas olarak kuru fiber malzemelerinin kalıbın taban kısmına serilmesini ve kalıbın diğer yarısının alt kalıbın üzerine yerleştirilip serim takımının kilitlenmesini içermektedir. İşlemin şematik görünümü Şekil 3.3'te gösterilmektedir.

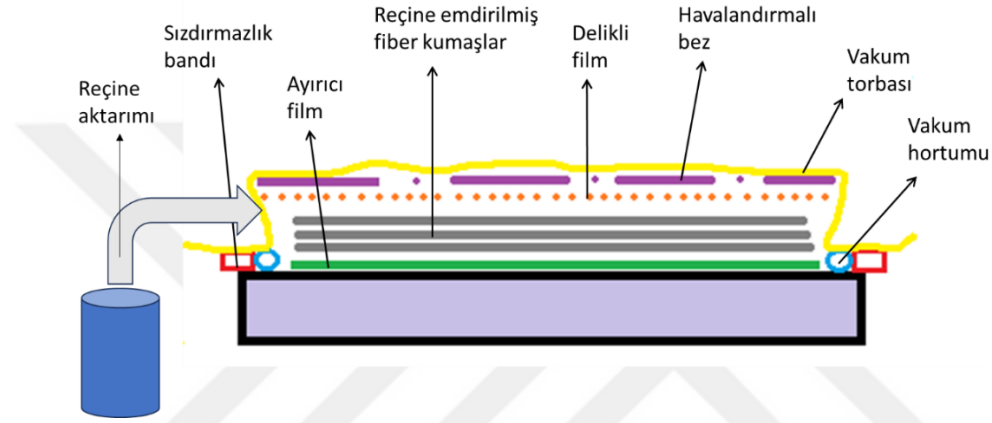


Şekil 3.3 Reçine aktarımlı kalıplama yönteminin şematik görünümü

Kalıplar kapatıldıktan sonra sertleştiricisini içeren bir reçine enjekte edilir. Otomobil gövde parçaları, küvetler vb. gibi yüksek kaliteli parça gereksinimleri bu yöntemle karşılanabilmektedir [33]. RAK yöntemi, etkili reçine transferi ve elyaf elemanlarının emdirilmesi için vakum desteği ilavesi ile kullanılabilir [35]. RAK yöntemi ayrıca el ile serim ve vakumlu torbalama yöntemlerine kıyasla karmaşık şekiller için nispeten daha uygun olmaktadır [36].

3.4 Vakum Destekli Reçine Aktarımlı Kalıplama Yöntemi

Vakum destekli reçine aktarımlı kalıplamada (VDRAK), üretim, vakumlu torbalama tekniğinde olduğu gibi, tek bir kalıp üzerine kompozit laminatların serim yapılması ile gerçekleştirilir. İşlem reçine aktarımlı kalıplamanın aksine yalnızca kalıbın alt kısmında gerçekleştirilir. Laminasyonun üzerine bir ayırma filmi ve/veya delikli ayırma filmi yerleştirilir ve sistem sızdırmazlık bandı kullanılarak bir vakum torbasıyla kaplanmaktadır [33]. Kuru kompozit katmanların reçine emdirilmesi, Şekil 3.4'te görüldüğü gibi bir vakum kaynağı yardımıyla gerçekleştirilmektedir.



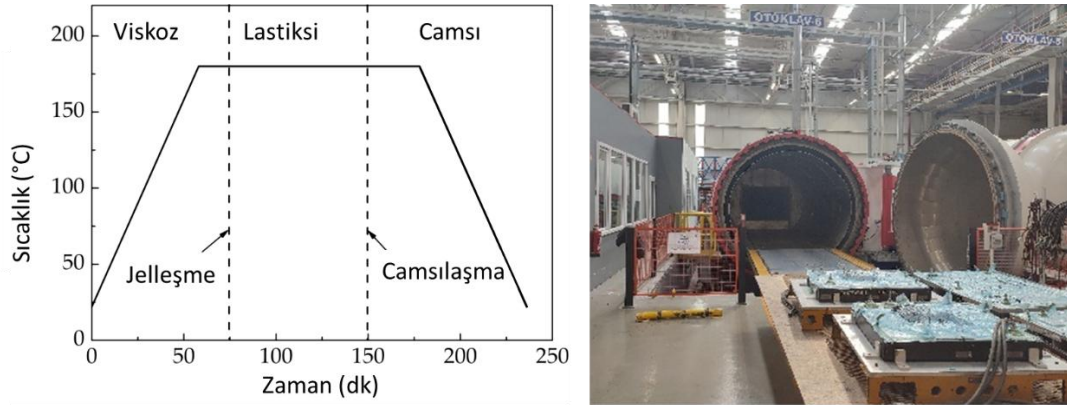
Şekil 3.4 Vakum destekli reçine aktarımlı kalıplama yönteminin şematik görünümü

Vakum desteği işlemi reçine hareketini sağlamaktadır ayrıca hapsedilen hava da bu sayede uzaklaştırılmaktadır. Vakum uygulaması elyaf konsantrasyonunu artırarak kompozit katmanlar arasındaki yapışma bağına iyileştirmektedir. VDRAK tekniği, RAK yöntemiyle karşılaştırıldığında daha düşük takım maliyeti, reçine ile kalıbın daha kısa sürede doldurulması gibi çeşitli avantajlar sağlamaktadır. Nihai ürünün proses verimliliği ve kalitesi, uygun reçine hareketi ile başarılı bir şekilde gerçekleştirilebilen elyafların yeterli düzeyde ıslatılmasına bağlı olmaktadır [35].

3.5 Otoklav Prosesi Yöntemi

Otoklav üretim yöntemi, havacılık endüstrisi gibi mükemmel kalitenin gerekli olduğu alanlarda uygulanmaktadır. Bu yöntemde matris içerisinde minimum boşluk oranı ile artırılmış fiber hacim oranı elde edilmektedir. Kürleme, Şekil 3.5'te görüldüğü gibi basınç altında ve ısı üreten bir otoklavda gerçekleştirilir. Kürleme işlemi, kürleme sırasında reçinenin mekanik özelliklerinin evrimine göre üç

aşamaya ayrılmıştır: viskoz, lastiksi ve camsı aşamalar. Bu aşamalar arasındaki sınırlar jelleşme ve camsılaşma noktaları tarafından oluşturmaktadır.

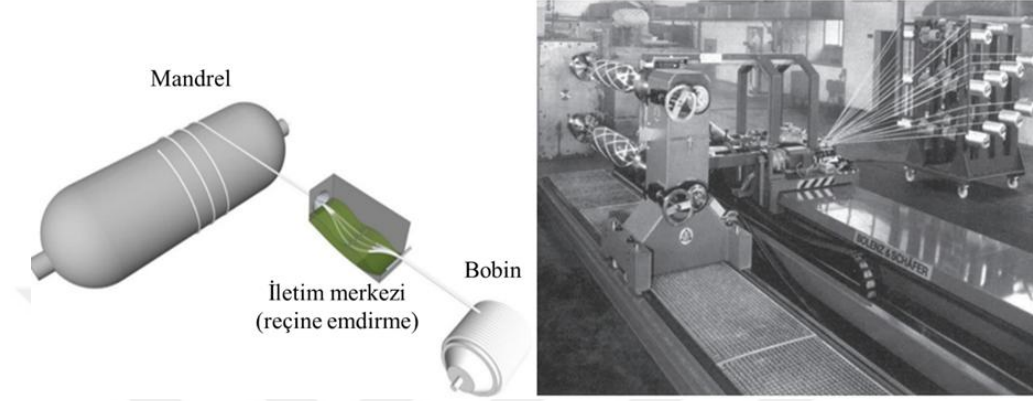


Şekil 3.5 Kompozitin otoklav istasyonunda kürlenmesi ve çeşitli aşamaları.

Kermani ve arkadaşları [38] otoklav basıncı, vakum torbası basıncı ve otoklav sıcaklığı gibi proses parametrelerini kontrol ederek otoklav fırını ile bal petekli sandviç yapısı üretti. Otoklav prosesi ile kompozit malzemelerin üretilmesi vakumlu torbalama yöntemine benzer şekilde olmaktadır [33]. Kompozit, kapalı ısıya dayanıklı vakumlu torba içinde kürlenmeye hazırlandıktan sonra, ürün bir otoklavın içine yerleştirilmektedir. Vakum, basınç ve ısı gibi dış kaynaklar, vakum yardımıyla havayı ve uçucu maddeleri uzaklaştırarak daha iyi bir laminasyon oluşturmak için her bir lamenin yoğunlaştırılmasını ve sağlamlaştırılmasını sağlamaktadır. Yangın olasılığını önlemek için azot veya karbondioksit gibi maddeler kullanılmaktadır. Otoklav prosesi ile kompozit üretimi yöntemi diğer yöntemler ile kıyaslandığında maliyetlidir ve yoğun iş gücü gerektirmektedir. Bere ve arkadaşları [39], karbon/epoksi prepreg kompozit laminatlar için otoklav işleminin adımlarını aşağıdaki gibi belirtmiştir: (1) Kalıbın 60°C'de 30 dakika ısıtılması. (2) 2 °C/dak hızında 30 dakika ısıtılması ve sıcaklığın toplamda 60 dakikada 120°C'ye çıkarılması. (3) 120°C'de 2 saat bekletilmesi, (4) kompozitin 60 dakika boyunca 2 °C/dakika hızında soğutulması. Öte yandan Plappert ve arkadaşları [40], tek bir sıcaklık artış rampasıyla % 60 lif hacim yoğunluğuna ulaştı. İşlem şu şekilde gerçekleştirildi: Sıcaklığın 3 bar basınçla ortam sıcaklığından 120°C'ye 30 dakikada çıkarılması, ardından 120 dakika sabit sıcaklık tutulması ve son olarak 30 dakikada ortam sıcaklığına soğutulması. Ayrıca, otoklav ile üretim yöntemi için literatürde bildirilen boşluk oranı %1'in altındadır [37,41].

3.6 Filament Sarma Yöntemi

Boru ve tüp gibi silindirik parçaların üretilmesi için filament sarma yöntemi etkin olarak kullanılmaktadır. İşlem, Şekil 3.6'da gösterildiği gibi bobinden çıkan sürekli fiber bantlarının reçine emdirme işlemi yapılarak mandrel üzerine sarılmasını içermektedir [33].



Şekil 3.6 Filament sarma prosesinin gösterimi

Sarma işleminden sonra, kürlleme bir mandrelin artırılmış sıcaklığında gerçekleştirilir. Reçine emdirme, sarma işleminden önce, işlem sırasında veya işlem sonrasında yapılabilir. Bitmiş ürünün mukavemeti ve sertliği, elyaf katmanlarının serim esnasındaki sıkıştırılmasına bağlı olmaktadır [42]. Serim sonrasındaki ortaya çıkan parçanın kalitesini etkileyen başlıca faktörler, helis açısı, sarma gerginliği, tel bant genişliği koşulları, reçine içeriği ve dağılımı, sarma hızı ve kürlleme döngüsü olarak tanımlanmaktadır [43]. Düzenlenmiş yönelimi korumak ve fiber hizalama hatalarını önlemek için mandrellerde yeterli fiber gerginliğinin sağlanması gerekmektedir. Düşük viskoziteli reçine tipleri tercih edilir veya uygun reçine akışını kontrol etmek için reçine banyosu sıcaklığı artırılmaktadır. Diğer durumlarda, yapı içinde boşluklar oluşarak ürünün mekanik özelliklerinin zayıflamasına neden olmaktadır. Delaminasyon ve fiber kırışıklıkları karşılaşılabilecek diğer kusurlardır. Fiber kompozitlerin mukavemetini etkileyen önemli parametreler sırasıyla sarma açısı, fiber yönelimi ve dizisi, fiber hacim oranı, fiber ve matrisin mekanik ve fiziksel özellikleri olarak belirtilmiştir [44]. Basıncı kaplar, boru hatları, kanatlar, otomotiv tahrik milleri, oksijen tankları, roket gövdesi vb. filament sarma tekniğinin yaygın uygulama örnekleridir [36].

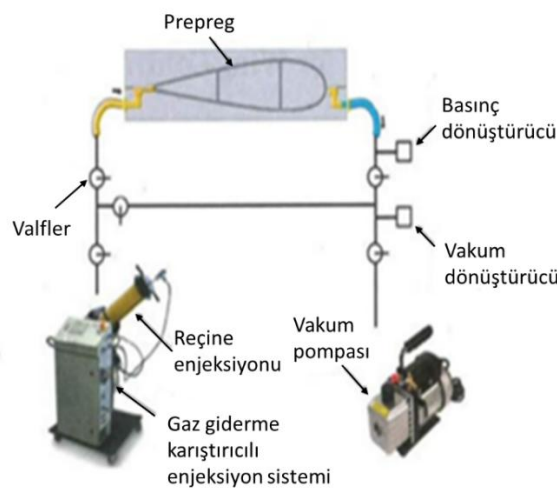
3.7 Aynı Nitelikli Reçine Aktarımlı Kalıplama Yöntemi

Aynı nitelikli reçine aktarımlı kalıplama (ANRAK), prepreg serimi ve sıvı reçine transfer kalıplamadan oluşan yeni geliştirilmiş bir kompozit üretim yöntemidir. Yöntem ilk olarak Radius Engineering (2020) tarafından net şekilli kompozit ürünler sağlamak amacıyla geliştirilmiş ve ticarileştirilmiştir. Şekil 3.7’de [45], geleneksel ve net şekilli üretimler arasındaki farkı göstermektedir.



Şekil 3.7 a) Geleneksel kompozit üretimi b) Net şekilli kompozit üretimi

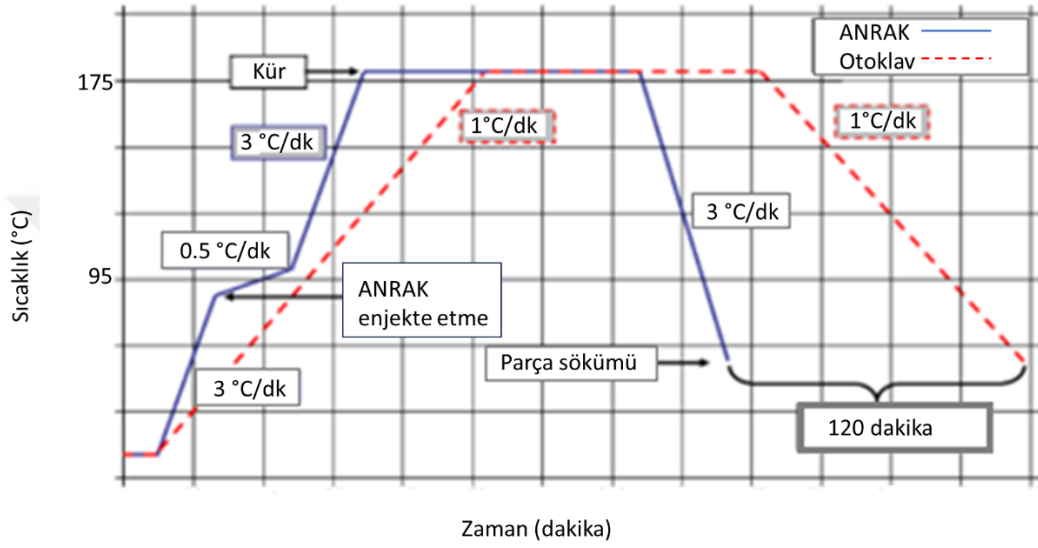
ANRAK, otoklav dışı işlem olarak da bilinmektedir ve otoklav işlemine göre birçok avantaja sahiptir [33]. ANRAK yardımıyla, büyük ve karmaşık parçalar daha düşük maliyetle son şekilleriyle üretilebilmektedir. Yöntem, prepreg serim yapılması sebebiyle RAK yönteminden farklıdır. Fakat RAK sisteminde olduğu gibi reçine enjekte edilmesi Şekil 3.8’de [46] gösterildiği gibi iki yöntemde de ortak olarak kullanılmaktadır.



Şekil 3.8 ANRAK yönteminin şematik gösterimi

Bu, sert reçineler ve sertleştirilmiş maddeler gibi yüksek kaliteli sertleştirilmiş malzemelerin kullanılmasına olanak tanımaktadır.

Enjekte edilen reçine, kompozit laminatta hidrostatik basınç oluşturur ve boşluk içeriklerinin oluşumunu ortadan kaldırır, bu da son ürünün hem kalitesini hem de mekanik özelliklerini iyileştirmektedir. Buna ek olarak karmaşık bağımlı değişkenleri nedeniyle, kompozit kalitesinin kontrolü otoklav işleminden daha kolaydır. Ayrıca, Şekil 3.9’ da [45] görüldüğü gibi, aynı nitelikli reçine transfer kalıplama yöntemindeki kürleme, otoklav yönteminden yaklaşık iki saat daha kısa sürmektedir [47].



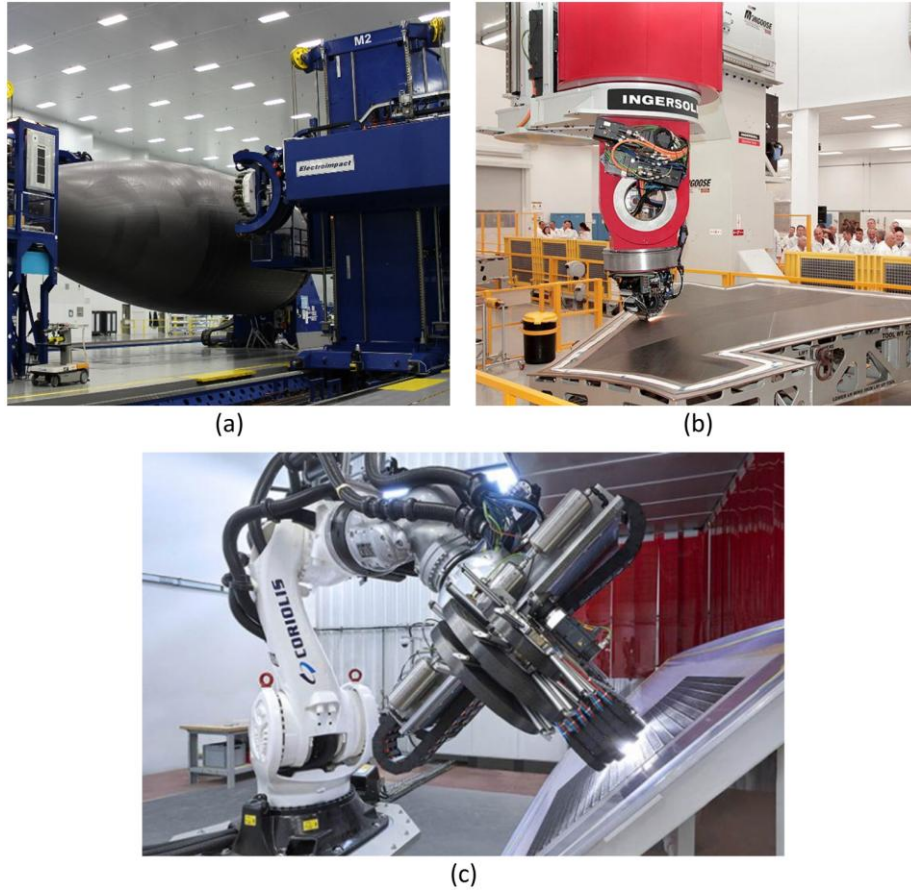
Şekil 3.9 ANRAK ve otoklav kürleme döngülerinin karşılaştırmalı gösterimi

Öte yandan, yöntemin RAK tekniğine göre avantajları vardır. Son parçadaki kalınlık değişimleri, boyutsal doğruluk ve yüzey kalitesi ANRAK yardımıyla iyileştirilmektedir. İşlem şu anda Radius Engineering Inc. (2020) tarafından ticarileştirme sürecindedir. RAK ve ANRAK arasındaki temel fark kullanılan elyaf kumaşlardır. RAK tekniği kuru kumaşlar kullanırken, ANRAK yöntemi prepregler kullanır. Prepreglerin emdirilmesi için kullanılan reçine malzemesi, ANRAK işleminin reçine enjeksiyonu için de kullanılır. Bu nedenle, ANRAK işlemi havacılık endüstrilerinin yapısal elemanlar üretmesi için son derece uygun ve tercih edilen yöntem olmasını sağlamaktadır [45,47].

3.8 Tezgâh ile Serim Yöntemi

OFS teknolojisinin amacı, prepreg fiberleri kompozit bir yapı oluşturmak üzere bir kalıp üzerine katman katman serilmesidir. Her bir fiber, serim kafası tarafından kalıp yüzeyine serilir dönen tekerlek yardımıyla basınç uygulanarak yapışması

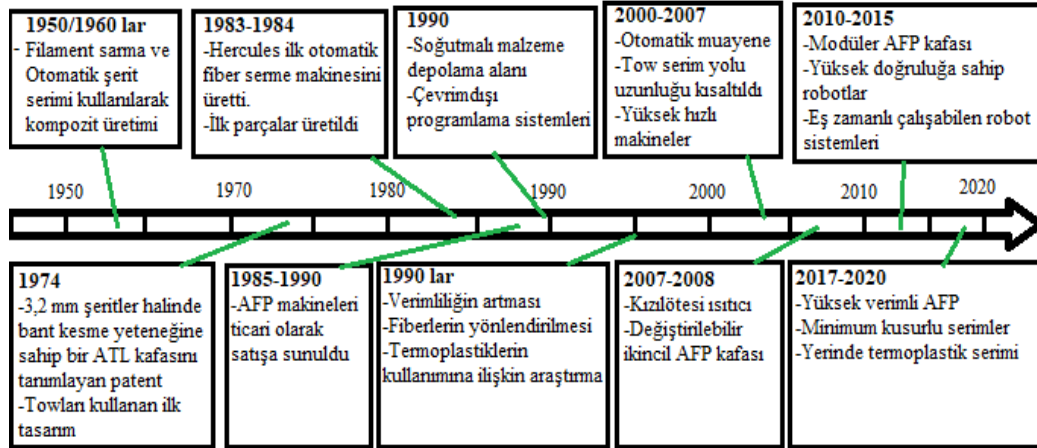
sağlanır ve ısıtıcılar yardımıyla malzeme yapışma sıcaklığına ulaşarak uygun bir serim yapılması gerçekleştirilir. Her bir kat farklı yönelimlerle (0° - 45° - 90° - 135°) serim yapılabilir; bu yöntem de yükü istenen yönde taşıyabilen bir yapı oluşturulmasına fayda sağlamaktadır. Tezgah ile serim yapılırken yine Fibersim veya Catia kompozit dizayn (KPD) gibi yazılımlarda tasarım yapılır. Ardından bu tasarım datası nüemik kontrol (NK) programların oluşturulacağı bilgisayar destekli imalat (BDİ) yazılımlarına import edilir. Bu yazılımlar sayesinde tezgahın anlayacağı G kodlar oluşturularak serim uygulaması gerçekleştirilir. Tezgah ile serimin avantajı, yapılan üretimin tekrarlanabilirliği, düşük scrap malzeme miktarı, kompleks yapıların minimum hata ile üretilbilmesi, hızlı üretim süreleri olarak sayılabilirken. Dezavantaj olarak pahalı tezgah ve ekipman yatırımı, bakım maliyetleri, kompleks serim toolu maliyeti, kalifiye operator ihtiyacı, tasarım ve üretim programlarını kullanacak tecrübeli mühendis ihtiyacı olarak sıralanmaktadır. Şekil 3.10’ da OFS sisteminde kullanılan yatay köprülü tip [48], dikey köprülü tip [49], robot kolu tip [50] makine tipleri paylaşılmıştır.



Şekil 3.10 Yatay köprülü tip(a), dikey köprülü tip(b), robot kolu tip(c) OFS makinesi

4.1 Otomatik Fiber Serme Sistemi Nedir?

OFS, üretimi daha verimli hale getiren nispeten yeni bir kompozit malzeme üretim sürecidir. Yüksek üretim hızı, yüksek doğruluk, esneklik ve tekrarlanabilirlik ile bu teknik, uçak gövdeleri veya rüzgar türbini kanatları gibi iler teknoloji gerektiren yapıların üretiminde tercih edilmektedir.



Şekil 4.1 Otomatik fiber serme gelişmelerinin zaman çizelgesi

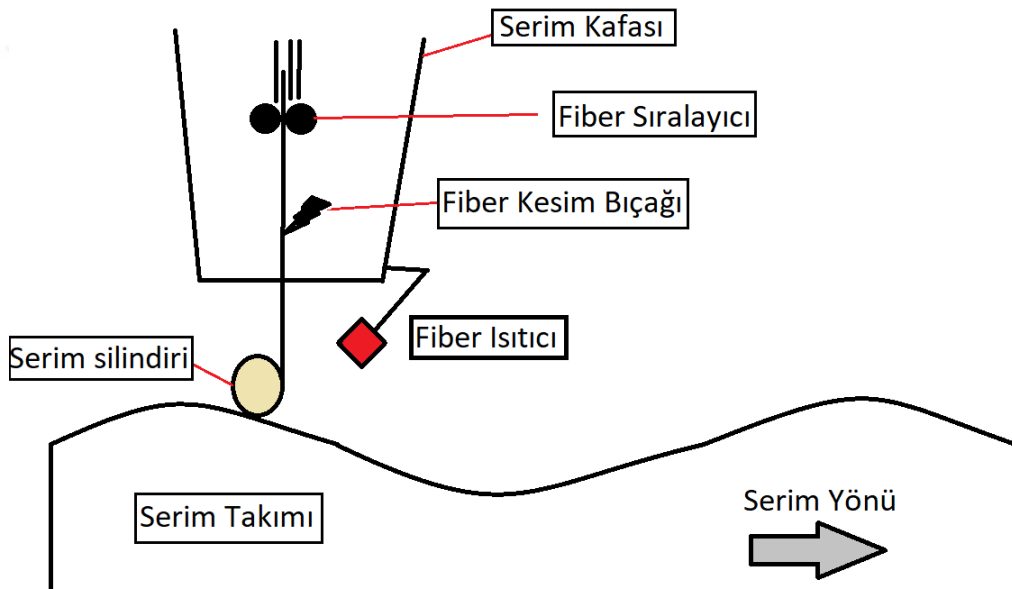
Şekil 4.1’de [3] zaman çizelgesi olarak paylaşılan OFS sisteminin başlangıcı 1950’ li yıllara kadar dayanmaktadır. 1980 li yıllarda ile OFS makinesi ve ilk parça üretimi ile hızlanan sistemin gelişimi 1990 lı yıllarda verimlilik üzerine çalışmalarını yoğunlaştırmıştır. 2000 li yıllara gelindiğinde yüksek hızlı makine ve serim kafa yapısı özelleşmesi ise son haline yaklaşan OFS sistemi 2020’ li yıllarda popüler olarak kullanımına devam etmektedir.

4.2 Otomatik Fiber Serme Sistemi Temel Bileşenleri

Sistemin temel prensibi fiberlerin kalıp veya mandrele serim işleminin hassas bir şekilde gerçekleştirilmesidir. OFS sisteminde kullanılan ve sistemin temel bileşenleri olan ekipmanlar aşağıdaki gibidir;

1. Fiber serim kafası
2. Robotik kol veya köprü sistemi
3. Mandrel veya kalıp yüzeyi
4. Bilgisayar destekli tasarım ve imalat yazılımları

4.2.1 Fiber Serim Kafası Bölümleri



Şekil 4.2 Otomatik fiber serim kafası şematik gösterimi

Bu makinenin kritik kısmı Şekil 4.2 de gösterilen, serim yapılan katın konsolidasyonu sırasında malzemelerin konumunu, basıncı ve sıcaklığı kontrol eden serim kafasıdır.

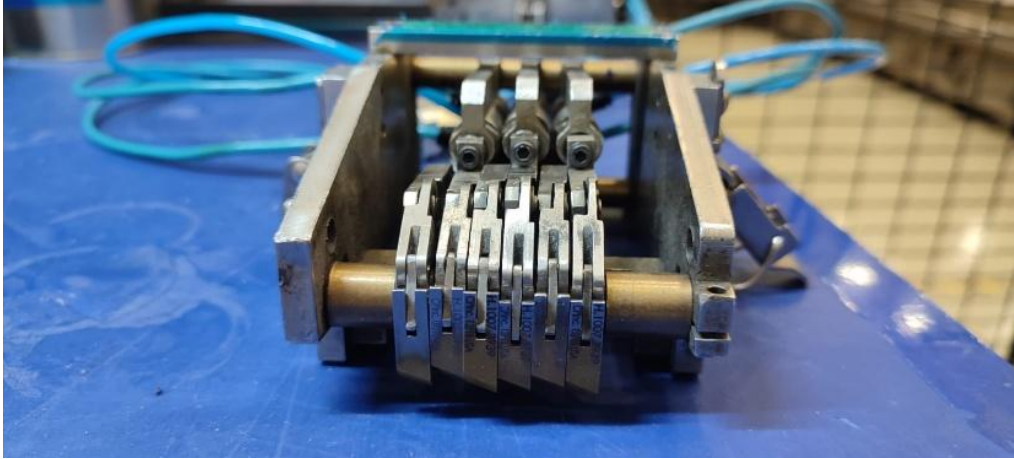
Fiber (tow): Serim yapılan malzemeyi tanımlamak için kullanılır genellikle karbon fiber, cam fiber veya aramid şeklinde kullanılmaktadır. Genişlikleri 1/8 inç ,1/4 inç veya 1/2 inç olarak uygulanmaktadır. Serim silindrinde bulunan tüm fiberlerin tek geçiş hareketinde serimlerinin yapıldığı bölgeye kurs ismi verilmektedir. Şekil 4.3 te OFS makinesi fiber besleme ünitesinde bulunan fiberler gösterilmektedir.



Şekil 4.3 Fiberlerin gösterilmesi

Fiber besleyiciler: Makaralardan gelen fiberleri ayrı ayrı besleyen sistemdir

Kesme ve yeniden başlatma mekanizması: Karmaşık eğrileri takip etmek veya serimi durdurmak için gerektiğinde fiberlerin kesilmesi ve yeniden başlatılmasını sağlayan sistemdir. Şekil 4.4 de gösterildiği gibi her fiber için bir adet kesici bulunmaktadır. Pnömatik sistemle kontrol edilen kesicilerin çalışma hassasiyeti serimin kalitesini önemli ölçüde etkilemektedir.



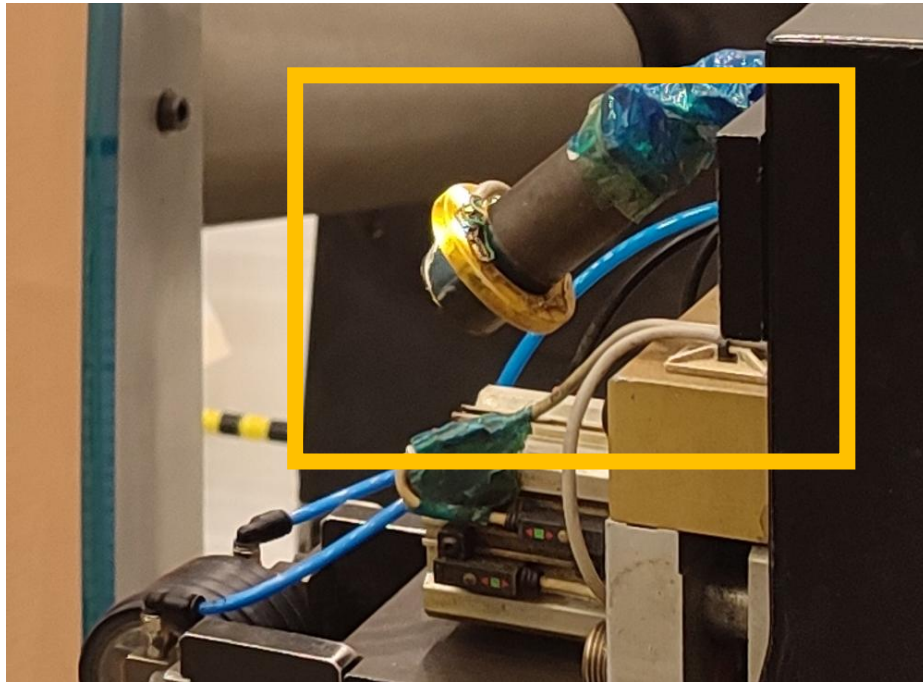
Şekil 4.4 Fiber kesim mekanizması gösterilmesi

Serim silindiri: Fiberlerin kalıba veya mandrel yapışmasını sağlamak ve serim esnasında oluşan havayı dışarı atmak için fiberleri yüzeye bastıran sistemdir. Şekil 4.5 de gösterilen serim silindirinin pnömatik olarak ileri geri hareketler sayesinde serim kafası serim kalıbını takip etmekte ve basınç sensörleri yardımıyla ihtiyaç duyulan basma kuvveti sağlanmaktadır.



Şekil 4.5 Serim silindrinin gösterilmesi

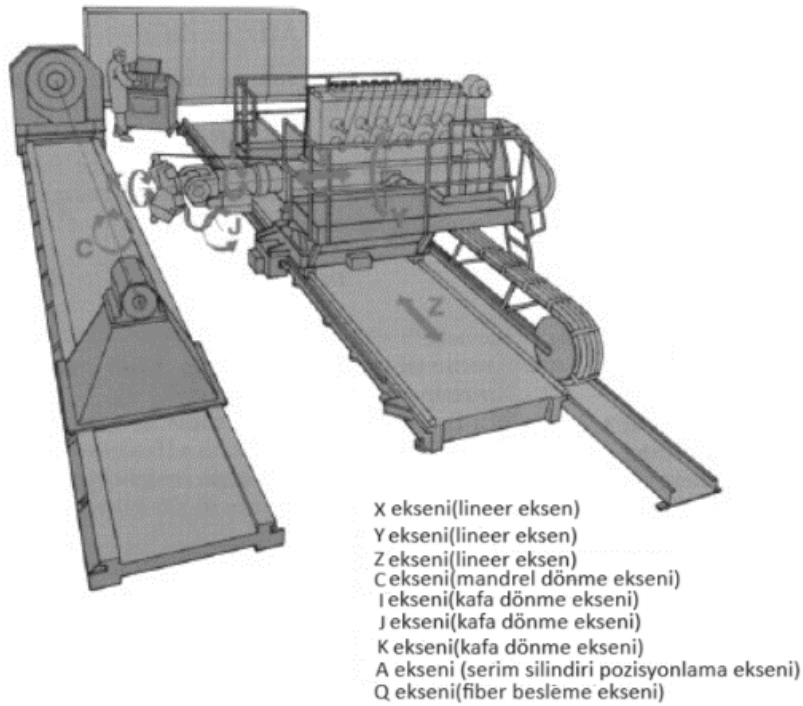
Isıtma Sistemi: Yapıştırma için önceden reçine emdirilmiş fiberlerdeki reçineyi serim için uygun sıcaklığa eritmek için kızılötesi lambalar, lazerler veya sıcak hava üfleyiciler kullanılan sistemdir. Şekil 4.6 da sıcak hava üfleyici ısıtma mekanizması gösterilmektedir.



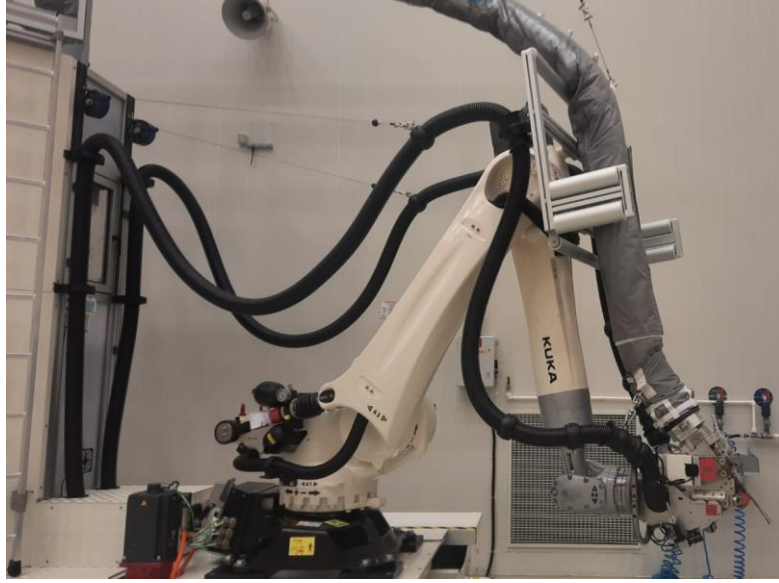
Şekil 4.6 Isıtma sisteminin gösterilmesi

4.2.2 Robotik Kol veya Köprülü Sistem Bölümü

Fiber serim kafasını 5 ila 7 eksenle yüksek hassasiyetle hareket ettiren sistemdir. Tipik bir otomatik fiber serme makinesi Şekil 4.7 [51] ve Şekil 4.8’ de gösterildiği gibi, uç kısmında bir serim kafası bulunan, bilgisayarla kontrol edilen bir robotik koldan veya özelleştirilmiş bir makineden oluşur. Makineler, bilgisayar kontrollü altı veya yedi eksen olabilirler, üç eksen (X, Y, Z) lineer olarak hareket ederken, iki veya üç eksen (I, J, K) kafa dönüşü ve silindirik parçaların (kalıp) imalatına olanak sağlayan bir mandrel ekseni (C) dönüşünden oluşur. İlave olarak serim silindirinin, serim takımı formuna göre doğru pozisyonu alması için bir eksen (A) ve fiberlerin doğrusal olarak serim silindiri alt kısmına beslenmesini sağlayan diğer bir ilave eksenden (Q) oluşmaktadır. Bu çalışmada test numunelerinin serimi için Fives firmasına ait yatay köprülü tip Cincinnati VIPER® 1200 makinesi kullanılmıştır. Makine serim kafası 6.35 mm genişliğinde 12 adet fiber serimi gerçekleştirmektedir. Bir kurs boyunca 76.2 mm genişliğinde malzeme serimi gerçekleştirilmektedir. En kısa fiber serimi 50.8 mm olarak uygulanmaktadır. Sıcak hava üfleme ile reçineyi serim için uygun sıcaklık ve yapışkanlık yapısına ulaştırmaktadır.



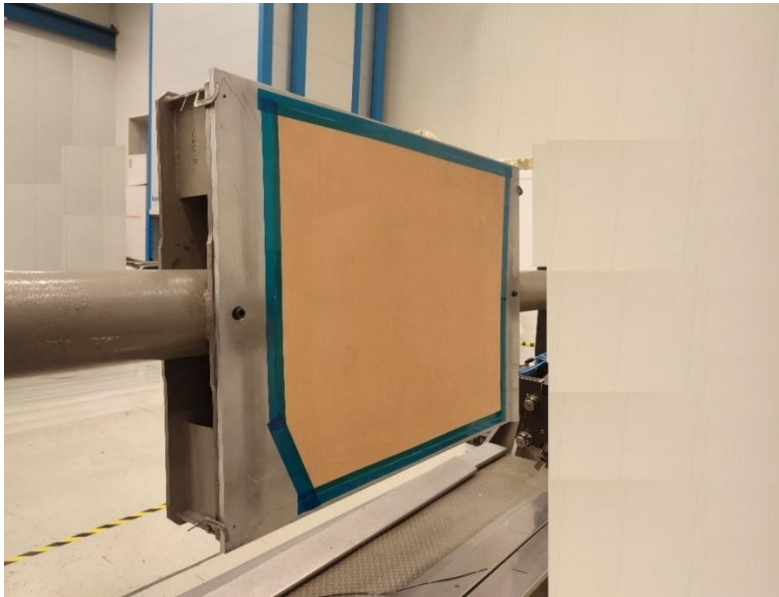
Şekil 4.7 Otomatik fiber serme makinesi şematik gösterimi



Şekil 4.8 Otomatik fiber serme robotu gösterilmesi

4.2.3 Mandrel veya Kalıp Bölümü

Fiberlerin üzerine seriminin yapıldığı kalıp yapısıdır. Üretimi yapılacak olan kompozit parçanın yapısına göre sabit yapıda veya silindirik parçalar için dönebilen yapıda olabilmektedir. Şekil 4.9’ da deneysel çalışmalarda kullanılan test numunelerinin serim takımı gösterilmektedir. Genel olarak genleşme katsayısı düşük olan invar vb. metallerden üretilmektedir. Serime başlanmadan önce ayırıcı benzeri malzemeler uygulanarak serim sonrası malzemenin kolay sökülmesi sağlanmaktadır.



Şekil 4.9 Serim kalıp bölümü gösterilmesi

4.2.4 Bilgisayar Destekli Tasarım ve İmalat Yazılımları

Serim yapılacak kompozit malzeme için öncelikle bilgisayar destekli tasarım yazılımları kullanılarak kompozit tasarımı yapılması gerekmektedir. Bu çalışmada CATIA KPD kullanılarak tasarımlar tamamlanmıştır. Tasarım ağacında aşağıdaki bölümler için geometrik unsurların tanıtılması gerekmektedir.

Rozet: Parçanın serimi yapılacak yönlerin tanımlanması için kullanılan koordinat sistemidir. 0 derece x eksenini yönünü göstermektedir.

Sınırlar: Her bir serim katmanını için serim yapılacak alanı tanımlayan ve kapalı bir bölgeyi içermesi gereken unsurlardır.

Serim Yüzeyi: Serim yapılacak kalıp geometrisinin yüzey formudur. Rozet ve sınırların bu yüzey üzerine iz düşümü alınarak serim unsurları tanımlanmış olur.

Serim Referans Eğrisi: Serim yapılacak model kompleks yapıda ise rozet ile 0 yönü tanımlamak için kullanılan bir çizgi yeterli olmayacaktır. Kompleks serim yapılması gereken durumlarda birden fazla referans eğri tanımlaması yapılması gerekmektedir.

Serim Bölgesi Yönü: Serim yapılacak yönü tanımlamak için kalıp geometri yüzeyinin hangi bölgesine serim yapılacak o bölgeye bir nokta tanımlanması gerekmektedir.

Serim Bölgesi: Özel parametre çalışması istenen bölgeler için sınır şeklinde kapalı bölgeler tanımlanarak serim esnasında bu bölgede farklı serim hızı, basma kuvveti gibi özel parametreler kullanılabilir.

Serim Katmanı Yapısı: Serim yapılacak katların tanımlandığı bölümdür. Her bir kat için sınır ve serim açısı tanımlaması gerekmektedir. Açılar tanımlanırken programda tanımlanan harfler kullanılmaktadır. Örneğin $A = 0^\circ$, $B = 45^\circ$, $C = 90^\circ$ şeklinde tanımlanmaktadır.

Bilgisayar destekli tasarım yazılımlarında tasarım tanımlandıktan sonra bilgisayar destekli imalat yazılımının kullanılabileceği formata dönüştürme işlemi uygulanmaktadır.

Bu çalışmada test numunelerinin programını hazırlamak için bilgisayar destekli imalat yazılımı olarak makine üretici olan Fives firması tarafından sağlanan ACE yazılımı kullanılmıştır.

Tasarımı tanımlanan dosya ACE yazılımına içeri aktarma işlemi yapılır. Kullanılacak makine seçimi ayarları tanımlanır. Her bir katman için tasarımda tanımlanan serim açısı, sınırlar otomatik olarak seçili halde gelir yine de manuel olarak değiştirmek mümkündür. Tüm serim katmanları için ortak olarak kullanılacak olan malzeme kalınlığı, genişliği, fiber sayısı, serim hızı, serim silindiri basıncı gibi parametreler serim ayarları bölümünde tanımlanmaktadır.

Yüzey seviyesi: Serim yapılacak yüzey numarasını tanımlamaktadır. Serim yapılacak katlar arttıkça yazılıma yeni yüzeyler oluşturması sağlanabilmektedir.

Serim açısı: Serim açısını tanımlamaktadır. Rozet veya serim açıları referans alınarak 0°, 45°, 90°, 135° olarak tanımlanabilmektedir.

Fiber üst üste binme: Fiberlerin her bir kurs serimi yapılırken komşu kursun fiberi üzerine ne kadar boşluk veya üst üste binme yapabileceğinin tanımlandığı bölümdür.

Serim yanal kaydırma: Serim katmanları boyunca boşlukların ve üst üste binmelerin hep aynı bölgeye gelmesini engellemek için serim yapılacak bölgeye fiber genişliği ölçüsü olarak yanal kayma parametresi tanımlanabilmektedir.

Kurs bölme: Serim yapılan kurs devamında serim yapılması istenilmeyen bir bölge olduğunda serim işlemine yanal kurstan veya serim yapılması istenmeyen bölge sonrasındaki kurstan devam edilmesi tanımlanabilmektedir.

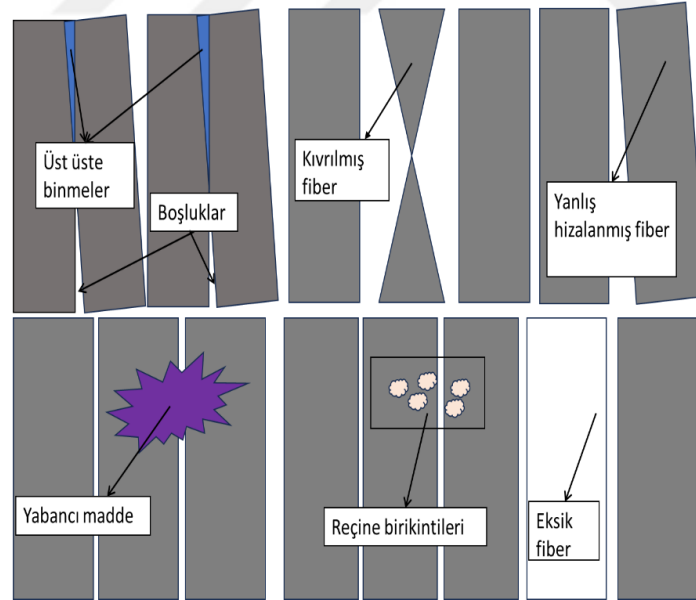
Fiber bant daralması: Dış bükey bölgelere serim yapılırken serim silindiri serim kalıbına tam olarak temas edememektedir. Bu köşe bölgeleri için serim silindirinin kaç tekerleğinin temas etmesi serim için uygunsa serim yapılacak bu köşe bölgenin kurslarını istenen fiber sayısına uygun şekilde bölünmesi işleminin tanımlandığı bölümdür.

Fiber sınırlara üst üste binme: Serim katları boyunca sınır bölgelere fiberlerin genişliğine oranla ne kadar boşluk veya üst üste binme yapmasına izin verileceğinin ayarlarının yapıldığı bölümdür.

5 OTOMATİK FİBER SERME ÜRETİMİNDE YAŞANAN SORUNLAR

Çeşitli işlem parametreleri, reçine emdirilmiş fiber kusurları ve üretim hataları da dahil olmak üzere OFS üretim sürecinin karmaşık yapısı nedeniyle laminatlarda boşluklar, üst üste binmeler, kıvrılmış fiberler, açısal sapma gibi kusurların oluşması gözlenmektedir. Bu kusurlar nihai ürünün mekanik performansını olumsuz etkileyebilmektedir [6,52].

Literatür çalışmaları kapsamlı şekilde incelendiğinde, OFS ile ilişkili olarak Şekil 5.1’ de gösterilen temel sorunlar tanımlanmaktadır. Tablo 5.1’ de [4] üretim hata türleri, sebepleri, önemi ve muhtemel çözüm önerileri detaylandırılmıştır.



Şekil 5.1 OFS yönteminde üretim kaynaklı sorunların gösterilmesi

Boşluklar ve Üst Üste Binmeler: Bunlar, fiber çekme genişliğindeki değişikliklerden ve yerleştirme yanlışlıklarından kaynaklanan en yaygın

kusurlardır. Boşluklar (negatif tolerans) ve üst üste binmeler (pozitif tolerans) laminatın mukavemetini ve sertliğini önemli ölçüde etkileyebilmektedir.

Fiber Hizalama Hatası: Genellikle makine kinematiği ve fiber yönlendirmesinden kaynaklanan fiber serim konumlandırmasındaki sapmalar, kompozit yapının mekanik özelliklerini etkilemektedir.

Açısal Sapma: Eğri yüzeylere yerleştirme sırasında oluşabilen fiber serimindeki istenmeyen dalgalanmalar, laminatın çekme ve basma dayanımını azaltmaktadır.

Kıvrılmış Fiber: Serim sırasında fiberlerin kıvrılması, laminat genel kalitesini etkileyebilecek lokal kusurlara yol açmaktadır.

Tablo 5.1 Üretim hata türlerinin ve ilişkili kategorilerinin listesi

Hata Tipi	Sebebi	Önem	Muhtemel çözüm önerisi
Boşluk/Üst üste bindirme	Fiber yönlendirme, kompleks yüzeylerde serim yapılması	Kusurun başladığı bölgeler, reçine açısından zengin alanlar, kırıxıklık bölgesi	%50 Boşluk - %50 üst üste bindirme serimi, serim katlarının kaydırılması
Kıvrılmış fiber	Katlanmayla başlar, çift eğri formu takımlara yapılan serimler sırasında döndürme oluşmaktadır	Bölgesel kalınlıkta artış/azalma	El ile tamir
Eksik fiber	Fiber beslemenin durdurulması, yetersiz yapışma	Bölgesel kalınlık farklılıkları, reçine açısından zengin cepler	El ile tamir
Serim sınırı	Fiber sınır bölgelere gereken şekilde ulaşamıyor	Parçanın şeklini etkiler, kesilmezse arıza noktaları oluşur	Serim sınırında %100 üst üste bindirme uygulanması

Tablo 5.1 Üretim hata türlerinin ve ilişkili kategorilerinin listesi (devamı)

Açısal sapma	Hatalı silindir serimi, küçük yönelme yarıçapları	Üst üste binmelere neden olur, reçine açısından zengin alanlara yol açar	Referans eğri sayısının artırılması
Dolaşmış fiber	Silindir ve kesici arasındaki desteklenmeyen fiber parçaları	Boşluklara ve üst üste binmelere yol açar	El ile tamir
Pozisyon hatası	Besleme sırasında fiberlerin tıkanması, yanlış makine referansı	Boşlukla sonuçlanır, kusurun başlama bölgeleri olabilir, sınıra yakın olduğundan daha belirgin etki göstermektedir.	Makine kinematiği ve NK programın kontrol edilmesi
Katlanma	Makine kontrol sorunları gerginlik hataları, uzun veya karmaşık fiber yolları, yönlendirilmiş yollar	Bölgesel fiber hacim oranı üzerinde önemli etkisi bulunur, reçine açısından zengin alanlar oluşturur	El ile tamir ve serim yolları için NK program güncellenmesi
Büzülme	Yüksek derece fiber beslemesi	Önemli ölçüde dayanıklılık kaybı oluşmaktadır	El ile tamir
Kırıxıklık	Küçük yönelme yarıçaplarında fiber yerleşimi	Boşluklara, katlanmalara ve sonuçta mukavemet kaybına neden olur	El ile tamir

Tablo 5.1 Üretim hata türlerinin ve ilişkili kategorilerinin listesi (devamı)

Köprü oluşması	Çok fazla fiber gerilimi, yetersiz yapışma oluşması	Reçine bakımından zengin alanlar oluşur, katmanlara ayrılma	Baskı ve besleme için NK program güncellenmesi
Gevşek fiber	Fiber uzunluğu, silindir ve kesiciler arasındaki uzunluktan daha kısadır	Boşluklar/üst üste binmeler ve eksik towlarla sonuçlanır	El ile tamir
Fiber birleştirme	Kesme işlemi sırasında iki fiber uca birleştirildi	Bölgesel kalınlık değişimi, özellikle basınç yükleri altında arızanın başlayacağı bölge	Spesifikasyona uygun olarak el ile tamir
Yabancı madde	Kafada reçine veya elyaf tüyleri birikiyor, üretim alanından diğer kalıntılar	Bir sonraki katın yanlış yapışması	El ile tamir

Tablo 5.2’ de [6] literatürdeki deneysel çalışmalar, katkıda bulunanlar, yöntem ve test edilen mekanik özellikler karşılaştırmalı olarak paylaşılmıştır.

Tablo 5.2 Laminatlardaki kusurlar ile mekanik özellikler arasındaki bağlantıları inceleyen literatürdeki çalışmalar

Katkıda bulunanlar	Boşluk	Üst üste binme	Fiber dalgahlığı	Burkulmuş fiber	Yöntem	Mekanik özellikler
--------------------	--------	----------------	------------------	-----------------	--------	--------------------

Tablo 5.2 Laminatlardaki kusurlar ile mekanik özellikler arasındaki bağlantıları inceleyen literatürdeki çalışmalar (devamı)

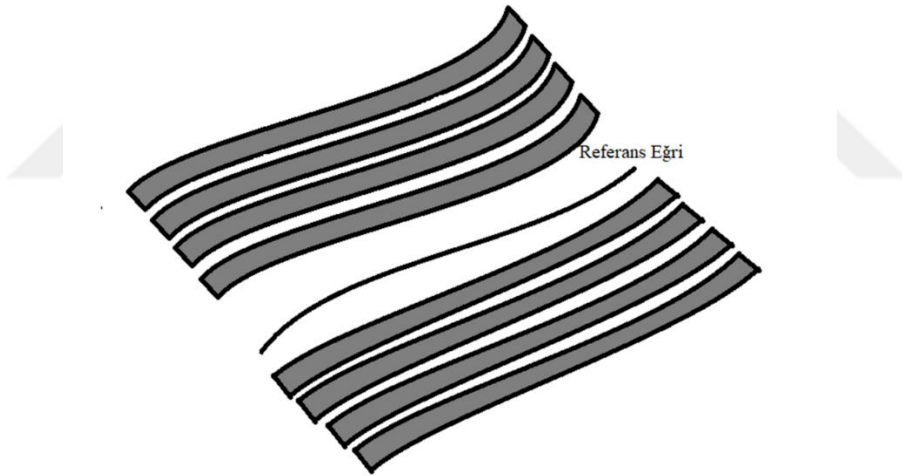
Sawicki ve arkadaşları [53,54]	+	+	-	-	Deneysel	Basma testi
Croft ve arkadaşları [7]	+	+	-	+	Deneysel	Çekme, basma, düzlemsel kesme, delikli çekme ve delikli basma
Marrouze ve arkadaşları [55]	+	-	+	-	Simülasyon ve deneysel	Dayanıklılık ve kararlılık
Lan ve arkadaşları [56]	+	+	-	-	Deneysel	Basma ve düzlemsel kesme
Guin ve arkadaşları [10]	+	-	-	-	Deneysel	Çekme, basma ve delikli basma
Woigk ve arkadaşları [11]	+	-	-	-	Deneysel	Çekme ve basma

Tablo 5.2 Laminatlardaki kusurlar ile mekanik özellikler arasındaki bağlantıları inceleyen literatürdeki çalışmalar (devamı)

Elsherbini ve arkadaşları [57]	+	-	-	-	Deneysel	Yorulma
--------------------------------	---	---	---	---	----------	---------

5.1 Açısal Sapma

Geometrinin ve serimin karmaşıklığı esasen yerel olarak belirlenmiş fiber açısından sapmayı belirlemektedir. Kullanılan ACE yazılımı fiber rotalarını tanımlamak için referans eğrileri kullanmaktadır. Bu referans eğrileri genellikle bir fiber kursunun merkez çizgisine karşılık gelmektedir. Şelik 5.2 de gösterildiği gibi pek çok bitişik fiber yolu tek bir referans eğrisi ile yönlendirilmektedir.



Şekil 5.2 Referans eğri ile fiberlerin yönlendirilmesi gösterilmesi

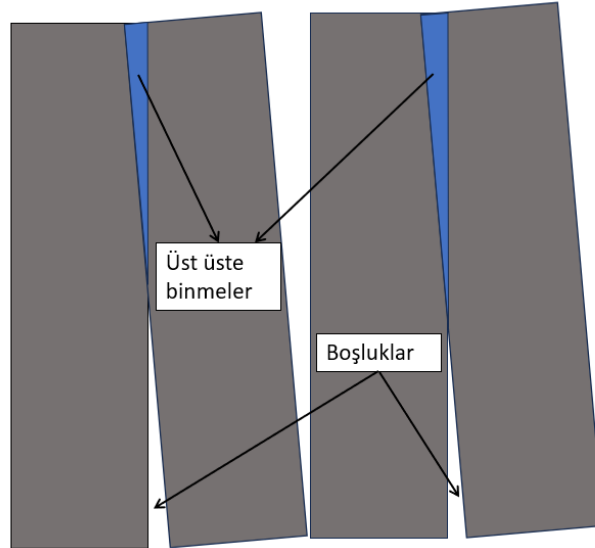
Eğer referans fiber yolu lineer değil formu ise, gerçekleşen fiber serim açısı, fiber rotası boyunca sürekli olarak istenilen fiber açısından sapmaktadır. Özellikle fiber yönlendirmesi, fiber kursunun dönüş kısımlarında farklı yarıçaplara neden olur ve bu da referans eğrisine göre önemli fiber açısı sapmalarına yol açmaktadır [58,59].

Fiber kurs genişliğinin ayarlanması, fiber açısı sapmalarının büyüklüğünü etkilemektedir. Fiber kursu genişliğinin artması fiber serim açısı sapmasını artırmaktadır [60]. Aynı zamanda fiber kurs genişliğinin artması boşluk ve üst üste binmelerin sayısını da arttırmaktadır [61,62,63].

Oluşan boşluk ve üst üste binme sayısını azaltmak için fiber kursu genişliği azaltılması gerekmektedir. Ancak, fiber kursları ne kadar dar olursa fiber serim oranı o kadar azalır. İstenen serim kalitesi ile gerekli serim süresi arasındaki bu denge, fiber serim planlamasında dikkate alınmalıdır.

5.2 Boşluk ve Üst Üste Binneler

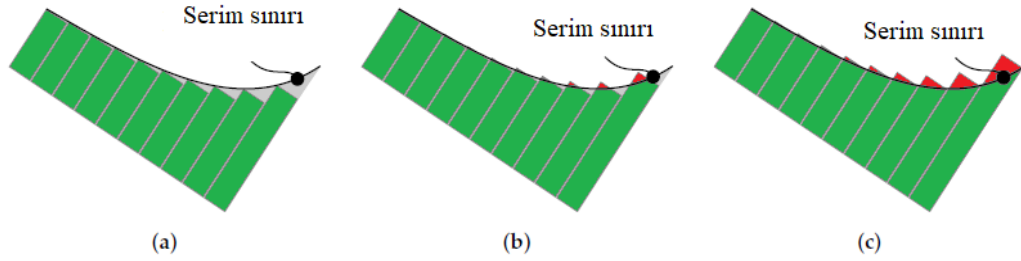
Boşluklar ve üst üste binneler, OFS işlemi sırasında en sık görülen kusurlardır. Bunların oluşması için temel faktörler, malzemenin işlenebilirliği ve makine parametreleridir [61]. Malzeme kalitesine bağlı olarak her çekmede genişlik dalgalanmaları olur. Şekil 5.3 de gösterildiği gibi bitişik fiberler ve kurslar arasında boşluklara (negatif tolerans) veya üst üste binmelere (pozitif tolerans) neden olur [64].



Şekil 5.3 Boşluk ve üst üste binnelerin gösterilmesi

Karmaşık parça geometrileri ve sofistike katmanlama tanımları (örneğin, rampa, konik katmanlar,.) boşlukların ve üst üste binnelerin oluşumunu teşvik etmektedir [58,61]. Serim stratejisine bağlı olarak, fiber kurs genişliği serim yolu boyunca değişebilmektedir. Yol boyunca kurs genişliğinin değişmesi ise kaçınılmaz olarak laminat içinde boşluklar ve örtüşmelerle sonuçlanmaktadır [62,65]. Öngörülen boşluk-üst üste binme oranı bu zik-zak şeklindeki kusurların miktarını ve büyüklüğünü belirlemektedir. Boşluk – üst üste binme oranı %0 olarak kullanıldığında, katman sınırında yalnızca boşluklar oluşmaktadır. %100 olarak kullanıldığında ise sadece üst üste binneler oluşmakta hiç boşluk oluşmamaktadır.

%0 ile %100 arasındaki herhangi bir kapsama stratejisi, malzeme boşlukları ve üst üste binmelerin bir kombinasyonu ile sonuçlanmaktadır ve Şekil 5.4 de gösterilmektedir. Jegley ve diğerleri [66], Marouene ve diğerleri [67], düz test panellerinde düzlemsel değişken fiber yönelimlerinin potansiyelini deneysel olarak göstermektedir. Örneğin, %100 üst üste binme stratejisi, basınç yükü altında panellerin kararlılığı açısından performansı iyileştirmektedir.



Şekil 5.4 a) %0 Boşluk-Üst üste binme stratejisi, b) %50 Boşluk-Üst üste binme stratejisi, c) %100 Boşluk-Üst üste binme stratejisi

Serim sırasında sınır bölgelerinde ve dönme alanlarındaki radius farkları serim yapılan kurs genişliğinin serim boyunca değişmesi boşluk ve üst üste binmelerin miktarını ve konumunu belirlemektedir. Ayrıca otoklav işlemi sırasında boşluk olan bölgelerde reçine birikimleri ve reçine bakımından zengin alanların oluşmasına neden olmaktadır. Woigk ve arkadaşları [11] mikroskop ve yüksek hızlı görüntüler aracılığıyla, boşlukların ve üst üste binme bölgesindeki laminat arızasının kökenini fiber serim dalgalanması olarak tanımlamaktadır.

Sawicki ve Minguett [68], Sawicki ve diğerleri [53] boşlukların ve üst üste binmelerin laminatların mekanik özellikleri üzerindeki etkilerinin araştırılmasına önemli ölçüde katkıda bulundular. Araştırmacılar, boşluklar ve örtüşmeler içeren farklı laminat konfigürasyonları için sertlik ve mukavemetteki değişiklikleri belirlemek üzere kapsamlı bir test programı yürüttüler. Boşlukların ve üst üste binmelerin, sıkıştırma altındaki laminatların mukavemet özelliklerini önemli ölçüde azaltabileceğini buldular. Bir boşluğun veya örtüşmenin boyutuna bağlı olarak, sonraki katmanlarda düzlem dışı fiber dalgalanması meydana gelmektedir. Bu, boşluğun veya örtüşmenin geçiş bölgelerinde hasar başlangıcını teşvik etmektedir. Bu olay, malzemenin basınç mukavemetini önemli ölçüde etkilemektedir.

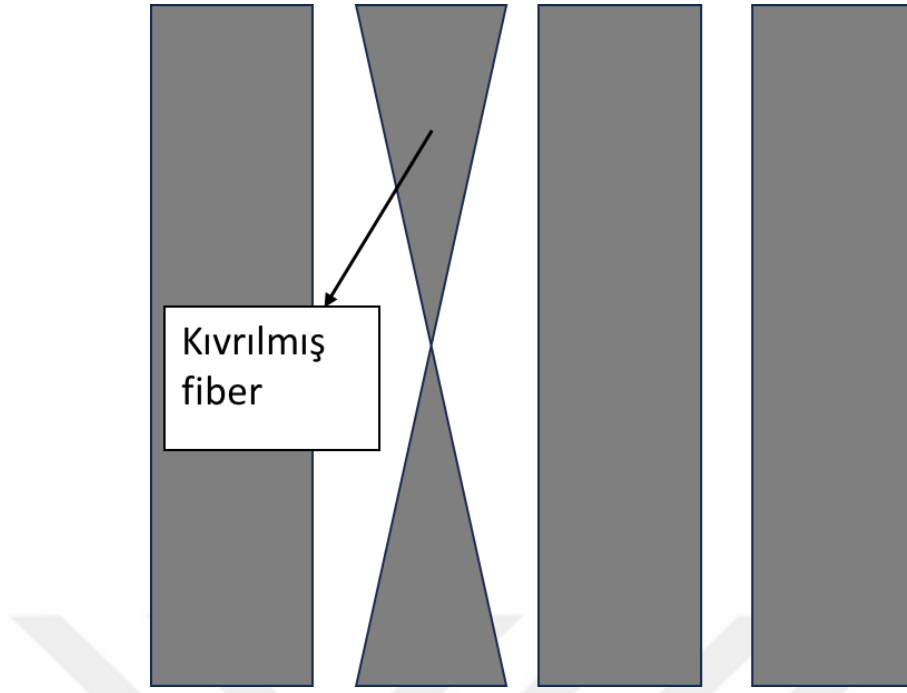
Ek olarak, Li ve diğerleri [69] ve Lan ve diğerleri [70,71], kütleme işleminin boşlukların ve örtüşmelerin geometrik görünümü üzerindeki etkisini gösteren çalışmalar yapmıştır. Otoklav işlemleri sırasında bir baskı plakası (esnek bir vakum torbasının aksine) kullanıldığında, geçiş bölgelerindeki fiber açığı sapmalarının ve dalgalanmanın daha az belirgin olduğu bulunmuştur.

Mevcut sınırlı verilerden, boşlukların ve üst üste binmelerin malzeme düzeyindeki sertlik ve mukavemet özellikleri üzerindeki etkisine ilişkin istatistiksel olarak anlamlı rakamlar elde edilememektedir. Kusurları göz önünde bulundurarak araştırılacak parametre alanı çok geniştir. Boşluklar ve üst üste binmeleri içeren laminatlar üzerinde malzeme testleri için test yönergelerinin veya standartlarının hala eksik olması büyük bir ikilem oluşturmaktadır. Geleneksel laminatlar için parametre alanı oldukça sınırlıdır. İlgili test yönergeleri veya standartları, numune geometrisini, yerleşimini, test düzeneğini, malzeme ve laminat seviyesindeki prosedürü tam olarak belirtmektedir.

Faló ve arkadaşları [9,72] geleneksel olmayan laminatların hasar toleransını deneysel olarak araştırdılar. Boşlukların ve üst üste binmelerin, sıkıştırma altında darbe hasarı olan laminatların mukavemeti üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bir etkisi olmadığını buldular. Çekme yükü altındaki çentik testleri (delikli numune çekme testi) için araştırmacılar aynı sonuca varırlar. Marouene ve arkadaşları. [73] basma yüklemesi altında çentik testleri gerçekleştirmiş ve laminattaki boşlukların ve üst üste binmelerin özellikle deliğe göre konumunun mukavemet özelliğini önemli ölçüde etkilediğini bulmuşlardır.

5.3 Kıvrılmış Fiber

OFS makinesinin fiber serme yolu boyunca hareket etmesinden dolayı, OFS uç efektörünün malzeme besleme ve kesme sistemi içinde fiberlerin bükülmesi meydana gelebilmektedir [74]. Şekil 5.5 de fiber kıvrılması şematik olarak gösterilmektedir.



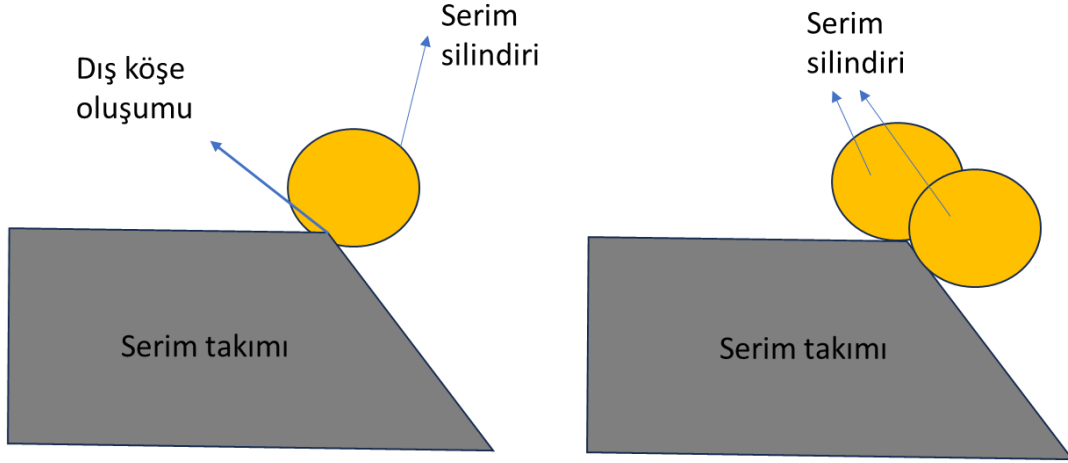
Şekil 5.5 Kıvrılmış fiber gösterilmesi

Fiberlerin genişliğindeki değişimler, malzeme besleme sistemi içerisinde yanıl hareketlerin oluşmasına olanak tanır ve bu da towların besleme sistemi içerisinde ters dönmesine neden olmaktadır. Ayrıca fiberlerin serimi sırasındaki dönüş hareketleri de fiberlerin kıvrılmasına neden olabilmektedir. Sonuç olarak kıvrılmışın fiberin yan bölgelerinde boşluk alanları oluşmaktadır [50,75].

Laminatlar içindeki kıvrılmış towlarının etkisine ilişkin çok az araştırma vardır. Sadece Croft ve arkadaşları [7] bu kusurun bazı sertlik ve mukavemet parametreleri üzerindeki etkisini deneysel olarak araştırmaktadır. Gelişmiş proses kontrolü ve malzeme kalitesindeki artış nedeniyle bu kusur nadiren meydana gelmektedir.

5.4 Köprü ve Köşe Oluşumu

OFS teknolojisinin besleme ünitesi tarafından fiberlerdeki gerilmenin kontrol edilmesi hem içbükey hem de dışbükey yüzeylere fiber malzeme serilebilmesi yeteneğini sağlamaktadır [76]. Fiber malzemenin nispeten yüksek gerilim altında olduğu filament sarma teknolojisine aksine, bu durum OFS teknolojisinde karmaşık yüzeylerde köprüleşmeye ve köşe oluşumuna neden olmaktadır.

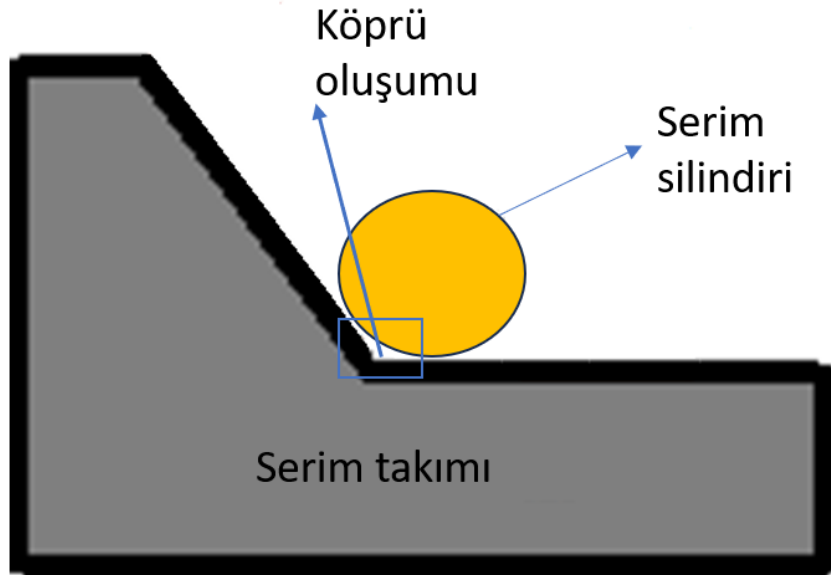


Şekil 5.6 Köşe oluşumu gösterilmesi

Fiberlerde öngerilme uygulanmadığı takdirde dışbükey yüzeylerde ise Şekil 5.6 da gösterilen köşe oluşumu meydana gelmektedir. İçbükey geometrilerde fiber serimi sırasında tow içindeki bu gerilimi Şekil 5.7 de gösterilen köprülemeyi tetikler [77].

Bu durum göz önünde bulundurulduğunda, köprüleme ve köşe oluşumunu önlemek için tüm fiber besleme sistemi boyunca towarların ön gerilimi izlenmeli ve hassas bir şekilde ayarlanmalıdır [5].

Özellikle fiber malzeme davranışı, takım geometrisi ve makine parametreleri köprü ve köşe oluşumunu etkilemektedir.



Şekil 5.7 Köprü oluşumu gösterilmesi

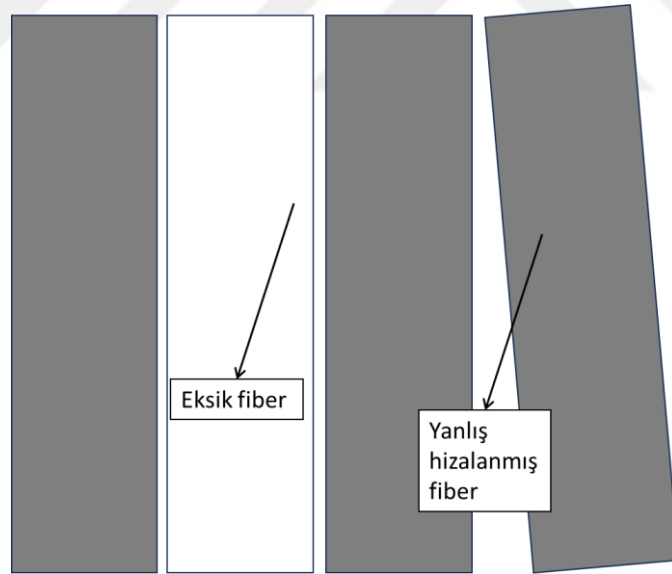
Lichtinger ve arkadaşları [61] serim silindiri ve oluşan geometrinin etkileşimini araştırdılar. Lokal özelliklerin (örn. rampalar, yarıçaplar...) laminat içinde köprüleme ve taçlandırma oluşumunu teşvik ettiğini bulmuşlardır. Araştırmacılara göre serim silindiri bu geometrik zorluklara uyum sağlayabilecek şekilde uyarlanabilir olmalıdır.

Dışbükey veya içbükey takım yarıçapına bağlı olarak fiberlerin yapışması başarısız olur ve towlar, serim takımı yüzeyinden bölgesel olarak ayrılırlar.

5.5 Eksik – Yanlış Hizalandırılmış Fiber

Fiber çekme yanlış hizalamaları öncelikle OFS makinesinin kinematik özelliklerinden ve kontrolünden kaynaklanmaktadır.

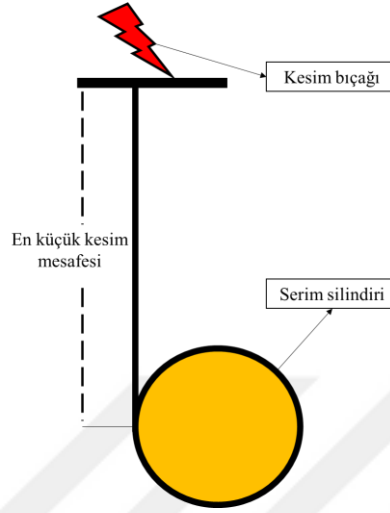
Perner ve arkadaşları [78], serim esnasında yük altındaki robotun işlem hızı ve atalet etkilerinin uç efektörün konumlandırma doğruluğunu etkilediğini savunmaktadır. Şekil 5.8 de eksik fiber ve yanlış hizalandırılmış fiber gösterilmektedir.



Şekil 5.8 Eksik-Yanlış hizalanmış fiber gösterilmesi

Tow serim ile ilgili olarak uyumsuzluklarının oluşumunda etkili olan diğer faktörler ise fiber malzemesinin işlenebilirliği ve serim katmanlamanın karmaşıklığı olarak değerlendirilmektedir. Ayrıca serim yolunun karmaşıklığı da tow hizalama hatalarında önemli bir etkiye sahip olmaktadır. Serim yolunun karmaşıklığı ile bağlantılı olarak, serim parametrelerinde tanımlanan boşluk, üst üste binme oranına

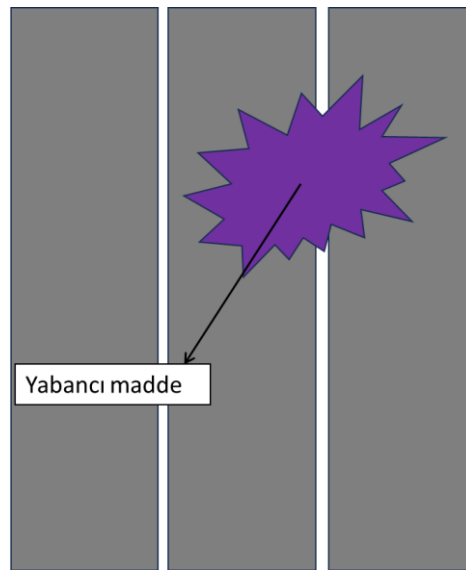
bağlı kalmak üzere bu tow hizalama hatalarının oluşması gerçekleşmektedir. Oluşan boşlukların boyutunu Şekil 5.9 da gösterilen en küçük kesim mesafesi olarak adlandırılan kesim bıçakları ile serim silindiri arasındaki mesafe belirlemektedir.



Şekil 5.9 En küçük kesim mesafesi gösterilmesi

5.6 Yabancı Madde

Yabancı maddelerin varlığı, kompozit malzemelerin mukavemet ve yorulma davranışı özellikleri değerlendirildiğinde önemli etkileri olabilmektedir [79,80]. Şekil 5.10 da fiberlerin serimi esnasında oluşabilen yabancı madde hasarı gösterilmektedir.

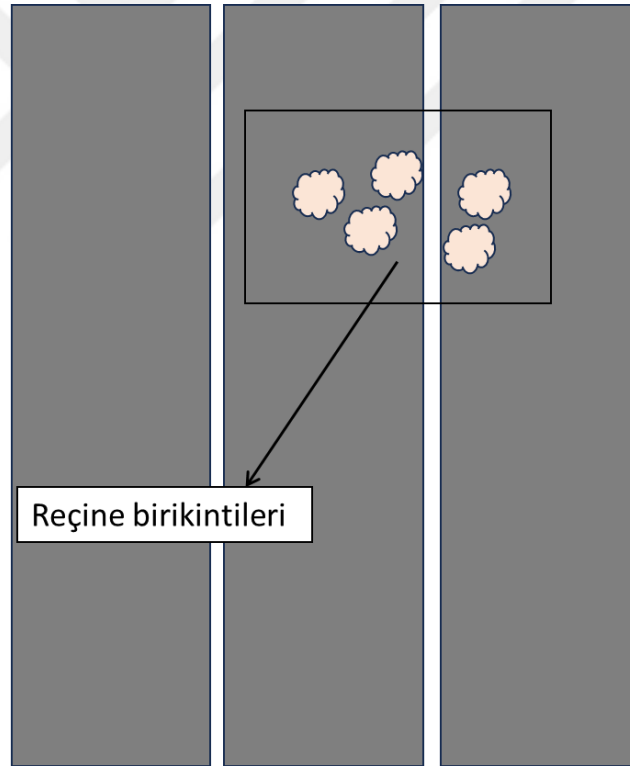


Şekil 5.10 Yabancı madde gösterilmesi

Genel olarak, fiber kompozitlerin herhangi bir üretim prosesi, laminat içerisinde kalıntılar (örn. yabancı cisimler, hava kalıntıları,) içerebilir [81]. Lif dalgalanmalarına ve açısal sapmalara bağlı olarak bölgesel tüy yumaklarının oluştuğu bilinmektedir. Seon ve arkadaşları [79], daha büyük maddelerin fiberlerin serimi esnasında fiber dalgalanmasına neden olduğunu göstermektedir.

5.7 Reçine Birikintileri

Fiberlerin serim esnasında yetersiz sıkıştırılması katmanlar arasında hava oluşumu olasılığını artırmaktadır. Çeşitli çalışmalar da sıkıştırma oranı ile katmanlar arasında hava oluşumu arasında doğrudan bir ilişki olduğunu göstermektedir. Serim yapılan fiberlerin genişlik dalgalanmalarından kaynaklanan küçük boşluklar ve Şekil 5.11 de gösterilen reçine birikintileri laminat içinde oluşan boşluk içeriğini artırmaktadır [64].



Şekil 5.11 Reçine birikintileri oluşumu gösterilmesi

Bu boşluk kısımlarına otoklav istasyonunda yüksek basınç ve sıcaklık etkisiyle reçine birikintileri oluşmaktadır. Reçine birikintileri oluşan bölgeler laminatın mukavemet özellikleri üzerinde etki göstermektedir.

6.1 Test Tanımlamaları

Bu bölümde uygulanan mekanik testler ve bunların deneysel kurulumu ayrıntılı olarak açıklanmaktadır. Öncelikle istatistiksel yaklaşım ve kullanılan materyalin tanımı sunulacaktır. Her mekanik test, belirli bir numune geometrisi için test parametrelerinin seçimini, uygun fikstürü ve kuponlar arasındaki değişkenliği azaltma stratejisini öneren farklı bir ASTM standardına tabidir. Bu standart kompozit malzeme test prosedürlerini, test numunesi boyutlarını tanımlamaktadır.

Her test, spesifik mekanik teste bağlı olarak farklı çene geometrisine sahip bir hidrolik test ekipmanı kullanılarak gerçekleştirilir. Deneyin tekrarlanabilirliği doğrultusunda, her kusur konfigürasyonu için beş özdeş numune test edilir ve nihai mekanik özellik, tüm bu numunelerin ortalaması kullanılarak hesaplanır. Her kusur türü için beş benzer kuponun ortalaması aşağıdaki şekilde hesaplanır:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n x_i \right) \quad (6.1)$$

Bu ifadede ortalama $\bar{x}$ ile temsil edilirken nihai gerilimi için kullanılmaktadır, x_i terimi i'inci numunenin sonucunu, n terimi ise numune sayısını, yani bu durumda altıyı temsil eder. Genellikle numune sayısı artırılarak daha kesin bir ortalama elde edilir fakat her test konfigürasyonu için özelliklerin istatistiksel olarak anlamlı değerlerini elde etmek amacıyla ASTM standartlarının gerektirdiği minimum numune sayısı beştir [82]. Testin hassasiyeti, tüm numuneler arasındaki farka bağlıdır ve testin geçerliliği hakkında bize iyi bir gösterge olmaktadır.

Denklem 6.2'de test hassasiyeti, standart sapma (s_{n-1}) ile temsil edilir ve numune sonuçları arasındaki değişimi gösterir. Standart sapma aynı zamanda testler

arasındaki hatanın da bir göstergesidir; dolayısıyla küçük bir sapma küçük bir hataya işaret eder.

$$s_{n-1} = \sqrt{\frac{(\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2)}{n - 1}} \quad (6.2)$$

Benzer şekilde, numunelerin değişim katsayısı (CV), ortalamaya göre yüzdelik hatayı temsil eder:

$$CV(\%) = \frac{s_{n-1}}{\bar{x}} \cdot 100 \quad (6.3)$$

Farklı serim yönlerine ve serim katman sayısına göre laminat özellikleri değişmektedir. Üretilen plakaların uygulanan yükler altındaki nihai mukavemetleri ölçmek için farklı lamine ve laminat yapılar oluşturulacak ve ilgili standartlara göre test edilecektir. Gerçekleştirilen testlerin özeti ve ayrıntıları Tablo 6.1’ de paylaşılmaktadır.

Tablo 6.1 Gerçekleştirilen deney tasarımı özeti

Test tipi	Serim sırası	Ölçülen değerler	Numune kalınlığı
Çentiksiz çekme testi (ASTM D3039)	$[0_4]_s$	Gerilim, gerinim, kuvvet, yer değiştirme, modülüs	1.2 mm
Çentiksiz basma testi (ASTM D3410)	$[0_8]_s$	Gerilim, kuvvet, yer değiştirme, hata kodu	2 mm

Tablo 6.1 Gerçekleştirilen deney tasarımı özeti (devamı)

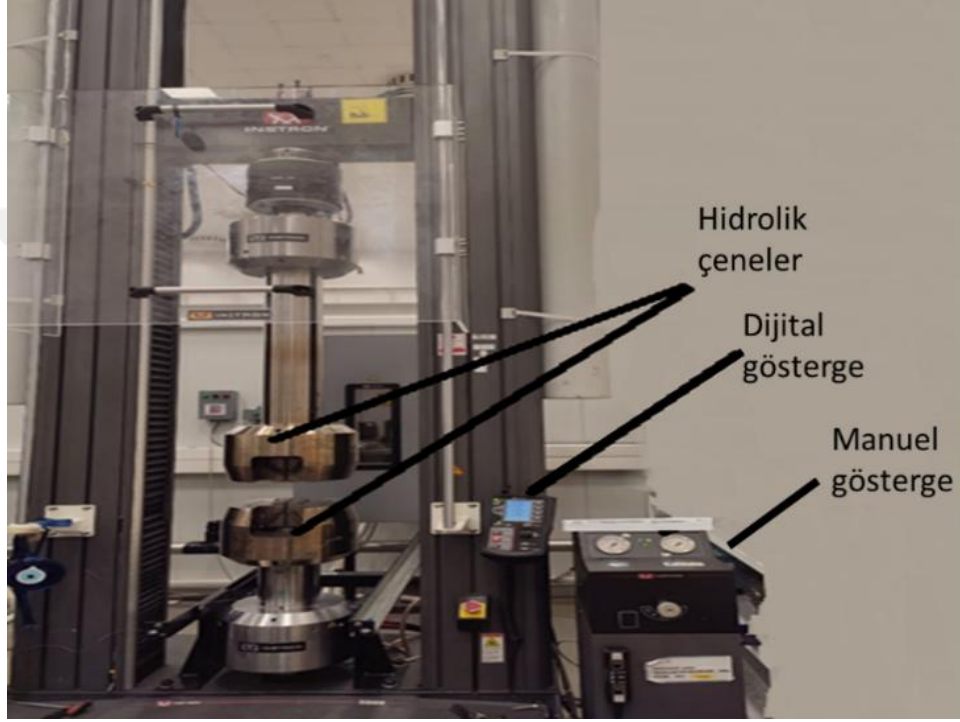
Delikli çekme testi (ASTM D5766)	$[(45/0/-45/90)_2]_s$	Gerilim, kuvvet, yer değiştirme, hata kodu	2.32 mm
Delikli basma testi (ASTM D6484)	$[(45/-45/90/0)_3]_s$	Gerilim, kuvvet, yer değiştirme, hata kodu	3.4 mm

ASTM standartları tarafından önerilen deneylere ait ayrıntılar ise Tablo 6.2’ de paylaşılmaktadır. ASTM standartlarında serim sırası bölümü için bir kısıt bulunmamaktadır. $[0]_s$ veya $[0,45,90,135]_s$ şeklinde uygulanabilmektedir.

Tablo 6.2 ASTM standartları deney tasarımı özeti

Test standardı	Test tipi	Numune boyutları (boy x genişlik x kalınlık)	Tırnak boyutları
ASTM D3039	Çentiksiz çekme	$250 \times 15 - 25 \times 1$ mm	56 mm
ASTM D5766	Delikli çekme	$200-300 \times 36 \times 2-4$, Ø6 mm delik	Hayır
ASTM D3410	Çentiksiz basma	$140-155 \times 10-25 \times 1-4$ mm	65 mm
ASTM D6484	Delikli basma	$300 \times 36 \times 3-5$, Ø6 mm delik	Hayır

Bu çalışmadaki testleri gerçekleştirmek için Şekil 6.1’ de gösterilen Instron 5985 test makinesi kullanıldı. Test makinesi 250 kN yük kapasitesine sahiptir. Deneyler gerçekleştirilirken test numuneleri hidrolik çenelere sıkıştırıldı ve deformasyona uğradığından emin olmak için uygulanan kuvvet test tipinde izin verilen parametreler doğrultusunda kademeli olarak artırıldı. Test numuneleri deformasyona uğramadan önceki en yüksek kuvvet manuel ve dijital göstergelerde izlendi, kaydedildi ve sonuçlar bölümünde detaylı olarak paylaşılmıştır.



Şekil 6.1 Instron mekanik test cihazı ve üniteleri.

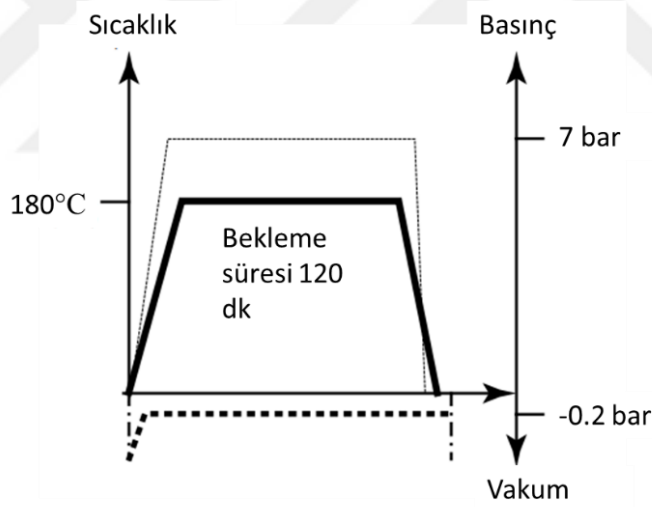
6.2 Kullanılan Malzeme Tanımı

Deneylerde kullanılan malzeme Hexcel firmasına ait “HexPly®M91 /34 %/ UD194 /IM7” kodlu yüksek performanslı ve son derece dayanıklı bir epoksi matristir. HexPly® M91, tek yönlü elyafarla birlikte sunulan, sertleştirilmiş ve kontrollü akışa sahip bir epoksi reçine sistemidir. HexPly® M91 prepregleri, temin edildiğinde buzdolabında saklanmalıdır. Prepreg buzdolabından çıkarıldıktan sonra, polietilen torba açılmadan önce oda sıcaklığına ulaşması beklenmelidir; (ambalajlı tam bir rulonun oda sıcaklığına ulaşması 48 saate kadar sürebilir). Fiber boyutları 3,175 mm (0,125") genişliğinde ve 0,184 mm (0,007") kalınlığındadır. Malzeme özellikleri Tablo 6.3’de özetlenmiştir [83].

Tablo 6.3 HexPly® M91/34%/UD194/IM7 malzeme özellikleri

Test tipi	Dayanım değeri (MPa)
Çentiksiz çekme testi (ASTM D3039)	2980
Çentiksiz basma testi (ASTM D3410)	1860
Delikli çekme testi (ASTM D5766)	505
Delikli basma testi (ASTM D6484)	315

Üretici firma tarafından tanımlanan otoklav kürleme parametreleri Şekil 6.2’ de paylaşılmaktadır ve tüm numuneler için benzer prosedür uygulanmaktadır



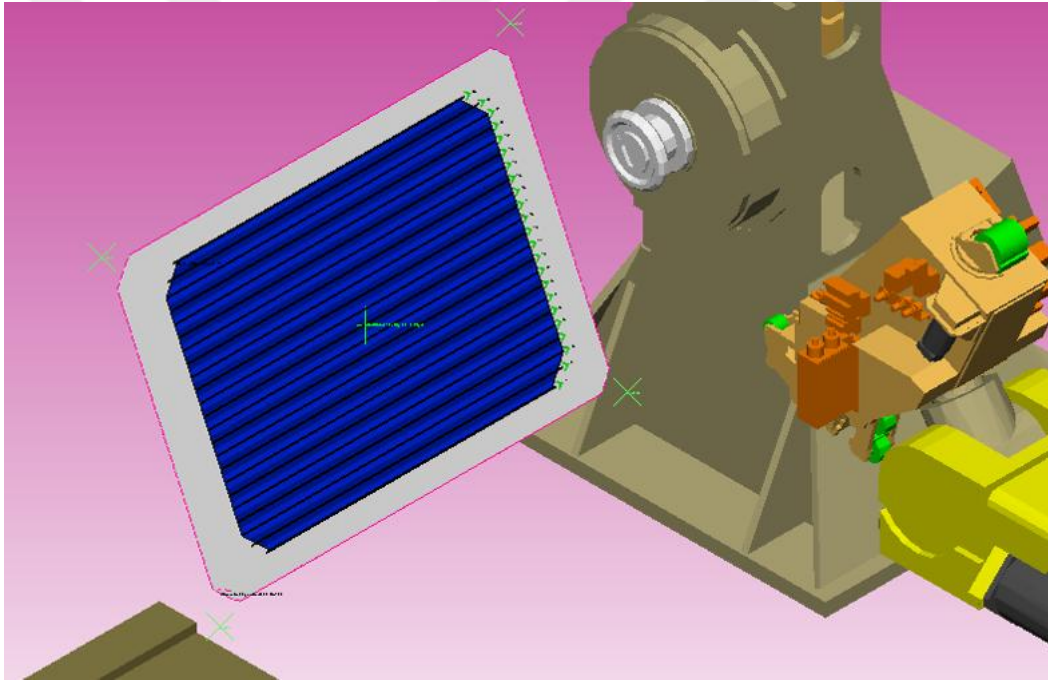
Şekil 6.2 Hexcel malzemesi otoklav kürleme parametreleri

6.3 Çentiksiz Çekme Testi (ASTM D3039)

Çentiksiz çekme testi (ÇÇT), çekme yönündeki aksenal gerinim, gerilim ve elastiklik modülünün miktarını belirler. Bu mekanik test ile mekanik özellikler arasındaki etkileşim, gerinim-gerilim ilişkisinde gösterilir. Grafikler oluşturulurken yatay konumda numunenin deforme olmadan önceki son boy miktarından ilk boy miktarından çıkarılması ile elde edilen yer değiştirme gösterilirken, dikey konumda

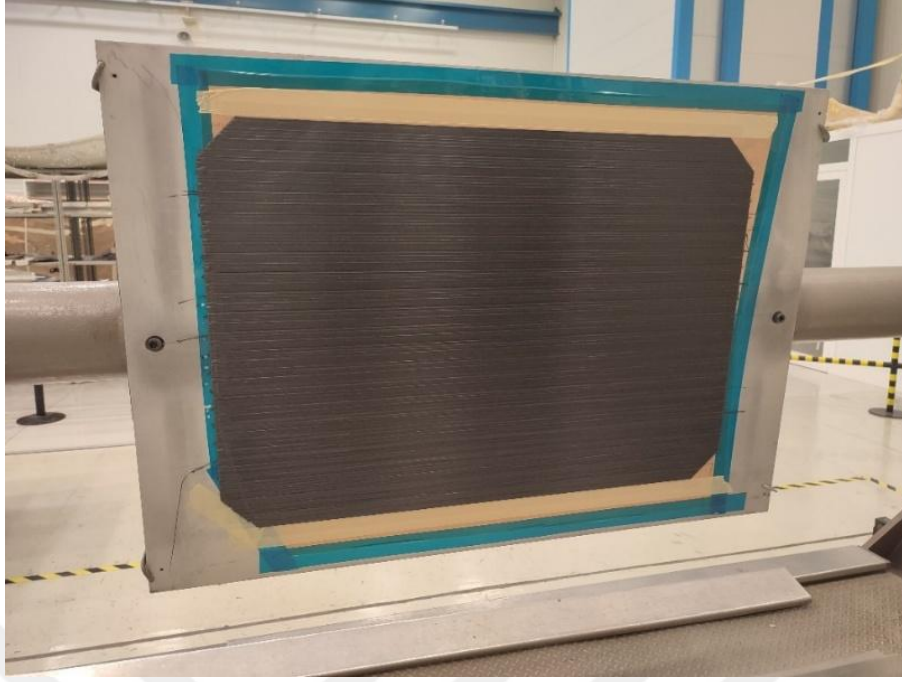
ise yükleme kuvvetinin numunenin başlangıçtaki kesit alanına bölünmesiyle elde edilen eksenel gerilim gösterilmektedir, bu gerilim değeri test makinesi tarafından elde edilmektedir. Lamine yapıdaki kompozit parçalarda tüm katlar aynı yönde olacak şekilde serim gerçekleştirilmektedir ve bulunan elastiklik modülü tüm katlar için eşittir. Laminat yapıdaki kompozit parçalarda ise elastiklik modülü, tüm laminatın konfigürasyonuna bağlıdır ve bulunan özellikler bu özel laminatın mekanik performansını tahmin etmek için kullanılır.

Mekanik zellikleri belirlemek için numune, uçlarını kavrayan ve çekme kuvveti uygulayan bir test çerçevesinin içine yerleştirilir. Bu test, numune geometrilerini, lamine konfigürasyonunu, test prosedürünü ve veri toplama yöntemini tanımlayan ASTM 3039 standardına [82] tabidir.



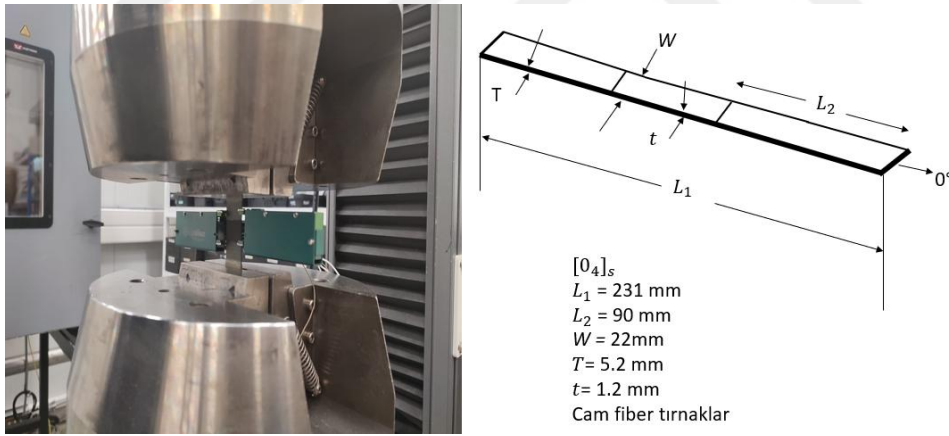
şekil 6.3 ASTM D3039 ekme testi plaka serim simülasyonu

şekil 6.3' de çekme testi plaka serimine ait ACE yazılımı simülasyon görseli paylaşılmaktadır. Çekme testi numunelerinin üretilmesi için gereken 8 kat 0° yönünde serim için fiber kalınlık, genişlik, her kursa ait fiber sayısı, serim hızı, serim silindir basıncı gibi serime ait parametreler ACE yazılımında bu bölümde tanımlanmaktadır. şekil 6.4' de çekme testinde kullanılacak lamine yapı tezgah serimi gösterilmektedir.



Şekil 6.4 Çekme testi plaka serimi

Şekil 6.5 kullanılan çekme numunesinin test düzeneğini ve test plakasının gerçek boyutlarını göstermektedir.



Şekil 6.5 Çekme testi; a) Test düzeneği b) Test plaka numune boyutları

Şekil 6.5 b'de orta bölüm test bölümünü temsil etmektedir ve gerilimin düzgün şekilde dağıtılması gereken yer de bu test bölümüdür. Bu test için serim yapılan plaka sekiz adet 0°'lik katmandan oluşur tüm numuneler bu plakadan kesilmektedir; bu nedenle özellikler lamine seviyesinde olacaktır. Daha iyi bir gerilim dağılımı elde etmek ve istatistiksel olarak tekrarlanabilir sonuçlar üretmek için hem test numune uzunluğu (L_1) hem de ölçüm alanı uzunluğu ($L_1 - 2 * L_2$) mümkün olduğu kadar uzun tutulmaktadır. Makine, test düzeneği ile test plaka numunesi arasında kuvveti aktarmak için hidrolik çeneler kullanmaktadır; bu, temas

yüzeylerindeki lamineye zarar verebilmektedir. Bu nedenle, yükleme sırasında plakalara zarar vererek karbon fiber laminenin ayrılmasını önlemek için test numunelerinin kenarlarına cam yapıda, 0° ve 90° olarak 7 kat serim yapılan tırnaklar ([0/90]7s) eklenmektedir.

Test, yükün lineer olarak arttırılması ve numune kırılana kadar verilerin kaydedilmesi yoluyla gerçekleştirilir. Laminenin nihai mukavemeti numunenin taşıyabileceği maksimum gerilimdir. Bu araştırmada, tüm test süresi boyunca laminenin deformasyonunu yani lamine modülünü (gerilim-gerinim eğrisinin eğimi) ölçmek için ölçüm bölümünde epsilon marka 3560BIA model ekstansometre kullanılmaktadır, kullanılan ekstansometre 10000 $\mu\epsilon$ 'ye kadar gerinimi kaydedebilmektedir.

Otoklav istasyonunda kompozit plaka haline geldikten sonraki istasyonlarda bu plakadan toplam 6 numune elmas bıçaklı testere kullanılarak 231 mm uzunluğunda ve 22mm genişliğinde kesilmiştir. Tüm numunelere 2 mm kalınlığında cam fiber tırnaklar eklenmiştir. Sonrasında tekrar otoklav istasyonunda kür edilmiştir.

Test numuneleri çekme deneyi düzeneğine uygun şekilde yerleştirildi ve hidrolik çeneler yardımıyla numuneler tırnak bölgelerinden sabitlendi. Çekme deneyi düzeneğinde numunelere 2 mm/dk sabit yer değiştirme oranı ile kademeli olarak artan çekme kuvveti uygulandı. Numuneler deforme oluncaya kadar çekme kuvveti uygulanmaya devam edildi. Numuneler deformasyona uğramadan önceki en yüksek değer nihai çekme dayanımı değeri olarak değerlendirilmektedir.

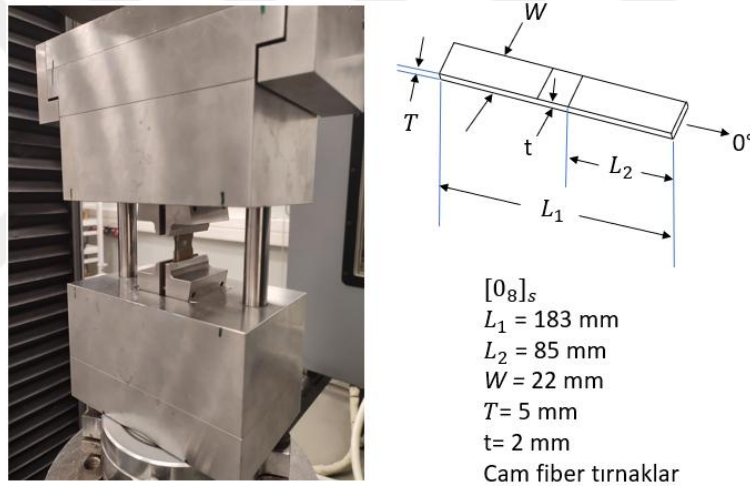
Tüm numuneler, Şekil 6.6'da gösterildiği gibi ölçüm uzunluğu alanında yanıl arıza modu gösterdi ve deney başarıyla tamamlanmıştır.



Şekil 6.6 ÇÇT deneyi numuneleri ve deney sonrası numune kırılması.

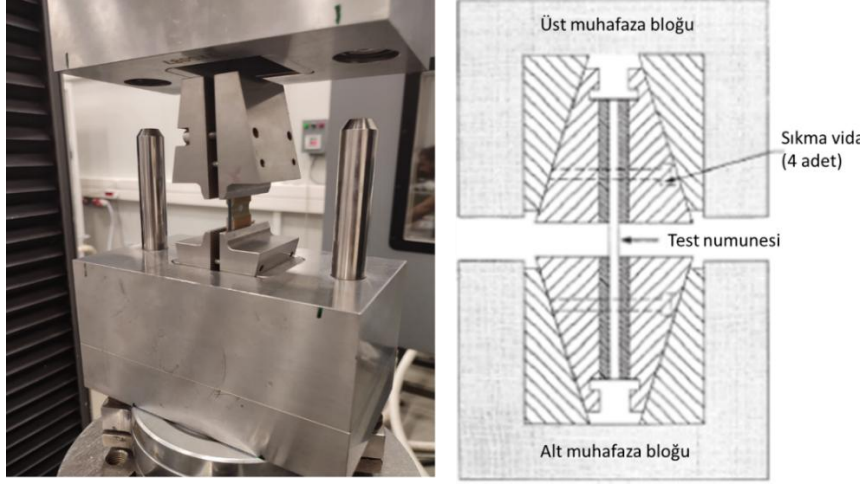
6.4 Çentiksiz Basma Testi (ASTM D3410)

Çentiksiz basma testi (ÇBT), gerilim-gerinim ilişkisi açısından ÇÇT' ye benzerdir tek fark yükleme yönüdür. Kompozit malzemelerin çekme ve basma özellikleri, sünek metallerin aksine her zaman aynı değildir ve bu nedenle iki ayrı testin yapılması gerekmektedir. Gerilim-gerinim ilişkisi aynı olsa bile test prosedürü farklıdır ve ASTM D3410 standardına göre gerçekleştirilmektedir [84]. Test numunesinin ana özelliği, test sırasında burkulmayı önlemek için test numune ölçüm alanı uzunluğunun ($L_1 - 2 * L_2$) küçük tutulmasıdır (12mm - 25mm). Burkulma bir kararsızlık olgusudur ve bu tür testlerdeki temel sorundur. Numunenin dikkatli bir şekilde tasarlanmasına ve test sırasında uygun şekilde hizalanmasına dikkat edilmelidir. Şekil 6.7, kullanılan ÇBT numunesinin test düzeneğini ve test numunesinin gerçek boyutlarını göstermektedir.



Şekil 6.7 Basma testi; a) Test düzeneği b) Test plaka numune boyutları

Numuneyi test sırasında düzgün bir şekilde hizalamak ve burkulmayı önlemek için ASTM standardı, bu araştırma boyunca kullanılan Teknoloji Araştırma Enstitüsü'nün Illinois Enstitüsü (Illinois Institute of Technology Research Institute) (IITRI) fikstürünün kullanılmasını önerir. Fikstür numune uçlarını kavrar ve ölçüm uzunluğu boyunca düzgün bir gerilim dağılımı oluşturmak için bir sıkıştırma kuvveti uygular. Şekil 6.8 [84], bu çalışma için kullanılan test düzeneğini göstermektedir.



Şekil 6.8 Basma test fikstürü (IITRI Fikstürü)

Bu test numunelerin uzunluğunun küçük olması sadece burkulma etkisini önlemek amacıyla değil aynı zamanda net bir basma gerilim test sonucu elde edilmesine de fayda sağlamaktadır. Lamine 16 adet tek yönlü katman (basma kuvveti yönü boyunca) kullanılarak hazırlanır. Çekme testindekiyle aynı sebeplerden dolayı, lamineyi makine çenelerinden korumak için ek tırnaklar yapıştırılmıştır. Basma test düzeneğinde de çekme testine benzer şekilde numunenin dayanacağı maksimum mukavemet değeri bulunmaktadır.

Bununla birlikte, ölçüm uzunluğunun küçük olması nedeniyle gerininin kaydedilmesi daha zordur, yani ekstansometreler kullanılamaz ve gerinim ölçerlerin dikkatli manipülasyonu gerekir. Gerinim ölçerlerin standarda uygun olarak ölçüm bölümüne yapıştırılması gerekir ve bir Wheatstone köprüsü yardımıyla gerinim tüm test boyunca okunabilir. Ayrıca, numunenin her iki kısmına yerleştirilen iki gerinim ölçer, test sırasında test kesitinin eğilmesini ölçebilmektedir. Testlerin gerçekleştirilmesi esnasında gerinim ölçer mevcut olmadığından Wheatstone köprüsü kurulumu yapılamamıştır.

ASTM D3410 ÇBT 'de numunelerin deformasyonunda görülen hasar tipleri ve hasar tiplerinin tanımlanması standart tarafından açıklanmaktadır. Her numune için hata tipi, hata alanı ve hata yerini tanımlayan üç karakterli kod ile hasar tanımlanmaktadır. Çok modlu bir arıza, Ç arıza modunun parantezleri arasına uygun arıza modu kodlarının her birini ekleyerek tanımlanmaktadır. Numune hasarlarına ve ilişkili hasar tanımlama kodlarına (dört kabul edilebilir ve dört kabul edilemez) ilişkin örnekler Şekil 6.9'da gösterilmektedir [84].

Birinci karakter											
Hasar tipi	Karakter										
Açılı	A										
Süpürgelemiş	S										
Uç ezilme	U										
Delaminasyon	D										
Euler burkulması	E										
Kalınlık boyunca	K										
İğne bantlar	İ										
Yanal	Y										
Çoklu mod	Ç (x,y,z)										
uZun bölünme	Z										
eNine kesme	N										
Patlayıcı	P										
diğer	Ğ										

İkinci karakter		Üçüncü karakter	
Hasar alanı	Karakter	Hasar konumu	Karakter
İç (Kavrama/Tırnak)	İ	Alt	A
Kavrama/Tırnak	K	Üst	Ü
Ölçüm alanı	Ö	Sol	S
Çoklu alan	Ç	Sağ	Ğ
Tırnak yapışkanı	T	Orta	O
Çeşitli	E	Çeşitli	Ç
Bilinmeyen	B	Bilinmeyen	B

Kabül edilebilir hasar kodları:
NKÜ,SÖO,KKÜ,ZÖÇ

Kabül edilemez hasar kodları:
DTÜ,KİÜ,ÜİÜ,DFÜ

Şekil 6.9 ÇBT test numunesi hasar tip ve kodlarının gösterilmesi

Hasar tanımlama kodunun ilk karakteri hasar tipini tanımlamaktadır. Şekil 6.9’ daki "Birinci karakter" tablosundaki tüm arıza modları, uç ezilme veya Euler burkulması hariç kabul edilebilir. Bir Euler burkulması hasar tipi, test sırasında veya sonrasında numunenin görsel olarak incelenmesiyle belirlenemez, bu nedenle sırt sırta gerilme gösterge cihazları kullanıldığında gerilim-gerinim veya kuvvet-gerinim eğrilerinin incelenmesiyle belirlenmelidir.

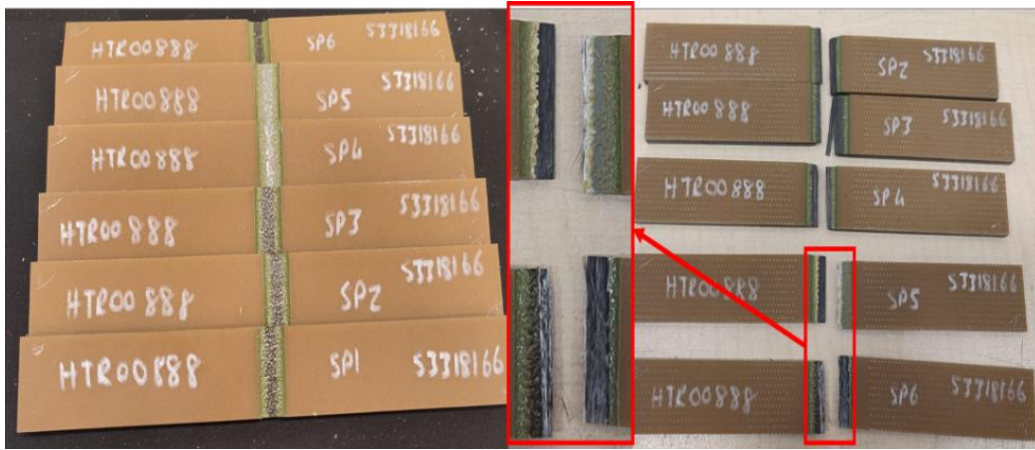
Hata konumu oluşması en çok istenen bölge kavrama/tırnak etkisi minimum olduğundan ölçüm alanının ortasıdır. Bu test yöntemindeki numunelerin uzunluğunun kısa olması nedeniyle, hasar yerinin ölçüm alanının kavrama/tırnak sonlandırma bölgesine yakın olması çok olasıdır. Ölçüm alanının ortası kadar arzu edilmese de, bu bölge de kabul edilebilir bir hasar alanıdır. Bir test numunesi popülasyonundaki arızaların önemli bir kısmı (%50'den fazla) kavrama veya tırnak bölgesinde meydana gelirse, numuneye kuvvet uygulama yollarının yeniden incelenmesi gerekmektedir. Dikkate alınacak faktörler arasında tırnak hizalaması, tırnak malzemesi, tırnak yapıştırıcısı, kavrama türü, kavrama basıncı ve kavrama hizalaması yer almalıdır. Numunenin kavrama/tırnak kısmının içinde meydana gelen herhangi bir arıza kabul edilemez. [84]

Otoklav istasyonunda kompozit plaka haline geldikten sonraki istasyonlarda bu plakadan toplam 6 numune elmas bıçaklı testere kullanılarak 183 mm uzunluğunda

ve 22mm genişliğinde kesilmiştir. Tüm numunelere 2 mm kalınlığında cam fiber tırnaklar eklenmiştir. Sonrasında tekrar otoklav istasyonunda kür edilmiştir.

Basma testi düzeneğinde ITRI fikstürü kullanılarak test numuneleri düzeneğe uygun şekilde yerleştirilmiştir. Numunelere basma testi boyunca çentiksiz çekme testinden daha yavaş olacak şekilde 1.5 mm\dk sabit yer değiştirme oranı olarak numuneler deformasyona uğrayana kadar basma kuvveti artarak uygulanmaya devam edilmiştir. Numuneler deformasyona uğramadan önceki en yüksek değer nihai basma dayanımı değeri olarak değerlendirilmektedir.

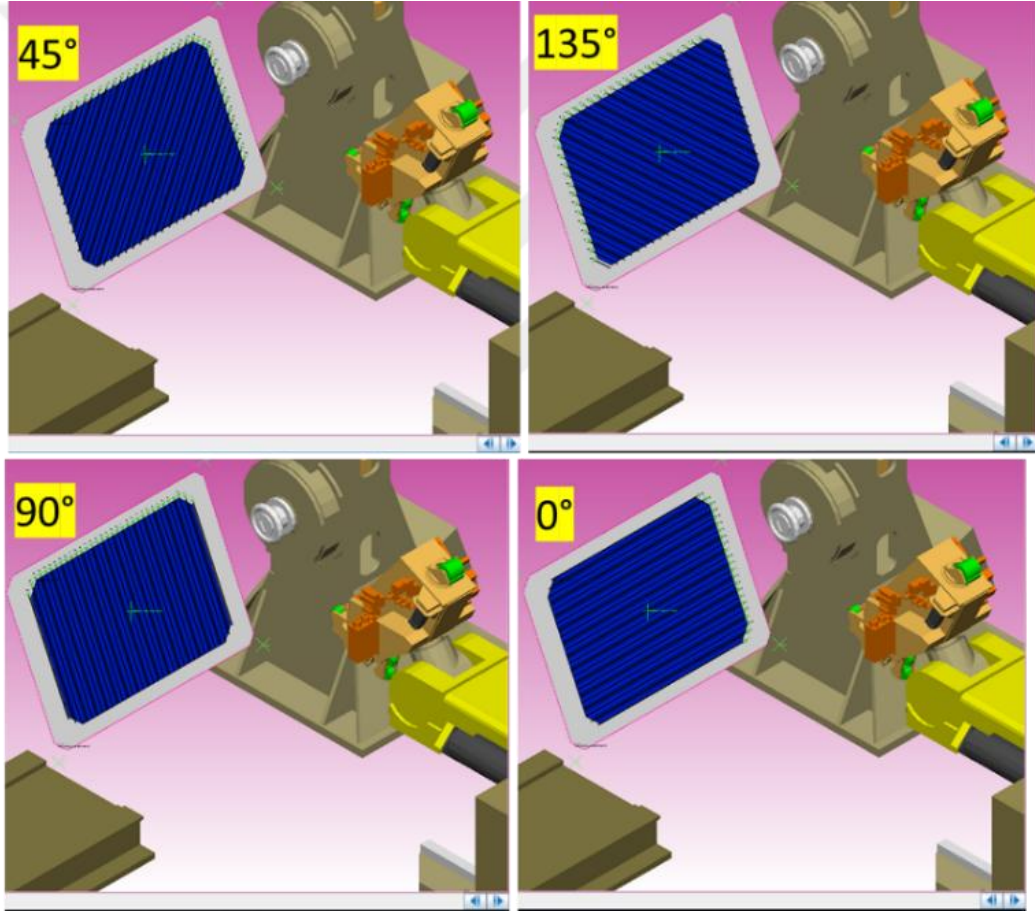
Şekil 6.10' da gösterildiği gibi 4 numune KKÜ tipi arıza modu ile deformasyona uğrarken 1 numune tipinde SÖO-KKÜ tip arıza modları birlikte görülmüştür ve deney başarıyla tamamlanmıştır. KKÜ tip arıza modu kabul edilebilir hata modlarından biridir ve ilk K harfi hasar tipi olarak kalınlık boyunca hasar oluştuğunu ifade etmektedir. İkinci K harfi hasar alanı olarak kavram tırnak bölgesi olduğunu ifade etmektedir. Ü harfi ise hasarın konumunun numunenin üst bölgesi olduğunu tanımlamaktadır. SÖO tip ise hasarın süpürgelenmiş tip olarak gerçekleştiğini, konum olarak ölçüm alanında olduğunu ve o harfi ile de hasarın konumunun numunenin orta bölümü olduğu ifade edilmektedir.



Şekil 6.10 ÇBT deneyi numuneleri ve deney sonrası numune kırılması.

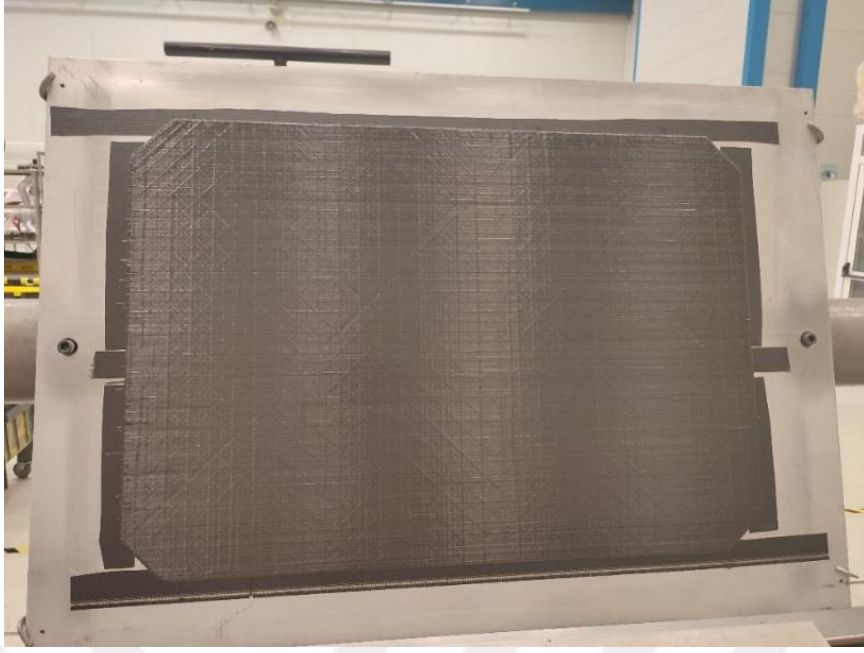
6.5 Delikli Çekme Testi (ASTM D5766)

Delikli çekme testi (DÇT) gerçekleştirmenin amacı, delikli yapıdaki belirli bir laminatın çekme yükleri altındaki davranışını değerlendirmek amacıyla yapılmaktadır. Delik etrafındaki gerilimi arttırmakta ve laminatın nihai dayanımını azaltmaktadır. Bu test, gerekli boyutları ve uygulama yöntemlerini öneren ASTM D5766 standardına [85] tabidir. Test sırasında delik konumunun kenar bölgeler minimum uzaklığı olarak tanımlanan kenar etkisinden kaçınmak için, standart tarafından en az altı genişlik/delik çapı oranı (W/D) önerilmiş ve bu deneyde dikkate alınmıştır. Şekil 6.11’ de 0°, 45°, 90° ve 135° serim katlarına ait ACE yazılım simülasyonu gösterilmiştir.



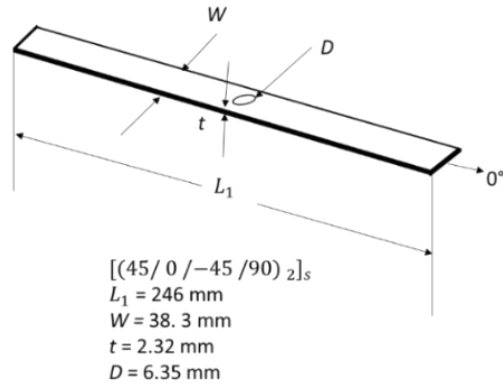
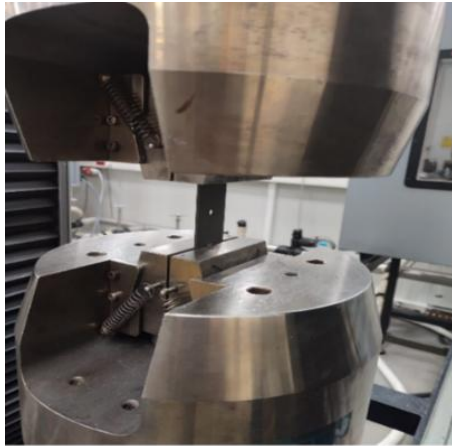
Şekil 6.11 ASTM D5766 DÇT plaka serim simülasyonu

Bu test yöntemi laminat seviyesinde kullanılır ve mekanik özellikler laminatın kat sırasına bağlıdır. Bu çalışmada kat sayısı 16 kat olarak uygulanmıştır. Şekil 6.12’de ise laminat yapının gerçekleştirilen serim görüntüsü paylaşılmıştır.



Şekil 6.12 Delikli çekme testi plaka serimi

Numune yüklendiğinde delik etrafındaki gerilim ve gerinim alanı tekdüze olmayan bir şekilde değişir, dolayısıyla gerinim ve modül yalnızca bölgesel olarak bulunabilir ve tüm yapıyı temsil etmemektedir. Ayrıca, bu test statik olarak yüklenmiş bir laminatın nihai mukavemet azalmasına baktığından, araştırma sırasında modül dikkate alınmayacaktır. Son olarak Şekil 6.13 kullanılan DÇT test düzeneğinin kurulumunu ve gerçek boyutlarını göstermektedir.



Şekil 6.13 Delikli çekme testi; a) Test düzeneği b) Test plaka boyutları

ASTM D5766 DÇT tipinde numunelerin deformasyonunda görülen hasar tipleri ve hasar tiplerinin tanımlanması standart tarafından açıklanmaktadır ve Şekil 6.14' de gösterilmektedir [85].

YÖÖ

AÖÖ

ÇÖÖ

Birinci karakter

İkinci karakter

Üçüncü karakter

Hasar tipi	Karakter
Açılı	A
kenar Delaminasyon	D
Kavrama/kırnak	K
Yanal	Y
Çoklu mod	Ç (x,y,z)
<u>uzun</u> bölünme	Z
Patlayıcı	P
diğer	Ğ

Hasar alanı	Karakter
İç (Kavrama/Tırnak)	İ
Kavrama/Tırnak	K
Ölçüm alanı	Ö
Çoklu alan	Ç
çEşitli	E
Bilinmeyen	B

Hasar konumu	Karakter
Alt	A
Üst	Ü
Sol	S
sağ	Ğ
Orta	O
Çeşitli	Ç
Bilinmeyen	B

Şekil 6.14 DÇT test numunesi hasar tip ve kodlarının gösterilmesi

ASTM D3410 ÇBT olduğu gibi birinci karakter hasar tipini, ikinci karakter hasar alanını, üçüncü karakter ise hasarın konumunu tanımlamaktadır.

YÖÖ hasar tipinde: Laminenin çekme hasarı deliğin ortasından yanal olarak meydana gelmektedir. Bölünmeler ve delaminasyon mevcut olabilmektedir.

AÖÖ hasar tipinde: Laminenin çekme hasarı genellikle delikteki gerilim bölgesinde oluşmaktadır, ancak açılı katların kalıntıları deliğin yanal merkez hattını geçmektedir. Bölünmeler ve delaminasyonlar mevcut olabilmektedir.

ÇÖÖ hasar tipinde: Lamine, delikteki gerilimden dolayı hasar görür ve çeşitli alt laminelerde birden fazla arıza modu sergilemektedir. Kapsamlı bölünme ve delaminasyon mevcut olmaktadır.

Otoklav istasyonunda kompozit plaka haline geldikten sonraki istasyonlarda bu plakadan toplam 6 numune elmas bıçaklı testere kullanılarak 246 mm uzunluğunda ve 38.3 mm genişliğinde kesilmiştir. Numune ortasında 6.35 mm çapında delik açılmıştır.

Delikli çekme deneyi ASTM D5766' nın standart test yöntemini izleyerek gerçekleştirilmiştir. Test numuneleri hidrolik çenelere standart tarafından önerilen şekilde yerleştirilmiştir. Çekme kuvveti 2 mm/dk sabit yer değiştirme oranı olacak şekilde numuneler deforme olana kadar artarak uygulanmaya devam edilmiştir. Numuneler deformasyona uğramadan önceki en yüksek değer nihai basma dayanımı değeri olarak değerlendirilmektedir.

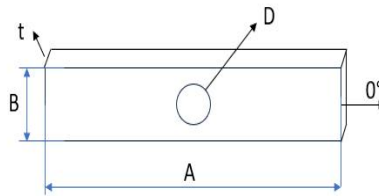
Tüm numuneler, Şekil 6.15 de gösterildiği gibi ölçüm uzunluk alanında açılı kopma arıza modu (AÖO) sergiledi ve deneyler başarıyla tamamlanmıştır. DÇT testi laminat seviyesinde gerçekleştiğinden ÇÇT ve ÇBT testlerinde olduğu gibi numuneler tamamen ayrılmamakta sadece deforme oldukları bölgede çatlak ve saçak görüntüsü oluşturmaktadır.



Şekil 6.15 DÇT deneyi numuneleri ve deney sonrası numune kırılması.

6.6 Delikli Basma Testi (ASTM D6484)

Delikli basma testi (DBT), delikli yapıdaki belirli bir laminatın basma yükleri altındaki davranışını değerlendirmek amacıyla yapılmaktadır. Delikli yapılarda gerilme yoğunlaşması sebebiyle sıkıştırmadaki nihai mukavemetin azaldığını ortaya koymaktadır. DBT test numunesi geometrisi, testin uygulaması ve test aparatı ASTM D6484 standardına [86] tabidir. Şekil 6.16, kullanılan DBT test düzeneğinin kurulumunu ve gerçek boyutlarını göstermektedir.



$$[(45/-45/90/0)_3]_s$$

$$A=272 \text{ mm}$$

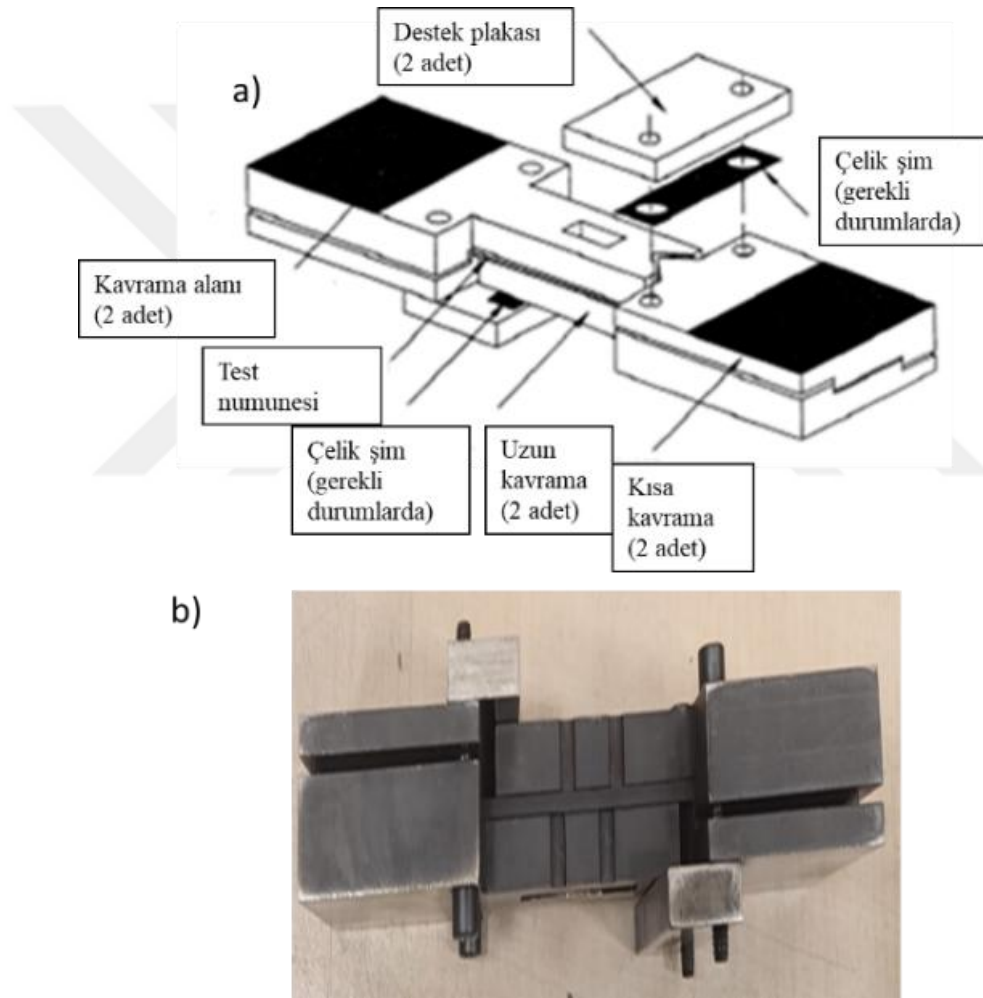
$$B=38.3 \text{ mm}$$

$$D=6.35 \text{ mm}$$

$$t=3.4 \text{ mm}$$

Şekil 6.16 Delikli basma testi; a) Test düzeneği b) Test plaka boyutları

DÇT gibi bu test de standartta tanımlanan yarı izotropik yapıda laminat kullanılarak gerçekleştirilir. Bu malzemeler bazı yönlerde izotropik gibi davranır, bazı yönlerde ise anizotropik (yani yön bağımlı) özellik gösterir. Dolayısıyla tamamen yön bağımsız olmamakta belirli düzlemler ya da yönler arasında benzer özellikler gösterebilmektedir [7]. Delikli basma testi plakası laminat seviyesinde 24 kat serim uygulanarak hazırlanmıştır. Fikstür ASTM standardına göre tanımlanmıştır ve Şekil 6.17' de gösterilmektedir [86]. Fikstür (Boeing DBT), laminatın burkulmasını önlemek için test sırasında laminatı sıkıştırarak ve pozisyonlayarak test sonuçlarının güvenilir şekilde alınmasına imkan sağlamaktadır.



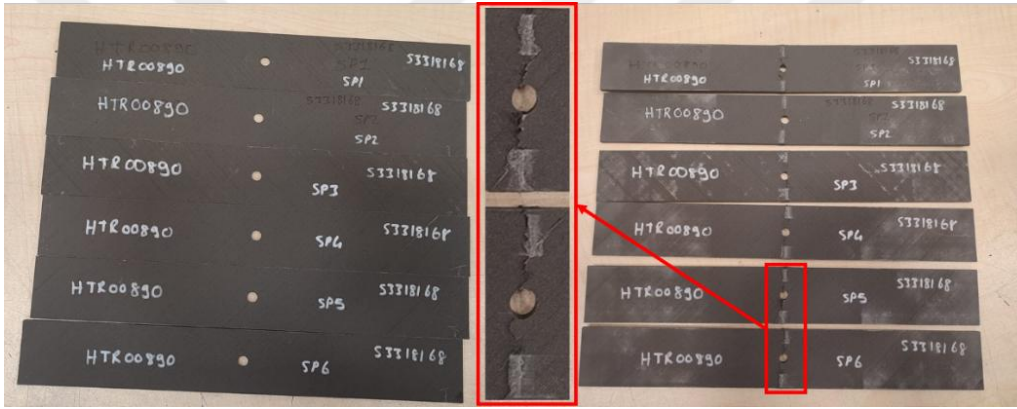
Şekil 6.17 DBT Boeing Fikstürü (a) Şematik görünüm (b) Gerçek resim

Otoklav istasyonunda kompozit plaka haline geldikten sonraki istasyonlarda bu plakadan toplam 6 numune elmas bıçaklı testere kullanılarak 272 mm uzunluğunda ve 38.3 mm genişliğinde kesilmiştir. Numune ortasında 6.35 mm çapında delik açılmıştır.

Delikli basma testi için ASTM D6484 tarafından önerilen Boeing DBT fikstürü kullanılmıştır. 6 test numunesi de test fikstürüne uygun şekilde yerleştirilmiştir. Basma kuvveti 2mm/dk sabit yer değiştirme oranı olacak şekilde numuneler deforme olana kadar uygulanmaya devam edilmiştir.

Numuneler deformasyona uğramadan önceki en yüksek değer nihai basma dayanımı değeri olarak değerlendirilmektedir

Şekil 6.18’ de gösterildiği gibi 4 numune AÖO tip arıza modu ile deformasyona uğrarken, 2 numune de YÖO tip arıza modu ile deformasyona uğramıştır ve deneyler başarıyla tamamlanmıştır. DBT testinde de DÇT benzer olarak laminat seviyesinde plaka serimi gerçekleştiğinden numuneler tamamen ayrılmak yerine deforme oldukları bölgede çatlak ve saçak görüntüsü oluşmaktadır.



Şekil 6.18 DBT deneyi numuneleri ve deney sonrası numune kırılması.

6.7 Literatürde Bulunan DeneySEL Çalışmalar

Literatür taramasında ASTM standartlarında yapılan çalışmalar sonraki bölümlerde tablo ve grafik olarak paylaşılmıştır.

Falcó ve arkadaşları [9] tarafından, bir katmandaki çeşitli kurslar arasındaki boşluk, üst üste binme, yanıl kaydırma gibi kombinasyonların laminatın çekme ve delikli çekme testi üzerindeki etkisini incelemek amacıyla deneyler yürütülmüştür. Test numunelerinde HexPly AS4/8552 malzeme kullanmıştır.

DÇT numune uzunluğu 310mm, tırnak uzunluğu 65mm, numune genişliği 32mm ve delik çapı 6.3mm olarak uygulanmıştır ve test sonuçları Tablo 6.4’ de [9] detaylı olarak paylaşılmıştır.

Tablo 6.4 Falcó ve arkadaşları literatür test sonuçları

Test numune tipi	Ortalama gerilim (MPa)
Çentiksiz çekme testi (temel)	389.2
Çentiksiz çekme testi (100% boşluk)	347.3
Çentiksiz çekme testi (0% boşluk)	303.1
Çentiksiz çekme testi (yanal ofset)	355.8
Delikli çekme testi (temel)	225.6
Delikli çekme testi (100% boşluk)	235.9
Delikli çekme testi (0% boşluk)	214.7
Delikli çekme testi (yanal ofset)	231.4

Croft ve arkadaşları [7] tarafından laminat üzerindeki delik açma, boşluk - üst üste binme, düzlem içi kesme deneyi etkisini incelemek için ÇÇT, ÇBT, DÇT, DBT tipinde deneyler yürütülmüştür. Deneylerde Cytec firmasına ait CYCOM® 5276-1 kodlu malzeme kullanılmıştır. Lamine seviyesindeki testlerde değerler % 5 oranında değişim gösterirken, laminat yapılarda % 13 e kadar gerilim değerlerinde değişim gözlenmiştir. Gerçekleştirilen deneylerdeki ortalama gerilim değerleri Tablo 6.5’ de [7] detaylı olarak paylaşılmıştır.

Tablo 6.5 Croft ve arkadaşları literatür test sonuçları

Test numune tipi	Ortalama gerilim (MPa)
Çentiksiz çekme testi (temel)	2268

Tablo 6.5 Croft ve arkadaşları literatür test sonuçları (devamı)

Çentiksiz çekme testi (100% boşluk)	2220
Çentiksiz çekme testi (0% boşluk)	2290
Çentiksiz çekme testi (50% boşluk)	2191
Çentiksiz çekme testi (burkulmuş fiber)	2334
Delikli çekme testi (temel)	420
Delikli çekme testi (100% boşluk)	416
Delikli çekme testi (0% boşluk)	430
Delikli çekme testi (50% boşluk)	423
Çentiksiz basma testi (temel)	1242
Çentiksiz basma testi (100% boşluk)	1232
Çentiksiz basma testi (0% boşluk)	1331
Çentiksiz basma testi (50% boşluk)	1242
Delikli basma testi (0% boşluk)	316
Delikli basma testi (50% boşluk)	326
Basma testi (burkulmuş fiber)	1243
Delikli basma testi (temel)	295
Delikli basma testi (100% boşluk)	333

Deepak ve arkadaşları [8] mandrel geliştirilmesi konulu çalışmalarında OFS yöntemi ile düz ve formlu yapıda deney numuneleri hazırlayıp çekme ve basma testleri gerçekleştirmiştir. El ile serim ve sonlu elemanlar yöntemi ile hesaplanan analitik değerleri, OFS yöntemi ile üretilen numunelerin test sonuçları karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Toray Industries firmasının ürettiği BMS276, TY/35, Class 7 kodlu malzeme ile deneyler gerçekleştirilmiştir ve deney sonuçları ve Tablo 6.6’ da [8] detaylı olarak paylaşılmıştır.

Tablo 6.6 Deepak ve arkadaşları literatür test sonuçları

Test numune tipi	Ortalama gerilim (MPa)
Çentiksiz çekme testi düz (OFS)	870.8
Çentiksiz çekme testi formlu (OFS)	864.1
Çentiksiz çekme testi (el ile serim)	871.9
Çentiksiz çekme testi (analitik tahmin)	905.3
Çentiksiz basma testi düz (OFS)	564.1
Çentiksiz basma testi formlu (OFS)	592.8
Çentiksiz basma testi (el ile serim)	570.3
Çentiksiz basma testi (analitik tahmin)	635.3

Lan ve arkadaşları [56] lamine yapıdaki kompozitler üzerinde çentiksiz basma ve düzlemsel kesme testleri gerçekleştirmiştir. El ile serim yöntemi ve OFS yöntemi ile serilen plakalar boşluk - üst üste binme, baskı plakası kullanımı varyasyonları ile karşılıklı olarak değerlendirilmiştir.

Hexcel firmasından 8552/AS4/RC34/ AW194 kodlu malzeme ile deneyler gerçekleştirilmiştir ve deneylerde ölçülen ortalama gerilimi değerleri Tablo 6.7’ de [56] detaylı olarak paylaşılmaktadır.

Tablo 6.7 Lan ve arkadaşları literatür test sonuçları

Test numune tipi	Ortalama gerilim (MPa)
Çentiksiz basma testi (el ile serim)	375.2
Çentiksiz basma testi 0.5 mm boşluk (OFS)	420.8
Çentiksiz basma testi 3.175 mm boşluk (OFS)	368.8
Çentiksiz basma testi 3.175 mm üst üste binme (OFS)	376.4
Çentiksiz basma testi 0.5 mm boşluk (OFS) (baskı plakasız)	392
Çentiksiz basma testi 3.175 mm boşluk (OFS) (baskı plakasız)	310
Çentiksiz basma testi 3.175 mm üst üste binme (OFS) (baskı plakasız)	179.6

Guin ve arkadaşları [10] çentiksiz çekme, çentiksiz basma ve delikli basma testleri gerçekleştirmiştir. Bu testler boyunca boşluksuz, 90° serim yönü boyunca boşluklu ve tüm katlar boyunca boşluklu olacak şekilde numunelere farklı testler uygulanmıştır. Hexcel firmasından IM7/8552-1 kodlu malzeme kullanılmıştır ve deney sonuçları Tablo 6.8’ de [10] paylaşılmaktadır.

Tablo 6.8 Guin ve arkadaşları literatür test sonuçları

Test numune tipi	Ortalama gerilim (MPa)
Çentiksiz çekme testi	119
Çentiksiz çekme testi boşluklu (90° serim yönü boyunca)	124
Çentiksiz çekme testi boşluklu (tüm katlar boyunca)	91.8
Çentiksiz basma testi	101
Çentiksiz basma testi boşluklu (90° serim yönü boyunca)	101
Çentiksiz basma testi boşluklu (tüm katlar boyunca)	86.9
Delikli çekme testi	49.5
Delikli çekme boşluklu (90° serim yönü boyunca)	51.5
Delikli çekme testi boşluklu (tüm katlar boyunca)	46.7

Woigk ve arkadaşları [11] tarafından çentiksiz çekme ve çentiksiz basma testleri gerçekleştirilmiştir. Boşluk, üst üste binme, boşlukların yanal ofsetlenmesi, boşluk & üst üste binme şeklinde farklı test tipleri uygulanmıştır.

Hexcel firmasından IM7/8552 kodlu malzeme kullanılmıştır ve test sonuçları Tablo 6.9’ da [11] detaylı olarak paylaşılmıştır.

Tablo 6.9 Woigk ve arkadaşları literatür test sonuçları

Test numune tipi	Ortalama gerilim (MPa)
Çentiksiz çekme testi (temel)	750
Çentiksiz çekme testi (boşluk)	740
Çentiksiz çekme testi (üst üste binme)	773
Çentiksiz çekme testi (boşluk) (yanal ofset)	749
Çentiksiz çekme testi (boşluk & üst üste binme)	694
Çentiksiz basma testi (temel)	643
Çentiksiz basma testi (boşluk)	692
Çentiksiz basma testi (üst üste binme)	705
Çentiksiz basma testi (boşluk) (yanal ofset)	652
Çentiksiz basma testi (boşluk & üst üste binme)	549

Turoski [87] tarafından lamina seviyesinde yapılan deneysel çalışmalarda çentiksiz çekme, delikli çekme ve çentiksiz basma, delikli basma testleri gerçekleştirilmiştir. Test numuneleri temel, boşluklu, yanal ofsetli olarak test edilmiştir.

Torayca firmasından T800H/3900-2 kodlu malzeme kullanılarak testler gerçekleştirilmiştir ve test sonuçları Tablo 6.10' da [87] paylaşılmaktadır.

Tablo 6.10 Turoski tarafından yapılan test sonuçları

Test numune tipi	Ortalama gerilim (MPa)
Çentiksiz çekme testi (temel)	982
Çentiksiz çekme testi (boşluk)	829
Delikli çekme testi (temel)	584
Delikli çekme testi (boşluk)	587
Çentiksiz basma testi (temel)	544
Çentiksiz basma testi (boşluk)	498
Delikli basma testi (temel)	385
Delikli basma testi (boşluk)	377
Delikli basma testi (boşluk) (yanal ofset)	357

Norvan [2] tarafından kuru fiberlerin OFS yöntemi kullanılarak üretilen kompozit lamine ve laminat yapılarda ÇÇT, ÇBT, DÇT, DBT testleri gerçekleştirilmiştir. Hexcel firmasına ait HiTape IM7 kodlu karbon fiber malzeme kullanılmıştır ve deney sonuçları Tablo 6.11’ de [2] detaylı olarak paylaşılmaktadır.

Tablo 6.11 Norvan tarafından yapılan test sonuçları

Test numune tipi	Ortalama gerilim (MPa)
Çentiksiz çekme testi	2882.7

Tablo 6.12 Aymen ve arkadaşları tarafından yapılan DBT test sonuçları

Test numune tipi	Ortalama gerilim (MPa)
Çentiksiz	311
0° merkezli boşluklu	319
0° ofsetli boşluklu	296
90° merkezli boşluklu	289
0° merkezli üst üste binmeli	315
0° ofsetli üst üste binmeli	329
90° merkezli boşluklu + 0° ofsetli boşluklu	271
0° ofsetli üçgen boşluklu	295

7.1 Çentiksiz Çekme Testi (ASTM D3039)

Çentiksiz çekme testinde çekme dayanımını belirlemek amacıyla kullanılan yöntem denklem 7.1 de paylaşılmaktadır.

$$\sigma_{ult} = \frac{P_{max}}{A_0} \quad (7.1)$$

σ_{ult} = Nihai çekme gerilimi (MPa), P_{max} = Arızadan önceki maksimum kuvvet (N), A_0 = Başlangıçtaki kesit alanı (mm^2)

Başlangıçtaki kesit alanı, numunenin ölçüm alanı kısmından üç farklı bölgeden genişlik ve kalınlık ölçülerinin alınması ve bu değerlerin ortalamalarının çarpılmasıyla belirlenmektedir [2].

Çentiksiz çekme testinde gerinimi belirlemek amacıyla kullanılan yöntem denklem 7.2 de paylaşılmaktadır.

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (7.2)$$

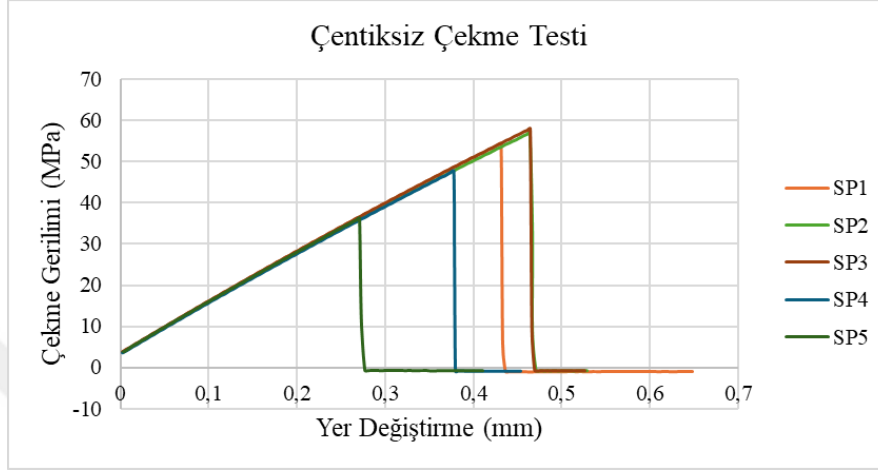
ε = Gerinim, ΔL = Ölçüm alanı uzama miktarı (mm), L_0 = Ölçüm alanı başlangıç uzunluğu (mm)

Çentiksiz çekme testinde Elastiklik modülü belirlemek amacıyla kullanılan yöntem denklem 7.3 de paylaşılmaktadır.

$$E = \frac{\Delta \sigma}{\Delta \varepsilon} \quad (7.3)$$

E = Elastiklik modülü (GPa), $\Delta \sigma$ = Gerilim değişimi (MPa), $\Delta \varepsilon$ = Gerinim değişimi

5 deney numunesinde Şekil 7.1 de grafik olarak gösterildiği gibi ortalama 0,4 mm yer değiştirme ölçüldü. 1 adet numune sonucu diğer sonuçlardan oldukça düşük olduğundan ihmal edilmiştir. En düşük dayanım değeri 36,34 MPa, en yüksek değer 57,98 MPa olarak ölçüldü ve ortalama dayanım değeri 50,71 MPa olarak hesaplandı. Standart sapma 8.96 MPa olup %17.68 oranına karşılık gelmektedir.



Şekil 7.1 Çentiksiz çekme testi “Çekme gerilimi – Yer değiştirme” grafiği

Tablo 7.1 de detayları verilen 6 numune için de 22 mm genişlik ve 1.2mm kalınlık değeri ölçülmüştür ve A_0 değeri 26.4 mm^2 olarak hesaplanmıştır.

Tablo 7.1 Çentiksiz çekme testi numuneleri detaylı sonuçları

	Maksimum yükleme [kN]	Çekme gerilimi [MPa]	Yer değiştirme [mm]	Gerinim	Modülüs [GPa]
SP1	1.43	54.31	0.43	0.008	6.02
SP2	1.51	57.09	0.46	0.009	5,89
SP3	1.53	57.98	0.46	0.009	5.98
SP4	1.26	47.81	0.38	0.007	5.99
SP5	0.96	36.34	0.27	0.005	6.18

Tablo 7.1 Çentiksiz çekme testi numuneleri detaylı sonuçları (devamı)

Ortalama	1.34	50.71	0.4	0.008	6.01
Standart sapma	0.24	8.96	0.08	0.002	0.11
Maksimum	1.53	57.98	0.46	0.009	6.18
Minimum	0.96	36.34	0.27	0.005	5.89
Değişim katsayısı	17.68	17.68	19.92	22.02	1.76

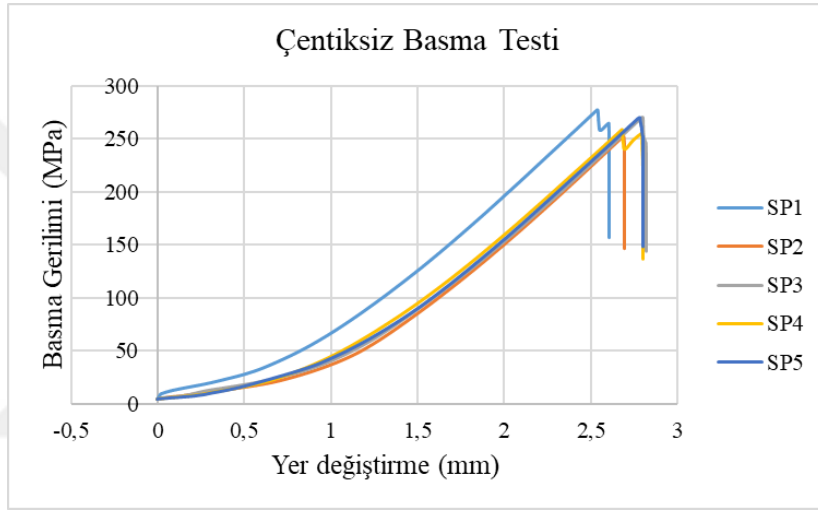
Hexcel tarafından 2980 MPa dayanım değeri tahmini paylaşılmaktadır. Deneylerde ölçülen ortalama gerilim değeri Hexcel tarafından paylaşılan değerden oldukça düşük olarak gerçekleşmiştir. Birinci tahmin olarak serim yönü olan 0° yönüne paralel olarak kesilen test plakası, cam fiber yapıdaki tırnak yapıştırma işlemi sonrası deney düzeneğine bağlanacağı boyutlara dilimlenirken, serim yönüne dik olacak şekilde dilimlenmiş olabileceği değerlendirilmektedir. ASTM D3039 standardı tarafından hem 0° hem de 90° yönünde çentiksiz çekme testi konseptleri paylaşılmaktadır. Norvan [2] tarafından gerçekleştirilen 90° yönünde çentiksiz çekme testi sonuçlarında ortalama olarak 77.4 MPa gerilim değeri ölçülmüştür. Hexcel tarafından 90° yönünde nihai gerilim değeri paylaşılmadığından, kullanılan malzeme aynı olmamasına rağmen fikir vermesi açısından her iki test sonuçlarını karşılaştırmak gerekirse gerçekleştirilen çentiksiz çekme testi deneyinde ortalama olarak 50.71 Mpa gerilim değeri ölçülmüştür ve iki deney sonuçları tutarlı olarak değerlendirilmektedir. İkinci tahmin olarak serim yönleri sadece 0° olarak uygulandığından ve serim katmanları arasında yanal kaydırma yapılmadığından, serim yapılan plakanın istenen mukavemet değerini karşılayamadığı düşünülmektedir. Üçüncü tahmin olarak numune ölçüm alanı uzunluğunun standart

tarafından önerilen değerden 90 mm kısa olması sebebiyle yeterli miktar malzemenin gerilmeye maruz bırakılmadığı değerlendirilmektedir.

7.2 Çentiksiz Basma Testi (ASTM D3410)

Çentiksiz basma testinde nihai gerilim değerini hesaplamak için ÇÇT deneyinde paylaşılan denklemler aynı şekilde kullanılmaktadır.

1 adet test numunesi test düzeneğine bağlarken kırıldığından Şekil 7.2’ de grafik olarak gösterilen 5 adet numune ile testler başarı ile uygulanmıştır. 5 test numunesinde ortalama olarak 2.72 mm yer değiştirme ölçülmüştür.



Şekil 7.2 Çentiksiz basma testi “Basma gerilimi – Yer değiştirme” grafiği

Tablo 7.2 de detayları verilen basma test numuneleri için 22 mm genişlik ve 2 mm kalınlık ölçülmüştür ve A_0 değeri 44 mm^2 olarak hesaplanmıştır.

Tablo 7.2 Çentiksiz basma testi numuneleri detaylı sonuçları

	Maksimum yükleme [kN]	Basma gerilimi [MPa]	Yer değiştirme [mm]	Hata kodu
SP1	12.22	277.72	2.54	KKÜ
SP2	11.11	252.48	2.69	KKÜ

Tablo 7.2 Çentiksiz basma testi numuneleri detaylı sonuçları (devamı)

SP3	11.93	271.06	2.80	SÖO-KKÜ
SP4	11.37	258.51	2.80	KKÜ
SP5	11.91	270.68	2.78	KKÜ
Ortalama	11.71	266.09	2.72	
Maksimum	12.22	277.72	2.8	
Minimum	11.11	252.48	2.54	
Standart sapma	0.41	9.21	0.09	
Değişim katsayısı	3.47	3.46	3,66	

Deneylerde tüm numuneler için en düşük 252.48 MPa, en yüksek 277.72 MPa basma gerilmesi ölçülmüştür ve ortalama olarak 266.09 MPa basma gerilmesi değeri hesaplanmıştır. Standart sapma 9.21 MPa olup % 3.46 oranına karşı gelmektedir. Üretici firma Hexcel tarafından 1860 MPa tahmini dayanım değeri paylaşılmaktadır. Deneylerde ölçülen değer üretici firma tarafından paylaşılan değerden oldukça düşük olarak gerçekleşmiştir. Tahmin olarak serim yönleri sadece 0° olarak uygulandığından ve serim katmanları arasında yanal kaydırma yapılmadığından, serim yapılan plakanın istenen mukavemet değerini karşılayamadığı düşünülmektedir. İkinci tahmin olarak numune uzunluğunun standart tarafından önerilen numune uzunluğu değerinden yaklaşık 40mm fazla olması olarak değerlendirilmektedir. Son olarak ASTM D3410 standardına göre, sabit çekme hızı kullanılan testlerde kama tipi tutucular ile tırnak malzemesi arasında yüksek uyum (yüksek sistem esnekliği) mevcutsa, numunede gözlemlenen

gerinim, beklenen değerden 10 ila 50 kat daha düşük olabilmektedir. Bu durum, test sisteminin sadece numuneyi değil, aynı zamanda kendi yapısal esnekliğini de deformasyona katmasıyla ilgilidir. Özellikle sabit hızla çalışan test makinelerinde kullanılan tırnak yapısı, sistemin genel uyumluluğunu artırarak bu etkiyi daha belirgin hale getirebilmektedir [84]. Deneylerde tırnak olarak ASTM D3410 standardı tarafından önerilen cam fiber tırnaklar kullanılmasına rağmen, deneylerde kama tutucu ve sabit çekme hızı kullanıldığından standart tarafından açıklanan bu bilgi ayrıca bilgilendirme amaçlı olarak paylaşılmıştır.

7.3 Delikli Çekme Testi (ASTM D5766)

Delikli çekme testi deneyinde nihai gerilimi hesaplamak için ÇÇT deneyinde verilen denklemler geçerlidir. Hesaplamalarda delik çapı ASTM D5766 tarafından ihmal edilebilir olarak değerlendirilmektedir. Delik çapını hesaplamalara dahil etmek için aşağıdaki denklem kullanılmalıdır;

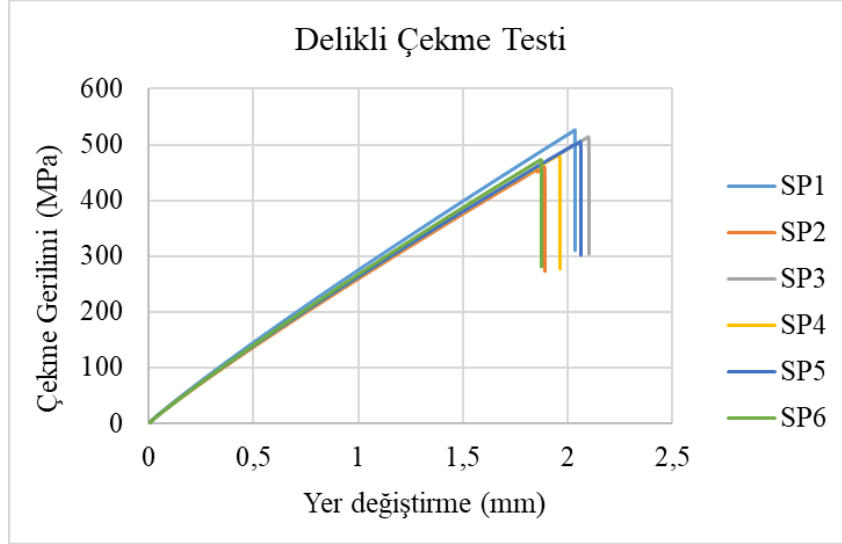
$$\sigma_{d\check{c}t} = \frac{P_{max}}{A_{net}} \quad (7.4)$$

$\sigma_{d\check{c}t}$ = Nihai çekme gerilimi (MPa), P_{max} = Arızadan önceki maksimum kuvvet (N), A_{net} = Net kesit alanı (mm^2)

$$A_{net} = (w - d) * t \quad (7.5)$$

w: Numune genişliği (mm), d: Delik çapı (mm), t: Numune kalınlığı (mm)

6 deney numunesinde Şekil 7.3' de grafik olarak gösterildiği gibi ortalama 1,98 mm yer değiştirme ve ortalama olarak 40-45 kN arası kuvvet uygulandığı ölçülmüştür. 6 numune için en düşük dayanım değeri 459,83 MPa, en yüksek dayanım değeri 526,85 MPa olarak ölçülmüştür ve ortalama dayanım değeri 493.79 MPa olarak hesaplanmıştır. Standart sapma 25.95 MPa olup %5.26 oranına karşılık gelmektedir.



Şekil 7.3 Delikli çekme testi “Çekme gerilimi – Yer değiştirme” grafiği

Tablo 7.3 de detayları verilen DÇT test numunelerinin tamamı 38.3 mm genişlik ve 2.32 mm kalınlıkta gerçekleştirilmiş olup delik çapı 6.35 mm olarak uygulanmıştır ve A_{net} değeri delik çapı ihmal edilerek 88.856 mm^2 olarak hesaplanmıştır.

Tablo 7.3 Delikli çekme testi numuneleri detaylı sonuçları

	Maksimum yükleme [kN]	Çekme gerilimi [MPa]	Yer değiştirme [mm]	Hata kodu
SP1	46.81	526.85	2.03	AÖÖ
SP2	40.86	459.83	1.89	AÖÖ
SP3	45.74	514.77	2.09	AÖÖ
SP4	42.83	482.01	1.96	AÖÖ
SP5	44.92	505.57	2.06	AÖÖ
SP6	42.09	473.69	1.87	AÖÖ

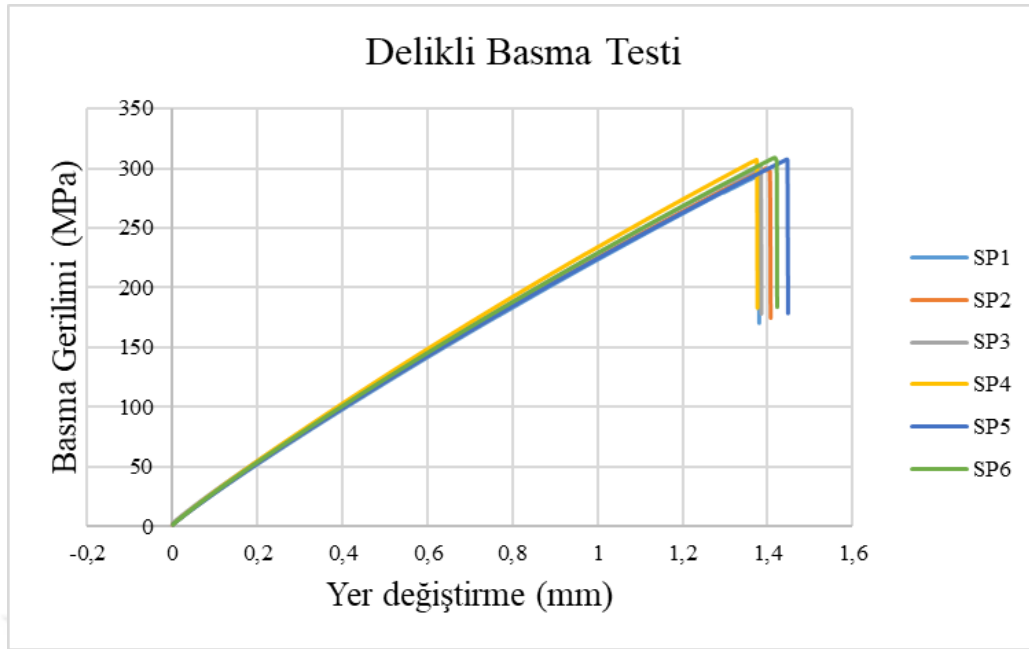
Tablo 7.3 Delikli çekme testi numuneleri detaylı sonuçları (devamı)

Ortalama	43.88	493.79	1.98	
Standart sapma	2.30	25.95	0.09	
Maksimum	46.81	526.85	2.09	
Minimum	40.86	459.83	1.87	
Değişim katsayısı	5.25	5.26	4.59	

Hexcel tarafından 505 MPa dayanım değeri tahmini paylaşılmaktadır. Deney sonuçları ile Hexcel tarafından verilen değer tutarlı olarak gerçekleşmiştir.

7.4 Delikli Basma Testi (ASTM D6484)

Delikli basma testi deneyinde mukavemet hesaplarını gerçekleştirmek için DÇT deneyindeki denklemler kullanılmaktadır. 6 deney numunesinde Şekil 7.4’de grafik olarak gösterildiği gibi ortalama 1.4 mm yer değiştirme ve 40 kN kuvvet uygulandığı ölçülmüştür. 6 deney numunesi için en düşük dayanım değeri 294.06 MPa, en yüksek dayanım değeri olarak 308.96 MPa olarak ölçülmüştür ve ortalama dayanım değeri 303.10 MPa olarak hesaplanmıştır. Standart sapma 5.77 MPa olup %1.90 oranına karşılık gelmektedir.



şekil 7.4 Delikli basma testi “Basma gerilimi – Yer değiştirme” grafiği

Tablo 7.4 de detayları verilen test numuneleri 38.32 mm genişlik ve 3.4 mm kalınlık olarak üretilmiş ve delik çapı numune merkezinde 6.35 mm olarak uygulanmıştır. A_{net} değeri delik çapı ihmal edilerek 130.288 mm^2 olarak hesaplanmıştır.

Tablo 7.4 Delikli basma testi numuneleri detaylı sonuçları

	Maksimum yükleme [kN]	Basma gerilimi [MPa]	Yer değiştirme [mm]	Hata kodu
SP1	38.31	294.06	1.38	YÖÖ
SP2	39.07	300.01	1.40	YÖÖ
SP3	39.18	300.88	1.38	AÖÖ
SP4	39.99	307.11	1.37	AÖÖ
SP5	40.05	307.56	1.44	AÖÖ

Tablo 7.4 Delikli basma testi numuneleri detaylı Sonuçları (devamı)

SP6	40.23	308.96	1.42	AÖÖ
Ortalama	39.47	303.10	1.4	
Minimum	38.31	294.06	1.37	
Maksimum	40.23	308.96	1.44	
Standart Sapma	0.74	5.77	0.03	
Değişim katsayısı	1.89	1.90	1.94	

Üretici firma Hexcel tarafından 315 MPa dayanım değeri tahmini paylaşılmaktadır. Deney sonuçları ile üretici firma tarafından paylaşılan değerler tutarlı olarak gerçekleşmiştir.

7.5 Sonuçlar ve Gelecekteki Çalışmalar

Bu çalışmada, karmaşık kompozit malzemelerin üretimine olanak tanıyan ileri kompozit üretim yöntemlerinden olan otomatik fiber serme yöntemi, bu yöntemde kullanılan makine bölümleri ve fonksiyonları açıklanmıştır. OFS'de kullanılan malzemeler avantaj ve dezavantajlarıyla birlikte listelenmiştir. OFS yöntemi yüksek doğruluk, yüksek tekrarlanabilirlik, düşük hurda oranı ve yüksek üretim hızı sağlamasına rağmen üretimden ve zor parça geometrilerinden kaynaklanan üretim hataları ve literatürdeki çalışmaların bu sorunlara yaklaşımları tablo olarak paylaşılmıştır. Gerçekleştirilen çentiksiz çekme testi, çentiksiz basma testi, delikli çekme testi ve delikli basma testi, test numuneleri, test prosedürleri ve test sonuçları detaylı olarak paylaşılmıştır. Literatür taramasında aynı malzeme ile yapılan bir çalışma bulunmadığından test sonuçları üretici firma Hexcel tarafından paylaşılan katalog değerleri ile karşılaştırılmıştır. Delikli çekme testi ve delikli basma testi sonuçları üretici firma katalog değerleri ile uyumlu olarak gerçekleşmiştir.

Çentiksiz çekme testi ve çentiksiz basma testi sonuçları beklenen değerlerden düşük olarak gerçekleşmiştir.

Çentiksiz çekme testinde deney sonuçlarının üretici firma Hexcel tarafından paylaşılan değerlerden düşük ölçülmesi hakkında; Birinci tahmin olarak serim yönü olan 0° yönüne paralel olarak kesilen test plakası, cam fiber yapıdaki tırnak yapıştırma işlemi sonrası deney düzeneğine bağlanacağı boyutlara dilimlenirken, serim yönüne dik olacak şekilde dilimlenmiş olabileceği değerlendirilmektedir. ASTM D3039 standardı tarafından hem 0° hem de 90° yönünde çentiksiz çekme testi konseptleri paylaşılmaktadır. Norvan [2] tarafından gerçekleştirilen 90° yönünde çentiksiz çekme testi sonuçlarında ortalama olarak 77.4 MPa gerilim değeri ölçülmüştür. Hexcel tarafından 90° yönünde nihai gerilim değeri paylaşılmadığından, kullanılan malzeme aynı olmamasına rağmen fikir vermesi açısından her iki test sonuçlarını karşılaştırmak gerekirse gerçekleştirilen çentiksiz çekme testi deneyinde ortalama olarak 50.71 Mpa gerilim değeri ölçülmüştür ve iki deney sonuçları tutarlı olarak değerlendirilmektedir. İkinci tahmin olarak serim yönleri sadece 0° olarak uygulandığından ve serim katmanları arasında yanal kaydırma yapılmadığından, serim yapılan plakanın istenen mukavemet değerini karşılayamadığı düşünülmektedir. Üçüncü tahmin olarak numune ölçüm alanı uzunluğunun standart tarafından önerilen değerden 90 mm kısa olması sebebiyle yeterli miktar malzemenin gerilmeye maruz bırakılamadığı değerlendirilmektedir.

Çentiksiz basma testinde deney sonuçlarının üretici firma Hexcel tarafından paylaşılan değerlerden düşük ölçülmesi hakkında; Tahmin olarak serim yönleri sadece 0° olarak uygulandığından ve serim katmanları arasında yanal kaydırma yapılmadığından, serim yapılan plakanın istenen mukavemet değerini karşılayamadığı düşünülmektedir. İkinci tahmin olarak numune uzunluğunun standart tarafından önerilen numune uzunluğu değerinden yaklaşık 40mm fazla olması olarak değerlendirilmektedir. Son olarak ASTM D3410 standardına göre, sabit çekme hızı kullanılan testlerde kama tipi tutucular ile tırnak malzemesi arasında yüksek uyum (yüksek sistem esnekliği) mevcutsa, numunede gözlemlenen gerinim, beklenen değerden 10 ila 50 kat daha düşük olabilmektedir. Bu durum, test sisteminin sadece numuneyi değil, aynı zamanda kendi yapısal esnekliğini de deformasyona katmasıyla ilgilidir. Özellikle sabit hızla çalışan test makinelerinde

kullanılan tırnak yapısı, sistemin genel uyumluluğunu artırarak bu etkiyi daha belirgin hale getirebilmektedir [84].

Problemin net olarak belirlenebilmesi için tahmin edilen çözümlerin uygulandığı yeni numuneler üretilmeli ve testler aynı şekilde tekrar gerçekleştirilmelidir.

İleride yapılacak çalışmalarda; boşluk, üst üste binmeler, açısal sapmalar, köprü – köşe oluşumları ve diğer üretim kusurları test numunelerine uygulanarak; her bir hatanın kompozitin mukavemet özelliklerine etkisi deneysel olarak değerlendirilebilir.

Düz plaka formlarına ek olarak uçak parçaları gibi kompleks şekilli test numuneleri üzerinde testler gerçekleştirilerek formlu geometrilerin test karakteristiği belirlenebilir.

Deneysel çalışmalara ek olarak nümerik çalışmalar gerçekleştirilerek, deneysel ve nümerik çalışmalar birlikte değerlendirilebilir.

Bu çalışmada otomatik fiber serme yöntemi kullanılarak termoset malzemeler ile yapılan üretim ve test çalışmaları, termoplastik malzemeler ile gerçekleştirilerek, termoplastik malzemelerin üretimine ait parametreler ve test karakteristiği belirlenebilir.

- [1] T.W. Eager, “Whither advanced materials? ,” *Adv. Mater. Processes*, ASM International, pp 25–29, 1991.
- [2] G. Norvan, “Composite Laminates Made by Automated Fiber Placement of Dry Fibers and Vacuum Assisted Resin Transfer Molding,” M.S. thesis, Concordia University, Montreal, QC, Canada, 2018.
- [3] A. Brasington, C. Sacco, J. Halbritter, R. Wehbe, and R. Harik, “Automated Fiber Placement: Status, Challenges and Evolutions (Submitted),” SAE, 2021.
- [4] R. Harik, Z. Gurdal, C. Saidy, S. J. Williams, and B. Grimsley, “Automated fiber placement defect identity cards: cause, anticipation, existence, significance, and progression,” [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/326464139>. Accessed: Jun 05, 2025.
- [5] F. Heinecke and C. Willberg, “Manufacturing-Induced Imperfections in Composite Parts Manufactured via Automated Fiber Placement,” *J. Compos. Sci.*, vol. 3, p. 56, 2019, doi: 10.3390/jcs3020056.
- [6] S. Shouzheng et al., “Defect Characteristics and Online Detection Techniques During Manufacturing of FRPs Using Automated Fiber Placement: A Review,” *Polymers*, vol. 12, p. 1337, 2020, doi: 10.3390/polym12061337.
- [7] K. Croft et al., “Experimental study of the effect of automated fiber placement induced defects on performance of composite laminates,” *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 42, pp. 484–491, 2011, doi:10.1016/j.compositesa.2011.01.007.
- [8] K. Deepak et al., “AFP mandrel development for composite aircraft fuselage skin,” *Int. J. Aerosp. Sci.*, vol. 15, no. 1, pp. 32–41, 2014, doi:10.5139/ijass.2014.15.1.32.

- [9] O. S. Falcó et al., “Variable-stiffness composite panels: Defect tolerance under in-plane tensile loading,” *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 63, pp. 21–31, 2014, doi:10.1016/j.compositesa.2014.03.022.
- [10] W. Guin, J. R. Jackson, and C. M. Bosley, “Effects of tow-to-tow gaps in composite laminates fabricated via automated fiber placement,” *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 115, pp. 66–75, 2018, doi:10.1016/j.compositesa.2018.09.014.
- [11] W. Woigk, S. Hallett, M. I. Jones, M. Kuhtz, A. Hornig, and M. Gude, “Experimental investigation of the effect of defects in Automated Fibre Placement produced composite laminates,” *Compos. Struct.*, vol. 201, pp. 1004–1017, 2018, doi:10.1016/j.compstruct.2018.06.078.
- [12] M. Aymen, P. Lorrain, and R. Boukhili, “Experimental and numerical investigation on the open-hole compressive strength of AFP composites containing gaps and overlaps,” *J. Compos. Mater.*, 2017, doi:10.1177/0021998317690917.
- [13] A. K. Kaw, *Mechanics of Composite Materials*, 2nd ed., CRC, Taylor & Francis, 2006.
- [14] A. Ghobadi, “Common Type of Damages in Composites and Their Inspections,” *World J. Mech.*, vol. 7, pp. 24–33, 2017, doi:10.4236/wjm.2017.72003.
- [15] Airbus A350 XWB, “Airbus Technical Publication Brochure,” [Online]. Available: http://www.airbus.com/fileadmin/media_gallery/files/brochures_publications/FAS_T_magazine/FAST_specialA350.pdf. Accessed: June 2013.
- [16] M. S. Sarfraz, H. Hong, and S. S. Kim, “Recent developments in the manufacturing technologies of composite components and their cost-effectiveness in the automotive industry: A review study,” *Compos. Struct.*, vol. 266, p. 113864, 2021, doi:10.1016/j.compstruct.2021.113864.
- [17] S. W. Tsai, “Strength Characteristics of Composite Materials,” *NASA, Tech. Rep.*, 1965.
- [18] P. K. Mallick, *Fiber-Reinforced Composites: Materials, Manufacturing, and Design*, Marcel Dekker, 1993.

- [19] L. Pilato and M. J. Michno, *Advanced Composite Materials*, New York, NY, USA, 2010.
- [20] E. Ates and O. Bas, “Resistance Welding Process Optimization in Joining of Thermoplastic Composites Assisted with Multiphysics Simulation,” M.S. thesis, Ankara Yıldırım Beyazıt Univ., Ankara, Turkey, 2020.
- [21] D. Brigante, *New Composite Materials: Selection, Design, and Application*, Springer Int. Publishing, 2014.
- [22] “Polymers,” [Online]. Available: <https://polymers.com.au/thermoplastics>. Accessed: Mar. 10, 2024.
- [23] F. E. Weinberg, “Computer assisted instruction for the mastery of basic chemistry concepts,” M.S. thesis, 2019.
- [24] M. Kaufman and C. J. Tinsley, “Material characteristics,” *Qwikconnect*, pp. 3–5, 2008.
- [25] S. Pantelakis and K. Tserpes, “Revolutionizing Aircraft Materials and Processes,” in *Thermoplastic Composites for Aerospace Applications*, Springer.
- [26] P. K. Mallick, *Processing of Polymer Matrix Composites*, Taylor & Francis, Boca Raton, FL, USA, 2018.
- [27] M. Di Francesco, L. Veldenz, G. Dell’Anno, and K. Potter, “Heater power control for multi-material, variable speed automated fibre placement,” *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, pp. 408–421, Oct. 2017, doi:10.1016/j.compositesa.2017.06.015.
- [28] G. Clancy et al., “A study of the influence of processing parameters on steering of carbon Fibre/PEEK tapes using laser-assisted tape placement,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 163, pp. 243–251, Apr. 2019, doi:10.1016/j.compositesb.2018.11.033.
- [29] M. Francesco et al., “On the development of multi-material automated fibre placement technology,” *ICMAC2015*, [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/281821794>. Accessed: Feb 05, 2025.
- [30] G. Clancy et al., “Steering of carbon fiber/thermoplastic pre-preg tapes using laser-assisted tape placement,” in *AIAA/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conf.*, AIAA SciTech Forum, 2018.

- [31] B. C. Kim, K. Hazra, P. Weaver, and K. Potter, "Limitations of fibre placement techniques for variable angle tow composites and their process-induced defects," 2011.
- [32] M. Assadi and T. Field, "OFS processing of dry fiber carbon materials (DFP) for improved rates and reliability," *SAE Tech. Pap.*, 2020, doi: 10.4271/2020-01-0030.
- [33] C. Uzay and N. Geren, "Advanced technologies for fiber reinforced polymer composite manufacturing: A review," [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/347455884>. Accessed: Nov. 28, 2020.
- [34] A. Baker, S. Dutton, and D. Kelly, *Composite materials for aircraft structures*, 2nd ed., USA: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2004.
- [35] K. K. Kar, *Composite Materials Processing, Applications, Characterizations*, Springer, Germany, pp. 686, 2017.
- [36] P. K. Mallick, *Fiber-reinforced composites: Materials, manufacturing, and design*, 3rd ed., USA: CRC Press, pp. 638, 2007.
- [37] M. Mehdikhani, L. Gorbatiikh, I. Verpoest, and S. V. Lomov, "Voids in fiber-reinforced polymer composites: A review on their formation, characteristics, and effects on mechanical performance," *J. Compos. Mater.*, pp. 1579–1669, 2019.
- [38] N. N. Kermani, P. Simacek, and S. G. Advani, "A bond-line porosity model that integrates fillet shape and prepreg facesheet consolidation during equilibrated co-cure of sandwich composite structures," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 139, 2020.
- [39] P. Bere, E. Sabău, C. Dudescu, C. Neamtu, and M. Fărtan, "Experimental research regarding carbon fiber/epoxy material manufactured by autoclave process," *MATEC Web Conf.*, vol. 299, pp. 1–6, 2019.
- [40] D. Plappert, G. C. Ganzenmüller, M. May, and S. Beisel, "Mechanical properties of a unidirectional basalt fiber/epoxy composite," *Sci.*, vol. 4, p. 101, pp. 1–12, 2020.
- [41] M. Hassan, A. Othman, and S. Kamaruddin, "A review on the manufacturing defects of complex-shaped laminate in aircraft composite structures," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 91, pp. 4081–4094, 2017.
- [42] M. Quanjin, M. R. M. Rejab, M. S. Idris, B. Zhang, and N. M. Kumar, "Filament winding technique: SWOT analysis and applied favorable factors," *SCIREA J. Mech. Eng.*, vol. 3, no. 1, pp. 1–25, 2019.
- [43] A. McIlhagger, E. Archer, and R. McIlhagger, "Manufacturing processes for composite materials and components for aerospace applications," *Polymer Composites in the Aerospace Industry*, Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering, Elsevier, UK, pp. 50, 53–75, 2015.
- [44] M. N. Prabhakar, N. Rajini, N. Ayrilmis, K. Mayandi, S. Siengchin, K. Senthilkumar, S. Karthikeyan, and S. O. Ismail, "An overview of burst, buckling, durability and corrosion analysis of lightweight FRP composite pipes and their applicability," *Compos. Struct.*, vol. 230, 2019.
- [45] Radius Engineering, "Net shape composites," [Online]. Available: http://www.radiuseng.com/net_shape_composites. Accessed: Jul. 10, 2019.

- [46] D. Gueuning and F. Mathieu, "Evolution in composite injection moulding processes for wing control surfaces," *Sampe J.*, vol. 52, no. 1, pp. 7–12, 2016.
- [47] "SQRTM enables net shape parts," *CompositesWorld*, [Online]. Available: <https://www.compositesworld.com/articles/sqrtm-enables-net-shape-parts>. Accessed: Jul. 10, 2019.
- [48] "The first composite fuselage section for the first composite commercial jet," *CompositesWorld*, [Online]. Available: <https://www.compositesworld.com/articles/the-first-composite-fuselage-section-for-the-first-composite-commercial-jet>. Accessed: Mar. 23, 2020.
- [49] "Mongoose Hybrid," [Online]. Available: <https://en.machinetools.camozzi.com/products/composite-manufacturing/all-products/mongoose-hybrid>. Accessed: Jan. 13, 2021.
- [50] "Coriolis composites: The reference in automated fiber placement," [Online]. Available: <https://www.coriolis-composites.com>. Accessed: Jan. 13, 2021.
- [51] K. C. Wu et al., "Structural response of compression-loaded, tow-placed, variable stiffness panels," in *Proc. 43rd Structural Dynamics and Materials Conf.*, Denver, CO, USA, Apr. 22–25, 2002, pp. 22.
- [52] B. Denkena, C. Schmidt, K. Völtzer, and T. Hocke, "Thermographic online monitoring system for automated fiber placement processes," *Compos. Part B Eng.*, vol. 97, pp. 239–243, 2016, doi: 10.1016/j.compositesb.2016.04.076.
- [53] A. Sawicki, E. Schulze, L. Fitzwater, and K. Harris, "Structural qualification of V-22 EMD tow-placed aft fuselage," in *Proc. Amer. Helicopter Soc. 51st Annu. Forum*, Fort Worth, TX, USA, May 1995.
- [54] A. Sawicki and P. Minguett, "The effect of intraply overlaps and gaps upon the compression strength of composite laminates," in *Proc. 39th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conf.*, Long Beach, CA, USA, Apr. 20–23, pp. 744–754, 1998.
- [55] J. Marrouze, J. Housner, and F. Abdi, "Effect of manufacturing defects and their uncertainties on strength and stability of stiffened panels," in *Proc. 19th Int. Conf. Composite Mater.*, Montreal, QC, Canada, Jul. 28, 2013.
- [56] M. Lan, D. Cartié, P. Davies, and C. Baley, "Influence of embedded gap and overlap fiber placement defects on the microstructure and shear and compression properties of carbon-epoxy laminates," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 82, pp. 198–207, 2016, doi: 10.1016/j.compositesa.2015.12.007.
- [57] Y. M. Elsherbini and S. V. Hoa, "Experimental and numerical investigation of the effect of gaps on fatigue behavior of unidirectional carbon/epoxy automated fiber placement laminates," *J. Compos. Mater.*, vol. 51, pp. 759–772, 2016, doi: 10.1177/0021998316655393.
- [58] G. G. Lozano, A. Tiwari, C. Turner, and S. Astwood, "A review on design for manufacture of variable stiffness composite laminates," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part B J. Eng. Manuf.*, pp. 1–12, 2015.
- [59] G. G. Lozano, A. Tiwari, and C. Turner, "A design algorithm to model fibre paths for manufacturing of structurally optimised composite laminates," *Compos. Struct.*, 2018.

- [60] M. A. Nik, K. Fayazbakhsh, D. Pasini, and L. Lessard, "Optimization of variable stiffness composites with embedded defects induced by automated fiber placement," *Compos. Struct.*, vol. 107, pp. 160–166, 2014.
- [61] R. Lichtinger, J. Lacalle, R. Hinterhoelzl, U. Beier, and K. Drechsler, "Simulation and experimental validation of gaps and bridging in the automated fiber placement process," *Sci. Eng. Compos. Mater.*, vol. 22, pp. 1–18, 2013.
- [62] S. T. Ijsselmuiden, "Optimal design of variable stiffness composite structures using lamination parameters," Ph.D. dissertation, Delft Univ. of Technology, Delft, The Netherlands, 2011.
- [63] K. Fayazbakhsh, "The impact of gaps and overlaps on variable stiffness composites manufactured by automated fiber placement," Ph.D. dissertation, McGill Univ., Montreal, QC, Canada, 2013.
- [64] M. Gruber, M. A. Lamontia, and B. J. Waibel, "Automated fabrication processes for large composite aerospace structures: A trade study," in *Proc. 46th Int. SAMPE Symp. Exhib.*, Long Beach, CA, USA, May 6–10, 2001, pp. 1987–1997.
- [65] D. H. J. A. Lukaszewicz, C. Ward, and K. D. Potter, "The engineering aspects of automated prepreg layup: History, present and future," *Compos. Part B Eng.*, vol. 43, pp. 997–1009, 2012.
- [66] D. Jegley, B. F. Tatting, and Z. Gürdal, "Tow-steered panels with holes subjected to compression or shear loading," in *Proc. 46th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conf.*, Reston, VA, USA, 2005, pp. 1–14.
- [67] A. Marouene, R. Boukhili, J. Chen, and A. Yousefpour, "Effects of gaps and overlaps on the buckling behavior of an optimally designed variable-stiffness composite laminates—A numerical and experimental study," *Compos. Struct.*, vol. 140, pp. 556–566, 2016.
- [68] A. J. Sawicki and P. Minguett, "The effect of intraply overlaps and gaps upon the compression strength of composite laminates," in *Proc. 39th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conf.*, Long Beach, CA, USA, Apr. 20–23, 1998, pp. 744–754.
- [69] X. Li, S. R. Hallett, and M. R. Wisnom, "Modelling the effect of gaps and overlaps in automated fibre placement (AFP)-manufactured laminates," *Sci. Eng. Compos. Mater.*, vol. 22, pp. 115–129, 2015.
- [70] M. Lan, D. Cartié, P. Davies, and C. Baley, "Microstructure and tensile properties of carbon-epoxy laminates produced by automated fibre placement: Influence of a caul plate on the effects of gap and overlap embedded defects," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 78, pp. 124–134, 2015.
- [71] M. Lan, D. Cartié, P. Davies, and C. Baley, "Influence of embedded gap and overlap fiber placement defects on the microstructure and shear and compression properties of carbon-epoxy laminates," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 82, pp. 198–207, 2016.

- [72] O. S. Falcó, C. S. Lopes, J. A. Mayugo, N. Gascons, and J. Renart, “Effect of tow-drop gaps on the damage resistance and tolerance of variable-stiffness panels,” *Compos. Struct.*, vol. 116, pp. 94–103, 2014.
- [73] A. Marouene, P. Legay, and R. Boukhili, “Experimental and numerical investigation on the open-hole compressive strength of OFS composites containing gaps and overlaps,” *J. Compos. Mater.*, vol. 51, pp. 1–16, 2017.
- [74] K. Völtzer, “Online-Prozessüberwachung von Automated Fiber Placement Prozessen auf Basis der Thermografie,” Ph.D. dissertation, Gottfried Wilhelm Leibniz Univ. Hannover, Hanover, Germany, 2018.
- [75] S. Zambal, C. Eitzinger, M. Clarke, J. Klintworth, and P. Y. Mechin, “A digital twin for composite parts manufacturing—Effects of defects analysis based on manufacturing data,” in *Proc. IEEE 16th Int. Conf. Ind. Informatics (INDIN)*, Porto, Portugal, Jul. 18–20, 2018, pp. 803–808.
- [76] C. Fagiano, “Computational modeling of tow-placed composite laminates with fabrication features,” Ph.D. dissertation, Delft Univ. of Technology, Delft, The Netherlands, 2010.
- [77] H. B. Olsen and J. J. Craig, “Automated composite tape lay-up using robotic devices,” in *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics Autom.*, Atlanta, GA, USA, May 2–6, 1993, pp. 291–297.
- [78] M. Perner, S. Algermissen, R. Keimer, and H. P. Monner, “Avoiding defects in manufacturing processes: A review for automated CFRP production,” *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 38, pp. 82–92, 2016.
- [79] G. Seon, Y. Nikishkov, and A. Makeev, “Structures perspective for strength and fatigue prognosis in composites with manufacturing irregularities,” *J. Am. Helicopter Soc.*, vol. 60, pp. 1–10, 2015.
- [80] J. P. Marrouze, J. Housner, and F. Abdi, “Effect of manufacturing defects and their uncertainties on strength and stability of stiffened panels,” in *Proc. 19th Int. Conf. Composite Mater. (ICCM19)*, Montreal, QC, Canada, Jul. 28–Aug. 2, 2013, pp. 1–10.
- [81] T. S. Mesogitis, A. A. Skordos, and A. C. Long, “Uncertainty in the manufacturing of fibrous thermosetting composites: A review,” *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 57, pp. 67–75, 2014.
- [82] ASTM D3039/D3039M, “Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials,” ASTM Int., West Conshohocken, PA, USA, 2006.
- [83] Hexcel, “HexPly® M91/34%/UD194/IM7 Datasheet,” [Online]. Available: <https://www.hexcel.com/Resources/DataSheets/Prepreg>.
- [84] ASTM D3410/D3410M, “Standard test method for compressive properties of polymer matrix composite materials with unsupported gage section by shear loading,” ASTM Int., West Conshohocken, PA, USA, 2006.
- [85] ASTM D5766/D5766M, “Standard test method for open hole tensile strength of polymer matrix composite laminates,” ASTM Int., West Conshohocken, PA, USA, 2006.

[86] ASTM D6484/D6484M, “Standard test method for open hole compressive strength of polymer matrix composite laminates,” ASTM Int., West Conshohocken, PA, USA, 2006.

[87] L. E. Turoski, “Effects of manufacturing defects on the strength of toughened carbon/epoxy prepreg composites,” M.S. thesis, Montana State Univ., Bozeman, MT, USA, 2000.



A

ÖRNEK TEST NUMUNELERİ DENEY PARAMETRELERİ

Test sonuçlarında grafik olarak gösterilen numunelere ait parametreler ek olarak aşağıda her test tipi için tablo halinde paylaşılmaktadır.

Tablo 9.1 Çentiksiz çekme testi örnek numune test parametreleri

Test numunesi	Zaman (s)	Yer değiştirme (mm)	Kuvvet (N)	Çekme gerilimi (MPa)	Gerinim 5 (usn)
1	0,0	0,002	99,831	3,781	-1,1089
1	0,1	0,003	102,482	3,882	12,1814
1	0,2	0,007	117,464	4,449	86,6652
1	0,3	0,011	128,994	4,886	145,0912
1	0,4	0,014	140,278	5,314	204,9515
1	0,5	0,017	151,322	5,732	263,6198
1	0,6	0,021	162,854	6,169	322,3732
1	0,7	0,024	174,256	6,601	380,6881

Tablo 9.1 Çentiksiz çekme testi örnek numune test parametreleri (devamı)

1	0,8	0,027	185,565	7,029	438,5811
1	0,9	0,031	196,642	7,449	497,3537
1	1,0	0,034	208,283	7,890	555,9137
1	1,1	0,037	219,495	8,314	613,1216
1	1,2	0,041	230,382	8,727	669,8734
1	1,3	0,044	242,390	9,181	729,2318
1	1,4	0,047	253,107	9,587	786,1858
1	1,5	0,051	264,206	10,008	844,1292
1	1,6	0,054	275,344	10,430	901,8294
1	1,7	0,057	286,390	10,848	958,7948
1	1,8	0,061	297,824	11,281	1016,0215
1	1,9	0,064	308,683	11,693	1073,5566
1	2,0	0,067	319,555	12,104	1129,2737
1	2,1	0,071	330,918	12,535	1186,0154
1	2,2	0,074	342,304	12,966	1243,7374
1	2,3	0,077	353,288	13,382	1299,9475
1	2,4	0,081	363,994	13,788	1356,6752

Tablo 9.1 Çentiksiz çekme testi örnek numune test parametreleri (devamı)

1	2,5	0,084	375,353	14,218	1414,3006
1	2,6	0,087	386,080	14,624	1469,5245
1	2,7	0,091	397,028	15,039	1525,9025
1	2,8	0,094	408,027	15,456	1582,8072
1	2,9	0,097	419,216	15,879	1637,6814
1	3,0	0,101	429,689	16,276	1694,1993
1	3,1	0,104	440,792	16,697	1751,4256
1	3,2	0,107	451,678	17,109	1806,7927
1	3,3	0,111	462,190	17,507	1863,2327
1	3,4	0,114	473,077	17,920	1919,8618
1	3,5	0,117	483,970	18,332	1975,1033
1	3,6	0,121	494,848	18,744	2031,6683
1	3,7	0,124	506,057	19,169	2088,1209
1	3,8	0,127	516,066	19,548	2143,2943
1	3,9	0,131	527,646	19,987	2198,8414
1	4,0	0,134	538,030	20,380	2254,9636
1	4,1	0,137	549,340	20,808	2310,5619

Tablo 9.1 Çentiksiz çekme testi örnek numune test parametreleri (devamı)

1	4,2	0,141	559,602	21,197	2366,7677
1	4,3	0,144	570,509	21,610	2422,2664
1	4,4	0,147	580,940	22,005	2477,9318
1	4,5	0,151	591,794	22,416	2533,7841
1	4,6	0,154	602,719	22,830	2590,0572
1	4,7	0,157	612,623	23,205	2644,5838
1	4,8	0,161	623,449	23,615	2700,4618
1	4,9	0,164	635,010	24,053	2756,8319
1	5,0	0,167	645,123	24,436	2811,4307
1	5,1	0,171	655,575	24,832	2866,8784
1	5,2	0,174	666,323	25,240	2922,7126
1	5,3	0,177	677,061	25,646	2977,8129
1	5,4	0,181	686,816	26,016	3033,4350
1	5,5	0,184	697,450	26,419	3088,3634
1	5,6	0,187	708,325	26,830	3142,9396
1	5,7	0,191	719,048	27,237	3199,1072
1	5,8	0,194	729,593	27,636	3255,0674

Tablo 9.1 Çentiksiz çekme testi örnek numune test parametreleri (devamı)

1	5,9	0,197	740,261	28,040	3309,4939
1	6,0	0,201	750,291	28,420	3364,6163
1	6,1	0,204	761,556	28,847	3420,3529
1	6,2	0,207	771,013	29,205	3475,6039
1	6,3	0,211	782,299	29,633	3530,1894
1	6,4	0,214	792,319	30,012	3585,8222
1	6,5	0,217	803,334	30,429	3640,7297
1	6,6	0,221	812,776	30,787	3696,5290
1	6,7	0,224	823,226	31,183	3751,8635
1	6,8	0,227	833,905	31,587	3806,1072
1	6,9	0,231	843,780	31,961	3860,6774
1	7,0	0,234	854,228	32,357	3916,7036
1	7,1	0,237	864,660	32,752	3971,1013
1	7,2	0,241	874,643	33,130	4026,0055
1	7,3	0,244	884,954	33,521	4081,7778
1	7,4	0,247	895,567	33,923	4136,3775
1	7,5	0,251	905,460	34,298	4190,6964

Tablo 9.1 Çentiksiz çekme testi örnek numune test parametreleri (devamı)

1	7,6	0,254	915,639	34,683	4245,8782
1	7,7	0,257	926,131	35,081	4300,2889
1	7,8	0,261	936,300	35,466	4355,6471
1	7,9	0,264	946,229	35,842	4410,3763
1	8,0	0,267	956,936	36,248	4465,2848
1	8,1	0,271	966,648	36,615	4520,4791
1	8,2	0,274	977,065	37,010	4576,4563
1	8,3	0,277	986,465	37,366	4631,0388
1	8,4	0,281	997,408	37,781	4685,7363
1	8,5	0,284	1007,523	38,164	4741,6994
1	8,6	0,287	1017,027	38,524	4796,0677
1	8,7	0,291	1026,856	38,896	4850,7298
1	8,8	0,294	1037,973	39,317	4907,0078
1	8,9	0,297	1047,531	39,679	4961,6853
1	9,0	0,301	1057,321	40,050	5016,0335
1	9,1	0,304	1067,627	40,440	5071,4086
1	9,2	0,307	1077,646	40,820	5126,1401

Tablo 9.1 Çentiksiz çekme testi örnek numune test parametreleri (devamı)

1	9,3	0,311	1087,137	41,179	5180,5875
1	9,4	0,314	1097,922	41,588	5236,7221
1	9,5	0,317	1107,604	41,955	5291,4596
1	9,6	0,321	1117,539	42,331	5346,1506
1	9,7	0,324	1127,569	42,711	5402,3131
1	9,8	0,327	1137,545	43,089	5456,7493
1	9,9	0,331	1147,470	43,465	5511,7034
1	10,0	0,334	1156,870	43,821	5566,7008
1	10,1	0,337	1167,096	44,208	5621,6614
1	10,2	0,341	1177,026	44,584	5676,5303
1	10,3	0,344	1186,908	44,959	5731,8821
1	10,4	0,347	1196,428	45,319	5786,2583
1	10,5	0,351	1206,142	45,687	5840,5097
1	10,6	0,354	1216,359	46,074	5896,3033
1	10,7	0,357	1225,840	46,433	5950,9296
1	10,8	0,361	1235,734	46,808	6004,9528
1	10,9	0,364	1245,798	47,189	6061,1567

Tablo 9.1 Çentiksiz çekme testi örnek numune test parametreleri (devamı)

1	11,0	0,367	1255,037	47,539	6116,2012
1	11,1	0,371	1264,565	47,900	6170,2789
1	11,2	0,374	1273,783	48,249	6226,0996
1	11,3	0,377	1283,563	48,620	6280,4404
1	11,4	0,381	1293,514	48,997	6335,6804
1	11,5	0,384	1303,368	49,370	6390,9846
1	11,6	0,387	1311,933	49,694	6445,2956
1	11,7	0,391	1322,180	50,083	6499,9196
1	11,8	0,394	1330,969	50,416	6555,2518
1	11,9	0,397	1341,052	50,797	6610,6948
1	12,0	0,401	1349,007	51,099	6663,6107
1	12,1	0,404	1359,685	51,503	6720,7492
1	12,2	0,407	1367,946	51,816	6775,2297
1	12,3	0,411	1378,079	52,200	6857,1703
1	12,4	0,414	1386,793	52,530	6945,7362
1	12,5	0,417	1396,853	52,911	6974,7376
1	12,6	0,421	1405,779	53,249	6959,1873

Tablo 9.1 Çentiksiz çekme testi örnek numune test parametreleri (devamı)

1	12,7	0,424	1414,989	53,598	6974,1658
1	12,8	0,427	1424,168	53,946	6944,4524
1	12,9	0,431	1433,836	54,312	7405,7835
1	12,9	0,432	794,091	30,079	7356,5627
1	13,0	0,433	149,572	5,666	7223,8198
1	13,1	0,436	-21,692	-0,822	7137,8271
1	13,2	0,439	-25,125	-0,952	3522,2471
1	13,3	0,443	-23,522	-0,891	3035,1228
1	13,4	0,446	-24,166	-0,915	6936,7136
1	13,5	0,449	-23,410	-0,887	6800,9482
1	13,6	0,453	-23,951	-0,907	6930,1571
1	13,7	0,456	-24,435	-0,926	6994,1641
1	13,8	0,459	-23,908	-0,906	6938,6140
1	13,9	0,463	-25,702	-0,974	6793,6569
1	14,0	0,466	-25,277	-0,957	6924,4229
1	14,1	0,469	-24,654	-0,934	6919,6844
1	14,2	0,473	-24,390	-0,924	6704,6941

Tablo 9.1 Çentiksiz çekme testi örnek numune test parametreleri (devamı)

1	14,3	0,476	-23,978	-0,908	7052,6875
1	14,4	0,479	-24,455	-0,926	6718,2826
1	14,5	0,483	-24,072	-0,912	6844,7478
1	14,6	0,486	-24,246	-0,918	6592,9010
1	14,7	0,489	-23,887	-0,905	6867,8991
1	14,8	0,493	-24,360	-0,923	6596,4172
1	14,9	0,496	-24,265	-0,919	6717,7354
1	15,0	0,499	-24,214	-0,917	6664,7227
1	15,1	0,503	-24,736	-0,937	6593,3759
1	15,2	0,506	-23,474	-0,889	7107,1028
1	15,3	0,509	-23,280	-0,882	5884,2800
1	15,4	0,513	-23,054	-0,873	5686,8587
1	15,5	0,516	-23,686	-0,897	6069,3617
1	15,6	0,519	-23,253	-0,881	6241,6303
1	15,7	0,523	-23,345	-0,884	7095,9325
1	15,8	0,526	-23,484	-0,890	6296,2868
1	15,9	0,529	-23,652	-0,896	6355,3280

Tablo 9.1 Çentiksiz çekme testi örnek numune test parametreleri (devamı)

1	16,0	0,533	-23,496	-0,890	6339,0075
1	16,1	0,536	-22,887	-0,867	6438,7354
1	16,2	0,539	-23,421	-0,887	6174,5425
1	16,3	0,543	-23,850	-0,903	6552,0094
1	16,4	0,546	-22,869	-0,866	6331,4470
1	16,5	0,549	-23,042	-0,873	6451,7581
1	16,6	0,553	-22,950	-0,869	6485,3276
1	16,7	0,556	-23,136	-0,876	6587,0355
1	16,8	0,559	-22,897	-0,867	6480,4107
1	16,9	0,563	-22,749	-0,862	6903,3625
1	17,0	0,566	-23,061	-0,874	6159,3996
1	17,1	0,569	-22,938	-0,869	6288,6747
1	17,2	0,573	-22,872	-0,866	5822,9323
1	17,3	0,576	-22,822	-0,864	5432,4074
1	17,4	0,579	-22,887	-0,867	5463,5261
1	17,5	0,583	-23,258	-0,881	5446,6506
1	17,6	0,586	-22,346	-0,846	5810,6510

Tablo 9.1 Çentiksiz çekme testi örnek numune test parametreleri (devamı)

1	17,7	0,589	-23,116	-0,876	5452,1789
1	17,8	0,593	-23,069	-0,874	5585,3035
1	17,9	0,596	-22,760	-0,862	5658,3784
1	18,0	0,599	-22,519	-0,853	5869,2372
1	18,1	0,603	-22,869	-0,866	5756,2836
1	18,2	0,606	-22,459	-0,851	5624,7730
1	18,3	0,609	-23,722	-0,899	5958,4691
1	18,4	0,613	-23,405	-0,887	6317,8050
1	18,5	0,616	-23,441	-0,888	7174,8989
1	18,6	0,619	-23,059	-0,873	7252,8082
1	18,7	0,623	-23,601	-0,894	7132,9698
1	18,8	0,626	-23,523	-0,891	6826,8166
1	18,9	0,629	-23,551	-0,892	6670,1486
1	19,0	0,633	-23,119	-0,876	6454,4040
1	19,1	0,636	-23,285	-0,882	6879,7753
1	19,2	0,639	-23,257	-0,881	7146,3729
1	19,3	0,643	-23,389	-0,886	6273,8559

Tablo 9.1 Çentiksiz çekme testi örnek numune test parametreleri (devamı)

1	19,4	0,646	-23,290	-0,882	6668,3255
1	19,4	0,648	-22,977	-0,870	6690,8137

Tablo 9.2 Çentiksiz basma testi örnek numune test parametreleri

Test numunesi	Zaman (s)	Yer değiştirme (mm)	Kuvvet (kN)	Basma gerilimi (Mpa)
1	0,0	-0,0008	0,1958	4,4489
1	0,1	0,0002	0,1957	4,4478
1	0,2	0,0026	0,2142	4,8682
1	0,3	0,0053	0,2466	5,6047
1	0,4	0,0078	0,2772	6,3008
1	0,5	0,0103	0,3064	6,9626
1	0,6	0,0128	0,3361	7,6395
1	0,7	0,0153	0,3636	8,2636
1	0,8	0,0177	0,3884	8,8270
1	0,9	0,0203	0,4096	9,3080
1	1,0	0,0228	0,4211	9,5715

Tablo 9.2 Çentiksiz basma testi örnek numune test parametreleri (devamı)

1	2,0	0,0478	0,4822	10,9587
1	3,0	0,0727	0,5330	12,1146
1	4,0	0,0978	0,5772	13,1173
1	4,0	0,0978	0,5772	13,1173
1	5,0	0,1228	0,6146	13,9678
1	6,0	0,1478	0,6513	14,8012
1	7,0	0,1728	0,6864	15,6005
1	8,0	0,1978	0,7200	16,3644
1	9,0	0,2228	0,7531	17,1154
1	10,0	0,2478	0,7876	17,9005
1	11,0	0,2728	0,8237	18,7210
1	12,0	0,2978	0,8613	19,5761
1	13,0	0,3228	0,9024	20,5099
1	14,0	0,3478	0,9459	21,4986
1	15,0	0,3728	0,9892	22,4828
1	16,0	0,3978	1,0341	23,5033
1	17,0	0,4228	1,0784	24,5096

Tablo 9.2 Çentiksiz basma testi örnek numune test parametreleri (devamı)

1	18,0	0,4478	1,1233	25,5300
1	19,0	0,4728	1,1715	26,6260
1	20,0	0,4978	1,2213	27,7572
1	21,0	0,5228	1,2749	28,9749
1	22,0	0,5478	1,3318	30,2674
1	23,0	0,5728	1,3922	31,6414
1	24,0	0,5978	1,4584	33,1449
1	25,0	0,6228	1,5303	34,7805
1	26,0	0,6478	1,6060	36,5006
1	27,0	0,6728	1,6840	38,2716
1	28,0	0,6978	1,7634	40,0774
1	29,0	0,7228	1,8459	41,9526
1	30,0	0,7478	1,9308	43,8819
1	31,0	0,7728	2,0166	45,8317
1	32,0	0,7978	2,1058	47,8602
1	33,0	0,8228	2,1975	49,9430
1	34,0	0,8478	2,2913	52,0755

Tablo 9.2 Çentiksiz basma testi örnek numune test parametreleri (devamı)

1	35,0	0,8728	2,3884	54,2808
1	36,0	0,8978	2,4894	56,5771
1	37,0	0,9228	2,5929	58,9302
1	38,0	0,9478	2,6997	61,3577
1	39,0	0,9728	2,8069	63,7925
1	40,0	0,9978	2,9182	66,3229
1	41,0	1,0228	3,0326	68,9235
1	42,0	1,0478	3,1481	71,5479
1	43,0	1,0728	3,2659	74,2257
1	44,0	1,0978	3,3860	76,9549
1	45,0	1,1228	3,5076	79,7175
1	46,0	1,1478	3,6316	82,5358
1	47,0	1,1728	3,7567	85,3792
1	48,0	1,1977	3,8844	88,2821
1	49,0	1,2228	4,0123	91,1880
1	50,0	1,2477	4,1417	94,1300
1	51,0	1,2727	4,2720	97,0909

Tablo 9.2 Çentiksiz basma testi örnek numune test parametreleri (devamı)

1	52,0	1,2977	4,4046	100,1048
1	53,0	1,3227	4,5373	103,1197
1	54,0	1,3477	4,6732	106,2101
1	55,0	1,3727	4,8111	109,3427
1	56,0	1,3977	4,9488	112,4721
1	57,0	1,4227	5,0875	115,6250
1	58,0	1,4478	5,2272	118,7991
1	59,0	1,4727	5,3687	122,0158
1	60,0	1,4978	5,5104	125,2361
1	61,0	1,5228	5,6534	128,4874
1	62,0	1,5477	5,7994	131,8052
1	63,0	1,5728	5,9480	135,1819
1	64,0	1,5978	6,0971	138,5715
1	65,0	1,6228	6,2461	141,9560
1	66,0	1,6478	6,3975	145,3972
1	67,0	1,6728	6,5502	148,8677
1	68,0	1,6978	6,7024	152,3280

Tablo 9.2 Çentiksiz basma testi örnek numune test parametreleri (devamı)

1	69,0	1,7228	6,8570	155,8401
1	70,0	1,7478	7,0126	159,3779
1	71,0	1,7728	7,1698	162,9503
1	72,0	1,7978	7,3266	166,5147
1	73,0	1,8228	7,4838	170,0853
1	74,0	1,8478	7,6429	173,7027
1	75,0	1,8728	7,8028	177,3358
1	76,0	1,8978	7,9625	180,9662
1	77,0	1,9228	8,1260	184,6814
1	78,0	1,9478	8,2881	188,3658
1	79,0	1,9728	8,4512	192,0728
1	80,0	1,9978	8,6166	195,8324
1	81,0	2,0228	8,7809	199,5664
1	82,0	2,0478	8,9435	203,2619
1	83,0	2,0728	9,1090	207,0219
1	84,0	2,0978	9,2738	210,7677
1	85,0	2,1228	9,4401	214,5474

Tablo 9.2 Çentiksiz basma testi örnek numune test parametreleri (devamı)

1	86,0	2,1478	9,6063	218,3250
1	87,0	2,1728	9,7750	222,1583
1	88,0	2,1978	9,9422	225,9583
1	89,0	2,2228	10,1098	229,7677
1	90,0	2,2478	10,2753	233,5298
1	91,0	2,2728	10,4423	237,3255
1	92,0	2,2978	10,6096	241,1274
1	93,0	2,3228	10,7765	244,9204
1	94,0	2,3478	10,9429	248,7023
1	95,0	2,3728	11,1096	252,4913
1	96,0	2,3978	11,2767	256,2882
1	97,0	2,4228	11,4443	260,0988
1	98,0	2,4478	11,6126	263,9225
1	99,0	2,4728	11,7811	267,7516
1	100,0	2,4978	11,9499	271,5897
1	101,0	2,5227	12,1180	275,4091
1	101,1	2,5253	12,1361	275,8214

Tablo 9.2 Çentiksiz basma testi örnek numune test parametreleri (devamı)

1	101,2	2,5278	12,1525	276,1940
1	101,3	2,5303	12,1696	276,5826
1	101,4	2,5328	12,1840	276,9101
1	101,5	2,5353	12,2016	277,3083
1	101,6	2,5378	12,2172	277,6628
1	101,7	2,5403	12,2197	277,7198
1	102,0	2,5477	11,6084	263,8275
1	103,0	2,5727	11,4496	260,2191
1	104,0	2,5977	11,6255	264,2165
1	104,1	2,6003	11,6412	264,5735
1	104,2	2,6027	11,6528	264,8357
1	104,3	2,6053	11,6616	265,0359
1	104,365	2,6069	10,9855	249,6709
1	104,371	2,6071	9,4326	214,3779
1	104,374	2,6072	8,5123	193,4610
1	104,376	2,6072	7,8718	178,9053
1	104,379	2,6073	6,9144	157,1465

Tablo 9.3 Delikli çekme testi örnek numune test parametreleri

Test numunesi	Zaman (s)	Yer değiştirme (mm)	Kuvvet (N)	Çekme gerilimi (MPa)
1	0,0	0,00000	180,64873	2,03305
1	0,1	0,00123	197,70876	2,22505
1	0,2	0,00491	305,24664	3,43530
1	0,3	0,00833	416,63840	4,68892
1	0,4	0,01168	523,86108	5,89562
1	0,5	0,01503	629,73505	7,08714
1	0,6	0,01834	731,48645	8,23227
1	0,7	0,02167	829,98419	9,34078
1	0,8	0,02501	926,94977	10,43204
1	0,9	0,02835	1026,75342	11,55525
1	1,0	0,03170	1126,69897	12,68005
1	2,0	0,06500	2070,80347	23,30516
1	3,0	0,09832	2976,12329	33,49378
1	4,0	0,13170	3867,38550	43,52419

Tablo 9.3 Delikli çekme testi örnek numune test parametreleri (devamı)

1	5,0	0,16503	4744,72559	53,39792
1	6,0	0,19832	5605,88721	63,08957
1	7,0	0,23171	6460,64355	72,70914
1	8,0	0,26501	7300,47998	82,16080
1	9,0	0,29834	8133,17969	91,53214
1	10,0	0,33169	8960,94336	100,84792
1	11,0	0,36501	9779,75098	110,06292
1	12,0	0,39832	10594,25684	119,22950
1	13,0	0,43171	11404,35254	128,34645
1	14,0	0,46502	12207,25000	137,38239
1	15,0	0,49834	13002,96973	146,33755
1	16,0	0,53165	13792,81445	155,22659
1	17,0	0,56505	14584,63281	164,13785
1	18,0	0,59837	15370,41895	172,98122
1	19,0	0,63163	16152,03711	181,77766
1	20,0	0,66504	16932,78320	190,56432
1	21,0	0,69836	17705,12305	199,25635

Tablo 9.3 Delikli çekme testi örnek numune test parametreleri (devamı)

1	22,0	0,73165	18474,46875	207,91469
1	23,0	0,76504	19243,26367	216,56683
1	24,0	0,79836	20009,30469	225,18799
1	25,0	0,83166	20770,86133	233,75867
1	26,0	0,86505	21529,91797	242,30122
1	27,0	0,89835	22281,63086	250,76112
1	28,0	0,93167	23031,50977	259,20038
1	29,0	0,96501	23781,24414	267,63800
1	30,0	0,99837	24530,14844	276,06631
1	31,0	1,03166	25271,91602	284,41428
1	32,0	1,06500	26013,03516	292,75494
1	33,0	1,09838	26751,08789	301,06113
1	34,0	1,13170	27491,10938	309,38943
1	35,0	1,16496	28224,97266	317,64847
1	36,0	1,19837	28961,49219	325,93738
1	37,0	1,23170	29695,98828	334,20352
1	38,0	1,26499	30424,35742	342,40070

Tablo 9.3 Delikli çekme testi örnek numune test parametreleri (devamı)

1	39,0	1,29836	31158,48242	350,66266
1	40,0	1,33170	31888,19141	358,87494
1	41,0	1,36499	32613,33789	367,03586
1	42,0	1,39835	33340,33984	375,21765
1	43,0	1,43169	34063,01172	383,35071
1	44,0	1,46502	34784,17969	391,46686
1	45,0	1,49834	35502,62500	399,55237
1	46,0	1,53168	36217,92578	407,60248
1	47,0	1,56503	36934,53906	415,66736
1	48,0	1,59833	37646,48828	423,67975
1	49,0	1,63171	38362,51953	431,73807
1	50,0	1,66503	39072,43359	439,72757
1	51,0	1,69831	39778,24219	447,67084
1	52,0	1,73171	40491,89453	455,70242
1	53,0	1,76505	41201,14453	463,68442
1	54,0	1,79829	41905,09375	471,60678
1	55,0	1,83169	42612,39453	479,56686

Tablo 9.3 Delikli çekme testi örnek numune test parametreleri (devamı)

1	56,0	1,86506	43314,63672	487,47000
1	57,0	1,89833	44014,36328	495,34485
1	58,0	1,93167	44711,86328	503,19464
1	59,0	1,96503	45413,66016	511,09277
1	60,0	1,99836	46114,27344	518,97760
1	61,0	2,03166	46813,49219	526,84668
1	61,010	2,03199	45865,60547	516,17902
1	61,011	2,03202	45215,17188	508,85895
1	61,012	2,03205	44439,33984	500,12759
1	61,013	2,03209	43581,69922	490,47559
1	61,014	2,03212	42655,73828	480,05466
1	61,015	2,03216	41648,71484	468,72147
1	61,016	2,03219	40549,69531	456,35291
1	61,017	2,03223	39371,49609	443,09326
1	61,018	2,03227	38145,34375	429,29395
1	61,019	2,03232	36898,81250	415,26529
1	61,020	2,03237	35636,31641	401,05695

Tablo 9.3 Delikli çekme testi örnek numune test parametreleri (devamı)

1	61,021	2,03242	34345,16797	386,52615
1	61,022	2,03248	33016,80859	371,57657
1	61,023	2,03255	31659,80078	356,30457
1	61,024	2,03262	30296,68750	340,96387
1	61,025	2,03269	28946,41992	325,76776
1	61,026	2,03277	27612,97461	310,76093

Tablo 9.4 Delikli basma testi örnek numune test parametreleri

Test numunesi	Zaman (s)	Yer değiştirme (mm)	Kuvvet (kN)	Basma gerilimi (MPa)
1	0,0	0,0013	0,2016	1,5471
1	0,0	0,0015	0,2137	1,6406
1	0,0	0,0019	0,2351	1,8045
1	1,0	0,0325	1,4101	10,8228
1	1,0	0,0332	1,4324	10,9939
1	1,0	0,0338	1,4549	11,1671
1	1,0	0,0345	1,4778	11,3422
1	1,0	0,0352	1,5006	11,5177

Tablo 9.4 Delikli basma testi örnek numune test parametreleri (devamı)

1	2,0	0,0659	2,5296	19,4158
1	2,0	0,0665	2,5508	19,5785
1	2,0	0,0672	2,5700	19,7259
1	2,0	0,0678	2,5928	19,9006
1	2,0	0,0685	2,6140	20,0633
1	3,0	0,0992	3,6199	27,7835
1	3,0	0,0998	3,6425	27,9572
1	3,0	0,1005	3,6631	28,1157
1	3,0	0,1012	3,6843	28,2782
1	3,0	0,1018	3,7039	28,4289
1	4,0	0,1325	4,6911	36,0060
1	4,0	0,1331	4,7127	36,1716
1	4,0	0,1338	4,7342	36,3365
1	4,0	0,1345	4,7563	36,5060
1	4,0	0,1352	4,7776	36,6698
1	5,0	0,1665	5,7659	44,2550
1	5,0	0,1672	5,7852	44,4033

Tablo 9.4 Delikli basma testi örnek numune test parametreleri (devamı)

1	5,0	0,1678	5,8054	44,5582
1	5,0	0,1685	5,8262	44,7180
1	6,0	0,1992	6,7778	52,0220
1	6,0	0,1999	6,7990	52,1844
1	6,0	0,2005	6,8200	52,3456
1	6,0	0,2012	6,8399	52,4986
1	6,0	0,2018	6,8594	52,6484
1	7,0	0,2325	7,7992	59,8612
1	7,0	0,2331	7,8201	60,0215
1	7,0	0,2338	7,8409	60,1811
1	7,0	0,2345	7,8609	60,3351
1	7,0	0,2352	7,8820	60,4969
1	8,0	0,2658	8,8118	67,6333
1	8,0	0,2665	8,8304	67,7758
1	8,0	0,2671	8,8510	67,9339
1	8,0	0,2678	8,8718	68,0938
1	8,0	0,2685	8,8926	68,2535

Tablo 9.4 Delikli basma testi örnek numune test parametreleri (devamı)

1	9,0	0,2992	9,8152	75,3346
1	9,0	0,2999	9,8352	75,4879
1	9,0	0,3005	9,8538	75,6309
1	9,0	0,3011	9,8725	75,7744
1	9,0	0,3018	9,8925	75,9283
1	10,0	0,3325	10,8048	82,9298
1	10,0	0,3332	10,8259	83,0919
1	10,0	0,3339	10,8463	83,2490
1	10,0	0,3346	10,8661	83,4004
1	10,0	0,3352	10,8850	83,5455
1	11,0	0,3658	11,7845	90,4500
1	11,0	0,3665	11,8029	90,5911
1	11,0	0,3671	11,8225	90,7417
1	11,0	0,3678	11,8432	90,8999
1	11,0	0,3685	11,8635	91,0556
1	12,0	0,3992	12,7559	97,9051
1	12,0	0,3999	12,7753	98,0540

Tablo 9.4 Delikli basma testi örnek numune test parametreleri (devamı)

1	12,0	0,4005	12,7938	98,1964
1	12,0	0,4011	12,8120	98,3358
1	12,0	0,4018	12,8311	98,4828
1	13,0	0,4325	13,7192	105,2989
1	13,0	0,4332	13,7385	105,4469
1	13,0	0,4338	13,7581	105,5974
1	13,0	0,4345	13,7780	105,7500
1	13,0	0,4352	13,7967	105,8935
1	14,0	0,4658	14,6772	112,6518
1	14,0	0,4665	14,6963	112,7987
1	14,0	0,4672	14,7161	112,9503
1	14,0	0,4678	14,7357	113,1011
1	14,0	0,4685	14,7549	113,2481
1	15,0	0,4992	15,6309	119,9720
1	15,0	0,4998	15,6486	120,1080
1	15,0	0,5005	15,6656	120,2379
1	15,0	0,5011	15,6841	120,3800

Tablo 9.4 Delikli basma testi örnek numune test parametreleri (devamı)

1	15,0	0,5018	15,7043	120,5351
1	16,0	0,5325	16,5733	127,2050
1	16,0	0,5332	16,5937	127,3615
1	16,0	0,5339	16,6140	127,5178
1	16,0	0,5345	16,6323	127,6578
1	16,0	0,5352	16,6497	127,7917
1	17,0	0,5658	17,5102	134,3963
1	17,0	0,5664	17,5288	134,5389
1	17,0	0,5671	17,5482	134,6881
1	17,0	0,5678	17,5681	134,8406
1	17,0	0,5685	17,5879	134,9923
1	18,0	0,5992	18,4448	141,5692
1	18,0	0,5999	18,4621	141,7024
1	18,0	0,6005	18,4792	141,8331
1	18,0	0,6011	18,4965	141,9661
1	18,0	0,6018	18,5153	142,1106
1	19,0	0,6325	19,3665	148,6437

Tablo 9.4 Delikli basma testi örnek numune test parametreleri (devamı)

1	19,0	0,6332	19,3859	148,7928
1	19,0	0,6339	19,4053	148,9412
1	19,0	0,6345	19,4235	149,0810
1	19,0	0,6352	19,4407	149,2135
1	20,0	0,6658	20,2814	155,6659
1	20,0	0,6665	20,3005	155,8121
1	20,0	0,6672	20,3195	155,9586
1	20,0	0,6678	20,3379	156,0993
1	20,0	0,6685	20,3564	156,2416
1	21,0	0,6992	21,1933	162,6654
1	21,0	0,6998	21,2100	162,7933
1	21,0	0,7005	21,2278	162,9297
1	21,0	0,7011	21,2467	163,0752
1	21,0	0,7018	21,2664	163,2258
1	22,0	0,7325	22,1001	169,6248
1	22,0	0,7332	22,1182	169,7638
1	22,0	0,7339	22,1355	169,8970

Tablo 9.4 Delikli basma testi örnek numune test parametreleri (devamı)

1	22,0	0,7345	22,1521	170,0238
1	22,0	0,7351	22,1683	170,1482
1	23,0	0,7658	22,9834	176,4044
1	23,0	0,7665	23,0010	176,5399
1	23,0	0,7672	23,0184	176,6729
1	23,0	0,7679	23,0353	176,8028
1	23,0	0,7685	23,0517	176,9286
1	24,0	0,7992	23,8639	183,1627
1	24,0	0,7998	23,8809	183,2932
1	24,0	0,8005	23,8978	183,4227
1	24,0	0,8011	23,9162	183,5639
1	24,0	0,8018	23,9349	183,7074
1	25,0	0,8325	24,7495	189,9599
1	25,0	0,8332	24,7682	190,1032
1	25,0	0,8339	24,7858	190,2383
1	25,0	0,8345	24,8024	190,3660
1	25,0	0,8352	24,8195	190,4973

Tablo 9.4 Delikli basma testi örnek numune test parametreleri (devamı)

1	26,0	0,8658	25,6314	196,7290
1	26,0	0,8665	25,6489	196,8634
1	26,0	0,8672	25,6664	196,9977
1	26,0	0,8678	25,6845	197,1362
1	26,0	0,8685	25,7025	197,2748
1	27,0	0,8992	26,5092	203,4664
1	27,0	0,8998	26,5265	203,5990
1	27,0	0,9005	26,5443	203,7352
1	27,0	0,9012	26,5628	203,8773
1	27,0	0,9018	26,5807	204,0148
1	28,0	0,9325	27,3800	210,1499
1	28,0	0,9332	27,3970	210,2806
1	28,0	0,9338	27,4133	210,4052
1	28,0	0,9345	27,4304	210,5365
1	28,0	0,9352	27,4481	210,6725
1	29,0	0,9658	28,2423	216,7685
1	29,0	0,9665	28,2606	216,9088

Tablo 9.4 Delikli basma testi örnek numune test parametreleri (devamı)

1	29,0	0,9672	28,2787	217,0477
1	29,0	0,9679	28,2963	217,1824
1	29,0	0,9685	28,3124	217,3063
1	30,0	0,9992	29,0966	223,3249
1	30,0	0,9998	29,1122	223,4452
1	30,0	1,0005	29,1288	223,5724
1	30,0	1,0011	29,1465	223,7082
1	30,0	1,0018	29,1647	223,8477
1	31,0	1,0325	29,9477	229,8578
1	31,0	1,0332	29,9645	229,9868
1	31,0	1,0338	29,9807	230,1108
1	31,0	1,0345	29,9973	230,2381
1	31,0	1,0351	30,0139	230,3656
1	32,0	1,0658	30,7955	236,3651
1	32,0	1,0665	30,8133	236,5014
1	32,0	1,0672	30,8311	236,6378
1	32,0	1,0679	30,8483	236,7697

Tablo 9.4 Delikli basma testi örnek numune test parametreleri (devamı)

1	32,0	1,0685	30,8645	236,8943
1	33,0	1,0991	31,6360	242,8160
1	33,0	1,0998	31,6541	242,9545
1	33,0	1,1005	31,6720	243,0925
1	33,0	1,1012	31,6896	243,2274
1	33,0	1,1019	31,7060	243,3533
1	34,0	1,1325	32,4780	249,2787
1	34,0	1,1331	32,4929	249,3931
1	34,0	1,1338	32,5088	249,5148
1	34,0	1,1345	32,5265	249,6504
1	34,0	1,1352	32,5447	249,7901
1	35,0	1,1659	33,3114	255,6752
1	35,0	1,1665	33,3285	255,8065
1	35,0	1,1672	33,3446	255,9303
1	35,0	1,1678	33,3596	256,0450
1	35,0	1,1685	33,3747	256,1607
1	36,0	1,1991	34,1304	261,9612

Tablo 9.4 Delikli basma testi örnek numune test parametreleri (devamı)

1	36,0	1,1998	34,1478	262,0947
1	36,0	1,2005	34,1659	262,2335
1	36,0	1,2012	34,1834	262,3683
1	36,0	1,2019	34,2004	262,4986
1	37,0	1,2325	34,9571	268,3066
1	37,0	1,2332	34,9723	268,4230
1	37,0	1,2338	34,9884	268,5467
1	37,0	1,2345	35,0050	268,6738
1	37,0	1,2352	35,0221	268,8051
1	38,0	1,2665	35,7900	274,6992
1	38,0	1,2672	35,8057	274,8199
1	38,0	1,2678	35,8211	274,9376
1	38,0	1,2685	35,8368	275,0581
1	39,0	1,2991	36,5012	280,1577
1	39,0	1,2998	36,5175	280,2831
1	39,0	1,3005	36,5339	280,4084
1	39,0	1,3012	36,5500	280,5322

Tablo 9.4 Delikli basma testi örnek numune test parametreleri (devamı)

1	39,0	1,3018	36,5663	280,6574
1	40,0	1,3325	37,2740	286,0896
1	40,0	1,3331	37,2887	286,2018
1	40,0	1,3338	37,3050	286,3271
1	40,0	1,3345	37,3219	286,4573
1	40,0	1,3352	37,3391	286,5888
1	41,0	1,3659	38,0372	291,9474
1	41,0	1,3665	38,0531	292,0688
1	41,0	1,3672	38,0679	292,1829
1	41,0	1,3678	38,0826	292,2957
1	41,0	1,3685	38,0983	292,4160
1	41,1	1,3691	38,1148	292,5431
1	41,1	1,3698	38,1317	292,6722
1	41,1	1,3705	38,1464	292,7855
1	41,1	1,3712	38,1591	292,8826
1	41,1	1,3718	38,1710	292,9741
1	41,2	1,3724	38,1843	293,0763

Tablo 9.4 Delikli basma testi örnek numune test parametreleri (devamı)

1	41,2	1,3731	38,1988	293,1875
1	41,2	1,3738	38,2137	293,3019
1	41,2	1,3745	38,2270	293,4040
1	41,2	1,3752	38,2397	293,5013
1	41,3	1,3758	38,2532	293,6052
1	41,3	1,3765	38,2680	293,7186
1	41,3	1,3772	38,2823	293,8282
1	41,3	1,3778	38,2966	293,9380
1	41,3	1,3785	38,3119	294,0557
1	41,4	1,3792	36,5683	280,6727
1	41,4	1,3801	22,2109	170,4752

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirileri

1. M. Olgun and H. Mercan, "Minimizing manufacturing-induced deviations in composite parts produced by AFP (automatic fiber placement) method," 7th Int. Conf. Advances in Mechanical Engineering (ICAME), Istanbul, Türkiye, Dec. 24-26, 2024.

