



**KARBON ELYAF TAKVİYELİ KOMPOZİT
BORULARDA DELİK DELME İŞLEMİNİN
MEKANİK VE YORULMA DAVRANIŞLARI
ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**

DOKTORA TEZİ

Sezer MORKAVUK

Danışman

Prof. Dr. Kubilay ASLANTAŞ

İkinci Danışman

Prof. Dr. Uğur KÖKLÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ A.B.D.

Ocak 2023

Bu tez çalışması 20.FEN.BİL.21 numaralı proje ile Afyon Kocatepe Üniversitesi,
Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Koordinasyon Birimi tarafından desteklenmiştir.

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DOKTORA TEZİ

**KARBON ELYAF TAKVİYELİ KOMPOZİT BORULARDA DELİK
DELME İŞLEMİNİN MEKANİK VE YORULMA DAVRANIŞLARI
ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**

Sezer MORKAVUK

Danışman

Prof. Dr. Kubilay ASLANTAŞ

İkinci Danışman

Prof. Dr. Uğur KÖKLÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ A.B.D.

Ocak 2023

TEZ ONAY SAYFASI

Sezer MORKAVUK tarafından hazırlanan “Karbon Elyaf Takviyeli Kompozit Borularda Delik Delme İşleminin Mekanik ve Yorulma Davranışları Üzerindeki Etkisinin Araştırılması” adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca 23/01/2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından **oy birliği** ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. Kubilay ASLANTAŞ

İkinci Danışman : Prof. Dr. Uğur KÖKLÜ

Başkan : Prof. Dr. Mustafa AYDIN
Manisa Celâl Bayar Üniversitesi,
Hasan Ferdi Turgutlu Teknoloji Fakültesi

Üye : Prof. Dr. Bekir YALÇIN
Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi

Üye : Prof. Dr. Kubilay ASLANTAŞ
Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi

Üye : Prof. Dr. Adem ÇİÇEK
Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi,
Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi

Üye : Doç. Dr. Lokman GEMİ
Necmettin Erbakan Üniversitesi,
Meram Meslek Yüksekokulu

Afyon Kocatepe Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun
..... /..... /..... tarih ve
..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

.....
Prof. Dr. İbrahim EROL
Enstitü Müdürü

BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI

Afyon Kocatepe Üniversitesi

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

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

beyan ederim.

23 / 01 / 2023

Sezer MORKAVUK

ÖZET

Doktora Tezi

KARBON ELYAF TAKVİYELİ KOMPOZİT BORULARDA DELİK DELME İŞLEMİNİN MEKANİK VE YORULMA DAVRANIŞLARI ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

Sezer MORKAVUK

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Kubilay ASLANTAŞ

İkinci Danışman: Prof. Dr. Uğur KÖKLÜ

Elyaf takviyeli polimer kompozitler yüksek dayanım ve sönümleme kabiliyeti, hafiflik ve yüksek korozyon direnci gibi mükemmel özellikleriyle havacılık, otomotiv, denizcilik ve taşımacılık gibi pek çok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Kompozitler kullanım amacına bağlı olarak çeşitli yöntemler ile farklı geometrilerde üretilmektedir. Özellikle çift eksenli elyaf oryantasyonuna sahip kompozit boruların üretiminde filaman sarım ve rulo (prepreg) sarım yöntemleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Farklı yöntemler ile üretilmiş kompozitlerin mekanik davranışları farklı olabileceği gibi işlenebilirlik karakteristiği de farklı olacaktır. Kompozitler çoğu zaman net şekle yakın geometride üretilseler de montaj işlemleri için kompozit üzerinde delik açma amacıyla konvansiyonel delik delme prosesi yaygın olarak kullanılmaktadır. Öte yandan kompozit boruların mekanik özelliklerinin belirlenmesinde yaygın olarak kullanılan halka çekme (disk ayırma) metodu için numune hazırlanırken, zayıflatılmış kesit oluşturmak amacıyla kompozit boru üzerine delik açılmaktadır. Anizotropik bir yapıya sahip olan kompozitler delindiklerinde ilk ve son tabakada delme kaynaklı delaminasyon oluşmakta ve ayrıca delik içi yüzeylerinde de mikro hasarlar meydana gelmektedir. İşlenebilirlik kaynaklı bu hasarlar sebebiyle özellikle havacılık endüstrisinde birçok parça reddedilmektedir. Bu çalışmada öncelikle $+45^{\circ}/-45^{\circ}$ elyaf oryantasyonuna sahip rulo (prepreg) sarım yöntemiyle üretilmiş kompozit boru iç yüzeyinden (içbükey kavisli yüzey) ve dış

yüzeyinden (dışbükey kavisli yüzey) delinerek farklı yüzey eğriliklerinin kompozitlerde delik delme prosesine etkileri incelenmiş ve düz yüzey (plaka) ile kıyaslanmıştır. Ardından $+45^{\circ}/-45^{\circ}$ elyaf oryantasyonunda filaman sarım ve rulo sarım yöntemleri ile üretilmiş karbon elyaf takviyeli kompozit borularda delik delme karakteristiği incelenmiş ve aynı elyaf oryantasyonuna sahip kompozit plaka ile kıyaslanmıştır. Delme karakteristiği, farklı kesme parametreleri ile destek kullanılarak ve kullanılmadan araştırılmıştır. İşlenebilirlik, itme kuvvetleri, delik delme kaynaklı delaminasyon, delik içi yüzey hasarları ve delik içi yüzey kalitesi dikkate alınarak değerlendirilmiştir. İşlenebilirlik testlerinden sonra, test edilen parametreler aralığında en fazla itme kuvveti ve hasarın olduğu durum, en az itme kuvveti ve hasarın olduğu durum ve destek kullanımı dikkate alınarak üç farklı koşulda delinmiş filaman ve rulo sarım kompozit boruların mekanik davranışı incelenmiştir. Çevresel (halka) çekme, çevresel çekme-çekme yorulma ve radyal basma testleri ile farklı koşullarda delinmiş kompozit boruların mekanik davranışları ve hasar gelişimleri analiz edilerek yorumlanmıştır. Test sonuçları kompozit borunun iç yüzeyinden delindiğinde, dış yüzeyden delmeye kıyasla daha az kuvvet ve hasar oluştuğunu ayrıca kompozit plakada aynı kesme koşullarında kompozit borulara kıyasla daha fazla kuvvet ve hasar oluştuğunu göstermiştir. Destek kullanımıyla kompozit plakada ve filaman sarım boruda delme kaynaklı delik çıkış delaminasyon hasarı önemli oranda azalmıştır. Filaman sarım kompozit borunun çevresel çekme yükü altındaki davranışı rulo sarım kompozit borudan daha iyi iken, rulo sarım kompozit boru çevresel çekme-çekme dinamik yükü ve radyal basma yükü altında filaman sarımdan daha iyi bir performans sergilemiştir. Filaman sarım kompozit boruda farklı delme koşullarının mekanik davranışları etkilediği gözlemlenirken, rulo sarım kompozit boruda üretim kaynaklı kusurların daha baskın olması nedeniyle, delme koşullarının mekanik davranış üzerinde kayda değer bir etkiye sahip olmadığı tespit edilmiştir.

2023, xvii + 189 sayfa

Anahtar Kelimeler: Delik delme, Filaman sarım, Halka çekme, Prepreg sarım, Rulo sarım, Yorulma.

ABSTRACT

Ph.D. Thesis

INVESTIGATION ON THE EFFECT OF DRILLING PROCESS ON MECHANICAL AND FATIGUE BEHAVIOUR IN CARBON FIBER REINFORCED COMPOSITE PIPES

Sezer MORKAVUK

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Prof. Kubilay ASLANTAŞ

Co-Supervisor: Prof. Uğur KÖKLÜ

Fiber reinforced polymer composites are widely used in many fields such as aviation, automotive, maritime and transportation thanks to their excellent properties such as high strength and damping ability, lightness and high corrosion resistance. Composites can be produced in different geometries with various methods depending on the purpose of use. Especially in the production of composite pipes with biaxial fiber orientation, filament winding and roll (prepreg) wrapping methods are widely used. In addition to the mechanical behavior, machinability characteristics of composites produced by different methods will also be different. Although composites are often produced with a geometry close to a net shape, the conventional drilling process is widely used for making holes on the composite for assembly operations. On the other hand, while a sample is being prepared for the ring tensile (split-disk) test method, which is widely used in determining the mechanical properties of composite pipes, holes are drilled on the composite pipe in order to create a reduced section. When the composites, which have an anisotropic structure, are drilled, drilling-induced delamination occurs in the first and last layer, and micro-damages also occur on the borehole surfaces. Due to these machinability-related damages, many parts are rejected, especially in the aerospace industry. In this study, firstly, the drilling process in composites with different surface curvatures by drilling from the inner surface (concave curved surface) and outer surface (convex curved

surface) of the composite pipe produced by the roll (prepreg) wrapping method with fiber orientation of $+45^{\circ}/-45^{\circ}$ was examined and compared with flat surfaced (plate) composite. Then, the drilling characteristics of carbon fiber reinforced composite pipes with $+45^{\circ}/-45^{\circ}$ fiber orientation produced by filament winding and roll wrapping methods were examined and compared with the composite plate is of the same fiber orientation. Drilling machinability characteristics were investigated with different cutting parameters and with or without using support. The machinability was evaluated by considering thrust forces, drilling-induced delamination, borehole surface damages and quality. After the machinability tests, the mechanical behavior of filament wound and roll wrapped composite pipes drilled in three different conditions, taking into account the maximum thrust force and damage, the least thrust force and damage, and the use of support in the range of the tested parameters were investigated. The mechanical behavior and damage development of the composite pipes drilled in different conditions were analyzed by hoop (ring) tensile, hoop tensile-tensile fatigue and radial compression tests. The test results showed that when drilled from the inner surface of the composite pipe, less force and damage occurred compared to drilling from the outer surface, and larger force and damage occurred in the composite plate compared to the composite pipes under the same cutting conditions. With the use of support, the hole exit delamination damage caused by drilling in the composite plate and filament wound pipe was significantly reduced. While the behavior of the filament wound composite pipe under hoop tensile load was better than the roll wrapped composite pipe, the roll wrapped composite pipe performed better than filament wound pipe under hoop tensile-tensile dynamic load and radial compression load. In filament wound composite pipe, it is observed that different drilling conditions affect the mechanical behaviors, whereas in roll wrapped composite pipe, it is determined that drilling conditions do not have a significant effect on the mechanical behavior due to the fact that manufacturing defects are more dominant.

2023, xvii + 189 pages

Keywords: Drilling, Filament winding, Ring tensile test, Prepreg wrapping, Roll wrapping, Fatigue.

TEŞEKKÜR

Çalışmalarımın gerçekleştirilmesi ve yönlendirilmesi konusunda önemli katkılarından dolayı kıymetli danışmanlarım Prof. Dr. Kubilay ASLANTAŞ'a ve Prof. Dr. Uğur KÖKLÜ'ye, Tez İzleme Komitesi üyelerim Prof. Dr. Mustafa AYDIN'a ve özellikle mekanik testlerden elde edilen sonuçların değerlendirilmesi konusunda yardımlarını esirgemeyen Doç. Dr. Lokman GEMİ'ye, sonuçların yorumlanması konusunda desteğini esirgemeyen Doç. Dr. Şakir YAZMAN'a ve tezimi 20.FEN.BİL.21 proje numarası ile finansal olarak destekleyen Afyon Kocatepe Üniversitesi, BAP Koordinasyon Birimine teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım boyunca beni hep destekleyen anneme ve eşime teşekkür eder, vefatından önce maddi ve manevi desteğini hiç esirgemeyen babamı rahmet ve minnetle anarım.

Sezer MORKAVUK
Afyonkarahisar 2023

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	vi
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xvii
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR BİLGİLERİ	8
2.1 Polimer Kompozitler.....	8
2.2 Polimer Kompozit Borular ve Üretim Yöntemleri	9
2.2.1. Filaman Sarım Yöntemi	9
2.2.2. Rulo Sarım (Prepreg Sarım) Yöntemi.....	12
2.2.3. Pultrüzyon (Profil Çekme) Yöntemi	13
2.2.4. Pull-Braiding (Çekme-Sarma) Yöntemi	14
2.2.5. Santrifüj (Savurma) Döküm Yöntemi.....	14
2.3 Polimer Kompozitlerde Konvansiyonel Delik Delme Prosesi	15
2.4 Literatür Taraması.....	21
2.4.1 Elyaf Takviyeli Kompozit Plakalarda Delik Delme Prosesi Üzerine Yapılan Çalışmalar	21
2.4.1.1 Kesme Hızı ve İlerleme Hızının Etkisi.....	23
2.4.1.2 Kesme Koşullarının Etkisi.....	25
2.4.1.3 Takım Geometrisi ve Malzemesinin Etkisi	30
2.4.1.4 Kompozit Malzemenin Etkisi.....	35
2.4.2 Elyaf Takviyeli Kompozit Borularda Delik Delme Prosesi Üzerine Yapılan Çalışmalar	40
2.4.3 Kompozit Plakalarda Delik Delme İşleminin Mekanik Özelliklere Etkisi Üzerine Yapılan Çalışmalar.....	44
2.4.3.1 Malzeme Dayanımı Üzerine Çalışmalar	45
2.4.3.2 Yatak Dayanımı Üzerine Çalışmalar.....	52
2.4.4 Kompozit Boruların Mekanik Karakterizasyonu Üzerine Yapılan Çalışmalar	57
3. MATERYAL ve METOT	64

3.1 Kompozit Boruların Üretimi.....	64
3.2 Delik Delme Testleri.....	66
3.2.1 Deney Düzenneği ve Parametreler.....	66
3.2.2 Ölçüm ve Görüntüleme Yöntemleri.....	70
3.2.2.1 İtme Kuvveti Ölçümü.....	70
3.2.2.2 Delaminasyon Ölçümü.....	71
3.2.2.3 Delik İçi Yüzey Kalitesinin İncelenmesi.....	72
3.3 Delik Delme İşleminin Mekanik Özellikler Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi ..	73
3.3.1 Çekme Testi	74
3.3.2 Yorulma Testi.....	79
3.3.2 Basma Testi.....	81
4. BULGULAR ve TARTIŞMA	83
4.1 Farklı Yüzey Eğriliğine Sahip Kompozitlerde Delik Delme Prosesi	83
4.1.1 İtme Kuvveti Analizi.....	83
4.1.2 Delaminasyon Analizi.....	86
4.1.3 SEM Analizi.....	88
4.2 Kompozit Borularda Delik Delme Prosesinin Analizi ve Plaka ile Karşılaştırılması	92
4.2.1 İtme Kuvveti ve Tork Analizi	92
4.2.2 Delaminasyon Analizi.....	97
4.2.3 Yüzey Kalitesi ve SEM Analizi	103
4.3 Kompozit Borularda Delik Delme İşleminin Malzeme Mekanik ve Yorulma Davranışlarına Etkisinin Analizi	109
4.3.1 Çekme Dayanımı Analizi.....	109
4.3.2 Yorulma Dayanımı Analizi	119
4.3.3 Radyal Basma Dayanımı Analizi	154
5. SONUÇ ve ÖNERİLER	162
6. KAYNAKLAR.....	166
ÖZGEÇMİŞ.....	184
EKLER	189

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

$\emptyset$	Çap
v	Kesme hızı
f	İlerleme hızı
n	İş mili hızı
A	Titreşim genliği
β	Eğim açısı
p	Helisel adım
μm	Mikrometre
mg	Miligram
Hz	Hertz
V_r	Elyaf hacim oranı
M_i	İlk kütle
M_f	Son kütle
ρ_c	Kompozit yoğunluğu
ρ_f	Elyaf yoğunluğu
F_x	X yönündeki kesme kuvveti
F_y	Y yönündeki kesme kuvveti
F_z	Z yönündeki kesme kuvveti
D_{max}	Maksimum hasarlı bölge çapı
D_{nom}	Nominal çap
F_d	Delaminasyon faktörü
w	Genişlik
D	Çap
R	Gerilme oranı
F_a	Kuvvet genliği
F_m	Ortalama kuvvet
F_{maks}	Maksimum kuvvet
F_{min}	Minimum kuvvet
ε	Emissivite (yayma) katsayısı
σ_{maks}	Maksimum gerilme
σ_{min}	Minimum gerilme
$\sigma_{\text{çekme}}$	Çekme dayanımı
A	Kesit alanı
f	Frekans
l	Numune boyu
R_a	Aritmetik ortalama pürüzlülük
R_q	Kuadratik ortalama pürüzlülük
T_g	Camsı geçiş sıcaklığı
E'	Depolama modülü

Kısaltmalar

ANN	Artificial Neural Network (Yapay Sinir Ağları)
ANOVA	Analysis of Variance (Varyans Analizi)
ASTM	American Society for Testing and Materials (Amerikan Test ve Materyal Topluluğu)
CFRP	Carbon Fiber Reinforced Plastic (Karbon Elyaf Takviyeli Plastik)
CFRTP	Carbon Fiber Reinforced Thermoplastic (Karbon Elyaf Takviyeli Termoplastik)
CNC	Computer Numerical Control (Bilgisayarlı Nümerik Kontrol)
DLC	Diamond Like Carbon (Elmas Benzeri Karbon)
DMA	Dynamic Mechanical Analysis (Dinamik Mekanik Analiz)
ECTFE	Etilenklorotrifloroetilen
FEP	Florlanmış etilen propilen
FGC	Functionally Graded Composite (Fonksiyonel Derecelendirilmiş Kompozit)
FRP	Fiber Reinforced Plastic (Elyaf Takviyeli Plastik)
GA	Genetic Algorithm (Genetik Algoritma)
GFRP	Glass Fiber Reinforced Plastic (Cam Elyaf Takviyeli Plastik)
HDPE	High Density Poly Ethylene (Yüksek yoğunluklu polietilen)
HFRP	Hybrid Fiber Reinforced Plastic (Hibrit Elyaf Takviyeli Plastik)
HSS	High Speed Steel (Yüksek Hız Çeliği)
PCD	Poly Crystal Diamond (Çoklu Kristalli Elmas)
PEEK	Polietereterketon
PP	Polipropilen
PTFE	Politetrafloroetilen
PVC	Polivinil Klorür
PVD	Physical Vapor Deposition (Fiziksel Buhar Biriktirme)
PVDF	Polivinilidin Florür
SEM	Scanning Electron Microscope (Taramalı Elektron Mikroskobu)
SiAlON	Silisyum Alüminyum Oksi-Nitrür
TGA	Termogravimetrik Analiz
TiAlN	Titanyum Alüminyum Nitrür
TiN	Titanyum Nitrür
TPE	Termoplastik Elastomer
VARTM	Vacuum Assisted Resin Transfer Molding (Vakum Destekli Reçine Transfer Kalıplama)
WC	Tungsten Karbür

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 1.1 Polimer kompozitlerin havacılık sektöründeki kullanımı (Hafif yolcu uçağı Premier I'nin karbon elyaf kompozit gövdesi) (Kolesnikov ve Herbeck 2004)..	1
Şekil 1.2 Polimer kompozitlerin otomotiv endüstrisinde kullanımı (Friedrich 2016, Supian vd. 2018).....	2
Şekil 1.3 Kompozitlerin basınçlı tank üretiminde kullanımı (Filaman sarım ve elle yatırma yöntemleri ile üretilmiş GFRP tank) (Hoa 2009, Rajak vd. 2019).	2
Şekil 1.4 Elyaf takviyeli kompozit boruların endüstride kullanımı (GFRP kompozit boru) (Benyahia vd. 2018).....	3
Şekil 1.5 Kompozitlerin makine imalatı sektöründeki kullanımı (CFRP kompozit şaft)(Lee ve Suh 2006).	3
Şekil 1.6 Havacılık sektöründe el aletleri kullanılarak yapılan delik delme işlemi ve el aletleriyle delinmiş bir parça (Hasan 2020).....	4
Şekil 1.7 Halka çekme testi numunesinin hazırlanması, (a) delik delme prosesi, (b) frezeleme prosesi (ASTM 2016, Benyahia vd. 2018).	5
Şekil 1.8 Farklı yüzey eğriliklerine sahip kompozitlerin delinmesi sırasında oluşan delaminasyon hasarı, (a) düz yüzey, (b) iç bükey yüzey, (c) dış bükey yüzey (Hocheng vd. 2014).	6
Şekil 2.1 Kompozit içerisinde farklı takviye fazı formları ve elyaf dizilimleri, (a) tek yönlü, (b) rastgele, (c) iki yönlü ve (d) çok yönlü (Chawla 1993, Alhashmy 2012).....	8
Şekil 2.2 Süreksiz/çift taraflı filaman sarım prosesi, (a) sarım aşaması, (b) kütleme aşaması, (c) mandrel çıkarılması aşaması (Rafiee 2016, Rajak vd. 2021)...	10
Şekil 2.3 Sürekli filaman sarım prosesi (Rafiee 2016, Aydın 2019).....	11
Şekil 2.4 Rulo (prepreg) sarım yöntemi, (a) makine ile sarım (İnt. Kyn. 1), (b) elle sarım (Gök 2022).	12
Şekil 2.5 Pultrüzyon (profil çekme) yöntemi, (a) prosesin şematik gösterimi (Riedel 2012), (b) pultrüzyon ile üretilmiş kompozitler (İnt. Kyn. 2).	13
Şekil 2.6 Pull-braiding (çekme-sarım) yöntemi, (a) yöntemin uygulaması, pull-braiding yöntemi ile üretilmiş parçalar (b) boru, (c) çubuk (Ahmadi vd. 2009, Milwich 2016).....	14
Şekil 2.7 Santrifüj (savurma) döküm metodu, (a) şematik gösterim (Rafiee 2016), (b) santrifüj döküm yöntemiyle üretilmiş kompozit boru (Subaşı vd. 2014).....	15
Şekil 2.8 Kompozitlerde delik delme prosesleri (Abdullah vd. 2019).....	16
Şekil 2.9 Standart matkap geometrisi (Krishnaraj vd. 2013).	17
Şekil 2.10 Kompozitlerin delinmesinde oluşan temel hasar tipleri (Gao vd. 2022).	18
Şekil 2.11 Kompozitlerin delinmesi sırasında oluşan delaminasyon mekanizması, (a) delik girişi, (b) delik çıkışı (Geng vd. 2019).	19

Şekil 2.12 Elyaf oryantasyonuna ve yerleşimine bağlı olarak delik içinde oluşan farklı hasar bölgeleri, (a) teğet kazıma bölgesi (tangent scraping zone), (b) yolma bölgesi (plucking zone), (c) elyafa dik kesme bölgesi (cutting zone of perpendicular to fiber) ve (d) kademeli teğet kazıma bölgesi (stepped tangent scraping zone) (Gemi vd. 2020b).	20
Şekil 2.13 İtme kuvvetini etkileyen parametreler (Lih ve Azmi 2021).....	20
Şekil 2.14 Cam elyaf takviyeli plastiklerin delinmesinde delik girişinde oluşan hasarın kesme parametrelerine bağlı değişimi, (a) iş mili hızının artmasıyla hasarın azalması (Campos Rubio vd. 2008), (b) kesme hızının hasar üzerinde etkisiz olması (Khashaba vd. 2010), (c) kesme hızının artmasıyla hasarın da artması (Sorrentino vd. 2018).	25
Şekil 2.15 Pilot delik stratejisi (Wang vd. 2017).	27
Şekil 2.16 Eğimli helisel frezeleme stratejisi (Pereszlai vd. 2021).	28
Şekil 2.17 Kriyojenik koşulda delik delme, (a) kriyojenige daldırarak işleme yöntemi (Basmacı vd. 2017), (b) kriyojenik püskürterek işleme yöntemi (Khanna vd. 2020).	29
Şekil 2.18 Ultrasonik titreşim destekli delme prosesi ve proses kinematiği (Zheng vd. 2019).	30
Şekil 2.19 Helisel matkap uç açısının delaminasyon üzerindeki etkisi (Palanikumar vd. 2008).	31
Şekil 2.20 Karbon elyaf takviyeli plastiklerin delinmesi için kullanılan bazı matkap tipleri, (a) konvansiyonel helisel matkap (twist drill), (b) çift uç açılı helisel matkap (double point angle twist drill), (c) sivri uçlu matkap (brad and spur (candlestick) drill), (d) açılı rayba matkabı (dagger (one-shot) drill), (e) kademeli matkap (step drill), (f) karot matkap (core drill), (g) özel karot matkap (special core drill) (Geier vd. 2019).	31
Şekil 2.21 Farklı matkap geometrilerinin itme kuvveti ve delaminasyon üzerindeki etkisi (Durão vd. 2010).	33
Şekil 2.22 Takım kaplama durumuna göre delik sayısına bağlı olarak itme kuvvetindeki değişim (Wang vd. 2013).	34
Şekil 2.23 Elyaf takviyeli kompozit boruların delinmesi, (a) desteksiz delme, (b) buz destek ile delme (Sahami poor dehghan ve Heidary 2020), (c) manyetik koloit destek ile delme (Hocheng vd. 2014).	42
Şekil 2.24 Cam elyaf takviyeli kompozit boruların farklı geometrili takımlar ile delinmesinde delik çıkışında oluşan hasarlar (Gemi vd. 2019).	43
Şekil 2.25 Delinmiş kompozit plaka çekme testi, (a) test numunesi, (b) test aşaması (Singh ve Bhatnagar 2006).	46
Şekil 2.26 Delaminasyonun çekme yükü üzerindeki etkisi, (a) iş mili hızı: 1000 dev/dk, (b) iş mili hızı: 3000 dev/dk (Yenigun ve Kilickap 2018).	46
Şekil 2.27 Farklı delme koşulları için kalıcı basma dayanımı grafikleri, (a) dayanım-deplasman, (b) dayanım-delaminasyon faktörü (Zarif Karimi vd. 2017).	48

Şekil 2.28 Farklı delme koşullarına bağlı gerilme-gerinim grafikleri, (a) çekme, (b) dört nokta eğilme (Meinhard vd. 2021).	49
Şekil 2.29 Normalize edilmiş çevrim sayısına bağlı olarak hasar gelişimi (Saleem vd. 2013).	50
Şekil 2.30 Çevrim sayısına bağlı olarak normalize edilmiş sekant modülünün değişimi (Hamdoun vd. 2006).	51
Şekil 2.31 Delaminasyon faktörüne bağlı olarak çevrim sayısı (Shahkhosravi vd. 2019).	52
Şekil 2.32 Yatak dayanımı test düzeneği ve numunesi (Haeger vd. 2016).	53
Şekil 2.33 Yatak dayanımı ve delik delme kaynaklı hasar arasındaki ilişki (Miguel Silva vd. 2017).	54
Şekil 2.34 Kompozit borularda eksenel yorulma testi, (a) test düzeneği, (b) farklı frekanslarda elde edilmiş S-N eğrileri (Kaynak ve Mat 2001).	57
Şekil 2.35 Kompozit halka yorulma testi, (a) deney sonuçları, (b) modeller ile tahmin edilen yorulma ömrünün deneysel sonuçlarla karşılaştırılması (Shabani vd. 2019).	59
Şekil 2.36 Radyal basma testi sırasında C/C kompozit borunun ilk hasarı (Gao vd. 2019).	60
Şekil 2.37 Farklı hasar aşamalarına bağlı S-N eğrisi (Gemi vd. 2009).	61
Şekil 3.1 Çalışmada kullanılan kompozitlerin üretim prosesinin şematik gösterimi, (a) filaman sarım yöntemi, (b) rulo (prepreg) sarım yöntemi, üretilmiş kompozitler (c) filaman sarım CFRP boru, (d) rulo sarım CFRP boru ve (e) CFRP plaka (Morkavuk vd. 2022a).	65
Şekil 3.2 Elyaf hacim oranının belirlenmesi.	66
Şekil 3.3 Delik delme testleri için deney düzeneği, (a) CFRP borunun desteksiz delinmesi, (b) CFRP borunun destek kullanılarak delinmesi, (c) CFRP plakanın desteksiz delinmesi, (d) CFRP plakanın destek kullanılarak delinmesi (Morkavuk vd. 2022a).	67
Şekil 3.4 Çalışmada kullanılan matkap (İnt. Kyn. 3).	68
Şekil 3.5 Farklı yüzey eğriliğine sahip CFRP kompozitlerde delme işlemi, (a) düz yüzey, (b) dış bükey yüzey, (c) iç bükey yüzey (Morkavuk vd. 2022b).	69
Şekil 3.6 İtme kuvvetinin ölçümü.	71
Şekil 3.7 Delaminasyon hasarının ölçümü (Morkavuk vd. 2022a).	72
Şekil 3.8 Delik içi yüzey kalitesinin incelenmesi, (a) yüzey pürüzlülüğü ve topografya, (b) SEM analizi.	73
Şekil 3.9 Halka çekme testi aparatı ve test numunesi.	75
Şekil 3.10 Halka çekme testi için numune hazırlama aşaması, (a) delik delme işlemi şematik görünümü, (b) frezeleme işlemi şematik görünümü, (c) desteksiz delik delme işlemi, (d) destekli delik delme işlemi, (e) abrazif kesme işlemi, (f) zımparalama işlemi.	77

Şekil 3.11 Halka çekme ve yorulma testi numuneleri.....	78
Şekil 3.12 Halka çekme testi.	78
Şekil 3.13 Yorulma testi deney düzeneği, (a) test cihazı, (b) kontrol yazılımı.	81
Şekil 3.14 Radyal basma testi ve test numunesi.....	82
Şekil 4.1 Farklı yüzey geometrisine sahip CFRP kompozitin delinmesi sırasında oluşan itme kuvvetinin zamana bağlı değişimi, (a) düz yüzey, (b) dış bükey yüzey, (c) iç bükey yüzey (1000 dev/dk, 400 mm/dk) (Morkavuk vd. 2022b).....	84
Şekil 4.2 Farklı yüzey geometrisine sahip CFRP kompozitin delinmesi sırasında oluşan maksimum itme kuvvetlerinin kesme parametrelerine bağlı değişimi, (a) sabit 1000 dev/dk iş mili hızı, (b) sabit 8000 dev/dk iş mili hızı, (c) sabit 800 mm/dk ilerleme hızı (Morkavuk vd. 2022b).....	85
Şekil 4.3 Farklı yüzey geometrisine sahip CFRP kompozitin delinmesi sırasında iş parçası-takım temasının şematik görünümü, (a) düz yüzey, (b) dış bükey yüzey, (c) iç bükey yüzey (Morkavuk vd. 2022b).....	86
Şekil 4.4 Farklı yüzey geometrisine sahip CFRP kompozitin delinmesi sırasında oluşan delaminasyon hasarı seviyesinin kesme parametrelerine bağlı değişimi (Morkavuk vd. 2022b).....	87
Şekil 4.5 Farklı yüzey geometrisine sahip CFRP kompozitin delinmesi sırasında oluşan delik içi hasarlarının SEM incelemesi (1000 dev/dk, 600 mm/dk) (Morkavuk vd. 2022b).....	90
Şekil 4.6 Farklı yüzey geometrisine sahip CFRP kompozitin delinmesi sırasında oluşan delik içi hasarlarının SEM incelemesi (4000 dev/dk, 600 mm/dk) (Morkavuk vd. 2022b).....	91
Şekil 4.7 Farklı kompozitler için destek kullanımına bağlı olarak itme kuvvetinin zamana bağlı değişimi (3000 dev/dk, 600 mm/dk) (Morkavuk vd. 2022a). ...	93
Şekil 4.8 Filaman sarım boru, rulo sarım boru ve plakanın delinmesi sırasında oluşan maksimum itme kuvvetlerinin kesme parametrelerine ve destek kullanımına bağlı değişimi (Morkavuk vd. 2022a).	93
Şekil 4.9 Filaman sarım boru, rulo sarım boru ve plakanın delinmesi sırasında oluşan maksimum torkun kesme parametrelerine ve destek kullanımına bağlı değişimi (Morkavuk vd. 2022a).	94
Şekil 4.10 Kompozit plakaların delinmesi sırasında oluşan eğilme deformasyonunun şematik görünümü ve kompozit boru ile kıyaslanması.	95
Şekil 4.11 Delik girişinde delme kaynaklı delaminasyon faktörünün kesme parametrelerine bağlı değişimi (Morkavuk vd. 2022a).	98
Şekil 4.12 Delik çıkışında delme kaynaklı delaminasyon faktörünün kesme parametrelerine ve destek kullanımına bağlı değişimi (Morkavuk vd. 2022a).	99
Şekil 4.13 Filaman ve rulo sarım kompozit boru ve kompozit plaka için delik girişi ve çıkışının optik mikroskop görüntüleri (1500 dev/dk) (Morkavuk vd. 2022a).	101

Şekil 4.14 Filaman ve rulo sarım kompozit boru ve kompozit plaka için delik girişi ve çıkışının optik mikroskop görüntüleri (4500 dev/dk).....	102
Şekil 4.15 Delik içi yüzeyi SEM görüntüleri (1500 dev/dk, 900 mm/dk, desteksiz delme) (Morkavuk vd. 2022a).....	104
Şekil 4.16 Delik içi yüzeyi SEM görüntüleri (1500 dev/dk, 900 mm/dk, destekli delme) (Morkavuk vd. 2022a).....	105
Şekil 4.17 Delik içi yüzeyi SEM görüntüleri (4500 dev/dk, 300 mm/dk, desteksiz delme) (Morkavuk vd. 2022a).....	106
Şekil 4.18 Delik içi yüzey topografyaları (3000 dev/dk) (Morkavuk vd. 2022a).	107
Şekil 4.19 Delik içi yüzey pürüzlülüğü değerlerinin (Ra ve Rq) kesme parametrelerine ve destek kullanımına bağlı değişimi (Morkavuk vd. 2022a).	108
Şekil 4.20 Halka çekme testi sonrası hasara uğramış numuneler.....	109
Şekil 4.21 Halka çekme testi sonrası numunelerin makro hasar analizi.	110
Şekil 4.22 Filaman sarım için kuvvet-uzama ve gerilme-gerinim grafikleri.	111
Şekil 4.23 Rulo sarım için kuvvet-uzama ve gerilme-gerinim grafikleri.....	112
Şekil 4.24 Filaman sarım ve rulo sarım boru kesitinin şematik görünümü.....	114
Şekil 4.25 Halka çekme testi sonrası filaman sarım numuneler için mikroskopik hasar analizi.	116
Şekil 4.26 Halka çekme testi sonrası rulo sarım numuneler için mikroskopik hasar analizi.	117
Şekil 4.27 Rulo sarım boru kesitinde gözlemlenen bazı boşlukların boyutu.	118
Şekil 4.28 Yorulma testleri sonrası hasara uğramış filaman sarım numuneler.	120
Şekil 4.29 Yorulma testleri sonrası hasara uğramış rulo sarım numuneler.....	120
Şekil 4.30 Farklı koşullarda delinmiş filaman sarım kompozit boru için S-N eğrileri.	121
Şekil 4.31 Farklı koşullarda delinmiş rulo sarım kompozit boru için S-N eğrileri.	121
Şekil 4.32 Filaman ve rulo sarım için normalize edilmiş maksimum gerilme-çevrim sayısı grafiği.	123
Şekil 4.33 TGA testi sonuçları.	125
Şekil 4.34 DMA testi sonuçları.	125
Şekil 4.35 Yorulma testleri sırasında ölçülen sıcaklıkların normalize edilmiş çevrim ile değişimi.	128
Şekil 4.36 Disk yüzeyi görüntüleri, (a) yüzeye yapışmış reçine kalıntısı, (b) temizlenmiş disk.	128
Şekil 4.37 Filaman sarım kompozit borunun %60 gerilme seviyesinde yapılan yorulma testleri sırasında numunelerin çevrim sayısına bağlı olarak makro hasar görüntüleri.	129

Şekil 4.38 Filaman sarım kompozit borunun %60 gerilme seviyesinde yapılan yorulma testleri sırasında numunelerin çevrim sayısına bağlı olarak termal kamera görüntüleri.	131
Şekil 4.39 Filaman sarım kompozit borunun %55 gerilme seviyesinde yapılan yorulma testleri sırasında numunelerin çevrim sayısına bağlı olarak makro hasar görüntüleri.	132
Şekil 4.40 Filaman sarım kompozit borunun %55 gerilme seviyesinde yapılan yorulma testleri sırasında numunelerin çevrim sayısına bağlı olarak termal kamera görüntüleri.	134
Şekil 4.41 Rulo sarım kompozit borunun %70 gerilme seviyesinde yapılan yorulma testleri sırasında numunelerin çevrim sayısına bağlı olarak makro hasar görüntüleri.	136
Şekil 4.42 Rulo sarım kompozit borunun %70 gerilme seviyesinde yapılan yorulma testleri sırasında numunelerin çevrim sayısına bağlı olarak termal kamera görüntüleri.	138
Şekil 4.43 Rulo sarım kompozit borunun %65 gerilme seviyesinde yapılan yorulma testleri sırasında numunelerin çevrim sayısına bağlı olarak makro hasar görüntüleri.	139
Şekil 4.44 Rulo sarım kompozit borunun %65 gerilme seviyesinde yapılan yorulma testleri sırasında numunelerin çevrim sayısına bağlı olarak termal kamera görüntüleri.	141
Şekil 4.45 Rulo sarım kompozit borunun %60 gerilme seviyesinde yapılan yorulma testleri sırasında numunelerin çevrim sayısına bağlı olarak makro hasar görüntüleri.	142
Şekil 4.46 Filaman sarım için %70 gerilme seviyesinde yüklenmiş numunelerin hasar görüntüleri ve mikroskobik hasar analizi.	145
Şekil 4.47 Filaman sarım için %60 gerilme seviyesinde yüklenmiş numunelerin hasar görüntüleri.	147
Şekil 4.48 Filaman sarım için %50 gerilme seviyesinde yüklenmiş numunelerin hasar görüntüleri ve mikroskobik hasar analizi.	148
Şekil 4.49 Rulo sarım için %70 gerilme seviyesinde yüklenmiş numunelerin hasar görüntüleri ve mikroskobik hasar analizi.	151
Şekil 4.50 Rulo sarım için %60 gerilme seviyesinde yüklenmiş numunelerin hasar görüntüleri.	152
Şekil 4.51 Rulo sarım için %50 gerilme seviyesinde yüklenmiş numunelerin hasar görüntüleri ve mikroskobik hasar analizi.	153
Şekil 4.52 Radyal basma testi sonrası hasara uğramış numuneler.	156
Şekil 4.53 Filaman sarım ve rulo sarım kompozit borunun radyal basma testi sırasında hasar gelişimi.	157
Şekil 4.54 Filaman sarım ve rulo sarım kompozit boru için yük-deplasman grafikleri.	158

Şekil 4.55 Radyal basma testi sonrası filaman sarım numuneler için mikroskopik hasar analizi.	160
Şekil 4.56 Radyal basma testi sonrası rulo sarım numuneler için mikroskopik hasar analizi.	161



ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 2.1 Elyaf takviyeli kompozit plakalarda delik delme prosesi üzerine yapılan çalışmaların özeti.....	37
Çizelge 2.2 Elyaf takviyeli kompozit borularda delik delme prosesi üzerine yapılan çalışmaların özeti.....	44
Çizelge 2.3 Elyaf takviyeli kompozit plakalarda delik delme işleminin mekanik ve yorulma davranışlarına etkileri üzerine yapılan çalışmaların özeti.....	55
Çizelge 2.4 Elyaf takviyeli kompozit boruların mekanik karakterizasyonu üzerine yapılan çalışmaların özeti.....	62
Çizelge 3.1 Üretilen kompozitlerin fiziksel özellikleri.....	64
Çizelge 3.2 Delik delme testi deney parametreleri.....	70
Çizelge 3.3 Yorulma testi deney parametreleri.....	80
Çizelge 4.1 İtme kuvveti ve tork için varyans analizi sonuçları.....	96
Çizelge 4.2 Delik çıkışında delaminasyon faktörü için varyans analizi sonuçları.....	100
Çizelge 4.3 Yüzey pürüzlülüğü (Ra) için varyans analizi sonuçları.....	108
Çizelge 4.4 Halka çekme testi sonuçları.....	113
Çizelge 4.5 Yorulma testi sonuçları.....	124
Çizelge 4.6 Radyal basma testi sonuçları.....	159

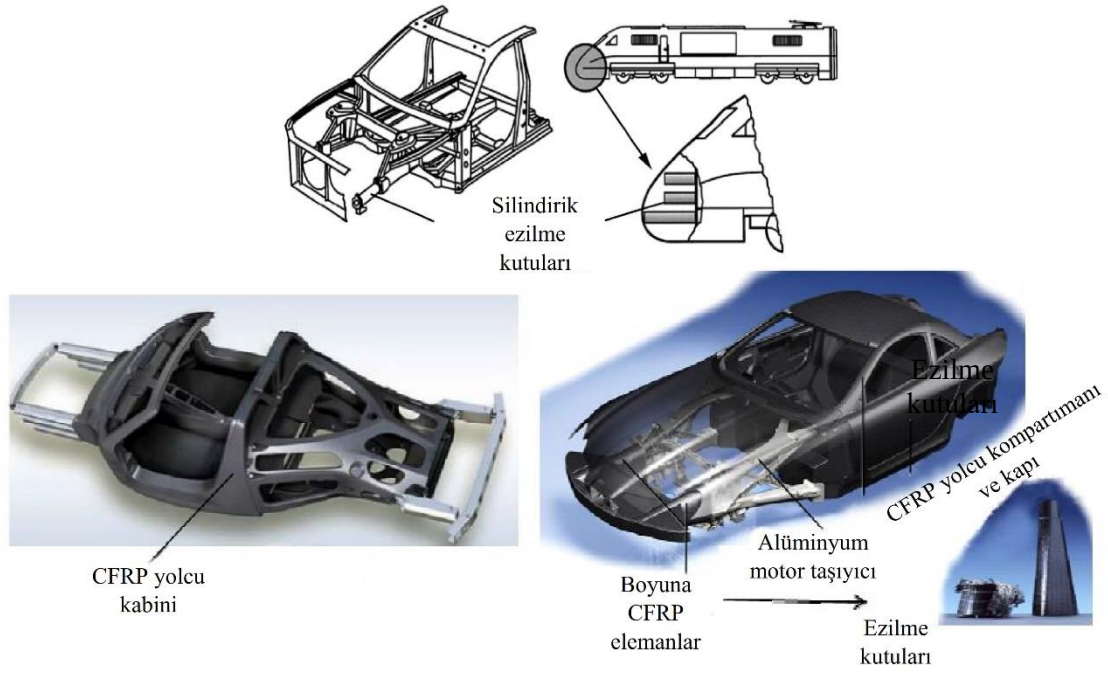
1. GİRİŞ

Kompozitler, birbiri içerisinde çözünmeyen iki veya daha fazla bileşenin makro boyutta bir araya gelmesiyle oluşan yapısal malzemelerdir. Bu bileşenlerden ilki takviye elemanı olarak adlandırılırken bu bileşenin içinde gömülü olduğu diğer bileşene ise matris adı verilmektedir (Sharma 2021).

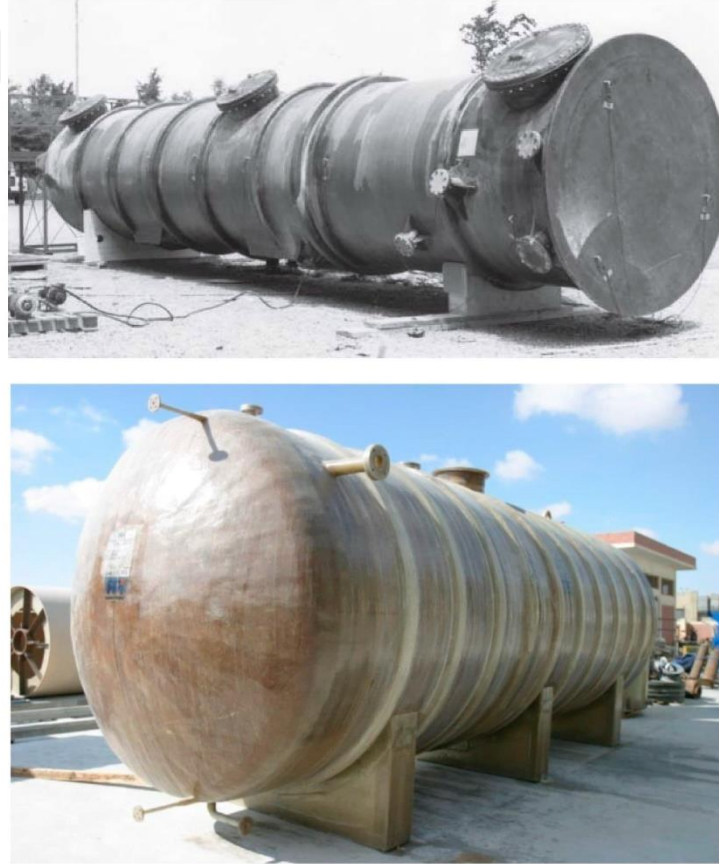
Elyaf takviyeli plastikler (FRP) ağırlıklarına oranla yüksek dayanım sunması, yüksek rijitlik ve yorulma dayanımı, yüksek sönümlenme kabiliyeti ve mükemmel korozyon direnci gibi özellikleriyle en yaygın kullanılan kompozitlerdir (Gemi vd. 2020a). Bu özellikleri sayesinde elyaf takviyeli plastik kompozitler havacılık ve otomotiv endüstrisi başta olmak üzere, denizcilik, yakıt ve kimyasal madde taşıma, spor ekipmanları, savunma sanayii, medikal ve yapı sektörlerinde tercih edilen bir malzeme haline gelmiştir (John ve Thirumalai Kumaran 2020, Gemi vd. 2021, Pereszlai vd. 2021). Özellikle cam elyaf takviyeli plastikler (GFRP) ve karbon elyaf takviyeli plastikler (CFRP) birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Şekil 1.1-1.5'te kompozitlerin endüstrideki kullanım örnekleri verilmiştir.



Şekil 1.1 Polimer kompozitlerin havacılık sektöründeki kullanımı (Hafif yolcu uçağı Premier I'nin karbon elyaf kompozit gövdesi) (Kolesnikov ve Herbeck 2004).



Şekil 1.2 Polimer kompozitlerin otomotiv endüstrisinde kullanımı (Friedrich 2016, Supian vd. 2018).



Şekil 1.3 Kompozitlerin basınçlı tank üretiminde kullanımı (Filaman sarım ve elle yatırma yöntemleri ile üretilmiş GFRP tank) (Hoa 2009, Rajak vd. 2019).



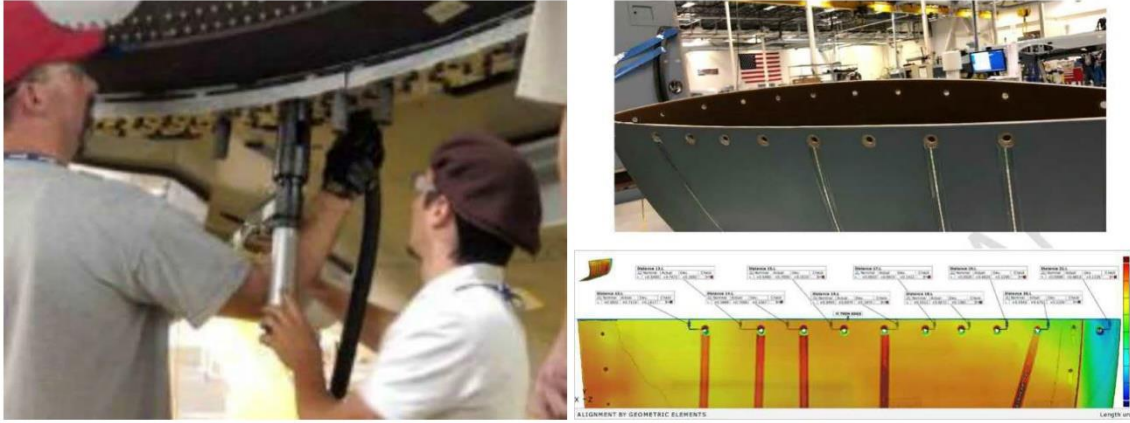
Şekil 1.4 Elyaf takviyeli kompozit boruların endüstride kullanımı (GFRP kompozit boru) (Benyahia vd. 2018).



Şekil 1.5 Kompozitlerin makine imalatı sektöründeki kullanımı (CFRP kompozit şaft)(Lee ve Suh 2006).

Pek çok alanda kullanılan elyaf takviyeli plastikler, farklı üretim yöntemleri kullanılarak istenilen geometrilerde ve elyaf oryantasyonunda üretilebilmektedir. Düzlemsel kompozitlerin üretiminde genellikle vakum destekli reçine transfer kalıplama (VARTM) ve vakum torbalama gibi yöntemler yaygın olarak kullanılırken, kompozit boruların üretiminde filaman sarım yöntemi sıklıkla tercih edilmekle beraber özellikle son yıllarda rulo sarım veya diğer adıyla prepreg sarım yöntemi ön plana çıkmaktadır. Kompozitler istenilen ve dizayn edilen net şekle yakın olarak imal edilseler de perçinli birleştirme ya

da cıvata bağlantısı gibi montaj operasyonları için kompozit üzerinde delik açma işlemi kaçınılmaz olmaktadır (Hocheng vd. 2016). Elyaf takviyeli kompozitlerin en yoğun kullanıldığı havacılık endüstrisinde küçük motorlu bir uçağın üretimi için bile 100000'den fazla delik gerektiği büyük uçaklarda ise bu sayının milyonlara ulaştığı belirtilmiştir (El-Sonbaty vd. 2004, Grilo vd. 2013). Montaj hattının birçoğunda delik delme operasyonu el aletleri kullanılarak yapılmakta (Şekil 1.6) ve bu durumda ise kesme hızı ve ilerleme hızı hassas olarak ayarlanamamakta ve buna bağlı olarak delik kalitesi olumsuz etkilenmektedir ancak otomatik makineler kullanılarak bu sorunun üstesinden gelinebilmektedir (Oncul 2016).

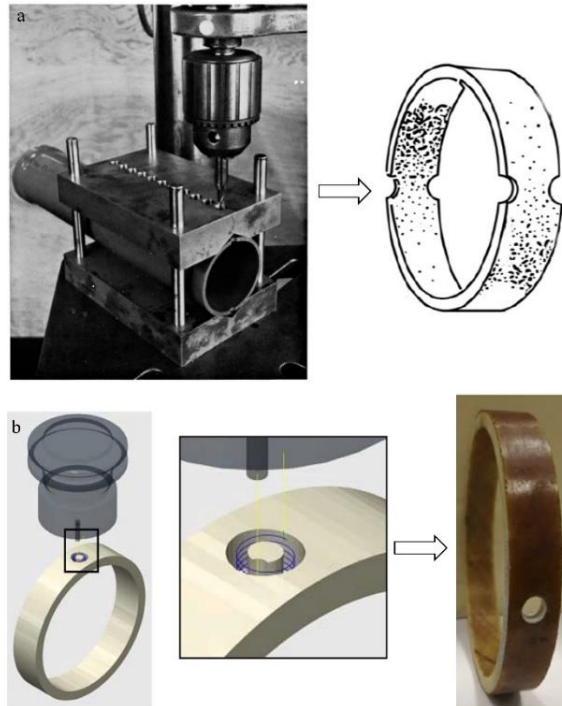


Şekil 1.6 Havacılık sektöründe el aletleri kullanılarak yapılan delik delme işlemi ve el aletleriyle delinmiş bir parça (Hasan 2020).

Anizotropik ve heterojen bir yapıya sahip olan elyaf takviyeli kompozitler delindiğinde delaminasyon ve kesilmemiş elyaf gibi makro boyutlu hasarların yanı sıra elyaf çekmesi (fiber pull-out), elyaf-matris ayrılması (debonding), matris çatlağı (matrix crack) ve elyaf kırılması (fiber breakage) gibi mikro boyutlu hasarlar meydana gelmektedir (Jia vd. 2016, Morkavuk vd. 2022b). Malzemenin dayanımını ve servis ömrünü etkileyebileceğinden, literatürde birçok araştırmacı tarafından delaminasyonun bu hasarlar arasında en tehlikelisi olduğu ve havacılık endüstrisinde delik delme kaynaklı oluşan delaminasyon sebebiyle üretilen parçaların yaklaşık %60'ının reddedildiği vurgulanmıştır (Davim ve Reis 2003, Arul vd. 2006, Seif vd. 2007, Krishnaraj vd. 2012, Grilo vd. 2013). Bu sebeple kompozit plakaların daha az hasar ile ya da hasarsız delinmesi üzerine pek çok çalışma yapılmıştır.

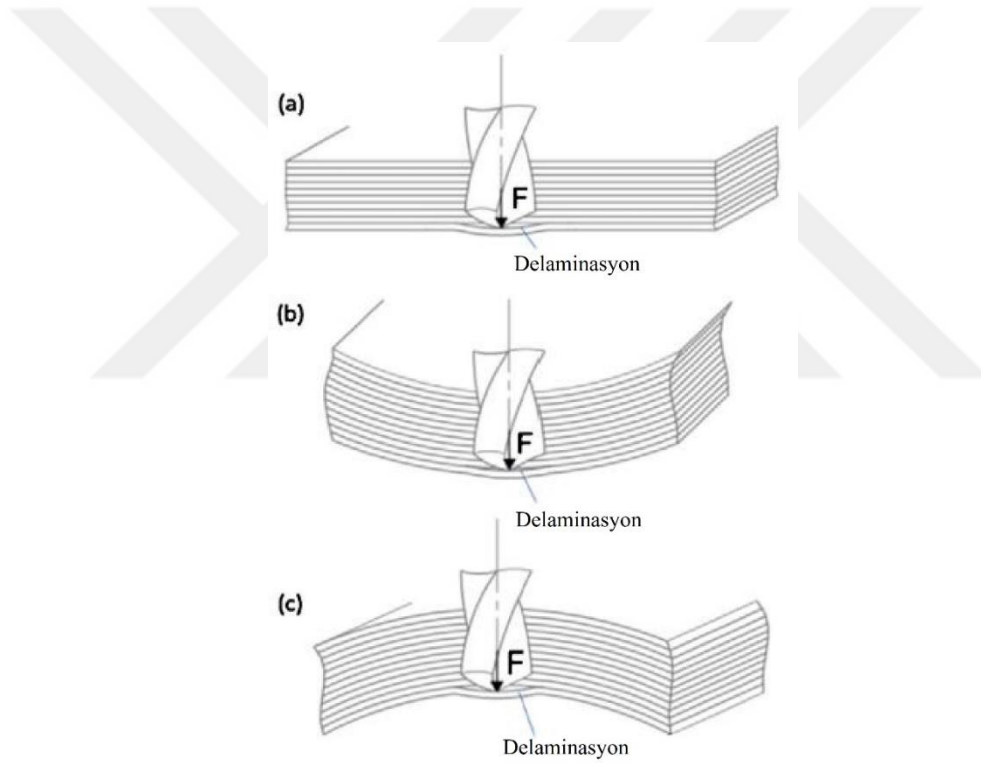
Endüstride farklı alanda kullanılan kompozit boruların mekanik özelliklerinin

belirlenmesinde, ASTM tarafından belirlenmiş bazı test metotları kullanılmaktadır. Tüp çekme, halka çekme (disk-ayırma) ve patlatma testleriyle kompozit borunun aksel ve çevresel yöndeki mekanik özellikleri tespit edilebilmektedir (Erdiller 2004, Gemi vd. 2020a). Çevresel yöndeki çekme dayanımının belirlenmesinde pahalı ekipmanlar gerektirmemesi, uygulamasının kolay olması ve güvenilirliği sebebiyle halka çekme testi literatürde yaygın olarak kullanılmaktadır (Kaynak vd. 2005, Rafiee 2012, Eggers vd. 2019, Saghir vd. 2021). ASTM D2290 standardına göre halka çekme testleri üretim metoduna bakılmaksızın, termoset reçineli takviyeli borulara uygulanabilmektedir. İlgili standarda göre halka çekme test numunesinin hazırlanması aşamasında kontrollü bir hasar gerçekleşmesi için numune üzerinde zayıflatılmış kesit oluşturulması gerekmektedir. Böylece malzemenin kesit alanı daraltılmış bölgeden kopması sağlanmaktadır. Zayıflatılmış kesiti oluşturmak için kullanılan ve ilgili standartta önerilen en yaygın yöntem konvansiyonel delik delme işlemidir. Helisel frezeleme ya da kontur frezeleme gibi yöntemler kullanılarak da indirgenmiş bölge elde edilebilmektedir. Öte yandan, zayıflatılmış kesitin standartta halka numune kenarlarına açılması gerektiği belirtilirken, literatürde numune merkezine delik açan araştırmacılar da vardır. Şekil 1.7’de halka çekme testi numunesi hazırlama aşaması ve hazırlanmış numuneler görülmektedir.



Şekil 1.7 Halka çekme testi numunesinin hazırlanması, (a) delik delme prosesi, (b) frezeleme prosesi (ASTM 2016, Benyahia vd. 2018).

Elyaf takviyeli kompozit borular gerek halka çekme testi ile mekanik özelliklerin belirlenmesi amacıyla gerekse montaj işlemleri için delinmektedirler. Literatürde farklı yüzey eğriliklerine sahip kompozitlerin (Şekil 1.8) delinmesi sırasında oluşan delaminasyon hasarının farklı seviyelerde olabileceği ve dolayısıyla plaka ile borunun işlenebilirlik karakteristiğinin farklı olabileceği belirtilmiştir (Hocheng vd. 2014, Hocheng vd. 2016). Ancak bu konuda kapsamlı bir çalışma yapılmamıştır. Öte yandan malzeme üzerinde oluşan bu hasarların mekanik özelliklere ve yorulma davranışına etkisi ile ilgili kompozit plakalarda pek çok çalışma yapılmasına rağmen, literatürde kompozit borular için böyle bir çalışma henüz mevcut değildir ve bu konuda bir boşluk mevcuttur. Konu ile ilgili kapsamlı literatür taraması bir sonraki başlık altında verilmiştir.



Şekil 1.8 Farklı yüzey eğriliklerine sahip kompozitlerin delinmesi sırasında oluşan delaminasyon hasarı, (a) düz yüzey, (b) iç bükümlü yüzey, (c) dış bükümlü yüzey (Hocheng vd. 2014).

Farklı yöntemler kullanılarak çeşitli geometrilerde üretilen kompozitler farklı mekanik davranış gösterdiği gibi işlenebilirlik açısından da farklı davranış sergileyecektir. Bu tez çalışmasında öncelikle farklı yüzey geometrilerinin işlenebilirlik üzerindeki etkileri incelenmiş, sonra kompozit plaka ve boruların delinebilme karakteristiği karşılaştırmalı olarak detaylıca araştırılmıştır. Bu araştırma sonucunda belirlenen delik delme

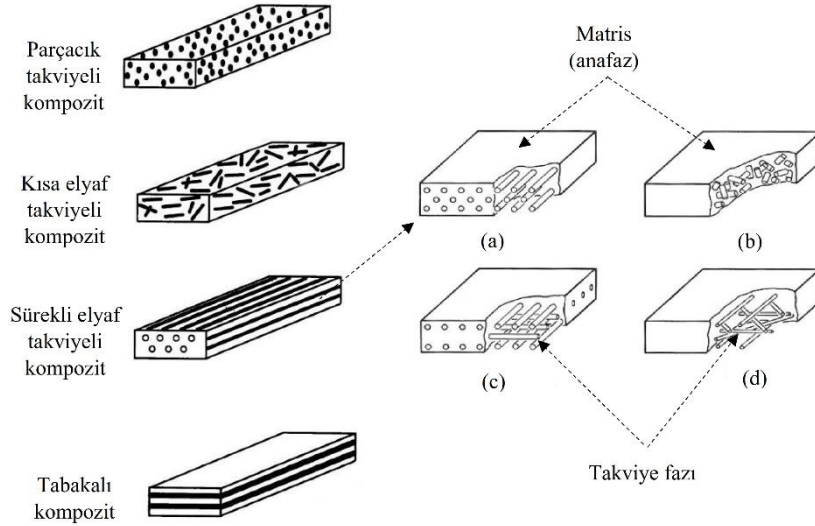
parametreleri kullanılarak filaman sarım ve rulo sarım yöntemleri ile üretilmiş kompozit borularda konvansiyonel delik delme işleminin boruların mekanik özelliklere ve yorulma ömrüne etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Böylece literatürde hakkında bilgi eksikliği olan her iki konu da açıklığa kavuşturulmuştur.



2. LİTERATÜR BİLGİLERİ

2.1 Polimer Kompozitler

Kompozitler, kendi başlarına kullanıldıklarında birbirlerinin özelliklerini karşılayamayan en az iki farklı malzemenin makro boyutta bir araya gelmesiyle oluşan yeni malzemelerdir (Sathishkumar vd. 2014). Bu iki malzemedan biri ana faz (matris) olarak adlandırılırken diğeri ise takviye fazı olarak adlandırılmaktadır. Matris kompozit yapı içerisinde sürekli formda bulunur ve temel görevi takviye fazını bir arada tutmak, kompozit üzerine gelen yükü takviye fazına dağıtmak, takviye fazını dışardan gelecek çevresel etkilere karşı korumak ve nihai ürüne yani kompozite istenilen şekli vermektir (Hsissou vd. 2021). Takviye fazı ise sürekli olabildiği gibi parçacık şeklinde de olabilmektedir ve görevi ise kompozite yük taşıma kabiliyeti kazandırmaktır. Sürekli elyaf takviyeli kompozitlerde, elyaf kompozit içerisinde istenilen oryantasyonda dizilerek kompozitin farklı yönlerde de yük taşıyabilmesi sağlanmaktadır. Şekil 2.1’de takviye fazının kompozit içerisindeki farklı formları ve farklı elyaf dizilimleri şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.1 Kompozit içerisinde farklı takviye fazı formları ve elyaf dizilimleri, (a) tek yönlü, (b) rastgele, (c) iki yönlü ve (d) çok yönlü (Chawla 1993, Alhashmy 2012).

Polimer bazlı yani polimer matrisli kompozitlerde matris malzemesi olarak termoset reçineler (epoksi, polyester, poliüretan gibi), termoplastikler (polyamid, PEEK,

polikarbonat gibi) ya da elastomerler (kauçuk ve TPE gibi) kullanılmaktadır. Takviye malzemesi olarak ise organik (polyester, aramid gibi) veya inorganik (cam, karbon, pamuk, yün gibi) takviye elemanları kullanılabilir (Friedrich ve Almajid 2013, Hsissou vd. 2021).

2.2 Polimer Kompozit Borular ve Üretim Yöntemleri

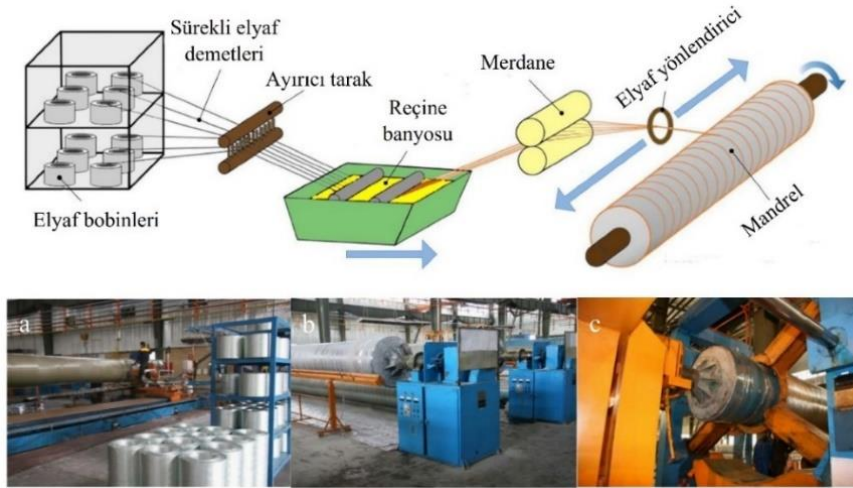
Geniş kullanım alanı ve artan üretim sayesinde elyaf takviyeli plastik (FRP) kompozit borulara olan talep 1950 yılından beri giderek artmaktadır. FRP kompozit boruların yüksek mukavemete karşılık düşük ağırlık oranı, mükemmel korozyon direnci, düşük sürtünme katsayısı, düşük termal iletkenlik, daha iyi boyutsal kararlılık sunması ve daha düşük kurulum ve bakım maliyeti gerektirmesi gibi avantajları daha fazla tüketiciyi cezbetmektedir (Manoj Prabhakar vd. 2019).

Elyaf takviyeli kompozit boruların üretiminde, kullanım amacına bağlı olarak matris fazında epoksi, polyester, vinil ester, fenolik ve furan gibi termosetlerin yanı sıra klorlu polivinil klorür (CPVC), yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE), polipropilen (PP), polivinilklorür (PVC), florlanmış etilen propilen (FEP Teflon), polivinilid florür (PVDF Kynar) ve etilen klorotrifloretilen (ECTFE Halar) gibi termoplastikler de kullanılmaktadır. Takviye fazında ise genellikle cam, karbon, kevlar, bazalt gibi sentetik elyaf kullanılması yanı sıra sisal lifi, muz lifi, kenevir lifi, keten lifi, kenaf lifi ve hindistan cevizi lifi gibi doğal elyaf da tercih edilmektedir (Manoj Prabhakar vd. 2019). Elyaf takviyeli plastikler arasında endüstride en yaygın kullanılan kompozitler yüksek rijitlik, dayanım ve sönümlenme kabiliyeti, çok iyi korozyon ve yorulma dayanımı gibi özellikleriyle cam elyaf takviyeli epoksi matrisli plastikler ve karbon elyaf takviyeli epoksi matrisli plastiklerdir (Gemi vd. 2020a). Kompozit borular farklı yöntemler kullanılarak üretilmektedir. Bu yöntemler aşağıda başlıklar altında verilmiştir.

2.2.1. Filaman Sarım Yöntemi

Filaman sarım, otomasyona uygun olan ve kompozit üretiminde yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntemde, elyaf demetleri/filamentleri, destekleyici bir nesne veya

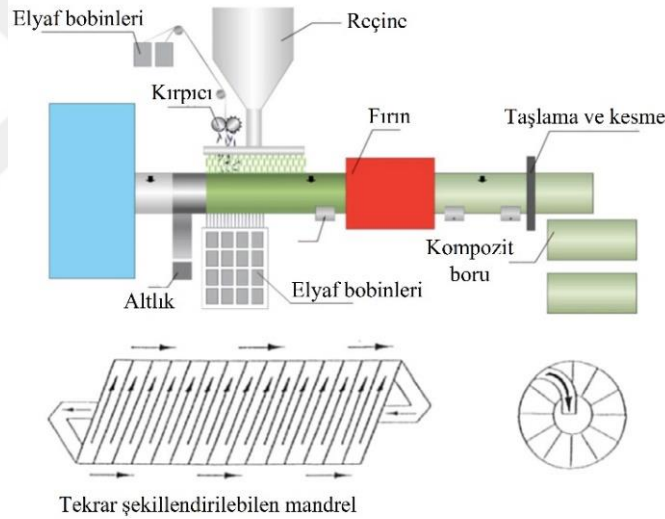
mandrel üzerine sürekli olarak sarılır. Bu yöntem ile açık uçlu silindirik kompozit yapılar (borular, roket motoru kasaları, oltalar ve golf sopası milleri gibi) ve kapalı uçlu silindirik kompozit yapılar (basınçlı kaplar, yakıt tankları, roket motoru kasası gibi) üretilmektedir (Rajak vd. 2021, Azeem vd. 2022). Filaman sarım yönteminde süreksiz/çift taraflı ve sürekli olarak adlandırılan iki farklı proses ile kompozit üretilmektedir. Çift taraflı filaman sarım yönteminde, önce elyaf demetleri reçine banyosundan geçirilerek reçine ile ıslatılır ardından ıslatılmış elyaf mandrelin uzunluğu boyunca sürekli ileri ve geri giderek hareket eden gezici bir araç aracılığıyla dönmekte olan mandrel üzerine sarılır. Bilgisayar kontrolü ile gezici aracın öteleme hızı ve mandrelin dönme hızı ayarlanarak farklı sarım açıları elde edilebilmektedir. Bu metot ile mandrel boyunda sabit uzunlukta kompozit borular üretildiği için ticari olarak sürekli olmayan filaman sarım işlemi olarak adlandırılmaktadır. Sarım işlemi sonrasında, boru ve mandrel birlikte kürlleme istasyonuna aktarılır. Üretilen boru dönel vaziyette ısıtılarak istenen sıcaklık ve sürede kürlenir. Kürlleme işlemi tamamlandıktan sonra mandrel başka bir istasyonda borudan çıkarılır (Rafiee 2016). Süreksiz/çift taraflı filaman sarım prosesi Şekil 2.2’de gösterilmiştir.



Şekil 2.2 Süreksiz/çift taraflı filaman sarım prosesi, (a) sarım aşaması, (b) kürlleme aşaması, (c) mandrelin çıkarılması aşaması (Rafiee 2016, Rajak vd. 2021).

Filaman sarım yönteminde elyaf mandrel üzerine belirli bir gerginlik ile sarılır. Gerginlik bu proses için hayati önem taşır ve elyaf tipi ile sarım desenine göre belirlenir. Gerginliğin az olması durumunda lifler arasında açıklık ve liflerin yerinden oynaması gibi problemler oluşurken gerginliğin yüksek olması ise elyaf hacim oranını artırmaktadır (Aydın 2019).

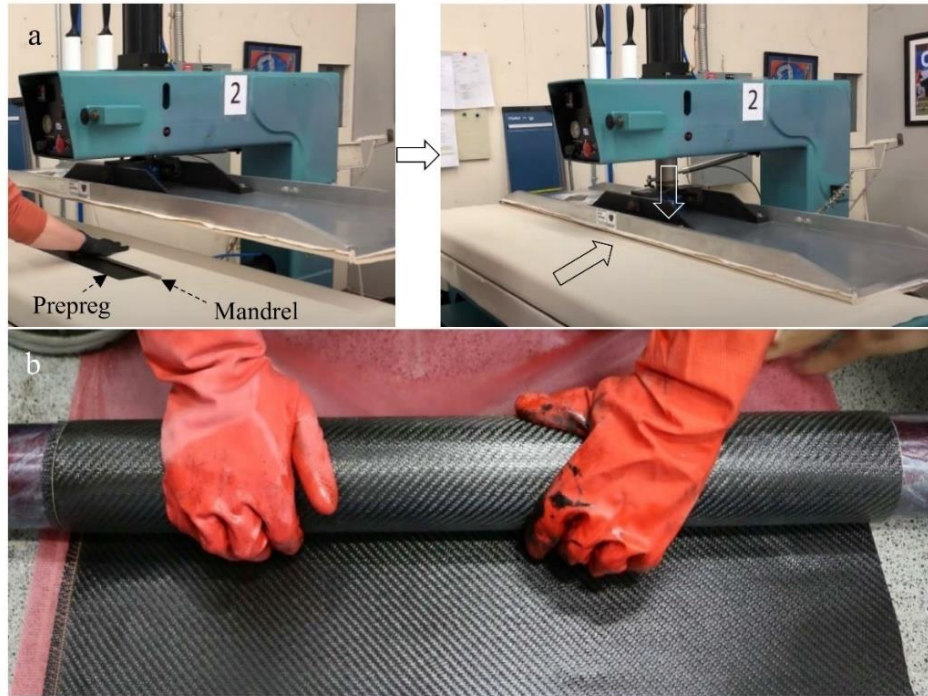
Sürekli filaman sarım metodunda ise (Şekil 2.3), mandrel kirişlerle desteklenen ve sürekli ilerleyen çelik bant tarafından şekillendirilir. Proseste tekrar şekillendirilebilir bir mandrel makinenin sonuna doğru spiral bir yolda hareket eder. Sürekli elyaf, kırpılmış elyaf, reçine ve agrega dolgu maddeleri mandrele yukarıdan uygulanır. Kürleme aşamasında kompozit ısıtıcı elemanlarla doğrudan ısınması sağlanır. Kürleme bölgesinde tabaka sıcaklığı değişik noktalardan ölçülür. İstenilen uzunluğa ulaşıldığında ve kürleme sonrasında senkronize bir testere ünitesi boruyu keser. Bu yöntemde borular sürekli üretilmektedir ve üretim süreci sadece malzeme bileşenlerini yenilemek veya değiştirmek için durmaktadır. Bu sebeple bu proses sürekli filaman sarım yöntemi olarak adlandırılmıştır. Süreksiz/çift taraflı filaman sarım prosesinin aksine sürekli filaman sarım prosesinde tüm üretim aşaması tek bir makine üzerinde gerçekleştirilmektedir (Subaşı vd. 2014, Rafiee 2016).



Şekil 2.3 Sürekli filaman sarım prosesi (Rafiee 2016, Aydın 2019).

2.2.2. Rulo Sarım (Prepreg Sarım) Yöntemi

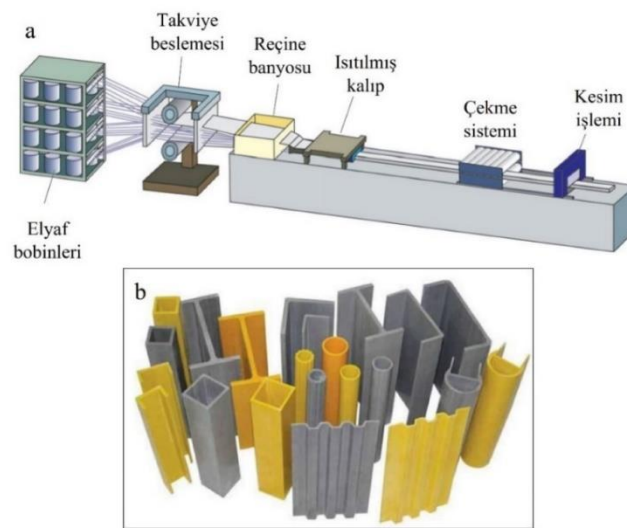
Rulo sarım ya da diğer adıyla prepreg sarım işleminde önceden hazırlanmış, reçine emdirilmiş ancak kürlenmemiş prepregler metal bir mandrel etrafına sarılmaktadır. Yöntemin uygulaması oldukça basittir. Bu yöntemle üretilen boruların iç çapı, kullanılan mandrelin dış çapına eşit olurken, dış çap, mandrelin etrafına sarılan prepreglerin tabaka sayısına göre belirlenmektedir. Sarım işlemi sonrasında bir fırında kürlleme yapılır ve ardından mandrel borudan çıkarılır. Sarım işlemi elle yapılabildiği gibi bir makine aracılığıyla da yapılabilmektedir. Makine ile yapılan işlemde, öncelikle operatör tarafından prepreg, mandrel üzerine bir miktar sarılır ardından sarımın devamı makine tarafından yapılır. Makine ile sarımda boru üzerine baskı uygulanarak sarıldığı için daha düzgün bir sarım işlemi gerçekleştirilir. Şekil 2.4'te rulo (prepreg) sarım işlemi gösterilmiştir. Bu yöntemde elyaf oryantasyonu prepreg hazırlık aşamasında belirlenmektedir. Endüstride 0° , 45° ve 90° gibi oryantasyon açılarında kumaşlar kolayca bulunabildiğinden bu açılarda rulo sarım boru elde etmek kolaydır ancak ara değerlere sahip açılarda rulo sarım boru elde etmek daha zordur.



Şekil 2.4 Rulo (prepreg) sarım yöntemi, (a) makine ile sarım (İnt. Kyn. 1), (b) elle sarım (Gök 2022).

2.2.3. Pultrüzyon (Profil Çekme) Yöntemi

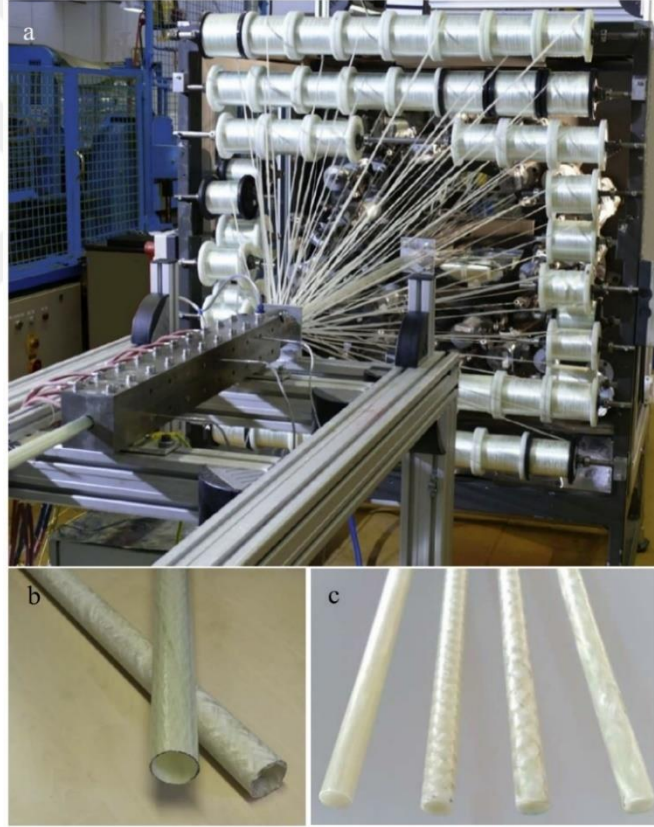
Pultrüzyon prosesi sabit bir enine kesit profiline sahip FRP kompozitleri üretmek için kullanılan, otomasyona uygun bir süreçtir. Pultrüzyon terimi, "(pull) çekme" ve "ekstrüzyon" kelimelerinin birleştirilmesi ile oluşturulmuştur. Pultrüzyon yöntemi ile kompozit üretimi ekstrüzyon tekniğine benzemektedir. Aradaki temel fark ise, pultrüzyon işleminde kullanılan malzeme önceden tanımlanmış kalıplardan çekilirken, ekstrüzyon işleminde ise malzeme kalıpların içinden itilir (Rajak vd. 2021). Bu proseste öncelikle sürekli elyaf, bobinlerden çekilerek reçine banyosundan geçirilir. Daha sonra reçine emdirilmiş elyaf hem şekil vermek hem de kürleme işlemi için ısıtılmış kalıba doğru çekilir. Kürleme ve şekillendirme işleminden sonra kompozit profil, çekme sistemi ile kalıptan çıkarılır ve istenilen uzunlukta kesilir (Aydın 2019). Bu süreç, sürekli tekrarlandığından üretim sürekli filaman sarım yöntemindeki gibi devam eder. Pultrüzyon ile üretilmiş birçok kompozit, polyester reçine kullanılarak ve sadece aynı yönde dizilmiş yani tek yönlü oryantasyona sahip sürekli fiber kullanarak üretilmektedir. Bu da elyaf yönünde iyi mekanik özellikler sunarken diğer yönlerde zayıf mekanik özellikler anlamına gelmektedir. Rastgele dağılmış elyaf takviyesi ve/veya dokunmuş kumaşlar eklenerek kompozitin farklı yönlerde de kuvvet taşıması mümkün olmaktadır (Bahar 2009). Pultrüzyon ile kompozit üretim yöntemi ve bu prosesle üretilmiş kompozitler Şekil 2.5'te verilmiştir.



Şekil 2.5 Pultrüzyon (profil çekme) yöntemi, (a) prosesin şematik gösterimi (Riedel 2012), (b) pultrüzyon ile üretilmiş kompozitler (İnt. Kyn. 2).

2.2.4. Pull-Braiding (Çekme-Sarma) Yöntemi

Bu yöntem elyaf örgü prosesi ve pultrüzyon prosesinin birleşiminden oluşmaktadır. Bu sebeple yapılacak işe göre “braidruzyon” ya da “braided pultrusion” gibi isimlerle de adlandırılır. Bu yöntemde tek yönlü lifler örgü makinesi kullanılarak bir mandrel üzerine ya da daha önce reçine emdirilmiş tek yönlü elyaf üzerine örülür. Bu kısımdan sonrası pultrüzyon prosesi ile aynıdır (Ahmadi vd. 2009). Bu yöntemde örgü, tek yönlü elyaf üzerine (çekirdek) örülebildiği gibi bir mandrel/liner üzerine de örülebildiği için içi boş (boru, profil gibi) ve dolu (çubuk gibi) kompozit yapılar elde edilebilmektedir. Şekil 2.6’da pull-braiding yöntemi ve bu yöntemle üretilmiş parçalar verilmiştir.

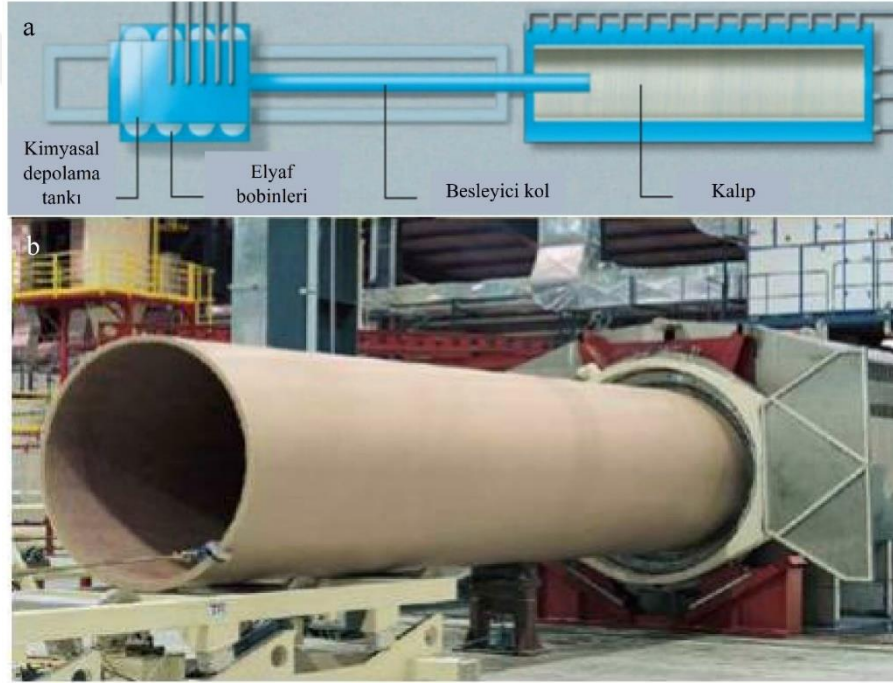


Şekil 2.6 Pull-braiding (çekme-sarma) yöntemi, (a) yöntemin uygulaması, pull-braiding yöntemi ile üretilmiş parçalar (b) boru, (c) çubuk (Ahmadi vd. 2009, Milwich 2016).

2.2.5. Santrifüj (Savurma) Döküm Yöntemi

Santrifüj döküm prosesi ile kompozit borular kırpılmış elyaf, polyester reçine ve dolgu maddeleri kullanılarak üretilmektedir. Bu proseste kırpılan lifler, reçine ve diğer katkı

maddeleri karıştırılarak, belirlenen miktarda dönen kalıp içinde ileri geri hareket eden besleme kolu ile beslenir. Kalıp başlangıçta düşük bir hızda döndürülür. Tüm hammaddelerin beslenmesi tamamlandıktan sonra, mandrelin dönme hızı artırılarak, beslenen malzemeleri kalıp duvarına doğru sıkıştırmak için yeterli santrifüj kuvvetleri sağlanır. Bu nedenle ham maddeler sıkışır ve sıkışan hava dışarı atılır. Bu yöntemde boru duvarı dıştan içe doğru inşa edilir. Son olarak, boru kurluşmesi için ısıtılır ve kurlama işlemi sırasında kalıp dönmeye devam ederek tüm uzunluk boyunca homojen duvar kalınlığı sağlanır (Rafiee 2016). Yöntemin şematik gösterimi ve uygulaması Şekil 2.7’de gösterilmiştir.

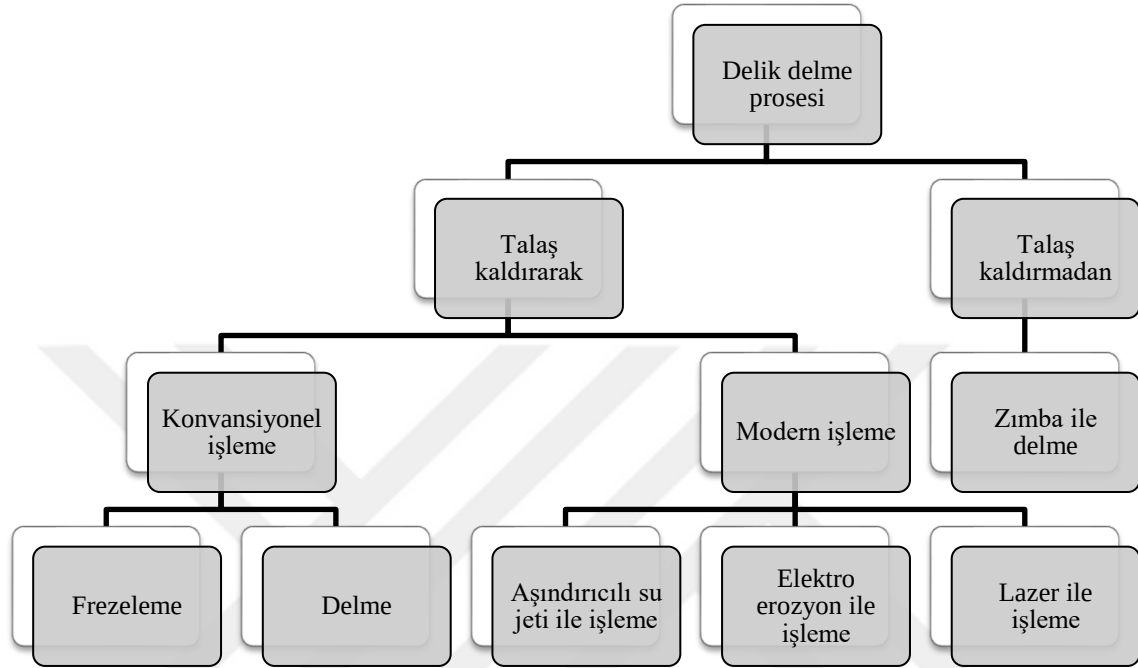


Şekil 2.7 Santrifüj (savurma) döküm metodu, (a) şematik gösterim (Rafiee 2016), (b) santrifüj döküm yöntemiyle üretilmiş kompozit boru (Subaşı vd. 2014).

2.3 Polimer Kompozitlerde Konvansiyonel Delik Delme Prosesi

Delik delme prosesi, talaş kaldırarak delik açma ve talaş kaldırmadan delik açma olarak ikiye ayrılmaktadır. Talaş kaldırarak yapılan delik açma işlemi ise konvansiyonel işleme ve modern (geleneksel olmayan) işleme olarak ikiye ayrılır. Delme ve frezeleme, kompozitlerin delinmesinde kullanılan konvansiyonel işleme yöntemleridir. Geleneksel olmayan işlemede tel erozyon, lazer ve aşındırıcılı su jeti ile işleme gibi yöntemler

kullanılmaktadır. Kompozit malzemelerde talaş kaldırmadan delik açmak için ise zımbalama yöntemi kullanılmaktadır (Abdullah vd. 2019). Kompozitlerin delinmesinde kullanılan prosesler Şekil 2.8’de gösterilmiştir.

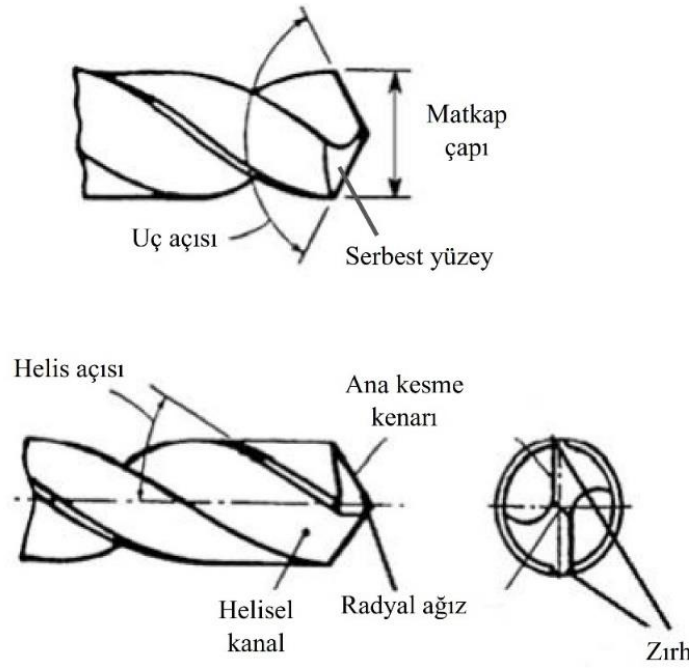


Şekil 2.8 Kompozitlerde delik delme prosesleri (Abdullah vd. 2019).

Her ne kadar modern ve ileri işleme teknikleri mevcut olsa da kesici takımlar ile talaş kaldırarak gerçekleştirilen konvansiyonel mekanik delik delme prosesi kompozitlerde delik delme işlemleri arasında lider konumdadır ve endüstride sıklıkla tercih edilen bir metottur. Delik delme prosesi, kompozit yapıyı diğer bileşenlerle sabitlemek amacıyla perçinli ve cıvatalı bağlantıların gerçekleştirilmesi için yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle havacılık ve uzay endüstrisinde tüm talaş kaldırma işlemlerinin %40'ını delik delme işleminin oluşturduğu bildirilmiştir (Abdullah vd. 2019, Geng vd. 2019, Xu vd. 2022).

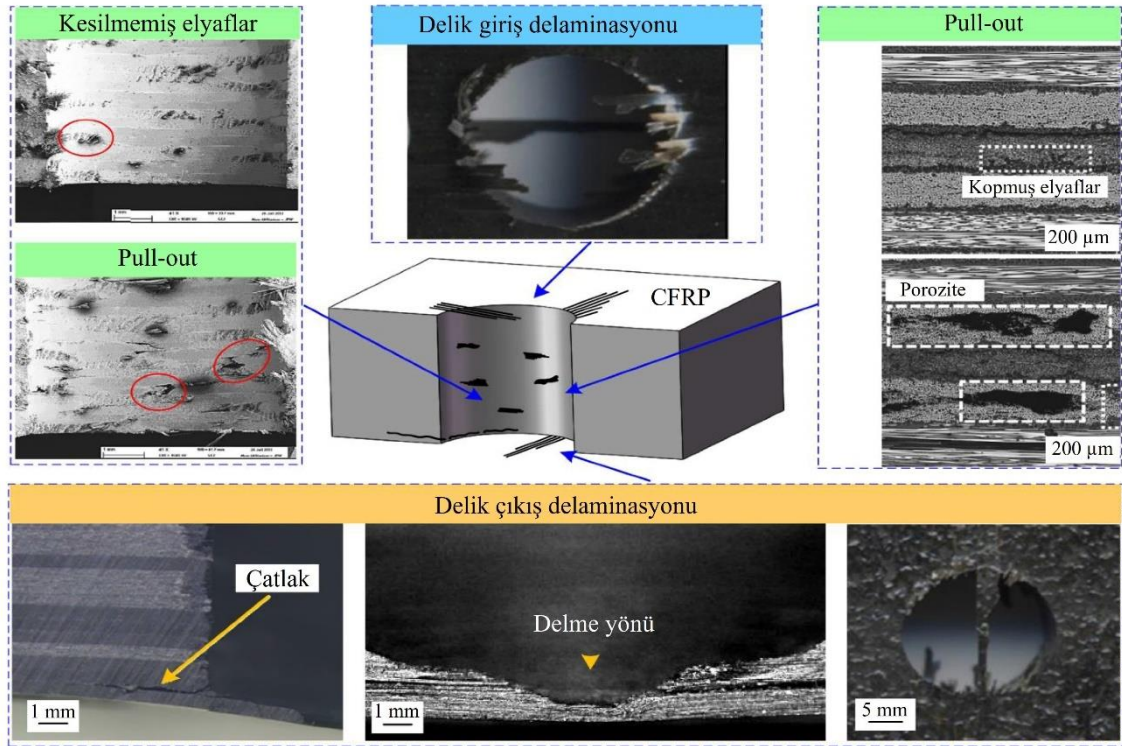
Konvansiyonel delik delme işleminde en yaygın kullanılan takım iki ağızlı helisel matkaplardır. Bu takım bir radyal ağız, iki ana kesici kenar ve iki zırh olacak şekilde üç farklı kesme yüzeyine sahiptir. Standart matkap geometrisi Şekil 2.9’da gösterilmiştir. Matkabın ana kesme kenarı (cutting lip) serbest yüzey ve helisel kanalların etkileşimi ile oluşturulur. Verimli bir kesim için ana kesme kenarı düz, eşit uzunlukta ve matkabın

ekseni ile simetrik olmalıdır. Radyal ağız, matkabın uç noktasında bulunur ve serbest yüzeylerin etkileşimi ile oluşturulur. Helis açısı pratik olarak matkabın kesme kenarındaki talaş açısını belirler. Helis açısı azaldıkça talaş açısı da azalır ve kesici kenarı daha güçlü hale getirir. Talaş açısı esas olarak helisel kanala, helis açısına, uç açısına ve ölçüldüğü yerdeki yarıçapa bağlıdır. Helisel matkaplarda en sık kullanılan uç açısı 118° 'dir, ancak elyaf takviyeli plastikler için 135° tercih edilmektedir. Uç açısının azaltılması, kesme genişliğini artırır (kesme uzunluğu artar) ve genellikle bu durum kırılğan malzemeler için tercih edilir (Krishnaraj vd. 2013).



Şekil 2.9 Standart matkap geometrisi (Krishnaraj vd. 2013).

Elyaf takviyeli kompozitler anizotropik özelliklere ve heterojen yapılara sahiptir. Delme sırasında takım kesme kenarları, dönüşümlü olarak ve termomekanik etkiler oluşturarak elyafa ve matrise temas eder. Elyaf ve matris için talaş kaldırma mekanizmaları farklıdır ve aynı kesme kenarlarının etkisi altında bile elyaf yerleşimi ile sürekli olarak değişir. Bu durum delik girişinde, delik içi yüzeyinde (delik duvarında) ve delik çıkışında delaminasyon, elyaf çekmesi, elyaf matris ayrılması, matris çatlakları, elyaf kırılması gibi hasarların oluşmasına sebep olur. Bu hasarlar delik kalitesini düşürdüğü gibi malzemenin mekanik dayanımını ve servis ömrünü etkilemektedir (Gemi vd. 2019, Geng vd. 2019, Xu vd. 2022). Kompozitlerin delinmesi sırasında oluşan temel hasar tipleri Şekil 2.10'da verilmiştir.

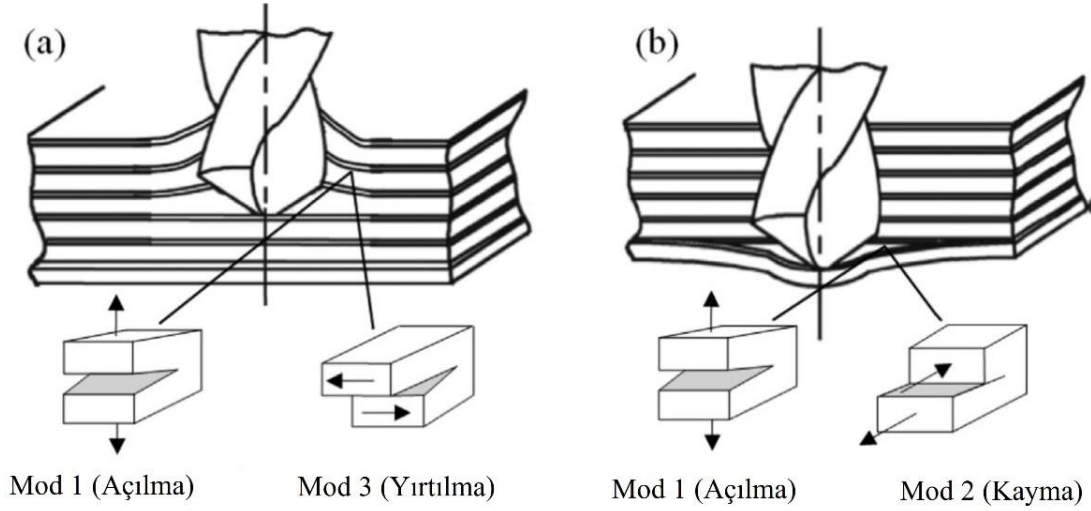


Şekil 2.10 Kompozitlerin delinmesinde oluşan temel hasar tipleri (Gao vd. 2022).

Delik girişinde oluşan ve soyulma (peel-up) (Şekil 2.11(a)) adı verilen delme kaynaklı delaminasyon hasarı, helisel kanal şekli, helis açısı ve tork ile ilişkilendirilmektedir. Spiral matkabın kesici kenarları kompozitin tabakalarıyla temas ettiğinde, matkap helisel kanallarının eğimi boyunca bir soyma kuvveti oluşur. Bu soyma kuvveti plakaları ayırır ve Mod 3 yırtılma (Tearing shear) mekanizması ile delaminasyon oluşur. Buna ek olarak matkap titreşimi gibi elverişsiz kesme koşulları nedeniyle üst katlardaki elyaf yeterince kesilemez. Elyaf saçakları yukarı çekilir, bu da Mod 1 açılma çatlağı (Opening) mekanizması ile delaminasyona sebep olur (Geng vd. 2019, Xu vd. 2022).

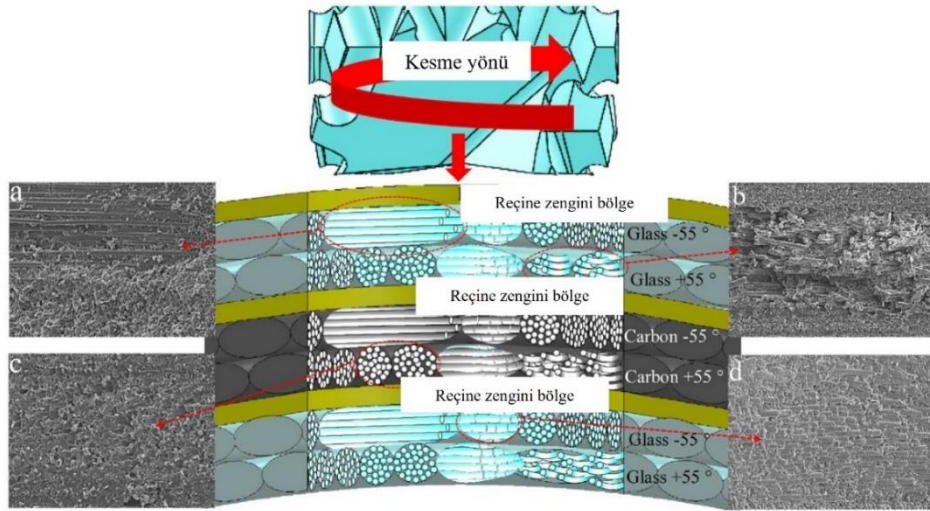
Delik çıkışında oluşan delik delme kaynaklı delaminasyon ise dışa itme (push-out) (Şekil 2.11(b)) olarak adlandırılmaktadır ve itme kuvveti, plakaların arayüz kalitesi yani tabakalar arası dayanım ve işleme koşullarından etkilenmektedir. Matkap delik çıkışına yaklaştığında, matkabın altındaki kesilmemiş tabakalar, kalınlığın azalması nedeniyle deformasyona ve özellikle bu alanın eğilmesine karşı daha hassas hale gelir. Sonrasında, katmanlar arası gerilme, katmanlar arası dayanımı aştığında delaminasyon meydana gelmektedir. Alt yüzeydeki kırılma, eksenel kuvvetler ve bükülme sebebiyle hem Mod I

açılma (Opening) hem de Mod II kayma (Sliding shear) mekanizmaları ile oluşur. Delme sırasında üretilen itme kuvvetini telafi edebilen bir destek kuvveti ve en alt tabakayı destekleyen başka bir tabakanın olmaması nedeniyle delik çıkışında oluşan delaminasyon, delik girişinde oluşandan daha kritiktir (Geng vd. 2019, Xu vd. 2022).



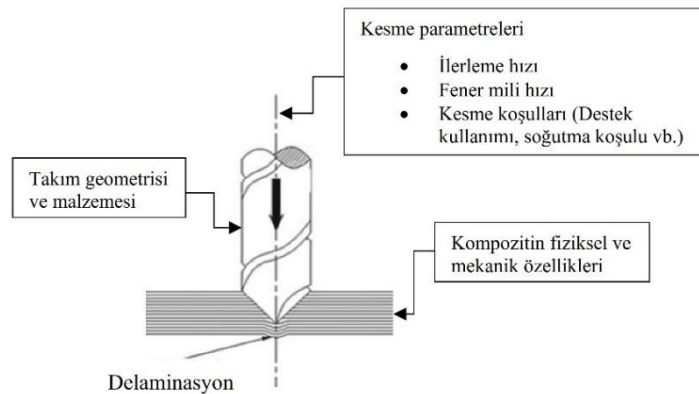
Şekil 2.11 Kompozitlerin delinmesi sırasında oluşan delaminasyon mekanizması, (a) delik girişi, (b) delik çıkışı (Geng vd. 2019).

Delik yüzeyindeki kusurların oluşumu ise iki durumla ilişkilendirilmektedir. Bu durumun ilki delik şekliyle ilgili iken, ikincisi ise yüzeydeki matrisin bozulmasıyla ilgilidir. İlk durum, matkabın ana kesme kenarlarının etkisi altında, elyafın kırılmadan önce deformasyona uğramasıyla açıklanabilir. İkinci durum ise, temel olarak seçilen ilerleme hızı, takım geometrisi, kompozit malzemenin anizotropisi ve soğutma sıvısı kullanımı arasındaki etkileşimden kaynaklanır. Matris bozulması ve delik duvarında gözlemlenen pull-out, elyaf yönü ile kesme yönü arasında ölçülen bağıl açıdan güçlü bir şekilde etkilenmektedir (Krishnaraj vd. 2013). Bu sebeple delik içi yüzeyinde Şekil 2.12’de görüldüğü üzere farklı tipte hasar görmüş bölgeler oluşabilir.



Şekil 2.12 Elyaf oryantasyonuna ve yerleşimine bağlı olarak delik içinde oluşan farklı hasar bölgeleri, (a) teğet kazıma bölgesi (tangent scraping zone), (b) yolma bölgesi (plucking zone), (c) elyafa dik kesme bölgesi (cutting zone of perpendicular to fiber) ve (d) kademeli teğet kazıma bölgesi (stepped tangent scraping zone) (Gemi vd. 2020b).

Kompozitler delinirken ortaya çıkan bu hasarlar üzerinde itme kuvveti önemli bir rol oynamaktadır. Özellikle literatürdeki birçok çalışmada delik çıkış delaminasyonunun büyüklüğü ile itme kuvveti arasında önemli bir ilişki olduğu vurgulanmıştır (Geng vd. 2019). Bu sebeple konvansiyonel delik delmede itme kuvvetinin düşürülmesi büyük önem arz eder. Şekil 2.13'te konvansiyonel delik delme prosesinde itme kuvvetini etkileyen parametreler gösterilmiştir. Birçok araştırmacı, delme sırasında oluşan itme kuvvetini azaltmak veya delaminasyon başlangıcından sorumlu olan kompozitin kritik itme kuvvetini artırarak hasar oluşumunu geciktirmek için kesme parametrelerin optimizasyonu dahil olmak üzere çeşitli delaminasyon bastırma teknikleri üzerine çalışmışlardır (Lih ve Azmi 2021).



Şekil 2.13 İtme kuvvetini etkileyen parametreler (Lih ve Azmi 2021).

2.4 Literatür Taraması

Bu başlık altında önce elyaf takviyeli kompozit plakaların ve boruların delinmesi üzerine yapılmış çalışmalar incelenmiş ve bu çalışmalardan elde edilmiş sonuçlar özetlenmiştir. Ardından, elyaf takviyeli kompozit plakalarda delik delme işleminin mekanik özelliklere etkisi konusunda yapılan çalışmalar ve kompozit boruların mekanik karakterizasyonu üzerine yapılan çalışmalar özetlenmiş ve ayrıca incelenen çalışmaların özetleri tarih sırasına göre çizelgelerde sunulmuştur.

2.4.1 Elyaf Takviyeli Kompozit Plakalarda Delik Delme Prosesi Üzerine Yapılan Çalışmalar

Elyaf takviyeli plastiklerin işlenebilirliği üzerine yapılan ve açık literatürde taranan çalışmalar 1980'li yıllardan başlayıp günümüze kadar uzanmaktadır. König vd. (1985) elyaf takviyeli kompozitlerin frezeleme, delik delme gibi konvansiyonel metotlarla işlenebilirliğinin yanı sıra su jeti ve lazer kesim gibi modern işleme metotları ile kesilmesi üzerine kapsamlı bir çalışma yapmışlardır. Çalışmada cam, karbon ve aramid fiber takviyeli plastiklerin işlenebilirliği detaylı olarak incelenmiştir. Keskin kesme kenarlarına sahip karbür ya da PCD kesici takım kullanılması durumunda kompozitlerin mekanik delme ve frezeleme performansının daha iyi olduğu, özellikle ince plakalar için su jeti ile kesme metodunun uygulanabileceği ancak lazer kesimin malzeme üzerinde termal hasar oluşturduğu vurgulanmıştır. Daha önce de belirtildiği üzere delik delme yöntemleri arasında endüstride en yaygın kullanılan yöntem konvansiyonel delik delme prosesi olduğu için literatürdeki çalışmaların büyük çoğunluğu kompozit plakaların konvansiyonel delinmesi üzerine odaklanmış ve bu çalışmalarda araştırmacılar genellikle delme kaynaklı hasarların özellikle de delaminasyon hasarının modellenmesi, karakterize edilmesi ve azaltılması konusuna odaklanmışlardır. Ho-Cheng ve Dharan (1990) kompozitleri delme sırasında oluşan delaminasyon mekanizmasını analitik yaklaşımla incelemiş ve modellemişlerdir. Hem delik girişi hem de delik çıkışında oluşan delaminasyon için yapılan modelde çıkışta oluşan delaminasyon, deneysel veriler ile doğrulanarak delaminasyonun başlangıcından sorumlu olan kritik itme kuvveti ile ilişkilendirilmiştir. Jia vd. (2020) tarafından yapılan çalışmada ise termal etkiler de dikkate alınarak karbon elyaf takviyeli plastiklerin delinmesi sırasında oluşan

delaminasyon analitik olarak incelenmiştir. Analitik model ayrıca nümerik ve deneysel olarak doğrulanmıştır. Kritik itme kuvvetinin sıcaklıktan önemli ölçüde etkilendiğini, sıcaklık arttıkça kuvvetin azaldığını ve delik çıkışında sıcaklığın artması sebebiyle delaminasyonun kolayca oluştuğunu bildirmişlerdir. Zhang ve Xu (2021) ise karbon elyaf takviyeli plastiklerin delinmesinde oluşan delaminasyonu Gauss süreç regresyonu modeli ile kesme parametrelerine bağlı olarak tahmin etmişler ve bu modelin yüksek doğrulukta ve hızlıca delaminasyonu tahmin edebildiğini vurgulamışlardır.

Delik delme kaynaklı delaminasyonun seviyesinin belirlenmesi ve karakterize edilmesi konusunda ise ilk çalışma Chen (1997) tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada karbon elyaf takviyeli plastiklerin delinmesi sırasında oluşan delik delme prosesi kaynaklı delaminasyon seviyesinin analiz edilmesi ve kolayca kıyaslanması için bir metot önerilmiştir. Bu metoda göre maksimum hasarlı bölgenin çapının deliğin nominal çapına bölünmesiyle delaminasyon faktörü adı verilen ve hasarın seviyesini belirten birimsiz parametre elde edilmektedir. Önerilen bu metot, kolaylığı sebebiyle birçok araştırmacı tarafından kullanılmıştır. Düzeltilmiş delaminasyon faktörü adı verilen dijital görüntü işleme dayalı bir başka metot ise Davim vd. (2007) tarafından önerilmiştir. Önerilen bu yöntem ile hem Chen (1997) tarafından önerilen konvansiyonel delaminasyon faktörü dikkate alınmış, hem de hasarlı alanın genişliği dikkate alınmıştır. Xu vd. (2018) ise karbon elyaf takviyeli plastiklerin delinmesi sırasında oluşan hasarların değerlendirilmesi için yeni bir yöntem önermişlerdir. Bu yöntemde çapak ve yırtılmalar dijital optik mikroskop ile gözlemlenip seviyesi dijital görüntü işleme ile belirlenirken, delaminasyon ise yüksek frekanslı ultrasonik transdüser ile donatılmış Taramalı Akustik Mikroskop (SAM) kullanılarak karakterize edilmiştir. Yöntemin uygulanabilirliği deneysel olarak farklı matkaplar ile test edilmiş ve elde edilen sonuçlar bu yöntemin delme kaynaklı hasarları değerlendirmede başarılı olduğunu göstermiştir. Kompozitlerin delinmesinde oluşan delaminasyon ve çapağın karakterizasyonu ve birbirinden ayırt edilmesi için Khashaba (2022) AutoCAD görüntü işleme adımı verdiği dijital görüntü işleme temelli yeni bir yöntem önermiştir. Bu yöntem ile çapak ve delaminasyon nominal delik çapından kolayca ayrılabilmiş ve hassas olarak ölçülebilmıştır. Önerilen yöntem cam elyaf takviyeli plastiklerin delinmesinde deneysel olarak test edilmiştir.

Literatürdeki çalışmalarda delik delme kaynaklı delaminasyona ek olarak itme kuvveti, delik içi hasarı ile yüzey kalitesi ve takım aşınması elyaf takviyeli kompozitlerin işlenebilirliğinin değerlendirilmesinde yaygın olarak kullanılan diğer parametrelerdir. Bu sonuç parametreleri, kesme hızı ve ilerleme hızı, kesme koşulları, kullanılan kesici takım ve iş parçası yani kompozit malzemedan etkilenmektedir.

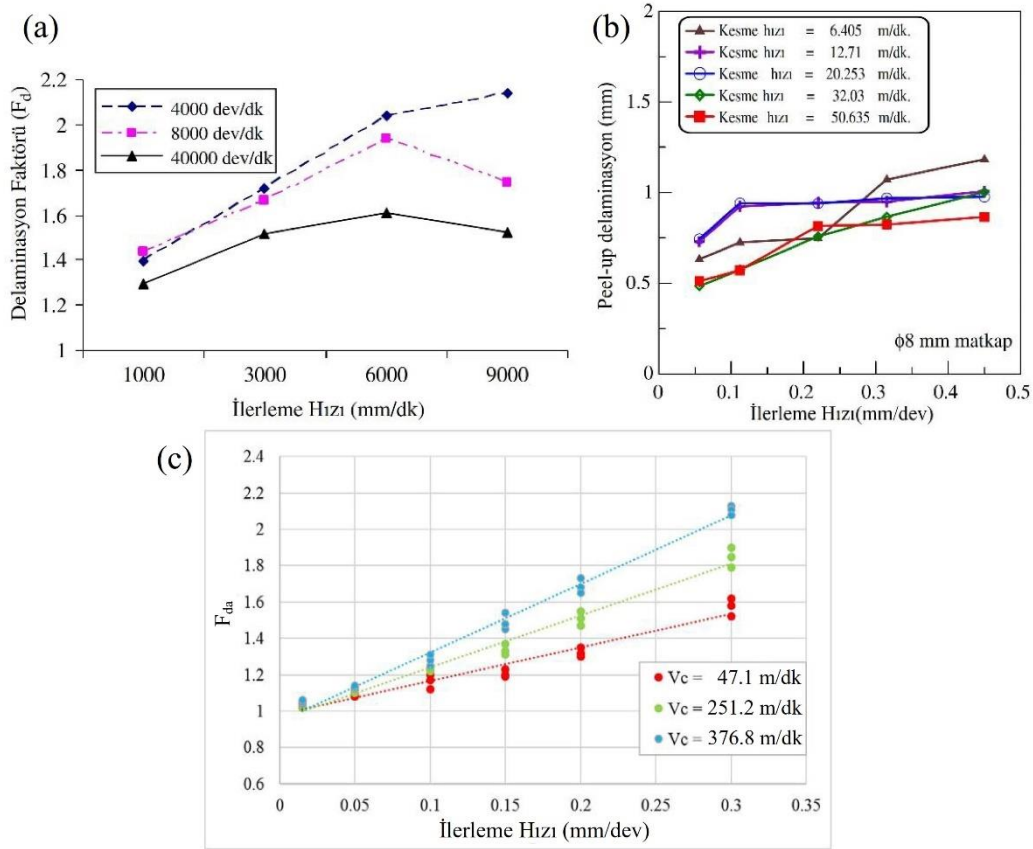
2.4.1.1 Kesme Hızı ve İlerleme Hızının Etkisi

Kesme hızı ve ilerleme hızı, itme kuvveti ve delaminasyonu etkileyen önemli kesme parametreleridir. Uygun kesme ve ilerleme hızı seçimi ile itme kuvveti düşürülerek kompozit üzerinde daha az hasar oluşması sağlanmaktadır. Bu sebeple birçok araştırmacı kesme parametrelerinin prosese etkisi üzerine çalışmalar yapmışlardır. Literatürdeki çalışmaların çoğunda ilerleme hızının artmasıyla itme kuvveti ve delaminasyonun da arttığı belirtilmiştir. Ancak kesme hızının etkisi üzerine farklı sonuçlar rapor edilmiştir. Bazı çalışmalarda kesme hızı/iş mili hızı arttıkça hasar azalırken (Şekil 2.14a), bazı çalışmalarda ise hasar artmıştır (Şekil 2.14c). Öte yandan, literatürdeki bazı çalışmalarda ise kesme hızının hasar üzerinde etkisiz olduğu belirtilmiştir (Şekil 2.14b) (Geng vd. 2019). Bu sebeple ilerleme hızının etkisi net iken kesme hızının etkisinin ise diğer faktörlere bağlı olarak değiştiği söylenebilir. Campos Rubio vd. (2008) cam elyaf takviyeli plastiklerin yüksek hızda delinmesinde oluşan delaminasyon hasarı üzerine bir çalışma yapmışlardır. Çalışma sonucunda düşük fener mili hızında yapılan testlerde hasarın ilerleme hızı ile arttığını ancak yüksek hızlı delmede durumun böyle olmadığını, delaminasyon hasarının matristeki yumuşama ile yüksek hızda oluşan sıcaklık tarafından domine edildiğini vurgulamışlardır. Khashaba vd. (2010) cam elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin delinmesinde ilerleme hızı, kesme hızı ve matkap çapının itme kuvveti, delaminasyon seviyesi, yüzey pürüzlülüğü ve malzemenin yük taşıma kabiliyetine etkisini araştırmışlardır. Delaminasyonun ilerleme hızı ve matkap çapına bağlı olarak arttığını ayrıca ilerleme hızının artışıyla itme kuvvetinin arttığını ve dolayısıyla delaminasyonun arttığını buna bağlı olarak malzemenin yük taşıma kabiliyetinin de azaldığını belirtmişlerdir.

Bazı araştırmacılar ise elyaf takviyeli kompozitlerin delinmesinde kesme parametreleri ile kesme kuvvetleri arasında ampirik bir ilişki kurmak ve kesme parametrelerini optimize

etmek amacıyla ANOVA, regresyon analizi gibi istatistiksel yöntemler kullanmışlardır. İlerleme hızı ve kesme hızının optimize edilmesi, delik delme kaynaklı kusurların, itme kuvvetinin, yüzey pürüzlülüğünün ve takım ömrünün iyileştirilmesi için önemli bir adımdır (Panchagnula ve Palaniyandi 2018). Enemuoh vd. (2001) karbon elyaf takviyeli termoset kompozitlerde hasarsız delikler elde etmek amacıyla Taguchi ve çok amaçlı optimizasyon metotları ile kesme parametrelerinin optimizasyonu üzerine bir çalışma yürütmüşlerdir. Daha az hasarlı ve daha kaliteli delikler elde etmek için yüksek kesme hızı ve düşük ilerleme hızları kullanılmasını önermişlerdir. Arul vd. (2006) cam elyaf takviyeli plastiklerin delinmesinde proses parametrelerinin optimizasyonu üzerine bir çalışma yapmışlardır. Çalışmada itme kuvveti, tork ve takım ömrü veri işleme grup yöntemi ile analiz edilmiştir. Krishnaraj vd. (2012) karbon elyaf takviyeli plastiklerin yüksek hızda delinmesinde kesme parametrelerinin optimizasyonu üzerine çalışmışlardır. Delik çapı, dairesellik ve delaminasyon değerlendirilerek işlenebilirlik incelenmiştir. Ayrıca, Genetik Algoritma (GA) ile optimum kesme parametreleri tespit edilmiştir. Düşük ilerleme hızlarının itme kuvveti ve delik çıkış delaminasyonunu düşürdüğünü, yüksek ilerleme hızlarının ise nominal delik çapına daha yakın delikler elde etmede daha önemli olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca, iş mili hızının dairesellik üzerinde baskın bir etkisi olduğu da bildirilmiştir.

İlerleme hızının itme kuvveti ve delaminasyon üzerindeki önemli etkisini göz önüne alarak hasarların azaltılması ve delik çıkış delaminasyonunun baskılanmasıyla amacıyla bazı araştırmacılar tarafından değişken ilerleme hızı stratejisi ile delme yöntemi önerilmiştir. Bu yöntemde genellikle ilerleme hızı, delme prosesi boyunca sabit olmayıp, delik bitimine yaklaşırken düşürülmektedir. Sorrentino vd. (2018) cam ve karbon elyaf takviyeli plastiklerin delinmesinde değişken ilerleme hızı stratejisini kullanmışlardır. Bu yöntem ile delik delmenin son aşamasında ilerleme hızı azaltılarak itme kuvvetinin azaltıldığını ve buna bağlı olarak delik çıkışında oluşan delaminasyonun da azaldığını bildirmişlerdir. Shuaipu ve Jie (2022) ise karbon elyaf takviyeli plastiklerin delinmesinde sinüs eğrisi şeklinde değişen ilerleme hızı stratejisini uygulamışlardır. Bu strateji ile sabit ilerleme hızıyla yapılan deneylere kıyasla itme kuvveti delik çıkışı yakınlarında düşürülmüş ve delaminasyonun yanı sıra yüzey kalitesi de önemli ölçüde iyileştirilmiştir.



Şekil 2.14 Cam elyaf takviyeli plastiklerin delinmesinde delik girişinde oluşan hasarın kesme parametrelerine bağlı değişimi, (a) iş mili hızının artmasıyla hasarın azalması (Campos Rubio vd. 2008), (b) kesme hızının hasar üzerinde etkisiz olması (Khashaba vd. 2010), (c) kesme hızının artmasıyla hasarın da artması (Sorrentino vd. 2018).

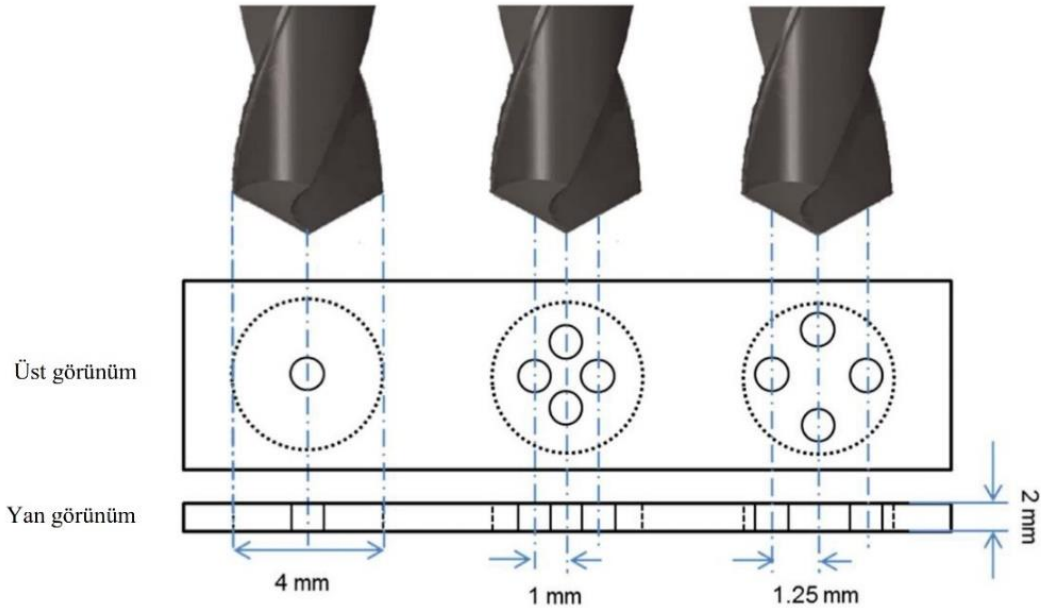
2.4.1.2 Kesme Koşullarının Etkisi

İtme kuvveti ve delik delme kaynaklı hasarları azaltmak amacıyla araştırmacılar farklı yöntem arayışına girmişlerdir. Bu kapsamda elyaf takviyeli plastiklerin delme sırasında destek kullanma (Dogrusadik ve Kentli 2017, Heidary ve Mehrpouya 2019), pilot delik delme (Wang vd. 2017), helisel frezeleme ile delme (Pereszalai vd. 2021), kriyojenik işleme (Basmaci vd. 2017, Khanna vd. 2020) ve ultrasonik titreşim destekli delme (Zheng vd. 2019, Cao vd. 2022, Feng ve Jiao 2022) gibi yöntemler kullanılmıştır.

Yüksek itme kuvvetleri kompozitlerin delinmesi sırasında oluşan hasarların temel sebebidir. Optimize edilmiş kesme parametreleri ve uygun takım seçimi ile itme kuvveti minimize edilebilmekte ve hasarlar bir yere kadar baskılanabilmektedir. Destek kullanımı, imalat sektöründe kullanılan diğer stratejilere kıyasla, hasarları azaltmada en

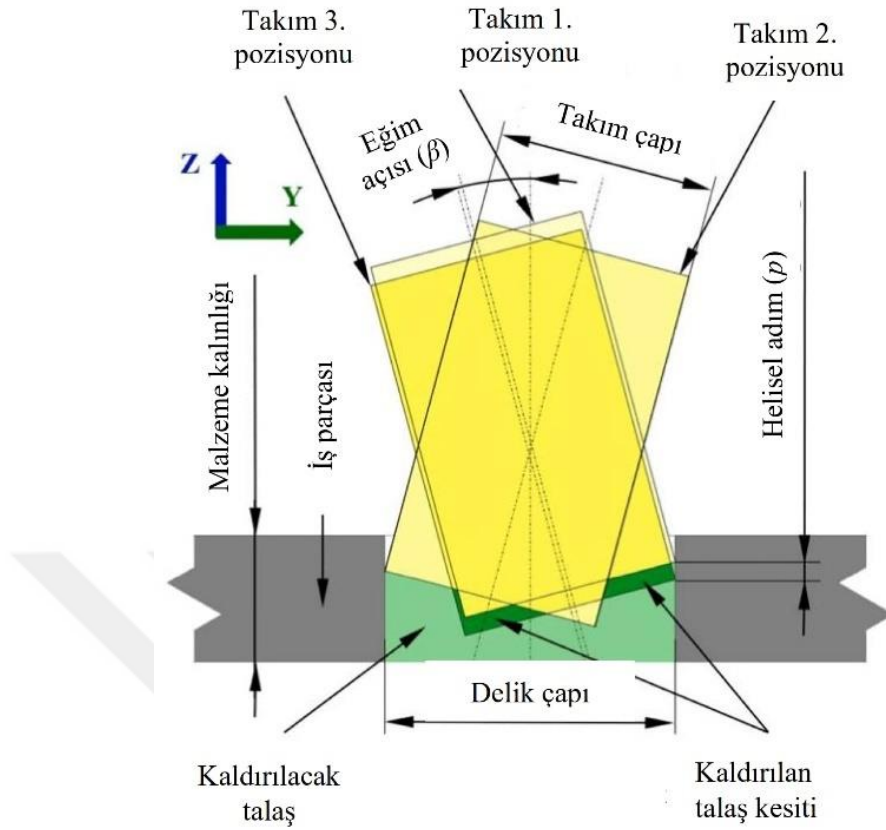
yaygın kullanılan tekniklerden biridir. Delaminasyon alanını ve çapak boyutunu etkili bir şekilde azaltmak için, bazı araştırmacılar bu yönteme odaklanmışlardır (John ve Thirumalai Kumaran 2020). Doğrusadık ve Kentli (2017) destek plakası kullanımının karbon elyaf takviyeli plastiklerin mikro delinmesindeki etkisini karşılaştırmalı olarak incelemişlerdir. Malzeme üst kısmı için metal, alt kısmı için fenolik ve ahşap destek plakaları kullanılarak deneyler gerçekleştirilmiştir. Prosesin mikro boyuta inmesi sebebiyle delaminasyon davranışının konvansiyonel delmeden farklı olduğunu, girişte destek plakası kullanımıyla giriş delaminasyonunun azaldığını ancak bu durumun farklı türde başka bir hasar meydana getirdiğini belirtmişlerdir. Ayrıca, ilk deliklerde artış olsa da daha sonraki deliklerde, çıkışta destek plakaları kullanımı ile hasarın azaldığını rapor etmişlerdir. Heidary ve Mehrpouya (2019) ise kompozit plakaların delinmesinde destek plakası kullanımının etkisini analitik ve deneysel olarak analiz etmişlerdir. Analitik model ile matkap çapı, radyal ağız uzunluğu ve destek plakasının kritik itme kuvveti üzerindeki etkileri incelenmiş ve model cam elyaf takviyeli kompozit üzerinde deneysel olarak doğrulanmıştır. Destek kullanımının kritik itme kuvveti üzerinde önemli bir etkisi olduğunu ve kritik itme kuvvetini arttırdığını bildirmişlerdir.

Literatürde matkap radyal ağızının, delik delme sırasında oluşan itme kuvvetine %60 oranında katkı sağladığı bildirilmiştir. Pilot delik stratejisiyle radyal ağızın neden olduğu kuvvet artışı azaltılabilmektedir (Patel ve Chaudhary 2021). Bu amaçla Wang vd. (2017) karbon elyaf takviyeli plastiklerin yüksek hızlı delinmesinde pilot delik stratejisinin uygulanabilirliğini sonlu elemanlar yöntemi ile ve deneysel olarak araştırmışlardır. Şekil 2.15'te görüldüğü gibi CFRP plaka üzerine farklı desenlerde pilot delikler açılıp ardından konvansiyonel olarak delinmiştir. Bu strateji ile itme kuvveti pilot deliksiz duruma kıyasla %55'e varan oranda düşürülmüştür.



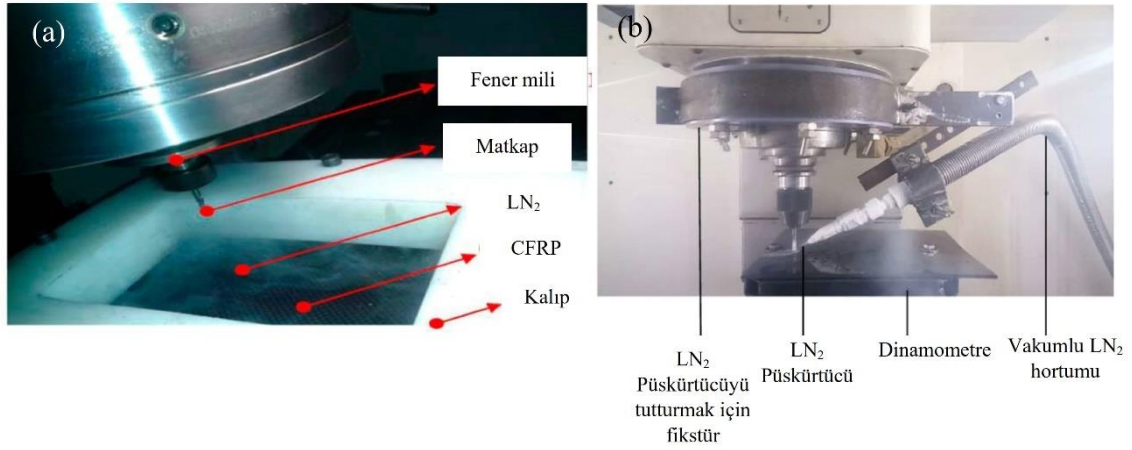
Şekil 2.15 Pilot delik stratejisi (Wang vd. 2017).

Konvansiyonel delik delme prosesine alternatif bir diğer metot helisel frezelemedir. Helisel frezeleme ile delik delme ya da bir diğer adıyla orbital delme yönteminde freze helisel bir takım yolu izleyerek deliği oluşturmaktadır. Bu prosesin kinematiği, kullanılan takım çapından bağımsız olarak ve takım değiştirmeden farklı çaplarda deliklerin açılmasına izin vermektedir. Bununla birlikte iyi talaş tahliyesi, daha az kuvvet, çapak ve delaminasyon oluşumu yöntemin diğer avantajlarından (Denkena vd. 2008). Bu avantajlar sebebiyle bazı araştırmacılar bu yöntem üzerine odaklanmışlardır. Voss vd. (2016) karbon elyaf takviyeli plastiklerin delinmesinde konvansiyonel delik delme ve orbital delme yöntemlerini kıyaslamışlardır. Orbital delmede daha düşük eksenel kuvvetlerin oluştuğu ayrıca daha az delik çıkış delaminasyonu ve delik içi hasarların oluştuğunu bildirmişlerdir. Öte yandan, proses zamanının orbital delmede daha fazla olduğu vurgulanmıştır. Pereszalai vd. (2021) ise yaptıkları çalışmada cam ve karbon elyaf takviyeli plastiklerin eğimli helisel frezeleme ile delinmesi prosesini (Şekil 2.16) analiz etmişlerdir. Adım ve eğim açısının itme kuvveti ve çapak oluşumunu önemli ölçüde etkilediğini bildirmişler ve prosesin yüksek eğim açısı ile yapılmasını önermişlerdir.



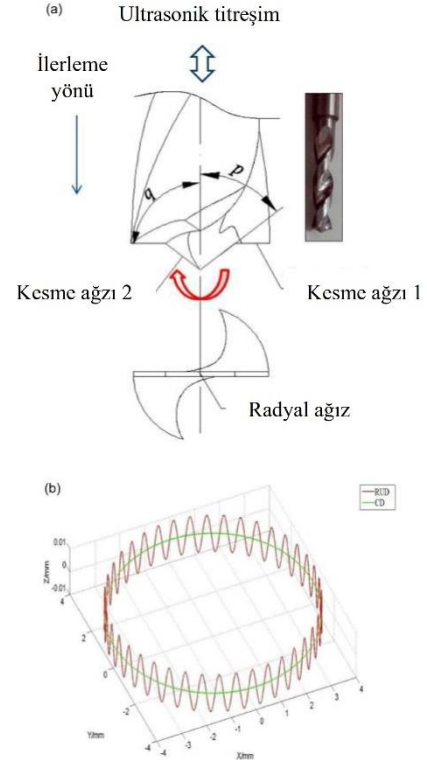
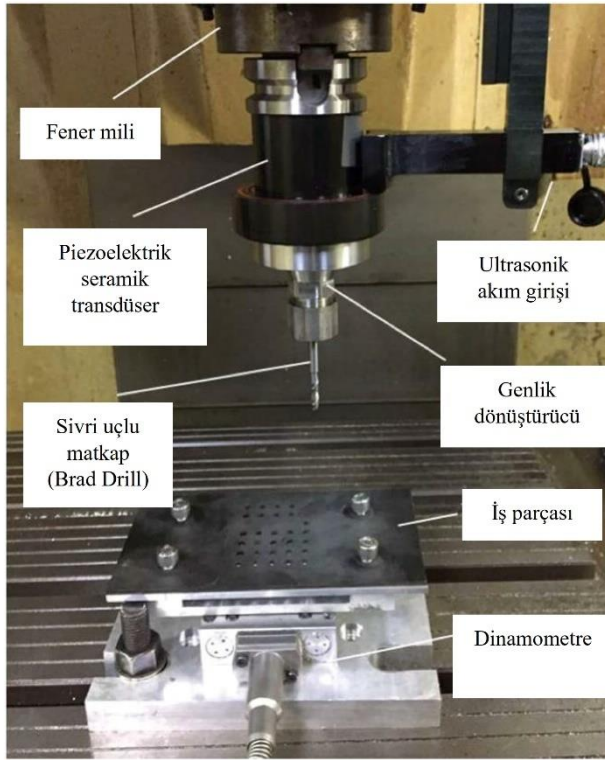
Şekil 2.16 Eğimli helisel frezeleme stratejisi (Pereszlai vd. 2021).

Nem soğurma karakteristiği sebebiyle elyaf takviyeli plastiklerin kırılma tokluğundaki azalma (Xu vd. 2022), araştırmacıları konvansiyonel kesme sıvılarını kullanmak yerine soğutma performansı iyi olan ancak kompozite zarar vermeyen yenilikçi yöntemleri kullanmaya teşvik etmiştir. Bu yöntemlerden biri de kriyojenik işlemdir. Basmacı vd. (2017) kriyojenliğe daldırarak işleme yaklaşımı (Şekil 2.17a) ile karbon elyaf takviyeli plastiklerin delinme performansını araştırmışlardır. İlerleme hızı ve matkap çapının kuru ve kriyojenik işleme koşullarında itme kuvveti, delaminasyon, yüzey kalitesi ve takım aşınması üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Çalışmanın sonucunda kriyojenliğe daldırarak işleme yöntemiyle yüzey kalitesi ve takım aşınmasında iyileşme olduğunu ancak itme kuvveti ve delaminasyonun arttığını bildirmişlerdir. Khanna vd. (2020) karbon elyaf takviyeli plastiklerin delinmesinde kriyojenik püskürterek işleme yöntemi (Şekil 2.17b) üzerine çalışmışlardır. Bu yöntem ile kuru koşulda işlemeye kıyasla delik yüzey pürüzlülüğü ile delik giriş delaminasyonunun önemli ölçüde azaldığı, ancak delik çıkış delaminasyonunun kriyojenik delik altına ulaşmadığından dolayı arttığı bildirilmiştir.



Şekil 2.17 Kriyojenik koşulda delik delme, (a) kriyojenliğe daldırarak işleme yöntemi (Basmacı vd. 2017), (b) kriyojenik püskürterek işleme yöntemi (Khanna vd. 2020).

Özellikle son yıllarda ön plana çıkan delik delme yöntemlerinden biri de titreşim destekli delik delme stratejisidir. Bu yöntemde mekanik ya da piezoelektrik bir osilatör yardımıyla takıma salınım hareketi vererek aralıklı bir kesim işlemi yaptırılır. Bunun sonucunda itme kuvvetinde kayda değer bir düşüş sağlanır ayrıca talaş tahliyesi için de avantaj sağlar. Titreşim frekansına göre düşük frekanslı titreşim destekli delme ya da ultrasonik titreşim destekli delme olarak adlandırılmaktadır (Geng vd. 2019). Zheng vd. (2019) karbon elyaf takviyeli plastiklerin sivri uçlu matkap (Brad drill) kullanılarak dönel ultrasonik işleme yöntemi ile delinmesinde oluşan itme kuvvetini teorik olarak analiz etmişler ve teorik modeli deneysel olarak doğrulamışlardır. Çalışmada kullanılan deney düzeneği ve ultrasonik delmenin kinematiği Şekil 2.18’de gösterilmiştir. Ultrasonik işleme ile konvansiyonel delmeye kıyasla daha düşük itme kuvvetlerinin oluştuğunu, ayrıca itme kuvvetinin ilerleme hızına bağlı olarak artarken iş mili hızının artmasıyla ise azaldığını bildirmişlerdir. Cao vd. (2022) ise karbon elyaf takviyeli plastiklerin ultrasonik titreşim destekli delme metoduyla elmas aşındırıcılı karot matkap ucu ya da diğer adıyla delik testeresi kullanılarak delinmesinde, analitik bir delaminasyon tahmin modeli oluşturmuşlardır. Bu modeli deneyler ile doğrulayarak yöntemin efektif olduğunu göstermişlerdir. Feng ve Jiao (2022) karbon elyaf takviyeli plastiklerin ultrasonik titreşim destekli delme yöntemiyle delinmesinde delik çıkış hasarının analizi üzerine bir çalışma yapmışlardır. Genlik ve ilerleme hızı sabit iken, çıkıştaki çapakların iş mili hızı ile arttığını ancak iş mili hızı düşüken konvansiyonel delmeye kıyasla ultrasonik destekli delmenin daha düşük delaminasyon oluşturduğunu bildirmişlerdir.

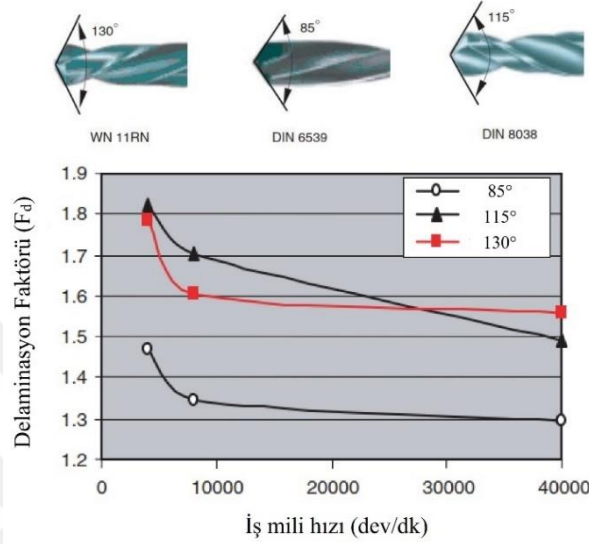


Şekil 2.18 Ultrasonik titreşim destekli delme prosesi ve proses kinematığı (Zheng vd. 2019).

2.4.1.3 Takım Geometrisi ve Malzemesinin Etkisi

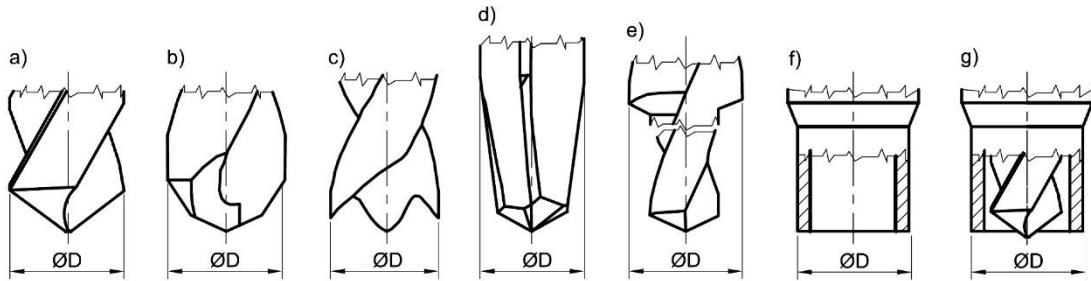
Standart bir helisel matkabın çapı, uç açısı, helis açısı, radyal ağız ve talaş açısı elyaf takviyeli plastiklerin delinmesi sırasında oluşan itme kuvveti, tork ve delaminasyon oluşumu üzerinde büyük bir etkiye sahiptir (Panchagnula ve Palaniyandi 2018). Bu sebeple bazı araştırmacılar standart matkap geometrisi parametrelerinin etkisini araştırmışlardır. Jain ve Yang (1993) ilerleme hızı ile radyal ağız ve uç açısı gibi matkap geometrisi parametrelerinin itme kuvveti ve delaminasyon üzerindeki etkilerini analitik ve deneysel olarak incelemişlerdir. Bu çalışmada HSS takım kullanıldığı ancak bu takımların 5 kez delik delme yapıldıktan sonra aşınma sebebiyle yavaş yavaş itme kuvvetinde değişikliğe sebep olduğu vurgulanmıştır. Ayrıca uç açısından ziyade radyal ağızın itme kuvveti üzerinde daha fazla etkisi olduğu ve değişken ilerleme hızı stratejisi ile delaminasyon hasarında önemli düzeyde azalma olduğu belirtilmiştir. Palanikumar vd. (2008) ise cam elyaf takviyeli plastiklerin yüksek hızla delinmesinde ilerleme hızı, iş mili hızı ve takım uç açısı parametrelerinin delaminasyon oluşumu üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Düşük iş mili hızlarında yapılan delme işleminde ilerleme hızındaki

artışla delaminasyonun arttığını ancak yüksek hızlı delmede ilerleme hızının artmasıyla delaminasyonun artmadığını vurgulamışlardır. Ayrıca 85° uç açısına sahip takımın 130° ve 115° uç açısına sahip takımlardan daha az delaminasyon oluşturduğunu tespit etmişlerdir (Şekil 2.19).



Şekil 2.19 Helisel matkap uç açısının delaminasyon üzerindeki etkisi (Palanikumar vd. 2008).

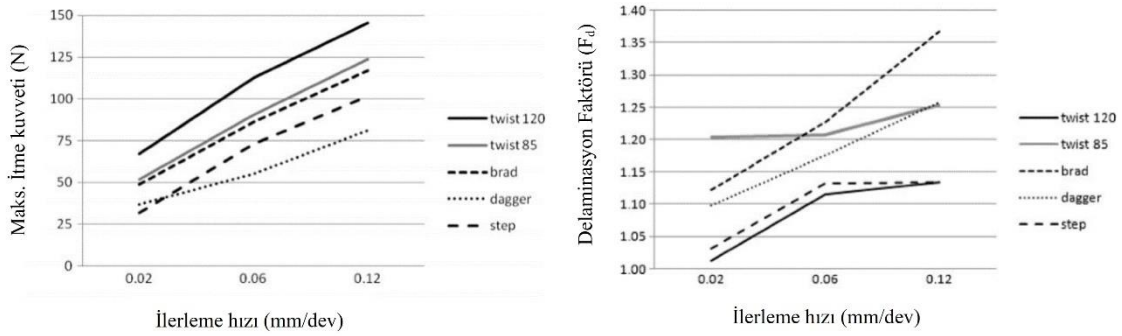
Birçok araştırmacı ise özel geometrili matkapların elyaf takviyeli plastiklerin delinmesindeki performansını araştırmışlardır. Özellikle son yıllarda yeni matkap geometrileri tasarlanıp kompozitlerin delinmesindeki etkileri araştırılmıştır. Karbon elyaf takviyeli plastiklerin delinmesi için kullanılan bazı matkap tipleri Şekil 2.20’de verilmiştir.



Şekil 2.20 Karbon elyaf takviyeli plastiklerin delinmesi için kullanılan bazı matkap tipleri, (a) konvansiyonel helisel matkap (twist drill), (b) çift uç açılı helisel matkap (double point angle twist drill), (c) sivri uçlu matkap (brad and spur (candlestick) drill), (d) açılı rayba matkabı (dagger (one-shot) drill), (e) kademeli matkap (step drill), (f) karot matkap (core drill), (g) özel karot matkap (special core drill) (Geier vd. 2019).

Durão vd. (2010) farklı matkap geometrilerinin kompozitlerin delinmesinde itme kuvveti, delik yüzey pürüzlülüğü ve delaminasyon oluşumu üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Çalışmada 85° ve 120° uç açılara sahip helisel, sivri uçlu (brad), açılı rayba (dagger) ve kademeli (step) matkaplar kullanmışlardır. Takım geometrisinin hem itme kuvveti hem de delaminasyon üzerinde etkili olduğunu, ancak kullanılan matkaba göre ilerleme hızının delaminasyon üstündeki etkisinin farklılaştığını bildirmişlerdir. Şekil 2.21’de farklı matkap geometrilerinin itme kuvveti ve delaminasyon üzerindeki etkileri verilmiştir. Lazar ve Xirouchakis (2011) karbon ve cam elyaf takviyeli plastiklerin delinmesi sırasında oluşan kuvvetin iş parçası ve takım boyunca dağılımını farklı takımlar (Açılı rayba matkabı (tapered drill-reamer ya da one-shot drill), sekiz kesici ağızlı helisel matkap (8-facet twist drill) ve helisel matkap) kullanarak detaylı olarak incelemişlerdir. En yüksek kuvvetin radyal ağız civarında takım ucunda meydana geldiğini, ayrıca tabaka başına düşen yükün temel olarak ilerleme hızı ve takım geometrisinden etkilendiğini tespit etmişlerdir. Karpat vd. (2012) çift uç açılı matkapların karbon elyaf takviyeli plastiklerin delinmesindeki performansını deneysel olarak araştırmışlardır. Çalışma kapsamında kaplamasız ve kaplamalı farklı uç açılara sahip takımlar, itme kuvveti ve tork oluşumuna göre değerlendirilmiştir. İlerleme hızının kesme hızından daha önemli olduğunu, yüksek ilerlemelerde delik çapı toleransının delik çıkış delaminasyonundan daha kritik olduğunu gözlemlemişlerdir. Jia vd. (2016) karbon elyaf takviyeli kompozitlerin delinmesinde kesme davranışını değiştirip hasarı azaltan yeni bir matkap geometrisi önermişlerdir. Önerilen bu matkap, standart bir one-shot matkabın üzerine testere dişlerine benzer kesme kanalları açılıp modifiye edilerek yapılmış bir takımdır. Yaptıkları teorik ve geometrik analizlerde bu takım ile kesme mekanizmasının aşağıdan yukarıya doğru değiştiğini ve dolayısıyla delik çıkışındaki delaminasyonun azaldığını göstermişler ve deneyler ile teorik sonuçları doğrulamışlardır. Qiu vd. (2018) kademeli matkap geometrisinin karbon elyaf takviyeli plastiklerin delinmesinde itme kuvveti ve delik hasarına olan etkisini deneysel olarak araştırmışlardır. Kademeli matkabın daha düşük itme kuvveti ve hasar oluşturarak helisel matkaptan daha iyi performans sağladığını bildirmişlerdir. Feito vd. (2019) farklı matkap tiplerinin (helisel, sivri uçlu (brad center), kademeli (step) ve rayba (reamer)) karbon elyaf takviyeli plastiklerin delinmesinde itme kuvveti, tork ve delaminasyon hasarı üzerine etkilerini incelemişlerdir. Ayrıca yanıt yüzey metodu ve varyans analizi ile giriş ve çıkış parametreleri arasındaki

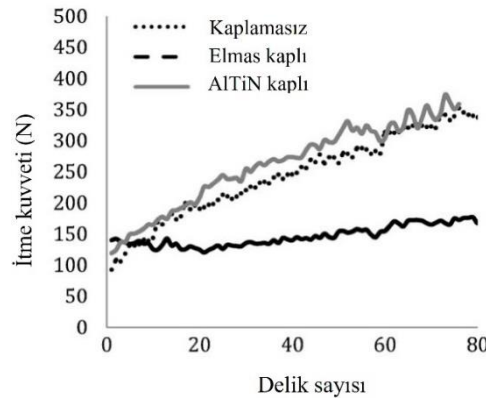
ilişkiyi analiz etmişler ardından çok amaçlı optimizasyon stratejisi ile optimum parametreleri belirlemişlerdir. Takım geometrisinden bağımsız olarak ilerleme hızının itme kuvveti ve delik çıkış delaminasyonu üzerinde etkili olduğu, ancak kesme hızının geometriye göre seçilmesi gerektiğini vurgulamışlardır. Helisel ve rayba takımlar için yüksek kesme hızının, kademeli ve sivri uçlu matkaplar için düşük kesme hızlarının iyi bir seçim olduğu belirtilmiştir. Kong vd. (2021) karbon elyaf takviyeli plastiklerin delinmesinde delik hasarlarını minimize etmek ve işlenebilirliği geliştirmek için helisel frezeleme ve kademeli matkabın avantajlarını birleştirerek yeni bir kesici takım önermişlerdir. Bu takım kullanılarak yapılan orbital delme işlemiyle itme kuvvetinde ve delik hasarlarında önemli bir azalma olduğunu gözlemlemişlerdir. Xu vd. (2021) ise farklı geometrilere sahip takımların (candlestick ve kademeli (step) matkap) karbon elyaf takviyeli plastiklerin delinmesinde aşınma davranışlarını incelemişlerdir. Abrazyonun her iki takım için baskın aşınma türü olduğunu ve candlestick matkabın kademeli matkaba göre aşınmaya karşı daha dirençli olduğunu tespit etmişlerdir. Qiu vd. (2022b) üç farklı tipteki matkapların (çift uç açılı (double point angle), kademeli (stepped) ve ters kenarlı (reverse edge compound)) karbon elyaf takviyeli plastiklerin delinmesinde takım ömrü üzerine çalışmışlardır. Maksimum takım aşınmasının dış köşelerde meydana geldiğini, ters kenarlı matkabın itme kuvveti, delaminasyon faktörü ve çapak yönünden daha iyi sonuçlar verdiğini bildirmişlerdir.



Şekil 2.21 Farklı matkap geometrilerinin itme kuvveti ve delaminasyon üzerindeki etkisi (Durão vd. 2010).

Literatürde takım malzemeleri ve kaplamaların, takım aşınması üzerinde, dolayısıyla işlenmiş deliklerin mikro ve makro yapısı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu vurgulanmıştır (Geier vd. 2019). Takım malzemesi ve kaplamanın elyaf takviyeli plastiklerin işlenebilirliği üzerine bazı araştırmalar yapılmıştır. Davim ve Reis (2003)

karbon elyaf takviyeli plastiklerin HSS ve karbür kesici takımlar ile delinmesinde kesme parametrelerinin delaminasyon üzerindeki etkisini Taguchi ve ANOVA teknikleri ile analiz etmişlerdir. İki ağızlı karbür matkabın dört ağızlı matkaba göre kompozit üzerinde daha az hasar oluşturduğunu, ayrıca karbür takımların HSS takımlardan daha iyi performans sergilediğini ve bu malzemeler için daha iyi bir seçim olacağını bildirmişlerdir. Çelik vd. (2015) ise SiAlON seramik takımların karbon elyaf takviyeli plastiklerin delinmesinde aşınma davranışını deneysel olarak incelemişler ve aynı geometriye sahip WC-Co takım ile kıyaslama yapmışlardır. Karbür takımların aşınma direncinin daha iyi olduğunu ve buna bağlı olarak daha az itme kuvveti ve delaminasyon hasarı oluşturduğunu bildirmişlerdir. Isbilir ve Ghassemieh (2012) karbon elyaf takviyeli plastiklerin delinmesinde çok tabakalı TiAlN/TiN PVD kaplı karbür takımların performansını delaminasyon, itme kuvveti ve tork, yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınmasını dikkate alarak incelemişlerdir. İlerleme hızının sonuçlar üzerinde daha baskın bir parametre olduğunu, ayrıca delaminasyonun ve yüzey pürüzlülüğünün ilerleme hızındaki artışla artarken kesme hızındaki artışla azaldığını belirtmişlerdir. Wang vd. (2013) kaplamasız, elmas kaplı ve AlTiN kaplı karbür takımların karbon elyaf takviyeli plastiklerin delinmesinde aşınma davranışlarını incelemişlerdir. Temel aşınma tipinin metallerden farklı olarak kenar körelmesi (edge rounding) olduğunu gözlemlemişlerdir. Elmas kaplı takımın önemli seviyede aşınmayı azalttığı, ancak AlTiN kaplı takımın oksidasyon sebebiyle aşınmayı engelleyemediğini bildirmişlerdir. Öte yandan Şekil 2.22’de görüldüğü üzere ilk deliklerde kaplamasız takım, kenar yarıçapı sebebiyle daha düşük kuvvetler üretirken, delik sayısı arttıkça aşınma sebebiyle kuvvetlerin yükseldiğini ancak elmas kaplı takımda kuvvet artışının çok az olduğunu tespit etmişlerdir.



Şekil 2.22 Takım kaplama durumuna göre delik sayısına bağlı olarak itme kuvvetindeki değişim (Wang vd. 2013).

2.4.1.4 Kompozit Malzemenin Etkisi

Daha önce de belirtildiği üzere delaminasyon oluşumunu etkileyen en önemli sebeplerden birisi de tabakalar arası dayanımdır. Tabakalar arası dayanım üzerinde ise şüphesiz elyaf ve matris arasındaki yapışmanın etkisi büyüktür. Dolayısıyla takviye ya da matristeki farklılıklar işlenebilirlik karakteristiğini de etkileyecektir. Merino-Pérez vd. (2016) yaptıkları çalışmada kompozit bileşenlerinin yani matris ile elyaf takviyesinin ve kesme hızının itme kuvveti ve tork üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Sonuçlar termoset reçine tipinin itme kuvveti ve tork üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu, ancak karbon elyaf kumaş tipinin ve kesme hızının etkisinin ihmal edilebilir seviyede olduğunu göstermiştir. Mekanik işlemede, malzeme dayanımı ve hasar davranışının mekanik özellikler ve matrisin hasar mekanizması tarafından domine edildiğini ve buna bağlı olarak reçinenin itme kuvveti üzerinde önemli etkisi olduğunu vurgulamışlardır. Kaybal vd. (2020) ise bor nitrür nanopartikül katkısının karbon elyaf takviyeli plastiklerin delinmesinde delaminasyon üzerine etkisini araştırmışlar ve bor nitrür katkısının itme kuvvetini artırmasına rağmen delaminasyonu düşürdüğünü rapor etmişlerdir. Kim vd. (2022) matrisi yumuşatmak amacıyla iş parçasının ısıtılmasının karbon elyaf takviyeli plastiklerin delinmesinde takım aşınması ve delaminasyon üzerindeki etkisini araştırmışlardır. İş parçasına uygulanan ön ısıtma ile farklı sıcaklıklarda testleri gerçekleştirmişler ve deney sonuçlarına göre iş parçasının ısıtılmasıyla itme kuvvetinin önemli ölçüde azaldığını, daha az takım aşınması meydana geldiğini ve delik çıkış delaminasyonunun uygun sıcaklıkta ve yüksek ilerleme hızında azaldığını belirtmişlerdir.

Bazı araştırmacılar hibrit yani birden fazla takviye elemanı olan kompozitlerin delinebilme karakteristiğini araştırmışlardır. Tan vd. (2016) karbon/cam elyaf takviyeli hibrit kompozitlerin delinmesinde delaminasyon oluşumu ve yüzey kalitesini incelemişlerdir. İlerleme hızı ve matkap geometrisinin sonuçlar üzerinde önemli etkisi olduğunu vurgulamışlardır. Ayrıca yanıt yüzey metodunu kullanarak bir regresyon modeli oluşturmuşlar ve bu modeli deneysel olarak doğrulamışlardır. Köklü vd. (2017) fonksiyonel derecelendirilmiş kompozitlerin delinebilme performansını cam ve karbon elyaf takviyeli kompozitler ile kıyaslamışlardır. Fonksiyonel derecelendirilmiş kompozitlerin diğer kompozitlere kıyasla daha karmaşık bir davranış sergilediğini,

delaminasyonun malzemenin üst ve alt tabakalarındaki istiflemeye göre değişiklik gösterdiğini bu sebeple diğer kompozitler için önerilen kesme parametreleri ve kesici takımların fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerin delinmesi için uygun olmayacağını bildirmişlerdir. Köklü vd. (2019) fonksiyonel derecelendirilmiş kompozitlerin (FGC) delinmesinde itme kuvveti, delaminasyon ve titreşim oluşumunun Taguchi, ANOVA ve yapay sinir ağları (ANN) ile tahmini ve optimizasyonu üzerine bir çalışma yapmışlardır. Malzeme yönünün fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerin delinmesinde büyük öneme sahip olduğunu, ilerleme hızının ise itme kuvveti ve titreşim oluşumu üzerinde en önemli faktör olduğunu belirtmişlerdir. Lee vd. (2021) karbon/aramid elyaf takviyeli hibrit kompozitlerin delinebilme karakteristiğini analiz edip, karbon elyaf takviyeli plastik ile kıyaslamışlardır. Hibrit kompozit daha az itme kuvveti oluşturduğu ve takımı daha az aşındırdığı için işlenebilirliğinin daha iyi olduğu vurgulanmıştır.

Literatürdeki çalışmaların büyük çoğunluğunda sürekli elyaf takviyeli kompozitlerin kalınlık yönünde yani elyafa dik yönde delinebilme karakteristiği araştırılmıştır. Li vd. (2022a) ise tek yönlü karbon elyaf takviyeli plastiklerin tabakalar arası yönde delinmesinde itme kuvveti ve hasar mekanizmasını analitik olarak incelemiş ve oluşturulan modeli deneysel olarak doğrulamışlardır. Çalışmanın sonucunda tabakalar arası yönde yapılan delmede elyafın eğilmeye karşı direncinin daha iyi olduğunu, dolayısıyla elyafdaki eğilme deformasyonunun daha az olduğunu ancak radyal ağza gelen itme kuvvetinin daha yüksek olduğunu vurgulamışlardır. Geier vd. (2022) ise kırılmış karbon elyaf takviyeli plastiklerin farklı geometrili matkaplar kullanılarak konvansiyonel delinmesinde oluşan çapağın dijital görüntü işleme metoduyla belirlenmesi konusunda bir çalışma yapmışlardır. Çapağı tahmin etmek için geliştirilen dijital görüntü işleme bazlı bu metodu deneysel olarak doğrulamışlardır. Detaylı incelemeleri yapılan bu çalışmaların kullanılan deney parametreleri ve araştırma konusunu içeren özeti Çizelge 2.1’de verilmiştir.

Çizelge 2.1 Elyaf takviyeli kompozit plakalarda delik delme prosesi üzerine yapılan çalışmaların özeti.

Yazar ve yıl	İş parçası	Kesici takım ve kesme parametreleri	Araştırma konusu
Jain ve Yang. (1993)	Tek yönlü CFRP, K: 4,5 mm	Ø6,35 mm, HSS helisel matkap, n : 1200 dev/dk f : 0,001– 0,04 mm/dev	İtme kuvveti Delaminasyon
Chen (1997)	Çok yönlü CFRP,	Ø5 mm, HSS ve WC matkap, n : 3700 ve 10000 dev/dk f : 0,05 mm/dev	İtme kuvveti ve tork Delaminasyon
Enemuoh (2001)	CFRP BMS 8-256	Ø6,35 mm, 75°–160° uç açılı helisel matkap n : 1250–3250 dev/dk f : 63,5–165,1 mm/dk	İtme kuvveti Delaminasyon Yüzey kalitesi Optimizasyon
Davim ve Reis (2003)	0°/90° CFRP, K:4 mm	Ø5 mm, HSS, 2 ve 4 ağızlı WC matkap, n : 1000 – 2000 dev/dk f : 0,04 – 0,15 mm/dev	Delaminasyon
Arul vd. (2006)	(0/±45/90) _{2s} GFRP, K: 3 mm	Ø4, 6, ve 8 mm helisel HSS n : 500 – 2500 dev/dk f : 0,02 – 0,06 mm/dev	İtme kuvveti ve tork Takım aşınması ve ömrü, optimizasyon
Davim vd. (2007)	0/90° CFRP, K: 3 mm	Ø5 mm K20 WC helisel matkap v : 50 – 70 m/ dk f : 0,25 – 0,35 mm/dev	Delaminasyon
Campos Rubio vd. (2008)	0°/90° GFRP, K: 2,5±0,2 mm	Ø5 mm, WC 85°–115° uç açılı helisel ve brad & spur matkap n : 4000 – 40000 dev/dk f : 1000 – 9000 mm/dk	Delaminasyon
Palanikumar vd. (2008)	0°/90° GFRP, K: 2,5±0,2 mm	Ø5 mm, K20 WC 85°–130° uç açılı helisel matkap n : 4000 – 40000 dev/dk f : 1000 – 9000 mm/dk	Delaminasyon
Khashaba vd. (2010)	GFRP, K: 8,3 mm	Ø8 ve 13 mm, WC matkap v : 6,405 – 50,635 m/dk f : 0,056 – 0,45 mm/dev	İtme kuvveti Delaminasyon Yüzey kalitesi
Durão vd. (2010)	CFRP, K: 4 mm	Ø6 mm, WC 85° ve 120° uç açılı helisel, brad, dagger ve step matkap v : 53 m/ dk f : 0,02 – 0,12 mm/dev	İtme kuvveti Delaminasyon Yüzey kalitesi
Lazar ve Xirouchakis (2011)	0/90° GFRP ve CFRP K:10 mm	Ø5,36 – 5,6 mm, WC tapered drill reamer, 8-facet ve helisel matkap n : 500 – 5000 dev/dk f : 0,02 – 0,20 mm/dev	İtme kuvveti ve tork
Krishnaraj vd. (2012)	Woven CFRP, K: 2 mm	Ø5 mm K20 WC 118° uç açılı helisel matkap n : 12000 – 20000 dev/dk f : 0,01 – 0,30 mm/dev	İtme kuvveti Delaminasyon Dairesellik Optimizasyon
Karpat vd. (2012)	0°/90°/±45° CFRP, K:10 mm	Ø6,35 – 6,91 mm, çift uç açılı helisel matkap n : 5000 – 10000 rpm f : 40 – 150 µm/dev	İtme kuvveti ve tork Takım aşınması Delik çapı toleransı

n : iş mili hızı, f : ilerleme hızı, v : kesme hızı, K : kalınlık

Çizelge 2.1 (Devam) Elyaf takviyeli kompozit plakalarda delik delme prosesi üzerine yapılan çalışmaların özeti.

Isbilir ve Ghassemieh (2012)	[90/-45/0/45] _{ss} CFRP, K:20 mm	Ø8 mm, TiAlN/TiN PVD kaplı WC helisel matkap <i>n</i> : 3000 – 9000 dev/dk <i>f</i> : 355 – 684 mm/dk	İtme kuvveti ve tork Delaminasyon Yüzey kalitesi Takım aşınması
Wang vd. (2013)	Çok yönlü quasi-izotropik CFRP, K:7,54 mm	Ø8 mm, kaplamasız, AlTiN kaplı ve elmas kaplı WC matkaplar <i>n</i> : 6000 dev/dk <i>f</i> : 0,0762 mm/dev	Takım aşınması İtme kuvveti Tork
Çelik vd. (2015)	0°/90°/+45°/-45° CFRP, K: 10 mm	Ø6,4 mm, SiAlON ve WC-Co matkap <i>n</i> : 20000 dev/dk <i>f</i> : 0,05 mm/dev	Takım aşınması İtme kuvveti Delaminasyon
Tan vd. (2016)	HFRP (cam/karbon hibrit)	Ø8 ve 6 mm, WC helisel, step ve brad&spur matkap <i>n</i> : 5000 – 10000 dev/dk <i>f</i> : 0,08 – 0,24 mm/dev	Yüzey pürüzlülüğü Delaminasyon
Jia vd. (2016)	[(-45/0/45/90) ₂ /0/0] _s CFRP, K: 3,6 mm	Ø7,94 mm, WC one-shot ve modifiye edilmiş one-shot matkap <i>n</i> : 3000 dev/dk <i>f</i> : 150 mm/dk	İtme kuvveti Delaminasyon
Perez vd. (2016)	[(0,90)3/(±45)] _{ss} , K: 10 mm	Ø6,35 mm, WC çift uç açılı matkap <i>n</i> : 2500 – 10000 dev/dk <i>f</i> : 125 – 500 mm/dk	İtme kuvveti ve tork
Voss vd. (2016)	[0° ₃₂ , ±45° ₂₄ , 90° ₁₂] _s CFRP, K: 8 mm	Ø6,35 mm, MG12 WC helisel matkap ve Ø5 mm parmak freze <i>v</i> : 160 m/dk <i>f</i> : 105 mm/dk (eksenel) ve 535 mm/dk (teğetsel)	Delaminasyon Kesme kuvvetleri
Dogrusadik ve Kentli (2017)	CFRP, K: 2 mm	Ø0,5 mm, WC mikro matkap <i>n</i> : 20000 – 40000 dev/dk <i>f</i> : 3 – 7 µm/dev	Delaminasyon
Basmaci vd. (2017)	0/90° CFRP, K:5 mm	Ø4 ve 6 mm, WC brad&spur matkap <i>v</i> : 50 m/dk <i>f</i> : 0,075 – 0,3 mm/dev	İtme kuvveti Delaminasyon Yüzey pürüzlülüğü ve topografyası Takım aşınması
Köklü vd. (2017)	FGC (karbon ve cam takviyeli), K:5 mm	WC brad center matkap <i>n</i> : 5000 dev/dk <i>f</i> : 0,01 – 0,12 mm/dev	İtme kuvveti Delaminasyon Delik çapı
Wang vd. (2017)	Çift yönlü CFRP, K:2 mm	Ø4 mm WC helisel matkap <i>n</i> : 20000 – 60000 dev/dk <i>f</i> : 0,4 – 0,8 m/dk	İtme kuvveti ve tork
Xu vd. (2018)	[(45°/90°/-45°/0°)6] _s CFRP	Ø6,35 mm WC brad&spur, helisel, dagger matkap <i>n</i> : 1000 – 2500 dev/dk <i>f</i> : 0,01 – 0,025 mm/dev	Delaminasyon Çapak analizi
Qiu et al. (2018)	Tek yönlü CFRP, K: 4.9 mm	Ø6 mm, WC helisel ve kademeli matkap <i>n</i> : 1500 – 5500 dev/dk <i>f</i> : 0,01 – 0,05 mm/dev	İtme kuvveti Delik içi hasar analizi
Sorrentino vd. (2018)	GFRP ve CFRP, K:8 mm	Ø10 mm, WC helisel matkap <i>v</i> : 47 – 376 m/dk <i>f</i> : 0,015 – 0,3 mm/dev	İtme kuvveti Delaminasyon

n: iş mili hızı, *f*: ilerleme hızı, *v*: kesme hızı, K: kalınlık

Çizelge 2.1 (Devam) Elyaf takviyeli kompozit plakalarda delik delme prosesi üzerine yapılan çalışmaların özeti.

Heidary ve Mehrpouya (2019)	[0/90/0/90/0/90/0] GFRP, K:5,5 mm	Ø10 mm, HSS helisel matkap n : 315 dev/dk f : 0,508 – 1,16 mm/dev	İtme kuvveti Delaminasyon Destek etkisi
Feito vd. (2019)	CFRP, K:2,2 mm	Ø6 mm, WC helisel, brad center, step ve reamer matkap v : 25 – 100 m/ dk f : 0,05 – 0,15 mm/ dev	İtme kuvveti ve tork Delaminasyon Optimizasyon
Zheng vd. (2019)	0°/90° CFRP, K: 3 mm	Ø4,5 mm, WC brad matkap n : 2000 – 6000 dev/dk f : 110 – 170 mm/ dk Ultrasonik titreşim genliği (A):0 – 8 µm	İtme kuvveti
Köklü vd. (2019)	Karbon/cam FGC, K: 5 mm	Ø5 mm, HSS TiN kaplı helisel matkap n : 2000 – 8000 dev/dk f : 0,0125 – 0,1 mm/ dev	İtme kuvveti Titreşim Delaminasyon Optimizasyon
Khanna vd. (2020)	(0°/+45°/90°/45°) CFRP, K:4 mm	Ø5 mm WC helisel 2 ve 4 yüzlü matkaplar v : 23,56 – 47,12 m/ dk f : 0,03 ve 0,06 mm/dev	İtme kuvveti Delaminasyon Yüzey pürüzlülüğü
Kaybal vd. (2020)	CFEn-C, K: 2,5 mm	Ø6 mm, WC helisel v : 50 – 90 m/ dk f : 0,005 – 0,4 mm/ dev	İtme kuvveti Delaminasyon Yüzey pürüzlülüğü
Jia vd. (2020)	Tek yönlü CFRP, K: 4 mm	Ø6 mm, helisel f : 5 mm/ dk	İtme kuvveti Delaminasyon
Zhang ve Xu (2021)	CFRP	Ø4, 8 ve 12 mm n : 500 – 1500 dev/dk f : 50 – 150 mm/dk	Delaminasyon
Kong vd. (2021)	[0°, +45°, 90°, -45°], CFRP, K: 5 mm	Ø8 WC parmak freze ve özel tasarlanmış freze n : 2000 dev/dk f : 0,032– 0,286 mm/ dev	İtme kuvveti Delaminasyon
Lee vd. (2021)	0/90° CFRP ve C-AFRP, K:6 mm	Ø8 mm, WC matkap n : 2000 dev/dk f : 200 mm/dk	İtme kuvveti Takım aşınması Çapak oluşumu
Xu vd. (2021)	[(0°/45°/-45°/90°) ₄]s CFRP, K:6,6 mm	Ø8 mm, WC candlestick ve step matkap v : 120 m/ dk f : 0,090 mm/ dev	Takım aşınması İtme kuvveti Delaminasyon
Pereszalai vd. (2021)	Tek yönlü GFRP ve CFRP, K:3,5 mm	Ø6 mm WC tek ağızlı parmak freze v : 160 m/ dk f : 50 mm/ dk Eğim açısı (β): 1°–15° Helisel adım (p): 0,01 – 1 mm	İtme kuvveti Çapak oluşumu
Cao vd. (2022)	0/90° CFRP, K: 8 mm	Ø6,15 mm elmas aşındırıcılı delik testeresi n : 600 – 3000 dev/dk f : 20 – 500 mm/dk Ultrasonik titreşim genliği (A):0 – 17 µm	Kesme kuvveti Delaminasyon

n : iş mili hızı, f : ilerleme hızı, v : kesme hızı, K: kalınlık

Çizelge 2.1 (Devam) Elyaf takviyeli kompozit plakalarda delik delme prosesi üzerine yapılan çalışmaların özeti.

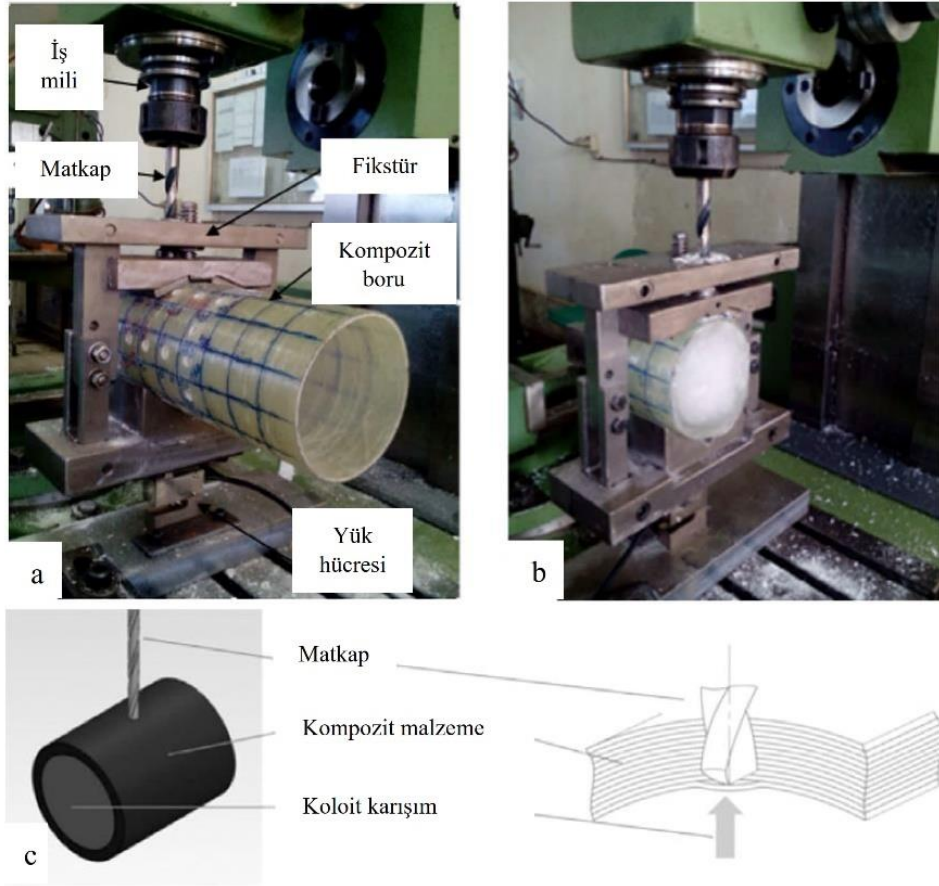
Feng ve Jiao (2022)	Tek yönlü CFRP K: 5 mm	Ø6 mm, WC matkap n : 100 – 2400 dev/dk f : 15 mm/dk Ultrasonik titreşim genliği (A):3,8 μ m (boyuna)- 1,5 μ m (burulma)	İtme kuvveti Delik çıkış hasarı
Geier vd. (2022)	Kırılmış elyafli CFRP, K:4 mm	WC fishtail ve brad&spur matkap v : 100 m/ dk f : 0,15 ve 0,35 mm/ dev	Çapak oluşumu
Khashaba (2022)	GFRP K: 3,1 mm	Ø10 mm, HSS helisel matkap v : 14,3 ve 27,5 m/ dk f : 0,05 – 0,23 mm/ dev	İtme kuvveti ve tork Delaminasyon
Kim vd. (2022)	-45°/0°/45°/90° CFRP, K:16 mm	Ø6,375 mm, elmas kaplı helisel matkap n : 8000 dev/dk f : 0,2 mm/ dev İş parçası ön ısıtma sıcaklığı:30 – 220 °C	Sıcaklık İtme kuvveti Takım aşınması Delaminasyon
Li vd. (2022)	Tek yönlü CFRP K: 14 mm	Ø6 mm, WC DLC kaplı helisel matkap n : 2000 – 3500 dev/dk f : 0,05 – 0,14 mm/ dev	İtme kuvveti ve tork Yüzey morfolojisi
Qiu vd. (2022)	CFRP, K: 5mm	Ø6 mm, WC double point angle, stepped ve reverse edge compound matkap n : 3500 dev/dk f : 0,04 mm/ dev	Takım aşınması İtme kuvveti Çapak oluşumu Delaminasyon
Shuaipu ve Jie (2022)	[45/0/ – 45/90] _{3S} CFRP, K:3,6 mm	Ø6 mm, WC helisel matkap n : 2100 – 2700 dev/dk f : 0,04 – 0,12 mm/ dev	İtme kuvveti Delaminasyon Yüzey morfolojisi

n : iş mili hızı, f : ilerleme hızı, v : kesme hızı, K: kalınlık

2.4.2 Elyaf Takviyeli Kompozit Borularda Delik Delme Prosesi Üzerine Yapılan Çalışmalar

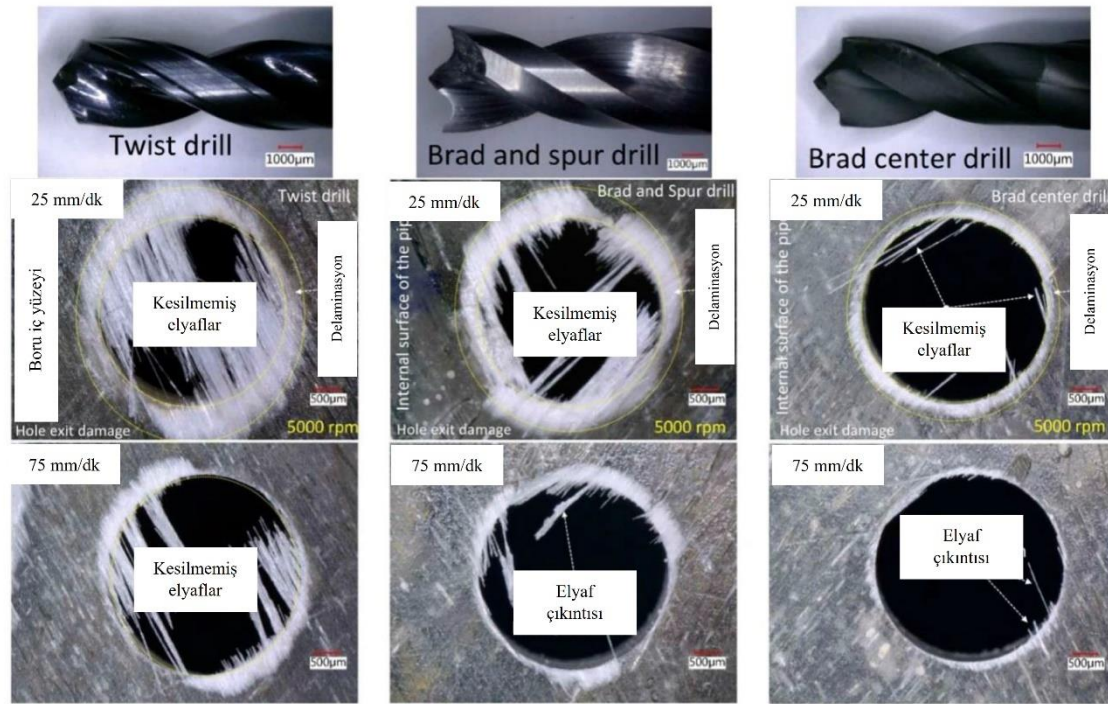
Elyaf takviyeli kompozit plakaların delinme karakteristiği üzerine literatürde oldukça fazla çalışma mevcut iken elyaf takviyeli kompozit boruların delinmesi üzerine ise sınırlı sayıda çalışma mevcuttur. Bu çalışmalar özellikle son birkaç yılda yapılmıştır. Bu çalışmalarda da araştırmacıların odak noktası yine delaminasyon olmuş ve bu hasarı azaltmak adına çeşitli yöntemler geliştirmişlerdir. Bu amaçla, kompozit boruların delinmesinde farklı destek elemanlarının prosese etkisi bazı araştırmacılar tarafından incelenmiştir. Hocheng vd. (2014) sıcak presli prepreg karbon elyaf takviyeli kompozit boruların delinmesi sırasında oluşan delaminasyonu azaltmak için manyetizma ile aktif olan ve demir tozlarından oluşan koloit bir karışımı destek elemanı olarak kullanmışlar ve bu yöntem ile delaminasyonu baskılaması için delik çıkışında manyetik bir destek

kuvveti oluşturmuşlardır. Çalışmanın sonucunda bu teknik ile delaminasyonun önemli seviyede azaldığını bildirmişlerdir. Hocheng vd. (2016) yayınladıkları bir başka çalışmada ise yine delaminasyonu azaltma amacıyla buz destek yöntemini önermişlerdir. Bu yöntemde boru içindeki suyun buza dönüşürken yoğunluğunun azalması ve dolayısıyla hacminin artması sebebiyle oluşan basıncı delaminasyonu baskılamak için kullanmışlardır. Bu yöntem ile kompozitin rijitliği arttığı için delme sırasında daha yüksek kuvvetlerin oluştuğunu ancak delaminasyonun önemli oranda azaldığını ve ayrıca bu yöntemin temiz ve ucuz olduğunu buna ek olarak arkasında atık bırakmadan kolayca malzemeden çıkarılabileceğini belirtmişlerdir. Aynı yöntem Sahami poor dehghan ve Heidary (2020) tarafından filaman sarım yöntemiyle üretilmiş cam elyaf takviyeli kompozit boruların delinmesinde test edilmiştir. Çalışmada kompozit borular destek kullanılmadan ve buz destek kullanılarak delinmiştir. Delme testlerinden sonra hasar açısından en kötü ve en iyi numunelerin kalan dayanımı bir diğer deyişle delik delme sırasında oluşan hasarların parça mukavemeti üzerindeki etkisi eksenel basma testi yapılarak belirlenmiştir. Çalışma sonucunda buz destek kullanılması durumunda itme kuvvetleri artmasına rağmen delaminasyon hasarının önemli ölçüde azaldığını bildirmişlerdir. Ayrıca delaminasyon oluşumunda matkap çapı ve kesme hızından ziyade, ilerleme hızı ve matkap geometrisinin daha etkili faktörler olduğunu vurgulamışlardır. Buz destek ve manyetik koloit destek kullanarak delme işlemi Şekil 2.23'te gösterilmiştir. Yazman (2021) ise filaman sarım cam elyaf takviyeli kompozit boruların delinmesinde poliamid çubuk şeklindeki destek kullanımının etkisini incelemiştir. Kompozit boruların delinmesi sırasında destek kullanımının delaminasyonu, delik içi hasarları ve yüzey pürüzlülüğünü azalttığı ancak itme kuvvetini artırdığını ve lamineler arası çatlağın ilerlemesini engellediğini bildirmiştir.



Şekil 2.23 Elyaf takviyeli kompozit boruların delinmesi, (a) desteksiz delme, (b) buz destek ile delme (Sahami poor dehghan ve Heidary 2020), (c) manyetik koloit destek ile delme (Hocheng vd. 2014).

Bazı çalışmalarda farklı matkap geometrilerinin kompozit boruların delinmesinde itme kuvveti ve hasar oluşumu incelenmiştir. Gemi vd. (2019) farklı tipteki matkapların cam elyaf takviyeli filaman sarım kompozit boruların delinmesindeki performansını araştırmak için deneysel bir çalışma yapmışlardır. İşlenebilirlik, itme kuvvetleri, delik çıkış hasarı ve delik içi hasar oluşumuna göre değerlendirilmiştir. Çalışmanın sonucunda matkap geometrisinin önemli bir faktör olduğunu ve sivri uçlu özel geometrili matkabın (Brad center drill) malzeme üzerinde daha az hasar oluşturarak en iyi performansı sergilediğini gözlemlemişlerdir (Şekil 2.24). Qiu vd. (2022a) karbon elyaf takviyeli kompozit boruların kademeli matkap ile delinmesinde ilerleme hızının delik çıkış delaminasyonu ve yırtılma (Tear) üzerindeki etkisi teorik olarak analiz etmişler ve optimum ilerleme hızını deneysel yöntemle tespit etmişlerdir.



Şekil 2.24 Cam elyaf takviyeli kompozit boruların farklı geometrili takımlar ile delinmesinde delik çıkışında oluşan hasarlar (Gemi vd. 2019).

Hibridizasyon ve istifleme sırasının delik delme karakteristiğine etkisi ise Gemi vd. (2020a) tarafından araştırılmıştır. Çalışmada filaman sarım cam/karbon elyaf hibrit kompozit borularda istifleme sırasının mekanik özelliklere ve delik delme karakteristiğine etkisini incelemişlerdir. İki kısımdan oluşan çalışmanın ilk kısmında istifleme sırasının halka çekme, iç basınç altında patlatma, sertlik ölçümü ile mekanik karakterizasyon yapılmış ve ayrıca farklı istifleme sırasına sahip hibrit kompozit borular delinirken oluşan itme kuvvetleri incelenmiştir. Çalışmanın ikinci kısmında ise (Gemi vd. 2020b) hibrit kompozit borularda mekanik testler ve delme testleri sonrası oluşan hasarlar makro ve mikro boyutta incelenmiştir. Çalışmaların sonucunda istifleme sırasının mekanik ve delik delme davranışında önemli etkisinin olduğunu, karbon tabakasının ortada istiflendiği durum olan cam/karbon/cam borunun daha iyi mekanik davranış sergilediğini ve ayrıca bu plaka delinirken daha az itme kuvveti oluştuğunu bildirmişlerdir. Ayrıca cam tabakasının delaminasyon hasarına karşı daha hassas olduğunu ve karbonun son tabakada istiflenmesi durumu olan cam/cam/karbon boruda daha az delik delme kaynaklı çıkış delaminasyonu oluştuğunu belirtmişlerdir.

Li vd. (2022b) tarafından yapılan çalışmada karbon elyaf takviyeli kompozit boruların dış ve iç yüzeyinden delindiğinde sergilediği davranış, itme kuvveti ve hasar oluşumu dikkate alınarak incelenmiştir. Teorik, nümerik ve deneysel olarak yapılan çalışmada, boru dış yüzeyinden yapılan delme işleminde iç yüzeye kıyasla daha yüksek kuvvetlerin oluştuğunu, delik girişinde daha az, delik çıkışında ise daha fazla hasar oluştuğunu bildirmişlerdir. Detaylı incelemeleri yapılan bu çalışmaların kullanılan deney parametreleri ve araştırma konusunu içeren özeti Çizelge 2.2’de verilmiştir.

Çizelge 2.2 Elyaf takviyeli kompozit borularda delik delme prosesi üzerine yapılan çalışmaların özeti.

Yazar ve yıl	İş parçası	Kesici takım ve kesme parametreleri	Araştırma konusu
Hocheng vd. (2014)	[0/90] Sıcak pres prepreg CFRP, İÇ: 20 mm, K:2,5 mm	Ø2 mm, HSS helisel matkap n : 1000 dev/dk f : 0,03 – 0,1 mm/dev	İtme kuvveti Delaminasyon
Hocheng vd. (2016)	[0/90] Sıcak pres prepreg CFRP, İÇ: 20 mm, K:2,5 mm	Ø2 mm, HSS helisel matkap n : 600 – 1200 rpm f : 0,06 – 0,2 mm/dev	İtme kuvveti Delaminasyon
Gemi vd. (2019)	±55° Filaman sarım GFRP, İÇ:72 mm, K: 2,4 mm	Ø4 mm, WC helisel, brad&spur ve brad center matkap n : 5000 dev/dk f : 25 – 275 mm/dk	İtme kuvveti Hasar analizi
Sahami poor dehghan and Heidary (2020)	±45° Filaman sarım GFRP, Çap:105 mm, K: 3 mm	Ø8 ve 12 mm, HSS helisel ve brad&spur matkap n : 250 – 1000 dev/dk f : 25 – 100 mm/dk	İtme kuvveti Delaminasyon
Gemi vd. (2020)	±55° Filaman sarım hibrit karbon ve cam FRP, İÇ:72 mm, K: 2,4 mm	Ø8 mm, WC parmak freze n : 796 – 3184 dev/dk f : 50 – 350 mm/dk	İtme kuvveti Delaminasyon Hasar analizi Yüzey pürüzlülüğü
Yazman (2021)	±55° Filaman sarım GFRP, İÇ:72 mm, K: 2,4 mm	Ø8 mm, WC parmak freze n : 796 – 3184 dev/dk f : 50 – 350 mm/dk	İtme kuvveti Delaminasyon Hasar analizi Yüzey pürüzlülüğü
Li vd. (2022)	[0°/45°/ 90°/135°] Prepreg rulo sarım, İÇ:10 mm, K: 3 mm	Ø4 mm, WC AlTiN kaplı helisel matkap n : 2000 – 5000 dev/dk f : 0,02 – 0,08 mm/dev	İtme kuvveti Delaminasyon Hasar analizi
Qiu vd. (2022)	[0°/45°/90°/135°] Prepreg rulo sarım, İÇ:16 mm, K: 3 mm	Ø6 mm, step matkap n : 3500 dev/dk f : 0,01 – 0,14 mm/dev	İtme kuvveti Delaminasyon Hasar analizi

n : iş mili hızı, f : ilerleme hızı, İÇ: İç çap, K: kalınlık

2.4.3 Kompozit Plakalarda Delik Delme İşleminin Mekanik Özelliklere Etkisi Üzerine Yapılan Çalışmalar

Literatür incelendiğinde, özellikle montaj işlemleri için kaçınılmaz bir proses olan delik

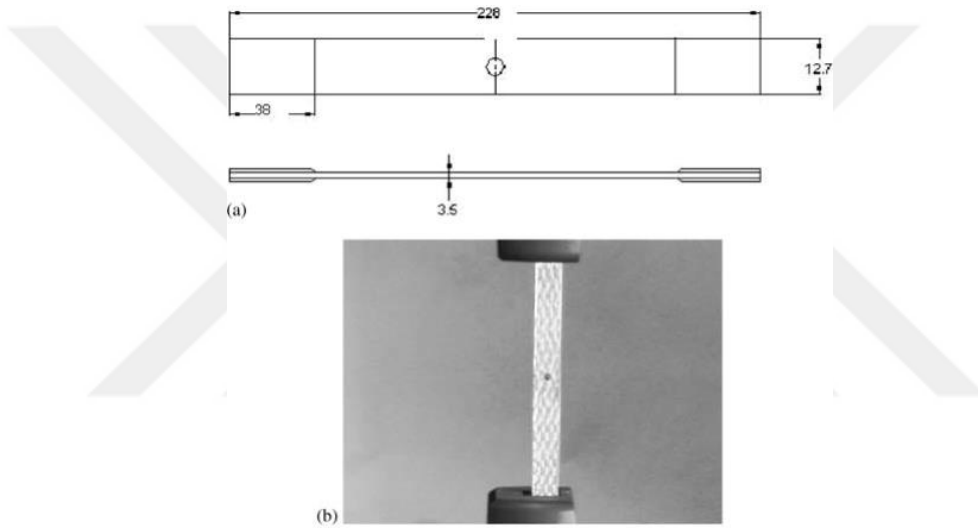
delme operasyonunun malzeme üzerinde oluşturduğu hasarların mekanik özelliklere ve yorulma ömrü üzerine olumsuz etkilerinin olduğu belirtilmiş olmasına rağmen bu konu ile ilgili çalışmaların sayısı işlenebilirlik üzerine yapılan çalışmaların sayısına kıyasla oldukça azdır. Öte yandan bu çalışmaların neredeyse tümünde kompozit plakaların incelendiği görülmüş olup kompozit borularda delik delme prosesinin kompozitin mekanik ve yorulma davranışına etkisini inceleyen kapsamlı bir çalışmaya rastlanmamıştır. Kompozit plakalarda delik delme prosesinin etkisi üzerine yapılan çalışmalar genel olarak iki gruba ayrılabilir.

2.4.3.1 Malzeme Dayanımı Üzerine Çalışmalar

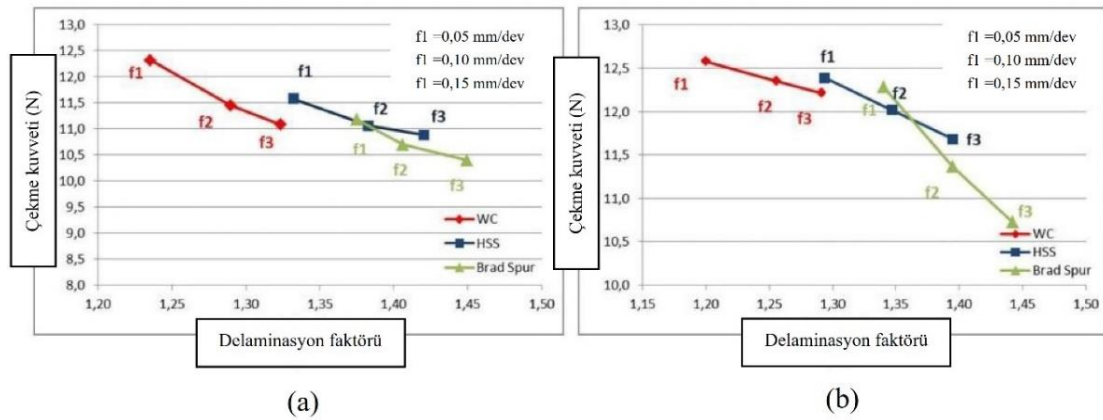
Bu çalışmalarda, delik açılmış elyaf takviyeli plastiklerin dayanımı çekme, basma ve eğilme gibi yükler altında quasi-statik ve/veya yorulma testleri ile araştırılmıştır. Çalışmaların çoğunda delinmiş kompozitlerin quasi-statik çekme yükü altındaki davranışı incelenmiştir. Singh ve Bhatnagar (2006) tek yönlü cam elyaf takviyeli plastiklerde delme kaynaklı oluşan hasarların kompozitin çekme dayanımı üzerindeki etkisini nümerik ve deneysel olarak incelemişlerdir. Delinmiş kompozit plakanın çekme testi numunesi Şekil 2.25’de gösterilmiştir. Aynı çapa sahip farklı geometrili matkaplar ile gerçekleştirilen testler sonucunda delme kaynaklı hasar ile kalıcı çekme dayanımı arasında güçlü bir ilişki olduğunu belirtmişlerdir. Abdul Nasir vd. (2015) keten elyaf takviyeli plastiklerin delinmesinde delaminasyon oluşumunu ve delik delmenin kalıcı çekme dayanımına etkisini farklı kesme parametreleri ve takımlar kullanarak deneysel olarak araştırmışlardır. Çalışmanın sonucunda kalıcı çekme dayanımının ve delaminasyonun ilerleme hızına karşı daha hassas olduğunu, ancak takım geometrisi ve iş mili hızından da etkilendiğini, ilerleme hızının mümkün olduğunca düşük tutulurken iş mili hızının da en yüksek seviyede olması durumunda maksimum kalıcı çekme dayanımının elde edilebileceğini belirtmişlerdir.

Bazı araştırmacılar ise çekme dayanımının tahmin edilmesi üzerine çalışmışlardır. Tao vd. (2016) karbon elyaf takviyeli plastiklerde delme kaynaklı oluşan delaminasyonun çekme dayanımı üzerindeki etkisini tahmin etmek için nümerik bir model oluşturmuşlardır. Modeli deneysel olarak da doğrulamışlardır. Çalışmanın sonucunda

delaminasyonun kalıcı çekme dayanımını belirgin bir şekilde etkilediğini vurgulamışlar ve bunun nedenini ise hasarlı tabakanın gerilmeyi diğer tabakalara aktarmada başarısız olup en dış tabakada erken hasar başlamasına bağlamışlardır. Yenigun ve Kilickap (2018) ise karbon elyaf takviyeli plastiklerin farklı kesme parametreleri ve takımlar kullanılarak delindikten sonra bu parametrelerin çekme yükü üzerindeki etkisini araştırmış ve ayrıca yapay sinir ağları (ANN) modeli ile çekme yükünü tahmin etmişlerdir. Çalışmanın sonucunda Şekil 2.26'de de görüldüğü üzere, kesme parametreleri ve kullanılan takım geometrisine bağlı olarak yüzey pürüzlülüğü, delaminasyon ve itme kuvvetindeki artışın kompozitin çekme dayanımı üzerinde azalmaya sebep olduğunu gözlemlemişlerdir.



Şekil 2.25 Delinmiş kompozit plaka çekme testi, (a) test numunesi, (b) test aşaması (Singh ve Bhatnagar 2006).

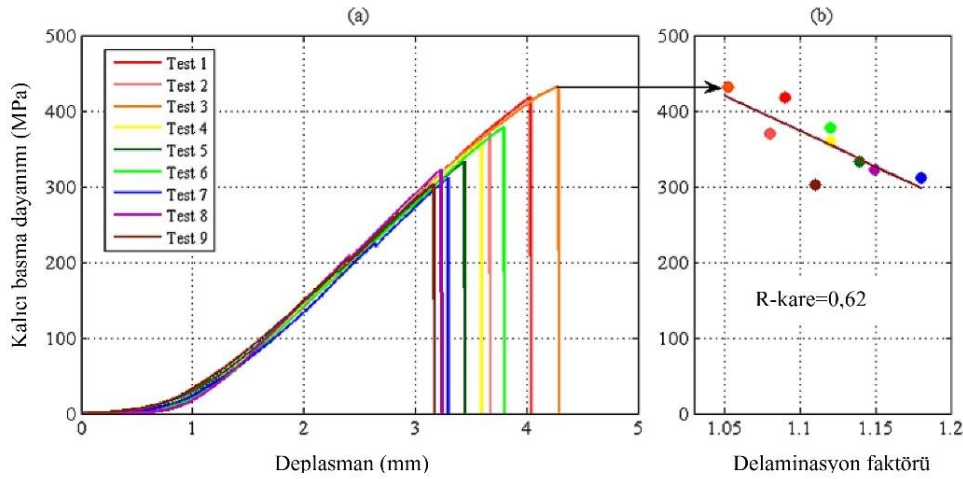


Şekil 2.26 Delaminasyonun çekme yükü üzerindeki etkisi, (a) iş mili hızı: 1000 dev/dk, (b) iş mili hızı: 3000 dev/dk (Yenigun ve Kilickap 2018).

Delik delme sırasında bozulan elyaf sürekliliğinin mekanik davranış üzerindeki etkisi ise Zitoune vd. (2011) tarafından çalışılmıştır. Bu çalışmada kompozit plakalarda kalıplanmış delik ile delik delme prosesi ile açılmış deliğin çekme yükü altındaki davranışı araştırılmıştır. Kalıplanmış delik ile elyaf sürekliliği bozulmadan kompozitin üretim aşamasında delik oluşturulmuştur. Çalışma sonucunda iki farklı yöntem ile açılmış deliklerin yük altındaki davranışlarının oldukça farklı olduğunu vurgulamışlardır. Delik delme prosesiyle açılmış delikte kırılma ani gerçekleşirken, kalıplanmış delikte kademeli şekilde olmuştur. Ayrıca delik delme prosesiyle elde edilmiş delikte oluşan maksimum deformasyon kalıplanmış deliğin iki katı olmuştur. Öte yandan kalıplanmış deliğin yaklaşık %30 daha yüksek çekme dayanımına sahip olduğu vurgulanmıştır. Turki vd. (2014) ise karbon elyaf takviyeli kompozitlerde delik delme kaynaklı hasarların ve dikiş etkisinin mekanik davranış üzerindeki etkilerini deneysel olarak incelemişlerdir. Dikiş etkisi, iş mili hızı ve ilerleme hızının itme kuvveti, tork ve hasar üzerindeki etkisini inceleyip mekanik test sonuçları ile parametreler arasında ilişki kurmuşlardır. Düşük ilerleme hızlarının daha az hasar oluşturduğunu, bu sebeple özellikle dikişsiz kompozitte daha yüksek dayanım elde edildiğini, dikişin delik içindeki hasarı azalttığını ve dolayısıyla dikişsiz kompozite kıyasla daha yüksek kırılma dayanımı elde edildiğini ve kesme koşullarının seçiminin önemini vurgulamışlardır.

Bazı araştırmacılar ise delik delme kaynaklı hasarların malzemenin basma davranış üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Zarif Karimi vd. (2013) cam elyaf takviyeli kompozit plakalarda delik delme prosesinin basma dayanımına etkisini araştırmışlardır. Matkap uç açısı, kesme hızı ve ilerleme hızının itme kuvveti, delaminasyon faktörü ve kalıcı basma dayanımı üstündeki etkisini incelemişlerdir. Basma dayanımı üzerindeki etkili parametrenin ilerleme hızı olduğunu, diğer parametrelerin ise ihmal edilebilir seviyede olduğunu vurgulamışlar ve ayrıca niteliksel olarak hasarlı bölge ile kalıcı basma dayanımı arasında lineer bir ilişki olduğunu belirtmişlerdir. Zarif Karimi vd. (2017) yaptıkları başka bir çalışmada cam elyaf takviyeli kompozit plakalarda delme kaynaklı delaminasyonun kompozitin kalıcı basma dayanımına etkisini araştırmışlardır. Çalışmanın sonucunda delaminasyon hasarı ve basma dayanımı arasında anlamlı bir ilişki olduğunu ve artan ilerleme hızı ile delaminasyonun arttığını buna karşılık basma dayanımının azaldığını belirtmişlerdir (Şekil 2.27). Ayrıca ilerleme hızının basma

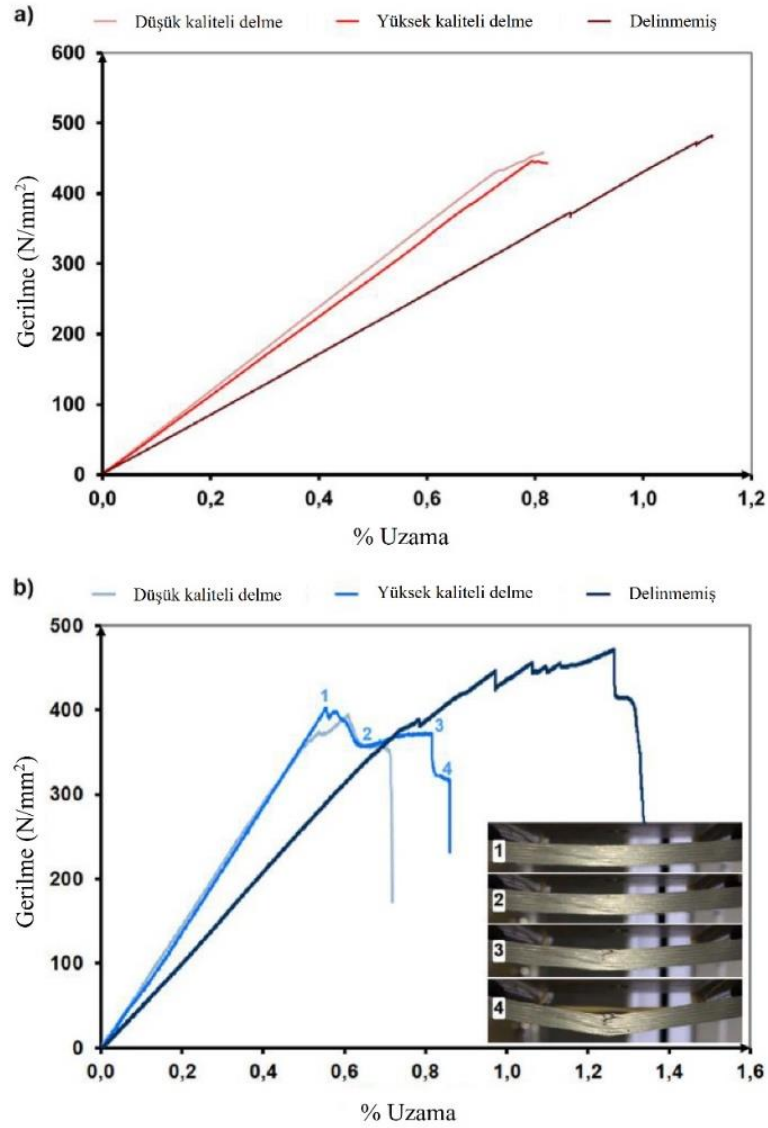
dayanımı üzerindeki etkisinin kesme hızından daha fazla olduğunu vurgulamışlardır. Duan vd. (2019) delme kaynaklı hasarların kompozitlerin basma yükü altında burkulma davranışına etkilerini deneysel olarak araştırmışlardır. Kompozit üretim aşamasında delik civarına farklı şekil ve boyutta PTFE film yerleştirilerek yapay delaminasyonlar oluşturulmuş ve lokal burkulma, lokal burkulma kaynaklı delaminasyon ve genel burkulma üzerindeki etkiler incelenmiştir. Burkulma yükü ve kırılma yükünün yapay delaminasyonun büyüklüğünün artmasıyla önemli oranda düştüğünü, kare şeklindeki delaminasyonun aynı alana sahip olmalarına rağmen dairesel delaminasyona göre köşeli yapısından ötürü daha fazla gerilme yığılmasına sebep olarak daha düşük lokal burkulma yüküne sebep olduğunu bildirmişlerdir.



Şekil 2.27 Farklı delme koşulları için kalıcı basma dayanımı grafikleri, (a) dayanım-deplasman, (b) dayanım-delaminasyon faktörü (Zarif Karimi vd. 2017).

Üç nokta eğilme ve dört nokta eğilme testleri ile bazı araştırmacılar, delik delme prosesinin eğilme dayanımı üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Heidary vd. (2018) cam elyaf takviyeli karbon nanotüp katkılı kompozit plakalarda delik delme prosesinin kompozitin eğilme dayanımına olan etkisini araştırmışlardır. Farklı ilerleme hızı, iş mili hızı, matkap çapı ve ağırlıkça nanotüp katkısının delinmiş numunenin üç nokta eğilme testi ile kalıcı eğilme dayanımı üzerindeki etkilerini kapsamlı olarak incelemişlerdir. Kalıcı eğilme dayanımının en fazla nano içeriğinden etkilendiğini bunu ise ilerleme hızının takip ettiğini matkap çapının ise çok az etkisi olduğunu rapor etmişlerdir. Meinhard vd. (2021) termoplastik reçineli karbon elyaf takviyeli plastiklerin (CFRTP) delinmesinde oluşan delme kaynaklı hasarların mekanik özelliklere etkisini

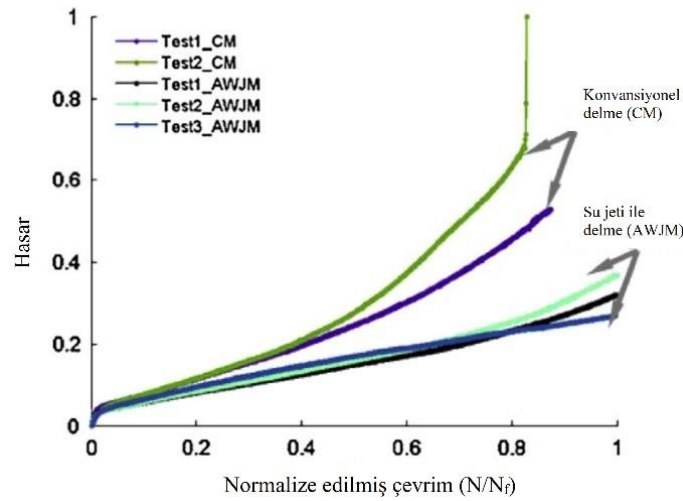
incelemişlerdir. Çalışmada çekme ve dört nokta eğilme testleriyle farklı koşullarda delinmiş numuneler ile delinmemiş numuneler test edilmiştir. CF RTP kompozitlerde delik delme kaynaklı baskın hasarın delaminasyondan ziyade çapak oluşumu olduğunu, testler sonucunda ise bu malzemede delik kalitesinin çekme ya da eğilme dayanımları üzerinde kayda değer bir farklılığın olmadığını gözlemlemişlerdir (Şekil 2.28).



Şekil 2.28 Farklı delme koşullarına bağlı gerilme-gerinim grafikleri, (a) çekme, (b) dört nokta eğilme (Meinhard vd. 2021).

Quasi-statik testlere kıyasla, yorulma testleri üzerine daha az sayıda çalışma mevcuttur. Bu çalışmaların çoğunluğunda delinmiş kompozit plakaların çekme-çekme yorulma yükü altındaki davranışı analiz edilmiştir. Nixon-Pearson vd. (2013) delikli karbon elyaf

takviyeli plastiklerin çekme-çekme yorulma yükü altında hasar gelişimini deneysel olarak analiz etmişlerdir. Hasarı bilgisayarlı tomografi ile inceleyip üç boyutlu hasar oluşum sırasını çıkarmışlardır. Hasarın ilk olarak yüzey plakasında matris çatlaması olarak başlayıp bu çatlağın diğer plakalara yayılmasıyla delaminasyon oluşturduğunu ve kalınlık boyunca ilerlediğini ve numune bitişine doğru yönlendiğini tespit etmişlerdir. Saleem vd. (2013) karbon elyaf takviyeli plastiklerde konvansiyonel delme ve su jeti ile delmenin çekme-çekme yorulma yükü altında mekanik davranışa olan etkisini araştırmışlardır. Quasi-statik çekme testlerinde kayda değer bir farklılığın olmadığını ancak su jeti ile delinmiş numunelerin yorulma dayanımının daha yüksek olduğunu bildirmişlerdir. Öte yandan, konvansiyonel delme ile açılan deliklerde elyaf çekmesi, matris bozulması gibi hasarların çatlak oluşumu ve ilerlemesi için gerilme yığılması oluşturduğunu, dolayısıyla su jeti ile delinmiş malzemenin yorulma hasarlarına karşı direncinin daha iyi olduğunu gözlemlemişlerdir (Şekil 2.29).

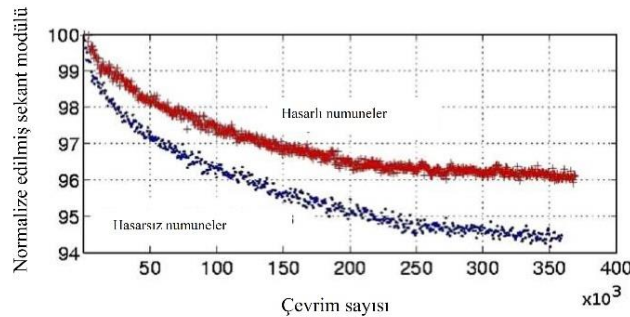


Şekil 2.29 Normalize edilmiş çevrim sayısına bağlı olarak hasar gelişimi (Saleem vd. 2013).

Yenigun ve Kilickap (2021) farklı elyaf oryantasyonlarına sahip karbon elyaf takviyeli plastiklerin delik kalitesinin yorulma ömrü üzerindeki etkilerini kapsamlı bir şekilde incelemişlerdir. Çalışmada farklı matkaplar kullanılarak farklı kesme parametreleri ile delinmiş numuneler hasar durumuna göre az, orta, çok şeklinde üç kategoriye ayrılmış ve bu üç koşuldaki numuneler en düşük çekme yüküne göre değişen oranda dinamik olarak çekme yüküne maruz bırakılmıştır. Delik kalitesinin azalmasıyla çekme yükü ve yorulma ömründe azalma olduğunu ve uygun kesme parametreleri kullanılarak yorulma

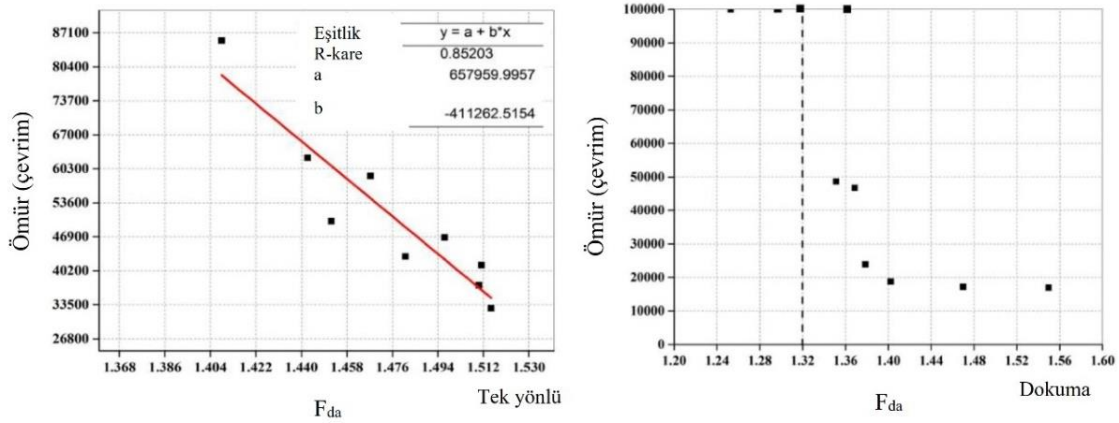
ömründeki azalmanın engellenebileceğini vurgulamışlardır. Wang vd. (2022) delme kaynaklı delaminasyonu azaltmak amacıyla yapılan düşük sıcaklıklarda delme işleminin karbon elyaf takviyeli plastiklerin çekme ve çekme-çekme yorulma davranışı üzerindeki etkilerini deneysel olarak araştırmışlardır. Bu amaçla üç farklı hasar koşulunda olacak şekilde -25° C sıcaklıkta ve oda sıcaklığında farklı kesme parametreleri, kaplamasız ve kaplamalı takımlar kullanılarak numuneler hazırlanmış statik ve dinamik yük altında test edilmiştir. Statik çekme sonuçlarına göre düşük hasarlı numunenin yüksek hasarlı numuneden daha yüksek dayanım gösterdiğini ancak farklı sıcaklıklarda yapılan kesme koşullarının aynı olduğu dolayısıyla aynı hasara sahip olan numunelerin dayanımlarının hemen hemen aynı olduğunu bildirmişlerdir. Çekme dayanımının %70'inde yapılan yorulma testlerinde ise 1 000 000 ve 2 000 000 çevrimde hasar gelişimi ultrasonik C-scan yöntemiyle izlenmiş ve 2 000 000 çevrim sonrası numunelerin kalıcı çekme dayanımları incelenmiştir. Sonuçlara göre düşük sıcaklıkta delinmiş, düşük hasara sahip numunenin kalıcı çekme dayanımının oda sıcaklığında aynı parametreler ile delinmiş numuneninkinden hafifçe daha yüksek olduğunu, oda sıcaklığında delinmiş yüksek hasarlı numunenin ise en düşük dayanıma sahip olduğunu bildirmişlerdir.

Hamdoun vd. (2006) ise karbon elyaf takviyeli plastiklerde delik kalitesinin basma-basma yorulma davranışına olan etkisini araştırmışlardır. Hasarlı ve hasarsız delikli olacak şekilde iki farklı deney seti oluşturulmuş ve bu iki durum için statik ve yorulma testleri gerçekleştirilerek numunelerin sekant modülleri kıyaslanmıştır. Deneyler sonucunda hasarlı numunenin sekant modülü, hasarsız numuneninkinden hafifçe daha düşük olmasına rağmen 4×10^5 çevrimden sonra sekant modüllerinin hemen hemen aynı olduğunu gözlemlemişlerdir (Şekil 2.30).



Şekil 2.30 Çevrim sayısına bağlı olarak normalize edilmiş sekant modülünün değişimi (Hamdoun vd. 2006).

Bazı araştırmacılar ise üç ve dört nokta eğilme-eğilme yorulma testleri ile delik delme kaynaklı hasarların kompozit plakalar üstündeki etkisini araştırmışlardır. Shahkhosravi vd. (2019) cam elyaf takviyeli kompozit plakalarda yüksek hızlı delme sırasında oluşan delaminasyonun malzeme quasi-statik dayanım ve yorulma ömrü üzerindeki etkilerini üç nokta eğilme testi ile araştırmışlardır. Hem tek yönlü hem de dokunmuş kumaştan üretilmiş cam elyaf takviyeli plakalar, farklı kesme parametreleri ile delinerek test edilmiştir. Testlerin sonucunda statik dayanım üzerinde kesme parametrelerinin önemli bir etkisinin olmadığını ancak yorulma ömrünün kesme parametrelerine, dolayısıyla delme kaynaklı hasarlara bağlı olarak önemli oranda değiştiğini gözlemlemişlerdir (Şekil 2.31). Haeger vd. (2019) karbon elyaf takviyeli plastiklerde delme kaynaklı oluşan delaminasyonun statik ve dinamik yük altında dört nokta eğilme dayanımına etkisini araştırmışlardır. Aşınmış ve yeni takımlar kullanarak farklı hasarlara sahip farklı kalitelerde delikler elde etmişler ve deplasman kontrollü dört nokta eğilme yorulma testlerini gerçekleştirmişlerdir. İşlenebilirlik kaynaklı kusurların yorulmanın erken safhasında ömrü olumsuz etkilediğini ayrıca yorulma çatlak ilerlemesini teşvik ettiğini bu sebeple yorulmanın erken safhasında rijitlik kaybı meydana geldiğini bildirmişlerdir.



Şekil 2.31 Delaminasyon faktörüne bağlı olarak çevrim sayısı (Shahkhosravi vd. 2019).

2.4.3.2 Yatak Dayanımı Üzerine Çalışmalar

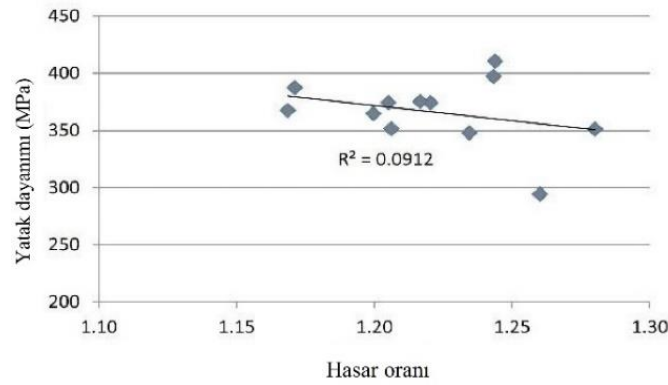
Bu çalışmalarda ise delik açılmış kompozit plakalar pim bağlantısı yapılarak çekme yükü altında malzeme yatak dayanımı quasi-statik ve/veya yorulma testleri ile araştırılmıştır. Haeger vd. (2016) karbon elyaf takviyeli plastiklerde malzeme kalitesi (mikroyapı) ve

ataak dayanımı ile delaminasyon faktörü arasında önemli bir ilişki saptanmıştır. Bu ilişkiyi aşağıdaki şekilde yazabiliriz:



Yatak dayanımı testi

53



Şekil 2.33 Yatak dayanımı ve delik delme kaynaklı hasar arasındaki ilişki (Miguel Silva vd. 2017).

Safarabadi ve Sardar (2020) cam elyaf takviyeli plastiklerin birleştirilmesinde delik delme kaynaklı delaminasyonun yatak dayanımına etkisini nümerik olarak analiz etmişlerdir. Farklı elyaf oryantasyonuna sahip kompozitler üzerinde yapılan nümerik analizlerle genel olarak delaminasyonun yatak dayanımını düşürdüğü, delaminasyonun 0/90° oryantasyona sahip kompozitte daha fazla etkili olduğunu, delamine olmuş bölgenin yarıçapının artmasının yatak dayanımını çok fazla değiştirmedığını ancak bu bölgenin numunenin kenarlarına ulaşması durumunda yük taşıma kapasitesinin önemli ölçüde düştüğünü bildirmişlerdir.

Bazı çalışmalarda ise pim bağlantılı kompozit plakaların dinamik yük altındaki davranışı araştırılmıştır. Persson vd. (1997) karbon elyaf takviyeli plastiklerin delinmesi sırasında oluşan hasarların malzeme basma ve yatak dayanımına etkisini incelemişlerdir. Farklı matkaplar kullanılarak delinen deliklerde oluşan hasarlar tahribatsız olarak bilgisayarlı tomografi yöntemi ile karakterize edilmiş ve dayanımları test edilmiştir. Testler neticesinde delik hasarlarının pim bağlantılı plakaların statik çekme ve yorulma dayanımını önemli oranda düşürdüğünü, basma dayanımı üzerinde ise daha az etki oluşturduğunu bildirmişlerdir. Saleem vd. (2015) cıvata bağlantılı karbon elyaf takviyeli kompozitlerde konvansiyonel delme ve su jeti ile delme yöntemleri ile delinmiş deliklerin yüzey kalitesinin mekanik davranış üzerindeki etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. Konvansiyonel delme ile delinen deliklerde daha fazla hasar meydana geldiğini, su jeti ile delinmiş numunelerin ise yüksek çevrimli yorulma dayanımının yaklaşık %20 daha yüksek olduğunu bildirmişlerdir. Van Der Sypt vd. (2017) dinamik yatak yüküne maruz kalan delinmiş karbon elyaf takviyeli plastiklerin davranışını nümerik ve deneysel olarak

analiz etmişlerdir. Delik delme kaynaklı yüzey kusurlarını makroskobik ve mikroskobik boyutta analiz ederek mekanik davranış ile ilişkilendirmişlerdir. Detaylı incelemeleri yapılan bu çalışmaların özeti Çizelge 2.3'te verilmiştir.

Çizelge 2.3 Elyaf takviyeli kompozit plakalarda delik delme işleminin mekanik ve yorulma davranışlarına etkileri üzerine yapılan çalışmaların özeti.

Yazar ve yıl	Kompozit	Kesme koşulu ve parametreleri	Mekanik test
Persson vd. (1997)	$[(\pm 45/0/90)_3]_{s24}$ CFRP, Tabaka kalınlığı: 0,127 mm	WC PCD, ve elmas kaplı özel geometrilili takımlar n : 2800, 6000, 25000 dev/dk	Quasi-statik ve Yorulma: Yatak dayanımı Basma $R=0$ f: 5 Hz
Hamdoun vd. (2006)	$[(90/45/0/45/0_2/45/0_2/-45)_2/90/45/0/-45/0]_{sm}$ CFRP, K: 6,4 mm	$\varnothing 6$ mm 90° ve 120° uç açılı WC helisel matkap f : 0,05 ve 1 mm/dev	Quasi-statik ve Yorulma: Basma $R=10$ f: 3 Hz Yük oranı: %60
Singh ve Bhatnagar (2006)	Tek yönlü GFRP	$\varnothing 4$ mm farklı geometrilerde WC matkap n : 750 – 2250 dev/dk f : 10 – 20 mm/dk	Quasi-statik: Çekme
Zitouni vd. (2011)	Tek yönlü CFRP	$\varnothing 6,35$ ve $7,94$ WC helisel matkap ile delinmiş ve çelik panç ile üretim aşamasında kalıplanmış delikler	Quasi-statik: Çekme
Karimi vd. (2013)	Tek yönlü GFRP, K: 6 mm	$\varnothing 5$ mm 90° , 110° ve 120° uç açılı HSS helisel matkap n : 100 – 485 dev/dk f : 0,11 – 0,5 mm/dev	Quasi-statik: Basma
Saleem vd. (2013)	$[\pm 45^\circ]_{2S}$ CFRP, K: 2,1 mm	$\varnothing 6$ mm WC helisel matkap n : 2020 dev/dk f : 0,1 mm/dev ve Su jeti partikül boyutu: 120 ve 220 μm , jet basıncı: 145 MPa, uzaklık: 4 mm, jet açısı: 90°	Quasi-statik ve Yorulma: Çekme $R=0,1$ f: 10 Hz Yük oranı: %17 – 65
Nixon-Pearson vd. (2013)	$[45_2/90_2/-45_2/0_2]_S$ CFRP, K: 2 mm	$\varnothing 3,175$ mm WC özel geometrilili matkap	Quasi-statik ve Yorulma: Çekme $R=0,1$ f: 5Hz Yük oranı: %40 – 80
Turki vd. (2014)	$[(0^\circ/+45^\circ/90^\circ/-45^\circ)_3]_S$ dikişli ve dikişsiz CFRP K: 7 mm	$\varnothing 6$ mm WC helisel matkap n : 1800 – 6000 dev/dk f : 0,04 – 0,36 mm/dev	Çevrimli Çekme
Abdul Nasir vd. (2015)	Düz dokuma keten elyaf takviyeli epoksi K: 5 mm	$\varnothing 8$ mm WC helisel ve kademeli matkap n : 3000 ve 6000 dev/dk f : 0,16 ve 0,24 mm/dev	Quasi-statik: Çekme
Saleem vd. (2015)	$[\pm 45^\circ]_{2S}$ ve $[90/+45/0/-45]_S$ CFRP, K: 2,1 mm	$\varnothing 6$ mm WC helisel matkap n : 2020 dev/dk f : 0,1 mm/dev ve Su jeti partikül boyutu: 120 ve 180 μm , jet basıncı: 3000 ve 3500 Bar, uzaklık: 4 mm, jet açısı: 90°	Quasi-statik ve Yorulma: Çekme (Cıvatalı bağlantı) $R=0,1$ f: 10 Hz Yük oranı: %25 – 80

n : iş mili hızı, f : ilerleme hızı, K: kalınlık, R: gerilme oranı, f: frekans

Çizelge 2.3 (Devam) Elyaf takviyeli kompozit plakalarda delik delme işleminin mekanik ve yorulma davranışlarına etkileri üzerine yapılan çalışmaların özeti.

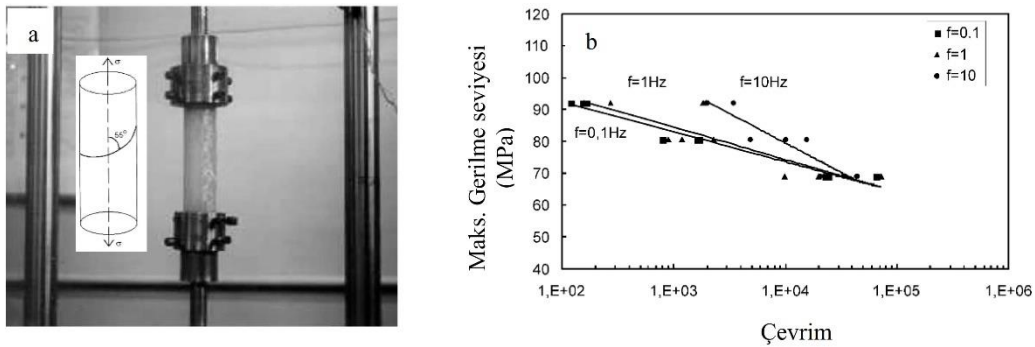
Haeger vd. (2016)	[0, 45, 90, -45] _s CFRP, K:2, 4 ve 6 mm	Ø6 mm 90° uç açılı helisel matkap, Ø5,9 mm 85° uç açılı kademeli matkap, n: 5000 ve 5305 dev/dk f: 0,07 ve 0,06 mm/dev	Quasi-statik: Çekme Yatak dayanımı 4 nokta eğilme
Tao vd. (2016)	[0/45/90/-45] _{2s} ve [0/45/0/-45] _{2s} CFRP, K: 2,4 mm	Ø6, 9 ve 12 mm elmas kaplı helisel matkap	Quasi-statik: Çekme
Karimi vd. (2017)	GFRP, K: 6 mm	Ø5 mm HSS helisel matkap n: 315 – 1000 dev/dk f: 31,5 – 125 mm/dk	Quasi-statik: Basma
Silva vd. (2017)	CFRP, K: 3,6 mm	Ø6 mm helisel ve özel geometrilili matkaplar n: 1120 ve 1800 dev/dk f: 0,12 ve 0,30 mm/dev	Quasi-statik: Yatak dayanımı
Sypt vd. (2017)	[(90/+45/-45/0) ₄ /(0/+45/-45/90) ₄] CFRP, K: 8mm	Ø8 mm delik	Yorulma: Yatak dayanımı R=0 f: 5 Hz Yük oranı: %50 – 70
Yenigün ve Kilickap (2018)	(+45/-45) CFRP, K:6 mm	Ø6 mm HSS ve WC helisel ve özel geometrilili matkap n: 1000 – 5000 dev/dk f: 0,05 – 0,15 mm/dev	Quasi-statik: Çekme
Heidary vd. (2018)	GFRP/MWCNT K: 2,6±0,1 mm	Ø4 ve 5 mm HSS n: 315 ve 630 dev/dk f: 0,04 – 0,1 mm/dev	Quasi-statik: 3 nokta eğilme
Duan vd. (2019)	[45 / -45 / 0 / 0 / 45 / -45 / 0 / 0 / 0 / 90] _s CFRP, K: 2,6 mm	Ø6 mm yapay delaminasyonlu delikler	Quasi-statik: Basma
Shahkhosravi vd. (2019)	[0] ₃₂ ve [0-90] ₈ GFRP, K: 5 mm	Ø4 mm HSS helisel matkap n: 3000 ve 10000 dev/dk f: 50 – 150 mm/dk	Yorulma: 3 nokta eğilme f: 5 Hz Yük oranı: %70 ve 80
Haeger vd. (2019)	[0/45/90/-45] _{2s} CFRP, K:4 mm	Ø5,9 mm WC aşınmış ve yeni helisel matkaplar n: 5305 dev/dk f: 0,06 mm/dev	Yorulma: 4 nokta eğilme R=0,1 f: 5 Hz Deplasman seviyesi: 8 – 9,2 mm
Safarabadi ve Sardar (2020)	[0/90] _{2s} , [15/-75] _{2s} , [30/-60] _{2s} ve [45/-45] _{2s} GFRP	Ø5 mm delik, 3 – 20 mm yarıçapa sahip delaminasyon	Quasi-statik: Yatak dayanımı
Meinhard vd. (2021)	[0/45/90/-45] _{3s} CFRTP, K: 3,9±0,1 mm	Ø5,9 mm WC aşınmış ve yeni helisel matkaplar n: 1325 ve 5305 dev/dk f: 0,06 ve 0,6 mm/dev	Quasi-statik: Çekme 4 nokta eğilme
Yenigün ve Kilickap (2021)	Tek yönlü, 0/90, ve ± 45 CFRP, K:6 mm	Ø6 mm HSS ve WC helisel ve özel geometrilili matkap n: 1000 – 5000 dev/dk f: 0,05 – 0,15 mm/dev	Quasi-statik ve Yorulma: Çekme Yük oranı: %75 – 90
Wang vd. (2022)	[45/0/-45/90] _{3s} CFRP, K: 3 mm	Ø6 mm WC kaplamalı ve kaplamasız takımlar n: 1000 ve 4000 dev/dk f: 0,02 – 0,03 mm/dev	Quasi-statik ve Yorulma: Çekme R=0,1 f: 10 Hz Yük oranı: %70

n: iş mili hızı, f: ilerleme hızı, K: kalınlık, R: gerilme oranı, f: frekans

2.4.4 Kompozit Boruların Mekanik Karakterizasyonu Üzerine Yapılan Çalışmalar

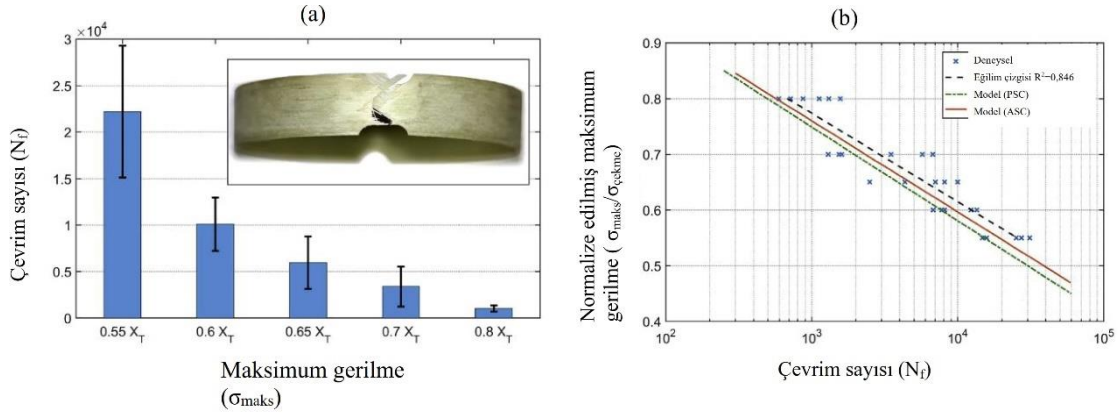
Kompozit boruların mekanik karakterizasyonu konusunda literatürde pek çok çalışma mevcuttur. Bu çalışmalarda kompozit borunun mekanik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla eksenel çekme ve yorulma (Joseph ve Perreux 1994, Kaynak ve Mat 2001), halka çekme ve yorulma (Benyahia vd. 2018, Kara vd. 2019, Shabani vd. 2019, Rafiee ve Abbasi 2020, Rafiee vd. 2020), radyal basma (Eggers vd. 2019, Gao vd. 2019, Błażejowski vd. 2021), eksenel basma (Tao vd. 2017, Gemi vd. 2022), iç basınç altında patlatma ve yorulma (Tarakçıoğlu vd. 2005, Gemi vd. 2009, Krishnan vd. 2015) ve düşük hızda darbe (Gemi vd. 2018) gibi test yöntemleri kullanılmıştır.

Joseph ve Perreux (1994) cam elyaf takviyeli filaman sarım kompozit boruların eksenel çekme yükü altındaki yorulma davranışını incelemişlerdir. Çalışmada farklı frekanslar için S/N eğrilerini elde etmişler ayrıca hasar gelişimini incelemişlerdir. Malzeme ömrünün frekans ve gerilme seviyesinin bir fonksiyonu olduğunu, frekansın artmasıyla malzeme bozulma hızı da sıcaklık artışı sebebiyle artmasına rağmen daha yüksek çevrim sayısına ulaşıldığını belirtmişlerdir. Kaynak ve Mat (2001) cam elyaf takviyeli filaman sarım kompozit boruların eksenel çekme yükü altında yorulma davranışını ve makroskobik ve mikroskobik boyutta hasar davranışını incelemişlerdir. Farklı frekanslar için yapılan testler ile S/N eğrilerini elde etmişler (Şekil 2.34b) ve hasar kinetiğini oluşturmuşlardır. Hasarın ilk olarak matriste çatlak oluşmasıyla başladığını, bu çatlağın elyaf sarım açısı boyunca ilerleyip yayıldığını ve sonra elyafın kırılarak nihai hasarın oluştuğunu belirtmişlerdir.



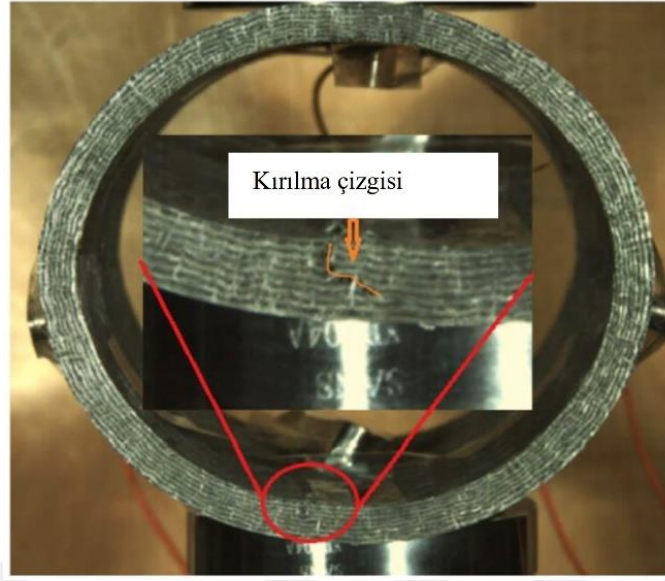
Şekil 2.34 Kompozit borularda eksenel yorulma testi, (a) test düzeneği, (b) farklı frekanslarda elde edilmiş S-N eğrileri (Kaynak ve Mat 2001).

Birçok araştırmacı kompozit boruların çevresel yöndeki mekanik özelliklerini belirlemek üzere quasi-statik halka çekme ve halka çekme-çekme yorulma testleri konusunda çalışmalar yürütmüşlerdir. Benyahia vd. (2018) cam elyaf takviyeli kompozit boruların farklı sıcaklıklarda mekanik özelliklerini deneysel olarak incelemişlerdir. -40°C ile 80°C arasındaki sıcaklıklarda disk ayırma yani halka çekme yöntemi ile testleri gerçekleştirmişler ve sıcaklığın artmasıyla kompozit borunun mekanik özelliklerinde azalma olduğunu, düşük sıcaklıklarda ise kompozitin rijitliğinin arttığını dolayısıyla kırılma deplasmanında ise ciddi bir düşüş olduğunu bildirmişlerdir. Kara vd. (2019) iç basınç altında yorulma yüküne maruz kalmış cam elyaf takviyeli kompozit boruların çevresel yöndeki çekme dayanımını incelemişler hasar oluşumunu gözlemlemişlerdir. 1000 ile 10000 çevrim arasında numuneler patlatma basıncının %35'inde dinamik yüke maruz bırakılmış sonra disk ayırma metoduyla çevresel yöndeki dayanımı incelenmiştir. Çalışma sonucunda yorulma çevrim sayısının çekme dayanımı üzerinde önemli etkisinin olduğunu vurgulamışlardır. Rafiee ve Abbasi (2020) filaman sarım kompozit boruların çevresel yöndeki çekme dayanımını ve hasar oluşumunu disk ayırma yöntemi ile deneysel ve nümerik olarak incelemişlerdir. Nümerik model ile tahmin ettikleri dayanım değerinin deneysel sonuçlar ile iyi bir uyuma sahip olduğunu belirtmişler ayrıca çentik sebebiyle oluşan gerilme yığılması faktörünü de nümerik analiz ile belirlemişler ve çentik boyunca oluşan gerilme dağılımını da incelemişlerdir. Rafiee vd. (2020) başka bir çalışmada filaman sarım kompozit boruların disk ayırma metoduyla çevresel çekme-çekme yükü altındaki yorulma davranışını teorik ve deneysel olarak araştırmışlardır. Gerilme analizi, hasar tahmini ve mekanik özelliklerde azalma gibi üç farklı bölümden oluşan teorik modelin, elde edilen deneysel sonuçlar ile iyi bir uyuma sahip olduğunu gözlemlemişlerdir. Shabani vd. (2019) ise tek yönlü cam elyaf takviyeli kompozit halkaların quasi-statik çekme ve yorulma davranışını deneysel olarak incelemişlerdir. Ayrıca farklı istifleme sırasına sahip çentikli kompozit halka numunenin yorulma davranışını incelemek için nümerik bir model oluşturmuşlar ve bu modelin uygulanabilirliğini değerlendirmek için, çentikli kompozit halkalar üzerinde farklı stres durumları altında yorulma testi yapmışlar ve güvenilir tahmin yaptığı için modelin tasarım aşamasında kullanılabilir olduğunu belirtmişlerdir. Deneysel sonuçlar ile modellerin karşılaştırılması Şekil 2.35'te gösterilmiştir.



Şekil 2.35 Kompozit halka yorulma testi, (a) deney sonuçları, (b) modeller ile tahmin edilen yorulma ömrünün deneysel sonuçlarla karşılaştırılması (Shabani vd. 2019).

Eggers vd. (2019) filaman sarım kompozit borularda sarım açısı, istifleme sırası ve çap-kalınlık oranının radyal basma, eksenel basma ve çevresel yöndeki çekme davranışına etkisini deneysel olarak araştırmışlardır. $\pm 90^\circ$ sarım açısına sahip numunenin en iyi radyal basma ve çevresel çekme dayanımına sahip olduğunu, ancak $\pm 60^\circ$ sarım açısına sahip numunenin ise en iyi eksenel basma karakteristiğine sahip olduğunu bildirmişlerdir. Gao vd. (2019) karbon-karbon (C/C) kompozit boruların quasi-statik radyal basma davranışını incelemişlerdir. Çalışmada ilk hasarın kompozitin deney cihazına temas ettiği alt kısımda meydana geldiğini gözlemlemişlerdir (Şekil 2.36). Bu malzemedeki hasar davranışının metallerde olduğu gibi ilerleyici şekilde olduğunu ancak yük taşıma kapasitesinin delaminasyon, büyük çatlaklar ve elyaf demeti kırılması gibi sebeplerle ciddi olarak düşebileceğini bildirmişlerdir. Błażejowski vd. (2021) ise filaman sarım karbon elyaf takviyeli kompozit borularda kürlenme sonrasında soğutma hızının radyal basma davranışı üzerindeki etkisini deneysel ve nümerik olarak araştırmışlardır. Fırında, oda sıcaklığında ve suda olmak üzere üç farklı ortamda kürlenme sonrası malzeme soğumaya bırakılmış ve sonrasında radyal basma dayanımları ve ayırma metoduyla kalıcı gerinim değerleri incelenmiştir. Testler sonucunda, kürlenme sonrası hızlı soğutmanın malzeme mekanik performansını hafifçe düşürdüğünü bildirmişlerdir.

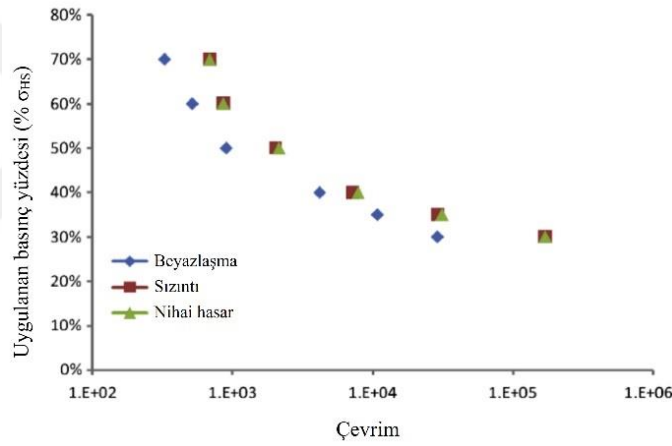


Şekil 2.36 Radyal basma testi sırasında C/C kompozit borunun ilk hasarı (Gao vd. 2019).

Tao vd. (2017) farklı tabaka oryantasyonlarına sahip prepreg karbon elyaf takviyeli kompozit boruların aksel basma yükü altındaki davranışını incelemişlerdir. Hasar davranışını ve kırılma morfolojisini yüksek hızlı kamera ve SEM kullanarak incelemişlerdir. Oryantasyonun basma davranışını önemli ölçüde etkilediğini ve hasar modunun açığa göre değiştiğini, 45° 'den daha düşük açılı tabakların aksel basmaya maruz kalan mühendislik uygulamaları için uygun olmadığını bildirmişlerdir. Gemi vd. (2022) ise farklı çaplara sahip düşük hızda darbe hasarlı filaman sarım cam elyaf takviyeli kompozit boruların aksel basma davranışını araştırmışlardır. Boru çapı arttıkça radyal burkulma yükünde azalma olduğunu ve hasar davranışının değiştiğini ayrıca kırılma gerinim değerinin oluşan hasarla ilişkili olarak darbe hızı arttıkça azaldığını bildirmişlerdir.

Kompozit boruların çevresel yöndeki dayanımını belirleme için kullanılan bir diğer ve en önemli testlerden birisi de iç basınç altında patlatma testidir. Basınç, patlama basıncının altında tutulup dinamik yükleme yapılarak bu yöntem ile yorulma testleri de gerçekleştirilebilmektedir. Tarakçioğlu vd. (2005) cam elyaf takviyeli filaman sarım kompozit boruların iç basınç altında yorulma davranışını incelemişlerdir. Farklı yük seviyeleri ve sabit frekansta yapılan testler sonucunda S/N eğrileri oluşturmuşlar ayrıca hasarın makro boyutta beyazlaşma, sızıntı ve nihai hasar sırasıyla gerçekleştiğini

bildirmişlerdir. Gemi vd. (2009) cam elyaf takviyeli filaman sarım kompozit boruların iç basınç altında yorulma davranışını incelemişlerdir. S/N eğrisi üzerinde hasar modlarını da göstermişler (Şekil 2.37) ve yüksek yüklerde nihai hasarın elyaf hasarlarından kaynaklandığını ancak düşük yüklerde matris hasarı tarafından domine edildiğini vurgulamışlardır. Krishnan vd. (2015) ise farklı sarım açısına sahip cam elyaf takviyeli kompozit boruların çok eksenli iç basınç atındaki davranışını incelemişlerdir. Yeni bir test düzeneği ile saf eksenel yükten saf çevresel yüke kadar değişen yükleme koşullarında çevrimli basınç altında boru yüzeyinde su damlacıkları oluşana kadar testleri gerçekleştirmişlerdir. Testler sonucunda her bir sarım açısının farklı yükleme koşulunda optimum basınca sahip olduğunu yani tek bir sarım açısının tüm yükleme koşullarında en yüksek dayanıma sahip olmadığını belirtmişlerdir.



Şekil 2.37 Farklı hasar aşamalarına bağlı S-N eğrisi (Gemi vd. 2009).

Bazı araştırmacılar ise kompozit boruların endüstride kullanımı sırasında maruz kaldığı yüklerden biri olan düşük hızda darbe üzerine odaklanmışlardır. Gemi vd. (2018) cam elyaf takviyeli kompozit boruların düşük hızlı darbe davranışını deneysel olarak araştırmışlardır. Kuvvet-zaman ve kuvvet-deplasman grafiklerini elde etmişler ayrıca hasar oluşumunu değerlendirmişlerdir. Hasarın radyal yöndeki deplasman tarafından domine edildiğini, elyaf-matris ayrılması(debonding), radyal çatlak, transfer çatlak ve delaminasyonun hasarlı bölgede gözlemlenen temel hasar modları olduğunu belirtmişlerdir. Detaylı incelemeleri yapılan bu çalışmaların özeti Çizelge 2.4'te verilmiştir.

Çizelge 2.4 Elyaf takviyeli kompozit boruların mekanik karakterizasyonu üzerine yapılan çalışmaların özeti.

Yazar ve yıl	Kompozit	Mekanik test ve deney parametreleri	Araştırma konusu
Joseph ve Perreux (1994)	[+55°, -55°] ₃ Filaman sarım GFRP, İÇ: 60 mm, K:2,5 mm	<i>Yorulma:</i> Eksenel çekme R=0 f: 0,02 – 5 Hz Yük oranı: %46 – 73	S/N eğrisi Hasar analizi
Kaynak ve Mat (2001)	±55° Filaman sarım GFRP, İÇ: 60 mm, K:0,8 mm	<i>Yorulma:</i> Eksenel çekme R=0,1 f: 0,1 – 10 Hz Yük oranı: %60 – 80	S/N eğrisi Hasar analizi
Tarakçıoğlu vd. (2005)	±55° Filaman sarım GFRP, İÇ: 72 mm, K:1,6 mm	<i>Yorulma:</i> İç basınç R=0,05 f: 0,42 Hz Yük oranı: %30 – 70	S/N eğrisi Hasar analizi
Gemi vd. (2009)	(±75°) ₂ Filaman sarım GFRP, İÇ: 72 mm, K:1,6 mm	<i>Yorulma:</i> İç basınç R=0,05 f: 0,42 Hz Yük oranı: %30 – 70	S/N eğrisi Hasar analizi
Krishnan vd. (2015)	[±45°] ₄ , [±55°] ₄ , ve [±63°] ₄ GFRP, İÇ: 100 mm K:4,18 – 4,40 mm	Çevrimli Çevresel ve Eksenel çekme R=0 ve -1 f: 2 Hz Yüklenme durumu: (Çevresel:Eksenel) 0:1/1:1/2:1/4:1/1:0	Hasar analizi
Tao vd. (2017)	[0 ₄ /±0°], [0 ₄ /±30°], [0 ₄ /±45°], [0 ₄ /±60°], [0 ₄ /±90°] CFRP, İÇ: 18 mm, K:0,9 mm	<i>Quasi-statik:</i> Eksenel basma	Yük-deplasman grafiği Hasar analizi
Benyahia vd. (2018)	±55° Filaman sarım GFRP, İÇ: 86 mm ± 0,2 K:6,2 ± 0,1 mm	<i>Quasi-statik:</i> Çevresel çekme (Disk ayırma) Sıcaklık: -40 – 80°C	Yük-deplasman grafiği Hasar analizi
Gemi vd. (2018)	(±55°) ₃ Filaman sarım GFRP, İÇ: 72 mm, K:2,4 ± 0,04 mm	Düşük hızda darbe Darbe hızı: 1,5 – 3 m/s	Kuvvet-deplasman grafiği Enerji grafikleri Hasar analizi
Eggers vd. (2019)	[± 60], [± 75], [± 90], [± 60/ ± 90], [± 75/ ± 90], [± 90/ ± 90], Filaman sarım CFRP, İÇ: 50,8 ve 136 mm, K: 0,84 – 1,7 mm	<i>Quasi-statik:</i> Çevresel çekme (Disk ayırma) Radyal basma Eksenel basma	Yük-deplasman grafiği Rijitlik
Kara vd. (2019)	±55° Filaman sarım GFRP, İÇ: 72 mm K:2,375 mm	<i>Yorulma:</i> İç basınç R=0,05 f: 0,416 Hz Yük oranı: %35 <i>Quasi-statik:</i> Kalıcı çevresel çekme (Disk ayırma)	Çevrim-dayanım grafiği
Shabani vd. (2019)	[90 ₄], [90 ₂ /45 ₂ /-45 ₂ /90 ₂] GFRP, İÇ: 105 ve 100 mm K:1,5 ve 2 mm	<i>Quasi-statik ve yorulma:</i> Çevresel çekme (Disk ayırma) R=0,1 f: 5 Hz Yük oranı: %30 – 70 ve %55 – 80	S/N eğrisi Nümerik yorulma modeli

İÇ: iç çap, K: kalınlık, R: gerilme oranı, f: frekans

Çizelge 2.4 (Devam) Elyaf takviyeli kompozit boruların mekanik karakterizasyonu üzerine yapılan çalışmaların özeti.

Gao vd. (2019)	C/C kompozit, İÇ: 130 mm K:10 mm	<i>Quasi-statik:</i> Radyal basma	Kuvvet-deplasman grafiği Nümerik modelleme
Rafiee ve Abbasi (2020)	Filaman sarım GFRP, İÇ: 101,6 mm K:2,8 mm	<i>Quasi-statik:</i> Çevresel çekme (Disk ayırma)	Nümerik modelleme
Rafiee vd. (2020)	Filaman sarım GFRP, İÇ: 101,6 mm K:2,8 mm	<i>Yorulma:</i> Çevresel çekme (Disk ayırma) R=0,1 f: 10 Hz Yük oranı: %60 – 80	Teorik modelleme S/N eğrisi
Błazejewski vd. (2021)	Filaman sarım CFRP, İÇ: 104 mm K:19,2 mm	<i>Quasi-statik:</i> Radyal basma	Yük-deplasman grafiği Nümerik modelleme
Gemi vd. (2022)	(±55°) ₃ Filaman sarım GFRP, İÇ: 54, 72 ve 96 mm, K:2,4	<i>Quasi-statik:</i> Düşük hızda darbe sonrası basma	Gerilme-gerinim grafiği Hasar analizi

İÇ: iç çap, K: kalınlık, R: gerilme oranı, f: frekans

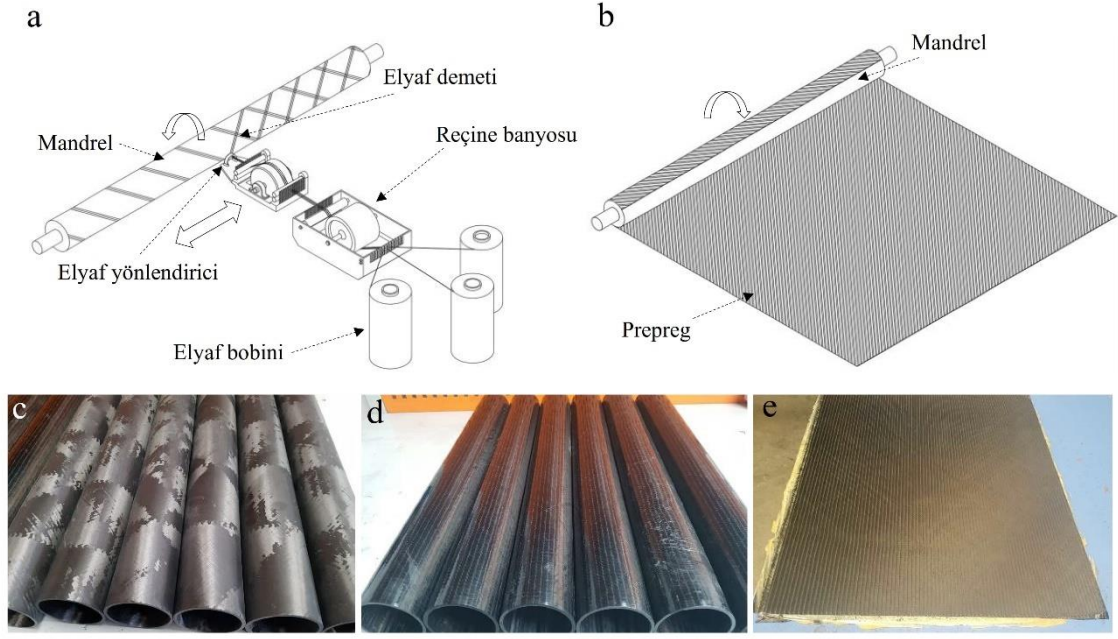
3. MATERYAL ve METOT

3.1 Kompozit Boruların Üretimi

Çalışmada kullanılan kompozit borular endüstride yaygın olarak kullanılan filaman sarım ve rulo sarım yöntemleri ile üretilmişlerdir. Filaman sarım metodunda elyaf demetleri reçine banyosundan geçirildikten sonra dönen mandrel üzerine $\pm 45^\circ$ açıyla sarılmış ve dönel pozisyonda 100°C sıcaklıkta 1,5 saat süreyle kürlenmiştir. Kürlenme sonrası filaman sarım prosesiyle üretilmiş boruların yüzeyindeki reçine fazlası kısımlar daha pürüzsüz bir yüzey elde etme amacıyla taşlanmıştır. Filaman sarım prosesinde takviye elemanı olarak 12K-A49 (DowAksa) karbon elyaf kullanılırken matris olarak F-RES 11564/F-HARD 13486 (Fibermak Composites) epoksi ve sertleştirici kullanılmıştır. Rulo sarım prosesinde ise $\pm 45^\circ$ dikişli karbon elyaf kumaş (CLT400 E05A-45/45 BIAxIAL CARBON, METYX Composites) ve F-RES 21/F-HARD 22 (Fibermak Composites) epoksi/sertleştirici kullanılarak oluşturulmuş prepreg, mandrel üzerine sarılmış ve kalıp içerisinde 125°C sıcaklıkta 1,5 saat süreyle kürlenmiştir. Kompozit borular ile kompozit plakanın işlenebilirlik karakteristiğini karşılaştırarak incelemek amacıyla rulo sarım borunun üretiminde kullanılan takviye elemanı ve matris kullanılarak vakum torbalama yöntemiyle aynı kür koşullarında kompozit plaka üretilmiştir. Kompozitlerin üretiminde kullanılan takviye elemanı ve reçinenin özellikleri EK 1’de verilmiştir. Kompozitler birbirlerine yakın kalınlıkta üretilmiş olup, üretim yöntemine ilave olarak kullanılan takviye ve reçinenin farklılığı tabaka sayısında farklılaşmaya neden olmuştur. Kompozitlerin üretim prosesi ve üretilmiş kompozitler Şekil 3.1 ’de gösterilmiş olup kompozitlerin fiziksel özellikleri ise Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1 Üretilen kompozitlerin fiziksel özellikleri.

Kompozit	İstifleme ve oryantasyon	İç çap (mm)	Kalınlık (mm)	Yoğunluk (g/cm ³)	Elyaf hacim oranı (V _r)
Filaman sarım CFRP boru	($\pm 45^\circ$) ₉	60	$3,10 \pm 0,05$	1,513	$47,42 \pm 1,61$
Rulo sarım CFRP boru	($\pm 45^\circ$) ₇	60	$3,18 \pm 0,12$	1,463	$36,78 \pm 2,96$
CFRP plaka	($\pm 45^\circ$) ₇	-	$3,27 \pm 0,11$	1,494	$46,33 \pm 1,52$



Şekil 3.1 Çalışmada kullanılan kompozitlerin üretim prosesinin şematik gösterimi, (a) filaman sarım yöntemi, (b) rulo (prepreg) sarım yöntemi, üretilmiş kompozitler (c) filaman sarım CFRP boru, (d) rulo sarım CFRP boru ve (e) CFRP plaka (Morkavuk vd. 2022a).

Kompozitlerin elyaf hacim oranları işlenebilirliğin yanı sıra mekanik özellikleri de etkileyeceğinden, karakterize edilmesi önemlidir. Bu sebeple çalışmada kullanılan kompozitlerin elyaf hacim oranları ASTM D3171 standardına göre belirlenmiştir. Bu kapsamda filaman sarım, rulo sarım ve plakadan üçer numune hazırlanmış ardından 0,1 mg hassasiyetindeki terazi ile numunelerin kütlesi ölçülmüş ve sonra numuneler kül fırınında 550 °C sıcaklıkta yakılmıştır (Şekil 3.2). Reçinenin tümüyle kompozitten uzaklaştığından emin olmak için koku ve duman kesildikten sonra numuneler fırından alınmıştır. Proses yaklaşık 1,5 saat sürmüştür. Ardından kalan elyaf tekrar tartılarak kütle farkı belirlenmiş ve Denklem 3.1 ile elyaf hacim oranı belirlenmiştir. Elyaf hacim oranları Çizelge 3.1’de verilmiştir. Bu bağındaki M_i ve M_f sırasıyla kompozitin kül fırınına koyulmadan önceki kütlesi ile yanma sonrası ölçülen kütleleri ifade etmektedir. ρ_c ve ρ_r ise sırasıyla kompozitin ve elyafın yoğunluklarıdır.

$$V_r = (M_f/M_i) \times 100 \times \rho_c/\rho_r \quad (3.1)$$



Şekil 3.2 Elyaf hacim oranının belirlenmesi.

3.2 Delik Delme Testleri

3.2.1 Deney Düzenegi ve Parametreler

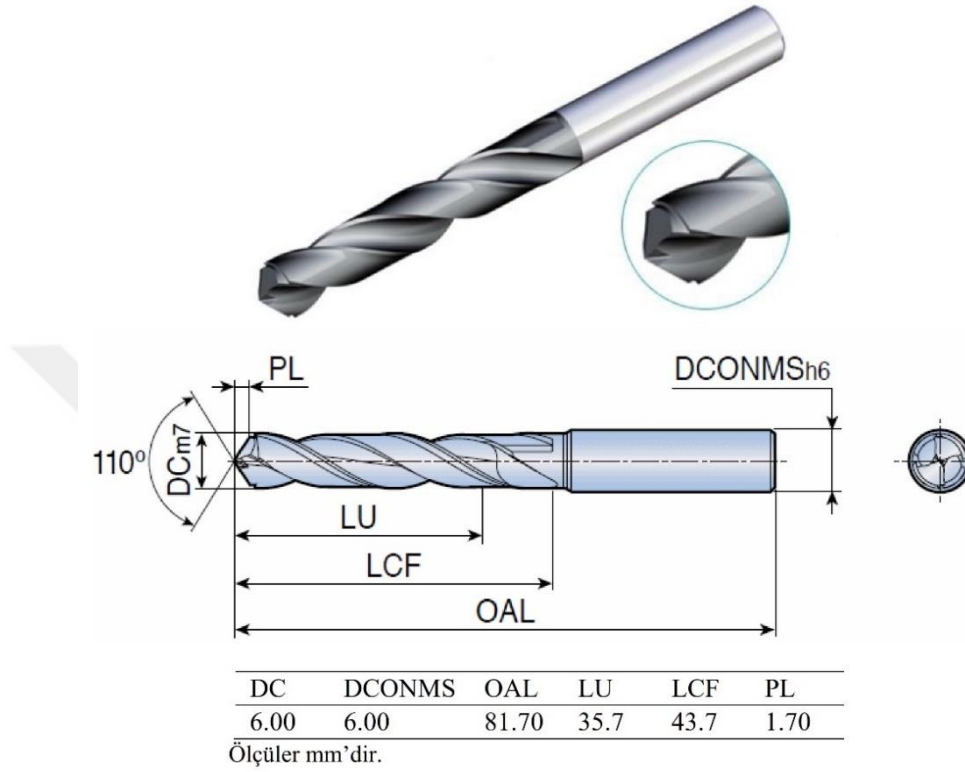
Delik delme testleri Quaser Mv 154c CNC dik işlem merkezi kullanılarak yapılmıştır. Boruların delinmesi için polyamid malzemeden yapılmış V şeklinde fikstür kullanılmıştır. Plaka delinirken de yine polyamid malzemeden yapılmış düz bir fikstür kullanılmıştır. Fikstürler tezgâh tablası üzerine sabitlenmiş olan dinamometreye cıvata ile bağlanmıştır. Deneyler hem destek elemanı kullanılarak hem de desteksiz olarak gerçekleştirilmiştir. Desteksiz delmede plakanın alt kısmı boş bırakılırken boruların da iç kısmı boş bırakılmıştır. Destekli delmede ise borular için, boru içine sıkı geçecek şekilde polyamid silindirik parça kullanılırken, plaka için ise polyamid plaka kullanılmıştır. Testler kuru kesme koşullarında yapılmış olup herhangi bir kesme sıvısı kullanılmamıştır. Delik delme testleri için deney düzeneği Şekil 3.3'te gösterilmiştir.



Şekil 3.3 Delik delme testleri için deney düzeneği, (a) CFRP borunun desteksiz delinmesi, (b) CFRP borunun destek kullanılarak delinmesi, (c) CFRP plakanın desteksiz delinmesi, (d) CFRP plakanın destek kullanılarak delinmesi (Morkavuk vd. 2022a).

Testlerde kullanılacak olan matkap çapı ve malzemesinin seçimi için literatürde mevcut olan önceki çalışmalar detaylı bir şekilde incelenmiştir. Bu çalışmalarda kompozitlerin en yaygın kullanıldığı alan olan havacılık ve uzay endüstrisinde parçaların delinmesinde genellikle 4,8-10 mm çapa sahip matkapların tercih edildiği vurgulanmıştır (Aamir vd. 2019, Giasin vd. 2021). Öte yandan kompozit plakalarda delik delme prosesinin etkisini incelemek amacıyla yapılan çalışmaların çoğunda ASTM D 5766 (ASTM 2011) standardı gereğince 6 mm çapa sahip matkaplar tercih edilmiştir (Çizelge 2.3). Kompozitlerin delinmesi üzerine yapılan çalışmalar incelendiğinde ise (Çizelge 2.1) WC (Tungsten karbür) takımların yaygın olarak tercih edildiği görülmektedir. Literatürde CFRP kompozitlerin delinmesinde karbon elyafın aşındırıcı olması sebebiyle HSS (Yüksek hız çeliği) takımların daha kötü bir performans sergilediği, bu sebeple WC takımların daha iyi bir seçenek olduğu vurgulanmıştır (Davim ve Reis 2003). Öte yandan literatürde elmas kaplı takımların, takım aşınması testlerinde daha iyi performans gösterdiği bildirilmiştir (Wang vd. 2013). Bu veriler doğrultusunda çalışmada CFRP malzemelerin delinmesi

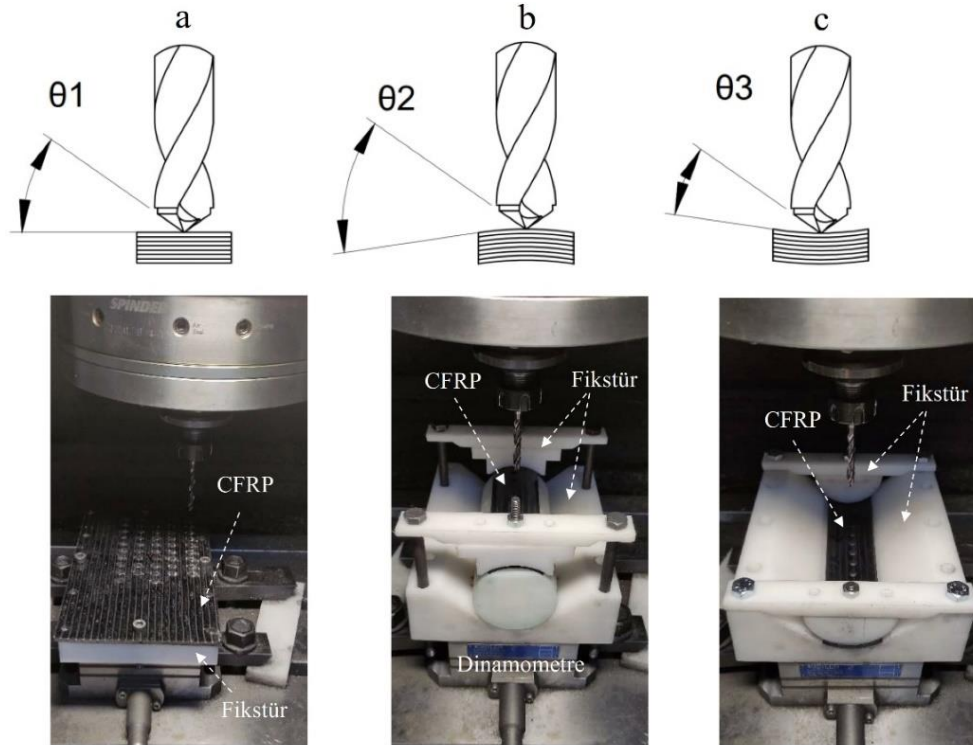
için dizayn edilmiş Taegutec CDF elmas kaplı, 6 mm çapında, 30° helis açısına, 110° uç açısına ve kademeli geometriye sahip WC karbür matkap tercih edilmiştir. Aşınmanın sonuçları etkilememesi için her 15 delik için yeni bir matkap kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan matkap Şekil 3.4’te verilmiştir.



Şekil 3.4 Çalışmada kullanılan matkap (İnt. Kyn. 3).

Literatürdeki çalışmaların büyük çoğunluğunda ilerleme hızının delaminasyon hasarı üzerinde kayda değer bir etkisi olduğu vurgulanırken, kesme hızı için farklı sonuçlar rapor edilmiştir. Bazı çalışmalarda kesme hızı ile delaminasyon hasarı azalırken bazı çalışmalarda sabit kalmış, birkaç çalışmada ise kayda değer bir etki gözlemlenmemiştir (Geng vd. 2019). Kesme parametreleri belirlenirken önceki çalışmalarda kullanılan parametreler incelenmiş ancak kullanılan bileşenlerin (reçine ve elyaf), elyaf oryantasyonunun, tabaka sayısı ile kalınlığın ve üretim yönteminin birçok çalışmada birbirinden farklı olması sebebiyle ön test yaparak deney parametrelerinin belirlenmesinin daha uygun olacağına karar verilmiştir. Hem ön test yapmak hem de giriş bölümünde belirtilen farklı yüzeylerin delinebilme karakteristiğini incelemek için 1000, 2000, 4000 ve 8000 dev/dk iş mili hızlarında ve 400, 600 ve 800 mm/dk ilerleme hızlarında rulo sarım boru ve plaka üzerinde delik delme testleri gerçekleştirilmiştir. Ön

test parametreleri belirlenirken kesici takım broşüründeki öneriler dikkate alınmış, bunun yanı sıra hasar oluşumunu gözlemlemek amacıyla önerilen sınırlar dışına da çıkılmıştır. Aynı takviye elemanı ve reçineye sahip olduklarından ön test amacıyla yapılan farklı yüzey geometrilerinin delinebilme karakteristiğinin araştırılması testlerinde sadece rulo sarım boru ve plaka iş parçası olarak kullanılmıştır. Bu kapsamda boru eksen boyunca 4 parçaya ayrılarak dış bükey (konveks) ve iç bükey (konkav) yüzeyler elde edilmiştir. Dış bükey ve iç bükey yüzeylerin delinebilmesi için V şekilli fikstür üzerine bağlanabilen aparatlar üretilmiş ve testler gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.5). Herhangi bir destek etkisi oluşmaması için kompozitlerin alt kısımlarında yaklaşık 4 mm boşluk bırakılmıştır. Ön testler sonucunda 4000 dev/dk'dan sonra itme kuvvetinin çok değişmediğini, 1000 dev/dk'nın ise malzeme üzerinde aşırı hasara sebep olması sebebiyle tüm malzemelerin test edildiği delik delme testlerinde 1500 ile 4500 dev/dk arasında iş mili hızı seçilmesinin uygun olduğu görülmüştür. Malzeme üzerinde ilerleme hızına bağlı oluşan hasarlar arasında daha belirgin farklılık oluşması için 300 ile 900 mm/dk arasında ilerleme hızı tercih edilmiştir. Deney parametreleri Çizelge 3.2'de verilmiştir. Tüm parametreler üçer tekrarlı olacak şekilde test edilmiştir.



Şekil 3.5 Farklı yüzey eğrilğine sahip CFRP kompozitlerde delme işlemi, (a) düz yüzey, (b) dış bükey yüzey, (c) iç bükey yüzey (Morkavuk vd. 2022b).

Çizelge 3.2 Delik delme testi deney parametreleri.

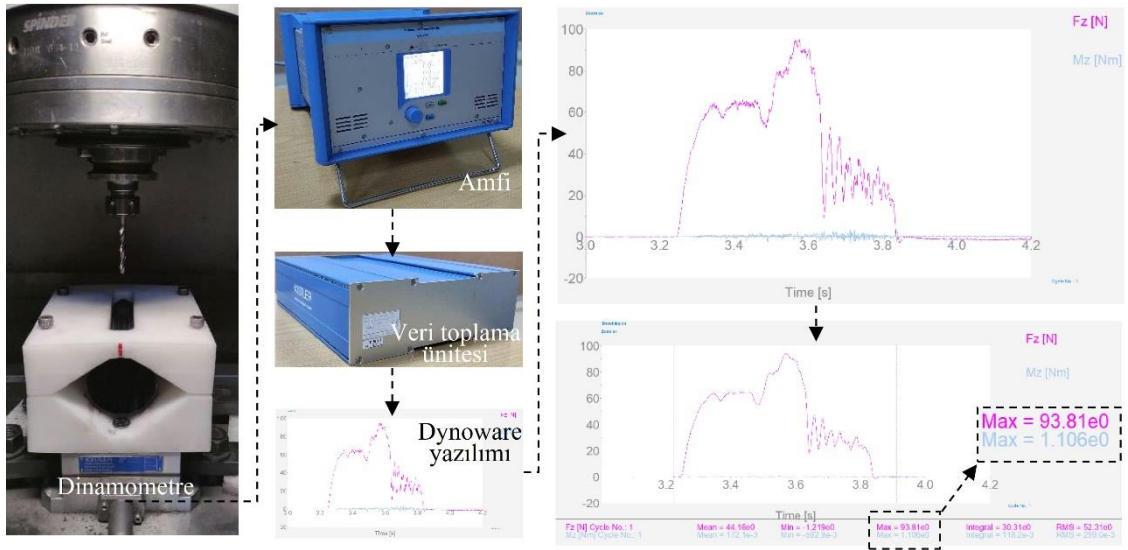
Parametreler	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
İş mili hızı (dev/dk)	1500	3000	4500
İlerleme (mm/dk)	300	600	900
Kompozit malzeme	Filaman sarım CFRP boru	Rulo sarım CFRP boru	CFRP plaka
Destek kullanımı	Evet	Hayır	-

3.2.2 Ölçüm ve Görüntüleme Yöntemleri

Çalışmada farklı üretim yöntemleri ile üretilmiş kompozit boruların ve plakanın delik delme karakteristiği itme kuvveti, delme kaynaklı delaminasyon hasarı ve delik içi yüzey kalitesi incelenerek belirlenmiş ve karşılaştırılmıştır. Ölçüm yöntemleri burada ayrı başlıklar altında detaylı olarak verilmiştir.

3.2.2.1 İtme Kuvveti Ölçümü

Delik delme sırasında x (F_x) ve y (F_y) yönündeki kesme kuvveti bileşenleri çok düşüktür. Bu sebeple itme kuvveti olarak adlandırılan z yönündeki kesme kuvveti (F_z) işlenebilirliğin değerlendirilmesinde kullanılmaktadır (Gemi vd. 2020a). İtme kuvveti deney esnasında 2000 Hz örnekleme hızıyla tezgah üzerine sabitlenmiş olan Kistler 9257B dinamometre, 5070A amfi ve 5697A veri toplama ünitesi ve Dynoware yazılımı yardımıyla ölçülmüştür. Ölçüm sonrası ham kuvvet-zaman grafiği elde edilmiş ardından oluşan gürültü ve dalgalanmaların analiz edilen kuvvet verisini olumsuz etkilememesi için filtreleme işlemi yapılmıştır. Güç tüketimi ve delik delme kaynaklı hasarlar üzerinde anahtar role sahip olduğundan, filtreleme sonrası delik delme işleminin başlangıcı ve bitişi arasında proses boyunca elde edilen maksimum kuvvet verisi kaydedilmiştir (Şekil 3.6). Deneylerde test edilen tüm parametreler için itme kuvvetleri ölçülmüştür.



Şekil 3.6 İtme kuvvetinin ölçümü.

3.2.2.2 Delaminasyon Ölçümü

Delik delme işlemi sonrası her bir deliğin giriş ve çıkış kısımları Keyence VHX-900F dijital mikroskop yardımıyla görüntülenmiş ve kaydedilmiştir. Kompozit boruların delik çıkış görüntülerinin alınabilmesi için deliklere uzak bir bölgeden boru eksen boyunca kesilmiştir. Delik giriş ve çıkışında oluşan delaminasyon hasarını ölçmek için literatürde önerilmiş pek çok yöntem bulunmakla birlikte Chen (1997) tarafından önerilen yöntem kolay uygulanması ve basitliği sebebiyle günümüzde halen birçok araştırmacı tarafından yaygın olarak tercih edilen ve kabul gören bir yöntemdir. Bu yöntemde, delamine olmuş maksimum hasarlı bölgeyi içine alan dairenin çapının (D_{max}) delik nominal çapına (D_{nom}) oranlanması ile delaminasyonun seviyesini karakterize eden delaminasyon faktörü (F_d) Denklem 3.2 ile hesaplanmaktadır. Delaminasyon hasarının incelenmesi ve hesaplanması aşamaları Şekil 3.7’de gösterilmiştir.

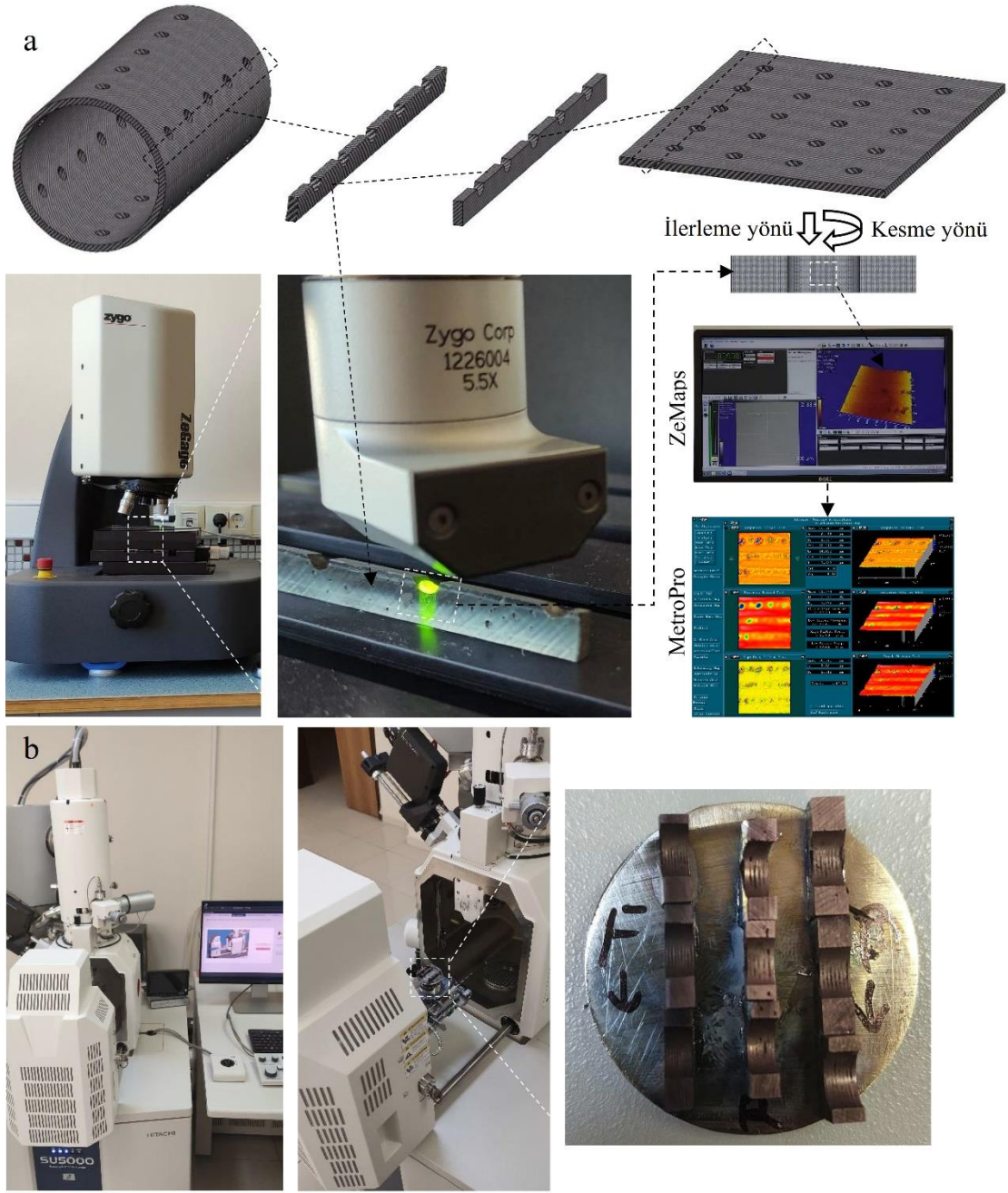
$$F_d = \frac{D_{max}}{D_{nom}} \quad (3.2)$$



Şekil 3.7 Delaminasyon hasarının ölçümü (Morkavuk vd. 2022a).

3.2.2.3 Delik İçi Yüzey Kalitesinin İncelenmesi

Delaminasyon ölçümleri sonrasında boru ve plaka üzerindeki delikler, Şekil 3.8a’da gösterildiği gibi ekseni boyunca kesilmiş ve kesme ile ilerleme yönü dikkate alınarak, yüzey pürüzlülüğü ve topografyası Zygo ZeGage üç boyutlu optik yüzey profilometresi, ZeMaps ve MetroPro yazılımları ile incelenmiştir. Sonrasında ise seçilen bazı delikler, delik içinde oluşan hasarları gözlemlemek üzere altın kaplama yapılarak Hitachi SU5000 taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiştir (Şekil 3.8b).



Şekil 3.8 Delik içi yüzey kalitesinin incelenmesi, (a) yüzey pürüzlülüğü ve topografya, (b) SEM analizi.

3.3 Delik Delme İşleminin Mekanik Özellikler Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi

Delik delme testlerinin sonuçları analiz edilerek filaman sarım ve rulo sarım borularda delik delme prosesinin etkisini incelemek üzere üç farklı koşulda delinmiş numuneler hazırlanarak çevresel yönde çekme, çevresel yönde çekme-çekme yorulma ve radyal

basma testleri yapılmıştır. Üç farklı koşul belirlenirken itme kuvveti, delaminasyon hasarı ve delik içi yüzey kalitesi dikkate alınmıştır. Bu kapsamda araştırılan parametreler içerisinde en fazla itme kuvveti ve dolayısıyla hasarın 1500 dev/dk iş mili hızı ve 900 mm/dk ilerleme hızı kombinasyonunda olduğu, en az itme kuvveti ve hasarın ise 4500 dev/dk iş mili hızı ve 300 mm/dk ilerleme hızı kombinasyonunda olduğu tespit edilmiştir. Bu sebeple bu iki koşula ilave olarak destek kullanımının da etkisini araştırmak için 1500 dev/dk iş mili hızı ve 900 mm/dk ilerleme hızı kombinasyonunda destek kullanılarak yapılan delme işleminin de kompozit boruların mekanik ve yorulma davranışına etkisi araştırılmıştır.

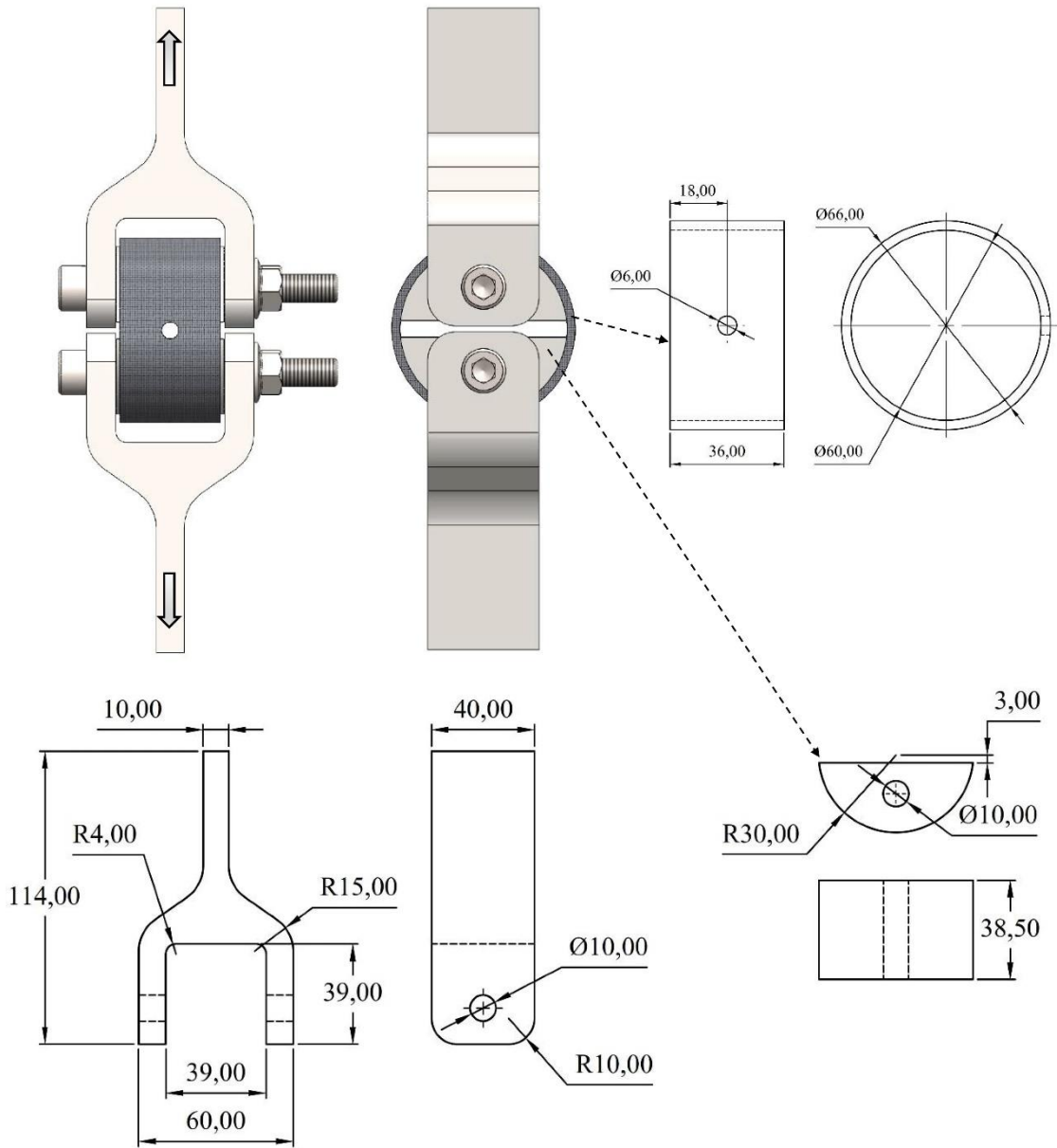
3.3.1 Çekme Testi

Halka çekme ya da bir diğer adıyla disk-ayırma testi kompozit boruların çevresel yöndeki çekme özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan yaygın bir yöntemdir. ASTM D2290 (ASTM 2016) standardına göre halka çekme testi üretim metoduna bakılmaksızın termoset reçineli takviyeli borulara uygulanabilmektedir. Çekme testi sırasında oluşacak eğilme momentini minimize etmek için standart tarafından bir aparat (split-disk) önerilmiştir. Test sırasında diskler arasında kalan açık bölgede oluşan eğilme momenti nedeniyle bu testte gerçek bir çekme mukavemetinden ziyade görünen bir çekme mukavemeti elde edilmektedir. Standartta test aparatının, bu eğilme momentinin etkisini en aza indirdiği vurgulanmıştır.

İlgili standarttaki bilgiler ışığında aparat tasarımı yapılmış ve Ck45 çelik malzeme kullanılarak üretilmiştir. Diskler arasında delik çapı kadar mesafe kalacak şekilde tasarım yapılmış, ayrıca yorulma testlerinde çentik etkisi oluşmaması için keskin köşeli tasarımdan kaçınılmıştır.

ASTM D2290 standardına göre halka çekme testi numunesi hazırlanırken daraltılmış kesit oluşturmak amacıyla numune kenarlarından delik açılmaktadır. Bununla beraber delikli polimer matrisli kompozit plakalarda çekme dayanımının testi ile ilgili rehber olabilecek bir standart mevcuttur (ASTM 2011). Literatürde kompozit plakalarda delik delme prosesinin mekanik özelliklere etkisi üzerine yapılan çalışmaların çoğunda bu standart takip edilmiştir. Bu sebeple çekme ve yorulma testi numuneleri için numune genişliğinin delik çapına oranı belirlenirken bu standarttan faydalanılmıştır. İlgili

standartta numune genişliğinin delik çapına oranı (w/D) 6 olacak şekilde numune genişliği (w) 36 ± 1 mm ve numune merkezinde konumlandırılmış delik çapı (D) 6 ± 0.06 mm olarak belirtilmiştir. Şekil 3.9’da halka çekme ve yorulma testlerinde kullanılan aparat ve test numunesi gösterilmiştir.



Şekil 3.9 Halka çekme testi aparatı ve test numunesi.

Numuneler hazırlanırken önce kompozit boru CNC tezgâh tablasına yeterince rijit bir şekilde sabitlenmiş ve belirlenmiş olan üç farklı kesme koşulunda (1: 1500 dev/dk, 900 mm/dk, desteksiz, 2: 1500 dev/dk, 900 mm/dk, destekli, 3: 4500 dev/dk, 300 mm/dk,

desteksiz) delikler boru üzerine açılmıştır. ASTM D2290 standardına göre daraltılmış kesit oluşturmak için halka numune üzerinde karşılıklı olacak şekilde delik açılması gerektiği belirtilse de opsiyonel olarak daraltılmış kesitin tek taraflı olabileceği de belirtilmiştir. Delik hasar kontrolünün daha rahat yapılabilmesi için bu çalışmada numuneler tek taraftan delinmiştir. Delik delme sonrasında halka şeklindeki numuneleri kompozit borudan kolayca ayırmak için 2 mm çapında 4 ağızlı karbür parmak freze ile kesme diski için yuva açılmış (Şekil 3.10b) ve sonra 2 mm kalınlığında abrasif kesme diski ile daha önce açılmış yuva sayesinde numuneler borudan kolayca kesilmiştir (Şekil 3.10e). Kenarlarda çentik etkisi olmaması ve daha homojen bir genişlik dağılımı olması amacıyla numune kenarlarına önce 300 kum ve sonra 800 kum zımpara ile zımparalama yapılmıştır (Şekil 3.10f). Böylece hazırlanan tüm numunelerin birbiri ile hemen hemen aynı genişliğe sahip olması sağlanmıştır. Kalınlığın her bir numunede aynı olması için borular tezgâha bağlanırken bir önceki boru ile aynı kalınlığa sahip olan kısmın delik pozisyonuna denk gelmesi sağlanmış ve delikler boruyu kaydırmadan aynı hizada delinmiştir (Şekil 3.10a). Numuneler arasında kalınlık ve genişlik farkı olması durumunda kesit alanındaki farklılığın delik delme kaynaklı hasarların önüne geçip numune dayanımını etkileyebileceğinden bu konuya azami dikkat gösterilmiştir. Numune hazırlama aşaması ve hazırlanmış numuneler Şekil 3.10 ve 3.11’de gösterilmiştir. Çekme testleri ASTM D2290 standardı uyarınca 2,5 mm/dk çekme hızında, Shimadzu AGS-X 100kN universal çekme-basma test cihazı üzerinde gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.12). Çekme testi sonuçlarından iki farklı yöntem ile üretilmiş ve farklı koşullarda delinmiş kompozit boruların çevresel yöndeki kuvvet-uzama ve gerilme-gerinim grafikleri elde edilmiştir.



Şekil 3.10 Halka çekme testi için numune hazırlama aşaması, (a) delik delme işlemi şematik görünümü, (b) frezeleme işlemi şematik görünümü, (c) desteksiz delik delme işlemi, (d) destekli delik delme işlemi, (e) abrasif kesme işlemi, (f) zımparalama işlemi.



Şekil 3.11 Halka çekme ve yorulma testi numuneleri.



Şekil 3.12 Halka çekme testi.

3.3.2 Yorulma Testi

Halka çekme testlerinden sonra yine aynı ölçülerde ve aynı koşullarda delinmiş numuneler ile aynı aparat kullanılarak, Instron 8801 servo hidrolik yorulma test cihazı üzerinde, halka çekme-çekme yorulma testleri gerçekleştirilmiştir. Daha önce kompozitlerde çekme yükü altında yorulma davranışı üzerine yapılmış birçok çalışmada gerilme oranı (R) yani sinüzoidal dinamik yüklemde maksimum gerilmenin minimum gerilmeye oranı 0,1 olarak belirlenmiştir (Çizelge 2.3 ve Çizelge 2.4). Ayrıca literatürde kompozitlerin yaygın olarak kullanıldığı havacılık endüstrisinde, uçakların birçok bileşeninin testinde R=0,1 oranının kullanıldığı bildirilmiştir (Kubit vd. 2020, Arun vd. 2022). Bu sebeple bu çalışmada da sabit R=0,1 oranı tercih edilmiştir. Önceki çalışmalarda R=0,1 oranı ile yapılan çevresel yönde halka çekme-çekme yorulma testleri 5 Hz ve 10 Hz frekans ile yapılmıştır (Çizelge 2.4). Yapılan ön testler neticesinde aynı yük seviyesinde 10 Hz’de yapılan testlerde numunenin kısa sürede ısınıp matris yumuşamasına sebep olduğu ve dolayısıyla daha düşük çevrim sayılarında kopmanın gerçekleştiği görülmüştür. Bu sebeple testlerin 5 Hz frekansta gerçekleştirilmesine karar verilmiştir. Yorulma testlerinde uygulanan maksimum gerilme seviyeleri, her iki malzemenin çekme dayanımının %90’ına tekabül eden gerilme seviyesinden başlanarak malzemelerin yorulma ömrünün 10^6 çevrim sayısına kadar ulaşacak şekilde belirlenmiştir. Literatürde 10^6 çevrim sayısının havacılık endüstrisinde yaygın olarak kullanıldığı ve bir uçağın faydalı ömrü boyunca karşılaştığı dinamik yükler için uygun bir limit olduğu vurgulanmıştır (Nixon-Pearson vd. 2013). Filaman sarım ve rulo sarım borunun hem yük altındaki davranışının farklı olması hem de farklı çekme dayanımlarına sahip olması sebebiyle daha düzgün dağılımlı bir S-N eğrisi elde etmek için her iki malzemede farklı maksimum gerilme seviyeleri uygulanmıştır. Yorulma testlerinde kullanılan parametreler Çizelge 3.3’te verilmiştir. Deneyler yük kontrollü olarak yapılmış olup, ilgili gerilme seviyeleri için yük genliği (F_a) ve ortalama yük (F_m), Denklem 3.3 ve 3.4 ile hesaplanarak test cihazına girilmiştir.

$$F_m = \frac{F_{maks} + F_{min}}{2} \quad (3.3)$$

$$F_a = \frac{F_{maks} - F_{min}}{2} \quad (3.4)$$

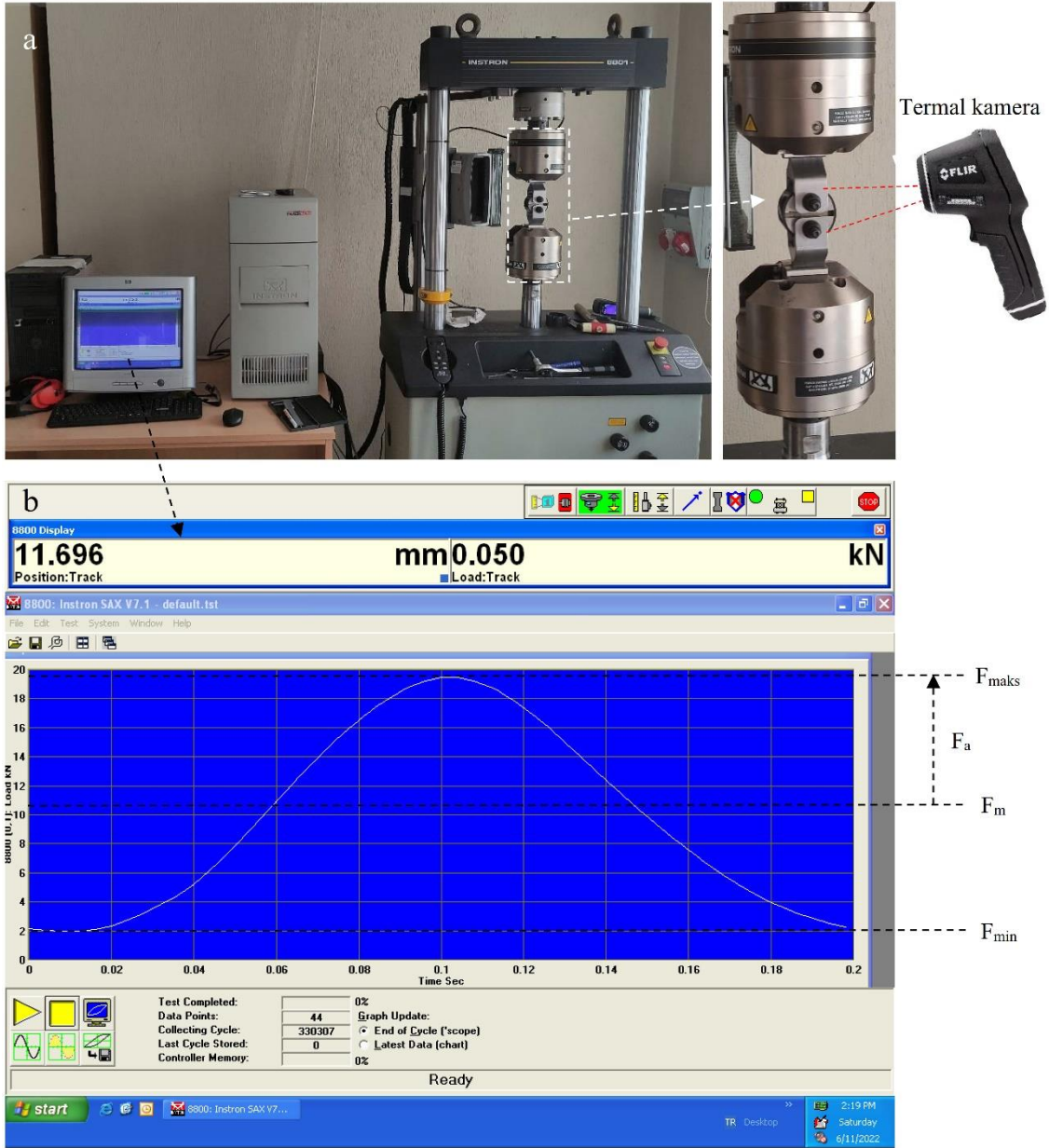
Burada F_{maks} ve F_{min} ise Denklem 3.5 ve 3.6 yardımıyla belirlenmekte olup “A” yüke maruz kalan numune kesit alanını ifade etmektedir. Kesit alanı hesaplanırken numune genişliğinden nominal delik çapı çıkarılıp kalınlık ile çarpılmaktadır. Yorulma testi için deney düzeneği ve kontrol yazılımı Şekil 3.13’te verilmiştir. Testler sırasında numune sıcaklığı belirli çevrimlerde FLIR TG 165 termal kamera ile ölçülmüştür. Literatürdeki birçok çalışmada (Haddad vd. 2014, Allheily vd. 2016, Shi vd. 2019) karbon elyaf takviyeli plastikler için emissivite (yayma) katsayısı (ϵ) 0,9 olarak alındığından, bu çalışmada da sıcaklık ölçümlerinde bu değer kullanılmıştır.

$$F_{maks} = \sigma_{maks} \times A \quad (3.5)$$

$$F_{min} = \sigma_{min} \times A \quad (3.6)$$

Çizelge 3.3 Yorulma testi deney parametreleri.

Kompozit boru	Kesme koşulu	Maksimum gerilme seviyesi	Gerilme oranı ($R=\sigma_{max}/\sigma_{min}$)	Frekans (f)
Filaman sarım	1500 dev/dk, 900 mm/dk, Desteksiz			
	1500 dev/dk, 900 mm/dk, Destekli	%90, %70, %60, %55, %50		
	4500 dev/dk, 300 mm/dk, Desteksiz			
			0,1	5 Hz
Rulo sarım	1500 dev/dk, 900 mm/dk, Desteksiz			
	1500 dev/dk, 900 mm/dk, Destekli	%90, %70, %65, %60, %50		
	4500 dev/dk, 300 mm/dk, Desteksiz			

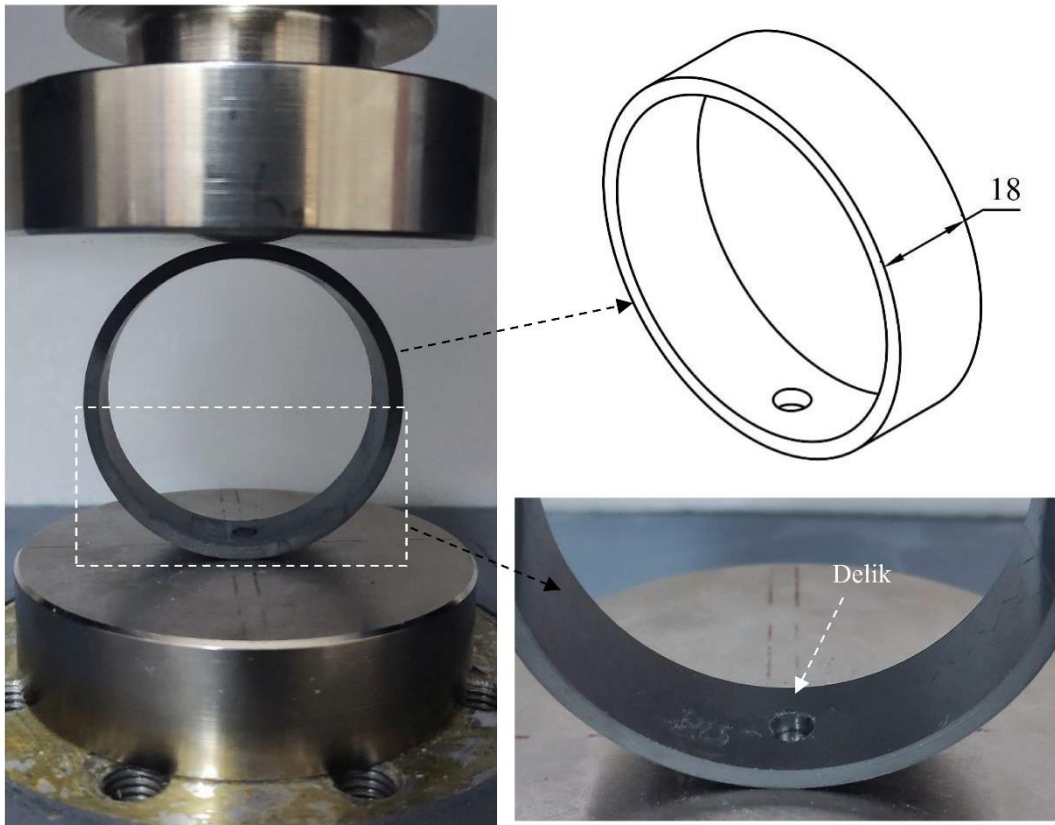


Şekil 3.13 Yorulma testi deney düzeneği, (a) test cihazı, (b) kontrol yazılımı.

3.3.2 Basma Testi

Elyaf takviyeli kompozitlerin radyal basma testi için numune hazırlanırken literatür ve ilgili standartlar araştırılmıştır. Plastik boruların rijitliğini belirlemek üzere radyal basma testi için ASTM D2412 standardı kullanılmaktadır. Bu standarda göre takviyeli termoset borular için minimum test numunesi boyunun boru çapının üç katı ($l/d=3$) olması gerektiği vurgulanmıştır (ASTM 2002). Ancak bu standardın halka numunelerden daha ziyade boruların testinde kullanıldığı görülmüştür. Literatürde ise kompozit boruların

radyal ve eksenel basma testleri için farklı oranlarda l/d (0,96 ve 0,35) kullanan araştırmacılar mevcuttur (Eggers vd. 2019). Oranın yüksek olduğu durumlarda, deliğin etkisinin tespit edilmesi zor olacağından, bu çalışmada l/d oranının 0,3 seçilmesine karar verilmiştir. Bu kapsamda test edilecek halka numunelerin genişliği 18 mm olarak belirlenmiştir. Radyal basma testi numuneleri de çekme testi numuneleri ile aynı yöntem kullanılarak Şekil 3.10’da gösterilen proses ile hazırlanmıştır. Delik, çekme numunesinde olduğu gibi numunenin tam ortasında konumlandırılmıştır. Yapılan ön testlerde ilk hasarın alt ya da üst çenelerin iş parçasıyla temas eden kısımlarında meydana geldiği görülmüştür. Literatürde de farklı kompozitlerin benzer hasar davranışına sahip olduğu belirtilmiştir (Şekil 2.36). Bu sebeple testler gerçekleştirilirken delik, alt çenenin parça ile temas ettiği yere gelecek şekilde konumlandırılmıştır. Radyal basma testleri Shimadzu AGS-X 100kN universal çekme-basma test cihazı üzerinde gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.14).



Şekil 3.14 Radyal basma testi ve test numunesi.

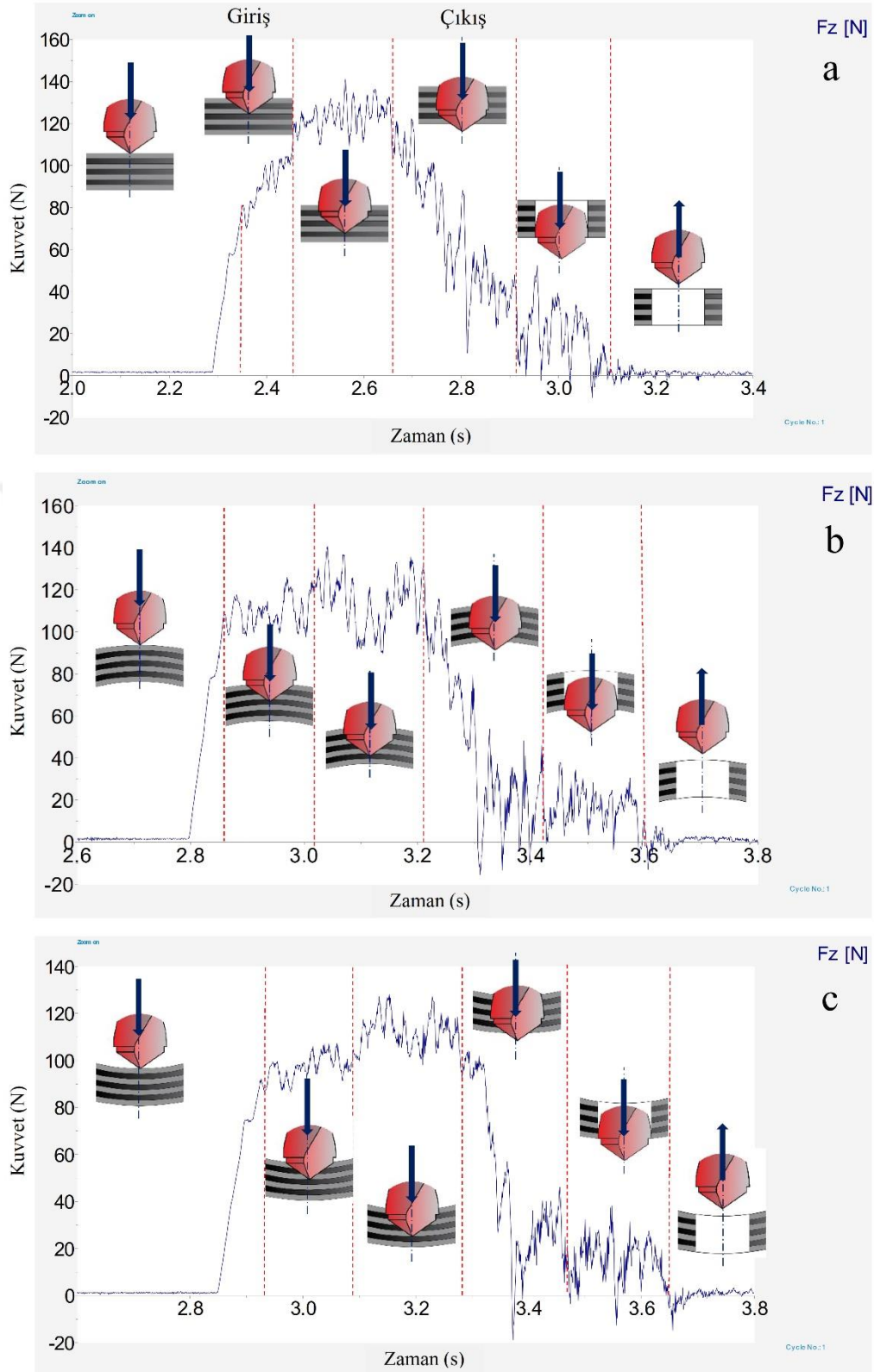
4. BULGULAR ve TARTIŞMA

4.1 Farklı Yüzey Eğriliğine Sahip Kompozitlerde Delik Delme Prosesi

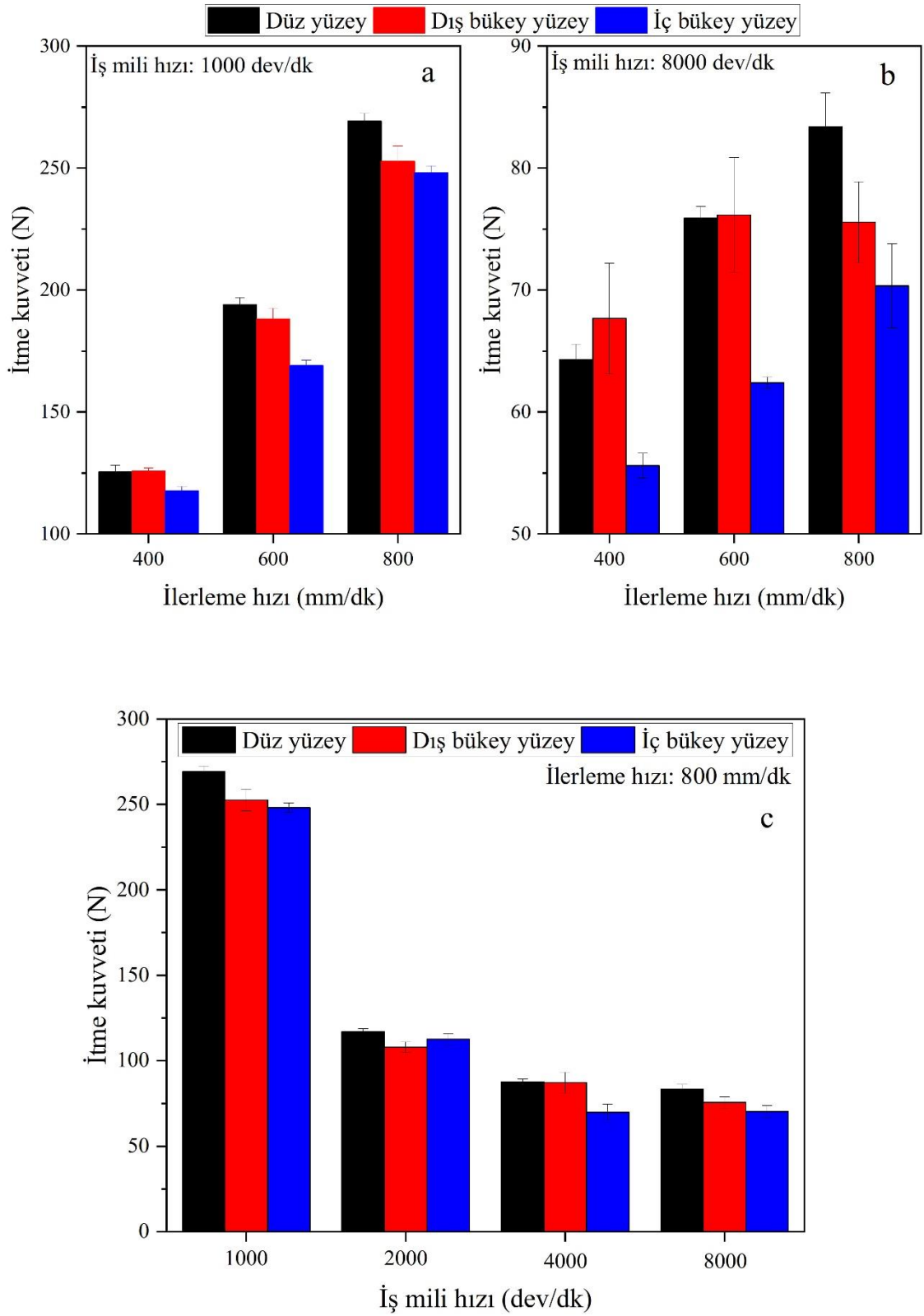
Ön test kapsamında rulo sarım kompozit boru eksenini boyunca kesilerek boru dış yüzeyinden (konkav yüzey) ve boru iç yüzeyinden (konveks yüzey) delinerek kesme parametrelerinin etkisi araştırılmış ve sonuçlar ayrı başlıklar halinde verilmiştir.

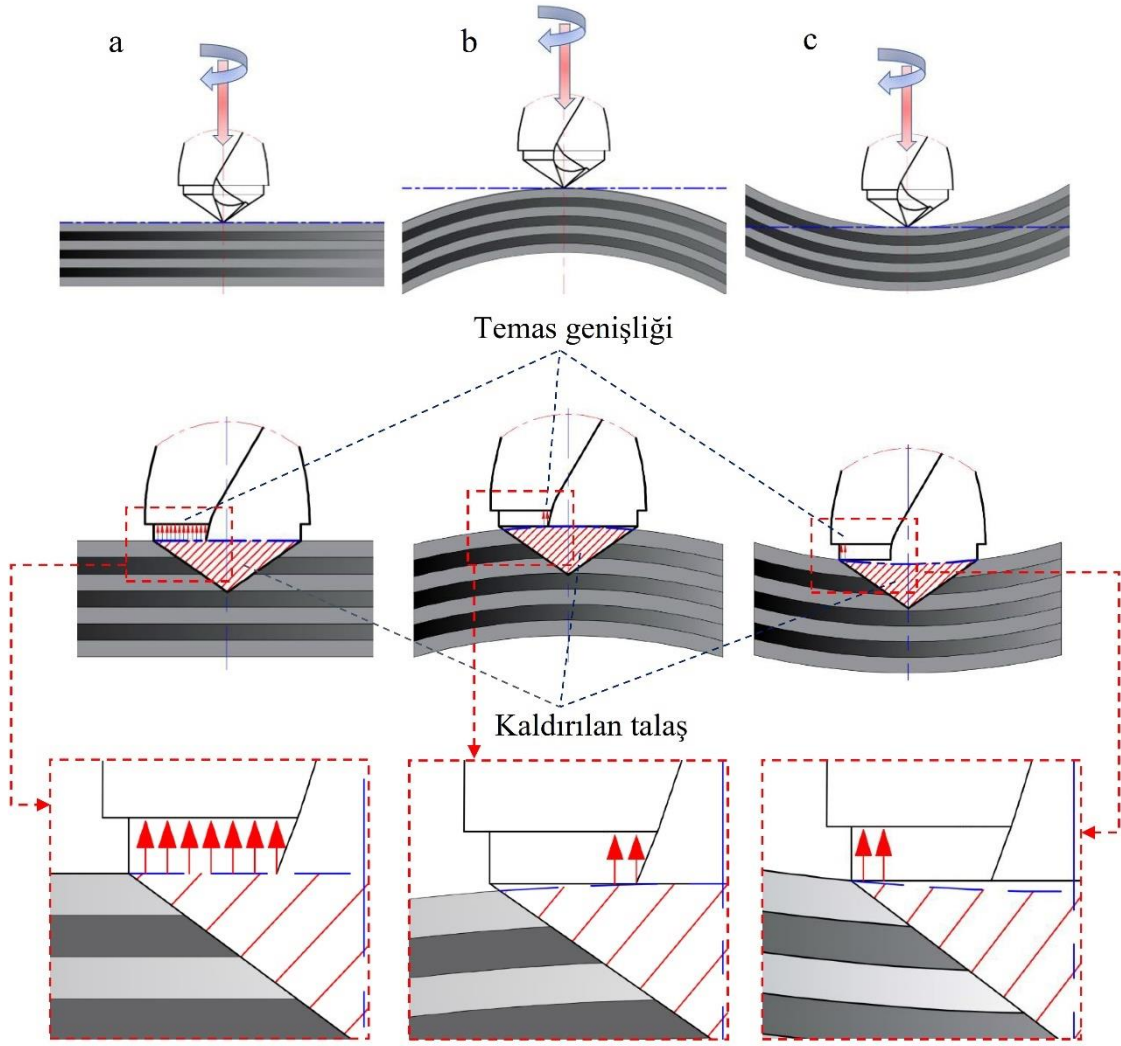
4.1.1 İtme Kuvveti Analizi

Literatürdeki birçok çalışmada itme kuvvetinin delme kaynaklı delaminasyon oluşumunun temel sebebi olduğu vurgulanmıştır. Delme sırasında oluşan itme kuvveti, delaminasyonun oluşumundan sorumlu olan kritik itme kuvveti değerini aşınca hasar oluşmaktadır (Jain ve Yang 1993, Tsao ve Hocheng 2004). Şekil 4.1’de farklı yüzey eğriliklerindeki kompozitlerin delinmesi sırasında oluşan itme kuvvetinin zamana bağlı değişimi, Şekil 4.2’de ise oluşan maksimum itme kuvvetleri gösterilmiştir. İtme kuvvetleri her üç yüzeyde de ilerleme hızına bağlı olarak artmaktadır (Şekil 4.2a ve b). Öte yandan iş mili hızı arttıkça kuvvetlerin azaldığı görülmüştür. Özellikle 1000 dev/dk iş mili hızından 2000 dev/dk iş mili hızına yükselince, kuvvetlerde önemli bir düşüş olmuştur (Şekil 4.2c). Test sonuçları genel olarak değerlendirildiğinde, düz yüzeyli kompozitlerin delinmesi sırasında daha yüksek kuvvetlerin oluştuğu, bunu ise dış bükey yüzey ve iç bükey yüzeyin takip ettiği görülmektedir. Kesme kenarlarının malzeme ile tam temas ettiği ve maksimum kuvvetin oluştuğu an detaylı incelendiğinde (Şekil 4.3), düz yüzeyli kompozitte iş parçası ile takım arasındaki temas alanının daha geniş olduğu görülmektedir. Bu durum üzerinde çalışmada kullanılan kademeli matkap geometrisinin etkisi de vardır. Daha geniş temas alanı daha yüksek kuvvet oluşumu ile ilişkilendirilebilir. Öte yandan plakanın daha yüksek elyaf hacmine sahip olması da daha yüksek itme kuvveti oluşmasının bir diğer sebebidir. Dış bükey yüzey delinirken öncelikle delik merkezine yakın olan elyaf kesilmekte iken, iç bükey yüzey delinirken önce delik çapına yakın olan elyaf kesilmektedir (Şekil 4.3 (b) ve (c)). Bu durum ise iç bükey yüzey delinirken elyaf sürekliliğini bozmakta ve böylece daha düşük itme kuvvetleri oluşmaktadır.



Şekil 4.1 Farklı yüzey geometrisine sahip CFRP kompozitin delinmesi sırasında oluşan itme kuvvetinin zamana bağlı değişimi, (a) düz yüzey, (b) dış bükey yüzey, (c) iç bükey yüzey (1000 dev/dk, 400 mm/dk) (Morkavuk vd. 2022b).

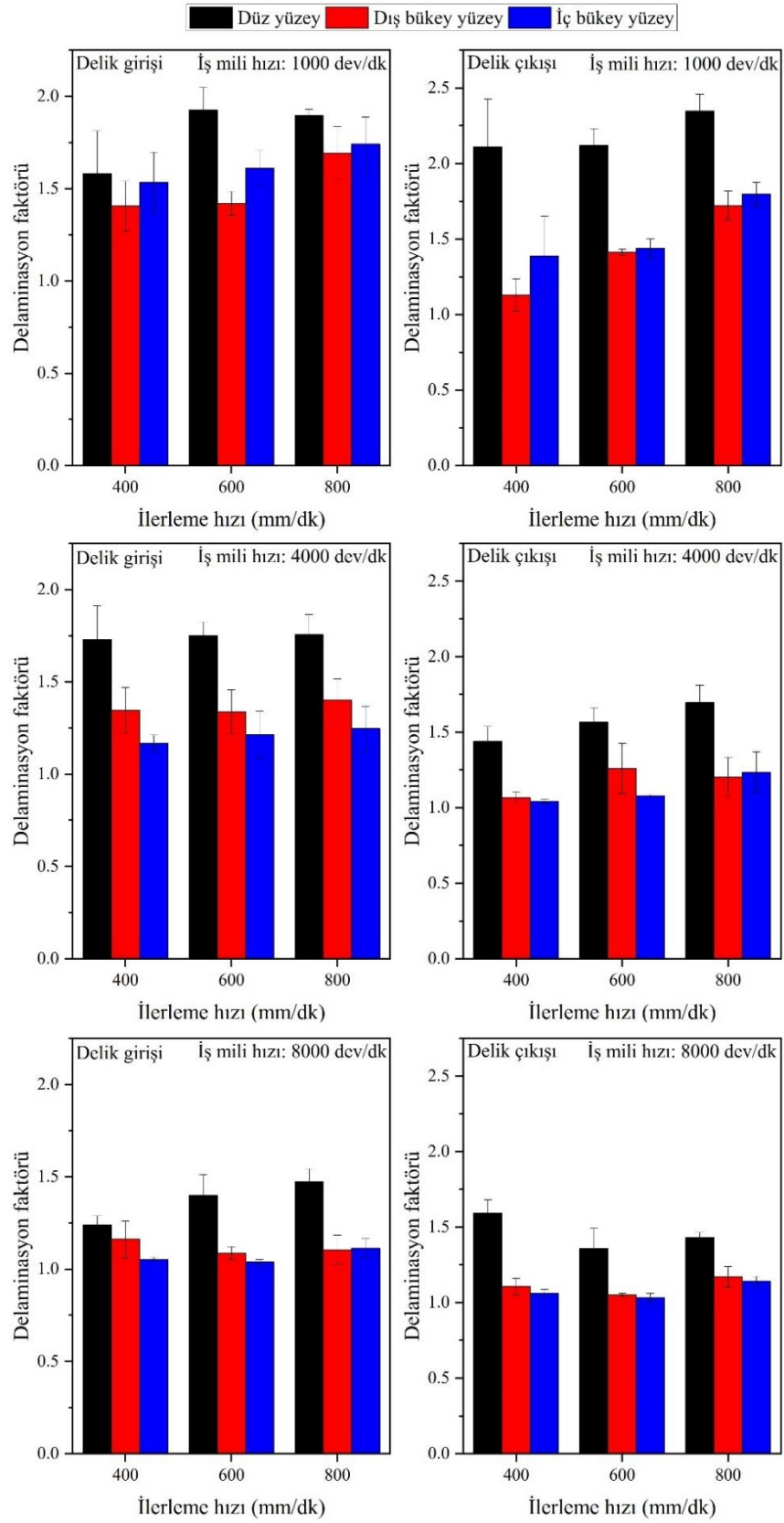




Şekil 4.3 Farklı yüzey geometrisine sahip CFRP kompozitin delinmesi sırasında iş parçası-takım temasının şematik görünümü, (a) düz yüzey, (b) dış bükümlü yüzey, (c) iç bükümlü yüzey (Morkavuk vd. 2022b).

4.1.2 Delaminasyon Analizi

Literatürdeki birçok çalışmada daha yüksek seviyede olduğu için sadece delik çıkış delaminasyonu analiz edilmektedir. Ancak bu çalışmada geometrik farklılık açısından inceleme yapıldığı için hem delik girişi hem de çıkışı delaminasyon oluşumu açısından incelenmiştir. Şekil 4.4'te farklı yüzey geometrilerine sahip kompozitlerde oluşan delaminasyon faktörünün kesme parametrelerine bağlı olarak değişimi gösterilmiştir.



Şekil 4.4 Farklı yüzey geometrisine sahip CFRP kompozitin delinmesi sırasında oluşan delaminasyon hasarı seviyesinin kesme parametrelerine bağlı değişimi (Morkavuk vd. 2022b).

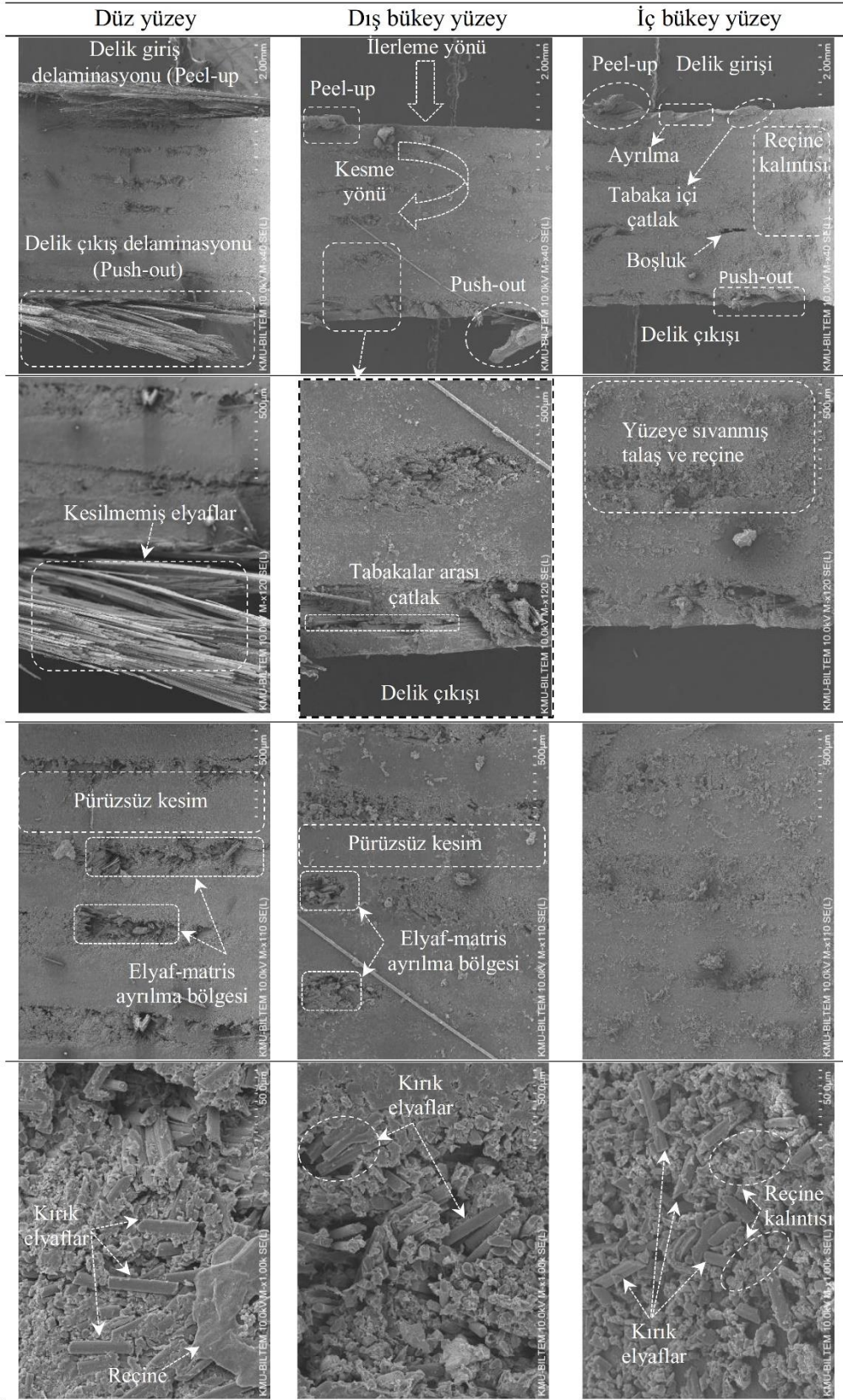
Şekil 4.4'deki grafikler incelendiğinde, 1000 dev/dk kesme hızında yapılan testlerde oldukça yüksek seviyede hasar olduğu görülmektedir. İtme kuvvetindeki davranışa benzer şekilde ilerleme hızı arttıkça hasar seviyesi artmış, iş mili hızı arttıkça ise hasar seviyesi azalmıştır. Kesme kuvveti sonuçları ile de uyumlu olarak düz yüzeyde daha fazla hasar oluşmuştur. Dış bükey ve iç bükey yüzeylerin hasar seviyesi arasında önemli bir farklılık bulunmasa da özellikle yüksek iş mili hızlarında dış bükey yüzeyli kompozitte hafifçe daha yüksek hasar olduğu söylenebilir.

4.1.3 SEM Analizi

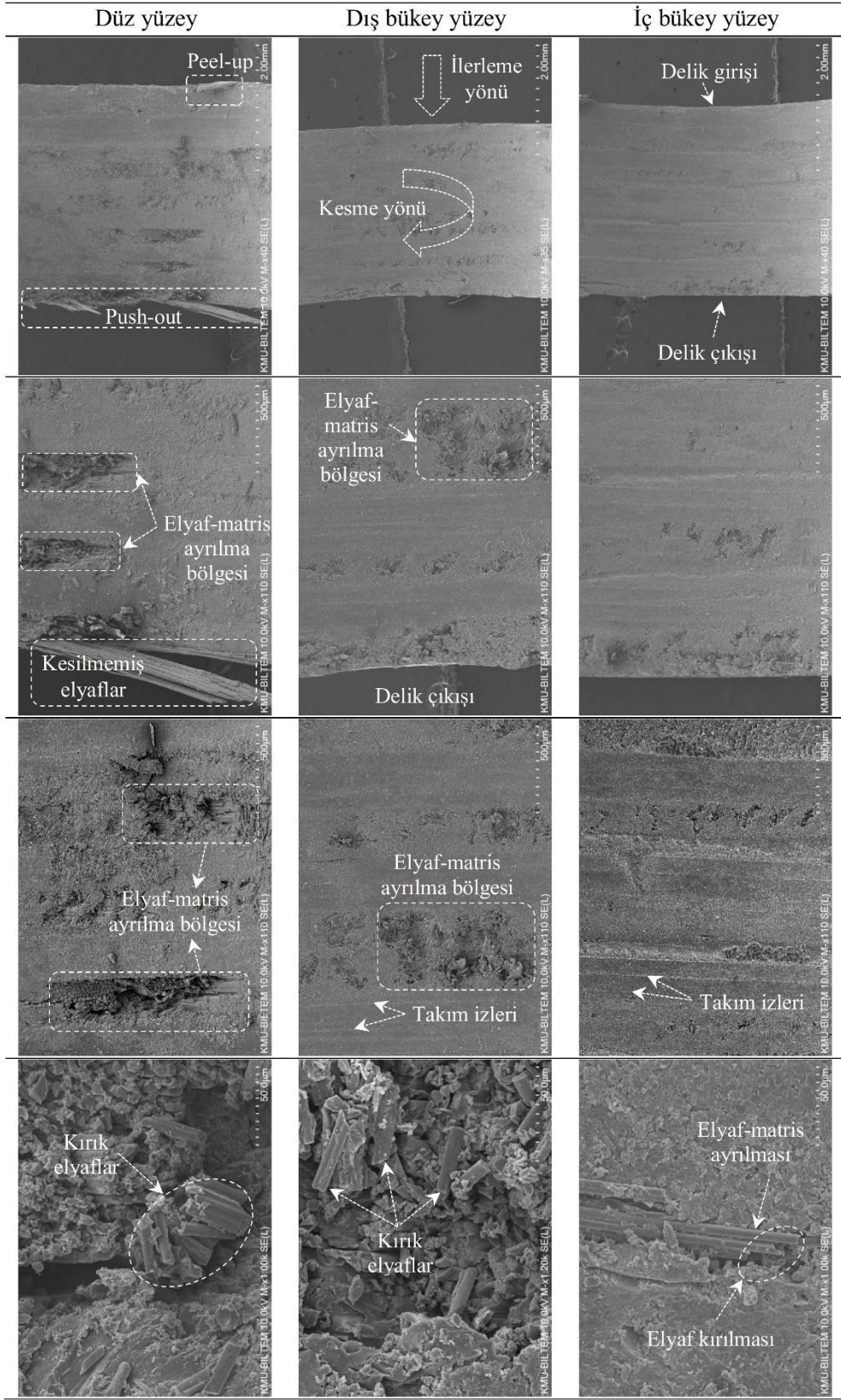
Sabit ilerleme hızı (600 mm/dk) ve iki farklı iş mili hızında (1000 ve 4000 dev/dk) delinmiş farklı yüzey geometrilerine sahip kompozitlerin delik içi yüzey görüntüleri ve tespit edilen hasarlar kıyaslamalı olarak Şekil 4.5 ve 4.6'da verilmiştir. Delikler incelenirken, önce deliğin tüm kesitini kapsayacak şekilde makro bir görüntü alınmış daha sonra delik içi yüzeyi ve delik çıkış kısmına odaklanılmıştır. Düşük iş mili hızı (1000 dev/dk) ile delinen düz yüzeyli kompozitin hem delik iç yüzeyinde hem de delik giriş ve çıkışında ciddi hasarlar oluşmuştur. Özellikle ilk ve son plakada elyaf düzgün kesilememiştir. Ancak yüksek iş mili hızında (4000 dev/dk), delik çıkışındaki kesilmemiş elyaf önemli oranda azalırken delik girişinde kesilmemiş elyaf görülmemiş, ancak lokal elyaf-matris ayrılması sebebiyle soyulma (peel-up) delaminasyonunun olduğu görülmüştür. Düz yüzeyli kompozitte düzgün kesilmiş yüzeyler de mevcuttur ancak elyaf-matris ayrılması hasarı nedeniyle yolma bölgelerinin (plucking zones) de olduğu ve bu hasar bölgelerinin düz yüzeyli kompozitte diğer yüzeylere göre daha şiddetli olduğu tespit edilmiştir. Bu bölgeler özellikle içbükey yüzeyde çok nadir görülmüştür. Soyulma bölgeleri daha detaylı incelendiğinde kırık ve yönü sapmış lifler ile reçine artıklarından oluştuğu görülmüştür. Kompozitin elyaf sürekliliğini bozarak yük altında tabaka içi ve tabakalar arası çatlağa, dolayısıyla malzemenin erken hasarına yol açabileceğinden bu tür hasarların önlenmesi gerekir. İş mili hızının artmasıyla bu hasar özellikle iç bükey yüzeyde önemli oranda azalmıştır. Dış bükey yüzeyde oluşan hasarlar incelendiğinde düşük iş mili hızında, delik çıkışında tabakalar arası çatlakların oluştuğu ve bu çatlakların ilerleyip elyaf-matris ayrılması (debonding) hasarıyla beraber delaminasyona sebep olduğu görülmüştür. Ancak, yüksek iş mili hızında, herhangi bir çatlak oluşmamış ve

lokal debonding hasarı ile Mod I (açılma) şeklinde delik çıkış delaminasyonu gözlemlenmiştir. Delik girişinde ise düşük iş mili hızında çok az soyulma delaminasyonu gözlemlenirken, yüksek iş mili hızında kayda değer bir hasar gözlemlenmemiştir. İçbükey yüzeyli kompozit üzerindeki hasarlar detaylı incelendiğinde, düşük iş mili hızında delik girişinde, delaminasyon hasarının meydana geldiği, buna ek olarak elyaf-matris ayrılması ve tabaka içi çatlakların da olduğu gözlemlenmiştir. Delik çıkışında ise dışbükey yüzeyden farklı olarak, delaminasyon oluşumu üzerinde Mod II (Kayma) etkili olmuştur.





Şekil 4.5 Farklı yüzey geometrisine sahip CFRP kompozitin delinmesi sırasında oluşan delik içi hasarlarının SEM incelemesi (1000 dev/dk, 600 mm/dk) (Morkavuk vd. 2022b).



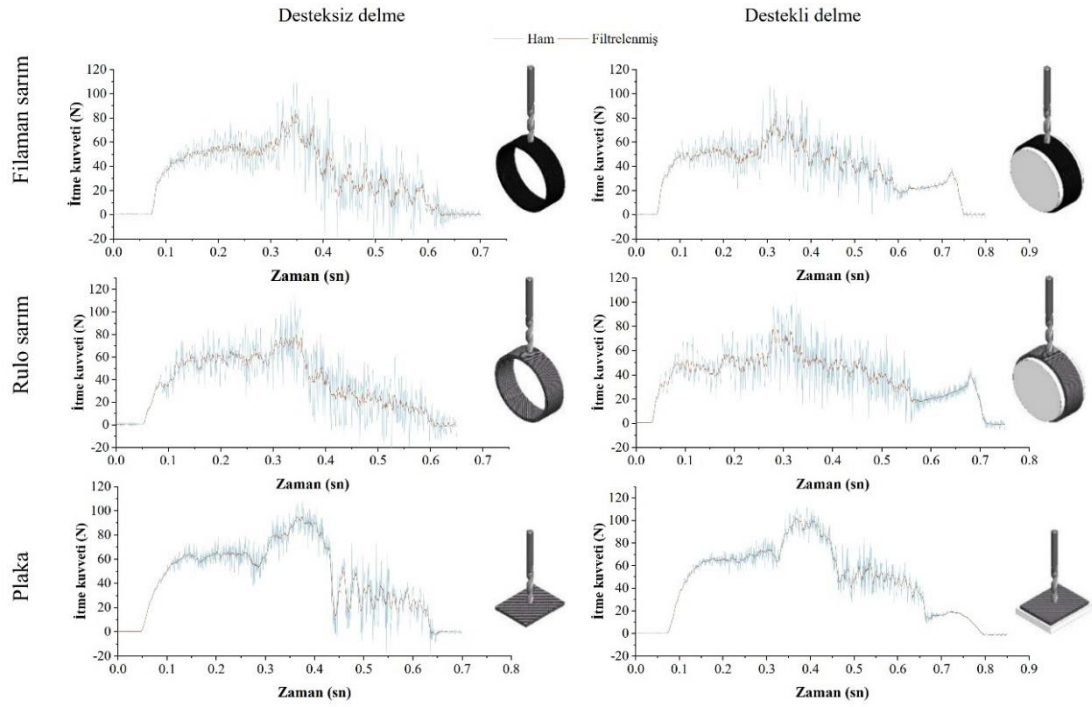
Şekil 4.6 Farklı yüzey geometrisine sahip CFRP kompozitin delinmesi sırasında oluşan delik içi hasarlarının SEM incelemesi (4000 dev/dk, 600 mm/dk) (Morkavuk vd. 2022b).

4.2 Kompozit Borularda Delik Delme Prosesinin Analizi ve Plaka ile Karşılaştırılması

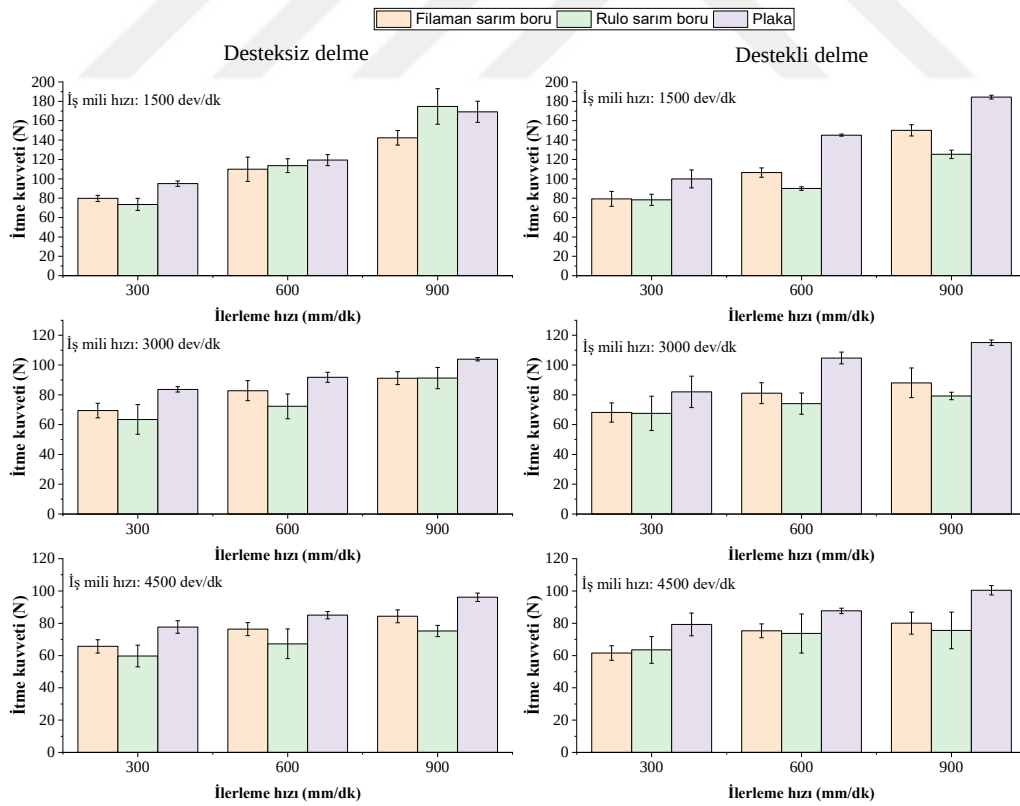
Yapılan ön testlerde rulo sarım kompozit boruda 1000 dev/dk iş mili hızında oldukça yüksek kuvvetlerin oluştuğu, iş mili hızı arttıkça kuvvetin düştüğü, ancak 4000 dev/dk iş mili hızından sonra ise kuvvetteki azalmanın yavaşladığı, dolayısıyla 4000 dev/dk ile 8000 dev/dk arasında önemli bir fark olmadığı görülmüştür. Öte yandan, ilerleme hızı ile kuvvetler doğrusal olarak değişmiştir. İlerleme hızına bağlı olarak delaminasyon hasarı, 1000 dev/dk iş mili hızında doğrusal olarak değişirken, 4000 ve 8000 dev/dk’da ilerleme hızına bağlı olarak çok fazla artmadığı gözlemlenmiştir. Bu sebeple ana testlerin 1500, 3000 ve 4500 dev/dk iş mili hızlarında ve 300, 600 ve 900 mm/dk ilerleme hızlarında yapılması kararlaştırılmıştır. Seçilen bu parametreler ile destekli ve desteksiz olacak şekilde filaman sarım kompozit boru ve rulo sarım borunun delinme karakteristiği incelenmiş ve plaka ile kıyaslanmıştır.

4.2.1 İtme Kuvveti ve Tork Analizi

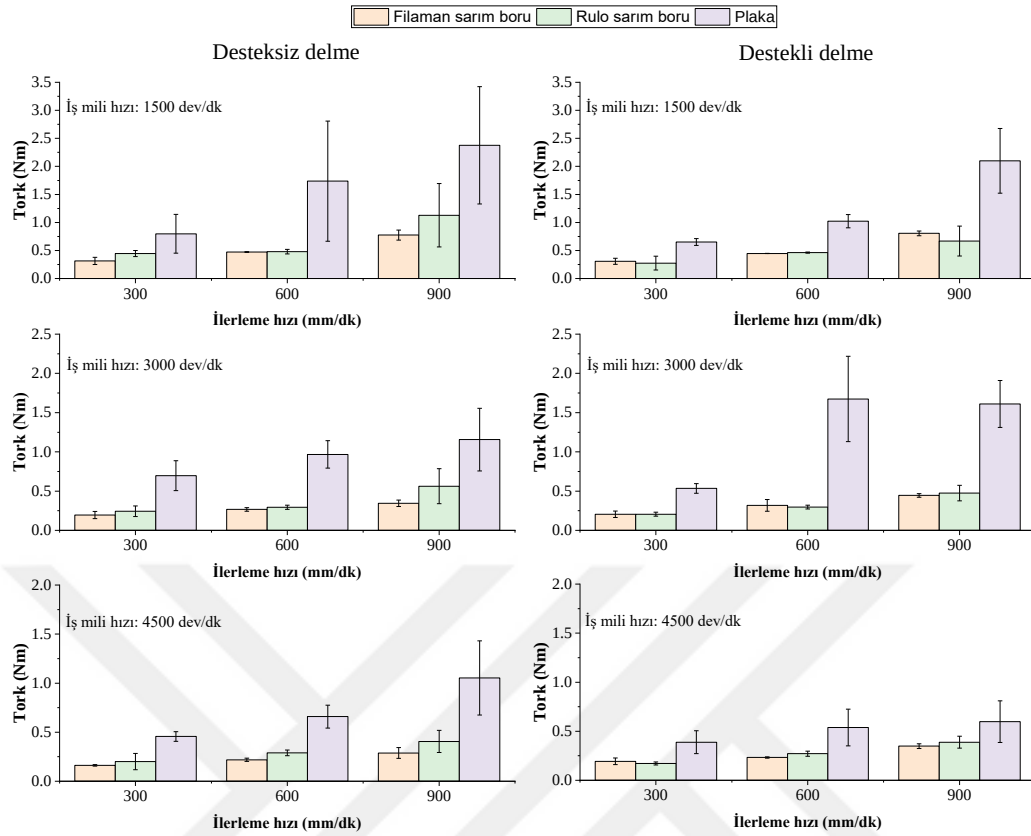
Farklı üretim yöntemleri ile üretilmiş kompozitlerin 3000 dev/dk iş mili hızı, 600 mm/dk ilerleme hızında delinmesi sırasında destek kullanımına bağlı olarak itme kuvvetinin zamana bağlı değişim grafiği Şekil 4.7’de verilmiştir. Ham kuvvet verileri incelendiğinde, her iki kompozit boruda da tüm delme işlemi sırasında dalgalanmalar olduğu görülürken, plaka için daha kararlı bir kuvvet-zaman grafiği elde edilmiştir. Sadece borular delinirken bu dalgalanmaların görülmesi bu durumun geometrik farklılıktan oluştuğunu düşündürmektedir. Şekil 4.3’te görüldüğü üzere, bu çalışmada kullanılan matkap geometrisine de bağlı olarak, düz yüzeyde yani plakada daha homojen dağılmış bir takım-iş parçası teması vardır. Bu durum her ne kadar yüksek kuvvet oluşumuna sebep olsa da kuvvet verilerinde daha az dalgalanma oluşturmuştur. Öte yandan, maksimum itme kuvvetine ulaşıldıktan sonra, tabakalar arasındaki geçişler filaman sarım boru ve plakada daha net hissedilirken, rulo sarım boruda geçişler daha yumuşaktır. Bu durum filaman sarım boru ve plakada tabakalar arası dayanımın rulo sarım boruya kıyasla daha yüksek olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.7 Farklı kompozitler için destek kullanımına bağlı olarak itme kuvvetinin zamana bağlı değişimi (3000 dev/dk, 600 mm/dk) (Morkavuk vd. 2022a).



Şekil 4.8 Filaman sarım boru, rulo sarım boru ve plakanın delinmesi sırasında oluşan maksimum itme kuvvetlerinin kesme parametrelerine ve destek kullanımına bağlı değişimi (Morkavuk vd. 2022a).

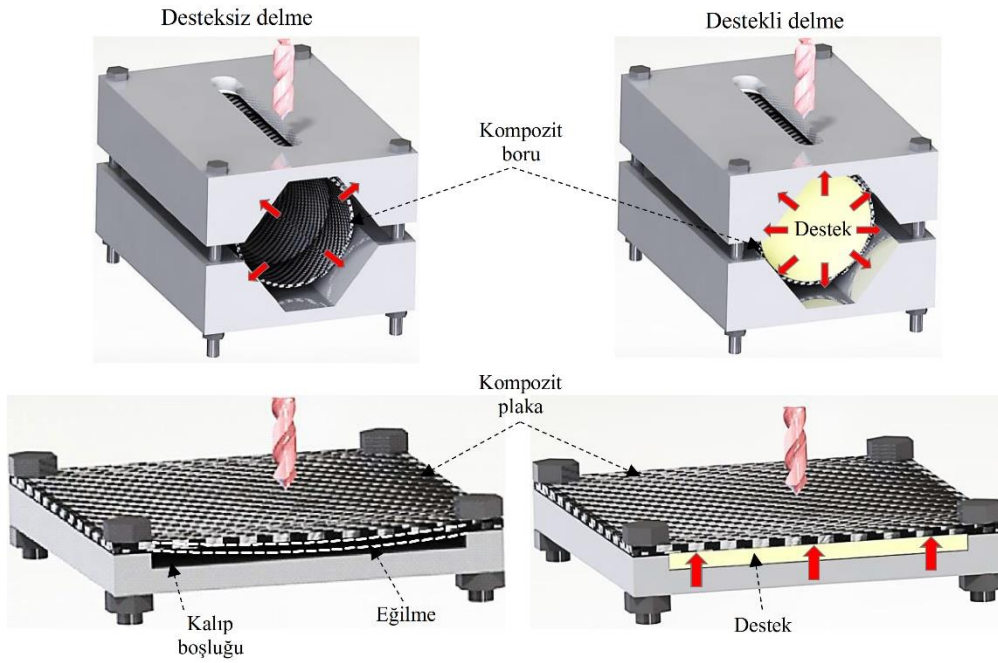


Şekil 4.9 Filaman sarım boru, rulo sarım boru ve plakanın delinmesi sırasında oluşan maksimum torkun kesme parametrelerine ve destek kullanımına bağlı değişimi (Morkavuk vd. 2022a).

Proses boyunca oluşan maksimum kuvvet ve tork verilerini değerlendirmek için elde edilen ham veriler filtrelenmiş ve kesme koşullarına bağlı olarak maksimum kuvvet ve tork değişimleri Şekil 4.8 ve 4.9’da verilmiştir. Her iki şekilden de görüldüğü üzere, itme kuvveti ve tork ilerleme hızı ile artarken, iş mili hızı ile de azalmaktadır. Bu sonuçlar, literatürdeki çalışmalarla benzerlik arz etmektedir (Arul vd. 2006, Eneyew ve Ramulu 2014). Literatürde bu durumun genellikle artan talaş yükü ve iş parçası-takım temasından kaynaklandığı bildirilmiştir (Abrão vd. 2007, Krishnaraj vd. 2012, Yazman 2021). Öte yandan Arul vd. (2006) tarafından iş mili hızının artmasıyla oluşan ısıdan kaynaklı olarak, matriste termal yumuşamanın meydana gelebileceği ve bu yumuşamanın bir yağlayıcı gibi davranıp sürtünme kuvveti ve momentini düşürebileceği belirtilmiştir. İş mili hızındaki artış ile itme kuvveti ve torkun azalması bu durum ile ilişkilendirilebilir.

Kesme parametreleri ve destek kullanımının farklı yöntemler ile üretilmiş kompozitlerin delinmesi sırasında oluşan kuvvet ve tork üzerindeki etkisini incelemek için $p \leq 0,05$ önem seviyesinde varyans analizi (ANOVA) yapılmış ve analiz sonuçları Çizelge 4.1

(Morkavuk vd. 2022a)'de verilmiştir. Analize göre iş mili hızı ve ilerleme hızı üç kompozit için de kuvvet ve tork oluşumunda önemli bir etkiye sahiptir. Ancak, her üç kompozitte de “p” değerinin 0,05’in oldukça üzerinde olması, destek kullanımının kuvvet ve tork oluşumu üzerinde anlamlı bir etkiye sahip olmadığını göstermektedir. Cam elyaf takviyeli kompozit borularda daha önce yapılan çalışmalar incelendiğinde destek kullanımının eğilme deformasyonunu engelleyerek yapıyı daha rijit bir hale getirdiği ve dolayısıyla itme kuvvetinde artış meydana getirdiği belirtilmiştir (Yazman 2021). Ancak karbon elyaf tabakasının cam elyaf takviyesine göre daha rijit davrandığı da diğer çalışmalarda rapor edilmiştir (Gemi vd. 2020a, Gemi vd. 2020b).



Şekil 4.10 Kompozit plakaların delinmesi sırasında oluşan eğilme deformasyonunun şematik görünümü ve kompozit boru ile kıyaslanması.

Literatürdeki bilgiler ışığında, bu çalışmada kullanılan karbon elyaf takviyeli kompozit borular delinirken ciddi bir eğilme meydana gelmediği ve dolayısıyla destek üzerine fazla yük binmediği düşünülmektedir. Her ne kadar varyans analizi plaka için de önemli bir etki olmadığını gösterse de kuvvet verileri incelendiğinde, özellikle yüksek ilerleme hızlarında (600 ve 900 mm/dk) destek kullanımına paralel olarak itme kuvveti de artmıştır. Bu durum, özellikle yüksek ilerleme hızlarında plakanın ataletindeki zayıflığından dolayı desteksiz delmede meydana gelen eğilme ile ilişkilendirilebilir (Şekil

4.10). Destek kullanımıyla plakadaki eğilme ortadan kalkar ve böylece, yüksek ilerleme hızlarında destek kullanılarak plaka delindiğinde daha yüksek kuvvetler oluşur. Düşük ilerleme hızında ise plakayı egecek kadar kuvvet oluşmadığı için desteğin etkisi zayıftır.

Çizelge 4.1 İtme kuvveti ve tork için varyans analizi sonuçları.

	Varyasyon kaynağı	Serbestlik derecesi	Kareler toplamı	Kareler ortalaması	F oranı	P değeri	%
İtme kuvveti	Filaman sarım boru						
	İş mili hızı	2	4821,2	2410,60	18,35	0,000	47,490
	İlerleme hızı	2	3746,9	1873,46	14,26	0,001	36,908
	Destek kullanımı	1	7,6	7,56	0,06	0,814	0,074
	Hata	12	1576,2	131,35			15,526
	Toplam	17	10151,9				100
	Rulo sarım boru						
	İş mili hızı	2	5665,2	2832,6	9,11	0,004	41,821
	İlerleme hızı	2	3920,0	1960,0	6,30	0,013	28,937
	Destek kullanımı	1	228,4	228,4	0,73	0,408	1,686
	Hata	12	3732,6	311,0			27,554
	Toplam	17	13546,3				100
	Plaka						
	İş mili hızı	2	7715,1	3857,5	18,94	0,000	48,922
	İlerleme hızı	2	5283,8	2641,9	12,97	0,001	33,504
	Destek kullanımı	1	327,2	327,2	1,61	0,229	2,074
	Hata	12	2444,1	203,7			15,498
	Toplam	17	15770,2				100
Tork	Filaman sarım boru						
	İş mili hızı	2	0,262892	0,131446	20,29	0,000	45,96
	İlerleme hızı	2	0,227437	0,113718	17,56	0,000	39,76
	Destek kullanımı	1	0,003891	0,003891	0,60	0,453	0,68
	Hata	12	0,077727	0,006477			13,58
	Toplam	17	0,571947				100
	Rulo sarım boru						
	İş mili hızı	2	0,27882	0,13941	10,52	0,002	32,18
	İlerleme hızı	2	0,38984	0,19492	14,71	0,001	44,99
	Destek kullanımı	1	0,03870	0,03870	2,92	0,113	4,46
	Hata	12	0,15900	0,01325			18,35
	Toplam	17	0,86637				100
	Plaka						
	İş mili hızı	2	2,09828	1,04914	8,24	0,006	34,51
	İlerleme hızı	2	2,42081	1,21041	9,51	0,003	39,81
	Destek kullanımı	1	0,03405	0,03405	0,27	0,614	0,56
	Hata	12	1,52715	0,12726			25,11
	Toplam	17	6,08029				100

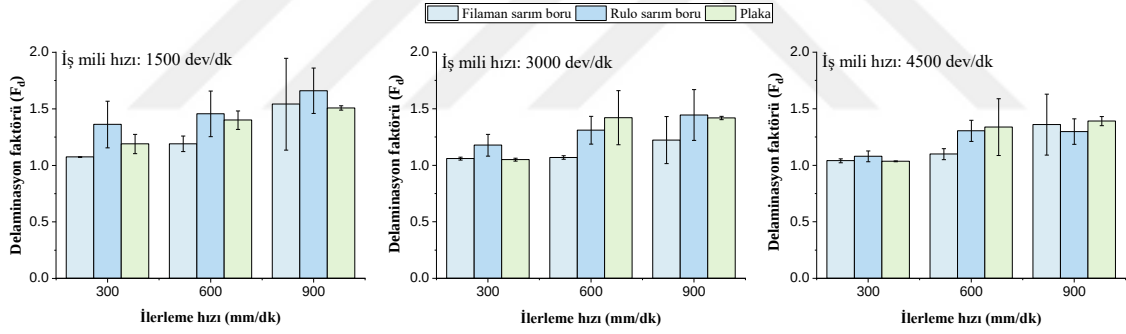
Tüm kuvvet verileri genel olarak değerlendirildiğinde (Şekil 4.8), en yüksek kuvvetlerin plakada meydana geldiği, bunu sırasıyla, filaman sarım ve rulo sarım borunun izlediği görülmektedir. Kompozit borunun ve kompozit plakanın delinmesi sırasında ölçülen kuvvetler arasındaki farkın temel olarak geometrik farklılıktan kaynaklandığı söylenebilir. Bir önceki başlıkta tartışıldığı ve Şekil 4.3'te gösterildiği üzere kompozit plakada kesici takım ve iş parçası arasındaki temas alanının daha fazla olması, plakada

daha yüksek kuvvetlerin oluşmasına sebep olduğu düşünülmektedir. Ayrıca üretim yöntemindeki farklılıklar da işlenebilirlik sırasında farklı kuvvetlerin oluşmasının bir diğer sebebidir. Filaman sarım üretiminde elyaf demetleri reçine banyosundan geçirildikten sonra belirli bir gerginlikte dönen mandrel üzerine sarılmaktadır. Böylece sarım sırasında fazla reçine tabaka üstüne çıkar ve bir fırça yardımıyla operatör tarafından sistemden uzaklaştırılır. Rulo sarımda ise reçine fazlasını üretim aşamasında sistemden uzaklaştırmak pek mümkün değildir. Bu sebeple filaman sarım borunun elyaf hacim oranı rulo sarımdan fazladır. Plaka üretilirken de vakum sayesinde fazla reçine sistemden uzaklaştırılır ve yüksek elyaf hacim oranları elde edilir. Literatürde daha önce yapılmış çalışmalarda, yüksek elyaf hacim oranlarının kesme kuvvetlerini arttırdığı bildirilmiştir (Khashaba vd. 2007a, Panchagnula ve Palaniyandi 2018). Filaman sarım ve plakada yüksek kuvvetlerin oluşmasının bir diğer sebebinin de bu olduğu düşünülmektedir.

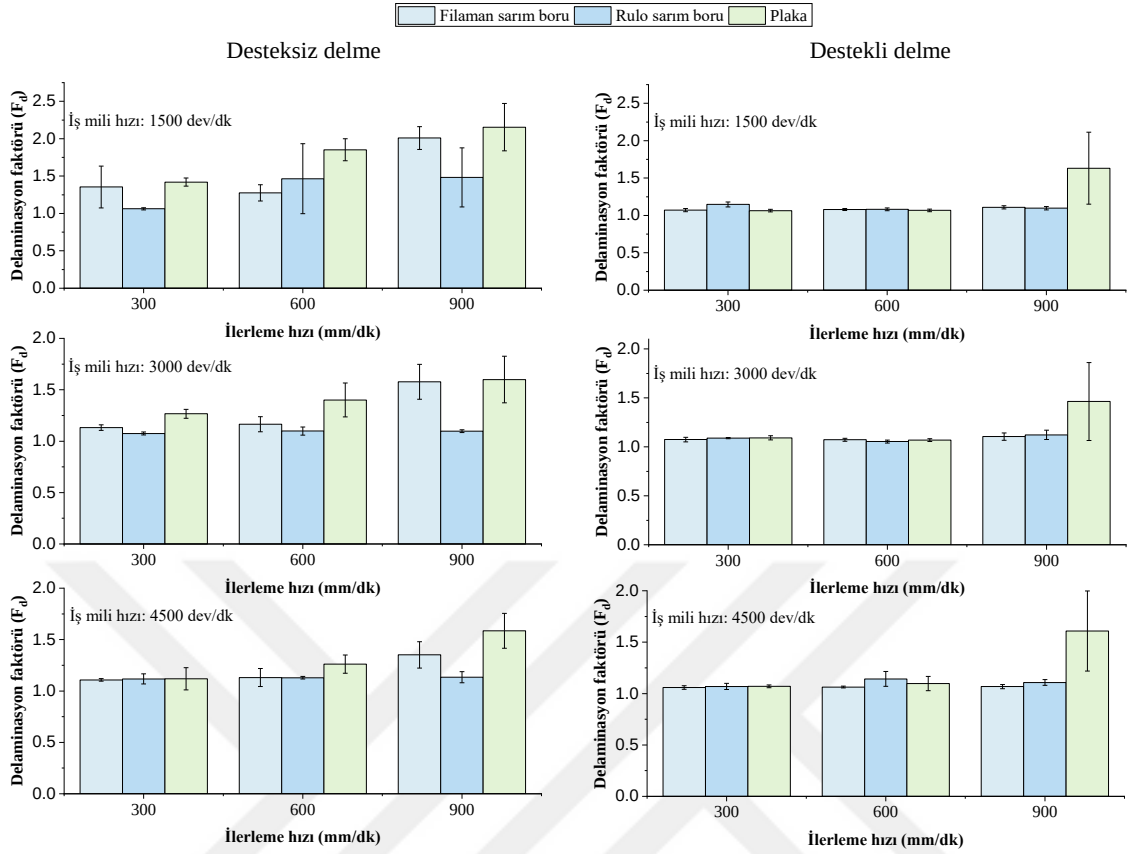
4.2.2 Delaminasyon Analizi

Literatürde kompozit borular üzerine yapılan birçok çalışmada delik delme kaynaklı delaminasyonun malzeme dayanımını, yük taşıma kapasitesini, servis ömrünü ve işleme kalitesini etkileyebileceği bildirilmiştir (Hocheng vd. 2014, Hocheng vd. 2016, Gemi vd. 2019, Sahami poor dehghan ve Heidary 2020). Bu sebeple delik delme sonrası delaminasyon analizinin yapılması önemlidir. Kesme koşullarına bağlı olarak farklı kompozitlerde oluşan delik delme kaynaklı delaminasyon grafikleri delik girişi için Şekil 4.11’de, delik çıkışı için ise Şekil 4.12’de verilmiştir. Delik girişinde, 300 mm/dk ilerleme hızında orta ve yüksek iş mili hızı için delaminasyonlar ihmal edilebilir düzeyde iken, tüm iş mili hızları için 900 mm/dk ilerleme hızında önemli hasarlar meydana gelmiştir. Delik girişindeki hasarlar incelendiğinde genel olarak en yüksek hasarın rulo sarım boruda meydana geldiği, bunu plaka ve filaman sarım borunun izlediği görülmektedir. Desteksiz delmede ise delik çıkışında meydana gelen hasarlar incelendiğinde genel olarak en yüksek hasarın plakada meydana geldiği, bunu sırasıyla filaman sarım boru ve rulo sarım borunun takip ettiği görülmektedir. Literatürdeki çalışmalarda delaminasyon oluşumu genellikle itme kuvveti ile ilişkilendirilmektedir (Mohan vd. 2007, Giasin ve Ayvar-Soberanis 2017, Geng vd. 2019). Delik çıkışında meydana gelen delaminasyon dışa doğru itme şeklinde (push-out) gerçekleştiğinden, bu hasar üzerinde itme kuvveti oldukça etkilidir. Ancak delik girişindeki delaminasyon soyulma (peel-up) şeklinde

gerçekleştiği için burada itme kuvvetinin etkisinin daha az olduğu söylenebilir. Bu nedenle, delik çıkışındaki delaminasyon hasarı, itme kuvveti sonuçlarıyla uyumluyken, delik girişinde farklı bir davranış söz konusudur. Elyafı bir arada tutan ve yükü homojen bir şekilde elyafa dağıtan matrisin (reçine) tabakalar arası ayrılmaya karşı elyafı destekleyerek delaminasyon oluşumunu azalttığı düşünülmektedir. Üretim metodundan kaynaklı olarak filaman sarım borularda üst katmanda, rulo sarım borularda ise alt katmanda reçine bakımından zengin bölgeler oluşmaktadır. Bu sebeple filaman sarımın delik girişinde rulo sarımın ise delik çıkışında birlerine kıyasla nispeten daha az hasar oluştuğu düşünülmektedir. Bu bölgelerde delaminasyon hasarının yanında kesilmemiş elyaf yoğunluğunda da önemli bir azalma görülmüştür. Delik çıkış delaminasyonu için varyans analizi sonuçları Çizelge 4.2 (Morkavuk vd. 2022a)'de verilmiştir. Analize göre ilerleme hızı ve destek kullanımı filaman sarım boru için önemli etkiye sahipken, rulo sarım boru için hiçbirisi önemli bir etkiye sahip değildir. Kompozit plakada ise her üç parametrenin de etkili olduğu görülmektedir.



Şekil 4.11 Delik girişinde delme kaynaklı delaminasyon faktörünün kesme parametrelerine bağlı değişimi (Morkavuk vd. 2022a).

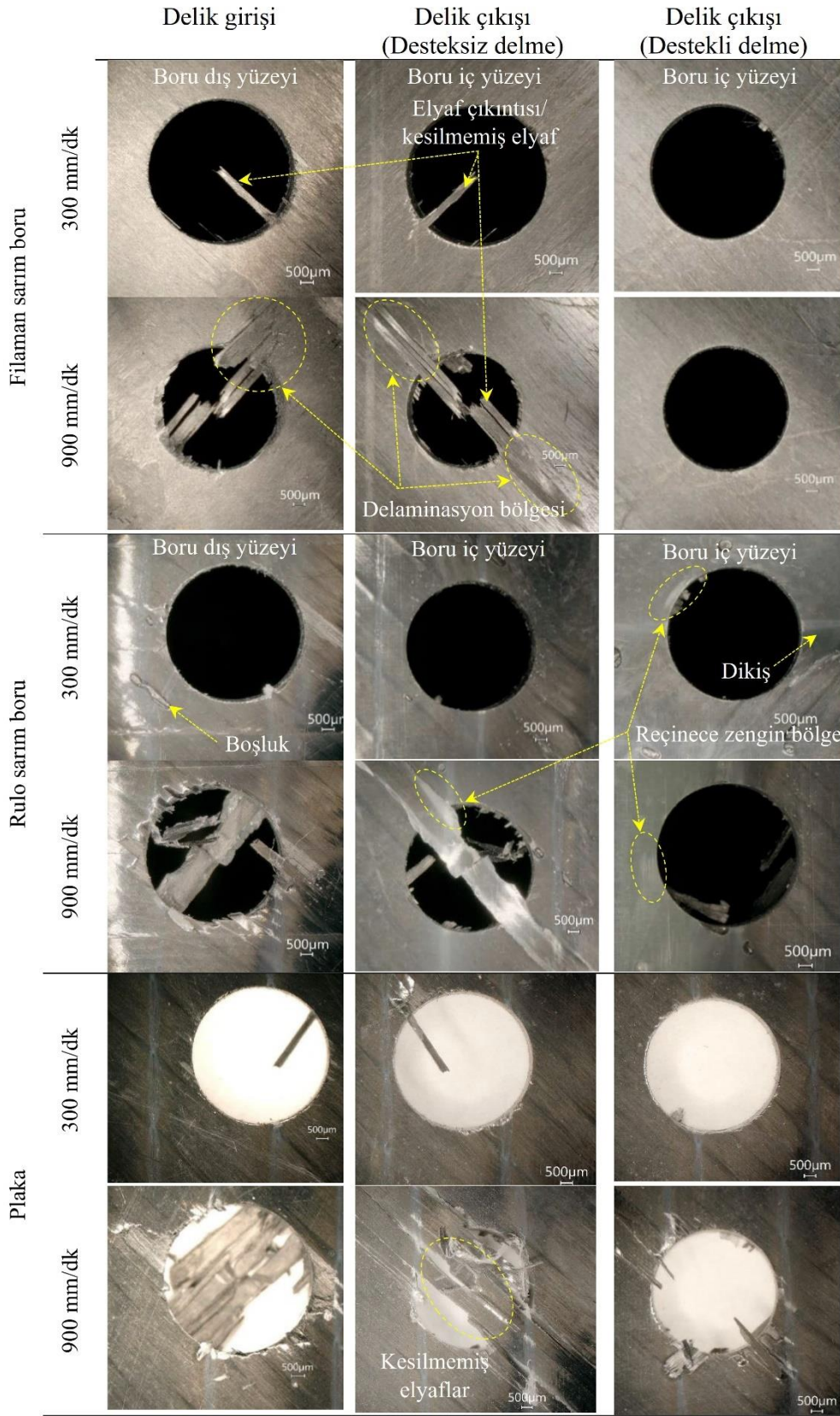


Şekil 4.12 Delik çıkışında delme kaynaklı delaminasyon faktörünün kesme parametrelerine ve destek kullanımına bağlı değişimi (Morkavuk vd. 2022a).

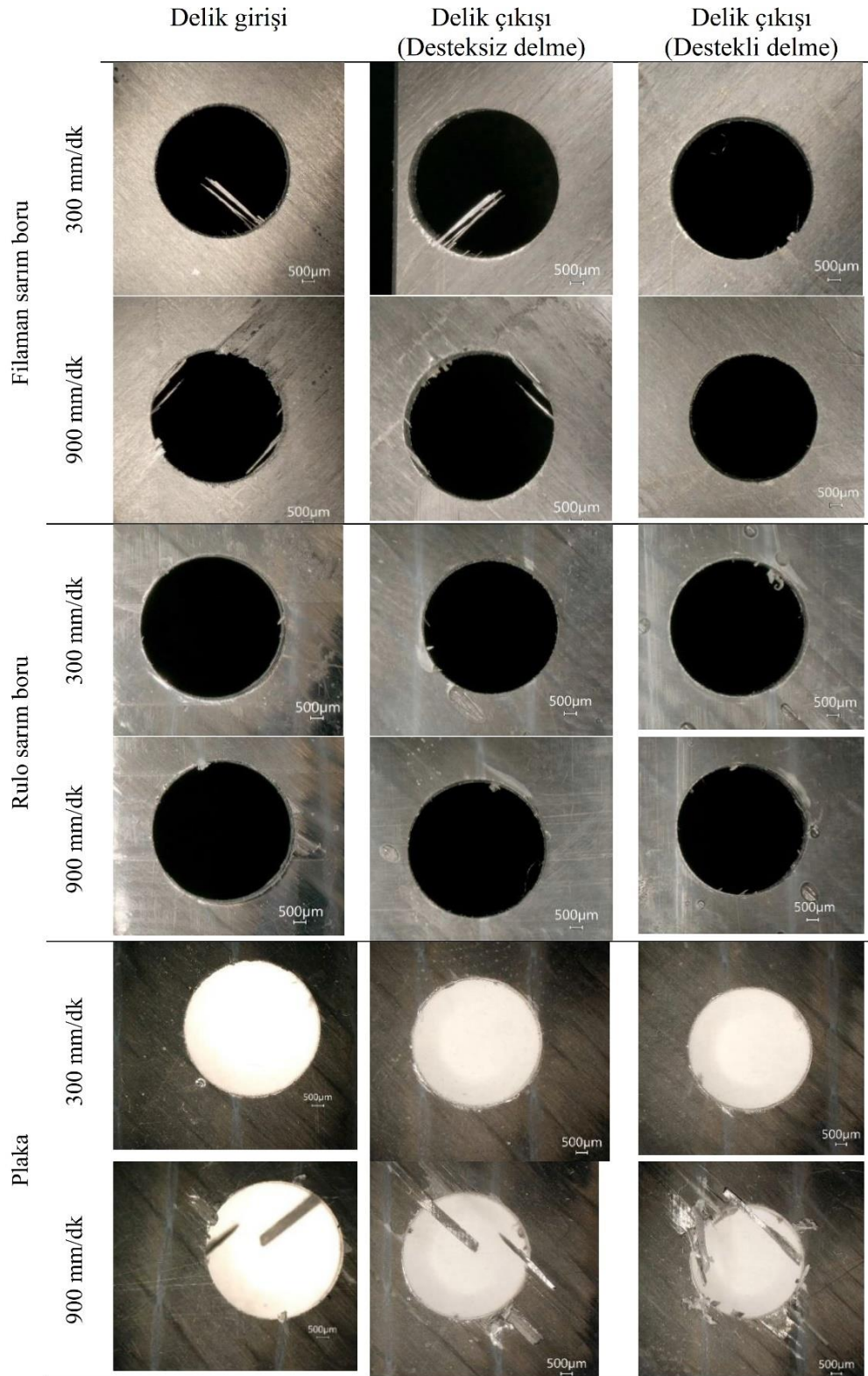
ANOVA sonuçları rulo sarım boru için delaminasyon faktörü ile destek kullanımı arasında anlamlı bir ilişki olmadığını gösterse de ($p>0,05$), düşük iş mili hızı ve yüksek ilerleme hızı kombinasyonunda yapılan bazı testlerde, destek kullanımı ile delik çıkışındaki delaminasyon hasarının önemli ölçüde azaldığı görülmüştür. Filaman sarım borunun delinmesinde ise destek kullanımının genel olarak önemli bir etkisi vardır ($p<0,05$). Filaman sarım boruda destek kullanımı ve itme kuvveti arasında anlamlı bir ilişki olmamasına rağmen (Çizelge 4.1), destek kullanımı ile delaminasyon arasında anlamlı bir ilişki elde edilmesi (Çizelge 4.2) ve dolayısıyla kuvveti çok yükseltmeden delaminasyon hasarının azaltılması bu malzemenin işlenebilirliğinde önemli bir gelişmedir. Şekil 4.13 ve 4.14'te bazı parametreler için delik giriş ve çıkış görüntüleri verilmiştir. Şekil 4.13 ve 4.14'te görüldüğü üzere kompozit plakada destek kullanılmasına rağmen, yüksek ilerleme hızında hala delaminasyon hasarının meydana geldiği gözlemlenmiştir. Ancak yüksek iş mili hızı düşük ilerleme hızı kombinasyonu ile oldukça kaliteli delikler elde edilmiştir (Şekil 4.14).

Çizelge 4.2 Delik çıkışında delaminasyon faktörü için varyans analizi sonuçları.

Varyasyon kaynağı	Serbestlik derecesi	Kareler toplamı	Kareler ortalaması	F oranı	P değeri	%
Filaman sarım için Delaminasyon faktörü						
İş mili hızı	2	0,1094	0,05471	1,89	0,193	10,905
İlerleme hızı	2	0,2263	0,11313	3,91	0,049	22,557
Destek kullanımı	1	0,3201	0,32007	11,05	0,006	31,907
Hata	12	0,3474	0,02895			34,629
Toplam	17	1,0032				100
Rulo sarım için Delaminasyon faktörü						
İş mili hızı	2	0,05970	0,02985	2,46	0,127	23,076
İlerleme hızı	2	0,02232	0,01116	0,92	0,425	8,627
Destek kullanımı	1	0,03110	0,03110	2,56	0,135	12,021
Hata	12	0,14560	0,01213			56,279
Toplam	17	0,25871				100
Plaka için Delaminasyon faktörü						
İş mili hızı	2	0,1979	0,09893	4,08	0,044	12,002
İlerleme hızı	2	0,7925	0,39623	16,35	0,000	48,065
Destek kullanımı	1	0,3677	0,36769	15,17	0,002	22,301
Hata	12	0,2908	0,02423			17,637
Toplam	17	1,6488				100



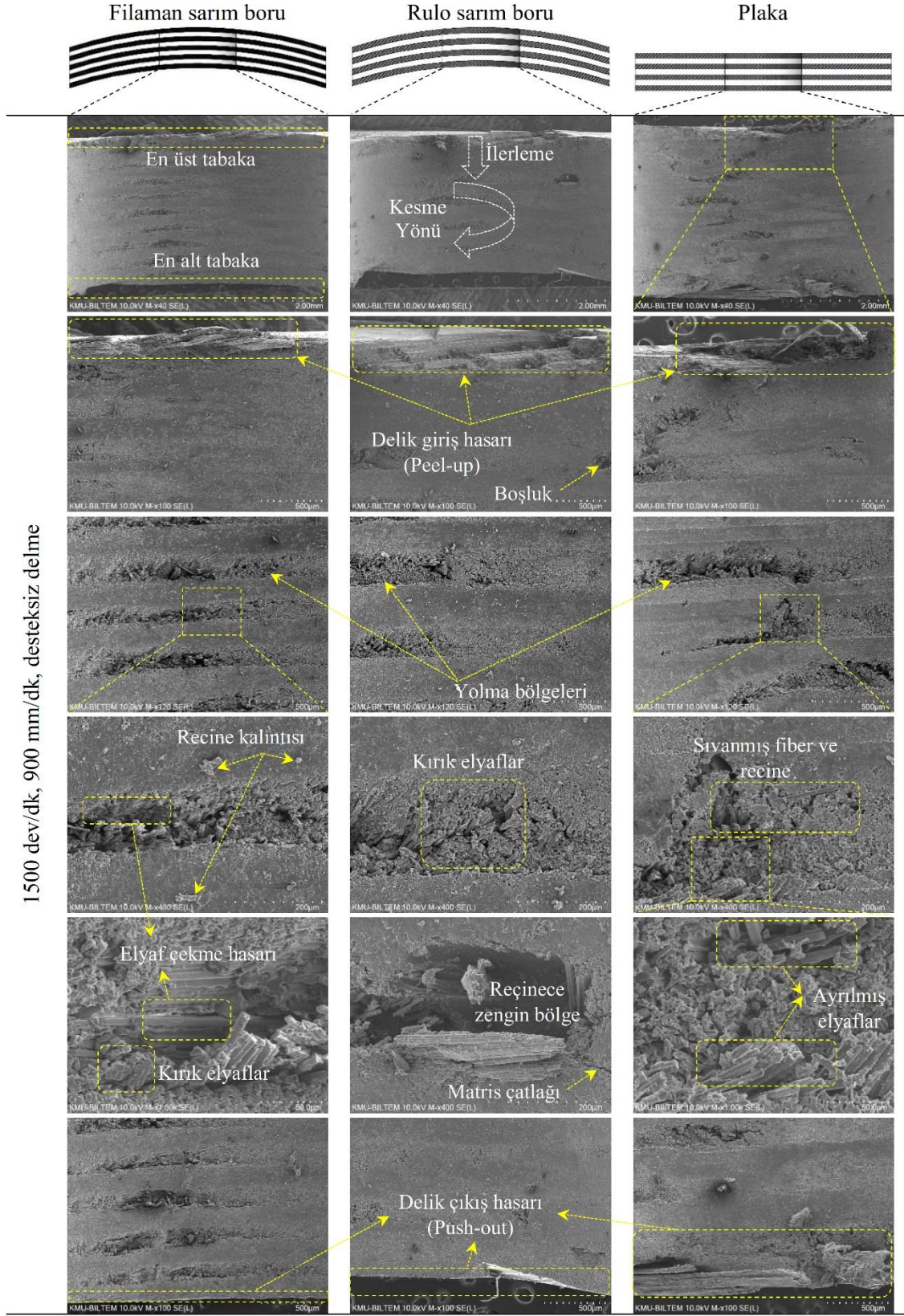
Şekil 4.13 Filaman ve rulo sarım kompozit boru ve kompozit plaka için delik girişı ve çıkışının optik mikroskop görüntüleri (1500 dev/dk) (Morkavuk vd. 2022a).



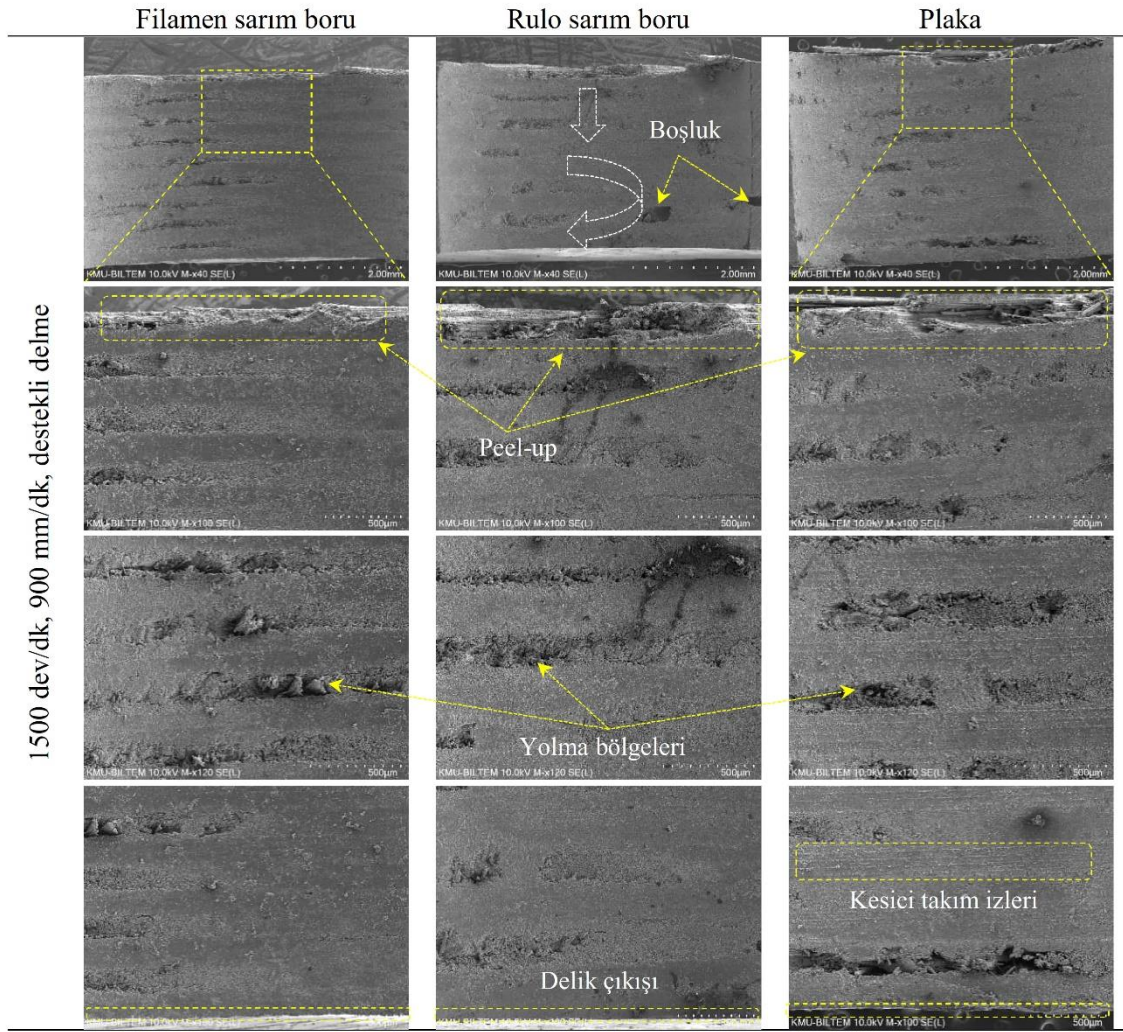
Şekil 4.14 Filaman ve rulo sarım kompozit boru ve kompozit plaka için delik girişı ve çıkışının optik mikroskop görüntüleri (4500 dev/dk).

4.2.3 Yüzey Kalitesi ve SEM Analizi

1500 dev/dk iş mili hızında, 900 mm/dk ilerleme hızıyla destek kullanılmadan yapılan delme işlemi sonrası delik içi yüzeylerinin SEM görüntüleri Şekil 4.15'te, aynı kesme parametreleri ile destek kullanılarak delinen deliklerin SEM görüntüleri ise Şekil 4.16'da verilmiştir. Şekil 4.17'de ise 4500 dev/dk iş mili hızı ve 300 mm/dk ilerleme hızıyla destek kullanılmadan delinen deliklerin SEM görüntüleri verilmiştir. Destek kullanılmadan 1500 dev/dk iş mili hızı ve 900 mm/dk ilerleme hızıyla yapılan delme işleminde yani zor kesme koşullarında her üç malzemede de delik giriş ve çıkışında delaminasyon hasarlarının (Peel-up ve Push-out) meydana geldiği görülmektedir. Bir önceki başlıktaki delaminasyon analizi ile uyumlu olarak, bu hasarların plakada daha şiddetli olduğu görülmüştür. Delik içi yüzeyinde, her üç malzeme için de kırık ve kesilmemiş liflerden oluşan yolma bölgeleri (plucking zones), elyaf çekme (pull-out) ve elyaf-matris ayrılması (debonding) hasarları mevcuttur. Bu bölgeler plaka ve filaman sarım boruda daha fazla gözlenirken, rulo sarım boruda nispeten daha az gözlemlenmiştir. Bunun nedeninin, rulo sarım borunun reçine açısından daha zengin olması ve reçinenin malzemeyi bu hasardan koruması ile ilişkili olduğu düşünülmektedir. Öte yandan, rulo sarım boruda üretim metodundan kaynaklı boşluklar (hava kabarcığı) tespit edilirken, diğer malzemelerde böyle bir durum gözlemlenmemiştir. Gözlemlere göre rulo sarımda matris, liflerin zarar görmesini engellemiş, ancak bu durumda da matriste çatlak oluşumu meydana gelmiştir. Aynı parametrelerle destek kullanılarak yapılan delme işleminde (Şekil 4.16), her üç malzeme için de delik çıkışındaki hasarlar önemli ölçüde azalırken, delik girişindeki hasar oluşmaya devam etmektedir. Ayrıca yolma bölgeleri de oluşmaya devam etmiş, bu bölgelerde destek kullanımı ile bir iyileşme olmamıştır. Destek kullanılmadan 4500 dev/dk iş mili hızı ve 300 mm/dk ilerleme hızıyla yapılan delme işleminde (Şekil 4.17) yani hafif kesme koşullarında ise hem delik girişinde hem de delik çıkışında oluşan hasarlar önemli oranda azalmış ve her üç malzeme için de pürüzsüz kesilmiş yüzeyler de elde edilmiştir. Ancak plakada hala az da olsa yolma bölgelerinin mevcut olduğu da gözden kaçmamıştır.



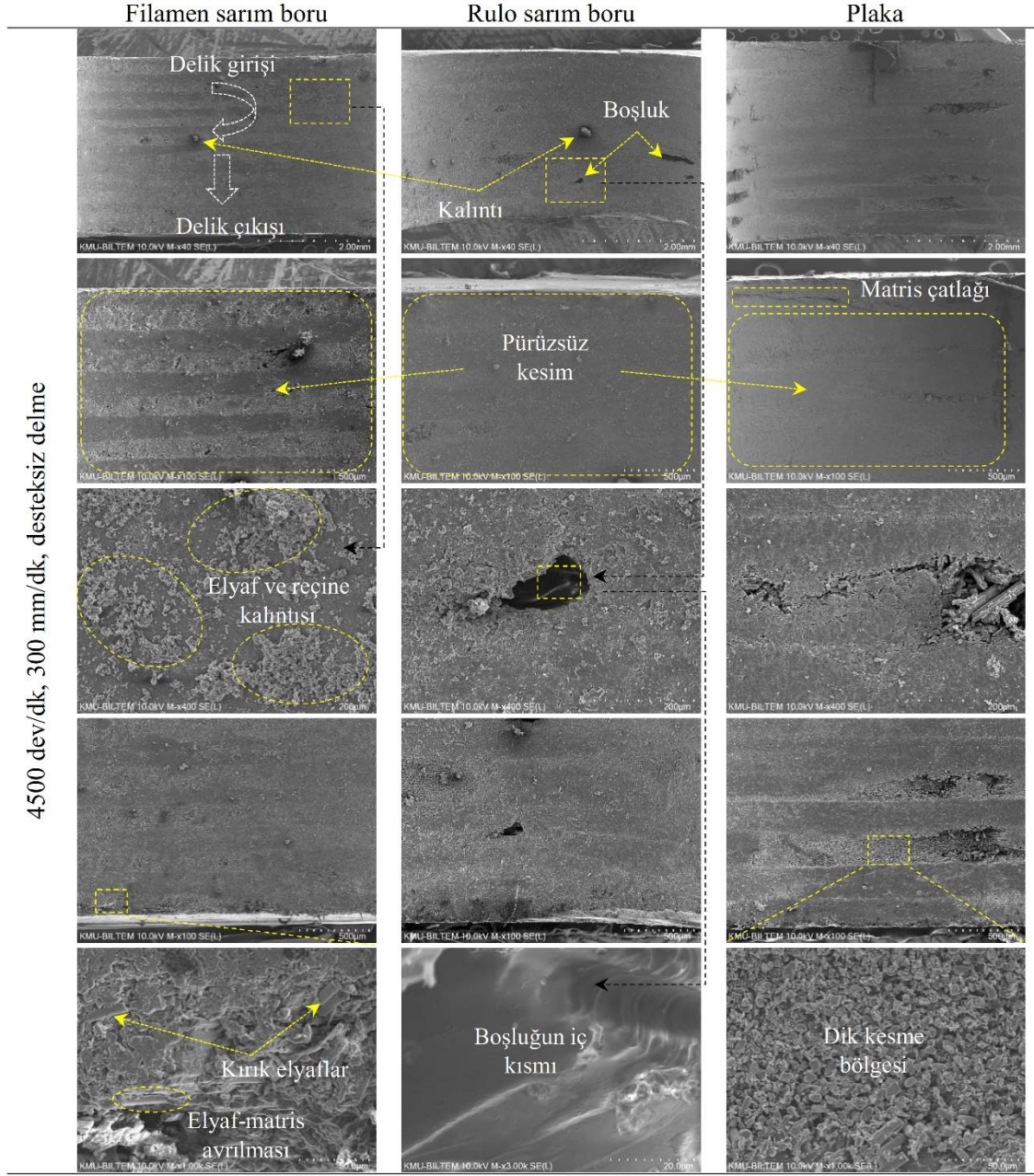
Şekil 4.15 Delik içi yüzeyi SEM görüntüleri (1500 dev/dk, 900 mm/dk, desteksiz delme) (Morkavuk vd. 2022a).



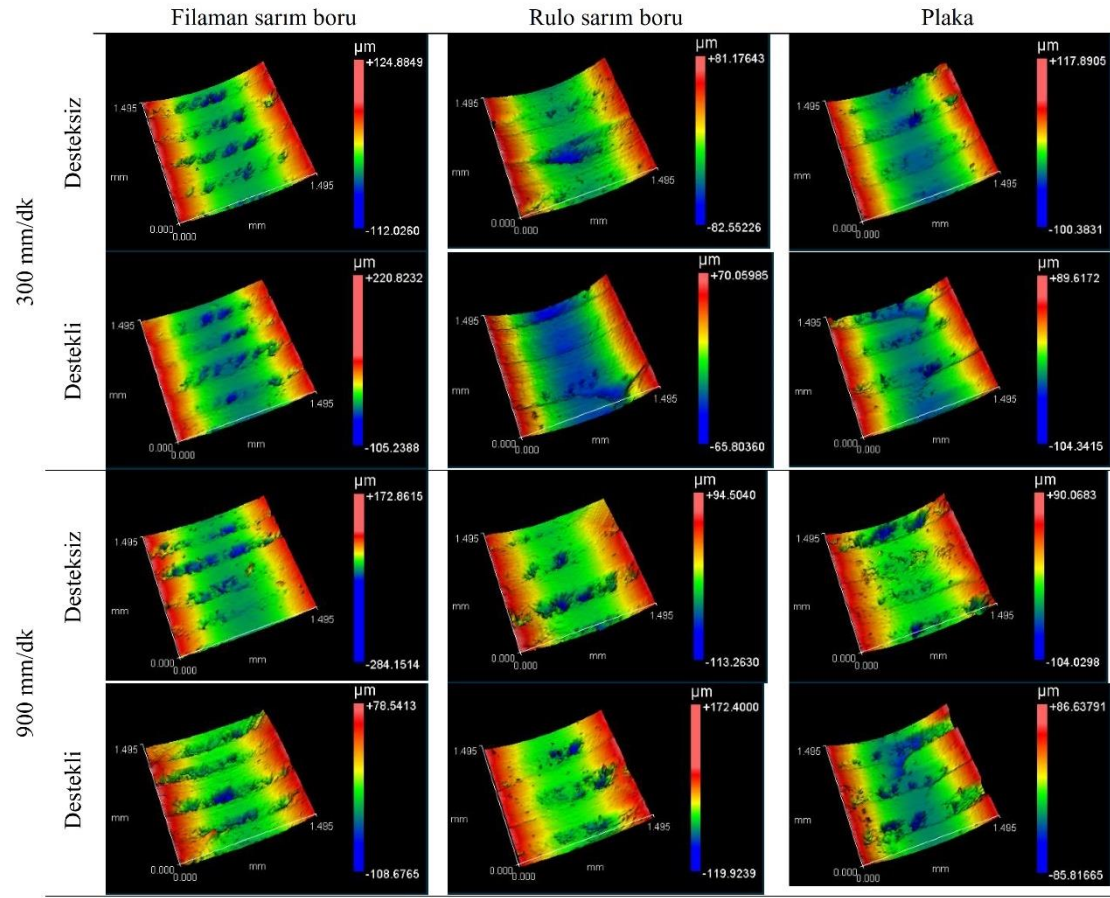
Şekil 4.16 Delik içi yüzeyi SEM görüntüleri (1500 dev/dk, 900 mm/dk, destekli delme) (Morkavuk vd. 2022a).

Şekil 4.18’de 3000 dev/dk iş mili hızında delinmiş delikler için yüzey topografyaları verilmiştir. Şekil 4.19’da ise test edilen tüm parametreler için yüzey pürüzlülüğü değerleri (R_a ve R_q) verilmiştir. SEM görüntülerindeki gibi yolma bölgeleri topografyalar üzerinde de görülmektedir. Bu bölgeler her üç malzeme üzerinde gözlemlense de filaman sarım boru üzerinde daha yoğun olduğu söylenebilir. Öte yandan tüm yüzey pürüzlülüğü değerleri genel olarak değerlendirildiğinde, filaman sarımda daha pürüzlü yüzeylerin olduğu söylenebilir. Şekil 4.18’de görüldüğü üzere, filaman sarım boruda gözlemlenen yoğun yolma bölgelerinin yüzey pürüzlülüğünü etkilediği düşünülmektedir. Ancak 1500 dev/dk iş mili hızı 900 dev/dk ilerleme hızında yapılan testlerde rulo sarımın yüzey pürüzlülüğü değerlerinin, filaman sarımın pürüzlülük değerleri ile aynı olduğu hatta bazı durumlarda daha yüksek olduğu görülmüştür. En düşük pürüzlülük değerleri ise genel

olarak plakada oluşmuştur. Bunun nedeninin, plakanın vakum altında kurlenmesinden dolayı daha az boşluklu ve daha sıkı bir yapıya sahip olması ve dolayısıyla daha pürüzsüz bir yüzeye sahip olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

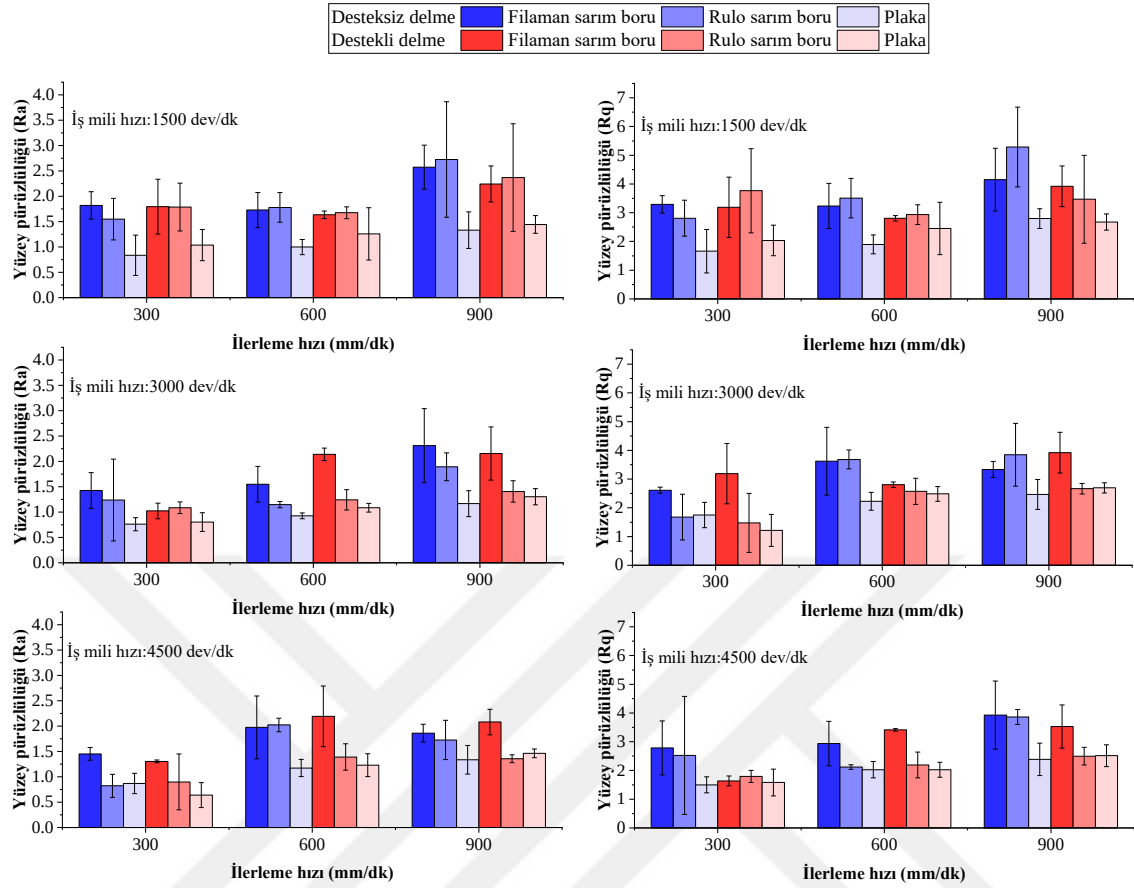


Şekil 4.17 Delik içi yüzeyi SEM görüntüleri (4500 dev/dk, 300 mm/dk, desteksiz delme) (Morkavuk vd. 2022a).



Şekil 4.18 Delik içi yüzey topografyaları (3000 dev/dk) (Morkavuk vd. 2022a).

Yüzey pürüzlülüğü (R_a) için ANOVA sonuçları Çizelge 4.3 (Morkavuk vd. 2022a)'te verilmiştir. Analiz, ilerleme hızının her üç malzemede de etkili olduğunu göstermektedir. İlerleme hızı arttıkça hem borularda hem de plakada yüzey kalitesi bozulmaktadır. Ancak elde edilen yüzeylerin kalitesinde 1500 ile 3000 dev/dk iş mili hızı arasında ciddi bir fark varken, 3000 ile 4500 dev/dk arasında ciddi bir fark yoktur. Öte yandan analiz, her üç malzemede de destek kullanımı ile yüzey pürüzlülüğü arasında önemli bir ilişki olmadığını göstermektedir. Zaten literatürde daha önce yayınlanmış birçok çalışmada destek kullanımı ile asıl amaçlanan olayın delaminasyon hasarını düşürmek ya da oluşumunu baskılamak olduğu belirtilmiştir (John ve Thirumalai Kumaran 2020, Patel ve Chaudhary 2021, Gao vd. 2022, Xu vd. 2022).



Şekil 4.19 Delik içi yüzey pürüzlülüğü değerlerinin (Ra ve Rq) kesme parametrelerine ve destek kullanımına bağlı değişimi (Morkavuk vd. 2022a).

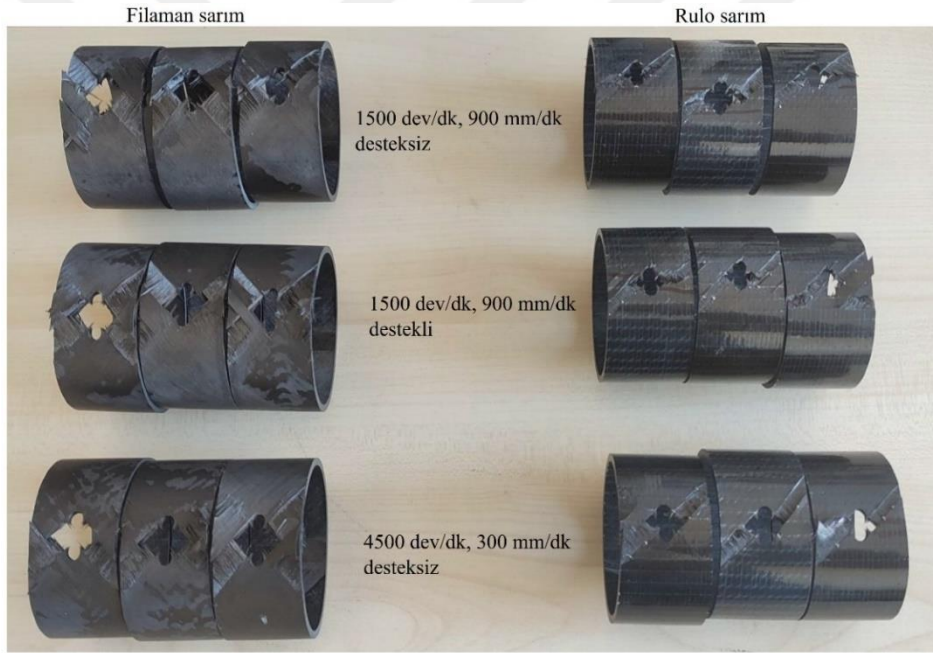
Çizelge 4.3 Yüzey pürüzlülüğü (Ra) için varyans analizi sonuçları.

Varyasyon kaynağı	Serbestlik derecesi	Kareler toplamı	Kareler ortalaması	F oranı	P değeri	%
Filaman sarım için Yüzey pürüzlülüğü (Ra)						
İş mili hızı	2	0,13066	0,065331	0,80	0,471	4,790
İlerleme hızı	2	1,61977	0,809883	9,96	0,003	59,38
Destek kullanımı	1	0,00093	0,000929	0,01	0,917	0,034
Hata	12	0,97606	0,081339			35,78
Toplam	17	2,72742				100
Rulo sarım için Yüzey pürüzlülüğü (Ra)						
İş mili hızı	2	1,5814	0,79072	9,41	0,003	38,123
İlerleme hızı	2	1,3989	0,69945	8,32	0,005	33,723
Destek kullanımı	1	0,1594	0,15942	1,90	0,194	3,842
Hata	12	1,0083	0,08403			24,307
Toplam	17	4,1481				100
Plaka için Yüzey pürüzlülüğü (Ra)						
İş mili hızı	2	0,06777	0,03389	3,36	0,069	6,554
İlerleme hızı	2	0,80329	0,40165	39,83	0,000	77,692
Destek kullanımı	1	0,04186	0,04186	4,15	0,064	4,048
Hata	12	0,12101	0,01008			11,703
Toplam	17	1,03393				100

4.3 Kompozit Borularda Delik Delme İşleminin Malzeme Mekanik ve Yorulma Davranışlarına Etkisinin Analizi

4.3.1 Çekme Dayanımı Analizi

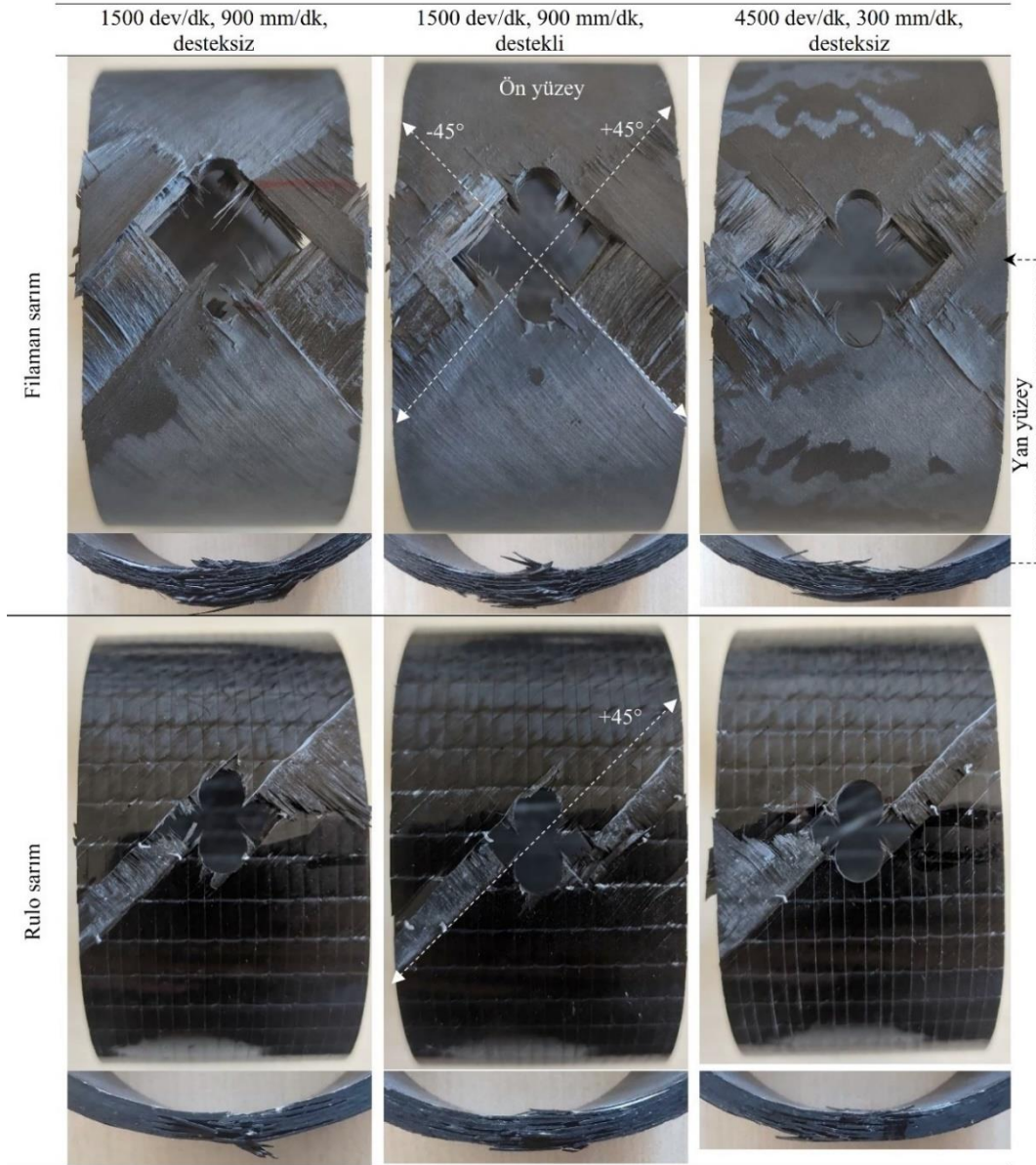
Delik delme kaynaklı oluşan delaminasyonun, delik içi hasarların ve yüzey kalitesinin filaman ve rulo sarım boruda malzemenin kalıcı çevresel çekme dayanımı üzerindeki etkilerini tespit etmek üzere üç farklı koşulda delinmiş halka çekme numuneleri hazırlanarak, üçer tekrarlı olacak şekilde halka çekme testleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.20’de test edilmiş numuneler gösterilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere, tüm numuneler beklendiği gibi delik civarından kopmuştur.



Şekil 4.20 Halka çekme testi sonrası hasara uğramış numuneler.

Numuneler makro boyutta daha yakından gözlemlendiğinde (Şekil 4.21), ön yüzeylerde hem filaman sarım hem de rulo sarım için delik delme koşuluna bağlı hasar durumunda önemli bir farklılık gözlemlenmemiştir. Ancak filaman sarımda yan yüzeylerde 4500 dev/dk, 300 mm/dk ilerleme hızında delinen numunede nispeten diğerlerine kıyasla daha az delaminasyon olduğu söylenebilir. Rulo sarımda ise ayırt edilebilir bir durum mevcut değildir. Öte yandan filaman sarım ve rulo sarımın hasar davranışlarının özellikle yan yüzeylerde birbirinden farklı olduğu görülmektedir. Filaman sarım boruda daha yoğun

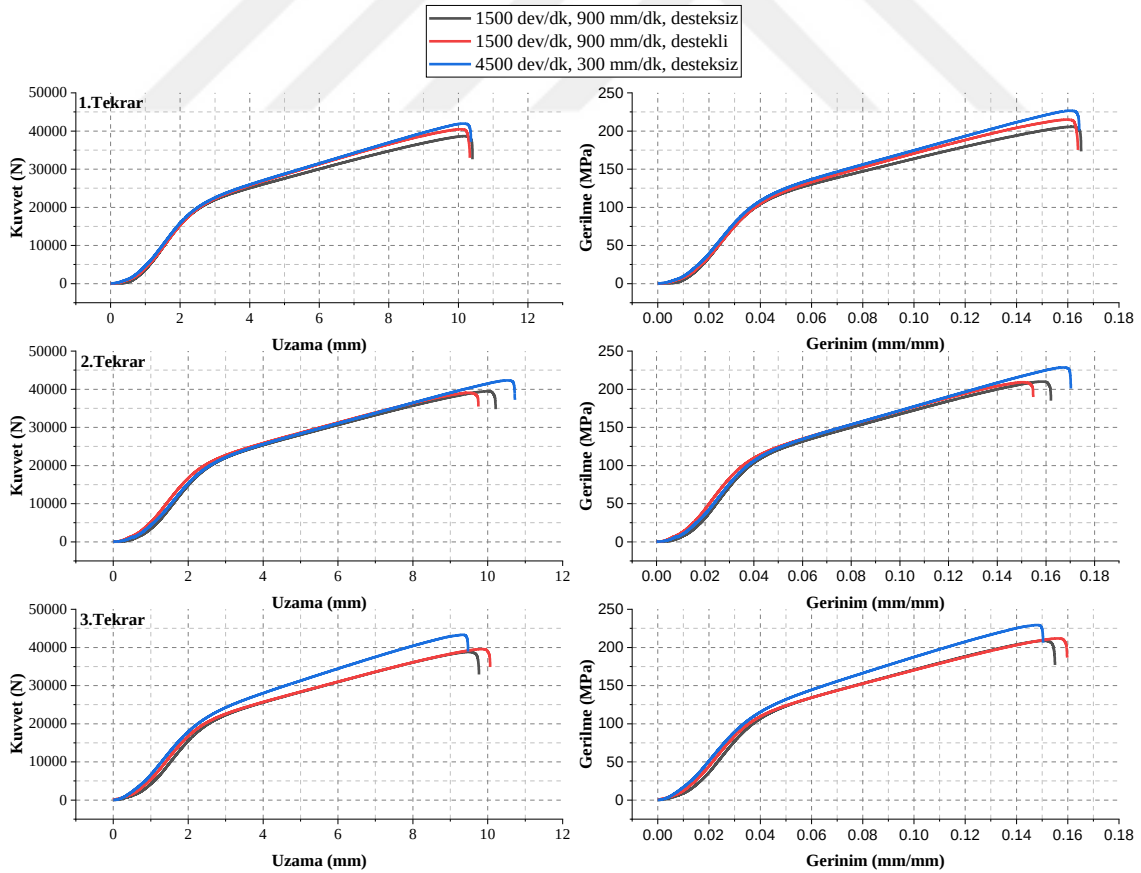
bir delaminasyon hasarı oluşumu göze çarpmaktadır. Filaman sarımda hasar daha geniş bir alana yayılırken, rulo sarımda hasar daha lokalizedir. Ayrıca filaman sarımda hasarlar, hem $+45^\circ$ hem de -45° yönünde ilerlerken, rulo sarımda sadece $+45^\circ$ yönünde bir hasar yayılımı mevcuttur. Gözlemlerden rulo sarımın daha gevrek bir davranış sergilediği söylenebilir.



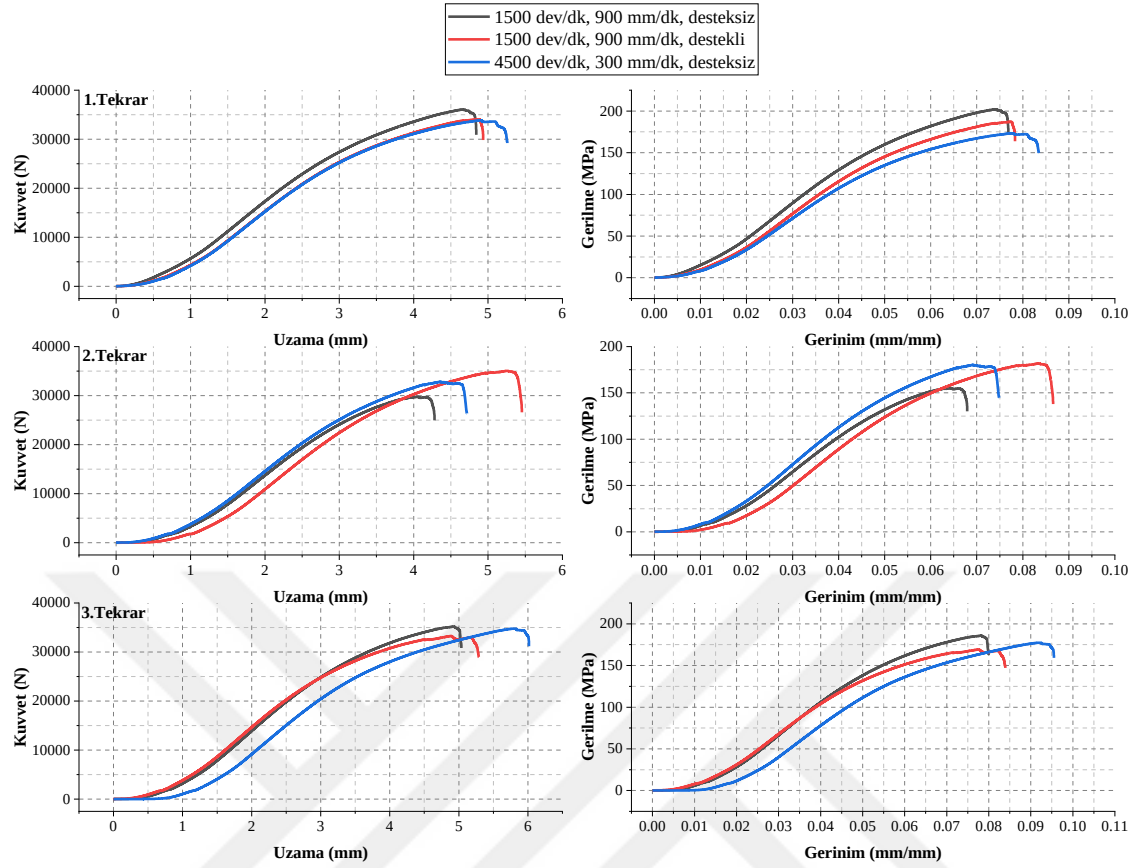
Şekil 4.21 Halka çekme testi sonrası numunelerin makro hasar analizi.

Delik delme koşuluna bağlı olarak kuvvet-uzama ve gerilme-gerinim grafikleri filaman sarım için Şekil 4.22’de, rulo sarım için ise Şekil 4.23’te verilmiştir. Gerinim hesabı

yapılırken ilk boy ortalama çap olarak alınmıştır. Şekil 4.22’den görüldüğü üzere, 4500 dev/dk ve 300 mm/dk kesme parametreleri ile desteksiz koşulda delinen filaman sarım numunelerde en yüksek dayanım elde edilmiştir. Uzama değerleri ise farklılık göstermektedir. Öte yandan aynı kesme parametreleri ile destekli ve desteksiz koşulda delinmiş numunelerin dayanımları birbirine oldukça yakındır. Rulo sarımda ise böyle bir eğilim görülmemiş, hatta bazı testlerde 4500 dev/dk ve 300 mm/dk kesme parametreleri ile desteksiz koşulda delinmiş numune en düşük dayanımı sunmuştur. Öte yandan iki farklı yöntem ile üretilmiş boruların çekme davranışı da birbirinden oldukça farklıdır. Filaman sarım daha rijit davranmış ve elastik bölgeden plastik bölgeye geçiş bu malzemede daha belirgin olmuştur. Rulo sarımda ise elastik bölgeden plastik bölgeye geçiş daha az belirgin olup plastik bölgeye geçişten kısa süre sonra kopma gerçekleşmiştir. Ayrıca rulo sarım kopana kadar neredeyse filaman sarımın yarısı kadar uzamıştır. Çizelge 4.4’te her iki malzeme için de çekme testinden elde edilen veriler standart sapmaları ile birlikte verilmiştir.



Şekil 4.22 Filaman sarım için kuvvet-uzama ve gerilme-gerinim grafikleri.



Şekil 4.23 Rulo sarım için kuvvet-uzama ve gerilme-gerinim grafikleri.

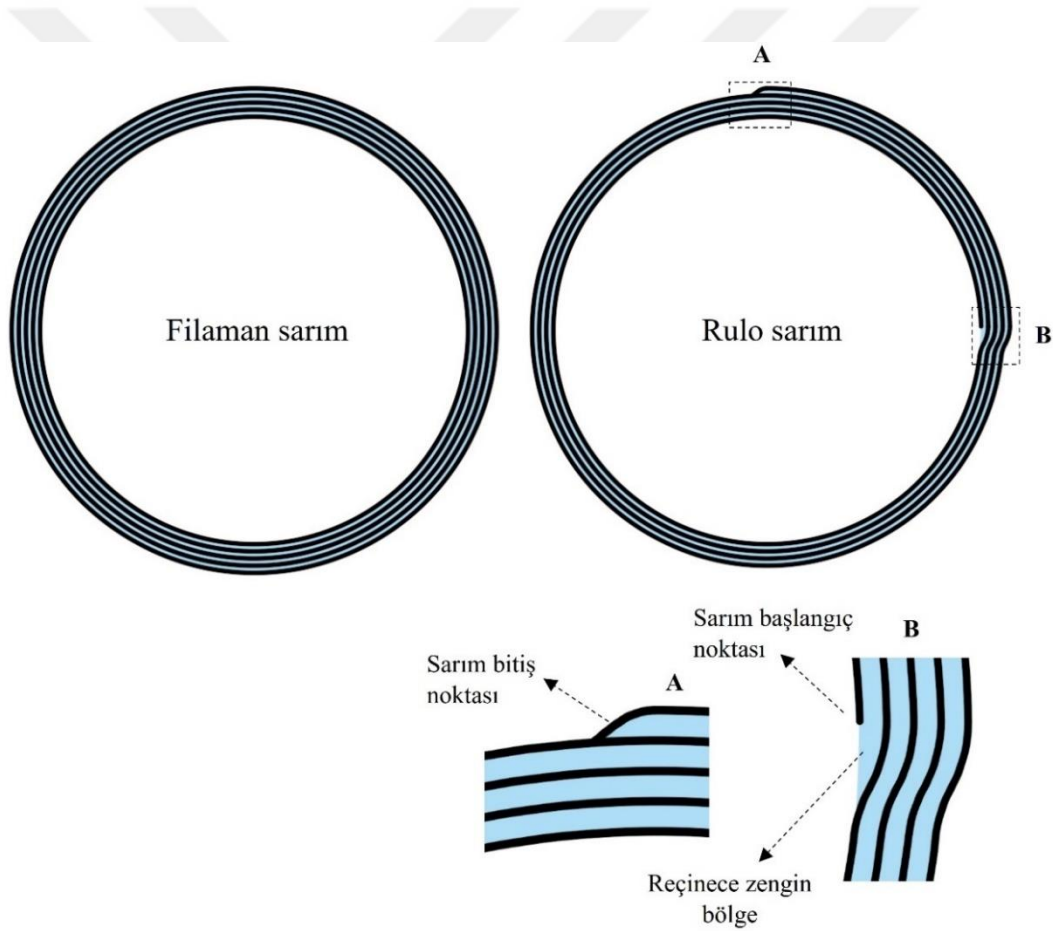
Tüm numuneler ortalamaya göre değerlendirildiğinde filaman sarımda en yüksek dayanımın 4500 dev/dk ve 300 mm/dk kesme parametreleri ile desteksiz koşulda delinen numunelerde elde edildiği, bunu ise sırasıyla 1500 dev/dk ve 900 mm/dk kesme parametreleri ile destekli koşulda delinmiş ve 1500 dev/dk ve 900 mm/dk kesme parametreleri ile desteksiz koşulda delinmiş numunelerin takip ettiği görülmektedir. Bu sonuçlar delik delme testlerinden elde edilen sonuçlar ile birlikte değerlendirildiğinde, filaman sarım boru için delik delme sırasında oluşan hasarların malzeme dayanımı üzerinde etkili olduğunu dolayısıyla en az hasarlı ve en kaliteli deliğe sahip numunenin en yüksek çekme dayanımına sahip olduğunu söylemek mümkündür. Aynı parametreler ile destekli ve desteksiz delme arasında ise ortalamaya göre fazla fark oluşmamıştır. Bu sonuç dayanım üzerinde sadece delik çıkış delaminasyonunun değil delik içi hasarların ve yüzey kalitesinin de etkili olduğunu göstermiştir. Çünkü destek kullanımının sadece delik çıkış delaminasyonunu azalttığı, delik giriş delaminasyonu, delik içi hasarları ve delik yüzey kalitesi üzerinde ise önemli bir etkisinin olmadığı bir önceki başlık altında tespit edilmiştir.

Çizelge 4.4 Halka çekme testi sonuçları.

	Delme koşulu	Numune	Genişlik (mm)	Kalınlık (mm)	Minimum alan (mm ²)	Maksimum kuvvet (N)	Maksimum gerilme (MPa)	Maksimum uzama (mm)
Filaman sarım	1500 dev/dk,	1	35,84	3,15	93,99	38652,32	205,60	10,19
	900 mm/dk,	2	36,00	3,13	93,90	39439,01	210,00	9,93
	desteksiz	3	35,88	3,11	92,92	38810,00	208,82	9,47
		Ortalama				38967,11 ±416,21	208,14±2,27	9,86±0,36
	1500 dev/dk,	1	35,87	3,15	94,09	40466,93	215,04	10,04
	900 mm/dk,	2	35,84	3,13	93,39	39065,71	209,13	9,43
	destekli	3	35,84	3,13	93,39	39560,52	211,78	9,83
		Ortalama				39697,72 ±710,61	211,98±2,96	9,77±0,30
	4500 dev/dk,	1	35,85	3,10	92,53	41954,64	226,69	10,12
	300 mm/dk,	2	35,87	3,10	92,59	42319,76	228,51	10,52
	desteksiz	3	35,87	3,16	94,38	43311,16	229,42	9,30
		Ortalama				42528,52 ±701,94	228,21±1,39	9,98±0,62
Rulo sarım	1500 dev/dk,	1	35,75	3,00	89,25	36065,40	202,04	4,65
	900 mm/dk,	2	35,96	3,20	95,87	29801,50	155,42	4,05
	desteksiz	3	35,87	3,17	94,68	35192,25	185,83	4,92
		Ortalama				33686,38 ±3392,61	181,10±23,66	4,54±0,44
	1500 dev/dk,	1	36,06	3,03	91,08	34074,63	187,05	4,88
	900 mm/dk,	2	35,95	3,22	96,43	35048,12	181,71	5,25
	destekli	3	35,88	3,29	98,30	33287,96	169,30	4,89
		Ortalama				34136,90 ±881,73	179,35±9,10	5,01±0,21
	4500 dev/dk,	1	35,85	3,27	97,60	33843,98	173,36	4,88
	300 mm/dk,	2	35,85	3,05	91,04	32860,21	180,46	4,36
	desteksiz	3	36,07	3,26	98,02	34767,41	177,33	5,77
		Ortalama				33823,87 ±953,75	177,05±3,55	5,00±0,71

Ortalamaya göre değerlendirildiğinde rulo sarım boruda ise ilginç bir şekilde en yüksek dayanım delik delme sırasında en fazla kuvvetin ve hasarın olduğu 1500 dev/dk ve 900 mm/dk kesme parametreleri ile desteksiz koşulda delinen numunede elde edilmiştir. En düşük dayanım ise delik delme sırasında en az kuvvetin ve hasarın olduğu 4500 dev/dk ve 300 mm/dk kesme parametreleri ile desteksiz koşulda delinen numunede elde edilmiştir. Bu sonuçlar temelde üretim yöntemindeki farklılık ile ilişkilendirilebilir. Filaman sarımda elyaf boru boyunca sarılıp sarım bittikten sonra diğer tabakaya geçilmektedir. Bu sebeple filaman sarım borunun kesitinde geometrik bir düzensizlik olmaz. Sadece belirli aralıklarda elyaf demetlerinin kesişim bölgeleri oluşur. Dolayısıyla halka numuneler kesişim bölgesine denk gelmedikçe kesit boyunca düzensizlik gözlemlenmez. Ayrıca sarım işlemi bitince en üst tabakada reçine kalıntısı olabilir o da zaten bu çalışmada materyal ve yöntem kısmında belirtildiği üzere taşlama prosesi ile düzeltilmiştir. Rulo sarımda ise prepreg mandrele ilk sarılırken sarım başlangıç noktasında ve sarım bittiğinde sarım bitiş noktasında geometrik düzensizlikler oluşur. Bu

düzensizlikler literatürde daha önce yapılmış çalışmalarda üst üste bindirme bölgeleri (overlapping zone) olarak adlandırılmış ve bu bölgelerin kritik olduğu ve gerilme yığılması oluşturduğu bildirilmiştir (Chen vd. 2011). Bu bölgeler rulo sarımda boru kesiti boyunca devam ettiği için halka numunelerde de düzensizlikler gözlemlenir. Şekil 4.24'te filaman sarım ve rulo sarım borunun kesitinin şematik görünümü verilmiştir. Bununla birlikte daha önce de belirtildiği gibi, reçinece zengin bölgeler ile hava boşlukları gibi düzensizlikler de oluşmaktadır. Bu sebeple rulo sarım yöntemiyle üretilen boruda oluşan üretim kaynaklı düzensizliklerin (hava boşlukları, başlangıç ve bitiş noktaları gibi.) delik delme ile oluşan hasarların önüne geçerek malzeme mekanik dayanımı üzerinde daha baskın olduğu düşünülmektedir.

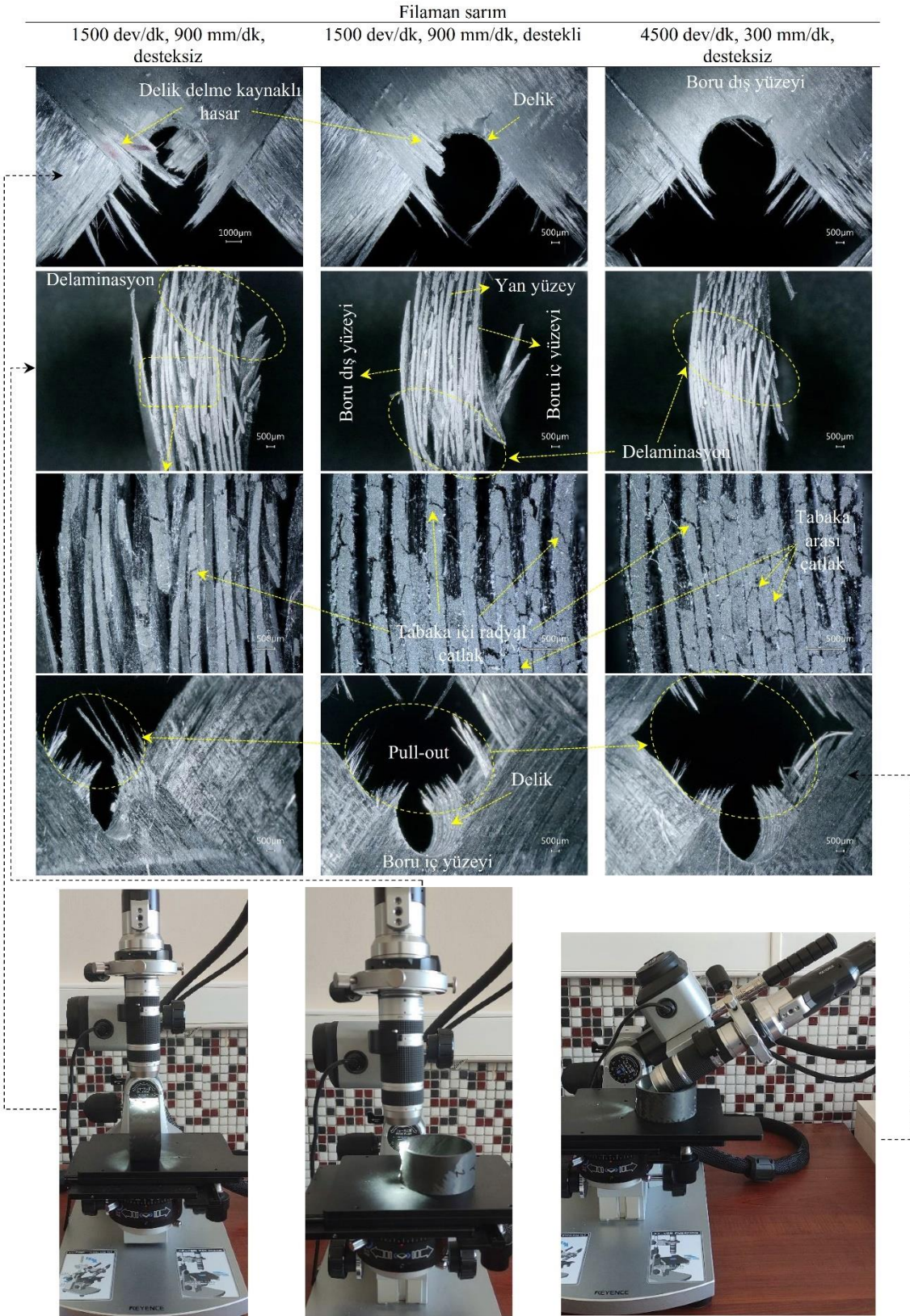


Şekil 4.24 Filaman sarım ve rulo sarım boru kesitinin şematik görünümü.

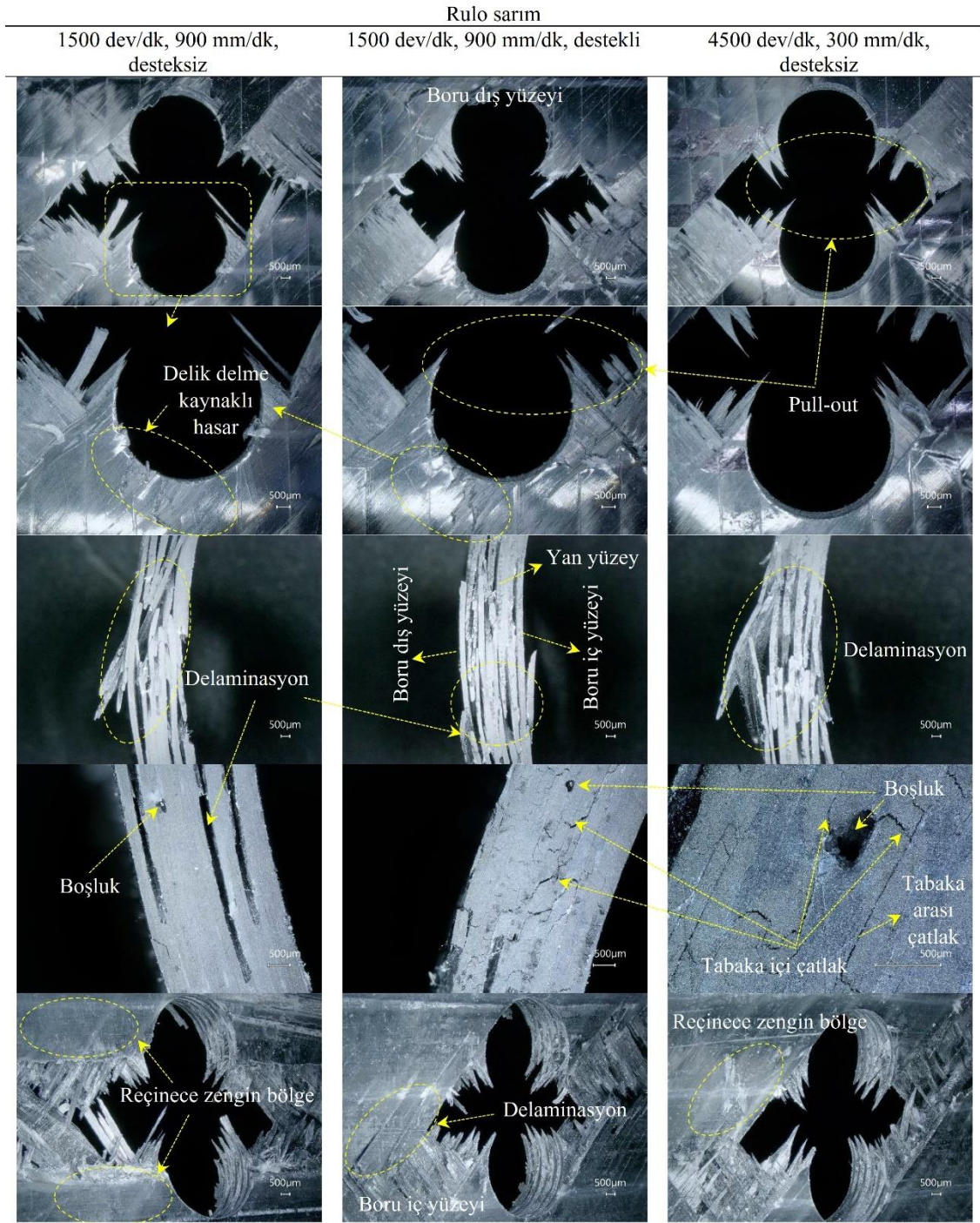
Farklı delme koşulları için deliğin bulunduğu kısım farklı açılarda Keyence VHX-900F dijital mikroskop ile incelenmiştir. Bu kapsamda delik girişi (boru dış yüzeyi), yan yüzey ve delik çıkışı (boru iç yüzeyi) incelenmiştir. Filaman sarım için hasar analizi Şekil

4.25'te, rulo sarım için hasar analizi Şekil 4.26'da verilmiştir. Filaman sarım için delik girişi görüntüleri incelendiğinde 1500 dev/dk, 900 mm/dk kesme parametreleri ile delinmiş numunelerde delme kaynaklı hasarlar göze çarpmaktadır. Yan yüzeylerde ise bu numunelerde daha yoğun ve daha geniş alana yayılmış delaminasyon hasarlarının olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca bu bölgeye odaklanıldığında 1500 dev/dk ve 900 mm/dk kesme parametreleri ile desteksiz koşulda delinmiş numunede yoğun delaminasyon gözlemlenirken, 4500 dev/dk ve 300 mm/dk kesme parametreleri ile desteksiz koşulda delinen numunede delaminasyona zemin hazırlayan tabaka içi ve tabakalar arası çatlakların ve delaminasyonların olduğu görülmüştür ancak diğer koşullarda delinen numunelerden daha azdır. Öte yandan destek kullanımıyla da nispeten delaminasyon yoğunluğunda azalma olduğu söylenebilir. Delik çıkışı yani boru iç yüzeyi incelendiğinde ise özellikle delik kenarlarında ve delik hizasında malzemenin ayrıldığı bölgelerde elyaf çekme (pull-out) hasarının olduğu gözlemlenmiştir.

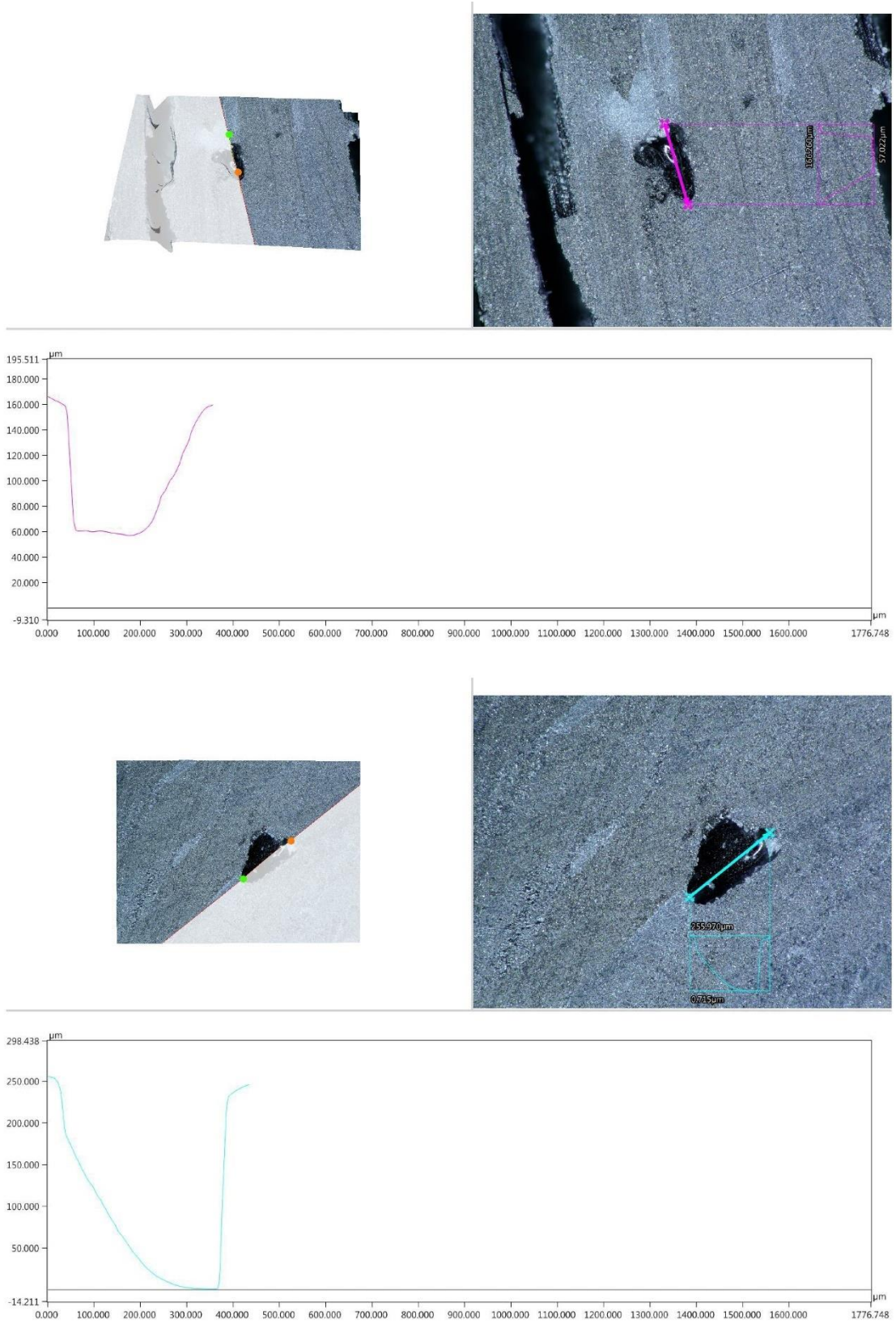
Rulo sarım boru incelendiğinde ise her üç koşulda da benzer hasarların olduğu görülmüştür. Delik kenarlarında elyaf çekme hasarlarıyla malzemenin birbirinden ayrıldığı, yan yüzeylerde ise delaminasyon ve tabaka içi ile tabakalar arası çatlakların olduğu görülmüştür. Öte yandan üretim kaynaklı boşluklar dikkati çekmektedir. Boşluklara odaklanıldığında ise, bu kusurların tabaka içi çatlak oluşumu ve ilerlemesinde rol aldığı görülmüştür. Boşluklar boru kesit boyunca gözlemlenmiş olup bazı boşlukların boyutu Şekil 4.27'de verilmiştir. Boşluklar farklı geometrilerde ve boyutlarda olmakla beraber şekilde verilen boşluklar yaklaşık 400 µm uzunluğunda ve 100 ila 250 µm derinliğindedirler. Filaman sarım ve rulo sarım malzemelerdeki hasar davranışı birbiri ile kıyaslandığında, filaman sarımda hasarın birçok tabakaya yayılarak homojen bir dağılım gösterdiği, rulo sarımda ise daha sınırlı bölgede hasar olduğu ve hasarın nispeten homojen dağılmadığı söylenebilir. Rulo sarım borunun kesitindeki geometrik düzensizlikler ile üretim kaynaklı boşlukların hasar davranışını değiştirdiği, bu sebeple hasar oluşumu üzerinde, delik delme kaynaklı hasarlardan ziyade bu kusurların rol oynadığı düşünülmektedir. Bu malzemede ayrıca reçine zengini bölgelerin delme kaynaklı hasarları azaltması ve mekanik yükleme altında hasarın yayılmasını önlemesi de bu durumun oluşmasının diğer sebebi olduğu söylenebilir.



Şekil 4.25 Halka çekme testi sonrası filaman sarım numuneler için mikroskobik hasar analizi.



Şekil 4.26 Halka çekme testi sonrası rulo sarım numuneler için mikroskobik hasar analizi.



Şekil 4.27 Rulo sarım boru kesitinde gözlemlenen bazı boşlukların boyutu.

4.3.2 Yorulma Dayanımı Analizi

Çekme testleri ile aynı delik delme koşullarında ve aynı ölçülerde numuneler hazırlanmış ve beş farklı yük oranında halka çekme (disk ayırma) yöntemi ile çevresel yöndeki çekme-çekme dinamik yükü altındaki yorulma dayanımı incelenmiştir. %90-%55 gerilme seviyesi uygulanan testlerde deneyler, numuneler kopana kadar devam ettirilmiştir. %50 gerilme seviyesinde ise bazı numuneler için 1 milyon çevrime ulaşıncaya testler durdurulmuştur. Filaman ve rulo sarım kompozitlerin quasi statik çekme yükü altındaki mekanik davranışları birbirlerinden oldukça farklı olduğu için dinamik yük altında da davranışların farklı olması kaçınılmaz bir durumdur. Bu sebeple uygulanan maksimum yük oranları her iki malzemenin çekme dayanımının %90'ına karşılık gelen yükten başlanarak testlere başlanmış ve elde edilen sonuçlara göre uygulanan yük düşürülerek S-N grafikleri elde edilmiştir. Burada çekme dayanımı her iki malzeme için de 1500 dev/dk ve 900 mm/dk kesme parametreleri ile desteksiz koşulda delinen numunelerden elde edilen çekme dayanımlarının ortalamasına göre alınmıştır. Malzemeler birbirinden farklı davranış sergilediği için uygulanan yük seviyeleri de değiştirilmiştir. Her iki malzemeye de maksimum %90 yük seviyesinde dinamik yük uygulanmış ve çevrim sayılarının çok düşük olması sebebiyle yük seviyesi %70'e düşürülmüştür. Sonrasında rulo sarımın filaman sarımdan daha yüksek çevrimlerde kopması sebebiyle her iki malzemeye farklı yük seviyelerinin uygulanmasına karar verilmiştir. Bu sebeple filaman sarım için çekme dayanımının % 90, 70, 60, 55 ve 50'sine karşılık gelen yük seviyelerinde, rulo sarım için ise çekme dayanımının %90, 70, 65, 60 ve 50'sine karşılık gelen yük seviyelerinde testler gerçekleştirilmiştir. Hem filaman sarım hem de rulo sarım için %50 maksimum yük seviyesine kadar yapılan tüm testler üçer tekrarlı yapılmıştır. %50 yük oranında filaman sarım için yapılan testlerde, ilk tekrarda 1 milyon çevrime ulaşılamamış ancak ikinci tekrarda tüm koşulda delinmiş numuneler 1 milyon çevrime ulaştığı için 3. tekrar yapılmamıştır. Rulo sarım için %50 yük oranında yapılan testlerde ise ilk tekrarlar da tüm numuneler 1 milyon çevrime ulaşmıştır ancak 4500 dev/dk ve 300 mm/dk kesme parametreleri ile desteksiz koşulda delinen numunede, diğer koşulda delinen numunelere kıyasla ciddi hasar oluşmuştur. Bu sebeple bu test tekrarlanmış ancak tekrar testinde de numune 1 milyon çevrime ulaşmadan kopma gerçekleşmiştir. Filaman sarım ve rulo sarım kompozit borular için yorulma testleri sonrası hasara uğramış

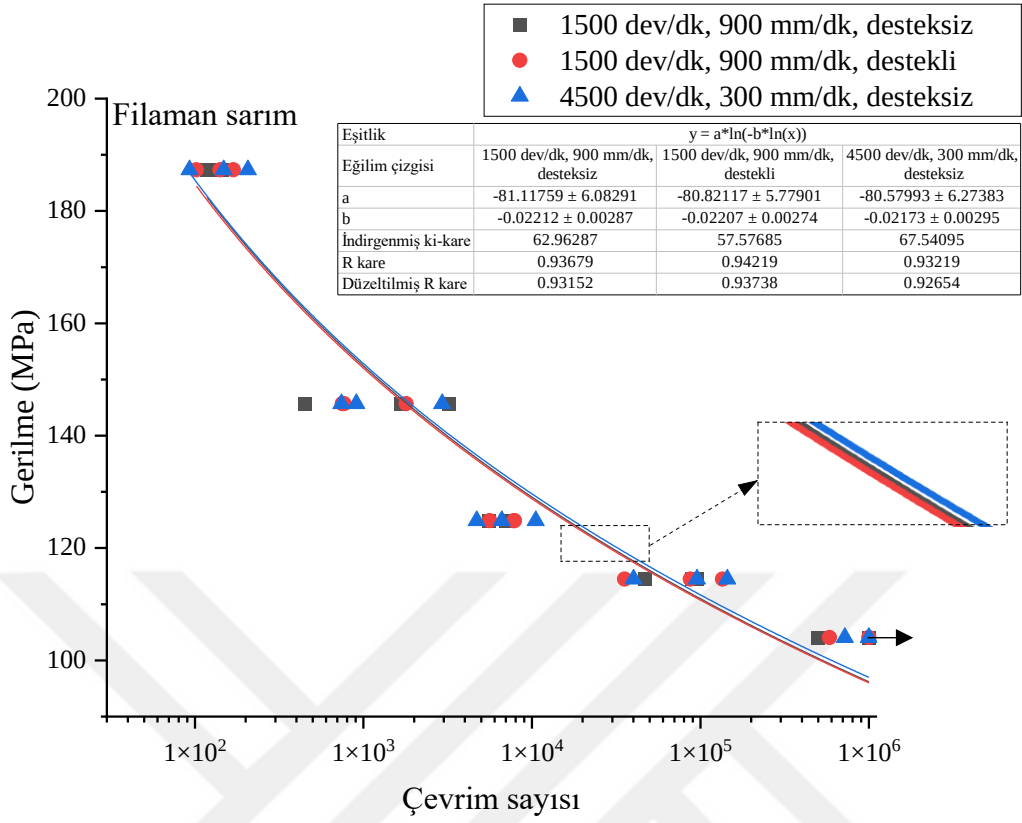
numuneler sırasıyla Şekil 4.28 ve Şekil 4.29’da verilmiştir. Testlerden elde edilen veriler ile oluşturulan S-N eğrisi filaman sarım için Şekil 4.30’da ve rulo sarım için Şekil 4.31’de verilmiştir.



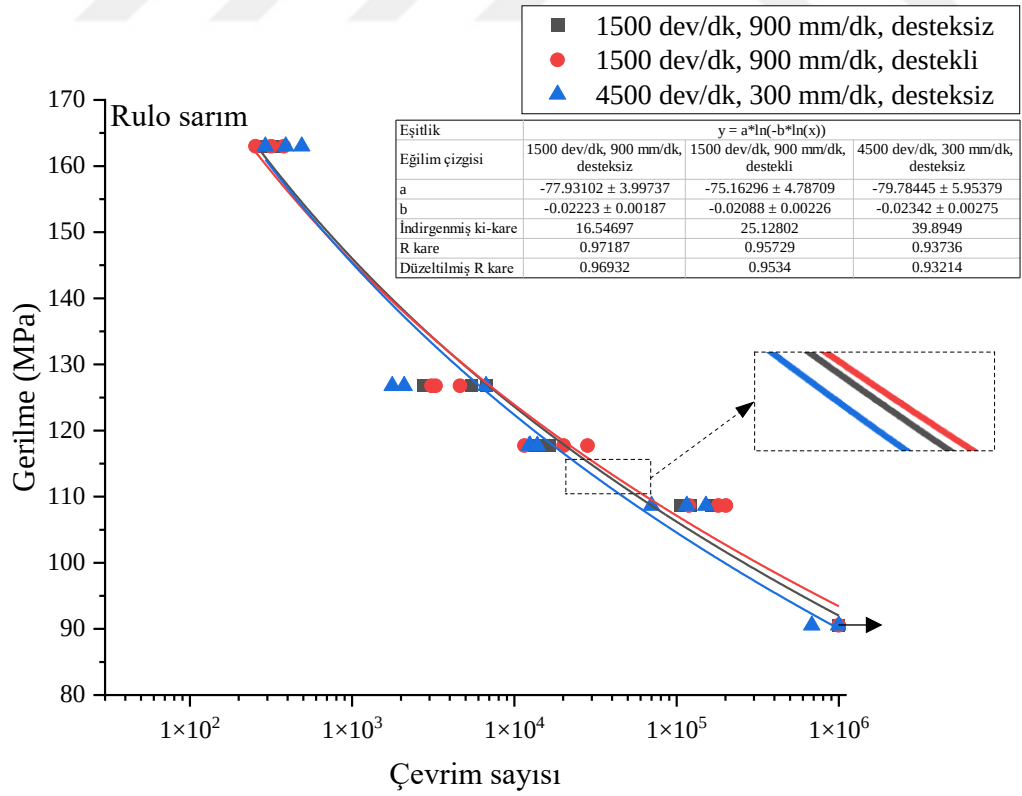
Şekil 4.28 Yorulma testleri sonrası hasara uğramış filaman sarım numuneler.



Şekil 4.29 Yorulma testleri sonrası hasara uğramış rulo sarım numuneler.



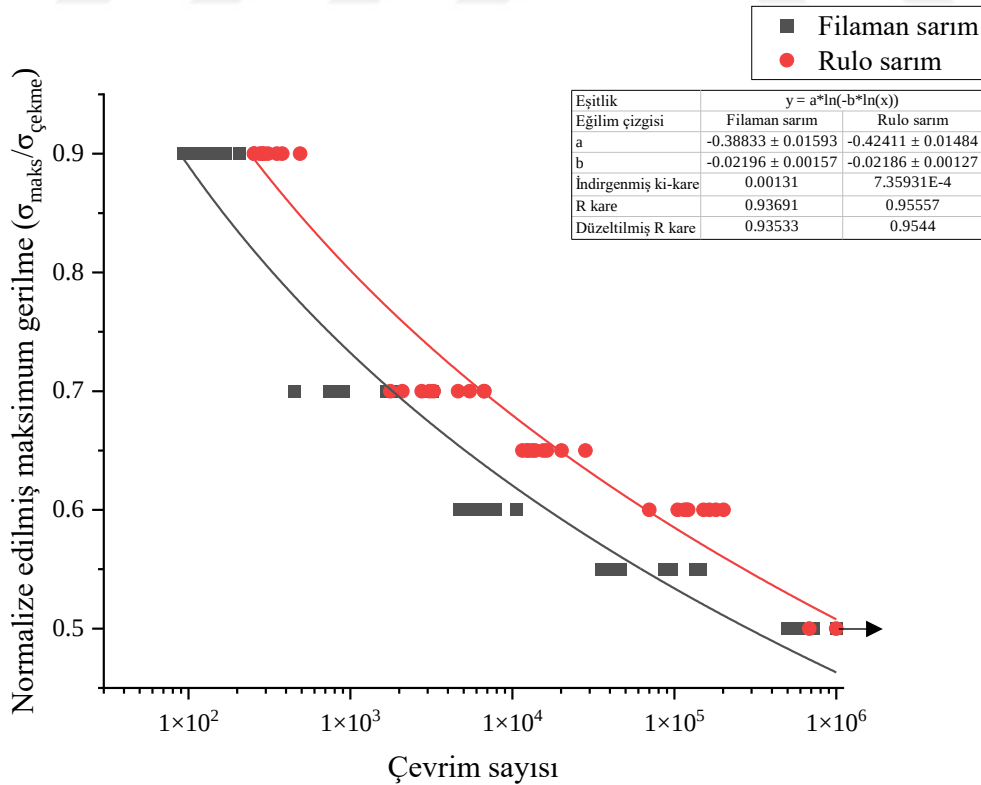
Şekil 4.30 Farklı koşullarda delinmiş filaman sarım kompozit boru için S-N eğrileri.



Şekil 4.31 Farklı koşullarda delinmiş rulo sarım kompozit boru için S-N eğrileri.

Literatürde S-N eğrileri oluşturulurken herhangi bir tipteki eğilim çizgisinin kullanılabileceği belirtilmiştir (Vassilopoulos ve Keller 2011). Farklı tipteki eğilim çizgileri denenerek, en yüksek R kare değerinin elde edildiği eşitlik ile S-N eğrileri oluşturulmuştur. S-N eğrilerine göre sonuçlar değerlendirildiğinde filaman sarım için çok fazla farklılık olmasa da 4500 dev/dk ve 300 mm/dk kesme parametreleri ile desteksiz koşulda delinen numunede, diğerlerine kıyasla daha yüksek yorulma ömrü elde edilmiştir. Öte yandan 1500 dev/dk ve 900 mm/dk kesme parametreleri ile desteksiz ve destekli koşulda delinen numunelerin S-N eğrilerinin birbirlerine oldukça benzer olduğu görülmektedir. Bu sonuçlar, çekme sonuçlarından elde edilen gerilme-gerinim grafikleriyle benzerlik göstermiştir. Rulo sarım için ise delik delme koşulları ile yorulma dayanımı arasında çekme sonuçlarında olduğu gibi yine anlamlı bir ilişki saptanmamıştır. Daha önce de belirtildiği gibi bu malzemede üretim kaynaklı kusurların delme kaynaklı kusurlardan daha baskın olduğu için delik delme koşullarındaki farklılık çekme dayanımını etkilemediği gibi yorulma ömrü üzerinde de etkisiz olmuştur. Şekil 4.32’de ise malzemelerin yorulma dayanımlarını kıyaslamak üzere elde edilen tüm veriler ile oluşturulan S-N eğrisi verilmiştir. Ayrıca tüm testlerden elde edilen veriler Çizelge 4.5’te verilmiştir. Aynı gerilme altında filaman sarım daha iyi yorulma ömrüne sahip olsa da normalize edilmiş maksimum gerilmeye göre değerlendirme yapıldığında yani her iki malzemeye uygulanan maksimum gerilmenin çekme dayanımına oranı baz alındığında, rulo sarımın öne çıktığı görülmektedir. Dolayısıyla rulo sarım kompozit borunun daha iyi bir yorulma davranışı sergilediği ve yorulmaya karşı daha iyi bir direnç gösterdiği söylenebilir. Malzemeler arasındaki bu farklılığın nedeni Şekil 4.22 ve 4.23’te görüldüğü üzere rulo sarımda filaman sarıma kıyasla yük altındaki deplasman miktarının az olması dolayısıyla dinamik yük altında matris ve elyaf arasında daha az hasar oluşmasıyla açıklanabilir. Çizelge 4.5’te görüldüğü üzere, aynı yük oranında yapılan tekrar testlerinde elde edilen çevrim sayıları birbirinden oldukça farklıdır. Özellikle filaman sarımda 4 kata varan farklılıkların olduğu gözlemlenmiştir. Rulo sarımda nispeten bu farklılık daha azdır. Literatür incelendiğinde, kompozit plaka ve borular üzerine yapılan birçok çalışmada da benzer, hatta bazı çalışmalarda daha yüksek farklılıkların olduğu görülmüştür (Kaynak ve Mat 2001, Khashaba vd. 2007b, Nixon-Pearson vd. 2013, Haeger vd. 2019, Shabani vd. 2019). Aynı yük koşulunda önemli farklılıkların oluşması literatürde işleme kaynaklı hasarlar, imalat kaynaklı kusurlar ve malzemenin kendi

yapısından kaynaklı doğal değişkenlik ile ilişkilendirilmişse de (Nixon-Pearson vd. 2013) böyle bir durumun oluşmasındaki bir diğer önemli faktörün sıcaklık artışı olduğu düşünülmektedir. Literatürde dinamik yükleme sırasında oluşan sıcaklığın camsı geçiş sıcaklığı altında olması durumunda malzeme üzerindeki etkisinin zayıf olduğu belirtilse de (Nixon-Pearson vd. 2013) camsı geçiş sıcaklığının altındaki sıcaklıklarda da malzeme davranışının değiştiği yorulma testleri sırasında gözlemlenmiş olup, bu gözlemi kanıtlamak amacıyla her iki malzemeden küçük numuneler alınıp sıcaklığa bağlı bozulma davranışını, camsı geçiş sıcaklığını (T_g) ve sıcaklığa bağlı elastik davranışını belirlemek üzere Termogravimetrik Analiz (TGA) ve Dinamik Mekanik Analiz (DMA) testleri gerçekleştirilmiştir. DMA testleri ASTM D7028-07 (ASTM 2015) standardı uyarınca çift ankastre yükleme koşulunda, 1 Hz frekansta, 54 μ m deplasman genliğinde, 3°C/dk ısıtma hızında gerçekleştirilmiştir. Numuneler kompozit boruların üzerinden eksen boyunca ölçüleri 50 mm uzunlukta ve 5 mm genişlikte olacak şekilde kesilmiştir. TGA sonuçlarından yola çıkarak %5 bozulma sıcaklıkları arasındaki farklılıktan dolayı filaman sarım için 25-175°C arasında, rulo sarım için ise 25-250°C arasında DMA testleri gerçekleştirilmiştir. TGA ve DMA testlerinin sonuçları Şekil 4.33 ve 4.34'te verilmiştir.

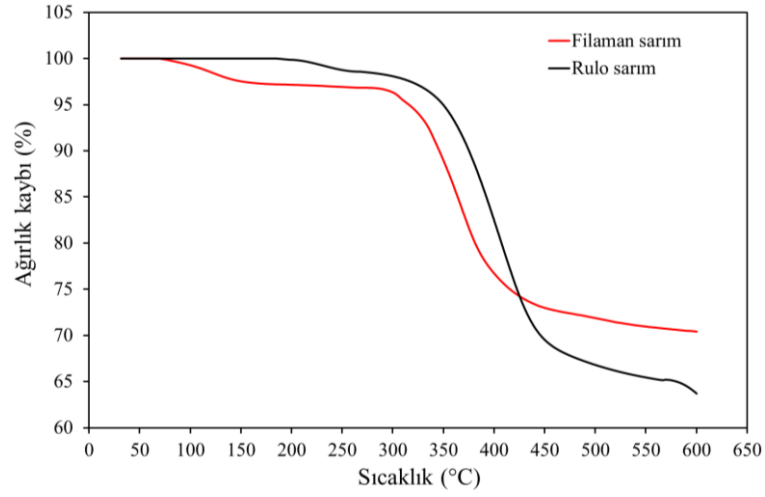


Şekil 4.32 Filaman ve rulo sarım için normalize edilmiş maksimum gerilme-çevrim sayısı grafiği.

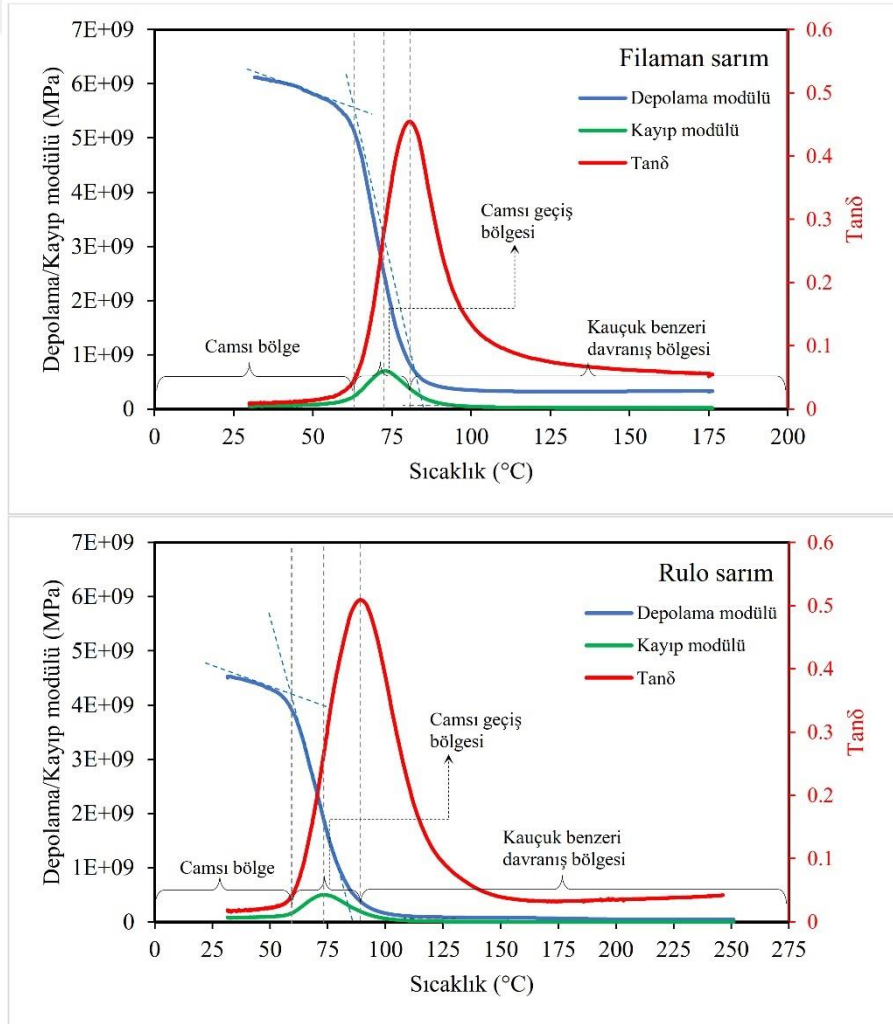
DMA test sonuçlarından görüldüğü üzere, filaman sarım için T_g yaklaşık 61,1°C olarak tespit edilirken rulo sarım için yaklaşık T_g 56,4°C olarak tespit edilmiştir. Üretim proseslerinin farklı olmasından kaynaklı olarak aynı reçinenin kullanılamaması ve ayrıca testlerin sadece kürlenmiş reçine üzerinde değil de doğrudan kompozit üzerinde uygulanması ve kompozitlerin elyaf hacim oranlarının farklı olması sebebiyle az da olsa böyle bir farklılığın oluştuğu düşünülmektedir. Öte yandan T_g ye ulaşılan kadar her iki malzemede de Depolama modülü (E') sürekli düşme eğilimindedir. T_g 'den sonra ise önemli bir düşüş olmuştur. Depolama modülündeki düşüşün çevrim sayısını da etkilediği düşünülmektedir.

Çizelge 4.5 Yorulma testi sonuçları.

		Normalize edilmiş maksimum gerilme ($\sigma_{maks}/\sigma_{çekme}$)				
		0,9	0,7	0,6	0,55	0,5
		Maksimum gerilme (MPa)				
		187,326	145,698	124,884	114,477	104,07
Filaman sarım	Delme koşulu	Numune	Çevrim sayısı			
	1500 dev/dk, 900 mm/dk, desteksiz	1	144	450	7015	94815
		2	118	3200	5590	46750
		3	137	1664	7019	89150
	1500 dev/dk, 900 mm/dk, destekli	1	102	768	7867	35467
		2	169	1794	5620	87110
		3	141	750	7854	135327
	4500 dev/dk, 300 mm/dk, desteksiz	1	148	908	6631	40145
		2	206	741	4709	95354
		3	93	2938	10536	144523
		Normalize edilmiş maksimum gerilme ($\sigma_{maks}/\sigma_{çekme}$)				
		0,9	0,7	0,65	0,60	0,5
		Maksimum gerilme (MPa)				
		162,99	126,77	117,715	108,66	90,55
Rulo sarım	Delme koşulu	Numune	Çevrim sayısı			
	1500 dev/dk, 900 mm/dk, desteksiz	1	277	6720	16329	105000
		2	352	2756	13242	121770
		3	314	5450	15525	164536
	1500 dev/dk, 900 mm/dk, destekli	1	254	3087	28238	201205
		2	380	3266	20120	181000
		3	317	4622	11545	119320
	4500 dev/dk, 300 mm/dk, desteksiz	1	490	6694	12504	70100
		2	292	1765	13850	151345
		3	390	2092	12365	115510



Şekil 4.33 TGA testi sonuçları.



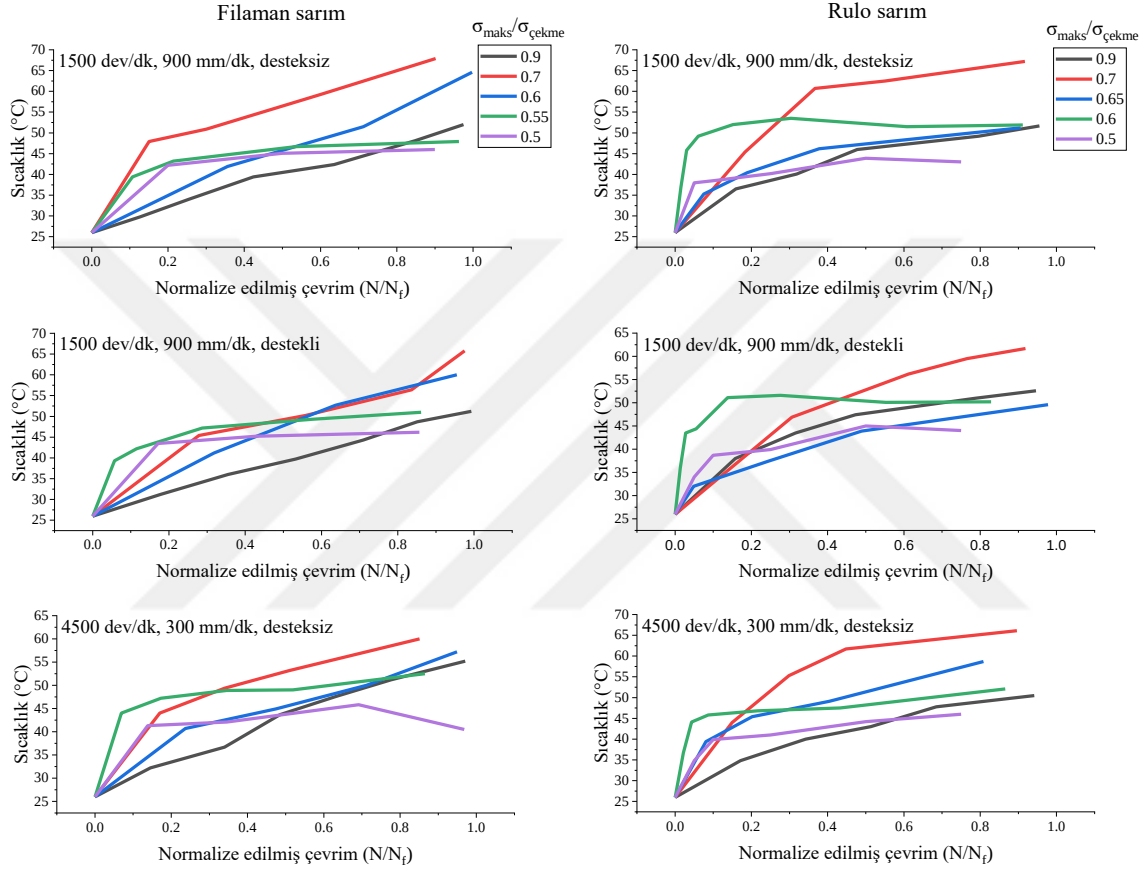
Şekil 4.34 DMA testi sonuçları.

Şekil 4.35'te farklı gerilme seviyeleri için o anki çevrimin, numunenin koptuğu çevrime oranı olarak tanımlanan normalize edilmiş çevrim sayısına bağlı numune yüzey sıcaklık dağılımları verilmiştir. Çekme dayanımının %90'ında yapılan yüklemelerde her iki malzeme için de camsı geçiş sıcaklığına ulaşmadan kopma gerçekleşmiştir. Çevrim sayıları düşük kaldığından sıcaklık çok yükselmeden numuneler kırılmıştır. %70'te ise her iki malzemede de oluşan sıcaklıklar camsı geçiş sıcaklıklarının üstüne çıkmış bu sebeple ani kırılmalar gerçekleşmiştir. %70'in altındaki yüklerde ise bazı testler hariç, camsı geçiş sıcaklığına ulaşılmadan kırılmaların gerçekleştiği söylenebilir. Yüksek gerilme oranlarında yapılan testlerde sıcaklıklar lineer artarken, düşük yükte yapılan testlerde sıcaklıklar belirli bir değere kadar hızla artmış, sonra çevrim sayısı arttıkça sıcaklık artışı yavaşlamış ya da sabit kalmış hatta bazı testlerde azalmıştır. Özellikle 100 000 gibi yüksek çevrimlere ulaşan düşük gerilme oranlarında yapılan testler sonrasında aparatın yarım disk şeklindeki parçalarının yüzeylerinde reçine kalıntılarının olduğu gözlemlenmiştir. Reçinenin yüzeye sıvanarak kompozitin çelik yarım diskler üzerinde kaymasını azalttığı testler sırasında gözlemlenmiş olup, sıcaklık artışının yavaşlamasının ya da sıcaklığın azalmaya başlamasının bu durumdan kaynaklandığı düşünülmektedir. Öte yandan literatür incelendiğinde, yorulma testleri sırasında sıcaklık oluşumundaki farklılıkların malzemenin termo-elastik davranışı, tabaka içindeki elyaf-matris ve elyaf-elyaf sürtünmelerinden kaynaklandığı belirtilmiştir (Haddad vd. 2014). Yükleme sırasında sıcaklıktaki artışlar literatürde matris çatlağı, delaminasyon, elyaf kırılması gibi birçok hasar ile ilişkilendirilmiştir. Öncelikle zayıf noktalarda matris çatlağının başladığı daha sonra debonding ve delaminasyon hasarlarının meydana geldiği ve elyaf kırılmalarıyla ani bir sıcaklık oluştuğu ve numune kırılana kadar da artmaya devam ettiği bildirilmiştir (Naderi vd. 2012, Naderi ve Khonsari 2013, Haddad vd. 2014). Özellikle yüksek gerilme seviyelerinde bu çalışmada da bazı testlerde benzer durumun oluştuğu söylenebilir. Her bir test sonrası disk yüzeyleri incelenmiş ve bir sonraki test koşullarını etkilememesi için özellikle yüksek çevrimli testler sonrasında yarım disk yüzeyleri önce 400 kum sonra 800 kum zımpara ile temizlenmiştir. Yüksek çevrimli testler sonrası disk yüzeyine yapışmış reçine kalıntıları ve temizlenmiş yüzeyin görüntüsü Şekil 4.36'da verilmiştir.

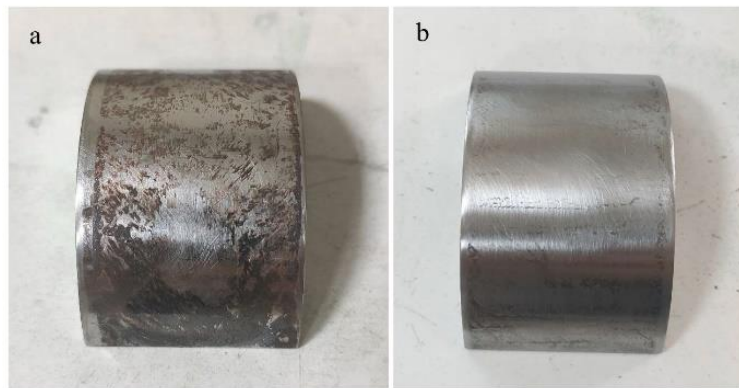
Testler sırasında belirli çevrimlerde numuneler makro olarak gözlemlenmiş ve hasar

gelişimleri izlenmiştir. Şekil 4.37-4.40’da filaman sarım için bazı testlerden elde edilen numune görüntüleri ve termal kamera görüntüleri verilmiştir. %60 maksimum gerilme seviyesinde yapılan testlerde, Şekil 4.37’de görüldüğü üzere 1500 dev/dk ve 900 mm/dk kesme parametreleri ile desteksiz ve destekli koşullarda delinen numunelerde 2500 çevrimde delikler ovalleşmiş ve delik kenarlarından elyaf oryantasyonu yönünde malzeme hasarının başladığı görülmüştür. 4500 dev/dk ve 300 mm/dk kesme parametreleri ile desteksiz koşulda delinen numunede de benzer hasarlar oluşmuş fakat diğerlerinden farklı olarak hasarların oluşması ve ilerlemesi daha yüksek çevrimlerde gerçekleşmiştir. Bu hasar sadece yüzeysel değil, delik içinde birden fazla tabakada da meydana geldiği dolayısıyla delik duvarı boyunca bu hasarın geliştiği görülmüştür. Çevrim sayısı arttıkça bu hasarın tetiklediği çatlaklar oluşmuş ve numune kenarlarına doğru ilerlemiştir. Sonrasında çatlaklar tabaka içine yayılmış ve yoğun debonding (ayrılma) hasarı meydana gelmiş ve son olarak şiddetli delaminasyonlar oluşarak orijini delik merkezinde, uzantıları elyaf oryantasyonu yönünde olacak şekilde “x” şeklinde bir kırılma gerçekleşmiştir. Hasar gelişimi termal kamera görüntüleri ile birlikte değerlendirildiğinde 4500 dev/dk ve 300 mm/dk kesme parametreleri ile desteksiz koşulda delinen numunede ilk hasar oluşumunun daha yüksek çevrimde gerçekleştiği, ancak ilk hasarın oluşumundan sonra kırılmaya kadar geçen sürecin diğer numuneler ile aynı olduğu söylenebilir. Ayrıca bu durumun sıcaklık artışı da değiştirdiği düşünülmektedir. Oluşan hasarların malzeme rijitliğini düşürdüğü dolayısıyla malzeme hasar gördükçe yorulma sırasında yük aynı olmasına rağmen deplasmanın sürekli artma eğiliminde olduğu görülmüştür. Deplasmanın artmasıyla da gerek elyaf-matris arasındaki sürtünmelerden gerekse disk ile boru iç yüzeyi arasındaki sürtünmeden kaynaklı olarak sıcaklık artışının meydana geldiği söylenebilir. Bu sebeple 4500 dev/dk ve 300 mm/dk kesme parametreleri ile desteksiz koşulda delinen numunenin daha düşük sıcaklıklarda kopmuş olması bu fenomen ile açıklanabilir. Öte yandan, yorulma testleri sırasında maksimum sıcaklıklar delik alt ve üst noktalarında disklerin boruya temas ettiği yüzeye yakın yerlerde oluşmuştur (Şekil 4.38). Şekil 4.39’da görüldüğü üzere %55 maksimum gerilme seviyesinde yapılan yüklemede özellikle 1500 dev/dk ve 900 mm/dk kesme parametreleri ile desteksiz koşulda delinen numunede çevrim sayısına bağlı olarak delik delmeden kaynaklı peel-up (soyulma) delaminasyonunun demetlere ayrılarak parçalandığı ve elyaf oryantasyonu doğrultusunda ilerlediği görülmüştür. Bu numunede

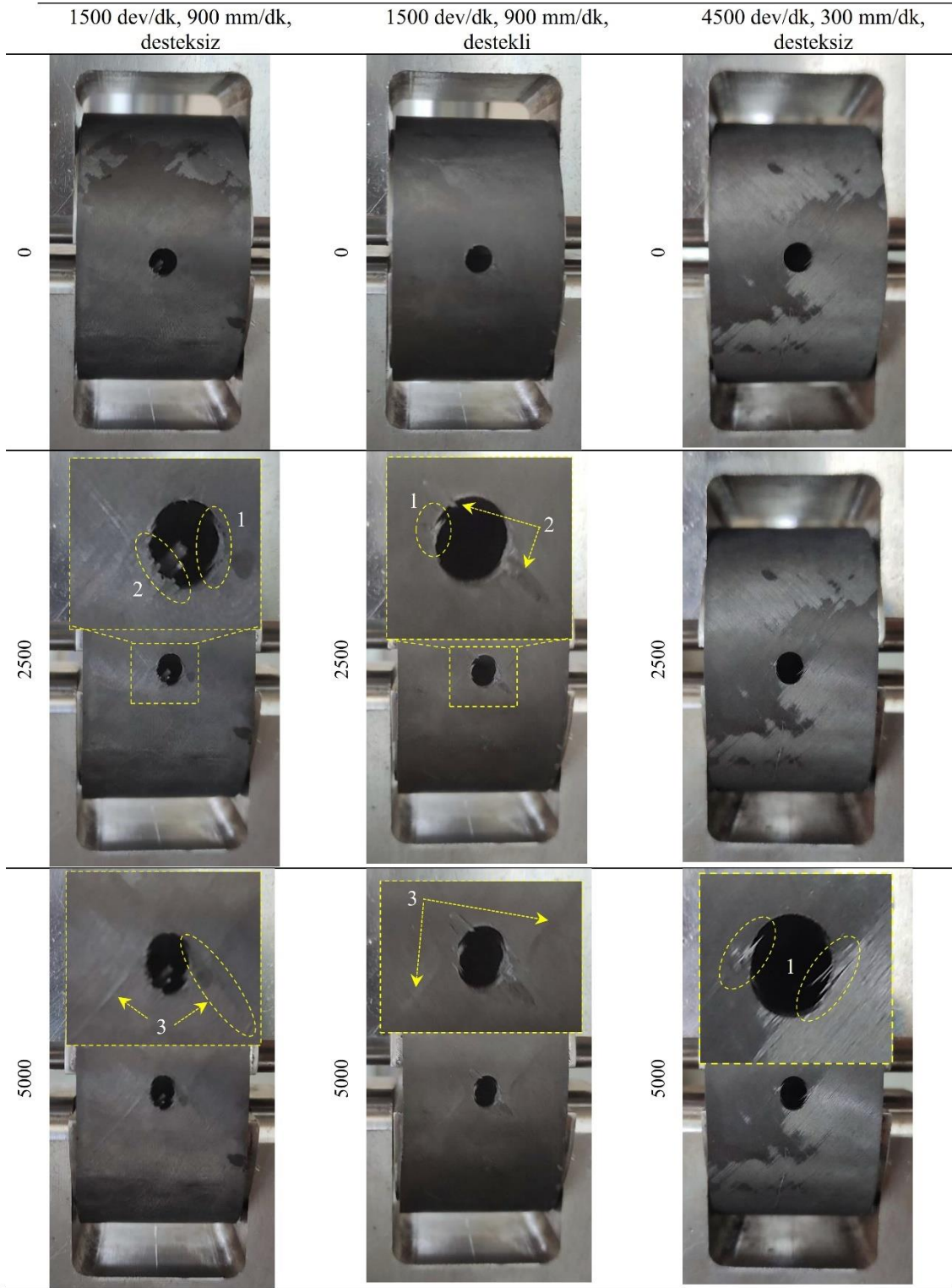
delik girişinde çok fazla hasar ve kesilmemiş elyaf bulunması sebebiyle delik içinde yorulma hasar başlangıcı tam görüntülenememiştir. Çevrim sayısı arttıkça yüzey çatlaklarının olduğu ayrıca delik delme kaynaklı hasarların ilerleyerek numune kenarına ulaştığı görülmüştür. Sonrasında ise çatlaklar tabaka içine yayılarak debonding (ayrılma) ve şiddetli bir delaminasyonla numune kopmuştur.



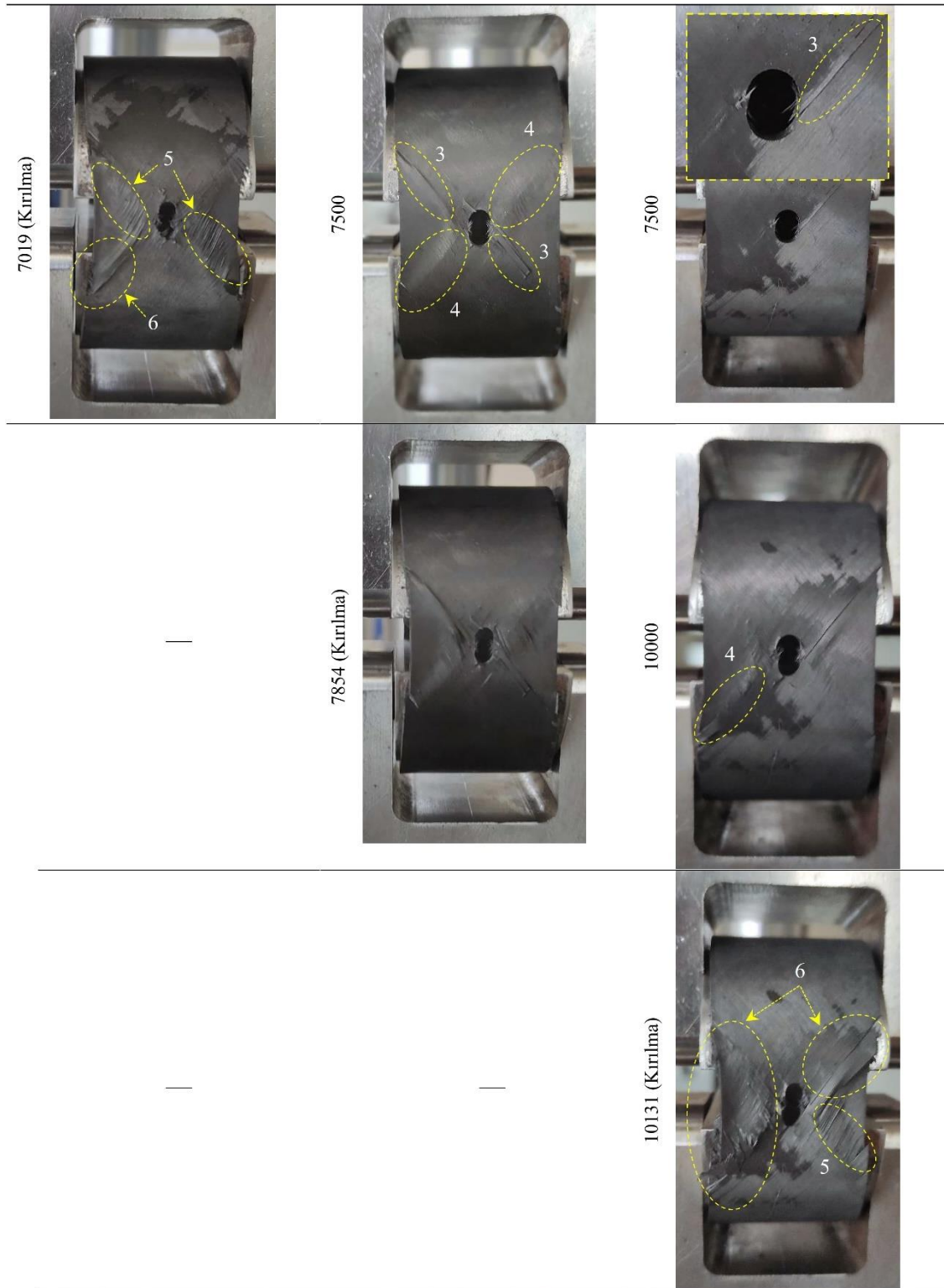
Şekil 4.35 Yorulma testleri sırasında ölçülen sıcaklıkların normalize edilmiş çevrim ile değişimi.



Şekil 4.36 Disk yüzeyi görüntüleri, (a) yüzeye yapışmış reçine kalıntısı, (b) temizlenmiş disk.

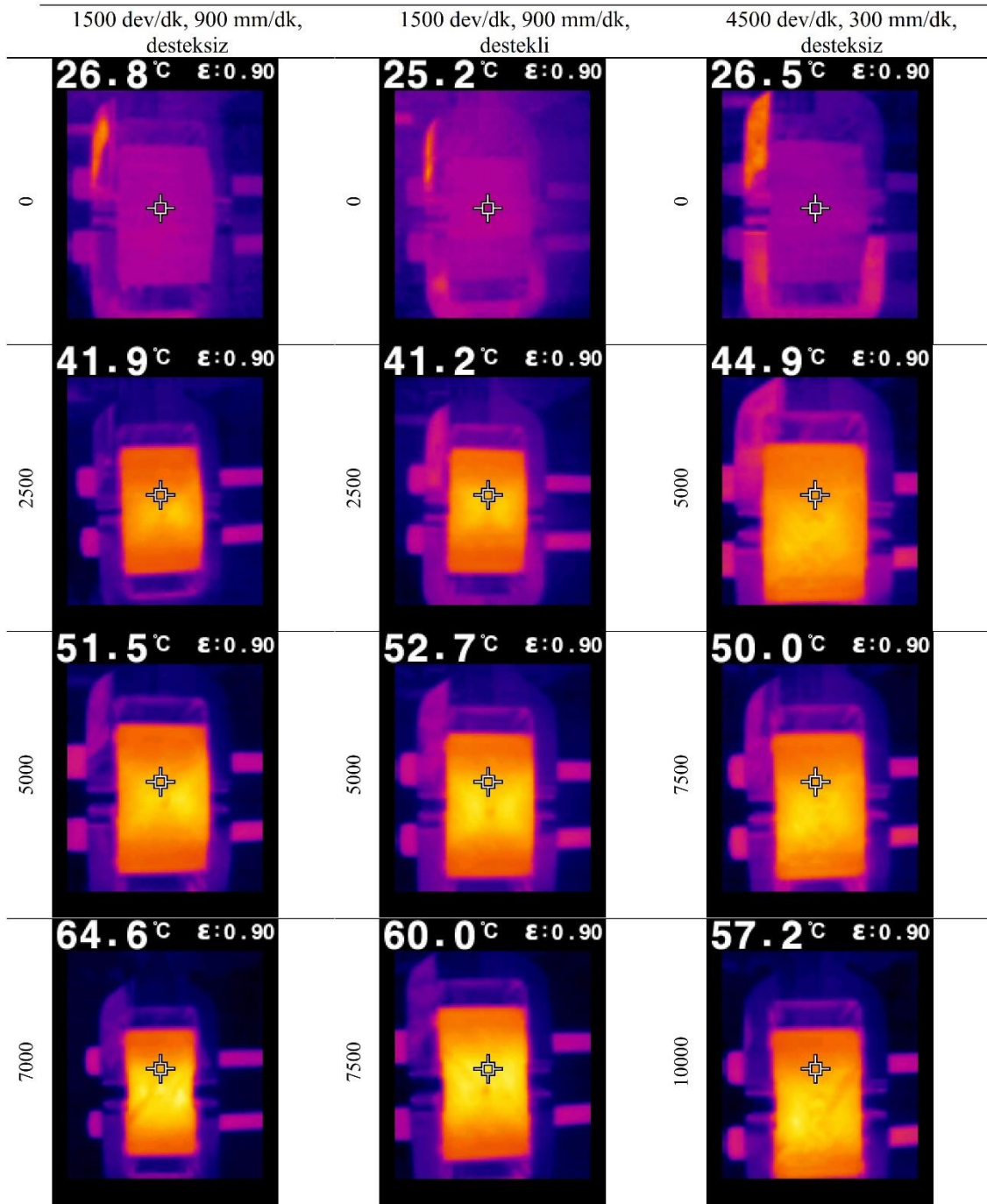


Şekil 4.37 Filaman sarım kompozit borunun %60 gerilme seviyesinde yapılan yorulma testleri sırasında numunelerin çevrim sayısına bağlı olarak makro hasar görüntüleri.

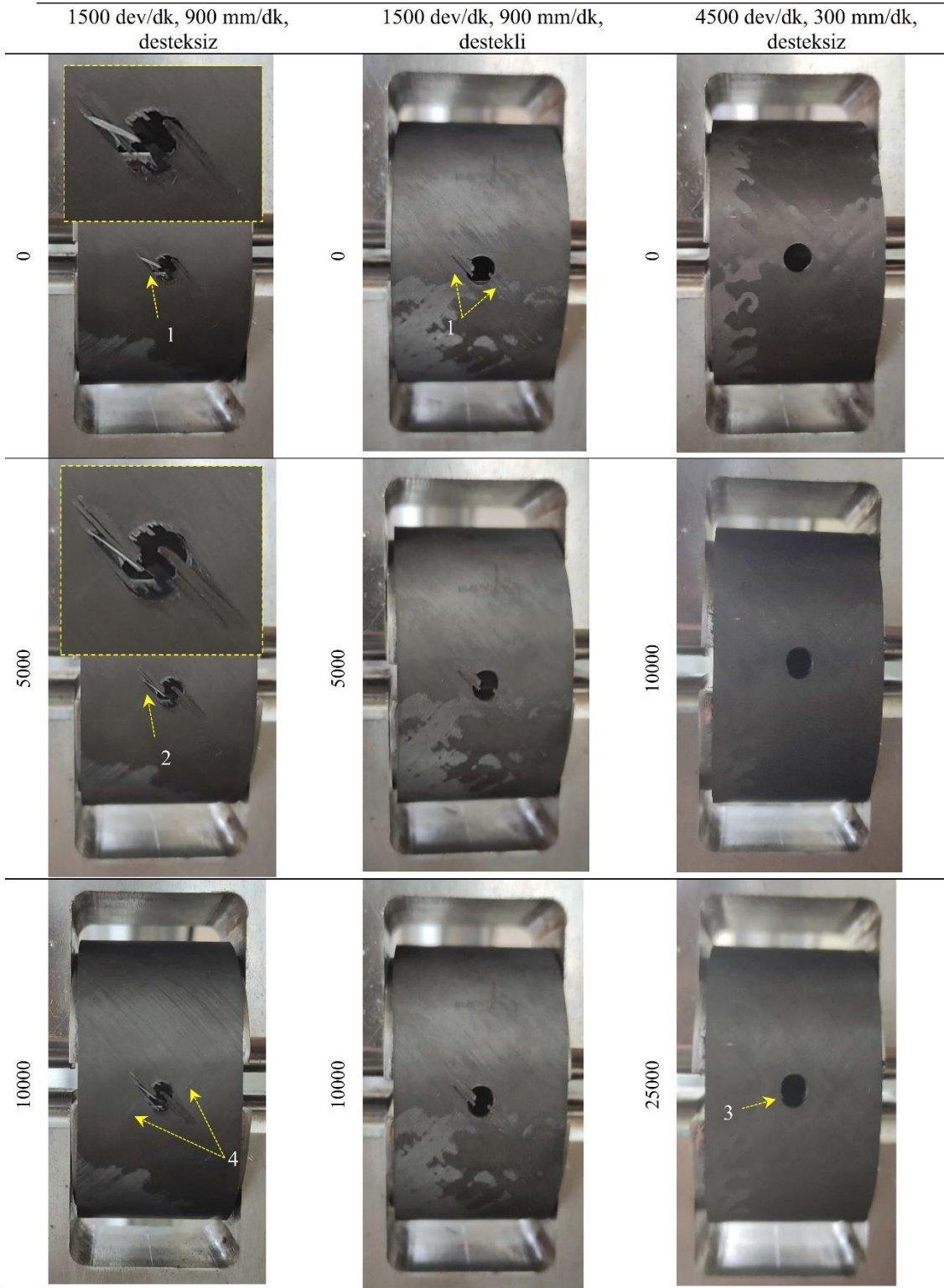


1-Delik içi yorulma hasar başlangıcı, 2-Delik delme kaynaklı hasarlar, 3-Yüzeysel çatlakların oluşması, 4-Çatlakların tabaka içinde yayılması, 5-Yoğun debonding hasarı, 6-Şiddetli Delaminasyon

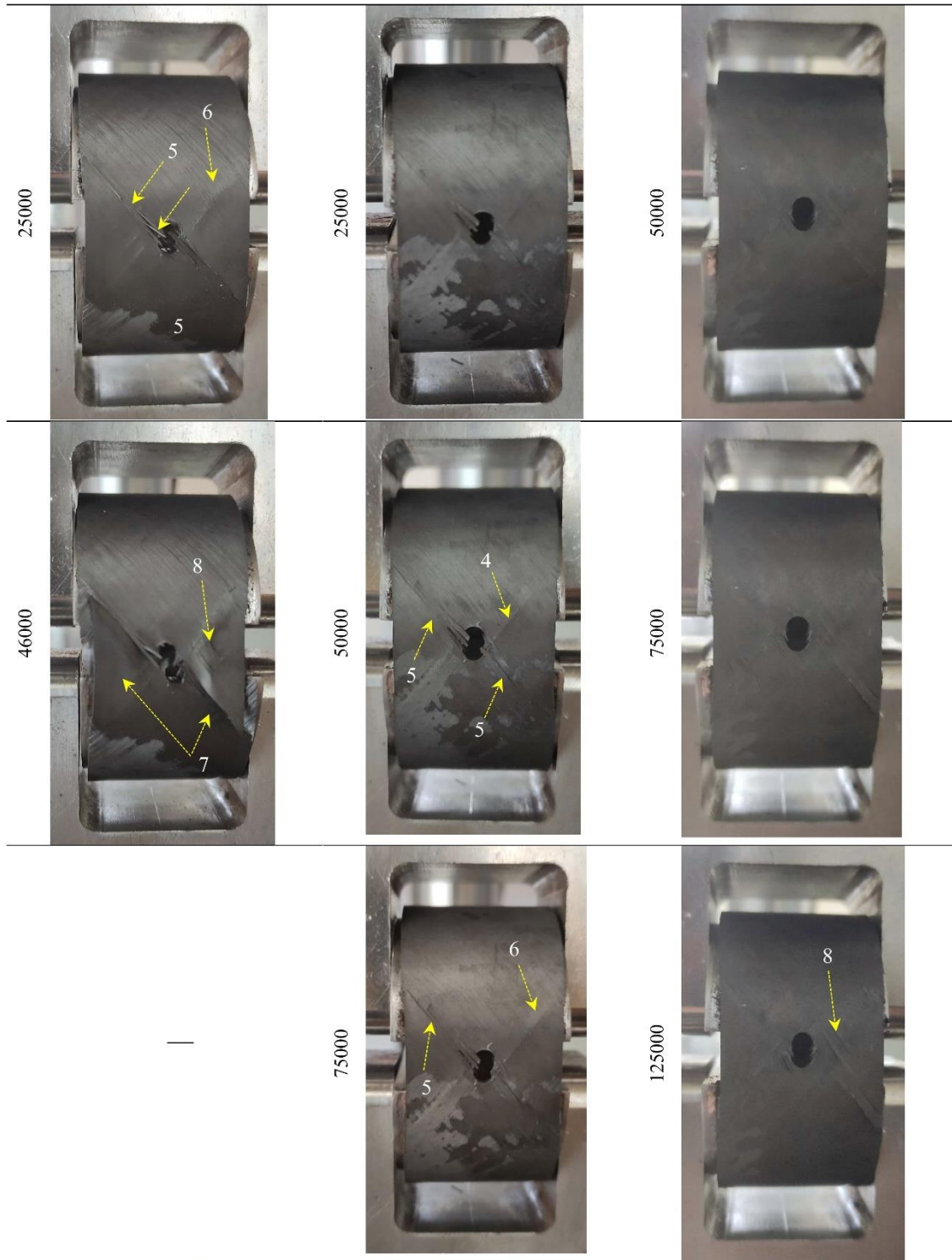
Şekil 4.37 (Devam) Filaman sarım kompozit borunun %60 gerilme seviyesinde yapılan yorulma testleri sırasında numunelerin çevrim sayısına bağlı olarak makro hasar görüntüleri.



Şekil 4.38 Filaman sarım kompozit borunun %60 gerilme seviyesinde yapılan yorulma testleri sırasında numunelerin çevrim sayısına bağlı olarak termal kamera görüntüleri.

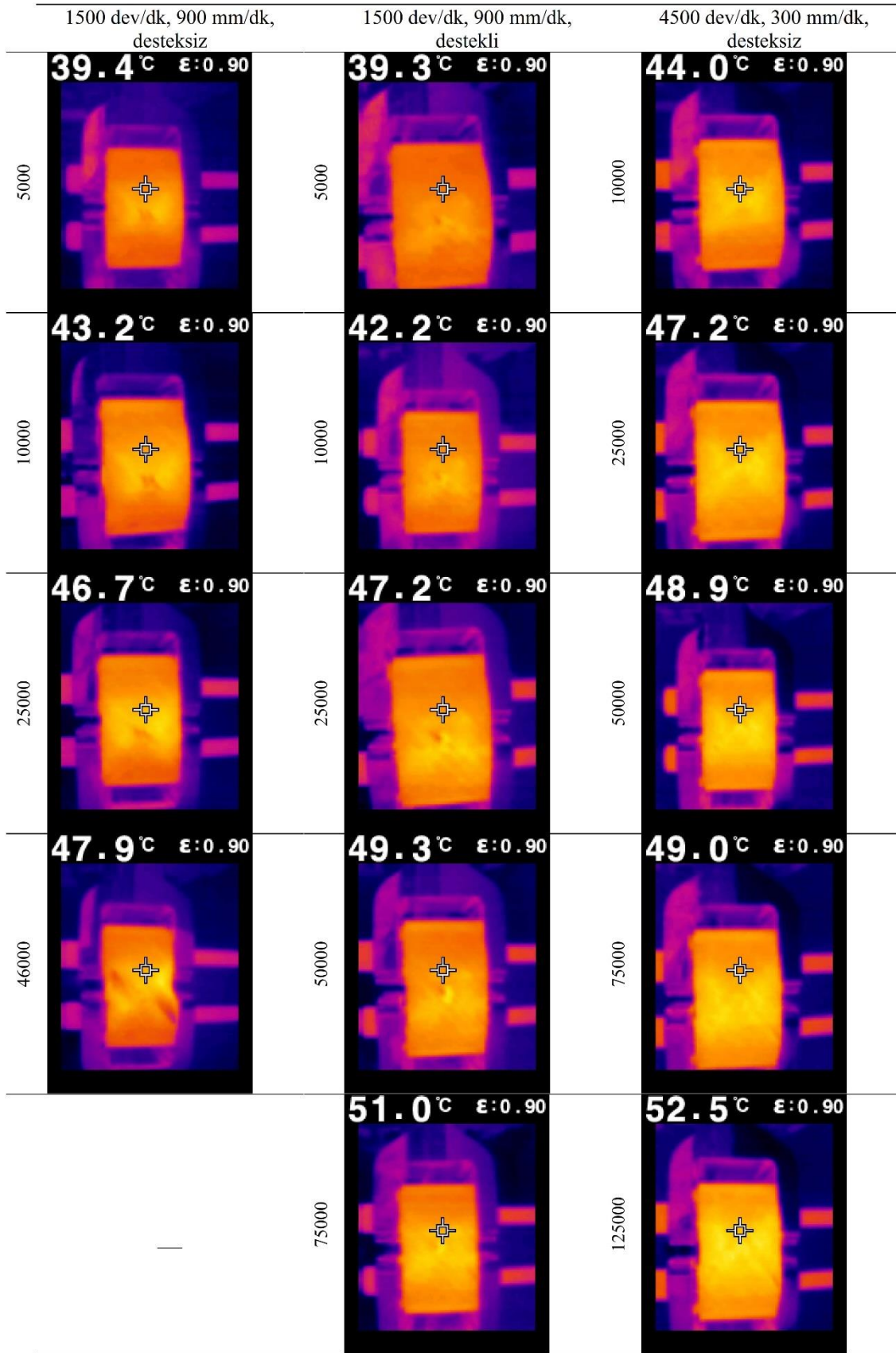


Şekil 4.39 Filaman sarım kompozit borunun %55 gerilme seviyesinde yapılan yorulma testleri sırasında numunelerin çevrim sayısına bağlı olarak makro hasar görüntüleri.



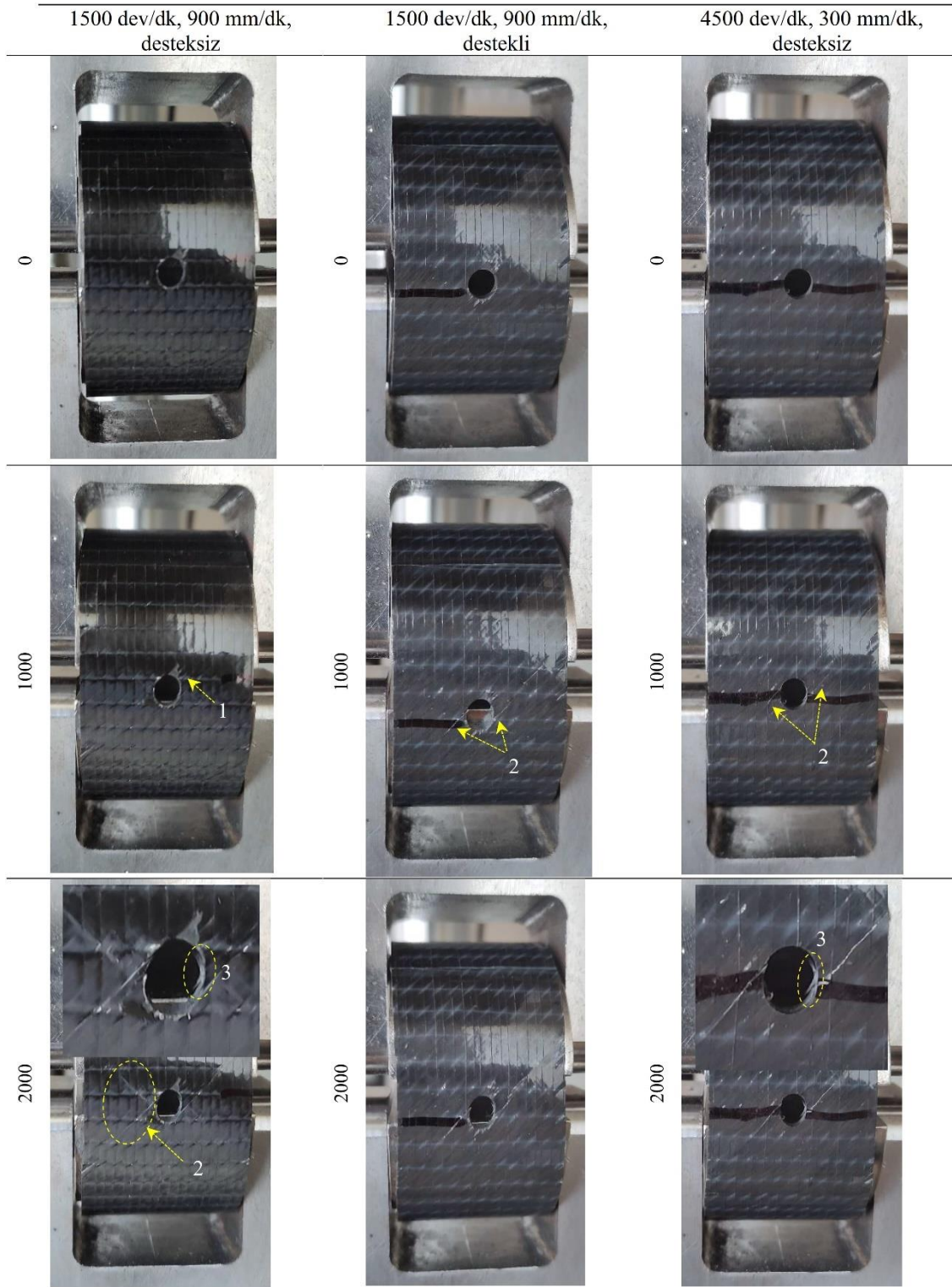
1- Delik delme kaynaklı hasarlar, 2- Delik delme kaynaklı hasarların yayılması, 3- Delik içi yorulma hasar başlangıcı, 4- Yüzeysel çatlakların oluşması, 5- Delik delme kaynaklı hasarın numune kenarlarına doğru ilerlemesi, 6- Çatlakların tabaka içinde yayılması, 7- Şiddetli Delaminasyon, 8- Debonding

Şekil 4.39 (Devam) Filaman sarım kompozit borunun %55 gerilme seviyesinde yapılan yorulma testleri sırasında numunelerin çevrim sayısına bağlı olarak makro hasar görüntüleri.

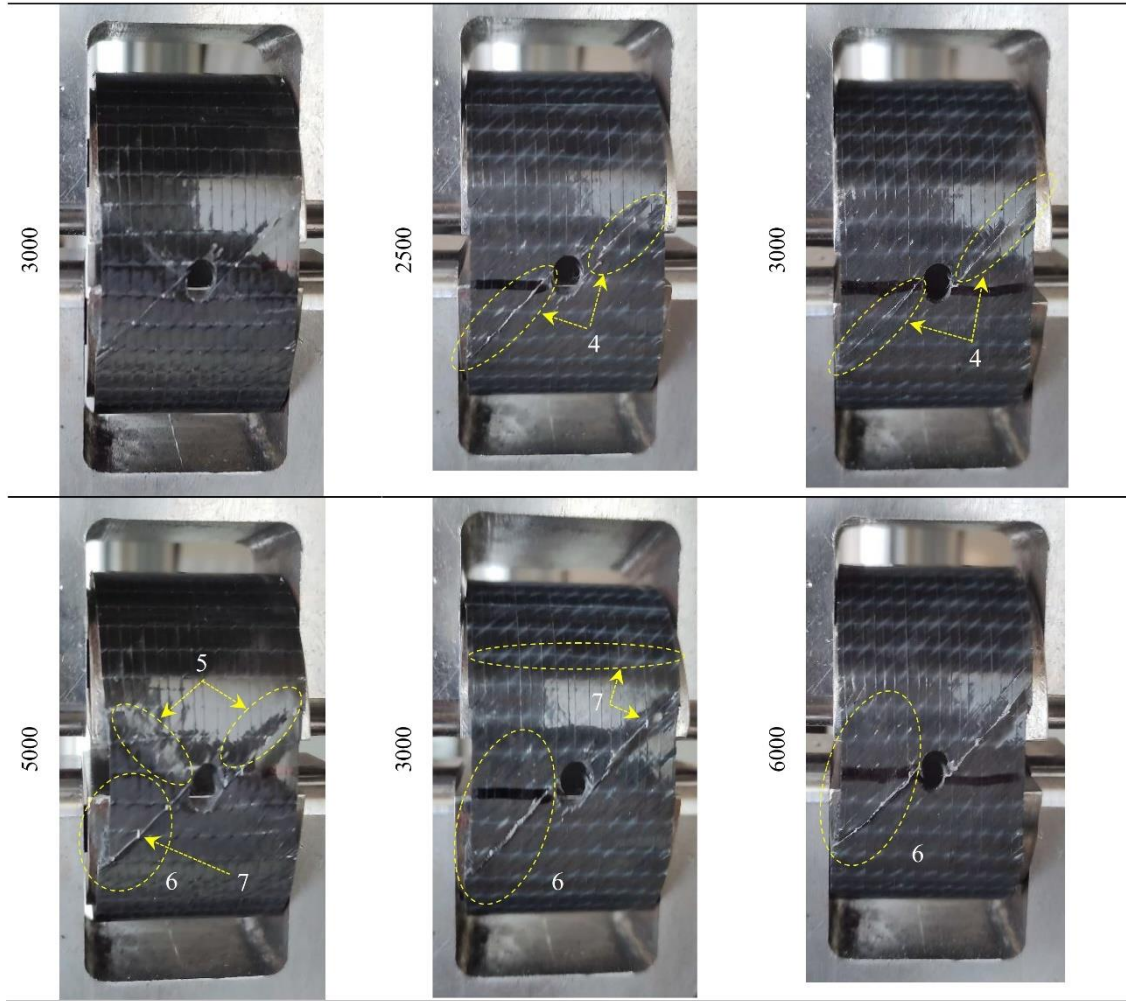


Şekil 4.40 Filaman sarım kompozit borunun %55 gerilme seviyesinde yapılan yorulma testleri sırasında numunelerin çevrim sayısına bağlı olarak termal kamera görüntüleri.

Şekil 4.41-4.45'te ise rulo sarım için bazı testlerden elde edilen numune görüntüleri ve termal kamera görüntüleri verilmiştir. Bu malzemede de filaman sarım ile benzer hasar davranışı gözlemlenmiştir. Farklı olarak deplasmanın daha az olması sebebiyle hasarların gelişimi daha yüksek çevrimlerde gerçekleşmiştir. Delik içi hasarı daha yüksek çevrimlerde gözle görülür hale gelmiştir. Öte yandan kırılma anında filaman sarımda gözlemlenen yoğun debonding hasarı bu malzemede gözlemlenmemiştir. Bu hasarın gözlemlenmemesi ve nispeten daha düşük şiddette delaminasyon görülmesi, elyafı istenen oryantasyonda bir arada tutmak için kullanılan dikiş ile ilişkilendirilebilir. Dikişlerin elyafı tutup ayrılmasını bir yere kadar engellediği düşünülmektedir. Filaman sarımda dikiş olmadığı için elyafın daha kolay ayrıldığı söylenebilir. Termal kamera görüntüleri incelendiğinde (Şekil 4.42), 2000 çevrim civarında camsı geçiş sıcaklığı aşılmasına rağmen 5000-6000 çevrimlere kadar testlerin devam etmesi şaşırtıcıdır. Filaman sarımda Şekil 4.35'te görüldüğü üzere %70 gerilme oranında camsı geçiş sıcaklığı aşıldıktan kısa bir süre sonra kopma gerçekleşmektedir. Ancak rulo sarımda aynı gerilme oranında camsı geçiş sıcaklığı aşılsa da testler devam etmektedir. Kompozit yapılarda matrisin temel görevi elyafı bir arada tutmak ve kompozit üzerine gelen yükü elyafa dağıtmaktır (Beheshtizadeh vd. 2019, Rajamuneeswaran vd. 2022). Buradan yola çıkarak rulo sarımın reçinece daha zengin oluşunun ve ayrıca dikişlerin elyafı bir arada tutmasının bu durumun oluşmasında rol oynadığı düşünülmektedir.

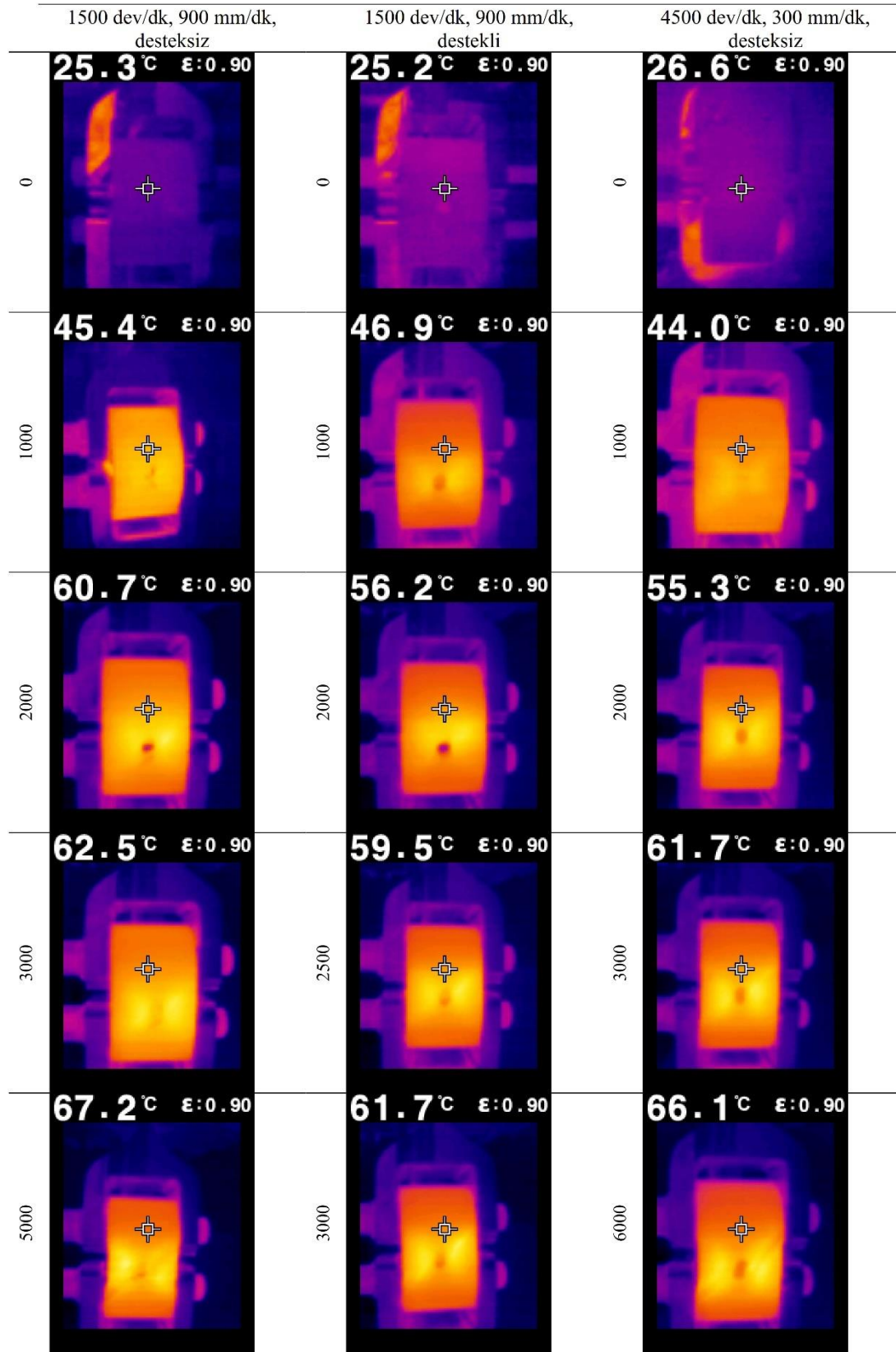


Şekil 4.41 Rulo sarım kompozit borunun %70 gerilme seviyesinde yapılan yorulma testleri sırasında numunelerin çevrim sayısına bağlı olarak makro hasar görüntüleri.

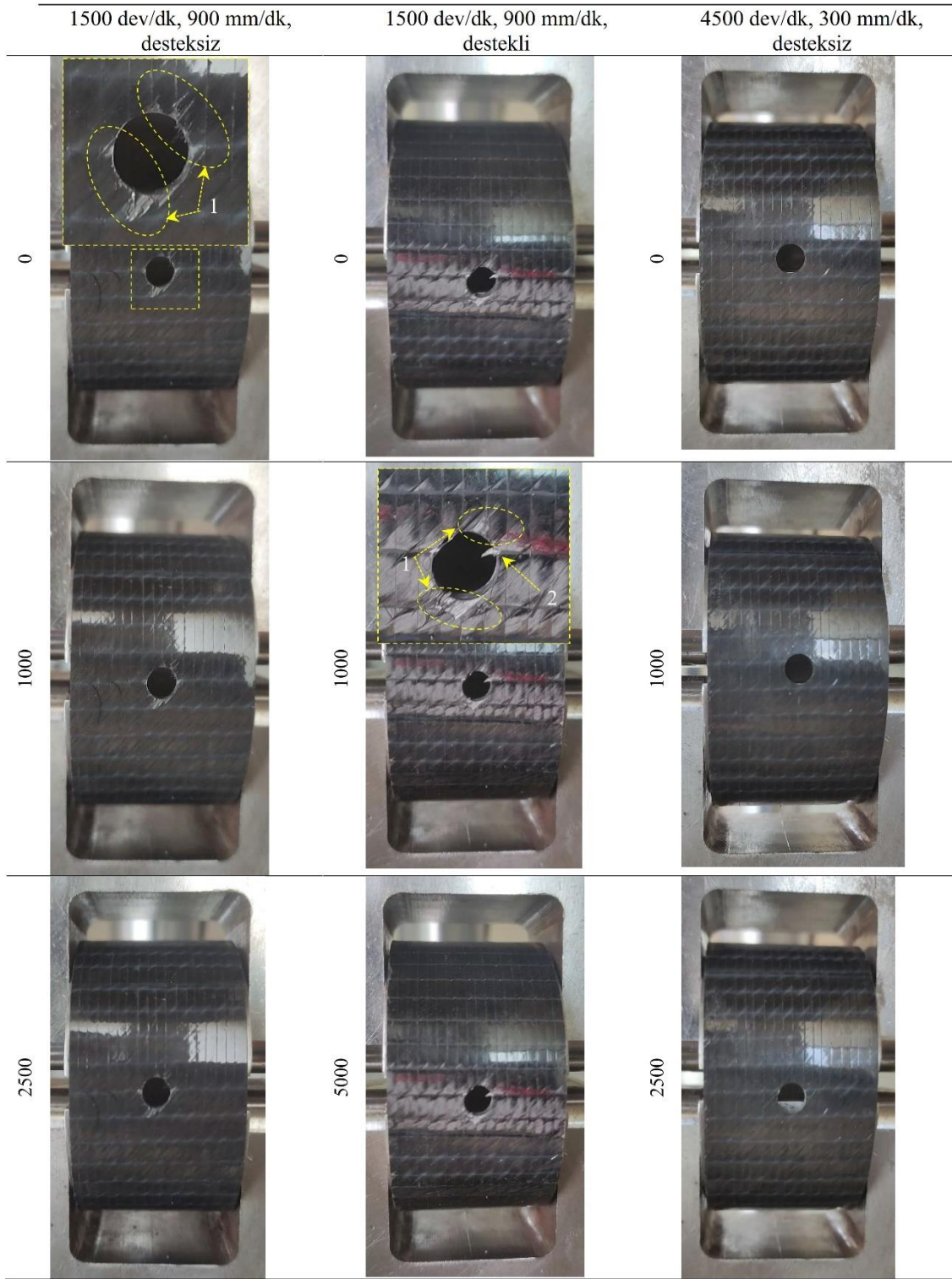


1- Delik delme kaynaklı hasarlar, 2- Yüzeysel çatlakların oluşması, 3-Delik içi hasar başlangıcı, 4- Çatlakların numune kenarlarına doğru ilerlemesi, 5- Çatlakların tabaka içinde yayılması, 6- Delaminasyon, 7-Dikiş

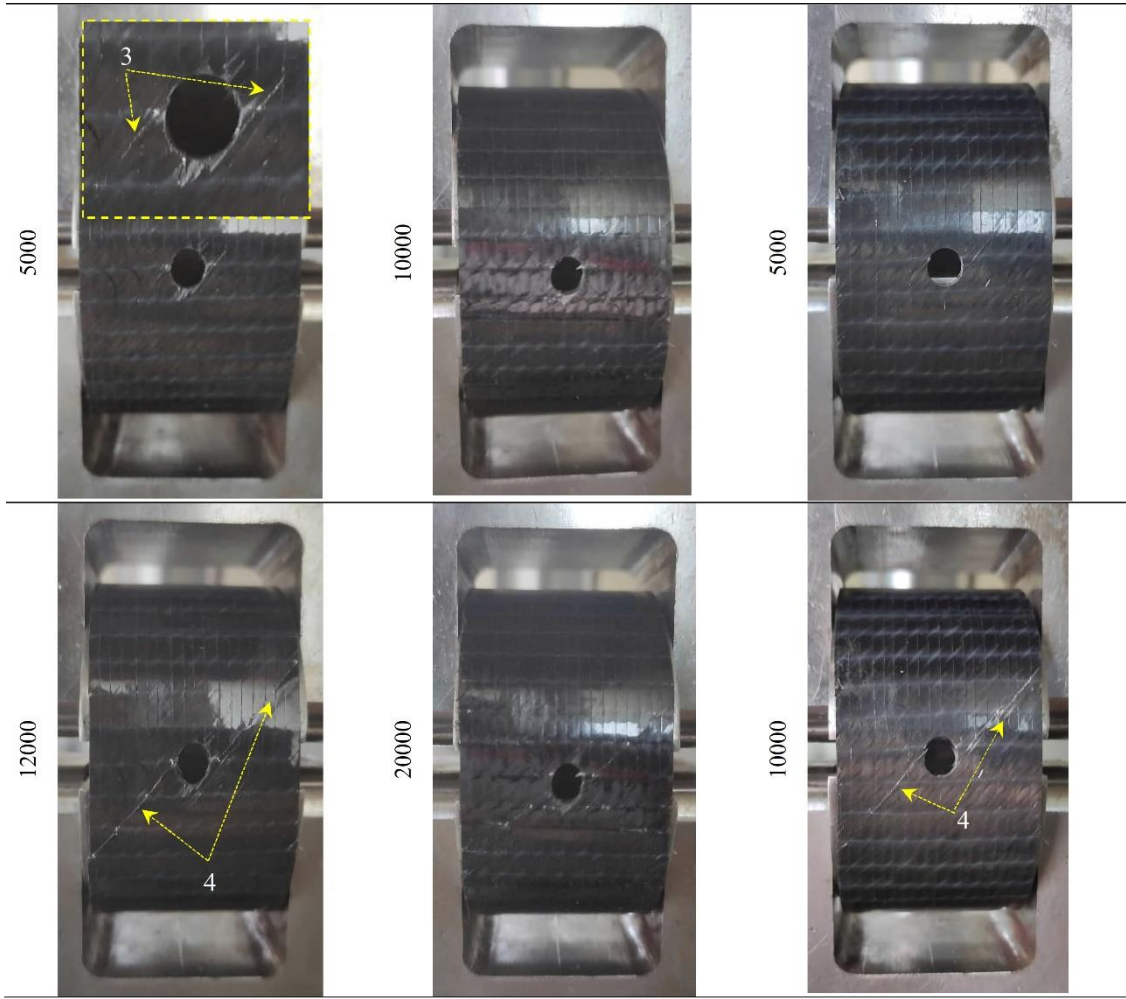
Şekil 4.41 (Devam) Rulo sarım kompozit borunun %70 gerilme seviyesinde yapılan yorulma testleri sırasında numunelerin çevrim sayısına bağlı olarak makro hasar görüntüleri.



Şekil 4.42 Rulo sarım kompozit borunun %70 gerilme seviyesinde yapılan yorulma testleri sırasında numunelerin çevrim sayısına bağlı olarak termal kamera görüntüleri.

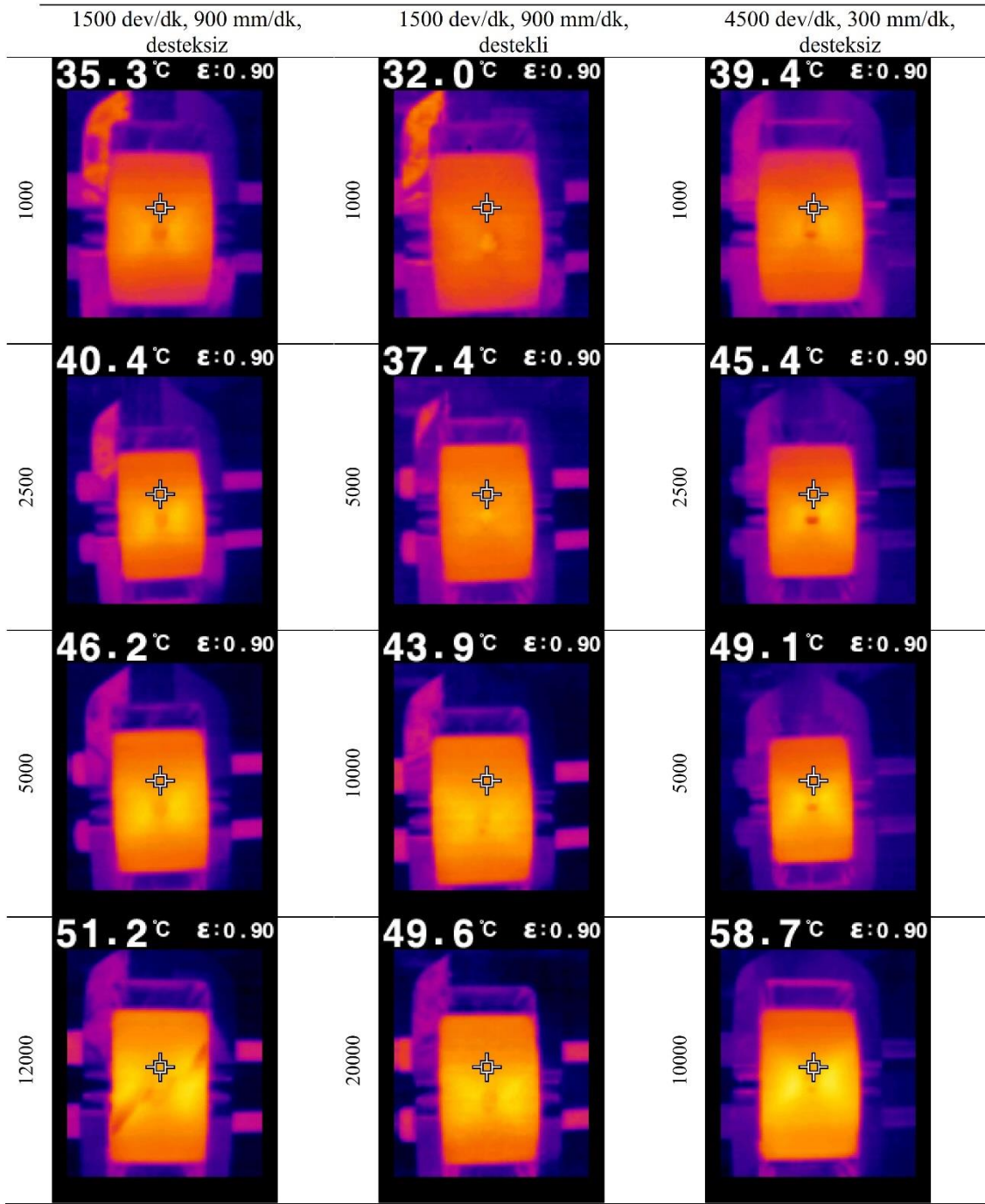


Şekil 4.43 Rulo sarım kompozit borunun %65 gerilme seviyesinde yapılan yorulma testleri sırasında numunelerin çevrim sayısına bağlı olarak makro hasar görüntüleri.

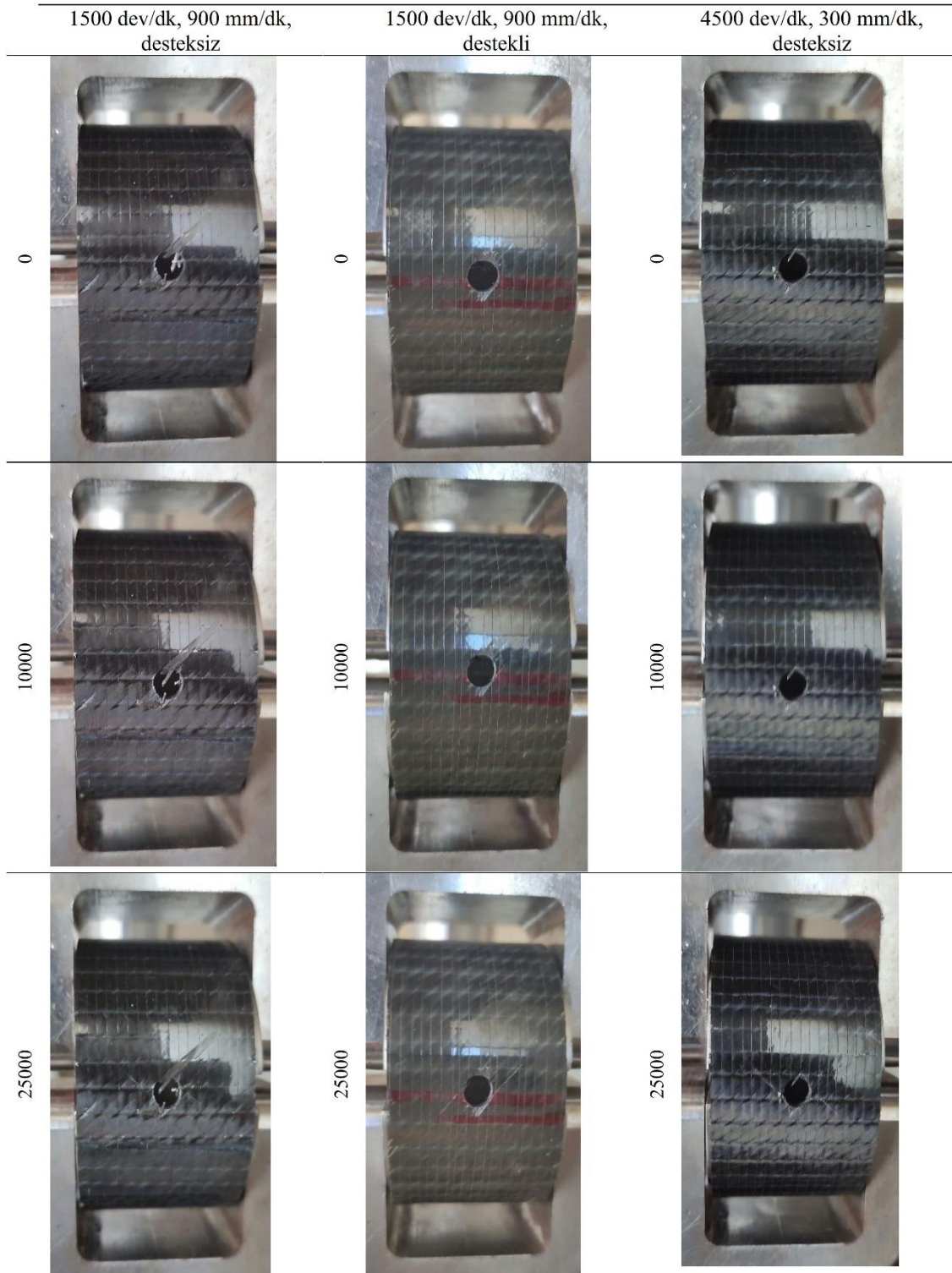


1- Delik delme kaynaklı hasarlar, 2- Dikiş, 3- Yüzeysel çatlakların oluşması, 4- Çatlakların numune kenarlarına doğru ilerlemesi

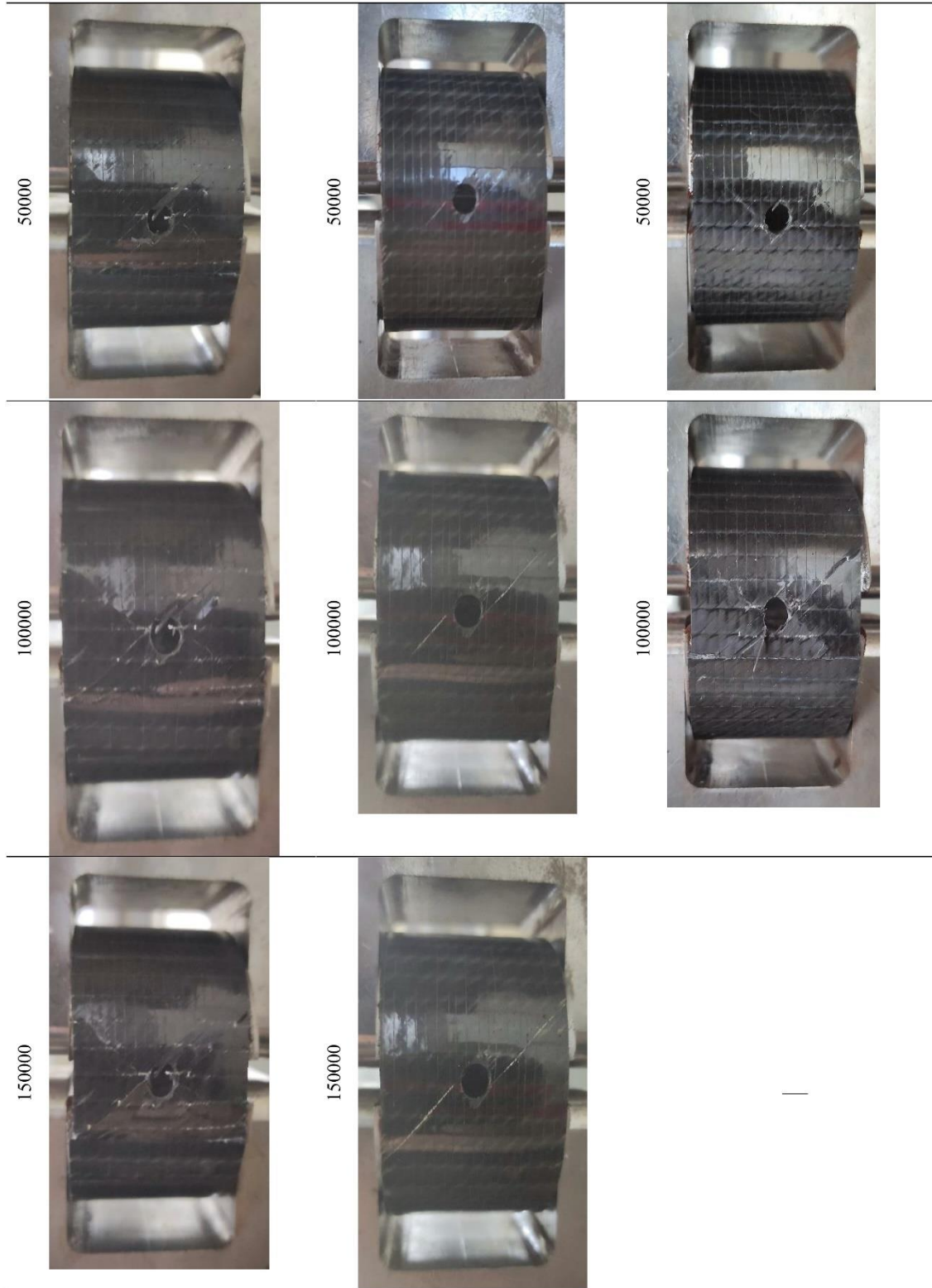
Şekil 4.43 (Devam) Rulo sarım kompozit borunun %65 gerilme seviyesinde yapılan yorulma testleri sırasında numunelerin çevrim sayısına bağlı olarak makro hasar görüntüleri.



Şekil 4.44 Rulo sarım kompozit borunun %65 gerilme seviyesinde yapılan yorulma testleri sırasında numunelerin çevrim sayısına bağlı olarak termal kamera görüntüleri.

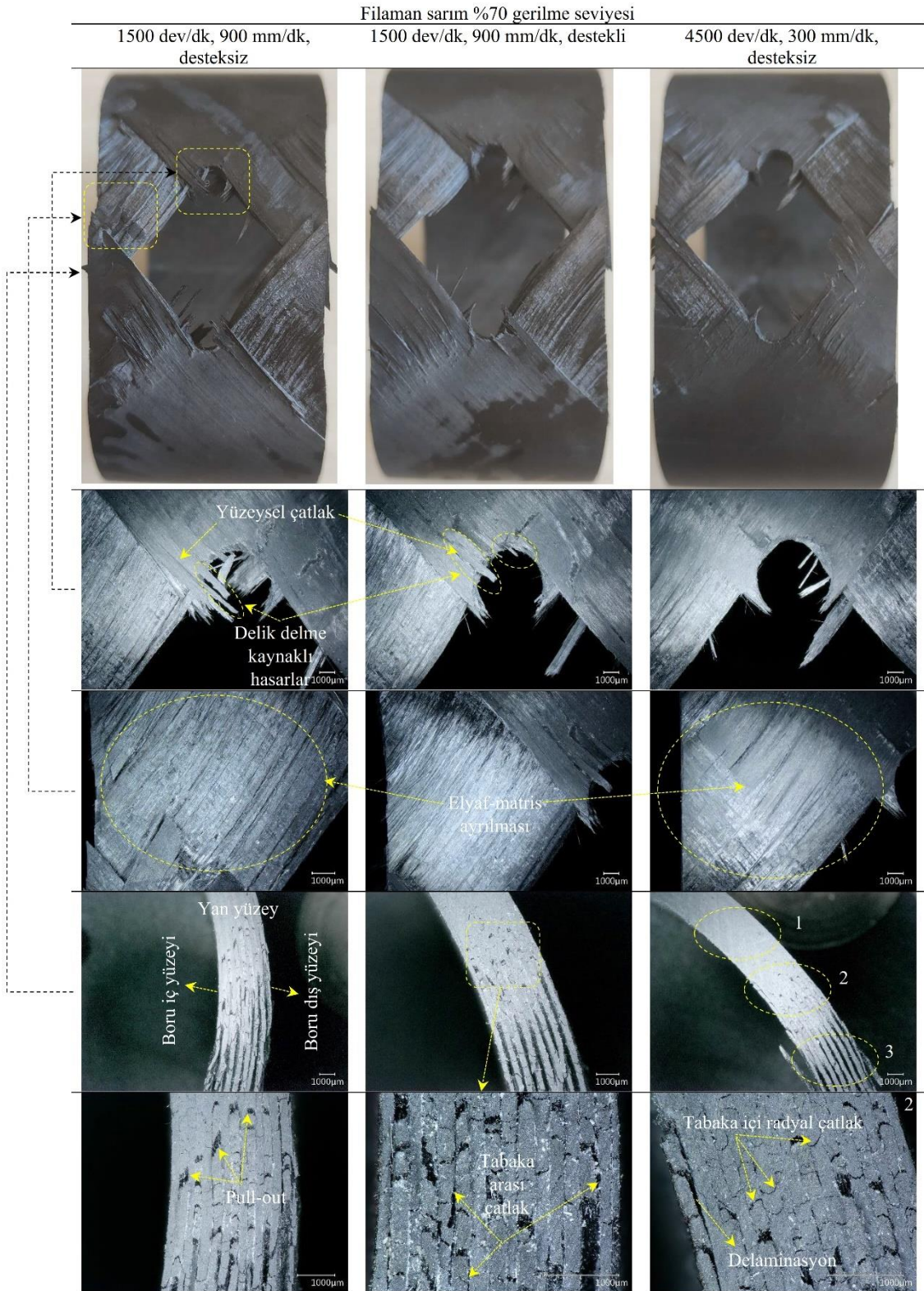


Şekil 4.45 Rulo sarım kompozit borunun %60 gerilme seviyesinde yapılan yorulma testleri sırasında numunelerin çevrim sayısına bağlı olarak makro hasar görüntüleri.



Şekil 4.45 (Devam) Rulo sarım kompozit borunun %60 gerilme seviyesinde yapılan yorulma testleri sırasında numunelerin çevrim sayısına bağlı olarak makro hasar görüntüleri.

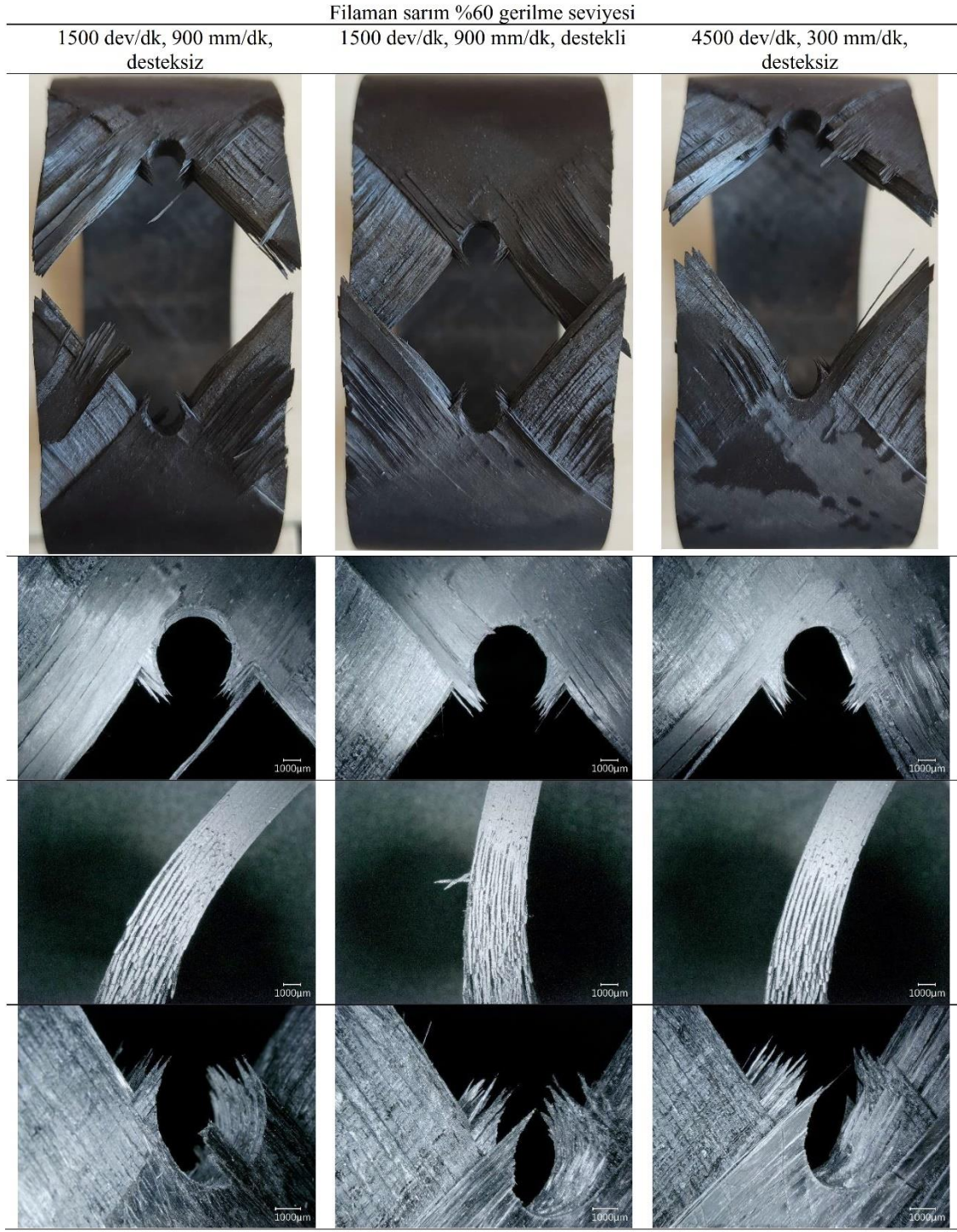
Şekil 4.46-4.48’de filaman sarım kompozit boru için %70, %60 ve %50 gerilme seviyesinde yüklenmiş numuneler için yüzey görüntüleri ve mikroskobik hasar analizleri verilmiştir. Şekil 4.46’da %70 ve Şekil 4.47’de %60 gerilme seviyesinde kırılmış numuneler incelenmiş ve farklı gerilme seviyesi de olsa oluşan hasarlar arasında önemli bir farklılık görülmemiştir. Şekil 4.48’de ise %50 gerilme seviyesinde 1 milyon çevrime kopmadan ulaşmış numunelerdeki hasar gelişimi incelenmiştir. %70 gerilme seviyesinde yüklenmiş ve kopmuş numuneler öncelikle makro olarak gözlemlenmiş ardından delik ön yüzeyi, yan yüzey ve boru iç yüzeyi incelenmiştir. Ön yüzeyler incelendiğinde, delik delme prosesinden kaynaklı hasarların yüzeysel çatlakları tetiklediği görülmektedir. Ancak kırılma üzerinde elyaf-matris ayrılması yani debonding hasarının daha baskın olduğu gözlemlenmiştir. Yan yüzeylerin ise genellikle üç farklı hasar seviyesine sahip olduğu görülmüştür. Deliğin bulunduğu kısımda (3) şiddetli delaminasyonlar oluşmuş, deliğin üst ve alt kısımlarında (2) elyaf çekme yani pull-out ile tabaka içi ve tabakalar arası çatlaklardan oluşan bölgelerin mevcut olduğu gözlemlenmiştir. Delikten daha uzak kısımlarda (1) ise herhangi bir hasar izine rastlanmamıştır. Her üç delme koşulunda da benzer hasar modları gözlemlenmiştir. Filaman sarım için 1 milyon çevrime ulaşır kopmayan numuneler incelendiğinde, 1500 dev/dk ve 900 mm/dk kesme parametreleri ile destekli koşulda delinen ve 4500 dev/dk ve 300 mm/dk kesme parametreleri ile desteksiz koşulda delinen numunelerin, 1500 dev/dk ve 900 mm/dk kesme parametreleri ile desteksiz koşulda delinen numuneye kıyasla daha fazla hasar aldıkları söylenebilir. Farklı hasar davranışı oluşmasının 1500 dev/dk ve 900 mm/dk kesme parametreleri ile desteksiz koşulda delinen numunede, delik pozisyonunun sarım kesişim bölgesine denk gelmesiyle ilişkili olduğu düşünülmektedir. Her üç numunede de delik içi delaminasyonlar ile yüzeysel çatlaklar gözlemlenirken, özellikle 1500 dev/dk ve 900 mm/dk kesme parametreleri ile destekli koşulda delinen ve 4500 dev/dk ve 300 mm/dk kesme parametreleri ile desteksiz koşulda delinen numunelerde tabaka içine yayılmış çatlakların mevcut olduğu görülmüştür. Yan yüzeyler incelendiğinde ise kopmuş numunelere kıyasla beklendiği üzere, şiddetli delaminasyon bölgesi oluşmamıştır ancak özellikle ilk ve son tabakalarda delik hizasında tüm koşullarda delaminasyon oluşmuştur. Öte yandan 1500 dev/dk ve 900 mm/dk kesme parametreleri ile destekli koşulda delinmiş numunede transfer çatlağının oluşup, çatlağın diğer tabakalar boyunca tırmanarak ilerlemesi ve genişleyerek delaminasyon oluşturmaya dikkat çekicidir.



Şekil 4.46 Filaman sarım için %70 gerilme seviyesinde yüklenmiş numunelerin hasar görüntüleri ve mikroskobik hasar analizi.

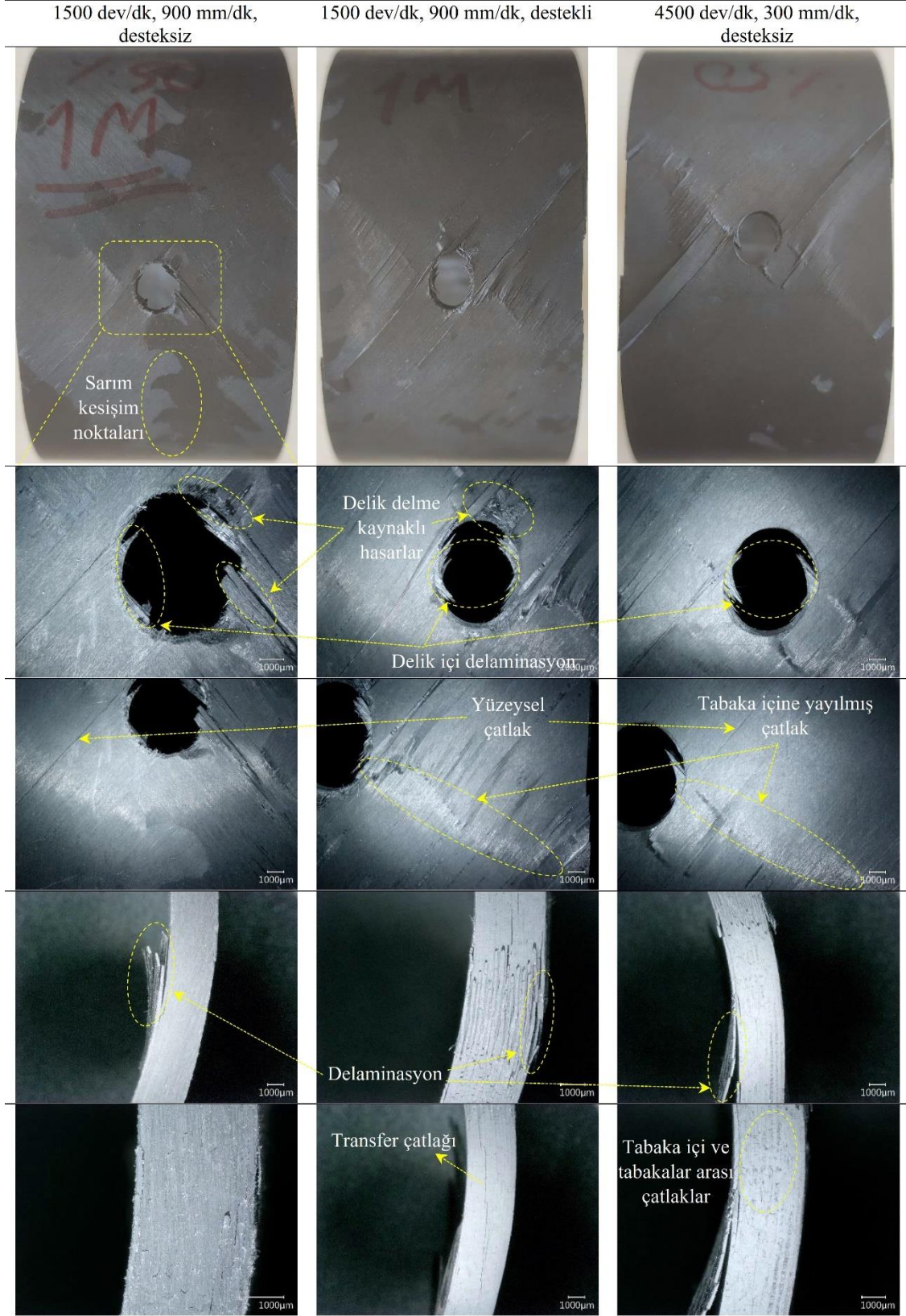


Şekil 4.46 (Devam) Filaman sarım için %70 gerilme seviyesinde yüklenmiş numunelerin hasar görüntüleri ve mikroskopik hasar analizi.

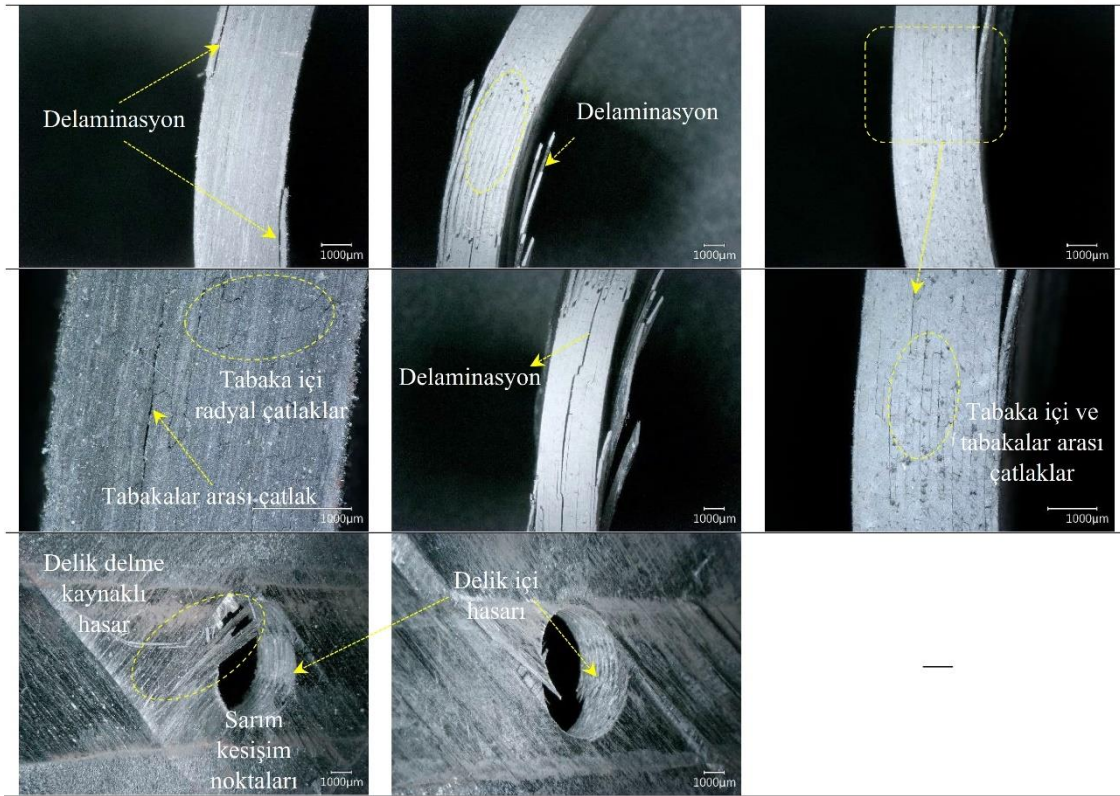


Şekil 4.47 Filaman sarım için %60 gerilme seviyesinde yüklenmiş numunelerin hasar görüntüleri.

Filaman sarım %50 Gerilme seviyesi



Şekil 4.48 Filaman sarım için %50 gerilme seviyesinde yüklenmiş numunelerin hasar görüntüleri ve mikroskopik hasar analizi.



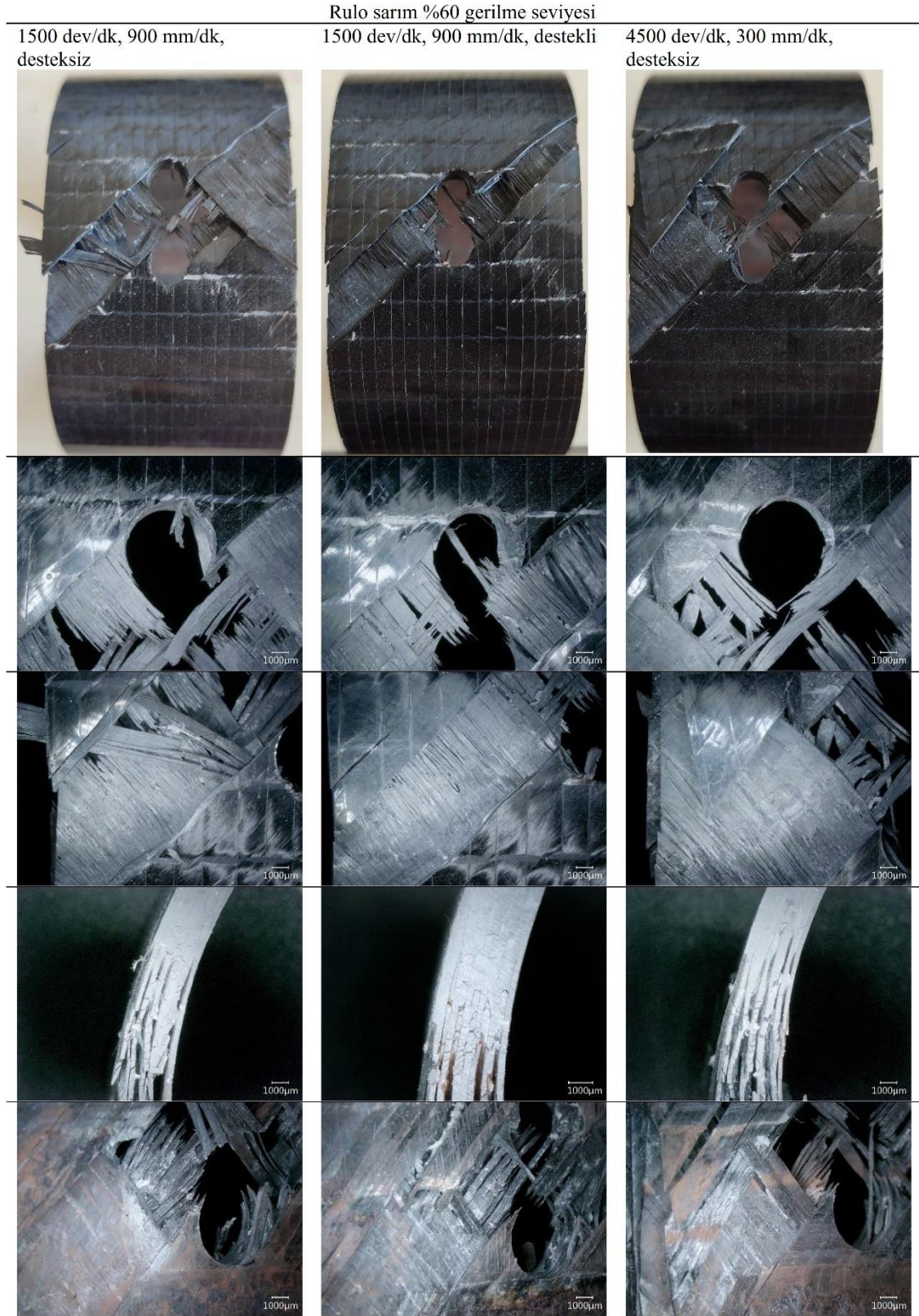
Şekil 4.48 (Devam) Filaman sarım için %50 gerilme seviyesinde yüklenmiş numunelerin hasar görüntüleri ve mikroskobik hasar analizi.

Şekil 4.49-4.51’de ise rulo sarım kompozit boru için %70, %60 ve %50 gerilme seviyesinde yüklenmiş numuneler için yüzey görüntüleri ve mikroskobik hasar analizleri verilmiştir. Şekil 4.49 incelendiğinde, rulo sarım boruda üç farklı delik delme koşulunda delinmiş numune için yapılan gözlemlerde hasar tipleri açısından bir farklılık gözlemlenmemiştir. Ancak filaman sarım ile kıyaslandığında bazı farklılıklar dikkati çekmiştir. Filaman sarımda olduğu gibi rulo sarımda da elyaf-matris ayrılmaları oluşmuş ancak kopma uzaması çekme testlerinde olduğu gibi daha kısa olduğundan ayrılmalar daha düşük şiddette olmuştur. Öte yandan Şekil 4.24’te gösterilen sarım bitiş noktasının kırılma davranışını etkileyişi ise, Şekil 4.49’da 1500 dev/dk ve 900 mm/dk kesme parametreleri ile destekli koşulda delinmiş olan numune üzerinde görülmektedir. Bu numunede sarım bitişi, deliğin hemen üst kısmına denk geldiği için kopma bu bölgede çizgisel bir şekilde gerçekleşmiştir. Yan yüzeyler incelendiğinde ise filaman sarımdan farklı olarak kırılma anında delaminasyonların alt ve üst tabakada oluştuğu, ortadaki tabakalara fazla yayılmadığı görülmüştür. Ancak %60 gerilme seviyesinde yapılan yüklemde (Şekil 4.50), filaman sarımdaki gibi olmasa da hasarların %70 gerilme

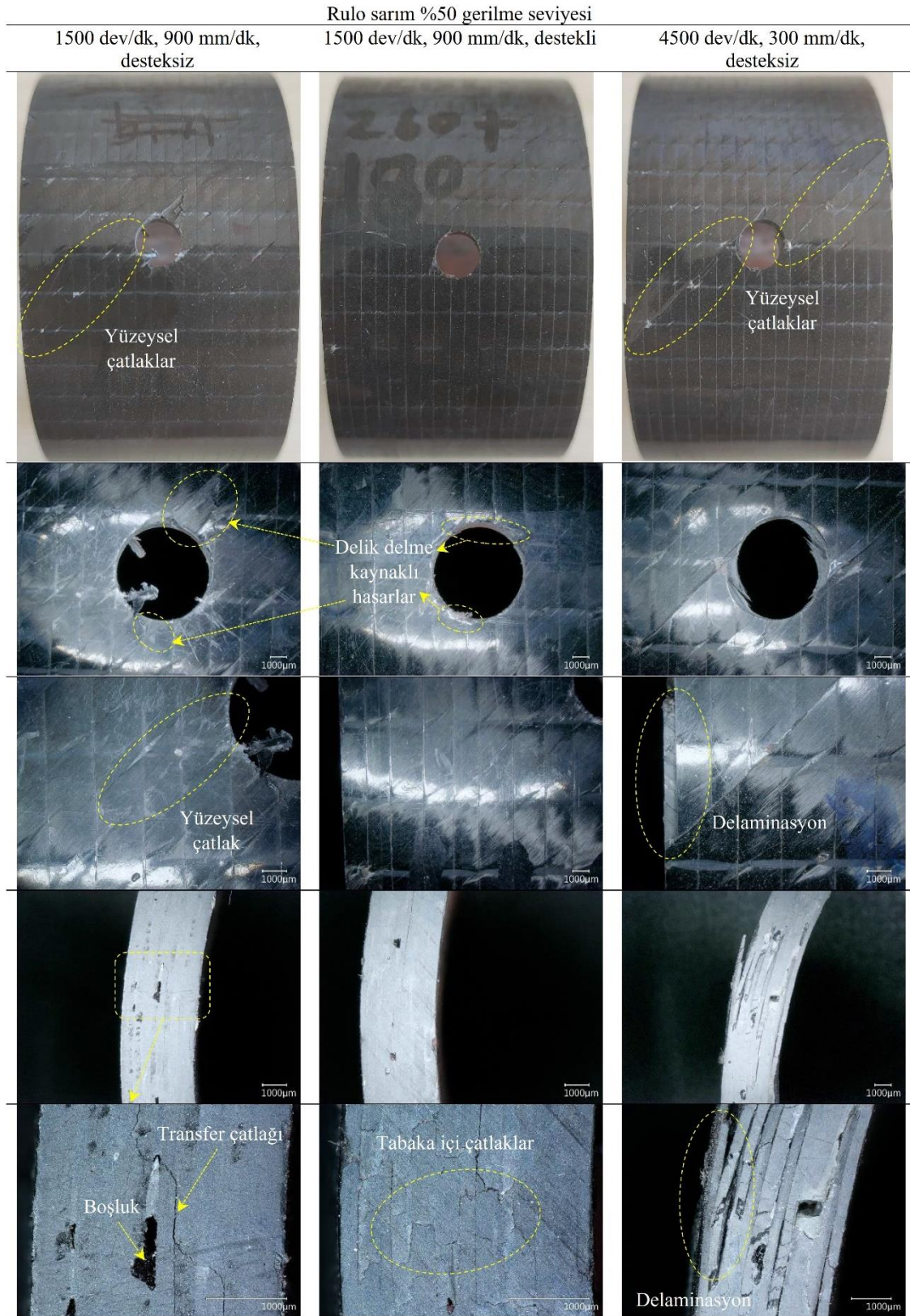
seviyesine kıyasla daha geniş alana yayıldığı söylenebilir. Filaman sarımda ise hasarlar tüm tabakalara homojene yakın bir şekilde dağılmıştır. Bu bulgular rulo sarımın yüksek gerilme seviyelerinde yapılan dinamik yüklemelerde de filaman sarımdan daha gevrek bir davranış sergilediğini doğrular niteliktedir. Şekil 4.51’de verilen rulo sarım için 1 milyon çevrime ulaşp kopmayan numuneler incelendiğinde, en fazla hasarın 4500 dev/dk ve 300 mm/dk kesme parametreleri ile desteksiz koşulda delinen numunede meydana geldiği, hatta numune kenarlarında delaminasyon hasarlarının olduğu görülmüştür. Bu numuneyi ise hasar oluşumu açısından 1500 dev/dk ve 900 mm/dk kesme parametreleri ile desteksiz koşulda delinen numune takip etmiştir. Özellikle bu iki numunede gözle görülür yüzeysel çatlaklar ile en alt ve üst tabakalarda delaminasyon olduğu gözlemlenmiştir. Filaman sarımla kıyaslandığında aynı gerilme seviyesinde (%50) rulo sarımda daha az hasar meydana geldiği görülmüştür. Transfer çatlakları her iki malzemede de gözlemlenmiştir. Daha düşük çevrimlerde ise mikroskobik gözlemlerde belirgin bir transfer çatlağının görülmeşi, tabaka içi ve tabakalar arası çatlakların bu çatlak ile birleşmesiyle açıklanabilir. Öte yandan rulo sarımda üretim kaynaklı boşlukların çatlak oluşumu ve ilerleyişini etkilemesi durumu ise Şekil 4.51’de, 4500 dev/dk ve 300 mm/dk kesme parametreleri ile desteksiz koşulda delinen numune incelemesinde gösterilmiştir. Görüntülerden boşlukların gerilme yığılması oluşturarak çatlak başlangıcına sebep olabileceği ya da tabaka arasında ilerleyen çatlağın yön değiştirip boşluğa doğru ilerleyebileceği anlaşılmaktadır.



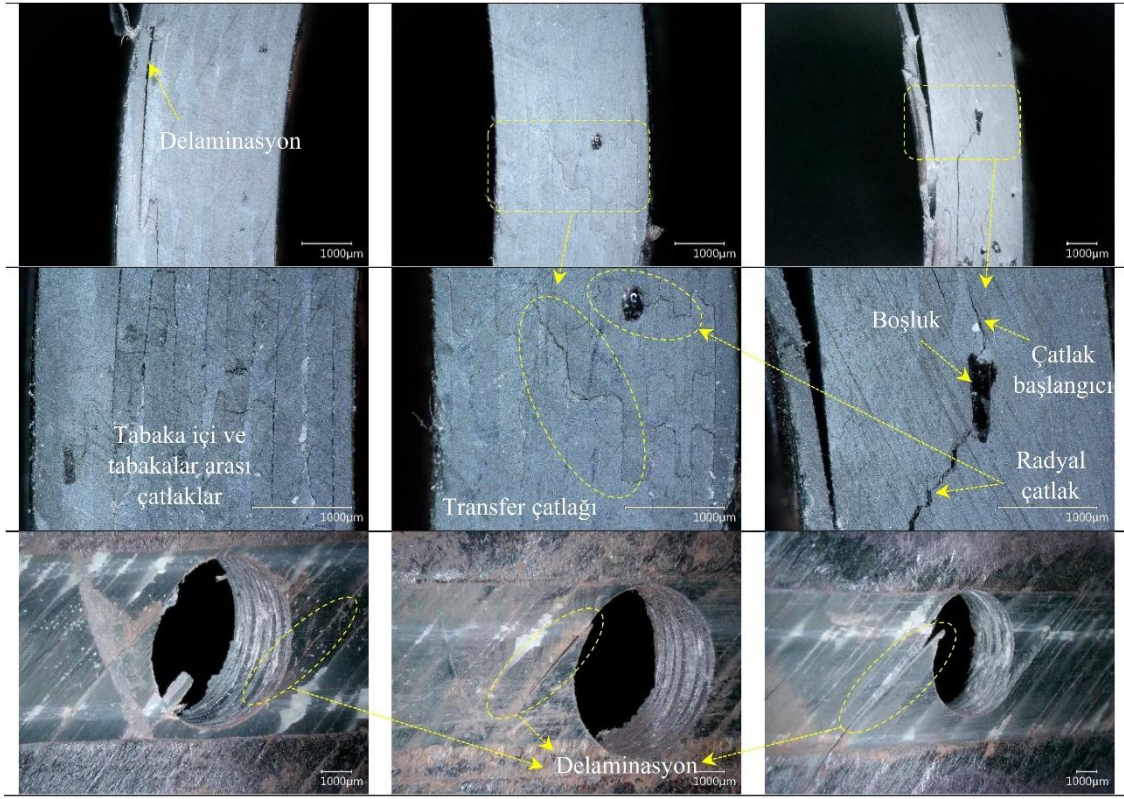
Şekil 4.49 Rulo sarım için %70 gerilme seviyesinde yüklenmiş numunelerin hasar görüntüleri ve mikroskobik hasar analizi.



Şekil 4.50 Rulo sarım için %60 gerilme seviyesinde yüklenmiş numunelerin hasar görüntüleri.



Şekil 4.51 Rulo sarım için %50 gerilme seviyesinde yüklenmiş numunelerin hasar görüntüleri ve mikroskobik hasar analizi.



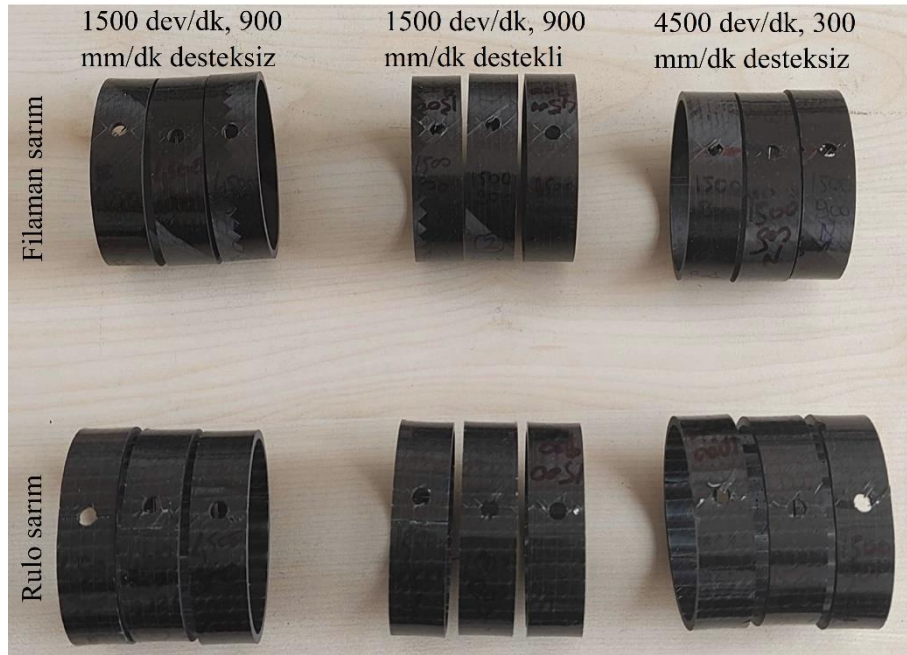
Şekil 4.51 (Devam) Rulo sarım için %50 gerilme seviyesinde yüklenmiş numunelerin hasar görüntüleri ve mikroskobik hasar analizi.

4.3.3 Radyal Basma Dayanımı Analizi

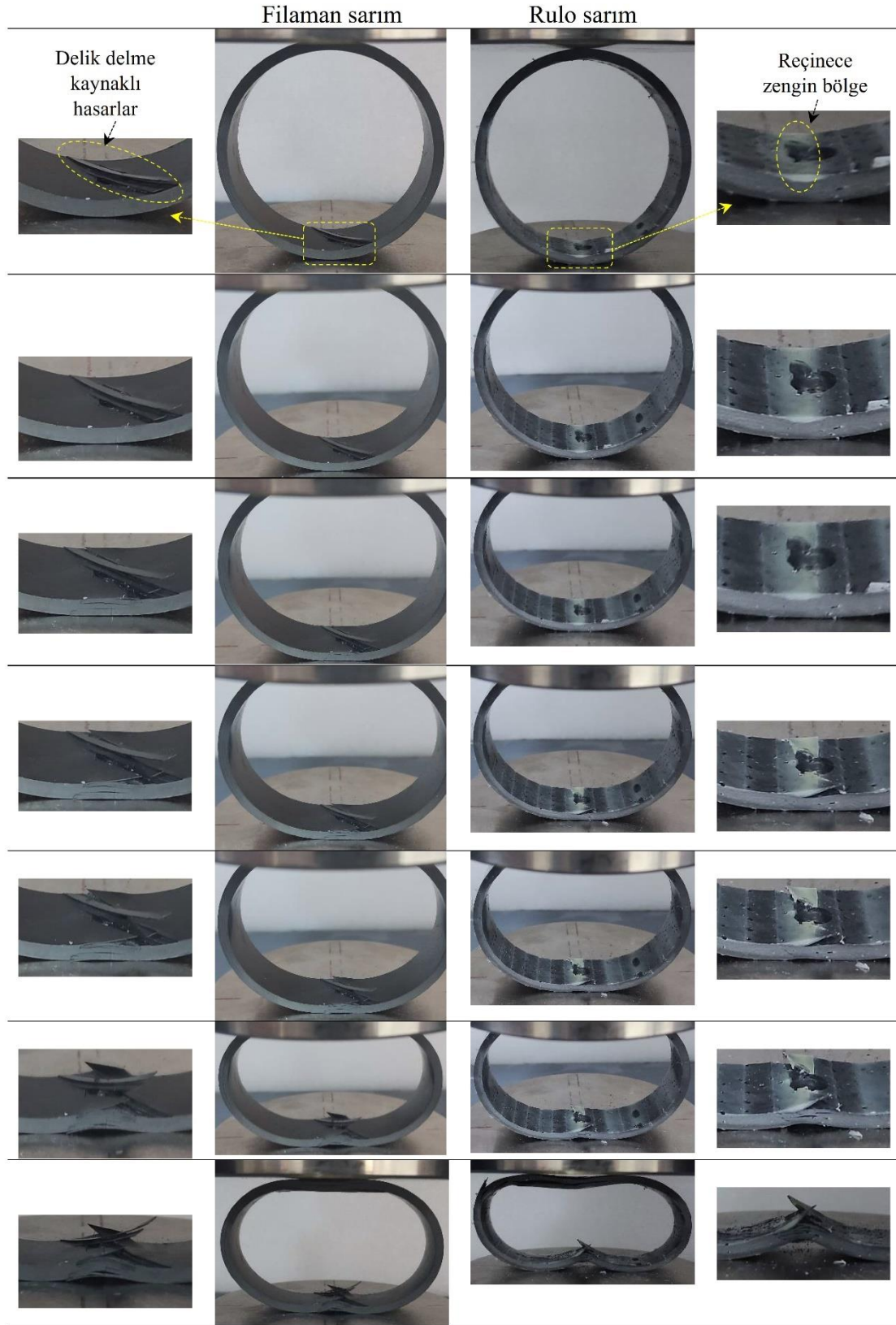
Delik delme koşullarının filaman sarım ve rulo sarım kompozit borunun basma dayanımı üzerindeki etkilerini incelemek üzere üçer tekrarlı radyal basma testleri gerçekleştirilmiş olup test sonrası numuneler Şekil 4.52’de verilmiştir. Daha önce belirtildiği üzere, radyal basma testlerinde en fazla hasar malzemenin test cihazına temas ettiği yüzeylerde meydana gelmektedir. Delik bu pozisyonda konumlandırıldığı için delik çevresinde az miktarda hasar olduğu görülmektedir. Filaman sarım ve rulo sarım kompozit boruda test sırasında oluşan hasar gelişimi ise Şekil 4.53’te verilmiştir. Filaman sarım malzemede oluşan hasarlar incelendiğinde, test öncesinde şiddetli delme kaynaklı delaminasyon hasarlarının olduğu, hatta numune kenarlarına kadar bu hasarın ulaştığı görülmektedir. Deplasman arttıkça malzeme iç tabakalarında ve delik kenarında delaminasyon oluşmaya başlamış ve deplasmana bağlı olarak ilerlemiştir. Rulo sarımda ise, reçinenin fazla olması hasar başlangıcını ve ilerleyişini geciktirmiştir. Bu sebeple, ilk hasar reçinenin çatlaması şeklinde boru iç yüzeyinde oluşmuş ve sonrasında bu tabakada delaminasyon oluşmasıyla

devam etmiş, deplasman arttıkça iç tabakalarda da delaminasyon oluşmuştur. Şekil 4.54'te farklı delme koşullarında delinmiş filaman ve rulo sarım kompozit boruların radyal basma testlerinden elde edilen yük-deplasman grafikleri verilmiştir. Filaman sarım boruda elastik bölge sonrasında yaklaşık 4 mm deplasmanda (1) ilk hasar oluşarak, kuvvette dalgalanma oluşmuş ve bu noktadan sonra deplasman arttıkça kuvvette artış olmuş, ancak yaklaşık 7 mm deplasmanda (2) kuvvette şiddetli bir düşüş meydana gelmiştir. Bu noktadan sonra kuvvette dalgalı bir yükselme trendi başlamıştır. Filaman sarım için testler 20 mm deplasmana ulaşıncaya sonlandırılmıştır. Rulo sarımında ise ilk hasar ve dolayısıyla kuvvette ilk düşüş yaklaşık 7-10 mm deplasmanda (1) başlamış, sonrasında kuvvet tekrar artışa geçmiştir. Yaklaşık 20-25 mm deplasmana (2) ulaşıldığında, kuvvette ikinci belirgin düşüş görüldükten sonra rulo sarım için testler sonlandırılmıştır. Burada bahsedilen ve grafik üzerinde gösterilen 1 ve 2 noktaları için elde edilen maksimum kuvvet ve bu noktadaki deplasman değerleri Çizelge 4.6'da verilmiştir. Çizelge 4.6 ve Şekil 4.54 incelendiğinde, filaman sarım kompozit boru için genel olarak ciddi farklılıklar oluşmasa da en düşük dayanımın 1500 dev/dk ve 900 mm/dk kesme parametreleri ile desteksiz koşulda delinen borularda, en yüksek dayanımın ise 4500 dev/dk ve 300 mm/dk kesme parametreleri ile desteksiz koşulda delinen borularda olduğu söylenebilir. Bununla birlikte, 1500 dev/dk ve 900 mm/dk kesme parametreleri ile desteksiz koşulda delinen borularda, radyal basma testleri sırasında elastik bölgeden sonra ilk kırılmanın başladığı bölgede, diğer koşullarda delinen borulara kıyasla yük-deplasman eğrisinde her üç tekrarda da bir düşüş olması dikkat çekicidir. Üç tekrarda da böyle bir davranış oluşması bu fenomenin oluşumunda delik delme kaynaklı hasarların etkili olduğunu düşündürmektedir. Rulo sarımında ise ilk hasarın oluştuğu, dolayısıyla kuvvetin düştüğü ilk bölgeye göre değerlendirilme yapıldığında 4500 dev/dk ve 300 mm/dk kesme parametreleri ile desteksiz koşulda delinen numunenin en düşük dayanıma sahip olduğu görülmektedir. Kuvvette düşüş meydana gelen ikinci bölgede ölçülen maksimum kuvvetler değerlendirildiğinde ise, en yüksek dayanım ortalamaya göre 4500 dev/dk ve 300 mm/dk kesme parametreleri ile desteksiz koşulda delinen numunede elde edilmiştir ancak tekrarlardan elde edilen sonuçlardaki sapmalar düşündürücüdür. Genel bir değerlendirme yapılacak olursa, önceki testler gibi bu testlerde de filaman sarımın delik delme prosesi ile oluşan hasarlardan ve delik yüzey kalitesinden etkilendiği ancak rulo sarımın etkilenmediği söylenebilir. Bu durumun

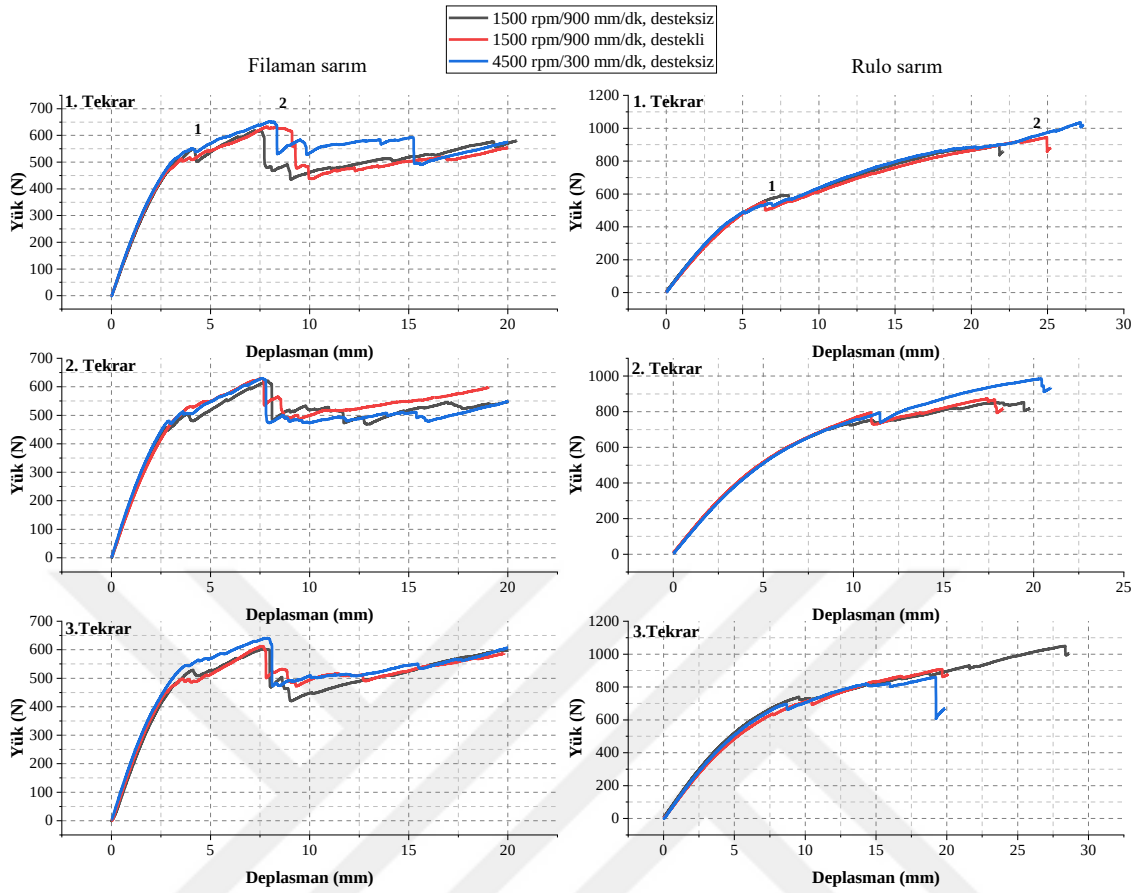
özellikle daha önce de belirtildiği üzere üretim yönteminden kaynaklı olan geometrik düzensizlikler (Şekil 4.24), hava boşlukları (Şekil 4.27) ve reçine zengini bölgelerin (Şekil 4.53) varlığından kaynaklanmaktadır. Öte yandan rulo sarımda reçinece zengin bölgeler hem delme kaynaklı hasarları hem de mekanik yükleme sırasında oluşan hasarları baskılamıştır. Ayrıca, rulo sarımda bazı numunelerde radyal basma testi sırasında kuvvet düşüşleri, yani hasar oluşumu diğer numunelerden erken gerçekleşmiştir. Reçinece zengin bölgelerin tüm boru kesiti boyunca homojen dağılım göstermemesinin bu duruma yol açtığı düşünülmektedir. Çevresel çekme testinde filaman sarım daha yüksek dayanım gösterirken radyal basmada rulo sarım daha yüksek dayanım göstermiştir. Bu durum kompozitlerde çekme yükünde elyafın, basma yükünde ise matrisin önemli olduğuna işaret etmektedir. Daha önce belirtildiği üzere filaman sarımın elyaf hacim oranı rulo sarımdan daha yüksektir.



Şekil 4.52 Radyal basma testi sonrası hasara uğramış numuneler.



Şekil 4.53 Filaman sarım ve rulo sarım kompozit borunun radyal basma testi sırasında hasar gelişimi.



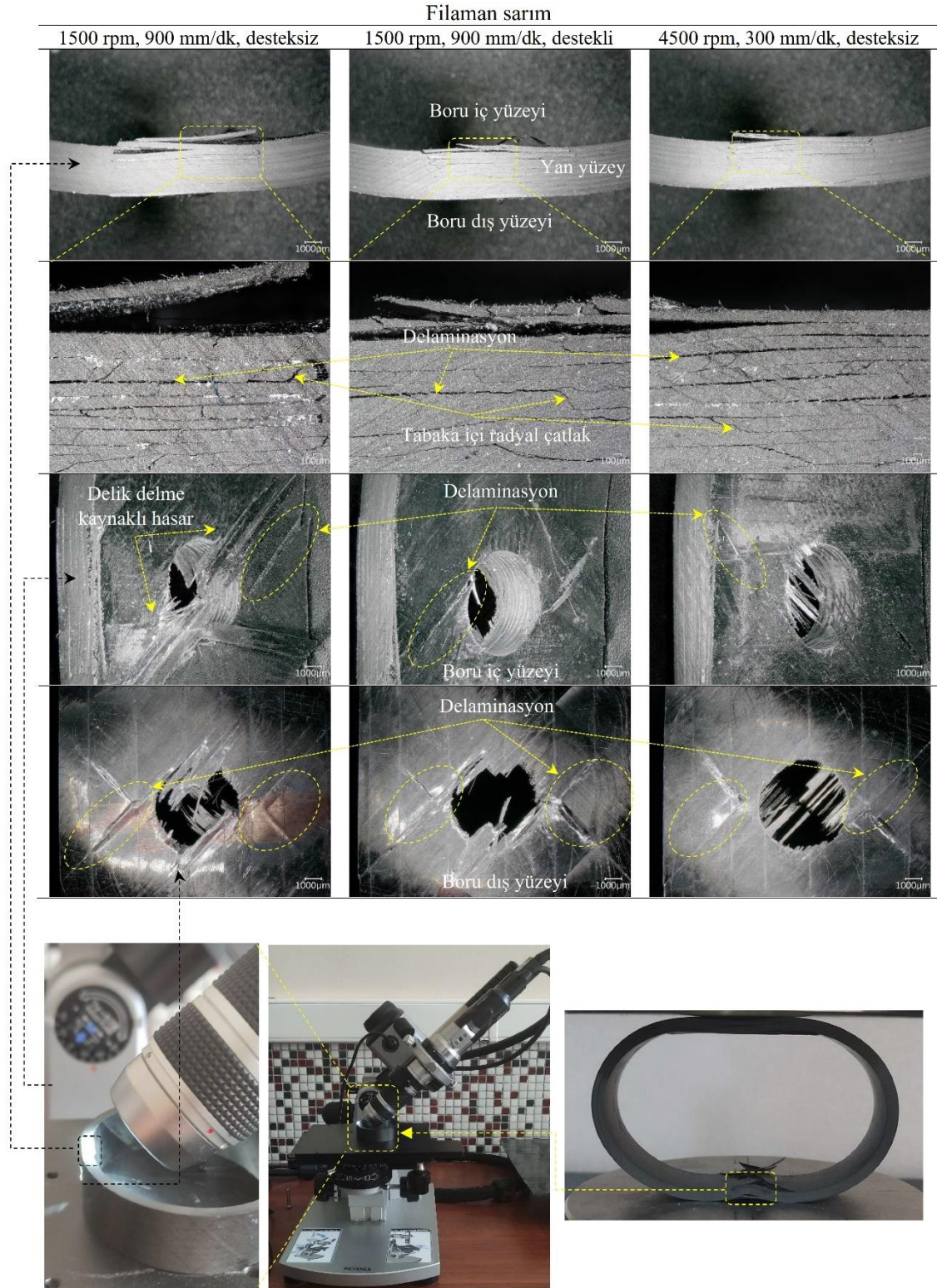
Şekil 4.54 Filaman sarım ve rulo sarım kompozit boru için yük-deplasman grafikleri.

Radyal basma testlerinden sonra numunelerin en fazla hasar gören kısmı (deliğin bulunduğu konum) farklı açılarda Keyence VHX-900F dijital mikroskop ile incelenmiştir. Bu kapsamda delik girişi (boru dış yüzeyi), yan yüzey ve delik çıkışı (boru iç yüzeyi) incelenmiş ve hasar analizi filaman sarım için Şekil 4.55'te, rulo sarım için Şekil 4.56'da verilmiştir. Filaman sarım için yan yüzeyler incelendiğinde 1500 dev/dk ve 900 mm/dk kesme parametreleri ile desteksiz koşulda delinen numunede delik çıkışında yani borunun iç yüzeyinde delaminasyonun daha şiddetli olduğu görülmüştür. Diğer koşullarda delinen numunelerde ise bu bölgede delaminasyon boyutu nispeten daha düşüktür. Yan yüzeyler daha detaylı incelendiğinde, her üç koşulda yapılan testlerde de yoğun tabaka içi çatlaklar ile alt tabakalara da yayılmış delaminasyon hasarları gözlemlenmiştir. Boru iç yüzeyinde ise delme kaynaklı hasarlara da bağlı olarak delaminasyonun delik kenarından başlayıp numune kenarlarına doğru ilerlediği görülmüştür. Boru dış yüzeylerinde (delik giriş kısmı) numunelerin basma cihazı plakası ile temas eden kısımlarında elyaf doğrultusunda ($+45^{\circ}/-45^{\circ}$) çatlak ve delaminasyonların

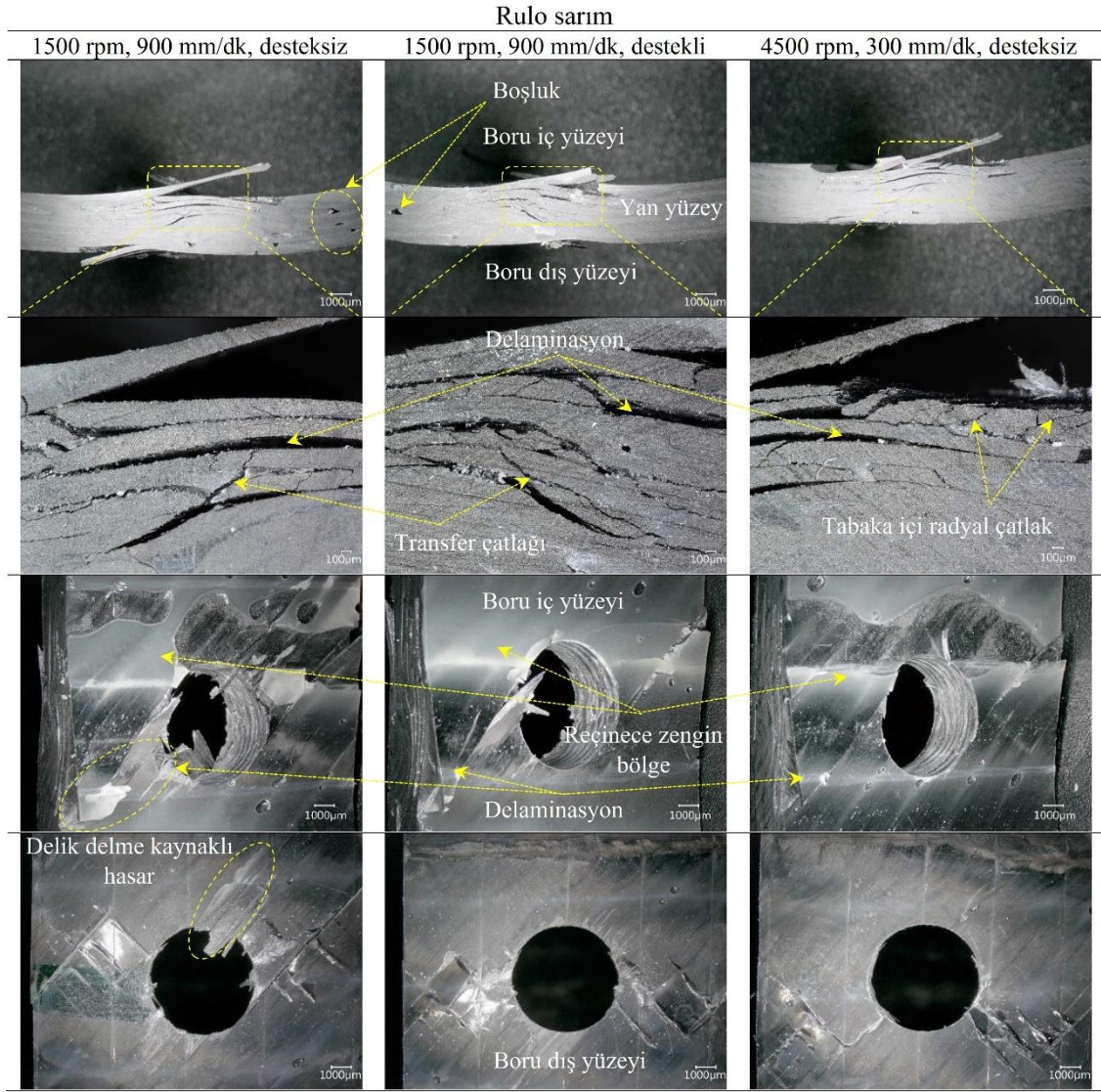
oluştugu gözlemlenmiştir. 4500 dev/dk ve 300 mm/dk kesme parametreleri ile desteksiz koşulda delinen numunede hasar dar bir alanda çizgisel olarak oluşurken diğer koşullarda delinen deliklerde hasar daha geniş bir alana yayılmıştır. Bu durum ise aslında sadece delik çıkışı değil delik girişinde oluşan delik delme kaynaklı hasarın da mekanik davranış üzerinde etkisi olduğunu düşündürmektedir. Rulo sarım boru için görüntüler incelendiğinde her üç koşulda delinen numunelerde de benzer hasar davranışı görülmüştür. Filaman sarımdan farklı olarak, daha önce de bahsedilen rulo sarımın üretim yönteminden kaynaklı düzensizlikler ve hava boşlukları hasar davranışını etkilemiştir. Ayrıca tabaka içi çatlaklara ilave olarak transfer çatlaklarının da oluştuğu gözlemlenmiştir. Öte yandan boru iç yüzeyi incelendiğinde reçinece zengin bölgelerin delik delme kaynaklı hasarı ve radyal basma sırasında oluşan delaminasyonu engellemeye yardımcı olduğu söylenebilir. Boru dış yüzeyinde ise filaman sarıma benzer şekilde elyaf oryantasyonu doğrultusunda hasarların oluştuğu, filaman sarıma kıyasla farklı bir davranış olmadığı görülmüştür.

Çizelge 4.6 Radyal basma testi sonuçları.

	Delme koşulu	Numune	Genişlik (mm)	Kalınlık (mm)	Kuvvet (N)		Deplasman (mm)	
					1	2	1	2
Filaman sarım	1500 dev/dk,	1	17,85	3,05	548,52	618,8	4,18	7,56
		2	17,76	3,12	505,47	621,06	3,85	7,89
	900 mm/dk,	3	17,73	3,10	528,97	603,53	4,12	7,69
	Desteksiz	Ortalama			527,65±21,55	614,46±9,53	4,05±0,17	7,71±0,16
	1500 dev/dk,	1	17,81	3,04	516,65	632,89	3,97	7,85
		2	17,72	3,06	531,06	628,80	3,99	7,54
	900 mm/dk,	3	17,73	3,13	497,77	612,46	3,60	7,59
	Destekli	Ortalama			515,16±16,69	624,72±10,80	3,85±0,22	7,66±0,16
	4500 dev/dk,	1	17,78	3,14	551,14	652,69	4,06	8,01
		2	17,77	3,14	512,77	629,77	3,61	7,61
	300 mm/dk,	3	17,78	3,12	545,40	640,61	3,78	7,85
	Desteksiz	Ortalama			536,44±20,69	641,02±11,46	3,82±0,22	7,82±0,19
Rulo sarım	1500 dev/dk,	1	17,84	3,15	592,26	895,96	7,59	21,82
		2	17,77	3,13	752,08	852,64	11,04	19,45
	900 mm/dk,	3	17,80	3,10	739,65	1049,50	9,56	28,36
	Desteksiz	Ortalama			694,66±88,90	932,70±103,44	9,40±1,72	23,21±4,61
	1500 dev/dk,	1	17,81	3,12	552,95	942,94	6,46	24,94
		2	17,80	3,10	793,93	873,20	10,97	17,43
	900 mm/dk,	3	17,82	3,11	722,47	907,40	10,43	19,67
	Destekli	Ortalama			689,78±123,76	907,85±34,87	9,29±2,46	20,68±3,85
	4500 dev/dk,	1	17,92	3,12	544,45	1035,65	6,82	27,155
		2	17,85	3,11	794,09	985,32	11,45	20,43
	300 mm/dk,	3	17,83	3,12	696,57	859,26	8,67	19,21
	Desteksiz	Ortalama			678,37±125,81	960,08±90,86	8,98±2,33	22,26±4,27



Şekil 4.55 Radyal basma testi sonrası filaman sarım numuneler için mikroskobik hasar analizi.



Şekil 4.56 Radyal basma testi sonrası rulo sarım numuneler için mikroskobik hasar analizi.

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu çalışmada öncelikle rulo sarım yöntemiyle üretilmiş kompozit boru iç yüzeyinden (iç bükey kavisli yüzey) ve dış yüzeyinden (dış bükey kavisli yüzey) delinerek, farklı yüzey eğriliklerine sahip kompozitlerde delik delme prosesi incelenmiş ve düz yüzey (plaka) ile kıyaslanmıştır. Ardından filaman sarım ve rulo sarım yöntemleri ile üretilmiş karbon elyaf takviyeli kompozit borularda delik delme karakteristiği incelenmiş ve kompozit plaka ile kıyaslanmıştır. İşlenebilirlik testleri sonrasında üç farklı koşulda delinmiş filaman ve rulo sarım kompozit boruların mekanik davranışları çevresel (halka) çekme, çevresel çekme-çekme yorulma ve radyal basma testleri ile incelenmiştir. Ayrıca bu testler sırasında, kompozitler üzerinde oluşan hasarlar analiz edilerek yorumlanmıştır. Çalışmadan elde edilen önemli sonuçlar ve bu alanda çalışacak diğer araştırmacılara yol göstermesi amacıyla gelecekte yapılabilecek çalışmalar için öneriler, aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

Sonuçlar:

- Farklı yüzeylerde delik delme prosesi sonuçları incelendiğinde en yüksek itme kuvvetinin düz yüzey delinirken meydana geldiği, bunu sırasıyla dışbükey kavisli yüzey ve içbükey kavisli yüzeyin izlediği görülmüştür.
- Kuvvet sonuçlarıyla uyumlu olarak, en yüksek delaminasyon hasarı düz yüzeyde meydana gelmiş, bunu ortalama olarak dışbükey ve içbükey kavisli yüzeyler izlemiş, ancak dışbükey ve içbükey yüzeyler arasında fazla bir fark oluşmamıştır.
- Kompozit plaka ve boruların delik delme karakteristikleri incelendiğinde, kompozit plakalar delinirken borulardan daha yüksek kuvvetler oluşmaktadır. Ayrıca filaman sarım kompozit boru delinirken rulo sarım boruya kıyasla daha yüksek kuvvetler oluşmaktadır.
- Kompozit plakalarda, kompozit borulara kıyasla daha yüksek delme kaynaklı delaminasyon hasarı oluşmaktadır. Borular arasında bir kıyaslama yapıldığında ise filaman sarımda aynı kesme koşullarında daha yüksek hasarlar oluşmaktadır.
- Destek kullanılarak yapılan delme işleminde, plaka ve filaman sarım boruda delme kaynaklı delaminasyon hasarı önemli oranda azalmaktadır. Rulo sarımda ise önemli bir iyileşme mevcut değildir. Filaman sarım boruda, destek kullanımı ile itme kuvvetleri önemli oranda artmazken, delaminasyon kayda değer biçimde

azalmıştır. Bu durum filaman sarım borunun işlenebilirliği için önemli bir bulgudur.

- Yüzey pürüzlülüğü sonuçları genel olarak değerlendirildiğinde, delik içinde en düşük yüzey pürüzlülük değeri plakada oluşurken, en yüksek pürüzlülük değeri filaman sarım boruda oluşmuştur.
- Tüm sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde, daha yüksek kuvvetler ve delme kaynaklı hasarlar oluşması sebebiyle kompozit plakaların işlenebilirliğinin borulara göre daha zor olduğu söylenebilir.
- Test edilen parametreler aralığında en az itme kuvveti, delik delme kaynaklı delaminasyon ve delik içi hasar oluşumu ve dolayısıyla en kaliteli delik 4500 dev/dk fener mili hızı ve 300 mm/dk ilerleme hızında delinen numunelerden elde edilirken en yüksek itme kuvveti, delik delme kaynaklı delaminasyon ve delik içi hasar oluşumu ve dolayısıyla en düşük kaliteli delik 1500 dev/dk fener mili hızı ve 900 mm/dk ilerleme hızında delinen numunelerde oluşmuştur.
- Filaman sarım kompozit borunun çevresel çekme yükü altındaki dayanımı ve birim uzama değeri rulo sarıma göre daha yüksektir. Özellikle filaman sarımın uzama değeri rulo sarımın yaklaşık iki katıdır.
- Çevresel çekme yükü altında kırılan filaman sarım boruda hasarlar daha geniş alana homojen bir şekilde yayılırken, rulo sarım boruda hasarlar daha lokalizedir. Her iki boruda da kırılma davranışı üzerinde tabaka içi ve tabakalar arası çatlaklar, delaminasyon ve elyaf-çekme hasar modları etkili olmuştur.
- Filaman sarım kompozit boruda en yüksek çekme dayanımı ortalama göre 4500 dev/dk, 300 mm/dk kesme parametreleri ile desteksiz koşulda delinen numunelerden elde edilirken bunu sırayla 1500 dev/dk, 900 mm/dk kesme parametreleri ile destekli koşulda delinmiş ve 1500 dev/dk, 900 mm/dk kesme parametreleri ile desteksiz koşulda delinmiş numuneler takip etmiştir. Ancak aynı kesme parametreleri ile desteksiz ve destekli koşulda delinen numunelerin dayanımları arasında önemli bir farklılık yoktur. Rulo sarımda ise tam tersi bir durum söz konusudur. Dolayısıyla delme kaynaklı hasarlar ve delik kalitesi filaman sarım kompozit borunun çekme dayanımını üzerinde etkiliyken rulo sarımda etkisizdir.
- Çekme dayanımları farklı olduğu için aynı yük altında filaman sarımın yorulma

dayanımı daha iyiyken normalize edilmiş gerilmeye ($\sigma_{maks}/\sigma_{çekme}$) göre değerlendirilme yapıldığında, rulo sarım borunun yorulma dayanımı filaman sarım borudan daha iyidir.

- S-N eğrilerine göre değerlendirildiğinde, filaman sarım boruda çok fazla farklılık oluşmasa da 4500 dev/dk, 300 mm/dk kesme parametreleri ile desteksiz koşulda delinen numunelerin yorulma dayanımlarının diğer koşullardan daha iyi olduğu söylenebilir. Öte yandan aynı kesme parametreleri ile desteksiz ve destekli koşulda delinen numunelerin S-N eğrileri birbirine oldukça benzerdir. Rulo sarım kompozit boruda ise çekme sonuçlarında olduğu gibi yine delme koşulları ile yorulma dayanımları arasında anlamlı bir ilişki saptanmamıştır.
- Yorulma testleri sırasında her iki kompozit boruda da %70 gerilme seviyesinde oluşan sıcaklıklar camsı geçiş sıcaklığını geçerken diğer gerilme seviyelerinde birkaç numune haricinde camsı geçişe ulaşılmadan kopma gerçekleşmiştir. Testler sırasında filaman sarım için %55 ve %50, rulo sarım için %60 ve %50 gerilme seviyelerinde sıcaklıklar belirli bir çevrime kadar hızla artmış, sonrasında ise artış hızı çok yavaşlamış hatta bazen sabit kalmıştır. Diğer gerilme seviyelerinde sıcaklık hep artma eğilimindedir. Öte yandan camsı geçiş sıcaklığına ulaşılmaya dahi malzemelerin her ikisinde de viskoelastik davranışın değiştiği DMA testi sonuçları ile doğrulanmıştır.
- Yorulma testleri sırasında kompozit boruda ilk hasar delik içinde başlamış ve delik ovalleşmiştir. Çevrim sayısı arttıkça delik içi hasarın tetiklediği yüzeyel çatlaklar oluşmuş ve bu çatlaklar numune kenarlarına doğru ilerlemiştir. Ardından çatlaklar tabaka içine yayılarak elyaf-matris ayrılması oluşmuş ve sonrasında şiddetli delaminasyonlar ile kopma gerçekleşmiştir. Çekme testindeki kırılma davranışına benzer şekilde filaman sarımda elyaf-matris ayrılması ve delaminasyon hasarları daha yoğun biçimde oluşup homojen bir dağılım gösterirken rulo sarımda daha az ayrılma gerçekleşmiş ayrıca delaminasyonlar tüm tabakalara yayılmadan ziyade daha çok alt ve üst tabakalarda oluşmuştur.
- Radyal basma yükü altında rulo sarım kompozit boru daha yüksek yüklere ve deplasmanlara ulaşarak filaman sarım kompozit boruya kıyasla daha iyi bir performans sergilemiştir.
- Çekme ve yorulma testlerinde olduğu gibi filaman sarım için en yüksek dayanım

4500 dev/dk, 300 mm/dk kesme parametreleri ile desteksiz koşulda delinen numunelerde elde edilmiş ancak rulo sarım için bir ilişki belirlenememiştir.

- Genel olarak değerlendirildiğinde statik çekme yükü altında filaman sarım, statik basma yükü altında rulo sarım kompozit boru ön plana çıkmaktadır. Çevresel çekme-çekme dinamik yükü altında ise daha az uzama yapması nedeniyle yine rulo sarım daha iyi bir davranış sergilemektedir. Öte yandan filaman sarım kompozit borunun mekanik davranışları delik delme koşullarından etkilenirken rulo sarım kompozit boru, geometrik düzensizlikler, üretim kaynaklı boşluklar ve reçine zengini bölgelerin varlığı sebebiyle delme parametrelerine karşı duyarsızdır. Rulo sarımdaki bu düzensizlikler mekanik davranış üzerinde delik delme kaynaklı hasarlardan daha baskındır.

Öneriler:

- Delme karakteristiği açısından değerlendirildiğinde, tasarımın izin verdiği ölçüde düz yüzey yerine dışbükey veya içbükey kavisli yüzeylerin tercih edilmesi önerilir.
- Kompozit borularda delik delme sırasında destek elemanı kullanmaktansa daha az hasar oluşturacak ve matrise zarar vermeyecek seviyede yüksek kesme hızı düşük ilerleme hızı kombinasyonu kullanılması önerilir.
- Delik delme prosesi ile halka çekme (disk ayırma) testi için numune hazırlanırken özellikle filaman sarım gibi düzgün bir iç yapıya sahip olan kompozit borularda dikkat edilmesi, aynı ve en az hasarı oluşturacak parametreler ile mümkünse sütunlu matkap tezgâhı yerine CNC gibi kesme parametrelerinin kontrol edilebildiği tezgahlar kullanılarak numunelerin delinmesi önerilir.
- Kullanılacak alan dikkate alındığında, statik çevresel çekme yüküne maruz kalacak yapılarda filaman sarım, dinamik çevresel çekme-çekme ve statik radyal basma yüküne maruz kalacak yapılar için rulo sarım kompozit borunun tercih edilmesi önerilir.
- Yorulma testlerinin mümkünse düşük frekanslarda yapılması, sıcaklık artışının yüksek olmaması için 10 Hz gibi yüksek frekanslara çıkılmaması önerilir.

6. KAYNAKLAR

- Aamir M, Tolouei-Rad M, Giasin K , Nosrati A, 2019, Recent advances in drilling of carbon fiber–reinforced polymers for aerospace applications: a review, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 105, 2289-2308.
- Abdul Nasir A A, Azmi A I , Khalil A N M, 2015, Measurement and optimisation of residual tensile strength and delamination damage of drilled flax fibre reinforced composites, *Measurement*, 75, 298-307.
- Abdullah M S, Abdullah A B , Sapuan S M, 2019, Review of hole-making technology for composites, Abdullah A B, Sapuan S M (Ed.), *Hole-Making and Drilling Technology for Composites (1-12)*, Woodhead Publishing, 227p, Duxford.
- Abrão A M, Faria P E, Rubio J C C, Reis P , Davim J P, 2007, Drilling of fiber reinforced plastics: A review, *Journal of Materials Processing Technology*, 186, 1-7.
- Ahmadi M, Johari M, Sadighi M , Esfandeh M, 2009, An experimental study on mechanical properties of GFRP braid-pultruded composite rods, *EXPRESS Polym Lett*, 3, 560-568.
- Alhashmy H, 2012, Fabrication of aluminium matrix composites (amcs) by squeeze casting technique using carbon fiber as reinforcement, University of Ottawa, Ottawa-Carleton Institute for Mechanical and Aerospace Engineering, Master of Applied Science, 83p, Ottawa.
- Allheily V, Lacroix F, Eichhorn A, Merlat L, L'Hostis G , Durand B, 2016, An experimental method to assess the thermo-mechanical damage of CFRP subjected to a highly energetic 1.07 μm -wavelength laser irradiation, *Composites Part B: Engineering*, 92, 326-331.
- Arul S, Samuel Raj D, Vijayaraghavan L, Malhotra S K , Krishnamurthy R, 2006, Modeling and Optimization of Process Parameters for Defect Toleranced Drilling of GFRP Composites, *Materials and Manufacturing Processes*, 21, 357-365.
- Arun J, Ansalam Raj T G, Reby Roy K E , Suresh S, 2022, Fatigue life, distortion behavior of AA 8011- nano B4C composite using simulated acoustic emission technique – An experimental and statistical appraisal, *International Journal of*

Fatigue, 164, Article number 107168.

ASTM D2412, 2002, Standard test method for determination of external loading characteristics of plastic pipe by parallel plate loading, ASTM, West Conshohocken, PA.

ASTM D5766, 2011, Standard test method for open-hole tensile strength of polymer matrix composite laminates, ASTM, West Conshohocken, PA.

ASTM D7028, 2015, Standard test method for glass transition temperature (DMA T_g) of polymer matrix composites by dynamic mechanical analysis (DMA), ASTM, West Conshohocken, PA.

ASTM D2290, 2016, Standard Test Method for Apparent Hoop Tensile Strength of Plastic or Reinforced Plastic Pipe, ASTM, West Conshohocken, PA.

Aydın M, 2019, Development of fiber reinforced cylindrical composite structures by filament winding technique, İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 66s, İzmir.

Azeem M, Ya H H, Alam M A, Kumar M, Stabla P, Smolnicki M, Gemi L, Khan R, Ahmed T, Ma Q, Sadique M R, Mokhtar A A , Mustapha M, 2022, Application of Filament Winding Technology in Composite Pressure Vessels and Challenges: A Review, Journal of Energy Storage, 49, 103468.

Bahar A M, 2009, Pultrüzyon yöntemiyle PMC üretimi ve üretim parametrelerinin nihai malzeme özelliklerine etkisi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 112s, İstanbul.

Basmacı G, Yoruk A S, Koklu U , Morkavuk S, 2017, Impact of Cryogenic Condition and Drill Diameter on Drilling Performance of CFRP, Applied Sciences, 7, Article number 667.

Beheshtizadeh N, Mostafapour A , Davoodi S, 2019, Three point bending test of glass/epoxy composite health monitoring by acoustic emission, Alexandria Engineering Journal, 58, 567-578.

Benyahia H, Tarfaoui M, El Moumen A, Ouinas D , Hassoon O H, 2018, Mechanical properties of offshoring polymer composite pipes at various temperatures,

Composites Part B: Engineering, 152, 231-240.

Błażejowski W, Barcikowski M, Lubecki M, Stabla P, Bury P, Stosiak M , Lesiuk G, 2021, The Mechanical Investigation of Filament-Wound CFRP Structures Subjected to Different Cooling Rates in Terms of Compressive Loading and Residual Stresses—An Experimental Approach, *Materials*, 14, Article number 1041.

Campos Rubio J, Abrao A M, Faria P E, Correia A E , Davim J P, 2008, Effects of high speed in the drilling of glass fibre reinforced plastic: Evaluation of the delamination factor, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 48, 715-720.

Cao S, Li H N, Huang W, Zhou Q, Lei T , Wu C, 2022, A delamination prediction model in ultrasonic vibration assisted drilling of CFRP composites, *Journal of Materials Processing Technology*, 302, Article number 117480.

Chawla K K, 1993, *Ceramic Matrix Composites*, Springer, 423p, New York.

Chen J F, Li S Q, Bisby L A , Ai J, 2011, FRP rupture strains in the split-disk test, *Composites Part B: Engineering*, 42, 962-972.

Chen W-C, 1997, Some experimental investigations in the drilling of carbon fiber-reinforced plastic (CFRP) composite laminates, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 37, 1097-1108.

Çelik A, Lazoglu I, Kara A , Kara F, 2015, Wear on SiAlON ceramic tools in drilling of aerospace grade CFRP composites, *Wear*, 338-339, 11-21.

Davim J P , Reis P, 2003, Study of delamination in drilling carbon fiber reinforced plastics (CFRP) using design experiments, *Composite Structures*, 59, 481-487.

Davim J P, Rubio J C , Abrao A M, 2007, A novel approach based on digital image analysis to evaluate the delamination factor after drilling composite laminates, *Composites Science and Technology*, 67, 1939-1945.

Denkena B, Boehnke D , Dege J H, 2008, Helical milling of CFRP–titanium layer compounds, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 1, 64-69.

Dogrusadik A , Kentli A, 2017, Comparative assessment of support plates' influences on

- delamination damage in micro-drilling of CFRP laminates, *Composite Structures*, 173, 156-167.
- Duan Q F, Li S X, Song P H, Cheng W, Cao D F , Hu H X, 2019, Effect of Drilling-Induced Delamination on Buckling Behavior of Open Hole Composite Laminate Specimens Under Compressive Loading, *Strength of Materials*, 51, 624-632.
- Durão L M P, Gonçalves D J S, Tavares J M R S, de Albuquerque V H C, Aguiar Vieira A , Torres Marques A, 2010, Drilling tool geometry evaluation for reinforced composite laminates, *Composite Structures*, 92, 1545-1550.
- Eggers F, Almeida J H S, Azevedo C B , Amico S C, 2019, Mechanical response of filament wound composite rings under tension and compression, *Polymer Testing*, 78, Article number 105951.
- El-Sonbaty I, Khashaba U A , Machaly T, 2004, Factors affecting the machinability of GFR/epoxy composites, *Composite Structures*, 63, 329-338.
- Enemuoh E U, El-Gizawy A S , Chukwujekwu Okafor A, 2001, An approach for development of damage-free drilling of carbon fiber reinforced thermosets, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 41, 1795-1814.
- Eneyew E D , Ramulu M, 2014, Experimental study of surface quality and damage when drilling unidirectional CFRP composites, *Journal of Materials Research and Technology*, 3, 354-362.
- Erdiller E S, 2004, Experimental investigation for mechanical properties of filament-wound composite tubes, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 149s, Ankara.
- Feito N, Muñoz-Sánchez A, Díaz-Álvarez A , Miguelez M H, 2019, Multi-objective optimization analysis of cutting parameters when drilling composite materials with special geometry drills, *Composite Structures*, 225, Article number 111187.
- Feng Z , Jiao F, 2022, Study on exit damage characteristics of ultrasonic vibration assisted drilling of CFRP, *Advances in Mechanical Engineering*, 14.
- Friedrich K , Almajid A A, 2013, Manufacturing Aspects of Advanced Polymer Composites for Automotive Applications, *Applied Composite Materials*, 20, 107-

128.

- Friedrich K, 2016, Carbon fiber reinforced thermoplastic composites for future automotive applications, AIP Conference Proceedings, 1736, Article number 020001.
- Gao T, Li C, Wang Y, Liu X, An Q, Li H N, Zhang Y, Cao H, Liu B, Wang D, Said Z, Debnath S, Jamil M, Ali H M , Sharma S, 2022, Carbon fiber reinforced polymer in drilling: From damage mechanisms to suppression, Composite Structures, 286, Article number 115232.
- Gao Y, Guan Y, Li K, Liu M, Zhang C , Song J, 2019, Failure behaviors of C/C composite tube under lateral compression loading, Nuclear Engineering and Technology, 51, 1822-1827.
- Geier N, Davim J P , Szalay T, 2019, Advanced cutting tools and technologies for drilling carbon fibre reinforced polymer (CFRP) composites: A review, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 125, 105552.
- Geier N, Póka G, Jacsó Á , Pereszlai C, 2022, A method to predict drilling-induced burr occurrence in chopped carbon fibre reinforced polymer (CFRP) composites based on digital image processing, Composites Part B: Engineering, 242, Article number 110054.
- Gemi D S, Şahin Ö S , Gemi L, 2021, Experimental investigation of the effect of diameter upon low velocity impact response of glass fiber reinforced composite pipes, Composite Structures, 275, Article number 114428.
- Gemi D S, Şahin Ö S , Gemi L, 2022, Experimental investigation of axial compression behavior after low velocity impact of glass fiber reinforced filament wound pipes with different diameter, Composite Structures, 280, Article number 114929.
- Gemi L, Tarakçıoğlu N, Akdemir A , Şahin Ö S, 2009, Progressive fatigue failure behavior of glass/epoxy (± 75)₂ filament-wound pipes under pure internal pressure, Materials & Design, 30, 4293-4298.
- Gemi L, Kayrıçı M, Uludağ M, Gemi D S , Şahin Ö S, 2018, Experimental and statistical analysis of low velocity impact response of filament wound composite pipes, Composites Part B: Engineering, 149, 38-48.

- Gemi L, Morkavuk S, Köklü U , Gemi D S, 2019, An experimental study on the effects of various drill types on drilling performance of GFRP composite pipes and damage formation, *Composites Part B: Engineering*, 172, 186-194.
- Gemi L, Köklü U, Yazman Ş , Morkavuk S, 2020a, The effects of stacking sequence on drilling machinability of filament wound hybrid composite pipes: Part-1 mechanical characterization and drilling tests, *Composites Part B: Engineering*, 186, Article number 107787.
- Gemi L, Morkavuk S, Köklü U , Yazman Ş, 2020b, The effects of stacking sequence on drilling machinability of filament wound hybrid composite pipes: Part-2 damage analysis and surface quality, *Composite Structures*, 235, Article number 111737.
- Geng D, Liu Y, Shao Z, Lu Z, Cai J, Li X, Jiang X , Zhang D, 2019, Delamination formation, evaluation and suppression during drilling of composite laminates: A review, *Composite Structures*, 216, 168-186.
- Giasin K , Ayvar-Soberanis S, 2017, An Investigation of burrs, chip formation, hole size, circularity and delamination during drilling operation of GLARE using ANOVA, *Composite Structures*, 159, 745-760.
- Giasin K, Barouni A, Dhakal H N, Featherson C, Redouane Z, Morkavuk S , Koklu U, 2021, Microstructural investigation and hole quality evaluation in S2/FM94 glass-fibre composites under dry and cryogenic conditions, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 40, 273-293.
- Gök Z, 2022, Prepreg kompozit boruların düşük hızlı darbe cevabına karbon nanotüp takviyesinin etkisinin incelenmesi, Necmettin Erbakan Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 77s, Konya.
- Grilo T J, Paulo R M F, Silva C R M , Davim J P, 2013, Experimental delamination analyses of CFRPs using different drill geometries, *Composites Part B: Engineering*, 45, 1344-1350.
- Haddad M, Zitoun R, Bougherara H, Eyma F , Castanié B, 2014, Study of trimming damages of CFRP structures in function of the machining processes and their impact on the mechanical behavior, *Composites Part B: Engineering*, 57, 136-143.
- Haeger A, Meinhard D, Lissek F, Kaufeld M, Hoffmann M J, Schneider G , Knoblauch

- V, 2016, Interaction between laminate quality, drilling-induced delamination and mechanical properties in machining of carbon fibre reinforced plastic (CFRP), *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, 47, 997-1014.
- Haeger A, Grudenik M, Hoffmann M J , Knoblauch V, 2019, Effect of drilling-induced damage on the open hole flexural fatigue of carbon/epoxy composites, *Composite Structures*, 215, 238-248.
- Hamdoun Z, Guillaumat L , Lataillade J-L, 2006, Influence of the drilling quality on the fatigue compression behaviour of carbon epoxy laminates, *International Journal of Fatigue*, 28, 1-8.
- Hasan Z, 2020, *Tooling for Composite Aerospace Structures: Manufacturing and Applications*, Butterworth-Heinemann, 277p, Oxford.
- Heidary H, Karimi N Z , Minak G, 2018, Investigation on delamination and flexural properties in drilling of carbon nanotube/polymer composites, *Composite Structures*, 201, 112-120.
- Heidary H , Mehrpouya M A, 2019, Effect of backup plate in drilling of composite laminates, analytical and experimental approaches, *Thin-Walled Structures*, 136, 323-332.
- Ho-Cheng H , Dharan C K H, 1990, Delamination During Drilling in Composite Laminates, *Journal of Engineering for Industry*, 112, 236-239.
- Hoa S V, 2009, *Principles of the manufacturing of composite materials*, DEStech Publications, Inc., 337p, Lancaster, Pennsylvania.
- Hocheng H, Tsao C C, Liu C S , Chen H A, 2014, Reducing drilling-induced delamination in composite tube by magnetic colloid back-up, *CIRP Annals*, 63, 85-88.
- Hocheng H, Tsao C C , Chen H T, 2016, Utilizing internal icing force to reduce delamination in drilling composite tubes, *Composite Structures*, 139, 36-41.
- Hsissou R, Seghiri R, Benzekri Z, Hilali M, Rafik M , Elharfi A, 2021, Polymer composite materials: A comprehensive review, *Composite Structures*, 262, 113640.
- Isbilir O , Ghassemieh E, 2012, Delamination and wear in drilling of carbon-fiber

- reinforced plastic composites using multilayer TiAlN/TiN PVD-coated tungsten carbide tools, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 31, 717-727.
- Jain S , Yang D C H, 1993, Effects of Feedrate and Chisel Edge on Delamination in Composites Drilling, *Journal of Engineering for Industry*, 115, 398-405.
- Jia Z, Fu R, Niu B, Qian B, Bai Y , Wang F, 2016, Novel drill structure for damage reduction in drilling CFRP composites, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 110, 55-65.
- Jia Z, Chen C, Wang F , Zhang C, 2020, Analytical study of delamination damage and delamination-free drilling method of CFRP composite, *Journal of Materials Processing Technology*, 282, Article number 116665.
- John K M , Thirumalai Kumaran S, 2020, Backup support technique towards damage-free drilling of composite materials: A review, *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, 3, 357-364.
- Joseph E , Perreux D, 1994, Fatigue behaviour of glass-fibre/epoxy-matrix filament-wound pipes: Tension loading tests and results, *Composites Science and Technology*, 52, 469-480.
- Kara M, Kirici M , Cagan S C, 2019, Effects of the Number of Fatigue Cycles on the Hoop Tensile Strength of Glass Fiber/Epoxy Composite Pipes, *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 19, 1181-1186.
- Karpat Y, Değer B , Bahtiyar O, 2012, Drilling thick fabric woven CFRP laminates with double point angle drills, *Journal of Materials Processing Technology*, 212, 2117-2127.
- Kaybal H B, Unuvar A, Kaynak Y , Avcı A, 2020, Evaluation of boron nitride nanoparticles on delamination in drilling carbon fiber epoxy nanocomposite materials, *Journal of Composite Materials*, 54, 215-227.
- Kaynak C , Mat O, 2001, Uniaxial fatigue behavior of filament-wound glass-fiber/epoxy composite tubes, *Composites Science and Technology*, 61, 1833-1840.
- Kaynak C, Salim Erdiller E, Parnas L , Senel F, 2005, Use of split-disk tests for the process parameters of filament wound epoxy composite tubes, *Polymer Testing*,

24, 648-655.

- Khanna N, Pusavec F, Agrawal C , Krolczyk G M, 2020, Measurement and evaluation of hole attributes for drilling CFRP composites using an indigenously developed cryogenic machining facility, *Measurement*, 154, Article number 107504.
- Khashaba U A, Seif M A , Elhamid M A, 2007a, Drilling analysis of chopped composites, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 38, 61-70.
- Khashaba U A, Selmy A I, El-Sonbaty I A , Megahed M, 2007b, Behavior of notched and unnotched $[0/\pm 30/\pm 60/90]_s$ GFR/EPOXY composites under static and fatigue loads, *Composite Structures*, 81, 606-613.
- Khashaba U A, El-Sonbaty I A, Selmy A I , Megahed A A, 2010, Machinability analysis in drilling woven GFR/epoxy composites: Part I – Effect of machining parameters, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 41, 391-400.
- Khashaba U A, 2022, A novel approach for characterization of delamination and burr areas in drilling FRP composites, *Composite Structures*, 290, Article number 115534.
- Kim G, Kim T-G, Lee S-W , Min B-K, 2022, Effect of workpiece preheating on tool wear and delamination at the hole exit in high feed drilling of carbon fiber reinforced plastics with diamond-coated tools, *Journal of Manufacturing Processes*, 74, 233-243.
- Kolesnikov B Y , Herbeck L, 2004, Carbon fiber composite airplane fuselage: concept and analysis, *ILA International Conference*, Berlin.
- Kong L, Gao D , Lu Y, 2021, Novel tool for damage reduction in orbital drilling of CFRP composites, *Composite Structures*, 273, Article number 114338.
- Köklü U, Demir O, Avcı A , Etyemez A, 2017, Drilling performance of functionally graded composite: Comparison with glass and carbon/epoxy composites, *Journal of Mechanical Science and Technology*, 31, 4703-4709.
- Köklü U, Mayda M, Morkavuk S, Avcı A , Demir O, 2019, Optimization and prediction of thrust force, vibration and delamination in drilling of functionally graded composite using Taguchi, ANOVA and ANN analysis, *Materials Research*

- Express, 6, Article number 085335.
- König W, Wulf C, Graß P , Willerscheid H, 1985, Machining of Fibre Reinforced Plastics, CIRP Annals, 34, 537-548.
- Krishnan P, Abdul Majid M S, Afendi M, Gibson A G , Marzuki H F A, 2015, Effects of winding angle on the behaviour of glass/epoxy pipes under multiaxial cyclic loading, Materials & Design, 88, 196-206.
- Krishnaraj V, Prabukarthi A, Ramanathan A, Elanghovan N, Senthil Kumar M, Zitoune R , Davim J P, 2012, Optimization of machining parameters at high speed drilling of carbon fiber reinforced plastic (CFRP) laminates, Composites Part B: Engineering, 43, 1791-1799.
- Krishnaraj V, Zitoune R , Davim J P, 2013, Drilling of polymer-matrix composites, Springer, 110p, Heidelberg.
- Kubit A, Drabczyk M, Trzepieciniski T, Bochnowski W, Kaščák L , Slota J, 2020, Fatigue Life Assessment of Refill Friction Stir Spot Welded Alclad 7075-T6 Aluminium Alloy Joints, Metals, 10, Article number 633.
- Lazar M-B , Xirouchakis P, 2011, Experimental analysis of drilling fiber reinforced composites, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 51, 937-946.
- Lee D G , Suh N P, 2006, Axiomatic design and fabrication of composite structures: applications in robots, machine tools, and automobiles, Oxford University Press, 709p, New York.
- Lee J H, Ge J C , Song J H, 2021, Study on Burr Formation and Tool Wear in Drilling CFRP and Its Hybrid Composites, Applied Sciences, 11, Article number 384.
- Li S, Dai L, Li C, Chen R, Qiu X, Li P , Jo Ko T, 2022a, Prediction model of chisel edge thrust force and material damage mechanism for interlaminar-direction drilling of UD-CFRP composite laminates, Composite Structures, 298, Article number 116023.
- Li S, Zou S, Dai L, Zhou Y, Qiu X, Li C, Li P , Ko T J, 2022b, Damage mechanism of carbon fiber reinforced plastic pipe based on reverse and forward curvature

- drilling, *Composite Structures*, 292, Article number 115700.
- Lih T C , Azmi A I, 2021, Thrust Force Analyses in Drilling FRP Composites, Hameed Sultan M T, Azmi A I, Majid M S A, Jamir M R M, Saba N (Ed.), *Machining and Machinability of Fiber Reinforced Polymer Composites (27-62)*, Springer Singapore, 335p, Singapore.
- Manoj Prabhakar M, Rajini N, Ayrilmis N, Mayandi K, Siengchin S, Senthilkumar K, Karthikeyan S , Ismail S O, 2019, An overview of burst, buckling, durability and corrosion analysis of lightweight FRP composite pipes and their applicability, *Composite Structures*, 230, 111419.
- Meinhard D, Haeger A , Knoblauch V, 2021, Drilling induced defects on carbon fiber-reinforced thermoplastic polyamide and their effect on mechanical properties, *Composite Structures*, 256, Article number 113138.
- Merino-Pérez J L, Royer R, Merson E, Lockwood A, Ayvar-Soberanis S , Marshall M B, 2016, Influence of workpiece constituents and cutting speed on the cutting forces developed in the conventional drilling of CFRP composites, *Composite Structures*, 140, 621-629.
- Miguel Silva J, Ferreira F, Abreu S M, Matos J E , Durão L M P, 2017, Correlation of drilling damage with mechanical strength: A geometrical approach, *Composite Structures*, 181, 306-314.
- Milwich M, 2016, Pultrusion of braids, Kyosev Y (Ed.), *Advances in Braiding Technology (355-381)*, Woodhead Publishing, 608p.
- Mohan N S, Kulkarni S M , Ramachandra A, 2007, Delamination analysis in drilling process of glass fiber reinforced plastic (GFRP) composite materials, *Journal of Materials Processing Technology*, 186, 265-271.
- Morkavuk S, Köklü U , Aslantaş K, 2022a, An Experimental Comprehensive Analysis of Drilling Carbon Fiber Reinforced Plastic Tubes and Comparison With Carbon Fiber Reinforced Plastic Plate, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, doi:10.1177/07316844221122041, In press.
- Morkavuk S, Köklü U , Aslantaş K, 2022b, An experimental investigation on the influence of different surface curvatures in drilling machinability of carbon fiber

- reinforced plastic, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 236, 10953-10968.
- Naderi M, Kahirdeh A , Khonsari M M, 2012, Dissipated thermal energy and damage evolution of Glass/Epoxy using infrared thermography and acoustic emission, Composites Part B: Engineering, 43, 1613-1620.
- Naderi M , Khonsari M M, 2013, On the role of damage energy in the fatigue degradation characterization of a composite laminate, Composites Part B: Engineering, 45, 528-537.
- Nixon-Pearson O J, Hallett S R, Withers P J , Rouse J, 2013, Damage development in open-hole composite specimens in fatigue. Part 1: Experimental investigation, Composite Structures, 106, 882-889.
- Oncul G, 2016, Opportunities in the design stage of composite components to reduce weight during assembly operations, Njuguna J (Ed.), Lightweight composite structures in transport: design, manufacturing, analysis and performance (53-74), Woodhead publishing, 453p, Duxford.
- Palanikumar K, Campos Rubio J, Abrao A M, Esteves Correia A , Davim J P, 2008, Influence of Drill Point Angle in High Speed Drilling of Glass Fiber Reinforced Plastics, Journal of Composite Materials, 42, 2585-2597.
- Panchagnula K K , Palaniyandi K, 2018, Drilling on fiber reinforced polymer/nanopolymer composite laminates: a review, Journal of Materials Research and Technology, 7, 180-189.
- Patel P , Chaudhary V, 2021, Damage free drilling of carbon fibre reinforced composites – a review, Australian Journal of Mechanical Engineering, doi:10.1080/14484846.2021.1913851, In press.
- Pereszlai C, Geier N, Poór D I, Balázs B Z , Póka G, 2021, Drilling fibre reinforced polymer composites (CFRP and GFRP): An analysis of the cutting force of the tilted helical milling process, Composite Structures, 262, Article number 113646.
- Persson E, Eriksson I , Zackrisson L, 1997, Effects of hole machining defects on strength and fatigue life of composite laminates, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 28, 141-151.

- Qiu X-Y, Li P-N, Tang L-y, Li C-p, Niu Q-L, Li S-J, Tang S-w , Ko T J, 2022a, Determination of the optimal feed rate for step drill bit drilling CFRP pipe based on exit damage analysis, *Journal of Manufacturing Processes*, 83, 246-256.
- Qiu X, Li P, Niu Q, Chen A, Ouyang P, Li C , Ko T J, 2018, Influence of machining parameters and tool structure on cutting force and hole wall damage in drilling CFRP with stepped drills, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 97, 857-865.
- Qiu X, Li P, Li C, Niu Q, Li S, Ko T J , Tang L, 2022b, Tool life evaluation of CFRP drilling with three kinds of drill, *Journal of Mechanical Science and Technology*, 36, 3643-3651.
- Rafiee R, 2012, Apparent hoop tensile strength prediction of glass fiber-reinforced polyester pipes, *Journal of Composite Materials*, 47, 1377-1386.
- Rafiee R, 2016, On the mechanical performance of glass-fibre-reinforced thermosetting-resin pipes: A review, *Composite Structures*, 143, 151-164.
- Rafiee R , Abbasi F, 2020, Numerical and Experimental Analyses of the Hoop Tensile Strength of Filament-Wound Composite Tubes, *Mechanics of Composite Materials*, 56, 423-436.
- Rafiee R, Abbasi F , Maleki S, 2020, Fatigue analysis of a composite ring: Experimental and theoretical investigations, *Journal of Composite Materials*, 54, 4011-4024.
- Rajak D K, Pagar D D, Menezes P L , Linul E, 2019, Fiber-Reinforced Polymer Composites: Manufacturing, Properties, and Applications, *Polymers*, 11, Article number 1667.
- Rajak D K, Wagh P H , Linul E, 2021, Manufacturing Technologies of Carbon/Glass Fiber-Reinforced Polymer Composites and Their Properties: A Review, *Polymers*, 13, 3721.
- Rajamuneeswaran S, Jayabal S, Nagaprasad N, Veerappan G, Jule L T , Krishnaraj R, 2022, Artificial Neural Network Modeling of Abrasion Loss and Surface Roughness of Crab Carapace Impregnated Coir Vinyl Ester Composites, *Advances in Materials Science and Engineering*, 2022, Article number 2158210.

- Riedel U, 2012, Biocomposites: Long Natural Fiber-Reinforced Biopolymers, Matyjaszewski K, Möller M (Ed.), Polymer Science: A Comprehensive Reference (295-315), Elsevier, 7760p, Amsterdam.
- Safarabadi M , Sardar M, 2020, Numerical study of GFRP joints bearing strength reduction due to drilling-induced delamination, Journal of Composite Materials, 54, 2185-2194.
- Saghir F, Gohari S, Mozafari F, Moslemi N, Burvill C, Smith A , Lucas S, 2021, Mechanical characterization of particulated FRP composite pipes: A comprehensive experimental study, Polymer Testing, 93, Article number 107001.
- Sahami poor dehghan M , Heidary H, 2020, Parametric study on drilling of GFRP composite pipe produced by filament winding process in different backup condition, Composite Structures, 234, Article number 111661.
- Saleem M, Toubal L, Zitoune R , Bougherara H, 2013, Investigating the effect of machining processes on the mechanical behavior of composite plates with circular holes, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 55, 169-177.
- Saleem M, Zitoune R, El Sawi I , Bougherara H, 2015, Role of the surface quality on the mechanical behavior of CFRP bolted composite joints, International Journal of Fatigue, 80, 246-256.
- Sathishkumar T, Satheeshkumar S , Naveen J, 2014, Glass fiber-reinforced polymer composites – a review, Journal of Reinforced Plastics and Composites, 33, 1258-1275.
- Seif M A, Khashaba U A , Rojas-Oviedo R, 2007, Measuring delamination in carbon/epoxy composites using a shadow moiré laser based imaging technique, Composite Structures, 79, 113-118.
- Shabani P, Taheri-Behrooz F, Maleki S , Hasheminasab M, 2019, Life prediction of a notched composite ring using progressive fatigue damage models, Composites Part B: Engineering, 165, 754-763.
- Shahkhosravi N A, Yousefi J, Najafabadi M A, Burvill C , Minak G, 2019, Fatigue life reduction of GFRP composites due to delamination associated with the introduction of functional discontinuities, Composites Part B: Engineering, 163,

536-547.

- Sharma S, 2021, Composite Materials: Mechanics, Manufacturing and Modeling, CRC Press, 535p, Boca Raton, FL.
- Shi Q, Liu J, Liu W, Wang F , Wang Y, 2019, Barker-coded modulation laser thermography for CFRP laminates delamination detection, *Infrared Physics & Technology*, 98, 55-61.
- Shuaipu W , Jie L, 2022, The study of CFRP variable feed drilling method based on sinusoidal curve, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 120, 6029-6039.
- Singh I , Bhatnagar N, 2006, Drilling-induced damage in uni-directional glass fiber reinforced plastic (UD-GFRP) composite laminates, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 27, 877-882.
- Sorrentino L, Turchetta S , Bellini C, 2018, A new method to reduce delaminations during drilling of FRP laminates by feed rate control, *Composite Structures*, 186, 154-164.
- Subaşı S, Eren Ş, Subaşı A , Güner Ö, 2014, Cam Elyaf Takviyeli Polimer (CTP) Boruların Üretimi, Sektördeki Kullanım Alanları ve Performans Değerlendirmesi, *El-Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi*, 1, 1-18.
- Supian A B M, Sapuan S M, Zuhri M Y M, Zainudin E S , Ya H H, 2018, Hybrid reinforced thermoset polymer composite in energy absorption tube application: A review, *Defence Technology*, 14, 291-305.
- Tan C L, Azmi A I , Muhammad N, 2016, Delamination and Surface Roughness Analyses in Drilling Hybrid Carbon/Glass Composite, *Materials and Manufacturing Processes*, 31, 1366-1376.
- Tao C, Qiu J, Yao W , Ji H, 2016, The effect of drilling-induced delamination on tensile strength and prediction of residual strength of carbon fiber-reinforced polymer laminate, *Journal of Composite Materials*, 50, 3373-3384.
- Tao J, Li F, Zhao Q , Zhang D, 2017, Influence of off-axis ply orientation on the axial compression behaviour of CFRP tubes, *Journal of Reinforced Plastics and*

Composites, 36, 399-413.

- Tarakçıoğlu N, Gemi L , Yapici A, 2005, Fatigue failure behavior of glass/epoxy $\pm 55^\circ$ filament wound pipes under internal pressure, Composites Science and Technology, 65, 703-708.
- Tsao C C , Hocheng H, 2004, Taguchi analysis of delamination associated with various drill bits in drilling of composite material, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 44, 1085-1090.
- Turki Y, Habak M, Velasco R, Aboura Z, Khellil K , Vantomme P, 2014, Experimental investigation of drilling damage and stitching effects on the mechanical behavior of carbon/epoxy composites, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 87, 61-72.
- Van Der Sypt P, Chérif M , Bois C, 2017, Analysis of the fatigue behaviour of laminated composite holes subjected to pin-bearing loads, International Journal of Fatigue, 103, 86-98.
- Vassilopoulos A P , Keller T, 2011, Fatigue of fiber-reinforced composites, Springer, 237p, London.
- Voss R, Henerichs M , Kuster F, 2016, Comparison of conventional drilling and orbital drilling in machining carbon fibre reinforced plastics (CFRP), CIRP Annals, 65, 137-140.
- Wang C, Cheng K, Rakowski R, Greenwood D , Wale J, 2017, Comparative studies on the effect of pilot drillings with application to high-speed drilling of carbon fibre reinforced plastic (CFRP) composites, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 89, 3243-3255.
- Wang H, Zhang X , Duan Y, 2022, Investigating the Effect of Low-Temperature Drilling Process on the Mechanical Behavior of CFRP, Polymers, 14, Article number 1034.
- Wang X, Kwon P Y, Sturtevant C, Kim D , Lantrip J, 2013, Tool wear of coated drills in drilling CFRP, Journal of Manufacturing Processes, 15, 127-135.
- Xu J, Li C, Mi S, An Q , Chen M, 2018, Study of drilling-induced defects for CFRP

- composites using new criteria, *Composite Structures*, 201, 1076-1087.
- Xu J, Lin T, Davim J P, Chen M , El Mansori M, 2021, Wear behavior of special tools in the drilling of CFRP composite laminates, *Wear*, 476, Article number 203738.
- Xu J, Yin Y, Paulo Davim J, Li L, Ji M, Geier N , Chen M, 2022, A critical review addressing drilling-induced damage of CFRP composites, *Composite Structures*, 294, Article number 115594.
- Yazman Ş, 2021, The effects of back-up on drilling machinability of filament wound GFRP composite pipes: Mechanical characterization and drilling tests, *Journal of Manufacturing Processes*, 68, 1535-1552.
- Yenigun B , Kilickap E, 2018, Prediction of the Tensile Load of Drilled CFRP by Artificial Neural Network, *Applied Sciences*, 8, Article number 549.
- Yenigun B , Kilickap E, 2021, Influence of hole quality on fatigue life of drilled CFRP with the different ply orientation angle, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 43, Article number 20.
- Zarif Karimi N, Heidary H, Minak G , Ahmadi M, 2013, Effect of the drilling process on the compression behavior of glass/epoxy laminates, *Composite Structures*, 98, 59-68.
- Zarif Karimi N, Heidary H, Fotouhi M , Minak G, 2017, Experimental analysis of GFRP laminates subjected to compression after drilling, *Composite Structures*, 169, 144-152.
- Zhang Y , Xu X, 2021, Predicting the delamination factor in carbon fibre reinforced plastic composites during drilling through the Gaussian process regression, *Journal of Composite Materials*, 55, 2061-2068.
- Zheng K, Dong S , Liao W, 2019, Investigation on thrust force in rotary ultrasonic drilling of CFRP using Brad drill, *Machining Science and Technology*, 23, 971-984.
- Zitoune R, Crouzeix L, Collombet F, Tamine T , Grunevald Y H, 2011, Behaviour of composite plates with drilled and moulded hole under tensile load, *Composite Structures*, 93, 2384-2391.

İnternet Kaynakları

- 1-<https://goodwinds.com/production-processes/carbon-wrapping/>, 16.11.2022
- 2-<https://www.angliacomposites.co.uk/products/pultruded-profiles/>, 16.11.2022
- 3- <https://www.taegutec.com>, 16.11.2022



- Köklü U, Koçar O, Morkavuk S, Giasin K, Ayer Ö, 2022, Influence of extrusion parameters on drilling machinability of AZ31 magnesium alloy, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, 236, 2082-2094, doi:10.1177/09544062221110466.
- Koklu U, Morkavuk S, Featherston C, Haddad M, Sanders D, Aamir M, Pimenov D Y, Giasin K, 2021, The effect of cryogenic machining of S2 glass fibre composite on the hole form and dimensional tolerances, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 115, 125–140, doi:10.1007/s00170-021-07150-y.
- Giasin K, Dad A, Brousseau E, Pimenov D, Mia M, Morkavuk S, Koklu U, 2021, The effects of through tool cryogenic machining on the hole quality in GLARE® fibre metal laminates, *Journal of Manufacturing Processes*, 64, 996-1012, doi: 10.1016/j.jmapro.2021.02.010.
- Giasin K, Barouni A, Dhakal H N, Featherston C, Redouane Z, Morkavuk S, Köklü U, 2021, Microstructural investigation and hole quality evaluation in S2/FM94 glass-fibre composites under dry and cryogenic conditions, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 40, 273-293, doi:10.1177/0731684420958479.
- Yazman Ş, Köklü U, Urtekin L, Morkavuk S, Gemi L, 2020, Experimental study on the effects of cold chamber die casting parameters on high-speed drilling machinability of casted AZ91 alloy, *Journal of Manufacturing Processes*, 57, 136-152, doi:10.1016/j.jmapro.2020.05.050.
- Gemi L, Köklü U, Yazman Ş, Morkavuk S, 2020, The effects of stacking sequence on drilling machinability of filament wound hybrid composite pipes: Part-1 mechanical characterization and drilling tests, *Composites Part B: Engineering*, 186, Article number: 107787, doi: 10.1016/j.compositesb.2020.107787.
- Gemi L, Morkavuk S, Köklü U, Yazman Ş, 2020, The effects of stacking sequence on drilling machinability of filament wound hybrid composite pipes: Part-2 damage analysis and surface quality, *Composite Structures*, 235, Article number:111737, doi: 10.1016/j.compstruct.2019.111737.
- Koklu U, Morkavuk S, 2019, Cryogenic drilling of carbon fiber-reinforced composite (CFRP), *Surface Review and Letters*, 26, Article number: 1950060, doi:

10.1142/S0218625X19500604.

Gemi L, Morkavuk S, Köklü U, Gemi D S, 2019, An experimental study on the effects of various drill types on drilling performance of GFRP composite pipes and damage formation, Composites Part B: Engineering, 172, 186-194, 10.1016/j.compositesb.2019.05.023.

Köklü U, Mayda M, Morkavuk S, Avcı A, Demir O, 2019, Optimization and prediction of thrust force, vibration and delamination in drilling of functionally graded composite using Taguchi, ANOVA and ANN analysis. Materials Research Express, 6, Article number:085335, doi: 10.1088/2053-1591/ab2617

Koklu U, Morkavuk S, Urtekin L, 2019, Effects of the drill flute number on drilling of a casted AZ91 magnesium alloy, Materials Testing, 61, 260-266, doi: 10.3139/120.111315.

Morkavuk S, Köklü U, Bağcı M, Gemi L, 2018, Cryogenic machining of carbon fiber reinforced plastic (CFRP) composites and the effects of cryogenic treatment on tensile properties: A comparative study, Composites Part B: Engineering, 147, 1-11, doi: 10.1016/j.compositesb.2018.04.024.

Basmacı G, Yoruk A S, Koklu U, Morkavuk S, 2017, Impact of cryogenic condition and drill diameter on drilling performance of CFRP, Applied Sciences, 7, Article number: 667, doi: 10.3390/app7070667.

Uluslararası bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitaplarında (proceedings) basılan bildiriler:

Köklü U, Morkavuk S, Demirbaş A, Uysal A, 2019, Experimental Investigation of the Effect of HSS and Carbide Tools on Thrust Force and Torque for Drilling AISI 304 Stainless Steel Materials in Dry Conditions, The International Aluminium-Themed Engineering and Natural Sciences Conference “IATENS-2019”, 4-6 October, Seydişehir/Konya. (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum).

Morkavuk S, Köklü U, Pınarbaşı M, 2019, Experimental Investigation of the Effect of HSS and Carbide Tools on Wear, Surface Roughness and Chip Formation in Dry

Drilling of AISI 304 Stainless Steel Material, The International Aluminium-Themed Engineering and Natural Sciences Conference “IATENS-2019”, 4-6 October, Seydişehir/Konya. (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum).

Basmacı G, Yörük A S, Morkavuk S, Köklü U, 2018, The effects of drill diameter on dry and cryogenic drilling of CFRP, 1st International Symposium on Light Alloys and Composite Materials (ISLAC’18), March 22-24, Karabük. (Özet Bildiri/Sözlü Sunum)

Morkavuk S, Köklü U, 2017, Karbon Fiber Takviyeli Plastiklerin Kuru ve Kriyojenik Koşulda Helisel Frezelenme Performansının Araştırılması, 8.Uluslararası Talaşlı İmalat Sempozyumu, 2-4 Kasım, Antalya. (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum)

Morkavuk S, Köklü U, 2017, The Effects of Various Drill Types on Delamination Occurred During Drilling of CFRP, 22nd International Scientific Conference “MECHANIKA-2017”, May 19, Kaunas. (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum)

Köklü U, Dağtekin E, Morkavuk S, 2017, Milling of Elastomer under Dry and Cryogenic Condition, 22nd International Scientific Conference “MECHANIKA-2017”, May 19, Kaunas. (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum)

Köklü U, Morkavuk S, 2017, Effect of various drill bits on thrust force in drilling of carbon fiber reinforced plastic, International Conference on Engineering Technology and Innovation “ICETI”, March 22-26, Sarajevo. (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum)

Morkavuk S, Köklü U, Bağcı M, 2016, Karbon fiber takviyeli kompozit malzemelerin yüksek ilerleme hızı ile kuru ve kriyojenik koşullarda frezelenmesi, 7. Uluslararası talaşlı imalat sempozyumu UTIS 2016, 3-5 Kasım, İstanbul. (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum)

Köklü U, Morkavuk S, 2016, Drilling Of Carbon Fiber Reinforced Plastics Under The Dry and Cryogenic Machining Conditions, The 17th International Conference on Machine Design and Production, 12-15 July, Bursa. (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum)

Morkavuk S, Köklü U, Bağcı M, 2016, Milling of Carbon Fiber Reinforced Plastics In Dry and Cryogenic Machining Conditions, The 17th International Conference on

Machine Design and Production, 12-15 July, Bursa. (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum)

Köklü U, Kına M, Morkavuk S, 2016, Experimental study on cylindrical grinding with helical grooves wheels, 21st International Scientific Conference "Mechanika 2016", 12-13 May, Kaunas. (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum)

EKLER

EK 1. Kompozitlerin üretiminde kullanılan takviye elemanı ve reçinenin özellikleri

Filaman sarım için kullanılan karbon elyaf özellikleri		
Özellik	Değer	Birim
Çekme dayanımı	4900	MPa
Çekme modülü	250	GPa
Gerinim	2,0	%
Yoğunluk	1,79	g/cm ³
Akma	800	g/1000m

Prepreg için kullanılan -45/45 biaxial karbon kumaş özellikleri		
Tabaka	Elyaf tipi	Alansal ağırlık
0°	1600 Tex – 24K	201 g/m ²
90°	1600 Tex – 24K	201 g/m ²
Dikiş	76 Dtex	5 g/m ²
Toplam:407 g/m ² (± %5)		

Filaman sarım için kullanılan reçine ve sertleştirici özellikleri (F- RES 11564 / F- HARD 13486)			
Özellik	Reçine	Sertleştirici	Birim
Viskozite (25 °C)	1200-1400	10-20	mPa.s
Yoğunluk (25 °C)	1,15	1	g/cm ³
Alevlenme noktası	185	123	°C
Kürleşme sonrası özellikler		Birim	
Çekme dayanımı (80 °C'de 8 saat)	70-75	MPa	
Çekme modülü (80 °C'de 8 saat)	2850-3000	MPa	
Eğilme dayanımı (80 °C'de 8 saat)	110-125	MPa	
Eğilme modülü (80 °C'de 8 saat)	2800-3000	MPa	

Prepreg için kullanılan reçine ve sertleştirici özellikleri (F- RES 21 / F- HARD 22)			
Özellik	Reçine	Sertleştirici	Birim
Viskozite (25 °C)	400-650	35000-45000	mPa.s
Yoğunluk (25 °C)	1,05	1,1	g/cm ³
Kürleşme sonrası özellikler		Birim	
Çekme dayanımı	80	MPa	
Çekme modülü	3300	MPa	
Eğilme dayanımı	125	MPa	
Eğilme modülü	3200	MPa	