

**KARAMANOĞLU MEHMETBEY ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KARBON FİBER TAKVİYELİ KOMPOZİT MALZEMENİN
FARKLI KALINLIKTA DESTEK PLAKALAR KULLANILARAK DELİNMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Çağlar BETGÜL

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

EYLÜL 2022

**KARAMANOĞLU MEHMETBEY ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KARBON FİBER TAKVİYELİ KOMPOZİT MALZEMENİN
FARKLI KALINLIKTA DESTEK PLAKALAR KULLANILARAK DELİNMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Çağlar BETGÜL
(190891112)**

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof.Dr.Uğur KÖKLÜ

EYLÜL 2022

TEZ ONAYI

Çağlar Betgöl tarafından hazırlanan Karbon Fiber Takviyeli Kompozit Malzemenin Farklı Kalınlıkta Destek Plakalar Kullanılarak Delinmesi adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman:
(Prof. Dr. Uğur KÖKLÜ)

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Uğur KÖKLÜ

Doç. Dr. Mustafa ÜNAL

Doç. Dr. Lokman Gemi

İmza:

Tez Savunma Tarihi: 12.09.2022

Yukarıdaki sonucu onaylarım

Ünvanı, Ad SOYAD
Enstitü Müdürü



BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK

Bu çalışmadaki tüm bilgilerin, akademik ve etik kurallara uygun bir şekilde elde edildiğini beyan ederim. Aynı zamanda bu kural ve davranışların gerektirdiği gibi, bu çalışmanın özünde olmayan tüm materyal ve sonuçları tam olarak aktardığımı ve referans gösterdiğimi belirtirim.

(İmza)
(Çağlar BETGÜL)



ÖNSÖZ

Yapılmış olan bu tezde, Karbon Fiber Takviyeli Kompozit Malzemenin farklı kalınlıkta destek plakalar kullanarak delinmesi deneysel olarak araştırılmıştır.

Yüksek lisans eğitimim boyunca değerli bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, her konuda bilgi ve desteğini almaktan çekinmediğim, araştırmanın planlanmasından yazılmasına kadar tüm aşamalarında yardımlarını esirgemeyen, beni teşvik ederek aynı titizlikle yönlendiren değerli danışman hocam Prof. Dr. Uğur KÖKLÜ'ye teşekkürlerimi sunarım.

Bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım sayın hocam Arş. Gör. Sezer MORKAVUK'a ve Öğr. Gör. Barış BAKIRCIOĞLU'na teşekkür ederim. Bu tez çalışması boyunca maddi ve manevi imkân ve yardımını eksik etmeyen, her daim yanımda olan eşim Asiye BETGÜL, annem Fatma BETGÜL, babam Mehmet BETGÜL, kardeşim Safettin BETGÜL ile çok sevdiğim merhum büyükbabam Etem AKAY ve büyükannem Ayşe AKAY'a sonsuz saygı, sevgi ve teşekkürlerimi sunarım.

Bu Yüksek Lisans Tezi, Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Koordinatörlüğünün 22-YL-20 No.lu Projesi ile desteklenmiştir.

Eylül 2022

Çağlar BETGÜL
(J.Uzm.Çvş.)



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
ÖZET	xvii
ABSTRACT	xix
1-GİRİŞ	1
2-LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	7
2.1. Kompozit Malzemeler.....	7
2.2. Kompozitlerin Kısa Tarihi	8
2.3. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması.....	9
2.4. Kompozitlerin Avantajları	14
2.5. Kompozitlerin Dezavantajları	16
2.6. Kompozitlerin Özellikleri	17
2.7. Fiber Takviyeli Kompozitler.....	20
2.8. Önemli Fiber Takviye Türleri	21
2.9. Fiber Takviyeli Kompozitlerin İşlenebilirliği	24
2.10. Karbon ve cam fiber takviyeli kompozit malzemelerin geleneksel üretim yöntemleri ile işlenebilirliği	24
2.11. Delik Delme Prosesinde Destek Plakalarının Kullanımı	26
3-MATERYAL METOT	31
3.1. Delik Delme Prosesinde Kesici Takım ve Malzeme.....	31
3.2. Deney Parametreleri.....	33
3.3. Deney Düzenegi.....	35
4.BULGULAR.....	40
4.1. İtme Kuvvetlerinin Analizi	41
4.2. Delaminasyon Ölçümü.....	45
4.3. Yığıntı Talaş Oluşumu ve Takım Aşınması.....	52
4.4. Yüzey Pürüzlülüğü.....	54
4.5. İşlenen Deliklerin Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ile İncelenmesi	61
5.TARTIŞMA VE SONUÇLAR	65
KAYNAKÇA.....	67
ÖZGEÇMİŞ.....	79



KISALTMALAR

CTE	: Coefficient of thermal expansion (Termal genişleme katsayısı)
PMK	: Polimer matrisli kompozitler
MMK	: Metal matrisli kompozitler
SMK	: Seramik matrisli kompozitler
GFRP	: Glass fiber reinforced polymer (Cam fiber takviyeli polimer)
CFRP	: Carbon fiber reinforced polymer (Karbon fiber takviyeli polimer)
FRP	: Fiber reinforced polymer (Fiber takviyeli polimer)
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu



ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1 : Farklı tipte karbon fiber liflerinin mekanik özellikleri.....	23
Çizelge 3.1 : Çalışmada kullanılan takviye elemanının mekanik özellikleri.....	33
Çizelge 3.2 : Kesme şartları.....	34
Çizelge 3.2 (Devam) : Kesme şartları	34
Çizelge 4.1 : Kesme şartlarına göre oluşan itme kuvveti değerleri.	42
Çizelge 4.1 (Devam) : Kesme şartlarına göre oluşan itme kuvveti değerleri	43



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Fiber takviyeli polimerlerin pazar paylarının gösterimi.....	3
Şekil 1.2 : Fiber yönlendirme tipleri.	4
Şekil 2.1: Takviye faza göre kompozitlerin sınıflandırılması.	9
Şekil 2.2 : Sürekli elyaf, whisker ve partikül takviyeli kompozitler için takviye hacim oranının bir fonksiyonu olarak gerilme modülü.....	11
Şekil 2.3 : Matris malzemelerine göre kompozitlerin sınıflandırılması.	12
Şekil 2.4 : Geleneksel malzemelerin ve kompozitlerin özgül mukavemet ve rijitlik değerleri.	15
Şekil 2.5 : Kompozitlerdeki takviyelerin geometrik ve konumsal özelliklerinin şeması: (a) konsantrasyon, (b) boyut, (c) şekil, (d) dağılım ve (e) yönelim.	17
Şekil 2.6 : Fiber, matris ve kompozitin gerilme-gerinim davranışı.....	21
Şekil 2.7 : (a) Örülmemiş cam elyafların dijital görüntüleri; (b) Örülmüş cam elyafı.	22
Şekil 2.8 : (a) Dokunmamış karbon fiberlerin dijital görüntüleri; (b) Dokunmuş karbon fiber.	23
Şekil 2.9 : (a) Dokunmamış kevlar fiberler (b) Dokunmuş kevlar fiberler.	24
Şekil 3.1 : Deneylerde kullanılan kesici takımlar.	31
Şekil 3.2 : Deneylerde kullanılan CFRP malzeme.	32
Şekil 3.3 : Quaser MV154C dik işleme merkezi, kuvvet ölçüm dinamometresi ve bileşenleri.....	36
Şekil 3.4 : Deneyin yapılış biçimi.....	37
Şekil 3.5 : Deney düzeneği.	38
Şekil 3.6 : Delaminasyon ve takım aşınması ölçümü için kullanılan dijital mikroskop.....	38
Şekil 3.7 : Yüzey pürüzlülüğü ölçümünde kullanılan optik profilometre.	39
Şekil 3.8 : Taramalı elektron mikroskobu.	39
Şekil 4.1 : Destekli ve desteksiz delik delme anında oluşan kuvvetler.	44
Şekil 4.2 : 2500 ve 7500 dev/dak fener mili hızına göre kuvvet grafiği.	45
Şekil 4.3 : 2500 ve 7500 mm/dak çıkış delikleri delaminasyon grafiği.	46
Şekil 4.4 : Destek kullanılmadan gerçekleştirilen testler sonucu delik çıkışında oluşan hasarlar.....	48
Şekil 4.5 : 0,5 mm destek kullanılarak gerçekleştirilen testler sonucu delik çıkışında oluşan hasarları.....	49

Şekil 4.6 : 1 mm destek kullanılarak gerçekleştirilen testler sonucu delik çıkışında oluşan hasarlar.....	50
Şekil 4.7 : 1,5 mm destek kullanılarak gerçekleştirilen testler sonucu delik çıkışında oluşan hasarlar.....	51
Şekil 4.8 : Delik delme işlemlerinden sonra kesici takım görüntüleri.....	53
Şekil 4.8 (Devamı) : Delik delme işlemlerinden sonra kesici takım görüntüleri.....	54
Şekil 4.9 : Yüzey pürüzlülüğü ölçümü.	55
Şekil 4.10 : Yüzey pürüzlülüğü grafiği.....	56
Şekil 4.11 : Desteksiz yüzey haritaları ve pürüzlülük değerleri.	57
Şekil 4.12 : 0,5 mm destekli yüzey haritaları ve pürüzlülük değerleri.	58
Şekil 4.13 : 1 mm destekli yüzey haritaları ve pürüzlülük değerleri.	59
Şekil 4.14 : 1.5 mm destekli yüzey haritaları ve pürüzlülük değerleri.	60
Şekil 4.15 : S: 2500 dev/dak, f: 400 mm/dak ve 2000 mm/dak parametre ile delinen deliğin SEM görüntüleri.....	62
Şekil 4.16 : F: 1200 mm/dak, s: 2500 dev/dak ve s: 7500 dev/dak parametre ile delinen deliğin SEM görüntüleri.....	64



ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

KARBON FİBER TAKVİYELİ KOMPOZİT MALZEMENİN FARKLI KALINLIKTAKİ DESTEK PLAKALAR KULLANILARAK DELİNMESİ

Çağlar Betgöl

Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Uğur KÖKLÜ

Eylül 2022, 101 sayfa

Karbon fiber takviyeli kompozit malzemenin mekanik olarak delinmesi sonucunda delik giriş ve çıkışlarında delaminasyon hasarı oluşmaktadır. Delme testlerinde destek plakalarının kullanılması, delmeden kaynaklanan delaminasyon hasarını azaltmada önemli bir rol üstlenmektedir. Bu tez çalışmasında; karbon fiber takviyeli kompozit malzemenin (CFRP), farklı kalınlıklarda alüminyum alaşımı destek plakaları kullanılarak delinmesi deneysel olarak araştırılmıştır. Deneylerde CFRP malzeme iki farklı (2500 dev/dak ve 7500 dev/dak) fener mili hızı ve beş farklı ilerleme hızı (400 mm/dak, 800 mm/dak, 1200 mm/dak, 1600 mm/dak ve 2000 mm/dak) kullanılarak delik delme testleri gerçekleştirilmiştir. Deneyler, desteksiz ve farklı kalınlıklarda Al2024 alüminyum alaşımı destek plakaları (0.5, 1 ve 1.5 mm) kullanılarak yapılmıştır. Deneyler, kuru kesme koşullarında yapılmış olup herhangi bir kesme sıvısı kullanılmamıştır. Deneylerde itme kuvveti (Fz), delaminasyon faktörü (Fd), yüzey pürüzlülüğü (Ra) ve delik içi yüzey hasarları incelenmiştir. Deney sonuçları, ilerleme hızının artmasıyla itme kuvveti artarken, fener mili hızının artması ile itme kuvvetinin azaldığını göstermiştir. Destek plakası kullanılması itme kuvvetini çok az artırmıştır. İlerleme hızının artmasıyla delaminasyon hasarı artarken, fener mili hızının artması ile delaminasyon hasarı azalmaktadır. En yüksek delaminasyon hasarı destek kullanılmadan yapılan testlerde oluşurken, en az delaminasyon ise 1,5 mm destek plakası kullanılarak yapılan testlerde meydana gelmiştir. Desteksiz delme testlerinde kesici takım üzerinde yığıntı talaş (built up edge-BUE) oluşumu gözlenmemiştir. Ancak delme deneylerinde destek plakası kullanımıyla kesici takımda BUE oluşmuştur. Desteksiz delmeden ziyade düşük kalınlıkta destek plakası kullanılmasıyla daha kaliteli yüzeyler elde edilmiştir. Delik içi hasar analizi incelemelerinde ise desteksiz delme koşullarında ve yüksek ilerleme hızlarında delik çıkışında ciddi hasarlar gözlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Karbon fiber takviyeli polimer kompozit (CFRP), delaminasyon, destek plakası, itme kuvveti, yüzey pürüzlülüğü, delik delme.



ABSTRACT

MsThesis

DRILLING CARBON FIBER REINFORCED COMPOSITE MATERIAL WITH SUPPORT PLATES

Çağlar Betgöl

**Karamanoğlu Mehmetbey University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engirening**

Supervisor: Prof. Dr. Uğur Köklü

September 2022, 101 pages

Delamination damage occurs at the hole entry and exits when carbon fiber reinforced composite materials drilled mechanically. The use of support plates in drilling tests plays a significant role in reducing drilling induced delamination damage. In this thesis study; the drilling of carbon fiber reinforced composite material (CFRP) using aluminum support plates with different thicknesses was investigated experimentally. In the experiments, CFRP material was drilled using two different spindle speeds (2500 rpm and 7500 rpm) and five different feed rates (400 mm/min, 800 mm/min, 1200 mm/min, 1600 mm/min and 2000 mm/min). The tests were carried out without using support and using Al2024 aluminum alloy support plates with different thicknesses (0.5, 1 and 1.5 mm). The experiments were carried out in dry cutting conditions and no cutting fluid was used. In the experiments, thrust force (F_z), delamination factor (F_d), surface roughness (R_a), and borehole surface damage were investigated. Results showed that while the thrust force increases with the increase of the feed rate, the thrust force decreases with the increase of the spindle speed. Using support plate in the experiments increases the thrust force slightly. While the delamination damage increases with the increase of the feed rate, the delamination damage decreases with the increase of the spindle speed. The highest delamination damage occurred in tests carried out without using support while the least delamination damage occurred in tests performed using 1.5 mm support plate. No built-up edge (BUE) formation observed on the cutting tool in unsupported drilling tests. However, BUE was formed on the cutting tool with the use of the support plate. Better quality surfaces were obtained by using a low-thickness support plate rather than unsupported drilling. In the borehole damage analysis, serious damage was observed at the hole exit in drilling without using support and at high feed rates.

Keywords: Carbon fiber reinforced polymer composite (CFRP), support, thrust, surface roughness, hole drilling.



1.GİRİŞ

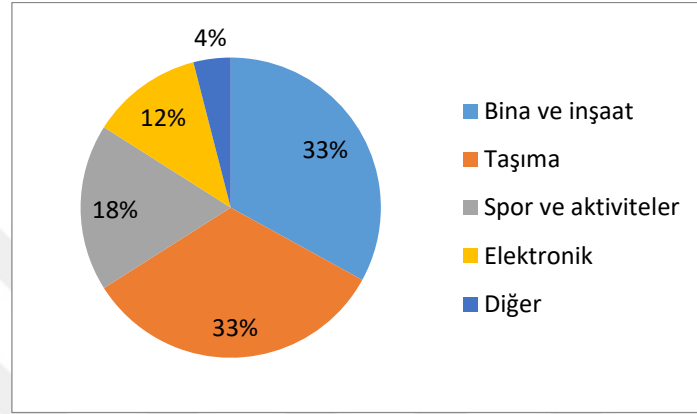
Teknolojinin gelişmesi, son yüzyılda bilgisayar ve diğer elektronik ürünlerde meydana gelen süratli ilerlemelerle birlikte büyük bir ivme kazanmıştır. Yaşanan bu hızlı gelişmeler neticesinde birçok yeni alan oluşmuştur. Bazı alanlarda doğal malzemeler endüstriyel ihtiyaçlara cevap verebilirken bazı alanlarda doğadan elde edilen malzemelerin sınırlı özellikleri, yeni geliştirilen sistemlerin ihtiyacını karşılayamamıştır. Oluşan malzeme açığının giderilmesi için malzeme biliminde gelişme kaçınılmaz bir hâle gelmiştir. Son yüzyılda genel olarak malzemeden istenilen özellikler giderek artmış ve mevcut alışımlı malzemeler, bu koşullar için yeterli gelmemeye başlamıştır. Tek bir malzemenin, birden fazla malzemenin özelliklerine sahip olması gerektiği beklentisi oluşmuştur. İstenilen farklı ve zorlu özelliklerin bir arada bulunması için yapılan çalışmalar neticesinde, kompozit adı verilen malzeme türü geliştirilmiştir.

Kompozit yapılar/malzemeler, form, şekil ve kimyasal bileşim olarak farklılık gösteren ve birbiri içinde uygulamalı olarak çözünemeyen bir veya birkaç makro bileşen karışımının kombinasyonundan oluşabilen malzemeler şeklinde tanımlanır (Smith, 1990). Kullanılan birçok kompozit malzeme sadece iki fazdan oluşmaktadır. Birinci faz için matris adı verilirken, takviye faz bir diğer adıyla saçınmış faz olarak adlandırılan takviye fazı diğer fazı sarar ve sürekliliğini bu şekilde sağlamış olur. Kompozit malzemenin mukavemete dayalı yük taşıma özelliğini Takviye fazı malzemesi, malzemede plastik deformasyonda oluşabilecek çatlak ilerlemelerinde ise matris fazı işlem gördüğünden kompozit malzemenin kopmasını geciktirmektedir. Matris veya güçlendirici fiberler inorganik (örneğin seramik veya cam), organik (polimerler) veya metalik (alüminyum, titanyum vb.) olabilir. Kompozit malzemeler terimi, herhangi bir dubleks alaşıma uygulanabilirken (referans ölçeğine bağlı olarak) genellikle bileşenleri işleme sırasında bir alaşım olarak birlikte oluşmayan ancak birleştirme işleminden önce ayrı olarak üretilen bir

malzemeyi tanımlamak için kullanılır (Nicholls, 1976; Courtney, 1990). Bu tanım bugün, ötektik bileşimlerin belirli alaşımlarının tek yönlü katılması yoluyla doğrudan eriyikten dökülebilen kompozitlere genişletilmiştir. Bununla birlikte bir malzemenin bir kompozit malzeme olarak sınıflandırılması için matris malzemesinden daha yüksek gerilme seviyelerini destekleyebilmesi, elyaflardan daha büyük gerilimlere maruz kalması ve elyafların matrise yeterince bağlanması gerekmektedir (Hertzberg, 1996). Buradaki amaç, her ikisinin de zayıflıklarından ödün vermeden her iki malzemenin üstün özelliklerinden yararlanmaktır. Bir bakıma kompozitler, uzlaşma sanatının en iyi örneğini oluşturur (Kelly, 1967). Ahşap, bir lignin matrisinde selüloz liflerinden oluşan doğal bir kompozittir. Selüloz lifleri, gerilim açısından güçlüdür ancak esnek bir yapıya sahiptir. Lignin lifleri yapıştırır ve malzemeye sertlik kazandırır. Kemik, yumuşak protein kolajen ile sert mineral apatitin bir birleşimi olan sert bir kompozittir. Tarihî kalıntılar dikkatle incelendiğinde kompozit malzeme üretme fikrinin çok yeni olmadığı görülmektedir. Firavunların zamanında Mısırlılar tarafından tuğlalara saman eklenmesi veya İnka ve Maya günlerinde erken çatlamalarını önlemek için bitki liflerinin çanak ve çömleklere katılması, tasarlanmış kompozitlerin klasik örnekleridir (Gordon, 1976). Kâğıt, beton vb. birçok başka malzeme de uzun bir süredir hayatımızda yer almaktadır.

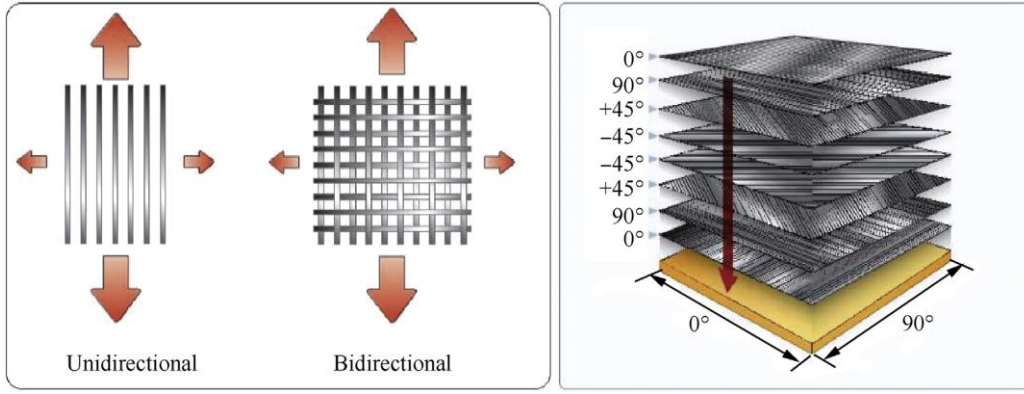
Polimer bazlı kompozit sistemler, işlevsel dolgu maddelerinin yüksek derecede işlenebilir polimerlerle sinerjik kombinasyonu sayesinde çok sayıda işlev sunar ve bu da uygulama alanlarını genişletir (Subramani ve diğerleri, 2017). Genel olarak yapısal uygulamalar için kullanılan kompozit malzemeler, en iyi yüksek performanslı sistemler olarak sınıflandırılır ve yüksek mukavemet-ağırlık oranları sunan ancak genellikle optimum performans için kontrollü üretim ortamları gerektiren sentetik malzemelerden yapılır. Fiber takviyeli polimerler, elektrik ve askerî uygulamalarda ileri teknoloji ve yüksek kaliteli malzemeler olacak potansiyele sahiptir (Zhang, Liang, ve diğerleri 2004). İlerleyen teknoloji ile transport ve elektronik uygulamaların yanı sıra inşaat alanlarındaki uygulamalarda beton elemanlarının yapısal olarak güçlendirilmesi için kullanılan çeşitli tiplerde FRP'ler geliştirilmiştir. Fiber Takviyeli Plastiklerin (FTP), tüketim mallarında, sanayi donanımlarında,

özellikle de askeri ve havacılık sahasında geniş kullanım alanlarına sahiptir. Türbin kanatlarında ve yapısal seramikler içinde kullanıma uygundur. Darbelere ve yüklere dayanıklı olmalarında dolayı da elektrik yalıtım alanlarında ve makaralarda kullanılmaktadır. Aşağıdaki pasta grafik, çeşitli uygulama alanlarındaki (Brydson, 1999; Mathew ve diğerleri, 2007) FTP'lerin pazar paylarının ayrıntılı bir resmini vermektedir (Şekil 1.1.).



Şekil 1.1 : Fiber takviyeli polimerlerin pazar paylarının gösterimi.

Fiberle güçlendirilmiş polimer kompozit malzemeler, yüksek özgül mukavemetleri ve modülleri nedeniyle yıllardır çeşitli alanlarda uygulanmaktadır (Babu ve diğerleri, 2013). Bir kompozit yapının mukavemeti ve sertliği, katların dizilim sırasına bağlı olduğu için fiber takviyeli polimer kompozit materyallerin katman oryantasyonunun uygun şekilde tasarlanması gerekir. Tek yönlü bir malzemedeki lifler bir yönde ilerlerken ve mukavemet ve sertlik yalnızca lifin yönündedir; çift yönlü bir malzemedeki lifler ise iki yönde uzanır. Mukavemet ve sertlik, lifin iki yönündedir. Katmanlar arasında, 0° kat, eksenel, $\pm 45^\circ$ kat kesme ve 90° kat'ın yan yüklere tepki vermesi için gerekmektedir (Şekil 1.2). Kat sırasının ve oryantasyonunun doğru olması uygulanan yükün yönünün bir fonksiyonudur (Sakuma ve diğerleri, 1984).



Şekil 1.2 : Fiber yönlenme tipleri (Karbon fiber malzemelerin işlenmesi, 2020).

Uçak endüstrisinde kullanılan karbon fiberler, yapısal bileşenlerin daha hafif olması sağlanarak yakıt verimliliğini ve uçakların yük taşıma kapasitesini iyileştirmek için yaygın olarak kullanılmaktadır. Uçak endüstrisinde tek bir küçük uçakta, yüz binden fazla montaj deliği ve daha büyük uçaklarda bir milyondan fazla delik olduğu bilinen bir gerçektir (Unde ve Ghodke, 2015). Bu nedenle üreticilerin iş akışı açısından delme işlemi, bileşenlerin [montajı sırasında (perçinli, cıvatalı) tüm işleme operasyonlarının %40'ını oluşturur (Abrao ve diğerleri, 2008). Fiber takviyeli kompozit malzemelerin işlenmelerinde yaşanan problemler anizotropi derecelerine bağlı olarak değişen malzeme özelliklerinden dolayı kesim esnasında zorluklar çıkarır. Matris ve fiber rijitlerinin birbirinden farklı olmasından dolayı yerel dinamik yüklemelerde tabakalar arası ayrılma (delaminasyon) gerçekleşebilir. Yüzeydeki düzensizlikler, mikro çatlaklarının oluşmasına, düşük sıcaklığın iletkenliğinden kaynaklanabilecek yanmalar gibi hatalarla karşılaşabilir. Kompozit malzemelerin işlenebilirliği, metal ve alaşım işlenmesinde kullanılan malzemelerden farklı şekillerde ele alınmalıdır (Abrao ve Faria, 2007). Bu tür yüzey hatalarının, ürün yüzey kalitesi üzerinde önemli olumsuz etkileri olabilir ve bu da araştırmacıları bunların ortadan kaldırılması veya azaltılması için sürekli çalışmalar yapmaya sevk eder. Yapılan çalışmalarda; yüzey kalitesinin kesme parametrelerine, takım geometrisine ve kesme kuvvetlerine bağlı olduğu bildirilmektedir. Bu nedenle, polimer matrisli kompozitlerin işlenmesinde doğru işleme parametreleri seçimi çok önemlidir (Kılıçkap, 2010; Tsao ve Hocheng, 2007). Delaminasyon, mekanik delme işlemi için başka bir zorluktur. Uygulamada, delme kaynaklı delaminasyon hasarını azaltmak için destek plakaları kullanılabilir (Davim ve Reis, 2003). Bu

durumda, farklı yapıların varlığı nedeniyle delme işlemi daha karmaşık hâle gelir. Destek plakaları genellikle giriş tarafı için alüminyum levha ve çıkış tarafı için fenolik, ahşap veya plastik malzemelerden yapılan levhalardır. Bu tür bir düzenleme için mikro matkap, sırasıyla giriş levhasını, CFRP laminatını ve arka levhayı geçer. Kompozit malzemeler, heterojen yapıları nedeniyle işlenmesi zor malzemeler olarak kabul edilmektedir. Bu tür malzemelerin işlenmesinde tipik olarak tornalama, frezeleme, planlama, delme vb. gibi geleneksel işleme yöntemleri kullanılır (Chouhan, Singh, ve Parmar, 2016). Kompozitlerin anizotropik ve heterojen yapıda olduklarından, bu tür malzemelerin geleneksel işleme yöntemleriyle işlenmesinde matris çatlaması, lif çekme, şişme ve delaminasyon gibi hasarlar oluşmaktadır. Hasarlar yalnızca heterojen ve anizotropik yapıdan değil, aynı zamanda işleme yöntemlerinden ve bunların etkileşimlerinden de kaynaklanmaktadır (Orifici ve diğerleri, 2008). Ek olarak heterojen yapıları nedeniyle polimer kompozit malzemelerin geleneksel yöntemlerle işlenmesi, delaminasyon, takım ömrünün azalması, lif sıyrılması, matris sıvanması ve toz oluşumu gibi yapısal ve sağlıkla ilgili sorunlara yol açar. Yüksek sertliklerine ve aşındırıcılıklarına rağmen (bazen bazı kesici ve delici malzemelerinden daha sert), kırılğan yapıları nedeniyle takımın plastik deformasyonunu önlemek için elyafların ezilmesi geleneksel işleme yöntemleriyle uygulanır. FTP kompozit malzemelerin düşük işlenebilirliği genellikle delaminasyon, çapaklar ve yüzey altı hasarları dâhil olmak üzere çeşitli işleme hatalarına yol açar (Abrate ve Walton, 1992; Hintze ve diğerleri, 2011).

Kompozit malzemelerin birçok alanda kullanılması, bu malzemelerin diğer malzemeler gibi işlenebilme ve montaj yapılabilme gereksinimini doğurmaktadır. Yukarıda bahsedilen işleme hatalarından anlaşılacağı üzere geleneksel malzemelerin işlenmesinde kullanılan bilgi ve yöntemler, bu yeni malzemeler için gerekenleri karşılayamamaktadır. İşlenebilirliği en verimli şekilde kullanabilmek için çeşitli yöntemler üzerinde çalışmalar yapılmaktadır. Bu çalışmalarda fener mili hızı ve ilerleme hızı gibi kesme parametrelerinin optimizasyonunun yanı sıra kesme koşullarının iyileştirilmesi çalışmaları da gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmada, ilerleme hızlarının ve kesme derinliğinin kompozit malzemenin delinmesi sırasında yüzey kalitesine ve

malzemeye etkileri incelenmiştir. Ayrıca destek plaklarının kullanılmasının delme işlemi üzerindeki etkileri araştırılmıştır.



2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

2.1 Kompozit Malzemeler

Kompozit malzemeler için evrensel olarak kabul edilmiş bir tanım yoktur. Literatürdeki tanımlar büyük farklılıklar göstermektedir. Ancak hiçbir tanım, kompozit malzemelerin en az iki farklı aşamadan oluştuğunu inkâr edemez. Aşağıdaki tanım, çok fazlı malzemeleri geniş ölçüde içine alır ve aynı zamanda geleneksel çok fazlı malzemeleri kapsamaz. Kompozit malzemeler, iki veya daha fazla malzemenin belirli özellikleri iyileştirmek veya istenen özelliklere ulaşılacak şekilde birleştirilmesiyle oluşan malzemelerdir. Bir kompozitte, dağınık faz(lar) matris adı verilen sürekli bir fazda dağıtılır. Tek koşul; dağınık fazın işlemiden sonra ve/veya, servis/yeniden işleme sırasında kendi özelliklerini muhafaza etmesidir. Bu basit bir örnekle açıklanacak olursa plastikler, iyi işlenebilirlikleri ve düşük maliyetleri ile bilinir. Ancak zayıf mekanik özelliklerinden dolayı plastikleri, herhangi bir yük taşıma uygulamasında kullanmak çok zordur. Plastiklerin Young modülü, yalnızca birkaç GPa'dır ve mukavemetleri genellikle 50 MPa'dan azdır. Cam elyaflar gibi sentetik elyaflar iyi mekanik özelliklere sahiptir; bu malzemelerin Young modülleri yaklaşık 70 GPa'dır ve mukavemetleri ise 3000 MPa düzeyindedir. Örneğin hacimce %50 plastik ve cam elyaftan yapılan bir kompozit oldukça iyi mekanik özelliklere sahip olabilir. Bu kompozitin Young modülü ve mukavemet değerleri sırasıyla 30 GPa ve 1000 MPa'dan fazla olacaktır. Bu kompozit malzeme, her türlü yük taşıma uygulaması için uygundur. Böylelikle cam elyafı ile bir kompozit oluşturularak plastiklerin mekanik özellikleri iyileştirilebilir ve cam elyaf işlenmiş kompozitte orijinal kimliğini korur. Bu tanım, yaşlandırma ile sertleşebilen alaşımları ve diğer çok fazlı alaşımları kapsamamaktadır çünkü dağılmış faz proses/yeniden ısıtma sırasında stabil değildir (Balasubramanian, 2014; Shyha, Soo ve diğerleri, 2010; Renard, 2005).

Kompozit malzemelerin özellikleri bileşenlerin özelliklerine, bileşenlerin oranlarına, geometrilerine, dağılımlarına ve dağılan fazın yönlenmesine bağlıdır. Temel faktör ise bileşenlerin oranı ve özellikleridir. Mevcut durumda sayısız özellikte malzeme vardır. Bu yüzden doğru oranda ve doğru malzemeler kullanarak istenilen özellikte malzeme oluşturmak mümkündür.

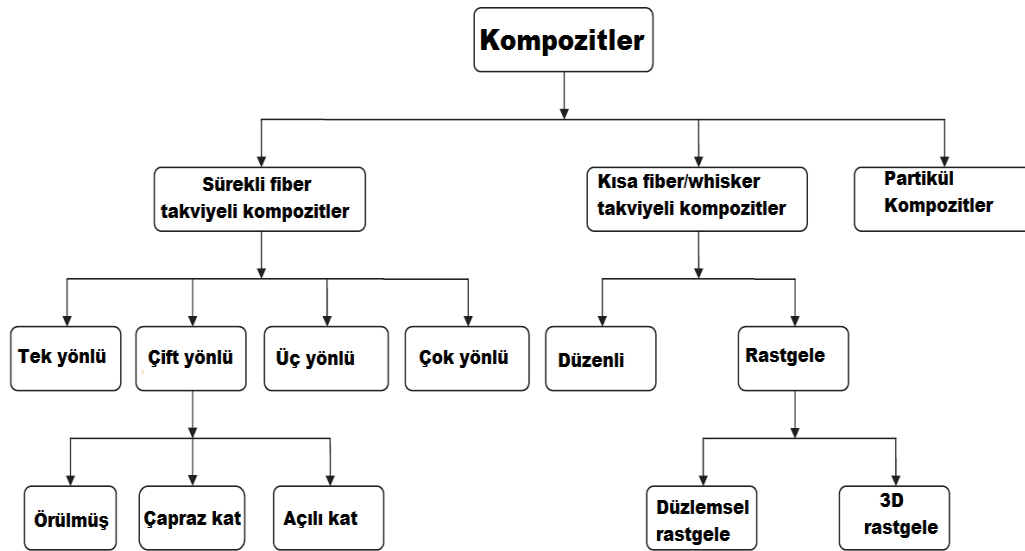
2.2 Kompozitlerin Kısa Tarihi

Doğaya dikkatle bakıldığında belki de milyonlarca yıldır doğa tarafından kompozitler üretilmektedir ve bu nedenle kompozitlerin tarihi, belki de dünyadaki yaşamın tarihi kadar eskidir. Bitki parçalarının çoğu, daha iyi mekanik özelliklere sahip olmak için gömülü fiber yapılara sahiptir. Bununla birlikte kompozitler son 2000 yıldır insanlar tarafından yapılmaktadır. İsrailoğulları, insan yapımı kompozitlerin en eski örneklerinden olan kil ve bitki samanı kullanarak tuğlalar yapmışlardır. Japon samurayları, on beşinci yüzyılda lamine metaller kullanarak kılıç yapmışlardır. Yirminci yüzyılın başlarında ise beton, dolgulu kauçuk ve fenolik reçineler geliştirilmiştir. Cam elyaf üretimi için geliştirilen bir proses İkinci Dünya Savaşı sırasında kompozitlerin gelişmesini sağlamıştır. Cam elyaf ve plastik kombinasyonu, fiber takviyeli polimerler (FRP) adı verilen inanılmaz derecede güçlü bir malzemeyi ortaya çıkarmıştır. Bu malzeme, geliştirilmeye başlamasının ilk aşamalarında uçakların radomlarını yapmak için kullanılmıştır. İkinci Dünya Savaşı sırasında polimer matrisli kompozitlerin (PMC'ler) askeri uygulamaları, 1940'ların sonlarında ve 1950'lerin başlarında özellikle denizcilik endüstrisinde, savaştan sonra ise ticari alanların birçoğunda kullanımı oldukça artmıştır. İlk ticari tekne gövdesi 1946'da tanıtılmıştır. Kompozit bilim ve teknolojisindeki hızlı büyüme, Amerika Birleşik Devletleri ve Avrupa'da 1950'lerde gerçekleşmiştir. Kompozit endüstrisi 1970'lerde olgunlaşmaya başlamıştır. Bu dönemde DuPont firması, aramid elyafını Kevlar adıyla tanıtmış ve bu dönemde karbon elyaf üretimi de başlamıştır. Bu elyaflarla birçok yüksek performanslı kompozit üretilmiştir. Kompozit malzemeler, işlenebilir mühendislik malzemeleri olarak kendilerini tamamen kanıtlamıştır ve artık her yerde, özellikle yapısal uygulamalarda çok yaygın olarak kullanılmaktadır. Yani geniş kabul görmüşlerdir ve mümkün olan her yerde geleneksel malzemeler, kompozit malzemelerle değiştirilmektedir. Şu anda

uçak, otomobil, denizcilik, spor, elektronik, kimya ve tıbbi endüstriler oldukça FRP'lere bağımlıdır. Şu anda bile kompozit teknolojisi, nano-takviyelerin, yeni matris malzemelerinin, üretim yöntemlerinin, tasarım yazılımlarının vb. geliştirilmesiyle birlikte gelişmeye devam etmektedir. Günümüz dünyasının en büyük endişesi enerji tasarrufudur. Hafif malzemeler kullanıldıkça herhangi bir makinenin çalışma verimliliğı artmakta ve daha az enerji ile daha fazla iř yapılmaktadır. Şu anda rüzgâr enerjisi, birçok ülkede ana enerji kaynaklarından birisi hâline gelmeye başlamıştır. Polimer kompozitlerden devasa yel değirmeni kanatları yapılmaktadır. Kompozitlerin modern dünyada enerji tasarrufu/üretimi için önemli bir rol oynamaya devam edeceğine şüphe yoktur (History of Composite Materials, 2021; Balasubramanian, 2014; Chung, 2003).

2.3 Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Çeşitli yöntemlerle üretilmemiş yani sentetik olmayan, doğıal olarak var olan kompozitler ağ, odun ve kemik vb. örnekler verilebilir. Ahşap, lignin matrisinde selüloz esaslı ve güçlü liflerden yapılmış bir kompozittir. Kemiklerin kalın, kırılğan ve sert bileşenleri, hidroksiapatit trombositleri ve kolajen adı verilen güçlü yalnız yumuşak bir proteinden oluşmaktadır. Bileşenlerin ince ölçekte doğıal kompozitlerde mevcut olmasına rağımen, bir diğıer sentetik kompozitler insan yapımıdır. İstenen özelliklerde bir sentetik kompozit yapılabilmesi için çok çeşitli takviye ve matrislerden uygun bir takviye ve bir matris seçmek için yeterli esneklik vardır. Takviye faza bağılı olarak, kompozitler fiber takviyeli kompozitler (FRC) ve partikül takviyeli kompozitler (Şekil 2.1.) olarak sınıflandırılabilir (Callister, 2014).



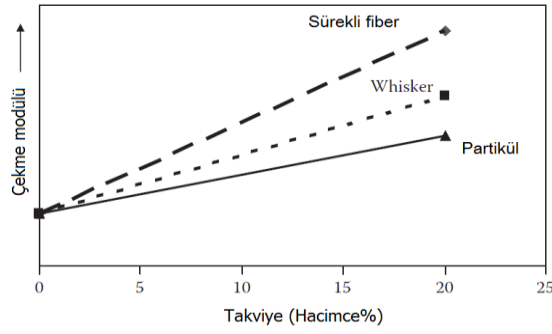
Şekil 2.1: Takviye faza göre kompozitlerin sınıflandırılması.

FRC'ler tek katmanlı veya çok katmanlı kompozitler olarak üretilebilir. Çok katmanlı bir kompozitteki katmanlar aynı tür fiber takviyesi ile yapıldığında buna "laminat" denir. Farklı katmanlarda iki veya daha fazla tipte fiber takviyesi kullanılıyorsa bu bir hibrit kompozittir. Tüm kompozit, tek katmanlı kompozitlerde tek bir katmana sahip olacaktır. Bu aynı zamanda her katmanda aynı yönelim ve özelliklere sahip kompozitleri de içerir. Tek katmanlı kompozitlerde takviye olarak uzun veya kısa lifler kullanılır. Lif takviyeleri ile daha iyi yük aktarımı mümkündür ve bu sayede yüksek mekanik özellikler gerçekleştirilmektedir. Ancak özellikler, her yönden aynı değildir. Genellikle mekanik özellikler, fiber yönü boyunca yüksektir. İzotropik kompozitler kısa liflerle kolaylıkla yapılabilir. İşleme sırasında, lifler bazı işleme yöntemlerinde belirli bir yönde hizalanabilir ve ardından kompozitler anizotropik hâle gelir. Bununla birlikte takviye olarak kısa liflerin kullanıldığı çoğu durumda kompozitler izotropiktir (Brinksmeier ve Janssen, 2002; Renard, 2005).

Hibrit kompozitler, fiziksel ve mekanik özellikleri ile konvensiyonel, düzgün yüzey oluşumu için mikrofil kompozitlerin bir araya getirilmesi ile geliştirilmiştir kompozit türleridir. Genellikle cam/karbon, cam/aramid ve aramid/karbon elyaflarından yapılır. Yeni gelişmelerle birlikte cam/doğal elyaf, hibrit kompozitlerde üretilmektedir. Hibrit kompozitler, her bir katkı tipinin özelliklerini barındırır. Örneğin cam/karbon hibrit kompozitinde, düşük maliyetli ve yüksek modüllü kompozit oluşturmak için düşük maliyetli cam

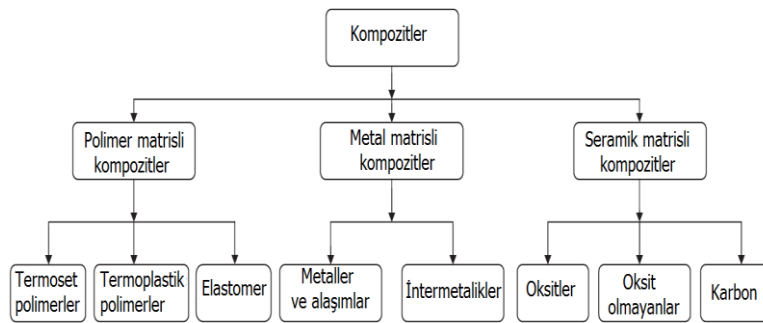
elyaf ve yüksek karbon elyaf modülleri dikkate alınır. Benzer şekilde, karbon/aramid hibrit kompozitler, tamamen aramid kompozite göre artırılmış modül ve basınç dayanımına ve tamamen karbon kompozite göre artırılmış tokluğa sahiptir. Bir hibrit kompozitteki her bir fiber tipinin termal genleşme katsayısı, işleme sırasında laminatta yüksek iç gerilim oluşmamasını sağlamak için dikkatli bir şekilde ele alınmalıdır (Hussein ve diğerleri, 2019; Dhakal ve diğerleri, 2018).

Whiskerler, tek kristaldir ve son derece yüksek mukavemetli kısa liflerdir. Whiskerlerin çapı 0.1 ile birkaç mikrometre arasında değişmektedir. Dislokasyonlar gibi kristal kusurların olmaması nedeniyle mukavemet, teorik mukavemete neredeyse yakındır. Bu nedenle whisker kullanarak bir matris malzemesinin mukavemetini önemli ölçüde artırmak mümkündür. Ancak whisker kullanmadan önce çözülmesi gereken bazı sorunlar vardır. Whiskerlerin çoğu pahalıdır. Dahası whiskerleri bir matrise eşit ve düzenli şekilde dâhil etmek zordur ve genellikle bu çözüm pratik değildir. Whiskerin işlenmesi, ince yapıları nedeniyle bir sorundur. Matristeki hizalama başka bir sorundur. Whiskerlerin bazıları kanserojen maddeler olarak sınıflandırılır. Whisker, özel bir ihtiyaç olmadıkça nadiren kullanılır. Partiküller neredeyse eşit boyutlu malzemelerdir. Partikül kompozitlerin çoğu da matrisin mukavemetini artırmaz. Dolayısıyla onları takviye olarak adlandırmak uygun değildir. Birkaç istisna vardır: Bir metal matris içindeki çok ince partiküller, dislokasyon hareketini engelleyerek mukavemeti artırabilir, sert partiküller çatlak ilerlemesini durdurabilir ve seramiklerin mukavemetini artırabilir. Partiküller esas olarak matrisin fonksiyonel veya termal özellikler gibi belirli fiziksel özelliklerini değiştirmek için eklenir. Örneğin ürünün maliyetini düşürmek ve modülü arttırmak için polimerlere partiküller eklenir. Bununla birlikte artış, elyaf yönünde sürekli fiber takviyeli kompozitler için karışım kuralına göre tahmin edilenden çok daha azdır. Şekil 2.2. Kompozitlerin Young modülünü, farklı takviye biçimlerinin yani sürekli elyaf, whisker ve partikül takviyenin hacim oranının bir fonksiyonu olarak göstermektedir. Takviye veriminin sürekli elyaftan partiküle doğru düştüğü unutulmamalıdır (Chawla ve Chawla, 2006; Balasubramanian, 2014).



Şekil 2.2 : Sürekli elyaf, whisker ve partikül takviyeli kompozitler için takviye hacim oranının bir fonksiyonu olarak gerilme modülü.

Matris malzemesine bağlı olarak, kompozitler Polimer/Plastik Matrisli Kompozitler (PMK), en az birinin metal olma koşuluyla farklı malzemelerin sistematik birleşmesiyle yeni üretilen malzemelere Metal Matrisli Kompozit (MMK), mekanik ve fiziksel özellikleri ile mükemmelliğe ulaşmış olan Seramik Matrisli Kompozit (SMK) olarak sınıflandırılırlar. Matris malzemesine göre kompozitlerin sınıflandırılması Şekil 2.3'te gösterilmiştir. Üç tip kompozit; benimsenen üretim yöntemi, mekanik davranışlar ve fonksiyonel özellikler bakımından farklılık gösterir. Matris malzemeleri fiziksel veya kimyasal değişime uğradığından kompozitlerin yapımında kullanılacak işleme yöntemi, kullanılan matris sistemine doğrudan dayanmaktadır. Matris malzemelerinin işlendiği sıcaklık, dağılmış fazın seçimini belirler çünkü donatı, herhangi bir kimyasal reaksiyona veya fiziksel değişikliğe uğramamalı veya özelliklerinde herhangi bir değişikliğe uğramamalıdır. Belirli bir kompozitin kullanılabileceği sıcaklık seviyesi, matris malzemesinin sıcaklık direnci ile belirlenir (W.D., 1976; G., 1982).



Şekil 2.3 : Matris malzemelerine göre kompozitlerin sınıflandırılması (Callister, 2007).

Matris malzemesi; polimer matrisli polimerlerde termoset polimer, termoplastik polimer veya elastomer olabilir. Termoset polimerler, işleme avantajı nedeniyle çok yaygın olarak kullanılmaktadır. Termoplastik polimerler, nispeten yüksek tokluk değerleri ve sonradan işlenebilme kabiliyeti nedeniyle her geçen gün önem kazanmaktadır. Spesifik özellik gereksinimlerini karşılamak için çok çeşitli termoplastik polimerler mevcuttur. Polimer matrisli kompozitler, ortam sıcaklığında kullanılacak ürünler için uygundur ve bunlar 250 °C'ye kadar kullanılabilen bazı özel polimerlerdir. Polimer matrisli kompozitler çalışma sıcaklığının 350 °C'den fazla olduğu uygulamalar için uygun değildir. PMK'lerin büyük ölçüde metallerin yerini alma başarısı, plastik matris malzemelerine kıyasla kompozitlerin çok daha gelişmiş mekanik özelliklerinden kaynaklanmaktadır. Kompozitlerin iyi mekanik özelliklere sahip olması, yüksek mukavemetli ve yüksek modüllü elyaf takviyesi sayesinde (R., 1995; Y., Cheshkov ve Natova, 2001).

Metal matrisli kompozitlerde en az biri metal olmak şartıyla metaller veya metal alaşımları kullanılır. Ağırlıklı olarak alüminyum, titanyum metalik köpük, fiber takviyeli metaller gibi hafif metaller kullanılır. Bazı özel uygulamalarda bakır ve kobalt gibi ağır metaller kullanılmaktadır. Metal matrisli kompozitler, çalışma sıcaklığının 1200 °C'ye kadar olduğu uygulamalar için uygun olabilir. Şu anda dağılmış faz olarak işleme avantajından dolayı kısa fiberler veya partiküller kullanılmaktadır. Metaller ve alaşımlar ayrıca modül ve mukavemeti önemli ölçüde iyileştirmek için sürekli fiberlerle güçlendirilmiştir. Metal matrisli kompozitler için temel sorun korozyondur. Metal matrisli kompozitlerin çoğu hâlâ geliştirme aşamasındadır ve yalnızca birkaç bileşen ticari olarak üretilmektedir. Metal matrisli kompozitlere olan ilgi son zamanlarda nakliye uygulamalarında yoğunlaşmıştır ve bunun sonucunda hafif metal tabanlı MMC'ler, özellikle alüminyum ve alaşım tabanlı MMC'ler çok ilgi çekmiştir. Alüminyum ve alaşımlarının, nispeten düşük Young modülü takviye malzemesi ile önemli ölçüde geliştirilebilir. Metaller ve alaşımlar doğal olarak iyi süneklik ve tokluğa sahiptir (J., 1995; Yoshinori, 2013).

Seramik matrisli kompozitlerde, matris malzemesi olarak birçok oksitli ve oksit olmayan seramik malzeme kullanılmaktadır. Seramik matrisli

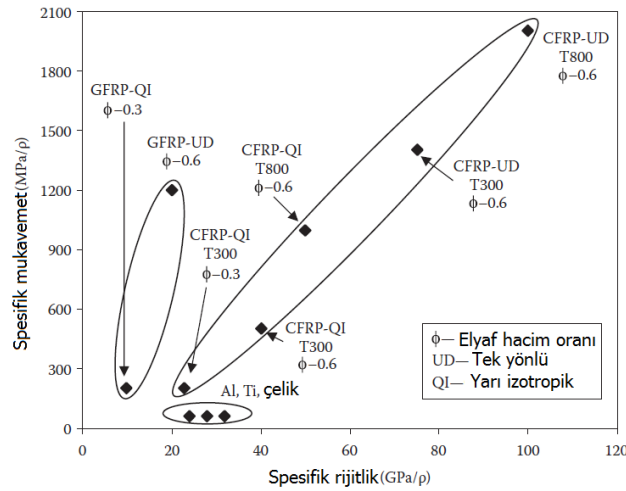
kompozitler, çalışma sıcaklıklarının 1200 °C'nin üzerinde olduğu yüksek sıcaklık uygulamaları için kullanışlıdır. Bu malzemeler çok pahalıdır çünkü seramik matrisli kompozitlerin çoğu yüksek sıcaklıkta işlenir. Bazı durumlarda, kaliteli bir ürün elde etmek için yüksek sıcaklıkta yüksek basınç uygulama ihtiyacı vardır. Dağınık fazın boyutuna bağlı olarak kompozitler; makro kompozitler, mikro kompozitler ve nanokompozitler olarak sınıflandırılabilir. Makro kompozitlerde dağınık fazın boyutu milimetre seviyesindedir. Makro kompozit için en iyi örnek betondur. Beton; çimento, kum ve çakıldan oluşur. Mikro kompozitler, mikrometre seviyesinde dağılmış fazdan oluşur. Şu anda kullanılan kompozitlerin çoğu mikro kompozitlerdir. İlk akla gelen örnekler arasında cam takviyeli ve karbon fiber takviyeli polimerler kullanılan en yaygın örnekler arasındadır.

Nanokompozitlerde dağınık fazın en az bir boyutu nanometre seviyesindedir. Karbon nanotüp takviyeli plastikler ve nanokil takviyeli plastikler, nanokompozitler için tipik örneklerdir. Mikro ve nanokompozit malzemeler, dağınık faz düzeyinde homojen değildir ancak makro düzeyde homojendir. Bu, makro düzeyde tek bileşenli bir malzeme gibi davrandıkları anlamına gelir. Kompozit malzemenin türünden bağımsız olarak arayüz, özelliklerin kontrol edilmesinde önemli bir rol oynar. Kompozitlerin bileşenleri, iyi tanımlanmış arayüzlerle ayrılır. Arayüzey bağ kuvveti, kompozitlerin uyumlu davranışı için çok önemlidir. Bağlama maddesinin kullanılması ve/veya bileşenlerin mekanik olarak birbirine kenetlenmesi ile daha yüksek bağlanma mukavemeti sağlanır. Her zaman daha iyi arayüzey bağ gücüne sahip olmak gerekli değildir; bazen özel bir arayüz, güçlü bir arayüzden daha faydalıdır. Enerji soğurucu sistemler için zayıf bir arayüz tercih edilecektir. Bu sistemlerde, bağ açmanın ardından lif çekilmesi, kırılma işlemleri sırasında çok fazla enerji emer. Bağ çözme yoluyla çatlak sapması, geliştirilmiş kırılma tokluğu için bir başka önemli katkıdır (Chawla K., 2012; Trefilov, 1995; Kar, 2017).

2.4 Kompozitlerin Avantajları

Kompozitlerin başlıca avantajı, yüksek özgül rijitlik ve mukavemet sağlamalarıdır. Bu nedenle kompozitler kullanılarak bileşen ağırlığı önemli ölçüde azaltılabilir. Şekil 2.4, kompozitlerin ve geleneksel malzemelerin özgül mukavemet ve modül değerlerini göstermektedir. Örneğin belirli bir yük

taşıma kapasitesi için bir bileşen yapılacaksa cam fiber takviyeli polimer (GFRP) bileşeni, çelik bileşenin yalnızca dörtte biri ağırlığında olacaktır. Benzer şekilde, sertlik malzeme seçiminde kriter ise karbon fiber takviyeli polimer (CFRP) bileşeni, çelik bileşenin yalnızca onda biri ağırlığında olacaktır. Ağırlık azaltma, havacılık ve otomobil sektörlerinde önemli bir sorundur. Dolayısıyla kompozit malzemeler, bu sektörlerdeki diğer geleneksel malzemeler üzerinde net bir avantaja sahip olacaktır. Kompozitlerin ikinci avantajı ise enerji verimliliği sağlamasıdır. Şu anda kullanılan kompozitlerin çoğu polimer bazlı kompozitlerdir. Polimer kompozitler, ortam sıcaklığında veya ortam sıcaklığının biraz üzerinde üretilebilir ve ortam sıcaklığının birkaç yüz derece üzerinde olabilir. Bu nedenle kompozitlerin üretimi için çok az enerji gerekir. Daha önce de belirtildiği gibi uçaklarda ve otomobillerde polimer kompozitlerin yaygın kullanımı toplam ağırlığı azaltacak ve dolayısıyla yakıt verimliliğini artıracaktır. Kompozitler, bu iki nedenden dolayı enerji tasarrufludur (Kelly, 1967; Chawla K., 2012; Balasubramanian, 2014; W.D., 1976).



Şekil 2.4 : Geleneksel malzemelerin ve kompozitlerin özgül mukavemet ve rijitlik değerleri (Balasubramanian, 2014).

Üretim sırasında bir fiber takviyeli kompozitte elyafları herhangi bir belirli yönde hizalamak mümkündür. Nihai kompozit yönsel özelliklere sahip olacak ve mekanik özellikler, fiber yönü boyunca yüksek olacaktır. Bazı yapılarda, mekanik özelliklerin elde edilmesi yalnızca belirli bir yönde yüksektir ve diğer yönlerde kritik olmayabilir. Bu tür uygulamalar için kompozitler daha uygundur. İstenilen özelliklere sahip kompozitler yapmak mümkündür. Çok

çeşitli takviyeler, matrisler ve işleme yöntemleri arasından uygun bir takviye, matris ve işleme yöntemi seçilebilir. Çok sayıda yazılım programı sayesinde, farklı fiber oryantasyonlu her türlü takviye ve matris için kompozit özelliklerinin teorik tahmini yapmak artık çok kolaydır. Kompozitler ile karmaşık şekiller çok kolay bir şekilde yapılabilir. Kompozitlerin işleme yöntemleri, en azından polimer kompozitler, herhangi bir karmaşık şekli üretecek kadar gelişmiştir. Polimer kompozitlerin çoğu, ortam sıcaklığında veya ortam sıcaklığının biraz üzerinde ($\sim 150\text{ }^{\circ}\text{C}$) işlenir. Bu nedenle işleme ekipmanı ve araçlarının çok kritik olması gerekmez. İstenilen özelliklerin kombinasyonu ile kompozitler üretmek mümkündür. Otomobil gövde parçaları gibi bazı uygulamalarda, daha iyi ısı yalıtımı ve estetik ile iyi mekanik özelliklere sahip olmak gerekmektedir. Polimer kompozitlerden yapılan bir otomobil gövde parçası tüm bu özelliklere sahip olacaktır. Elektronik bileşenlerin kapaklarında statik yük oluşumunu önlemek için bir miktar elektrik iletkenliğine sahip olunması arzu edilir. Polimere bir iletken malzeme ekleyerek bir miktar elektrik iletkenliğine sahip bir kompozit üretmek mümkündür (J.C. ve P., 2003; Callister W. D., 2014; Balasubramanian, 2014; W.D., 1976).

2.5 Kompozitlerin Dezavantajları

Kompozitler, maliyet bazında geleneksel malzemelerden daha pahalıdır. Kompozitler, ağırlık bazında sırasıyla alüminyum ve çelikten yaklaşık 5 ve 20 kat daha maliyetlidir. Ancak kompozitlerin dayanım performansı, kullanım yerine göre alüminyum ve çelikten yüksek olabilmektedir. Kompozitler sadece malzeme seçiminde yüksek performans ana faktör olduğunda yer bulur. Arayüzde kusur oluşma olasılığı yüksektir çünkü kompozitler tamamen farklı türden malzemelerden yapılmıştır. İşleme sırasında büyük bir özen gösterilmedikçe kusurların çıkması kaçınılmazdır.

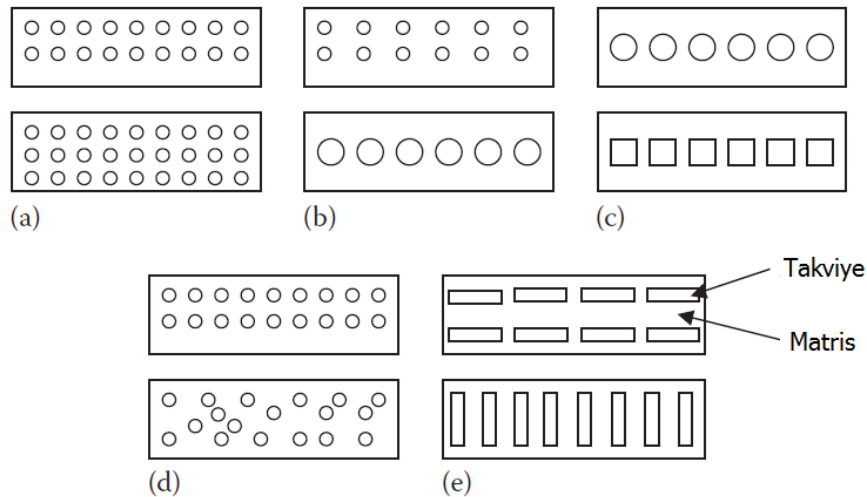
Fiber takviyeli kompozitlerin çoğu doğası gereği anizotropiktir. Liflere enine yönde yüksek gerilim uygulanması ürüne zarar verebilir. Kompozitlerin üretim hızı genellikle düşüktür. Kompozitler, otomobil endüstrisi gibi yüksek hacimli üretim endüstrileri için uygun olmayabilir. Yavaş üretim hızı sorunu, termoplastik kompozitler ve kalıplama bileşikleri ile bir dereceye kadar

aşılabilir. Şu anda fiber takviyeli kompozit bileşenleri, geleneksel malzeme bileşenleriyle karşılaştırılabilir oranlarda yapılabilmektedir. Konvansiyonel metalik malzemeler arasında uygun malzeme seçimi, özellikler hakkında geniş çapta kabul gören veri tabanının mevcudiyeti nedeniyle çok kolaydır. Ancak farklı kompozitlerin özellikleri hakkında benzer veri tabanı mevcut değildir. Bu, kompozitler için başka bir dezavantajdır. Geri dönüşüm, kompozitlerin yaygın kullanımı için bir başka engeldir. Kompozitlerin geri dönüşümü, geleneksel metalik malzemelere kıyasla zordur. Polimer matrisin iyi hava direnci, geri dönüşüm sırasında bir engeldir. Şu anda kompozitlerin geri dönüşümü için çeşitli seçenekler mevcuttur ancak bu seçenekler biraz pahalıdır (Chung, 2003; Nielsen, 2005; Marshall, 1991).

2.6 Kompozitlerin Özellikleri

Bir kompozitin özellikleri; takviye fazların özelliklerinin ve bunların göreceli oranlarının, boyutunun, şeklinin, dağılımının ve takviye fazın yönünün bir fonksiyonudur. Bu özellikler Şekil 2.5'te gösterilmektedir.

Bileşenlerin oranı, ağırlık fraksiyonu veya hacim fraksiyonu ile ifade edilebilir. Ağırlık fraksiyonu üretimle ilgilidir ve hacim fraksiyonu genellikle özellik hesaplamalarında kullanılır. Ağırlık ve hacim fraksiyonları, yoğunluk (ρ) vasıtasıyla birbirleriyle ilişkilidir.



Şekil 2.5: Kompozitlerdeki takviyelerin geometrik ve konumsal özelliklerinin şeması: (a) konsantrasyon, (b) boyut, (c) şekil, (d) dağılım ve (e) yönelim.

$$W_r = \frac{w_r}{w_c} = \frac{r_r}{r_c} V_r \quad (2.1.)$$

Formülde r takviye, c kompozit, W ağırlık fraksiyonu, V hacim fraksiyonlarını ve w ise ağırlığı ifade etmektedir.

Benzer olarak

$$W_m = \frac{w_m}{w_c} = \frac{r_m}{r_c} V_m \quad (2.2.)$$

Formülde m matrisi ifade eder. Eğer bileşenlerin hacim fraksiyonu veya ağırlık fraksiyonu biliniyorsa ρ_c belirlenebilir. Hacim fraksiyonları bilindiğinde

$$r_c = r_r V_r + r_m V_m \quad (2.3.)$$

Bileşenlerin ağırlık fraksiyonları bilindiğinde

$$\frac{1}{r_c} = \frac{W_r}{r_r} + \frac{W_m}{r_m} \quad (2.4.)$$

Denklem 1.3. bileşenlerin yoğunluklarının hacim oranı ayarlı toplamı ile kompozitin yoğunluğunu verir. Bu denklem yalnızca yoğunluğa uygulanamaz, belirli koşullar altında kompozitlerin diğer özelliklerine de uygulanabilir.

Denklemin genelleştirilmiş bir şekli;

$$X_c = X_r V_r + X_m V_m \quad (2.5.)$$

Burada X herhangi bir özelliği ifade eder ve r takviye, c kompozit, m matrisi ifade eder. Bu denklem, karışımlar kuralı veya karışımlar kanunu olarak bilinir.

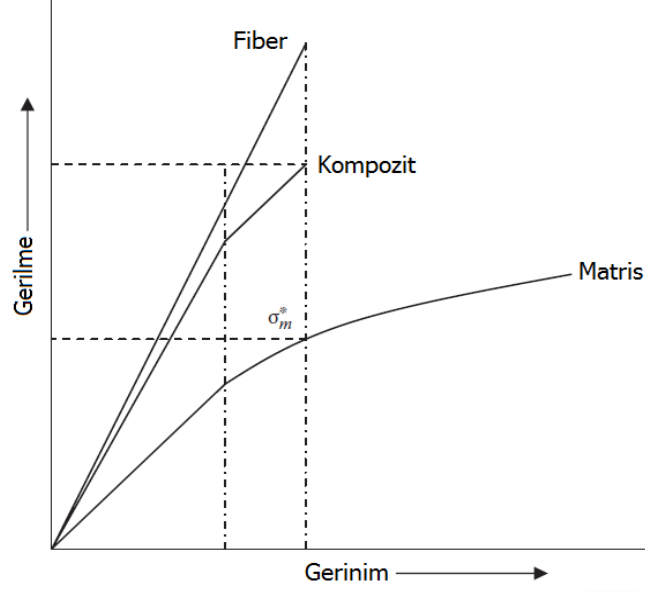
Takviye fazın boyutu da kompozitlerin özelliklerini etkiler. Genel olarak boyut ne kadar küçükse boyut etkisi nedeniyle mekanik özellikler o kadar iyi olacaktır böylece malzeme kusurunun boyutu sınırlanmış olur. Herhangi bir malzemenin gücü, kusurun boyutu ile ters orantılıdır. Bir malzemenin yüzey alanı, boyutuna ve şekline bağlıdır. Herhangi bir özel hacim için daha küçük takviye, daha fazla yüzey alanına sahiptir. Takviye ve matris arasındaki temas alanı yüzey alanıyla birlikte artar ve daha iyi özellikler sağlar. Bununla birlikte bir mikrometreden daha küçük çaplara sahip sürekli fiberler üretmek çok zordur. Çok ince kısa fiberler/whiskerler ve partiküller topaklanma eğilimindedir ve bunlardan düzgün bir dağılım elde etmek çok zordur. İdeal olarak bir kompozit homojen olmalıdır. Yani bileşenlerin tekdüze dağılımına sahip olmalıdır ancak üretim

sırasında bunu başarmak zordur. Homojenlik, malzemenin temsili bir hacminin fiziksel ve mekanik özelliklerinde malzemenin ortalama özelliklerinden ne ölçüde farklı olabileceğini belirler. Mümkün olduğunca üniform olmayan dağılımdan kaçınılmalıdır. Aksi takdirde bir kompozitin farklı bölgeleri, farklı özelliklere sahip olacaktır. Kompozitin en zayıf kısmı tarafından belirlenen bu özellikler, sistemin üniform olmaması nedeniyle azalacaktır. Örneğin üniform olmayan bir kompozitteki hata, en düşük mukavemet bölgesinde başlayacak ve dolayısıyla kompozitin genel mukavemetini olumsuz etkileyecektir. Fiberin matris içinde belirli bir yöndeki yönelimi, kompozitin izotropik özelliklerini etkiler. Takviye eş eksenli partiküller biçiminde olduğu zaman, kompozit esasen izotropik bir malzeme gibi davranır. Fiberin boyutları eşit olmadığı zaman, kompozit yalnızca fiber rastgele yönlendirildiğinde izotropik bir malzeme gibi davranabilir. Örneğin rastgele yönlendirilmiş kısa bir fiber takviyeli kompozit, izotropik özelliklere sahip olacaktır. Bazı durumlarda üretim süreci, takviyenin yönünü etkileyebilir ve dolayısıyla izotropi kaybı meydana gelir yani kompozitin anizotropik olduğu söylenir. Tek yönlü veya çapraz katlı laminat gibi sürekli fiber takviyeli kompozitlerden imal edilen bileşenlerde, laminat en yüksek mukavemetin maksimum hizmet gerilimi yönünde olacak şekilde düzenlenebildiğinden anizotropi istenebilir. Aslında bu kompozitlerin birincil avantajı, anizotropinin tasarım ve imalat yoluyla kontrol edilebilmesidir.

Bir kompozit malzemenin özelliklerinin çoğu, diğer faktörlerin karmaşık bir fonksiyonudur. Bir kompozitin bileşenleri, karışımlar kuralı tarafından tam olarak açıklanmayan kompozitlerin özelliklerini belirlemek için genellikle sinerjik bir şekilde etkileşime girer. Bir arayüzün kimyasal özellikleri ve bağlanma özellikleri, kompozitin özelliklerinin belirlenmesinde oldukça önemlidir. Arayüzey bağ kuvveti, matristen fiberlere yük aktarımı için yeterli olmalıdır ve ancak o zaman kompozit, güçlendirilmemiş matristen daha iyi bir mukavemete sahip olacaktır. Öte yandan kompozitin sertliği; mukavemetten daha önemliyse arayüz, bağ açma ve elyaf sıyrılması gibi sertleştirme mekanizmalarının cereyan etmesine hemen izin vermemelidir (Callister W. D., 2014; Balasubramanian, 2014; Kar, 2017; Marshall, 1991; Chung, 2003).

2.7 Fiber Takviyeli Kompozitler

Fiber takviyeli kompozitler, teknolojik olarak en önemli kompozitlerdir. Fiber takviyeli kompozitlerde olağanüstü yüksek özgül mukavemet ve Young modül değerleri elde edilebilir (Li ve diğerleri, 2017). Fiber yönlenmesi, içeriği ve dağılımının tümü, mukavemet ve diğer özellikler üzerinde önemli etkiye sahiptir. Sürekli fiberler normal olarak hizalanırken süreksiz fiberler hizalanabilir, kısmen hizalanabilir veya rastgele hizalanabilir. Bir fiber takviyeli kompozitte, fiberler yük taşıyıcı elemanlardır. Matris malzemesi, fiber takviyeleri bir katı içinde birbirine bağlar. Kompozit yüke tabi tutulduğunda yükü elyaflara aktarır. Aynı zamanda takviyeleri korumaya da yardımcı olur ve kompozitlerin dokusu, rengi ve fonksiyonel özellikleri, matrisin modifikasyonu yoluyla verilir. Bu tür kompozitlerin mekanik tepkisi; fiber ve matrisin gerilme-gerinim davranışlarına, fiber içeriğine ve yükün uygulandığı yöne bağlıdır. Yönlenmiş fiber kompozitlerin özellikleri oldukça anizotropiktir yani ölçüldükleri yöne bağlıdır. Genellikle fiberler, tamamen kırılğan malzemeler olarak kabul edilir ve matrisin makul ölçüde iyi sünekliğe sahip olduğu kabul edilir. Fiber, matris ve kompozitin gerilim-şekil değiştirme davranışları Şekil 2.6.'da gösterilmektedir. İlk aşamada, kompozitte hem fiberler hem de matris elastik olarak deforme olur. Uygulanan gerilim, matris akma geriliminden fazla olduğunda matris plastik olarak deforme olurken fiberler elastik olarak deforme olmaya devam eder. Bu aşama aynı zamanda kompozit için doğrusaldır ancak eğimi azalmıştır. Kompozit kopma başlangıcı, fiberler yaklaşık olarak fiber kırılma geriliminde kırılmaya başladığında başlar. İdeal durumda, tüm fiberler fiber kırılma geriliminde başarısız olur ve matris yükü kaldıramaz ve tüm kompozit aniden bozulur (Chawla K. , 2012; Hull ve Clyne, 1996).



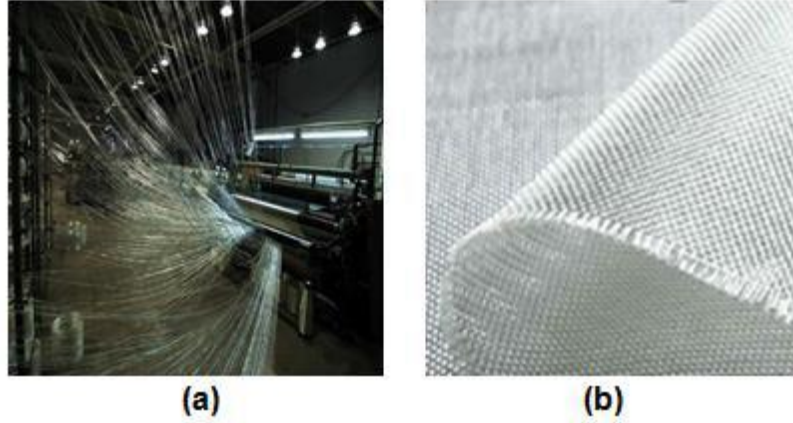
Şekil 2.6: Fiber, matris ve kompozitin gerilme-gerinim davranışı (Callister, 2007).

Kompozitte meydana gelen hasar sırasında matristeki gerilme σ_m^* olarak gösterilir. Kompozitteki hasar, gerçek durumda bütün fiberler aynı anda kopmadıkları hatta bazı fiberler kopsa bile matris bu kopan fiberleri deformasyon esnasında tutmaya devam ettiği için yıkıcı bir hasar olarak görülmeyebilir.

2.8 Önemli Fiber Takviye Türleri

a) Cam fiberler: Elyaf takviyeli kompozitlerin mekanik davranışları, esas olarak elyaf mukavemetine, matris mukavemetine ve elyaf/matris arasındaki arayüzey bağlanmasının mukavemetine bağlı olan gerilim transferini mümkün kılma yeteneklerine bağlıdır (Erden ve diğerleri, 2010). Cam elyaflar (GF'ler); elyaf takviyeli kompozitlerin mekanik ve tribolojik özelliklerini geliştirmek için uzunlamasına dokunmuş keçe, kesilmiş elyaf (farklı) ve kesilmiş keçeler gibi çeşitli biçimlerde kullanılmıştır. Bununla birlikte bu tür kompozitlerin özellikleri, kompozit hazırlama sırasında serilen fiberlerin doğasına ve yönüne bağlıdır (Alam ve diğerleri, 2010). Cam elyaflar, cam elyaftan yapılan tüm Fiber takviyeli kompozitler (FRP)'lerin poliestere reçineye istenilen fiziksel ve sertlik özelliğini kazandırabildiğinden %90 ile kullanılan polimer takviyelerinin en yaygın olanlarındandır. Bunlardan en eski ve en popüler biçimi E-cam veya elektrikli camdır. Diğer cam elyaf türleri arasında bir cam veya alkali cam, C-cam veya kimyasal dirençli cam ve yüksek mukavemetli R-

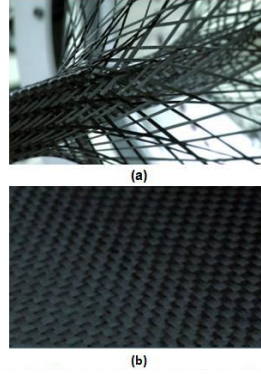
cam ve/veya S-cam bulunur. Laboratuvar koşullarında, cam elyaflar yaklaşık 7000 N/mm² gerilme gerilimlerine dayanabilirken ticari cam elyaflar 2800 ila 4800 N/mm²'ye ulaşır (Şekil 2.7).



Şekil 2.7: (a) Örülmemiş cam elyafların dijital görüntüleri; (b) Örülmüş cam elyafı .

b) Karbon Fiberler: Karbon fiberler (CF), grafitik ve kristal olmayan bölgelerden yapılan yeni nesil yüksek mukavemetli malzemelerdir. Tüm takviye edici elyaflar arasında karbon elyaflar, en yüksek spesifik modülü ve mukavemeti sunar. Ek olarak karbon fiberler, yüksek sıcaklıklarda bile gerilme mukavemetini koruyabilir ve nemden bağımsızdır. Karbon fiberler, cam ve diğer organik polimer fiberlerin aksine stres altında kırılmadan kalabilir (Hart ve Smith, 1987). Karbon fiberler ayrıca nispeten düşük ısı genleşme katsayısı ile yüksek elektriksel ve ısı iletkenliklere sahiptir (Donnet ve Bansal, 1998; Hajduk, 2005; Carolin, 2003). Karbon fiberlerin özellikleri onları havacılık, elektronik ve otomobil sektörlerindeki uygulamalar için ideal kılmaktadır. Karbon fiberler; maksimum 7 Gpa mukavemet sahiptir ve eksenel basma mukavemeti, çekme mukavemetlerinin %10-60'ıdır (Chand, 2000) ve enine basınç mukavemeti, eksenel basınç mukavemetlerinin %12-20'sidir (Shinohara ve diğerleri, 1993). Poli-akrilonitril (PAN), havacılık ve spor/eglençe ürünlerindeki yapısal malzeme kompozitleri için yaygın olarak uygulanan, yüksek gerilme mukavemeti ve daha yüksek elastik modül sunan, karbon elyaf üretiminde kullanılan en yaygın öncülerden biridir. Nihai işleme sıcaklığına bakıldığında PAN öncülleri ile Ultra yüksek modüllü (UHM) karbon fiberler, Orta modüllü (IM) karbon fiberler, düşük modüllü ve yüksek gerilme kuvvetli

(HT)karbon fiberler, yüksek modüllü (HM) karbon fiberler değişik sınıflarda karbon fiberleri oluşturmaktadır (Şekil 2.8) (Hearle, 2001).



Şekil 2.8: (a) Dokunmamış karbon fiberlerin dijital görüntüleri;
(b) Dokunmuş karbon fiber.

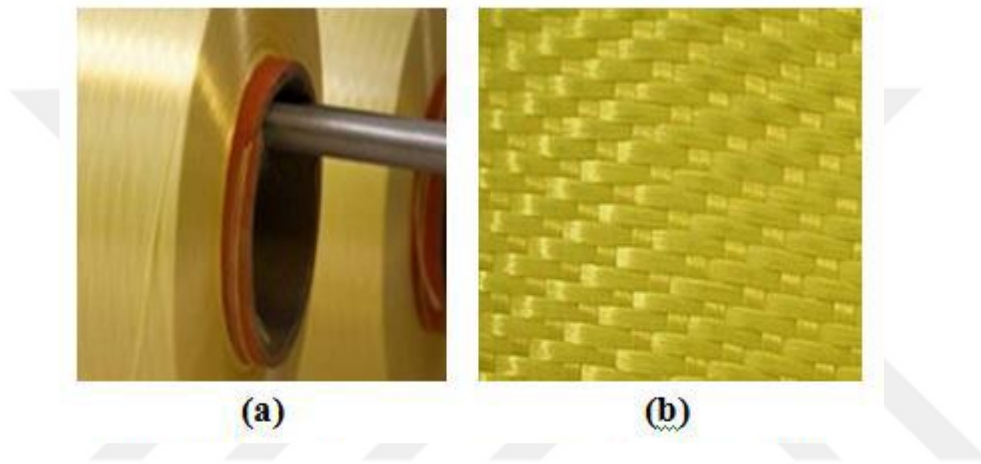
Karbon fiberler, son derece yüksek mukavemet/ağırlık ve rijitlik/ağırlık oranları nedeniyle çok yönlüdür. Dahası kimyasal olarak inert, elektriksel olarak iletken ve erimez özelliktedirler. Karbon fiberlerin rijitliği ve esneklik modülü camdan çeliğe üç kata kadar değişebilir. En yaygın kullanılan tipler 200.000-400.000 N/mm² elastik modülüne sahiptir. Çizelge 2.1 çeşitli karbon fiber ürünlerin mekanik davranışlarının ayrıntılı gösterimidir. Karbon fiberler, doğrudan bitmiş ürün veya ön ürün olarak işlenebilir. Bitmiş ürünler, dokuma tüpler veya pultrüde kesitler olarak görünebilir. Ön ürünler kısa lifleri, bükülmüş veya bükülmemiş iplikleri, sürekli filament, kırıkları ve benzerlerini içerebilir.

Çizelge 2.1: Farklı tipte karbon fiber liflerinin mekanik özellikleri(Rosato 2004).

Türü	Ultra yüksek elastik modül tipi	Yüksek elastik modül tipi	Orta seviye elastik modül tipi	Standart elastik modül tipi	Düşük elastik modül tipi
Çekme elastik modülü	600 GPa	350-600 GPa	280-350 GPa	200-280 GPa	200 GPa
Çekme mukavemeti	2,500 MPa	2,500 MPa	3,500 MPa	2,500 MPa	3,500 MPa

c) Kevlar Fiberler: Isıya dayanaklı, sert bir moleküler yapıya sahip, para-adramid zincirler arasındaki moleküler yapısından dolayı güçlü olan sentetik elyafıdır. 1960'larda lastik tekerlerdeki aramid benzeri elyaflar çelik takviyelerin alternatifi olarak geliştirilmiştir. Bununla birlikte geliştirildikten

sonra aramid fiberleri aynı zamanda balistik için uygundur ve asbestin yerini alabilecek özelliktedir. Kevlar elyafları genellikle hafiflik, yüksek mukavemet ve sertlik, hasar direnci ve yorgunluğa karşı direncin çok önemli olduğu yüksek performanslı kompozit uygulamalar için kullanılır. Aramid elyafları, yüksek darbe direnci ile birlikte yüksek mukavemet ve düşük ağırlık gerektiren uygulamalarda sıklıkla kullanılır. Aramid malzemelerin en sık kullanılan uygulamalarından bazıları kurşungeçirmez yelekler, soğutma araçları, gemi gövdeleri ve son zamanlarda sivil yapıların yapısal güçlendirilmesine yöneliktir (Rosato D., 2004; Erden ve diğerleri 2010) (Şekil 2.9).



Şekil 2.9 : (a) Dokunmamış kevlar fiberler (b) Dokunmuş kevlar fiberler (Rosato 2004).

2.9 Fiber Takviyeli Kompozitlerin İşlenebilirliği

Fiber takviyeli kompozitlerin işlenmesi, birçok açıdan metallerin ve alaşımlarının işlenmesinden önemli ölçüde farklılık göstermektedir (Konig ve diğerleri, 1989). Fiber takviyeli kompozitlerin işlenmesinde, malzeme davranışı sadece homojen olup olmamasına değil aynı zamanda çeşitli fiber ve matris özelliklerine, fiber oryantasyonuna ve matris ile fiberlerin nispi hacmine de bağlıdır. Takım, işlemeye tepkisi tamamen farklı olabilen sürekli değişen matris ve fiber malzemelerle karşılaşır. Örneğin bir alüminyum-bor kompozitinde, kesici takım sürekli olarak yumuşak bir alüminyum matris ve sert bor fiberlerle karşılaşır. Benzer şekilde bir cam-epoksi kompozitinde; takım, düşük sıcaklıkta bir yumuşak epoksi matris ve kırılman cam fiberlerle karşılaşır. Kompozitleri bir şekilde benzersiz kılan ve aynı zamanda işlenmesini zorlaştıran kesici takımın bu değişimlere karşı gösterdiği

davranıştır. Bu nedenle fiber takviyeli kompozitlerin işlenmesi, takım malzemelerinin geometrisi ve aşınma direnci konusunda bazı zorluklar gerektirir.

Geleneksel işleme uygulamaları, kompozitlerin işlemeye karşı tepkisinin metal işlemeden tamamen farklı olmasına rağmen ekipman ve deneyim mevcudiyeti göz önüne alındığında genellikle kompozitlerin işlenmesine uygulanır. Bununla birlikte bazı uygulamalarda iş malzemesinden daha sert bir takımla geleneksel işleme, ekonomik bir öneri olmayabilir. Örneğin sürekli SiC kompozit fiberleriyle güçlendirilmiş camın işlenmesinde, polikristalin elmas (PCD) dâhil olmak üzere hiçbir geleneksel kesici takım malzemesi diğerinden daha uzun süre dayanmaz (Rideealgh, Rawlings, & West, 1990). Bu nedenle alternatif malzeme kaldırma işlemleri veya lazerle kesme, ultrasonik işleme, su jeti (veya aşındırıcı su jeti) ile kesme veya elektrik deşarjı işleme gibi geleneksel olmayan işleme süreçleri için ihtiyaç ortaya çıkmaktadır. Elbette tüm bu süreçlerin kendine göre sınırlamaları vardır. Kompozitlerde kullanılan çoğu fiber (örneğin cam, bor ve karbon) sert ve aşındırıcı olduğundan kullanılması önerilen kesici takım malzemeleri arasında kaplamalı sement ve kaplamasız sement karbürler, seramikler, doğada bilinen elmas, en sert malzeme kabul edilen kübik bor nitrür (tek kristal veya polikristalin). Bununla birlikte sinterlenmiş karbür ve elmas yaygın olarak kullanılan malzemelerdir. Ek olarak fiber takviyeli kompozitlerin (özellikle bir epoksi matris ile) geleneksel yöntemle işlenmesi ile ilişkili kapsamlı plastik deformasyon ve bunun sonucunda oluşan ısı üretimi en aza indirilebilir. Bu işlemler lazerle işleme, su jeti (aşındırıcı ile veya aşındırıcı olmadan), ultrasonik işleme ve elektrik boşaltma işlemeyi içerir. Bu işlemlerin her biri, geleneksel işlemeye kıyasla ve hatta kendi aralarında karşılaştırıldığında belirli avantajlar ve eksiklikler sunar. Örneğin elektriksel deşarj işlemesi (EDM), kompozit malzemenin elektriksel olarak iletken olmasını gerektirir. Lazer işleme, kompozitin optik absorpsiyonuna ve termal özelliklerine bağlıdır. Aşağıdaki metinde, temsili kompozit malzemelerin geleneksel üretim yöntemleriyle işlenmesi ile ilgili bazı konular tartışılmaktadır.

2.10 Karbon ve Cam Fiber Takviyeli Kompozit Malzemelerin Geleneksel Üretim Yöntemleri ile İşlenebilirliği

Kompozit malzemeler, heterojen yapıları nedeniyle işlenmesi zor malzemeler olarak kabul edilmektedir. Bu tür malzemelerin işlenmesinde tipik olarak tornalama, frezeleme, tek noktalı kesme aleti kullanarak metal yüzeylere şekil verme genellikle öteleme tek noktalı kesici takımlar ile dönme hareketi de çok noktalı kesiciler ve delme vb. gibi geleneksel işleme yöntemleri kullanılır. Kompozitlerin anizotropik ve heterojen yapıları nedeniyle, bu tür malzemelerin geleneksel işleme prosesleriyle işlenmesi, genellikle matris çatlaması, lif çekme, genişleme (kabarma) ve delaminasyon (delik yüzey hatası) gibi malzeme hasarlarına neden olur (Chouhan ve diğerleri, 2016; Fu ve diğerleri, 2015). Hasar davranışları yalnızca heterojen ve anizotropik yapıdan değil, aynı zamanda işleme yöntemlerinden ve bunların etkileşimlerinden de kaynaklanmaktadır (Morkavuk, 2016). Bunlara ek olarak heterojen yapıları nedeniyle polimer kompozit malzemelerin geleneksel yöntemlerle işlenmesi; delaminasyon, takım ömrünün azalması, fiber sıyrılması, matris sıvanması ve toz oluşumu gibi yapısal ve sağlıkla ilgili sorunlara yol açmaktadır (Echaabi ve diğerleri, 1996). Yüksek sertliklerine ve aşındırıcılıklarına rağmen kırılgan yapıları nedeniyle takımların plastik deformasyonunu önlemek için elyafların işlenmesi geleneksel işleme yöntemleriyle gerçekleştirilir (KoPlev ve diğerleri, 1983; Murphy ve diğerleri, 2002). CFRP kompozit malzemelerin düşük işlenebilirliği genellikle delaminasyon, çapaklar ve yüzey altı hasarları dâhil olmak üzere çeşitli işleme hatalarına yol açar (Singh ve diğerleri, 2013; Turki ve diğerleri, 2014). CFRP kompozit malzemelerin geleneksel işleme takımları ile işlenmesi sırasında tipik son işlem ve yüzey bütünlüğü ile ilgili problemlerle sıkça karşılaşılır. Lif çekme, lif kopması, matris kopması ve delaminasyon gibi çeşitli hasar türlerinin meydana gelmesi çok sayıda iş parçasının reddedilmesiyle sonuçlanır (Alberdi ve diğerleri, 2015). Uçak endüstrisinde, kompozit malzemenin katmanlara ayrılma ile ilgili hasarlar kaynaklı ret oranının %60 olduğu akademik çalışmalarda vurgulanmıştır (Gaitonde ve diğerleri, 2008; Liu ve diğerleri, 2012; Persson ve diğerleri, 1997; Wong ve diğerleri, 1982; Unde ve diğerleri, 2015; Karnik ve diğerleri, 2008).

Karbon ve cam fiber takviyeli polimer kompozit malzemeler üzerinde delme kaynaklı yüzey hasarları ve matkap ucu geometrisinin ve kesme parametrelerinin etkileri üzerine yaptıkları çalışmada Durao vd. (2010) düşük ilerleme hızlarının aksel kuvvetleri azalttığını ve bunun da delaminasyon başlatma riskini azalttığı ve böylece kompozit tabakaların delinmesi için uygun olduğunu bildirmişlerdir. Ayrıca delaminasyon sonuçlarının takım geometrisinden etkilendiğini ve buna göre minimum delaminasyon için 120° uç açılı helisel matkapların kullanılması gerektiğini bildirmişlerdir.

Ramirez ve diğerleri (2014) kesme sıcaklıkları, delik yüzeyi topografyası ve kesme kuvvetleri ve aşınma ölçümü üzerine yaptıkları çalışmada delme işlemi sonucunda serbest yüzey aşınmasının olduğunu ve çapak oluştuğunu belirtmişlerdir. Eneyew ve Ramulu (2014), delme işlemi için PCD matkap kullandıkları çalışmalarında, itme kuvvetinin artan ilerleme hızı ile arttığını ve artan kesme hızı ile azaldığını belirtmişlerdir. Çeşitli araştırmalar, yüksek kesme hızları ve düşük ilerleme hızları ile iyi bir delik yüzey kalitesinin elde edildiğini ortaya koymaktadır. Gaitonde vd. (2008) yüksek hızlı delme işlemlerinde sementit karbür (K20) helisel matkabı kullanmışlar ve artan kesme hızının bir sonucu olarak delaminasyon eğiliminde bir azalma olduğunu bildirmişlerdir. Ayrıca düşük ilerleme hızı-uç açısı kombinasyonunun kullanılmasını da önermişlerdir. Grilo vd. (2013) Delme işlemini farklı matkap uçları (SPUR, R950, R415) ile uygulamış ve deliklerin giriş yüzeylerinde delaminasyon gözlemlenmemiş oysa delik çıkışlarında kesilmemiş lifler bulunmuştur. Bunlara ek olarak en düşük delaminasyon seviyeleri SPUR matkap ile elde edilmiştir. Kılıçkap (2010), delik çıkışındaki delaminasyonun %13-30 oranında, delik girişindeki delaminasyondan daha yüksek olduğunu belirterek düşük kesme hızı ve düşük ilerleme hız değerleri ile düşük delaminasyon faktörünün gözlemlendiğini bildirmiştir. Ekici ve Işık'ın elde ettiği test sonuçlarına göre yüksek kesme hızı ve düşük ilerleme hızı değerlerinin hasar faktörü azalttığı belirtilmiştir (Ekici ve Işık, 2009). Abrao ve diğerleri (2008) İtme kuvvetinin artan ilerleme hızıyla arttığını, kesme hızının itme kuvvetini çok az etkilediğini ve takım aşınmasının artan itme kuvveti seviyelerine yol açtığını bildirilmiştir.

Yapısal bütünlüğü azalttığı ve zayıf montaj toleransına yol açtığı için kompozitlerin delinmesi sırasında, delaminasyonun önemli bir sorun olduğu iyi bilinmektedir. HoCheng ve Dharan, kompozit laminatlarda delme sırasında delaminasyonu araştırmışlardır. Delme sırasında hem girişte hem de çıkışta delme kaynaklı delaminasyonun meydana geldiği bulunmuştur. Ho-Cheng ve Dharan, kırılma mekaniğini kullanarak bu sorunu analiz ettiler ve delinmiş delik derinliğinin bir fonksiyonu olarak optimal bir itme analizin karşılığı olarak delinmiş delik derinliklerine karşılık olarak optimal bir itme kuvvetini öngörmüşlerdir. Verimliliği en üst düzeye çıkarmak amacıyla geri besleme kontrolü için delaminasyon olmadan optimum itme kuvvetinin kullanılabileceğini öne sürdüler.

2.11 Delik Delme Prosesinde Destek Plakalarının Kullanımı

Kompozit malzemelerin delinmesinde oluşan bazı problemler hâlâ aşılanamamıştır. Kaliteli işlenmiş yüzey ve delik elde etmek için araştırmacıların uygun yöntem arayışları devam etmektedir. Çeşitli delik delme stratejileri arasında, delaminasyon hasarı ve çapak oluşumunu azaltmak için delik delme anında iş parçasının çıkış tarafında destek kullanımı önerilmektedir. Bu stratejinin uygulaması kolay olduğu için yaygın olarak tercih edilmektedir (John, 2020).

Birçok araştırmacı, delme operasyonlarındaki problemleri çözmek için alternatif destek plakaları kullanmaya başlamışlardır (John, 2020). Grafit/epoksi laminat delinmesinde itme kuvvetinin neden olduğu katmanlara ayrılmayı engellemek için alüminyum destek plakası kullanmıştır. Bu işlemin destek plakasız işlemeye oranla delaminasyon oluşturmak için daha yüksek itme kuvveti oluştuğunu tesbit etmişler (Sadat, 1992).

Bhattacharyya ve Horrigan, çapaksız ve delaminasyonsuz delik elde etmek için Kevlar kompozit malzemeler üzerinde yaptıkları çalışmalarda 20 GPa Young modülüne sahip ahşap esaslı destek malzemesi kullanarak gerçekleştirilen delme işleminde, destek plakasız delme işlemine kıyasla hem kriyojenik hem de kuru ortamda daha az delaminasyon oluştuğu sonucuna varmışlardır (Bhattacharyya, 1998).

Dhakal ve diğerleri karbon elyaf takviyeli polimer kompozitlerin farklı malzemeleri üzerinde yapılan delme işlemlerinde titreşim, sapma ve şok dalgalarının yayılımının azaltılması için su jeti ile yaptıkları delme deneylerinde, corex (alçı levha) destek malzemesi kullanmışlar ve netice olarak alçı levha destek plakasının tüm polimer kompozit malzemelerinin çıkış delaminasyonunu ciddi oranda azalttıklarını göstermişlerdir (Dhakal ve diğerleri, 2018).

Park vd. Karbon fiber takviyeli kompozit (CFRP) üzerinde daha önce deldikleri delikler üzerinde yaptıkları ultrasonik titreşimli çapak alma çalışmalarında destek olarak buz tabakasını kullanmışlar ve bu çalışmanın çapak oluşumunu en aza indirdiğini göstermişlerdir. Bunun nedeninin de iş parçası ile destek malzemede yardımcı olarak kullanılan buz tabakası arasında boşluk oluşmamasından kaynaklandığını açıklamışlardır (Park, 2019).

Delme kaynaklı oluşan delaminasyon hasarı, değişken kesme hızları ve ilerleme miktarı ile deneysel olarak incelenmiştir. Yapılan deneylerde iki farklı destek plakası seti kullanılmıştır. İlk deney setinde giriş levhası olarak alüminyum ve çıkış levhası olarak pirinç malzeme kullanılırken ikinci deney setinde de giriş levhası olarak pirinç ve çıkış levhası olarak da ahşap malzeme kullanılmıştır. CFRP malzemenin mikro delinmesindeki delaminasyon faktörleri hassas bir şekilde hesaplanmış, desteklenen ve desteklenmeyen durumlar için birbiriyle karşılaştırılmıştır. CFRP laminatın üst ve altına yerleştirilen destek plakalarının kullanılması, delaminasyon hasarını sınırlayan yöntemlerden biri olarak bulmuşlardır. Çok sayıda mikro delik delinerek yapılan çalışmalarda CFRP delik resimleri alınmıştır. Deney verilerini değerlendirmek için Minitab istatistik analiz yazılımı kullanılırken işleme parametreleri optimizasyonu için Yanıt Yüzeyi Metodu kullanılmıştır. Bu çalışmaların sonucunda CFRP katmanlarındaki mikro ve klasik delme metodlarının çok farklı delaminasyon hasarlarına yol açtığı gözlenmiştir (Dogrusadık, 2017).

Bu çalışmada, destek plakalarının etkileri dikkate alınarak mikro matkabın aşınması incelenmiştir. CFRP katmanların mikro delinmesinde iki ana sorun delaminasyon ve kullanılan takımların aşınmasıdır. Destek plakalı ve desteksiz

durumlar arasında karşılaştırma yapmak için farklı kesme hızları ve ilerleme oranları ile ilgili deneyler yapılmıştır. Değerlendirme için aşınmış mikro matkapların yanak aşınma alanları kullanılmıştır. Belirtilen bu iki durumda da farklı ilerleme değerleri yanak aşınması üzerinde kesme hızından daha etkilidir. Ayrıca malzemelerin yanak aşınması üzerinde kesme parametleride etkilidir (Dogrusadik, 2019).

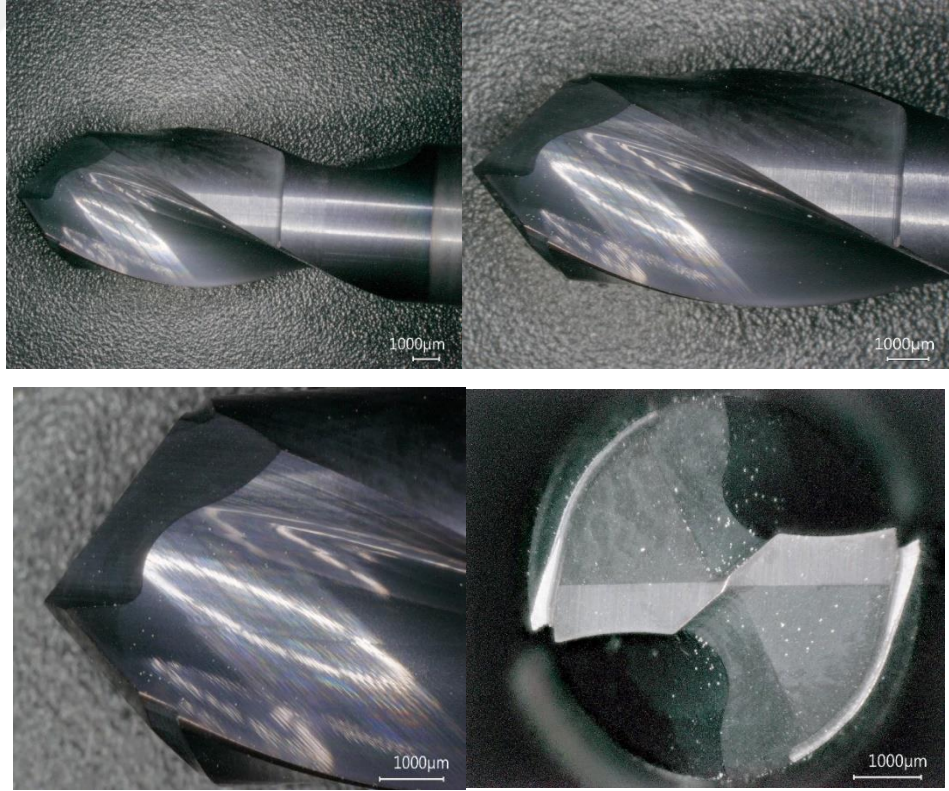
Park ve Dornfeld tarafından 304 L paslanmaz çelik levhanın destek malzemesinin etkisiyle (2 durumda: 10 mm ve 5 mm kalınlığında levha) kesilmesinde çapak oluşum sürecini incelemek için sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır. Yazarlar; destek plakasının malzeme özelliğini, sayısal analizde Young modülünün (sertlik) iki katı ve SS304L malzemesinin nihai mukavemeti olacak şekilde sınırladılar. Elde ettikleri sonuçlardan 10 mm kalınlığındaki destek plakasının, 5 mm kalınlığındaki destek plakasına kıyasla kesim sırasında iş parçası ile destek plakası arasındaki daha az boşluk nedeniyle sapmayı önemli ölçüde azalttığını ve çapakları etkili bir şekilde ortadan kaldırdığını bulmuşlardır (Park ve Dornfeld, 2000).

3.MATERYAL METOT

Bu çalışmada karbonfiber takviyeli kompozit malzemenin delinmeyle oluşan itme kuvveti, delaminasyon, takım aşınması, delik içi yüzey pürüzlülüğü ve delik iç yüzeyinde oluşan hasarlar deneysel olarak araştırılmıştır. Deneysel çalışmada farklı kalınlıkta destek plakaları kullanılmıştır.

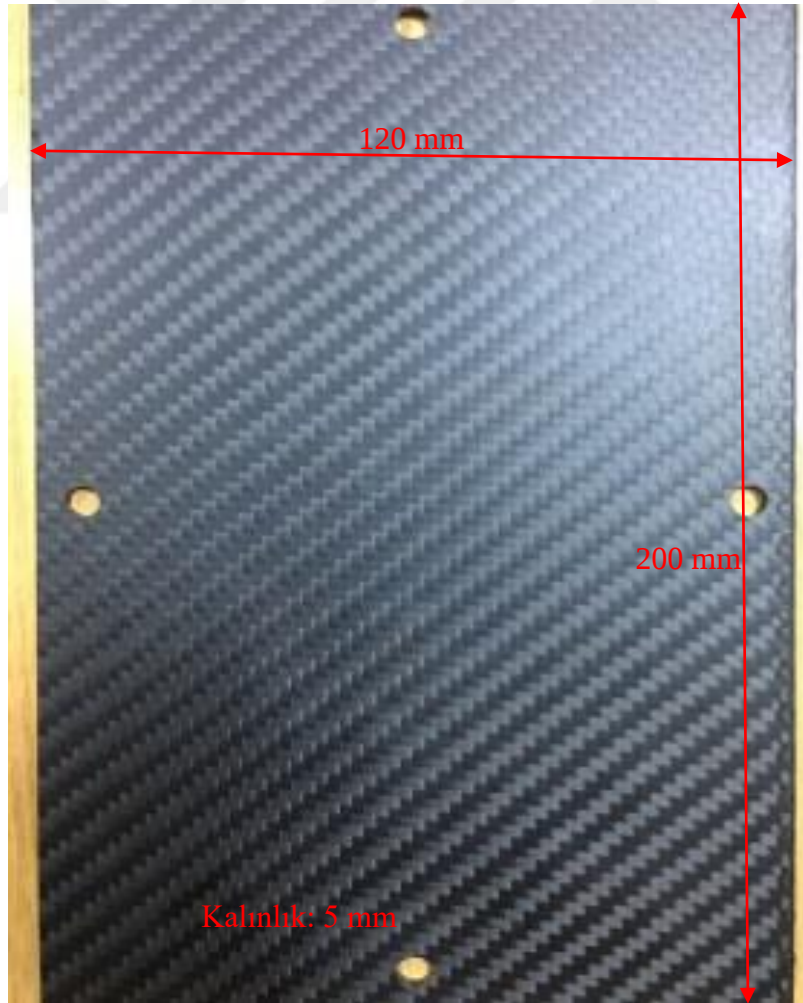
3.1 Delik Delme Prosesinde Kesici Takım ve Malzeme

Delme deneylerinde 6 mm çapında TaeguTec firmasının TTT.6985.530.03 seri numaralı kompozit malzemelerin işlenmesi için geliştirilen 30° helis açılı, 110° uç açılı helisel matkaplar kesici takım olarak kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan kesici takımların resimleri Şekil 3.1’de verilmiştir.



Şekil 3.1 : Deneylerde kullanılan kesici takımlar.

Karbon fiber takviyeli kompozit malzemeler otomotiv, savunma sanayi, robot teknolojisi, tıbbi aletlerin imalatı, denizcilik, uzay bilimleri, kimya endüstrisi, elektrik-elektronik sanayisi, müzik aletleri yapımı, inşaat ve yapı sektörü, gıda ve tarım üretimi, gibi birçok alanda kullanılmaktadır (Zor, 2018). Bu malzemeler üretim yöntemleri olarak nihai aşama gibi görülse de işlenebilirliğe ihtiyaç duyarlar. Bu çalışmada kullanılan karbon fiber takviyeli kompozit malzeme 500x500x3 mm boyutlarında dost kimya firmasından temin edilmiştir. Takviye elemanı olarak 200 gr/m² 3k twill dokuma karbon kumaş kullanılırken reçine (matris) olarak ise Hexion MGS L160/H160 kullanılmıştır (Çizelge 3.1). Bu kompozitin bağlama kalıbına bağlanabilmesi için 200x120x5 mm boyutlarında kesilmiştir (Şekil 3.2). Bağlama kalıbı da kuvvet dinamometresine montajlanmıştır.



Şekil 3.2: Deneylerde kullanılan CFRP malzeme.

Çizelge 3.1: Çalışmada kullanılan takviye elemanın özellikleri

Çekme dayanımı	3950 MPa
Elastisite modülü	238 Gpa
Kopmadaki birim boy değişim	1,7 %
Termal iletkenlik	17 W/m
Termal genleşme katsayısı	-0,1
Spesifik elektriksel direnç	$1,6 \times 10^{-3}$ W cm
Elyaf çapı	7 μ m
Yoğunluk	1,76 g/cm ³

3.2 Deney Parametreleri

Deneyssel çalışmada iki farklı fener mili hızı, beş farklı ilerleme miktarı, desteksiz ve 3 farklı kalınlıkta destek plakası kullanılarak kuru kesme şartlarında deneyler gerçekleştirilmiştir. Deneyssel tasarım Çizelge 3.2’de verilmiştir. Deneyler 3 tekrarlı olacak şekilde yapılmıştır.

Çizelge 3.2: Kesme şartları.

Deney Sayısı	Fener mili hızı (dev/dak)	İlerleme hızı (mm/dak)
1		400
2		800
3	2500	1200
4		1600
5		2000
6		400
7		800
8	7500	1200
9		1600
10		2000
11		400
12		800
13	2500	1200
14		1600
15		2000
16		400
17		800
18	7500	1200
19		1600
20		2000

Çizelge 3.2 (Devam) : Kesme şartları

21			400
22			800
23		2500	1200
24			1600
25	Destekli	1 mm	2000
26			400
27			800
28		7500	1200
29			1600
30			2000
31			400
32			800
33		2500	1200
34			1600
35	Destekli	1.5 mm	2000
36			400
37			800
38		7500	1200
39			1600
40			2000

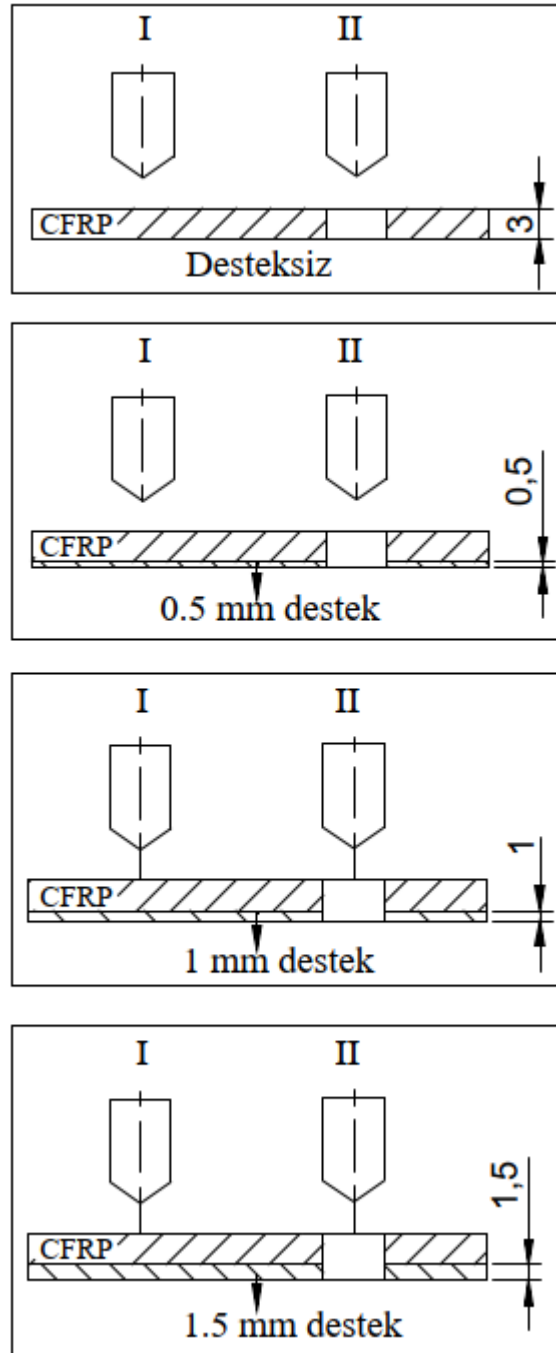
3.3 Deney Düzeneği

Deneyler Şekil 3.3’te gösterilen maksimum 17.5 kW güç kapasitesine ve 10.000 dev/dak fener mili hızına sahip Quaser MV154C dik işlem merkezinde gerçekleştirilmiştir. İtme kuvvetleri ölçümü 9257B tipi kistler kuvvet ölçüm dinamometresi ve yardımcı ekipmanları (Kistler 5070A amplifikatör, Kistler 5697A veri toplama sistemi (DAQ kartı) ve DynoWare yazılım ile yapılmıştır. İtme kuvveti ölçüm dinamometresi Şekil 3.3’te verilmiştir (www.kistler.com).

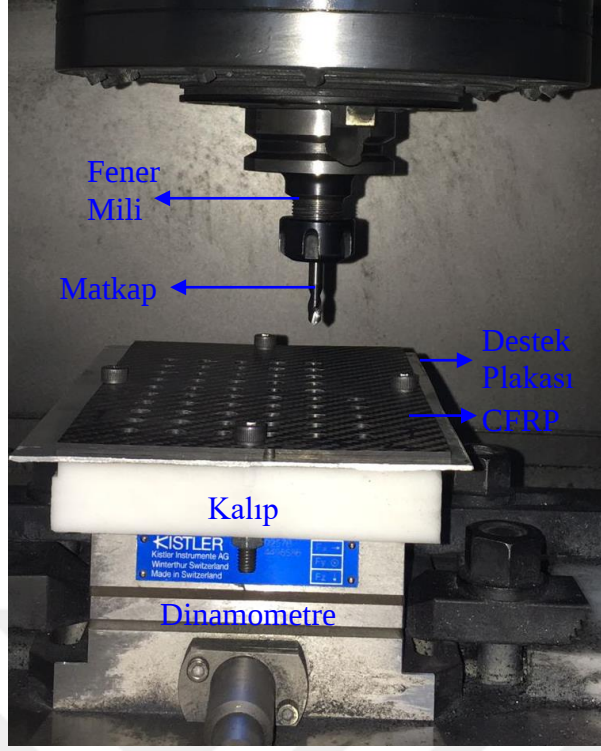


Şekil 3.3: Quaser MV154C dik işleme merkezi, kuvvet ölçüm dinamometresi ve bileşenleri.

Deneylerde kullanılan dinamometre, tezgâh tablasına rijit bir şekilde bağlanmıştır. Desteksiz ve farklı kalınlıklardaki destek kullanılarak kompozit plakaları delmek için bağlama kalıbı imal edilmiş ve dinamometre üzerine monte edilmiştir. Destekli yapılan deneylerde 0.5 mm, 1 mm ve 1.5 mm kalınlığında Al2024 malzeme destek plakası olarak kullanılmıştır. Karbon fiber takviyeli kompozit malzeme, civata ve somun vasıtasıyla bağlama kalıbı üzerine bağlanarak deneye hazır hâle getirilmiştir. Desteksiz ve farklı kalınlıklarda destek plakaları kullanılarak yapılan deneylerin sistematik gösterimi Şekil 3.4'te gösterilmiştir. Şekil 3.5'te ise deney düzeneği gösterilmiştir.

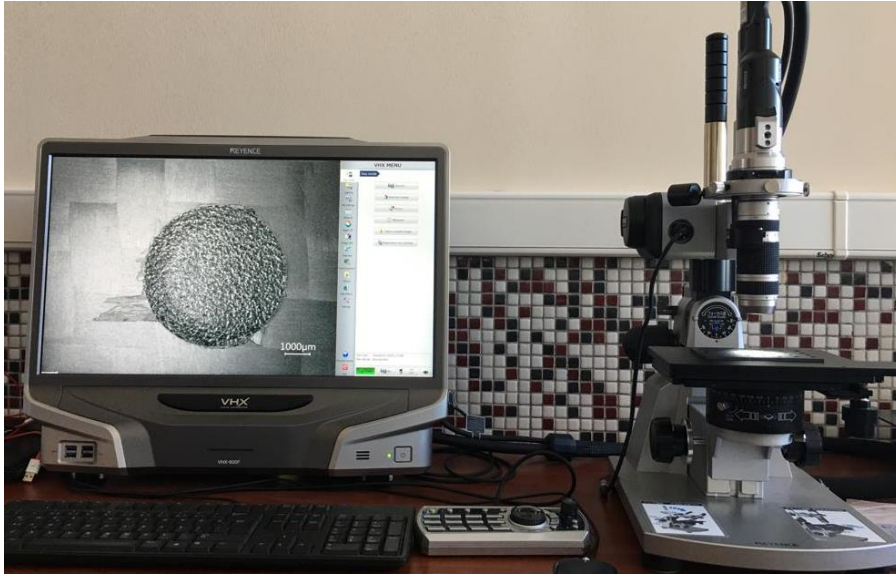


Şekil 3.4: Deneyin yapılış biçimi.



Şekil 3.5: Deney düzeneği.

Deney sonucunda, delik çıkışlarında oluşan delaminasyon ve takım aşınmaları Şekil 3.6’da gösterilen VHX-900F dijital mikroskopta incelenmiştir.



Şekil 3.6: Delaminasyon ve takım aşınması ölçümü için kullanılan dijital mikroskop.

Deneylerden sonra delikler, eksenlerinden kesilerek delik içi yüzey pürüzlülükleri Zygo ZeGage optic profilometre yardımıyla ölçülmüştür (Şekil

3.7). Delinen/işlenen yüzeyin üç farklı bölgesinden ölçüm yapılarak aritmetik ortalaması alınmıştır.



Şekil 3.7: Yüzey pürüzlülüğü ölçümünde kullanılan temazsız optik profilometre.

Deneylerden sonra kesilen delik içleri taramalı elektron mikroskobu ile görüntülenmiştir (Şekil 3.8).



Şekil 3.8: Taramalı elektron mikroskobu.



4. BULGULAR

Bu tez çalışmasında, karbon fiber takviyeli kompozit malzemenin destek olmadan ve farklı kalınlıklarda alüminyum destekler kullanılarak kuru kesme şartlarında delinmesi deneysel olarak araştırılmıştır. Deneyler anında itme kuvveti, deneylerden sonra ise delik çıkışlarındaki delaminasyon hasarı, delik içi yüzey pürüzlülüğü, takım aşınması ve delik içi hasar oluşumu araştırılmıştır.

4.1 İtme Kuvvetlerinin Analizi

Delik delme deneylerinde maksimum kuvvet kesici takımın ilerlediği Z yönünde oluşmaktadır. X ve Y yönlerinde çok fazla kesme kuvveti oluşmaz. Bundan dolayı sadece Z yönündeki kesme kuvveti (itme kuvveti) bu çalışmada dikkate alınmıştır. Deneyler; iki farklı fener mili hızı, beş farklı ilerleme hızı kullanılarak deneyler üçer tekrarlı olacak şekilde yapılmıştır. Çizelge 4.1.'de deneyler sonucu elde edilen itme kuvvetlerinin değerleri verilmiştir.

Çizelge 4.1: Kesme şartlarına göre oluşan itme kuvveti değerleri.

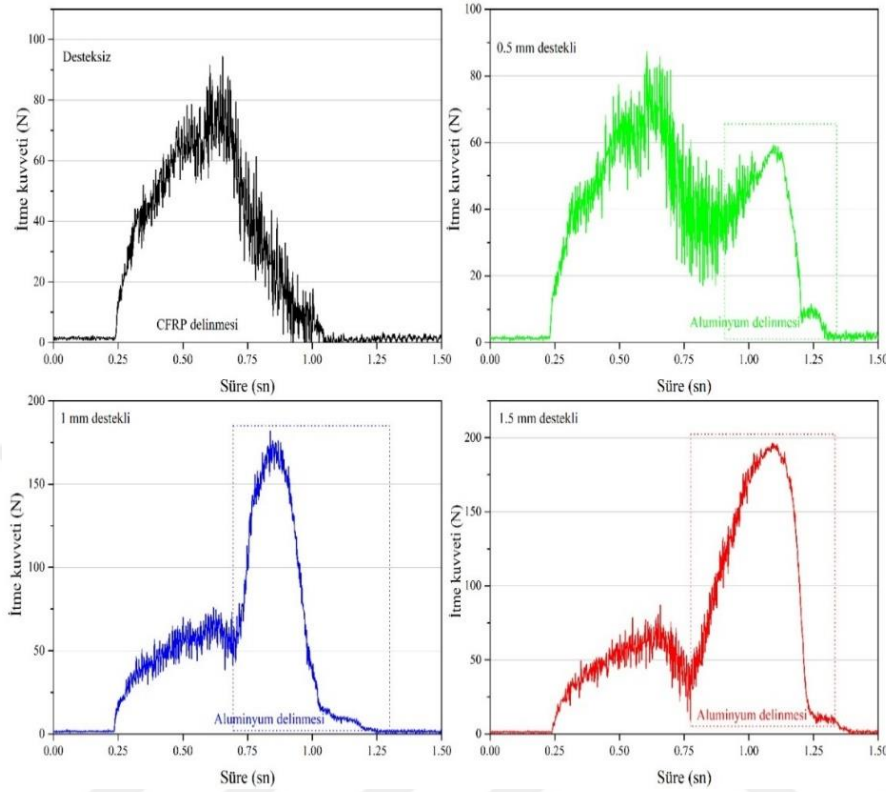
Deney Sayısı	Fener mili hızı (dev/dak)	İlerleme hızı (mm/dak)	Fz (N) 1.Tekrar	Fz (N) 2.Tekrar	Fz (N) 3.Tekrar	Ortalama kuvvet (N)
1	Desteksiz	400	90,33	93,06	94,52	92,64
2		800	128	123	124,3	125,10
3		1200	176	169,3	172,5	172,60
4		1600	227,8	222,2	223,7	224,57
5		2000	275,1	268,1	270,5	271,23
6		400	74,41	75,47	77,24	75,71
7		800	86,47	83,39	87,93	85,93
8		1200	96,27	96,65	98,6	97,17
9		1600	106,5	107,8	107,5	107,27
10		2000	113,6	114,9	118,7	115,73
11	Destekli 0.5 mm	400	93,41	94,4	94,92	94,24
12		800	131,8	127,7	129,3	129,60
13		1200	183,4	176,5	177,1	179,00
14		1600	237,9	233	225,2	232,03
15		2000	290,7	281,7	289,7	287,37
16		400	63,27	71,91	73,94	69,71
17		800	81,38	82,64	86,32	83,45
18		1200	92,25	116	94,56	100,94
19		1600	99,84	98,78	104,5	101,04
20		2000	107,2	108,9	112,7	109,60

Çizelge 4.1 (Devam): Kesme şartlarına göre oluşan itme kuvveti değerleri.

21			400	88,99	114,2	94,97	99,39
22			800	126,7	125,8	158,8	137,10
23		2500	1200	175,8	178,9	180	178,23
24			1600	233,4	235,3	226,2	231,63
25	Destekli	1 mm	2000	285,5	286,3	271,7	281,17
26			400	64,04	68,39	71,94	68,12
27			800	78,74	81,28	82,59	80,87
28		7500	1200	86,39	91,52	93,31	90,41
29			1600	97,14	120	113	110,05
30			2000	107,8	111,1	126,9	115,27
31			400	93,4	98,04	97,17	96,20
32			800	138,7	178,1	174,6	163,80
33		2500	1200	195	186,9	174,8	185,57
34			1600	237,1	245,4	232,5	238,33
35	Destekli	1.5 mm	2000	298,7	308,7	303,8	303,73
36			400	64,84	76,3	97,13	79,42
37			800	79,54	83,79	84,22	82,52
38		7500	1200	90,99	99,74	104,7	98,48
39			1600	117,4	120,1	121,6	119,70
40			2000	118,1	127,1	128	124,40

Şekil 4.1’de 0,5, 1 ve 1,5 mm kalınlığındaki destekler kullanılarak ve desteksiz yapılan delik delme işlemi için zamana bağlı kuvvet grafikleri verilmiştir. Desteksiz delmede, delik delme işlemi yaklaşık 0.75 sn. içerisinde tamamlanırken destek kalınlığı arttıkça delik delme için süre de artmıştır. Aslında bu artış, kullanılan destek plakasının da delinmesinden kaynaklıdır. Buna bağlı olarak itme kuvveti, kompozitin delme işlemine başladığında artış göstermiş; takımın son tabakaya yaklaşmasıyla kuvvet azalmaya başlamışken takım uç noktasının destek plakasına temas etmesiyle beraber tekrar itme kuvvetinde artış görülmüştür. 0,5 mm destek kullanıldığı durumda bu artış kompozitin delinmesi sırasında oluşan maksimum kuvvetin altında kalırken 1

ve 1,5 mm destek plakası kullanıldığı durumunda oluşan maksimum kuvvet, kompozitin delinmesi sırasında oluşan maksimum kuvvetin üzerine çıkmıştır.

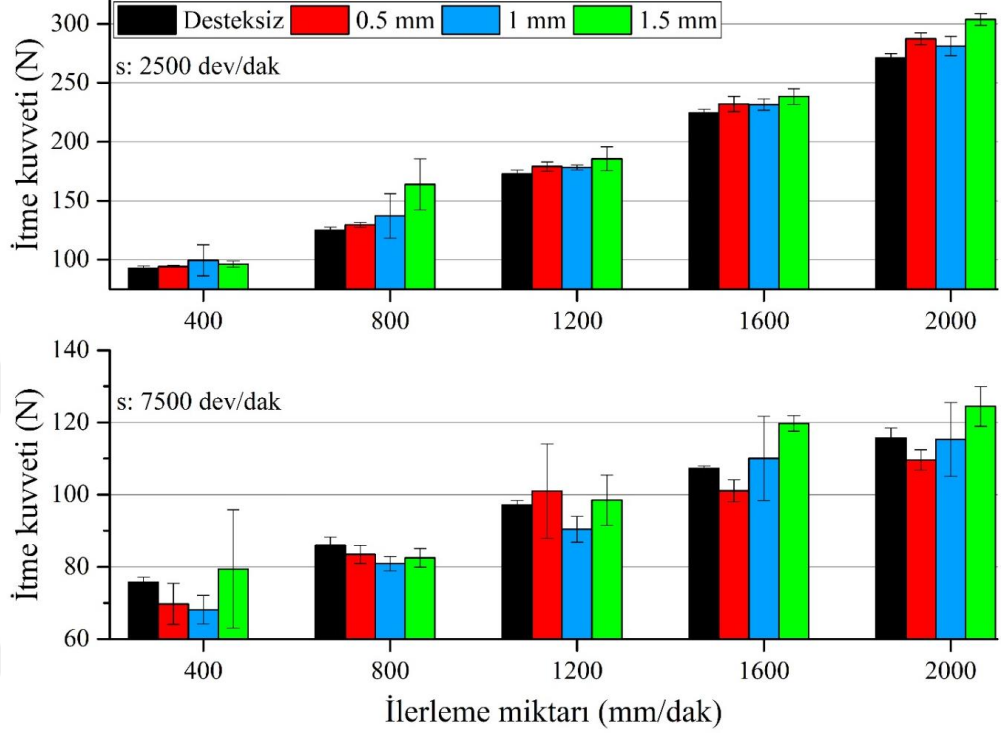


Şekil 4.1: Destekli ve desteksiz delik delme anında oluşan kuvvetler.

CFRP'nin farklı kesme parametreleri, desteksiz ve farklı kalınlıktaki (0,5 mm, 1 mm ve 1,5 mm) destek plakalarının ile delinmesi sonucu oluşan itme kuvveti değerleri Şekil 4.2'de verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi ilerleme hızı arttıkça buna bağlı olarak itme kuvvetlerinde de artış gözlenmektedir.

İlerleme hızının artmasıyla itme kuvvetinin artmasının nedeni; talaş kaldırma için artan enerji ihtiyacı, kesme alanı büyümesi ve kesilmemiş talaş yükünün artmasıdır (Koklu ve diğerleri, 2022). Fener mili hızının artması ile itme kuvveti azalmaktadır. Bunun sebebi ise kesici takım-iş parçası ara yüzeyindeki temas alanının ve özgül kesme enerjisinin azalmasına bağlıdır (Koklu ve Morkavuk, 2019). 2500 dev/dak fener mili hızı ile yapılan testlerde destek plakası kullanılması, itme kuvvetini çok az artırmıştır. 7500 dev/dak fener mili hızı ile yapılan testlerde ise destek kullanılması, itme kuvveti oluşumunda net bir fark oluşturmamıştır. Destek plakası kullanılmasıyla özellikle düşük fener mili hızında itme kuvvetindeki artış, kompozitin rijitliğinin artmasıyla

ilişkilendirilebilir (Gemi, 2020). Bu durum, kompozitin rijitliğinin iyileştirildiğini gösterir. Ayrıca kompozitin katmanları, kırılma deformasyonunu önlemeye yardımcı olur.

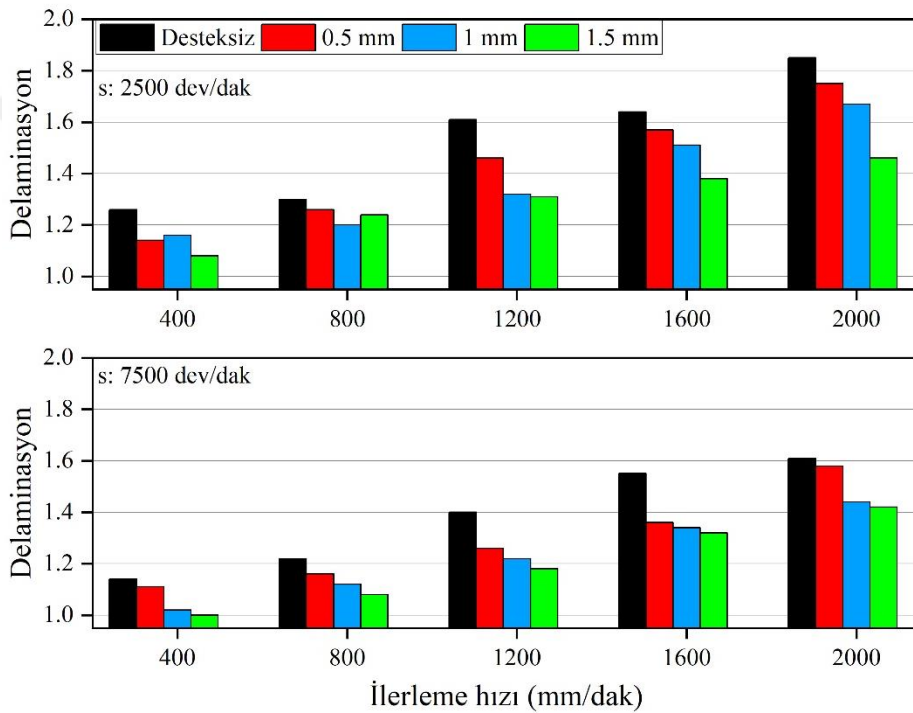


Şekil 4.2: 2500 ve 7500 dev/dak fener mili hızına göre kuvvet grafiği.

4.2 Delaminasyon Ölçümü

Delaminasyon faktörü, fiber yapıli kompozitlerin delinmesinde yaşanan en büyük problemlerin başında gelmektedir. Lifli yapılardaki katman ayrılmalarından ve kopmalarından kaynaklanan hasarlar nedeniyle malzemenin ömrü düşmekte, bu durumda fiber yapıli kompozitler delinirken delaminasyon faktörüne neden olan en büyük problemlerin başına gelmektedir. Karbon fiber gibi kompozit yapılar, daha düzgün ve pürüzsüzlük için tek başlarına delinebilirlerse delaminasyon oranları daha düzgün elde edebilmektedirler. Günümüzde ise üstün özelliklerinin fazlalaşmasından dolayı metalik malzemelerde istifli yapıda kullanılmaktadırlar (Aydın, 2019). Delik giriş ve çıkışında oluşan delaminasyon hasarı, maksimum hasar çapı (R_{max}) ile delinmiş delik çapı (R) arasındaki oran olarak tanımlanır (Khashaba, 2010).

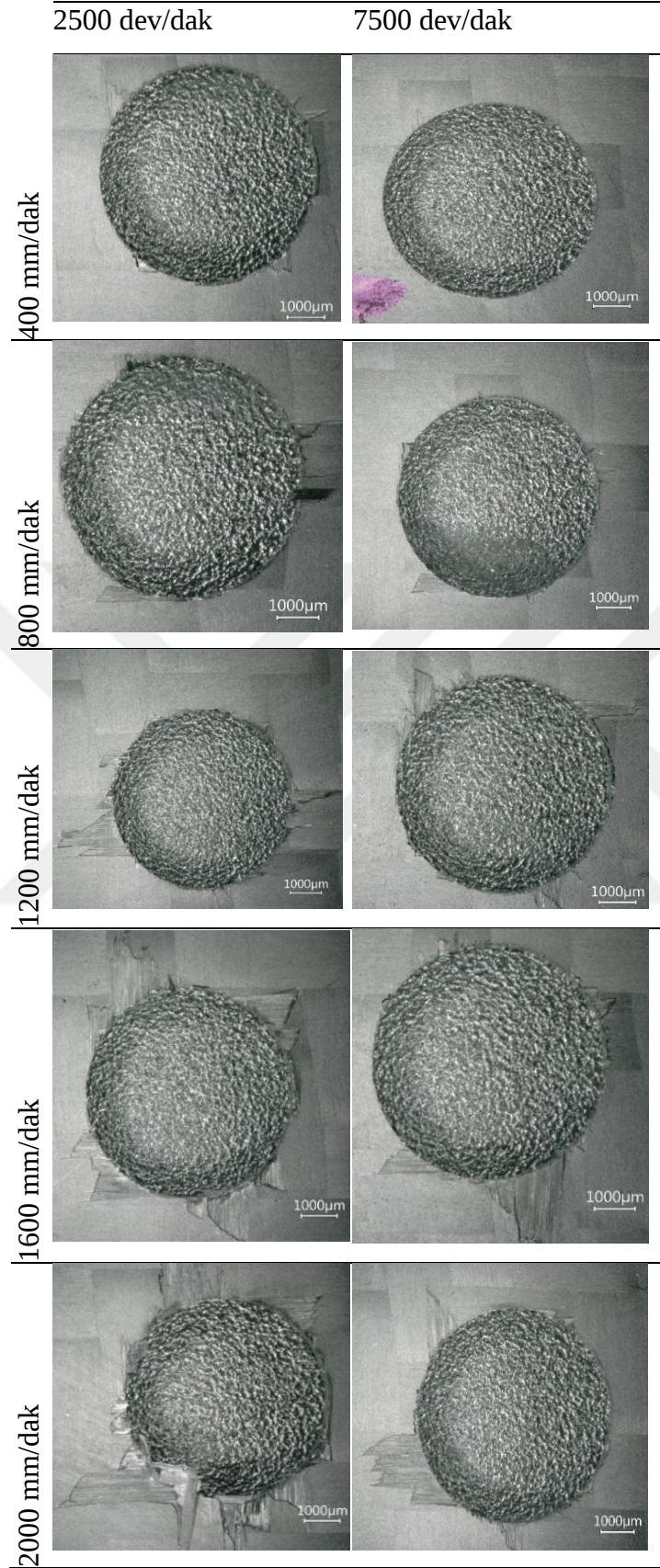
CFRP'nin farklı kesme parametreleri, desteksiz ve destekli (0,5 mm, 1 mm ve 1,5 mm) plakalarının ile delinmesi sonucu oluşan delik çıkış delaminasyon faktörü grafiği Şekil 4.3'te, delik çıkış görüntüleri Şekil 4.4'te verilmiştir. Delik çıkış tarafında oluşan hasarlar; delik giriş tarafında oluşan hasarlardan daha büyüktür. Çünkü delik girişinde en üst tabaka, bir alt tabaka tarafından desteklenirken delik çıkışındaki son tabaka herhangi bir tabaka tarafından desteklenmez ve dolayısıyla itme kuvveti delaminasyonunu oluşturan kritik bir değeri aştığında delik çıkış tarafına yakın arayüzlerde daha fazla hasar oluşur (Giasin, 2021).



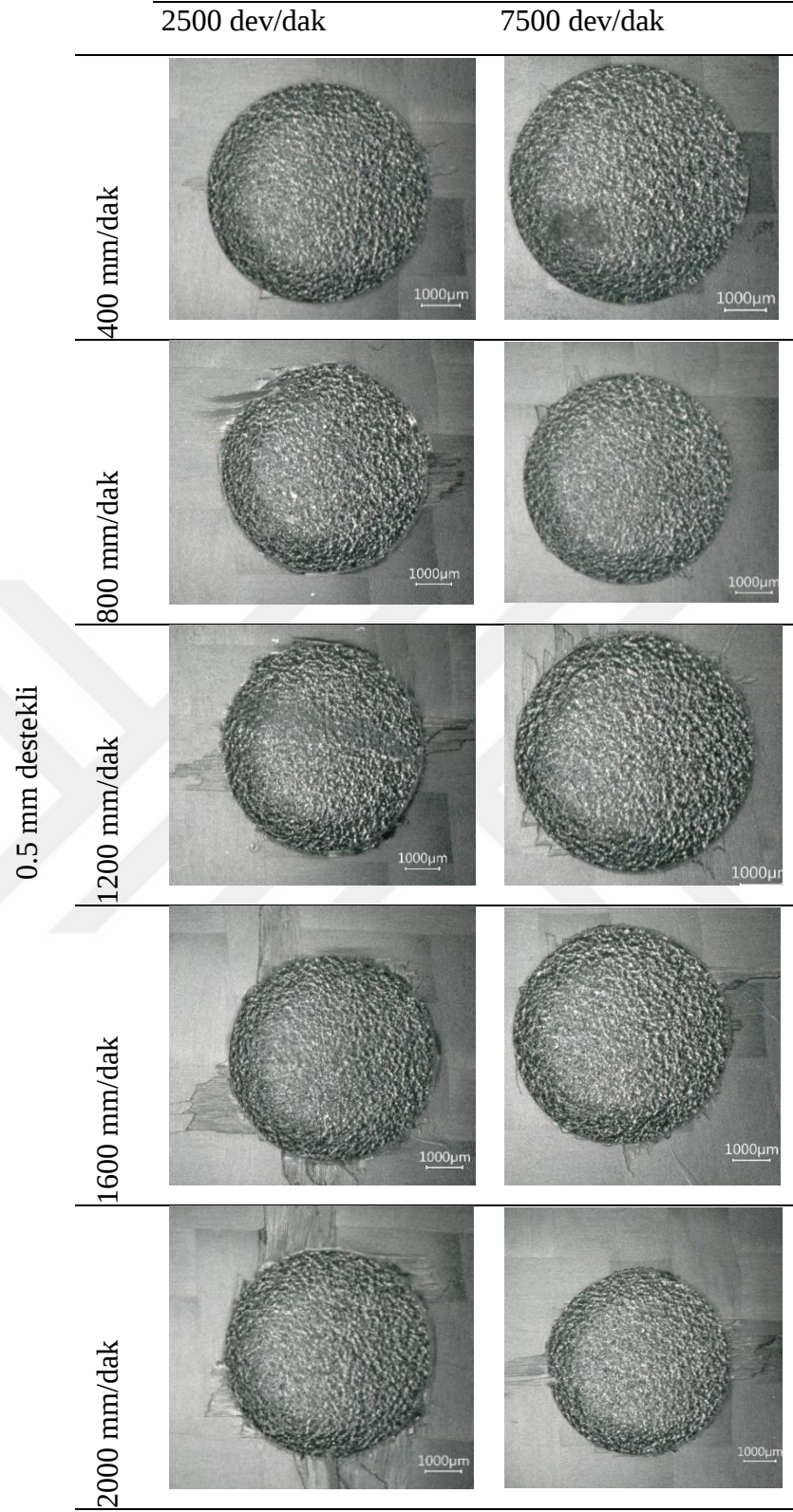
Şekil 4.3: 2500 ve 7500 mm/dak çıkış delikleri delaminasyon grafiği.

Şekil 4.3'te delaminasyon faktörü ilerleme hızındaki artışla artar. İlerleme hızı arttıkça daha fazla itme kuvveti oluşur. Artan itme kuvveti de delik çıkışındaki katmanları birbirinden ayırır. Bu nedenle katmanlara ayrılmayı önlemek için itme kuvveti azatılmalıdır (Giasin, 2021). Artan delaminasyon faktörü, fener mili hızı artması ile azalır. Fener mili hızının artmasıyla itme kuvveti azalır, kesme bölgesinde sıcaklık oluşumu artar ve dolayısıyla kompozit malzeme yumuşar, delaminasyon azalır. En yüksek delaminasyon hasarı, destek kullanılmadan yapılan testlerde meydana gelmiştir. Deneylerde farklı kalınlıklarda destek plakası kullanılarak delaminasyon hasarı azaltılmıştır. Deneysel amaçla kullanılan en yüksek kalınlığa sahip (1,5 mm) destek

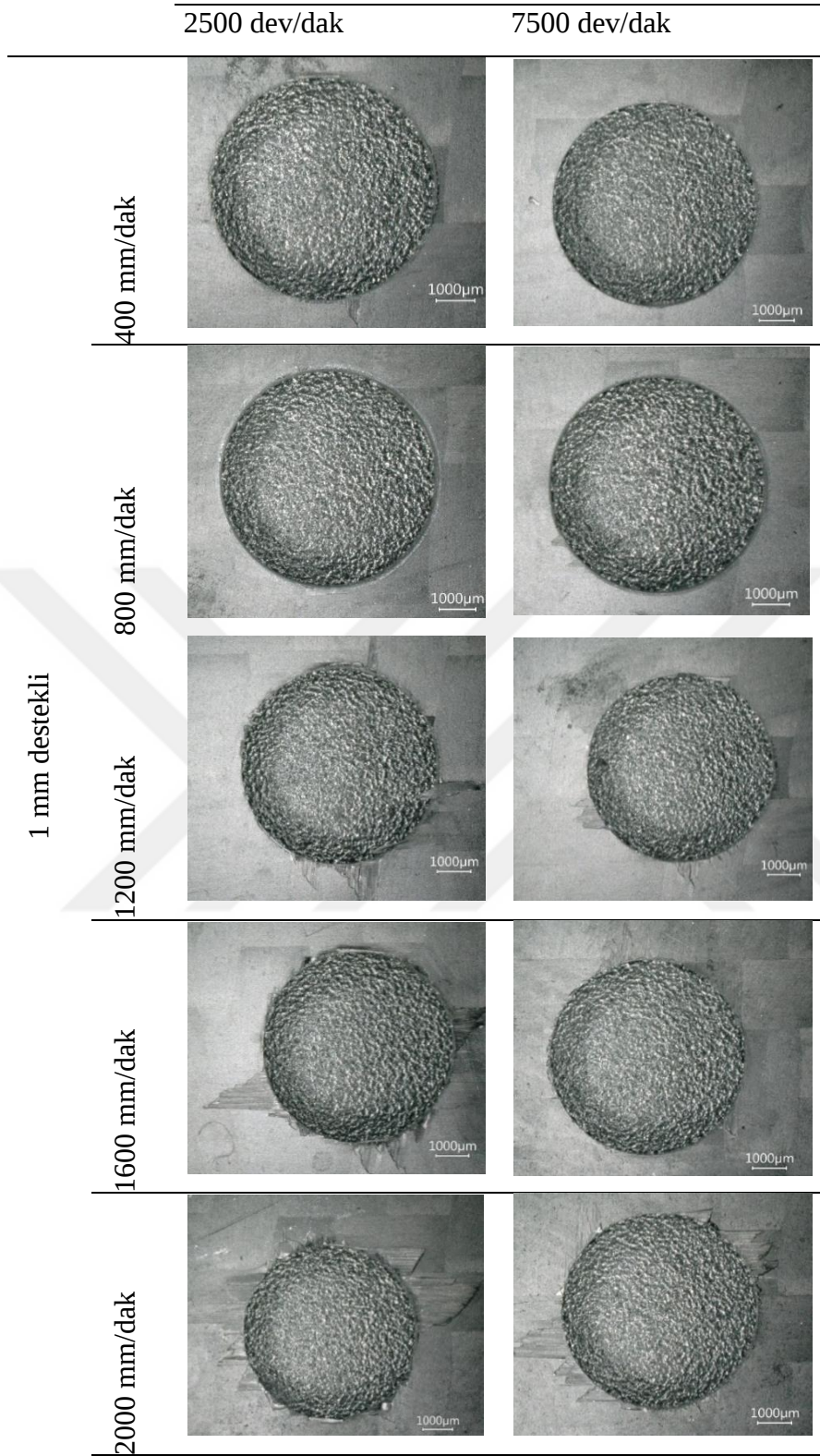
plakasının, hasarı en aza indirdiği gözlemlenmiştir. Literatürde, destek kullanımıyla itme kuvveti tarafından delmeden ziyade itilmeye zorlanan kompozitin son tabakasının rijitliğinin arttığı ve buna bağlı olarak eğilme deformasyonuna karşı destek elemanı tarafından korunduğu belirtilmiştir (Gemi ve diğerleri, 2020) (Hocheng, 2016). Buna ilaveten, literatürde delaminasyon hasarı temel olarak itme kuvveti ile ilişkilendirilmiştir. İtme kuvvetinin oluşturduğu gerilme değeri, tabakalar arası dayanım değerini aştığı zaman bu hasar meydana gelmektedir. Delaminasyonu başlatan bu kuvvet değerine kritik itme kuvveti denilmektedir. İtme kuvveti değeri, kritik itme kuvvetini aşmasıyla delaminasyon oluşmakta ve itme kuvvetinin artmasıyla delaminasyon hasarı genişlemektedir. Dolayısıyla itme kuvvetini artıran sebepler, delaminasyon hasarını da arttırmaktadır (Qi, 2014). Ancak bu çalışmada, destek plakası kalınlığı arttıkça kuvvet artarken delaminasyonun artmaması ve hatta azalması ise destek plakasının kalınlığının artmasıyla malzeme rijitliğinin artması buna bağlı olarak delik çıkışında tabakalar arasında dayanımın artmasını sağlamıştır. Bu bulgulardan, destek plakasının kalınlığının artmasıyla delaminasyonu oluşturan kritik itme kuvvetinin de arttığı sonucuna varılmıştır.



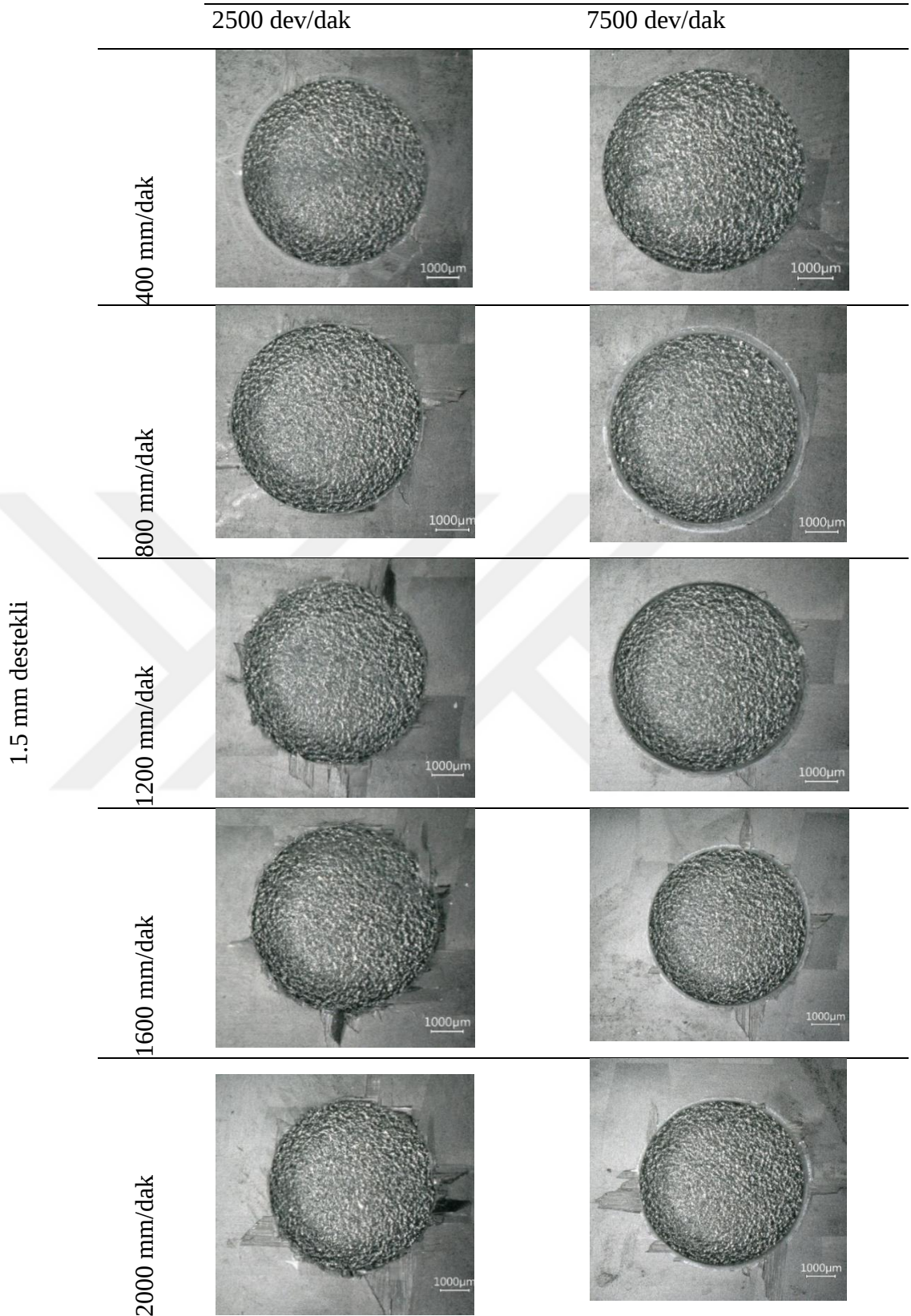
Şekil 4.4: Destek kullanılmadan gerçekleştirilen testler sonucu delik çıkışında oluşan hasarlar.



Şekil 4.5: 0,5 mm destek kullanılarak gerçekleştirilen testler sonucu delik çıkışında oluşan hasarlar.



Şekil 4.6: 1 mm destek kullanılarak gerçekleştirilen sonucu delik çıkışında oluşan hasarlar.

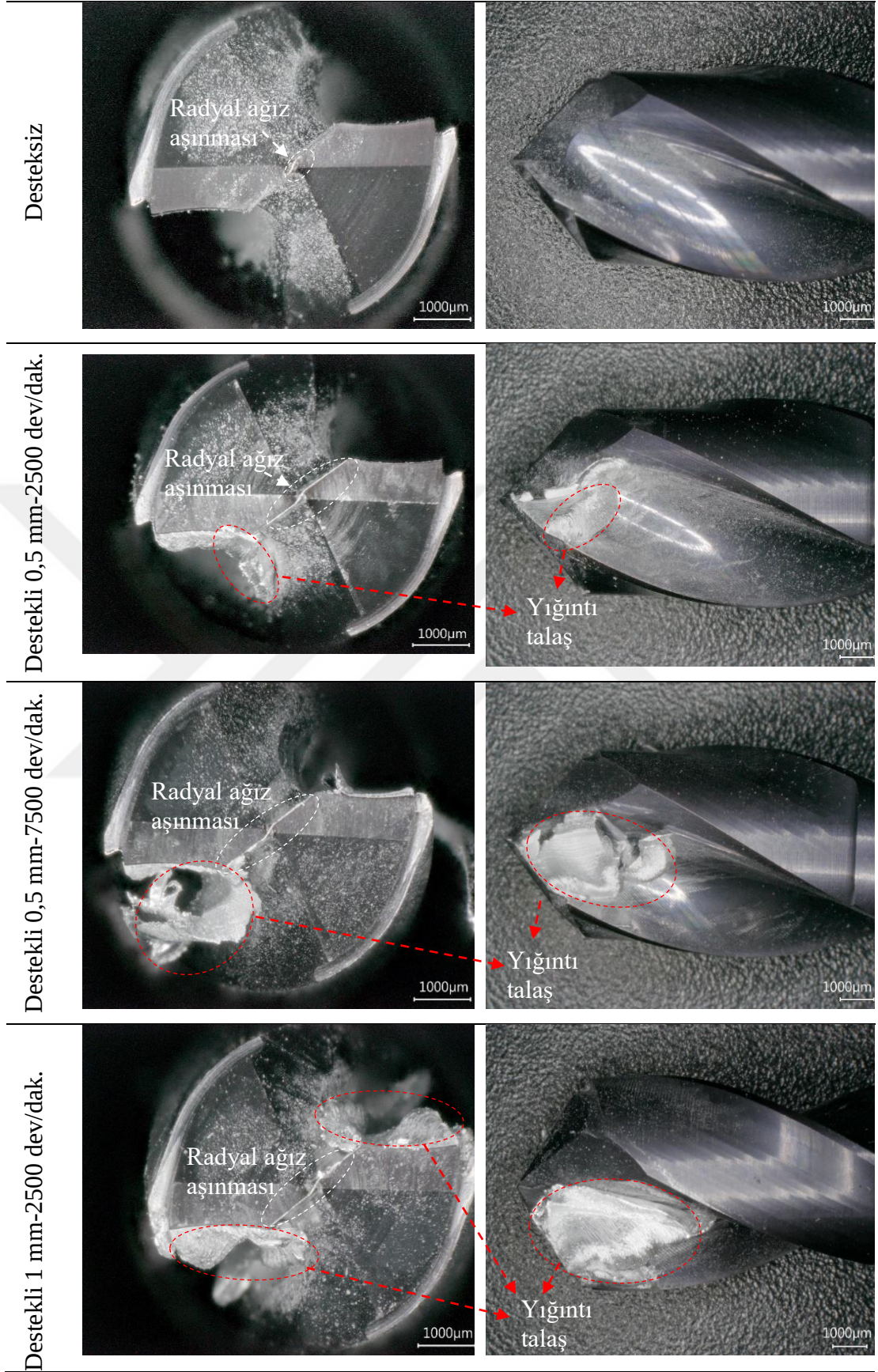


Şekil 4.7: 1,5 mm destek kullanılarak gerçekleştirilen testler sonucu delik çıkışında oluşan hasarlar.

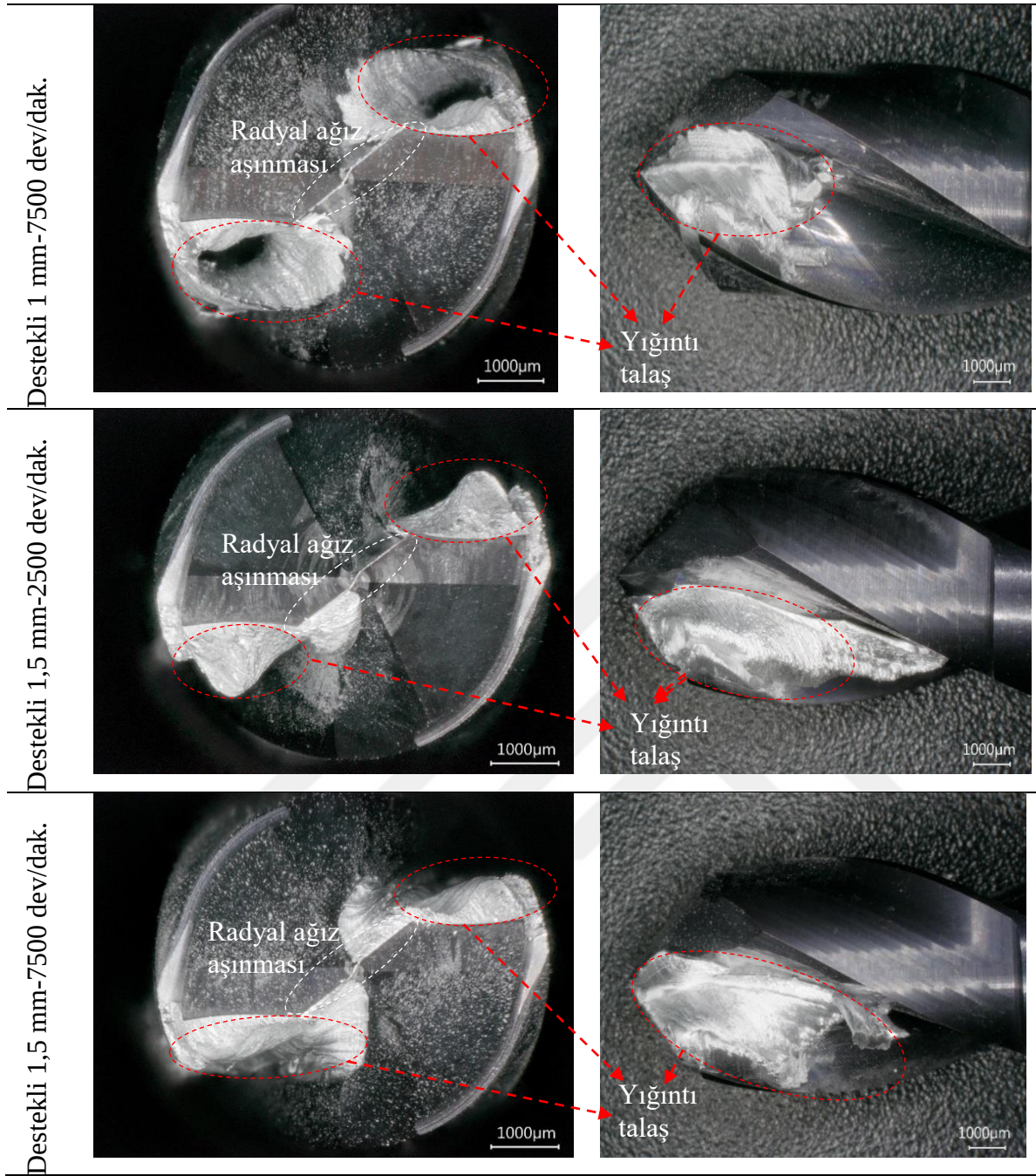
4.3 Yığıntı Talaş Oluşumu ve Takım Aşınması

Talaşlı imalat sektöründe takım aşınması sürekli olarak karşılaşılan bir durumdur. Bu durum genellikle takım aşınması imalat sektöründe oldukça maliyeti arttırdığı bilinmektedir. Delme esnasında talaş ve takım kanalları arasında deliklerde kesme bölgesinde oluşan sıcaklık değerlerinden kaynaklı sıkı sürtünme ortaya çıkmaktadır. Bu durumda talaş tahliye hızında bir artışının olmasından kaynaklı olarak takımın aşınmasına matkabın delme hızına bağlı malzeme ile temasta olduğu sürenin içerisinde delik yüzeylerinde bozulmaya sebep vermektedir. Aşınmadan kaynaklı esnek malzemelerin delinmesi sırasında yaşanabilecek en büyük sıkıntı ise; kesilen taşların kesilmiş gövdeleri, kenarlar veyahut da helis kanalları olarak bilinen yığıntı talaş (BUE-built up edge)'dir. Bu durum, talaşın kanallardan dışarı atılmasını olumsuz yönde etkileyerek delik yüzey kalitelerinin bozulmasına, takımdan malzeme kopmasına ve takım ömrünün azalmasına neden olmaktadır (Aydın, 2019).

Yapılan deneysel çalışmalarda CFRP'nin Al ile oluşturduğu katmanlı yapılarda ortaya çıkan en büyük problem destek plakasından kaynaklı talaş yığılmasıdır. Şekil 4.8'de iki farklı fener mili hızı (2500 dev/dak ve 7500 dev/dak) delme yöntemlerinde, 30° helis açısına, 110° uç açısına sahip kaplamalı kesici takım ile desteksiz ve destekli (0,5, 1 ve 1,5 mm) gerçekleştirilen delik delme işlemleri sonrasında takım görüntüleri verilmiştir. Şekil 4.8 incelendiğinde destek kullanılmadan yapılan delme işleminde matkap üzerinde BUE oluşumu gözlenememiştir. Öte yandan destek kullanılarak yapılan delme işleminde ise destek plakası kalınlığı arttıkça BUE' de artmaktadır. Hem desteksiz delmede hem de destekli delmede köşe aşınması gözlemlenmezken, radyal ağız aşınması tüm koşullarda gözlemlenmiştir. Ancak, desteksiz delmede çok az radyal ağız aşınması mevcutken, destekli delmede daha geniş radyal ağız aşınması gözlemlenmiştir. Bir takımla delinen delik sayısının az tutulması sebebiyle tüm deneylerde dış köşe aşınması ve serbest yüzey aşınması gözlemlenmemiştir.



Şekil 4.8: Delik delme işlemlerinden sonra kesici takım görüntüleri.

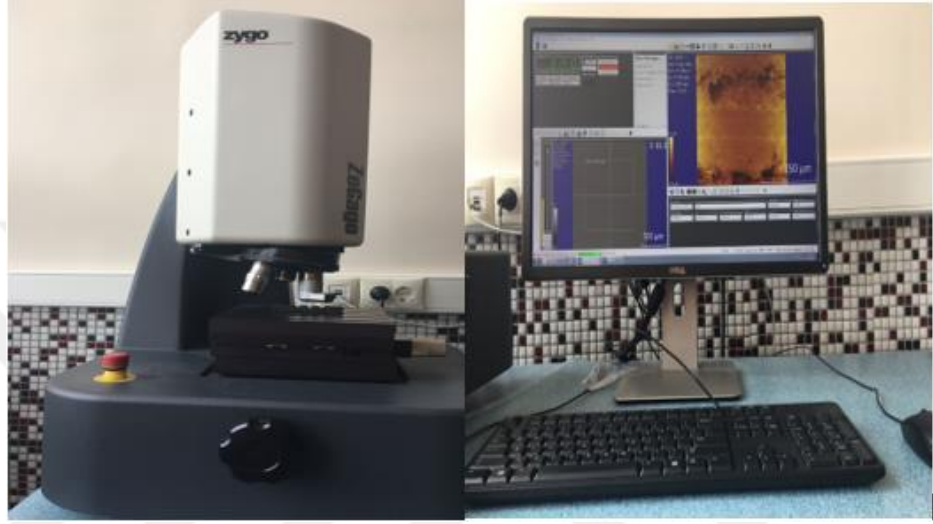


Şekil 4.8 (Devam): Delik delme işlemlerinden sonra kesici takım görüntüleri.

4.4 Yüzey Pürüzlülüğü

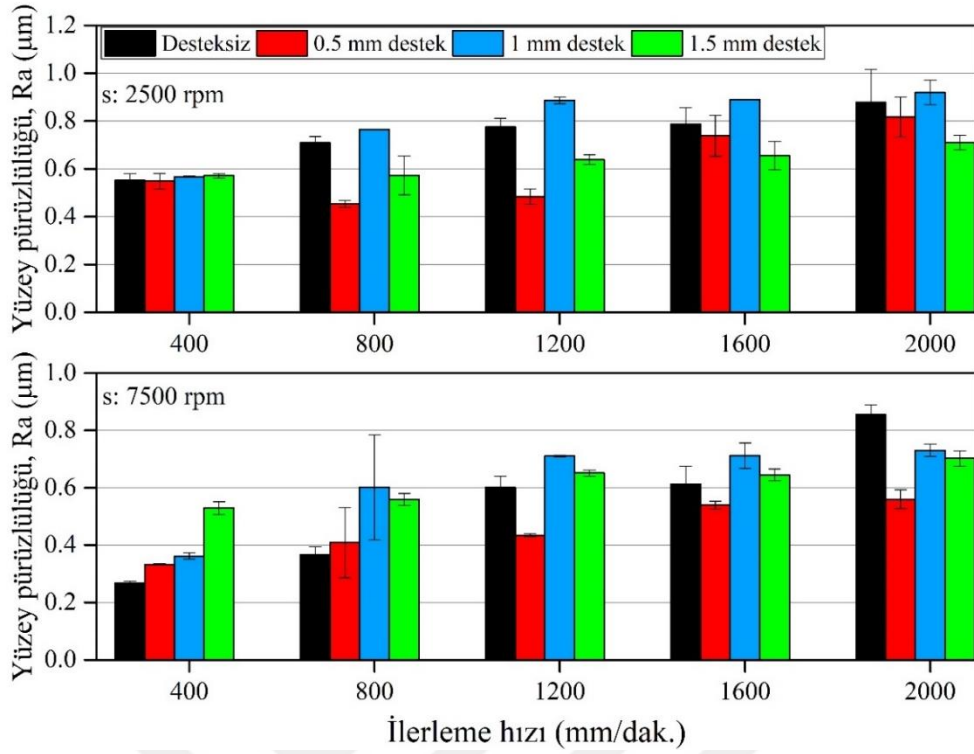
Pürüzlülük parametlerinin belirlenmesinde aritmetik ortalama olan pürüzlülük değeri (R_a), ortalama pürüzlülük değeri olan (R_z) literatür çalışmalarında en yaygın olanların başında gelmektedir. Yüzey pürüzlülüğün ölçüm parametresi olan R_a profil boyunda ölçülebilen pürüzlülüğün aritmetik ortalaması olarak bu çalışmamızda kullanılmıştır (Morkavuk, 2016).

Yüzey pürüzlülüğü ölçümünde, deneyler sonrası işlenen deliklerden delaminasyon ölçümünde olduğu gibi üç farklı ölçüm alınmış ve bu üç ölçümün ortalaması alınarak ortalama değer belirlenmiştir. Yüzey pürüzlülüğü ölçümü Zygo ZeGage optik profilometre, ZeMaps ve MetroPro yazılımları yardımıyla yapılmış ve Şekil 4.9’da gösterilmiştir.



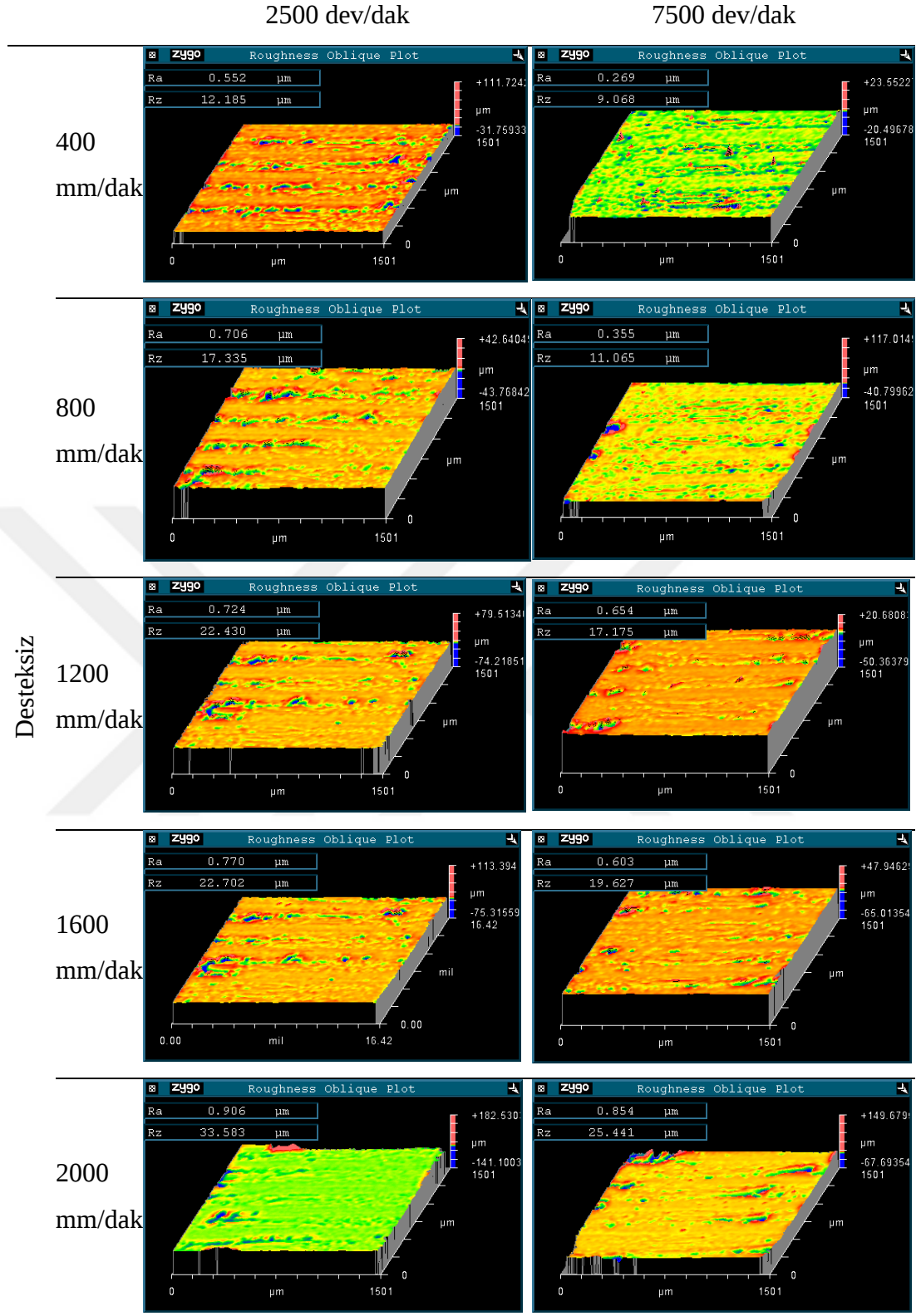
Şekil 4.9: Yüzey pürüzlülüğü ölçümü.

Şekil 4.10’da deliklerin yüzeylerinde oluşan yüzey pürüzlülüğü (Ra) değerleri yer almaktadır. Şekil 4.10 incelendiğinde fener mili hızı arttıkça yüzey pürüzlülüğü düşmektedir. Öte yandan ilerleme hızının artmasıyla deliklerin yüzey kalitesi bozulmaktadır. Bunun nedeni, itme kuvveti ile ilişkilidir. Daha yüksek itme kuvvetleri, daha kötü yüzey kalitesi oluşturmaktadır (Morkavuk, 2016).

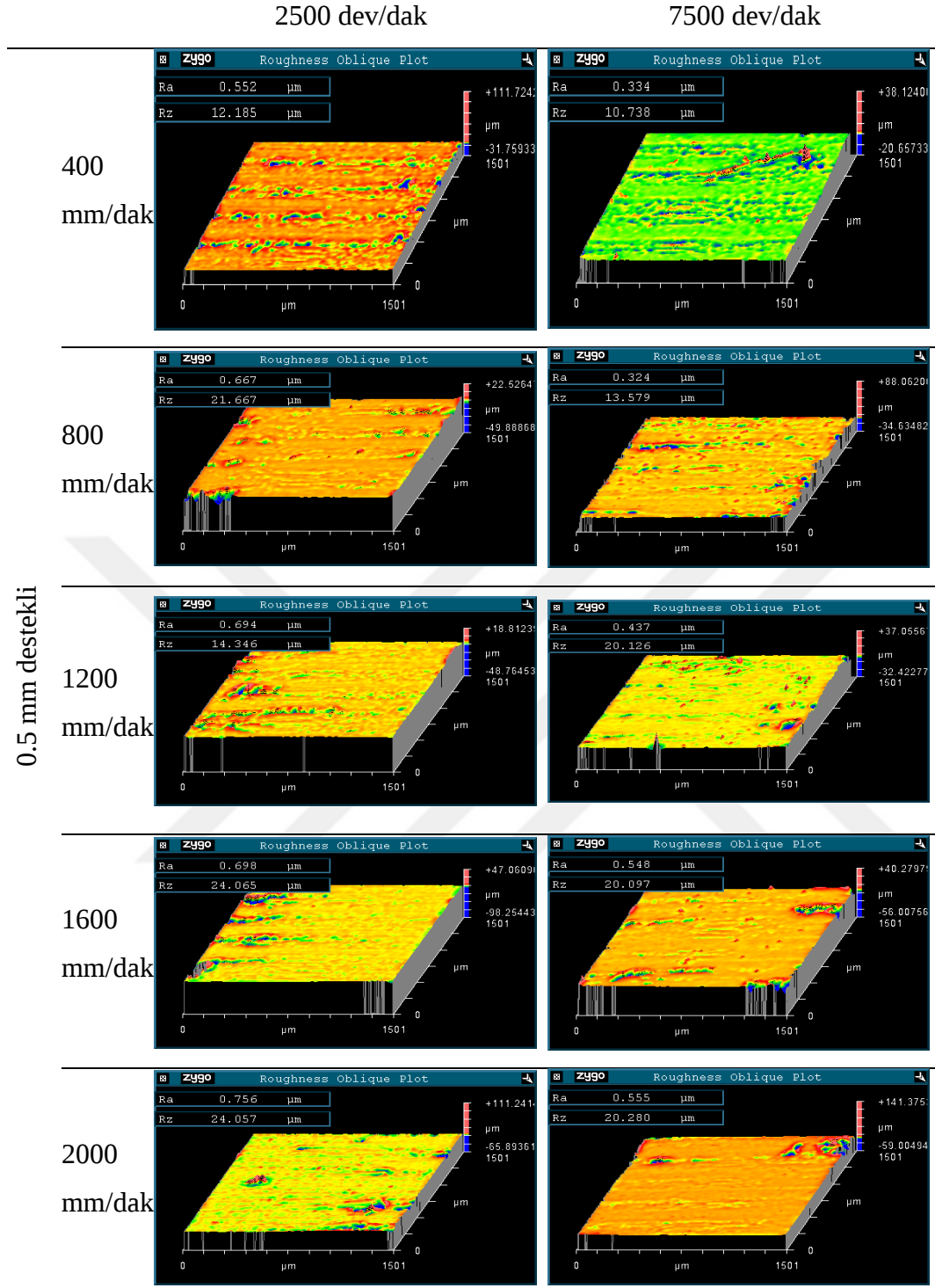


Şekil 4.10: Yüzey pürüzlülüğü grafiği.

Şekil 4.10 genel olarak incelendiğinde, en yüksek pürüzlülük değeri (1 mm) destek plakasında kullanılmasıyla oluşurken en düşük pürüzlülük değerleri ise (0,5 mm) destek plakası kullanımında oluşmuştur. Dolayısıyla desteksiz delmeden ziyade düşük kalınlıkta destek kullanılmasıyla daha kaliteli yüzeyler elde edilebilmiştir. Destek kalınlığı arttıkça takım helis kanalında BUE yapmış olan malzeme miktarıda artmaktadır. Takımdaki bu BUE yüzey kalitesini olumsuz etkilemektedir. Şekil 4.10'de yüzey haritalanması ve yüzey pürüzlülük değerleri verilmiştir.



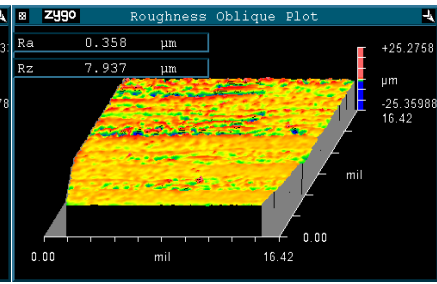
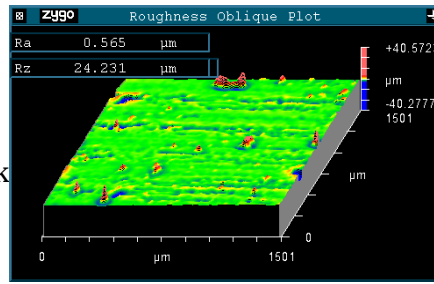
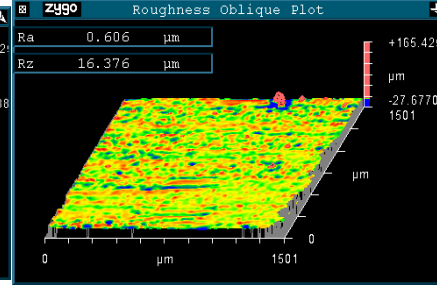
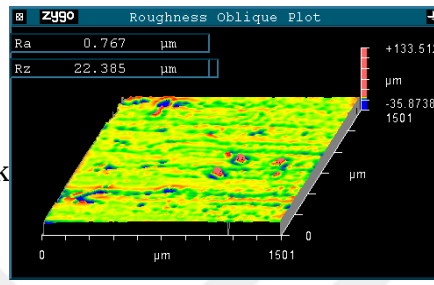
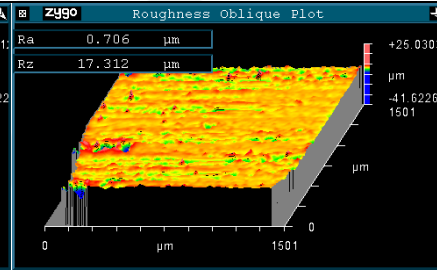
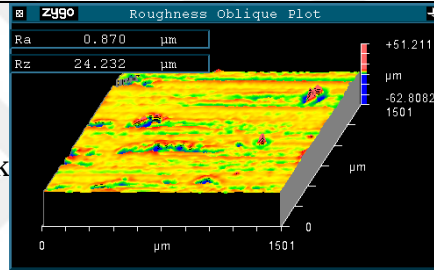
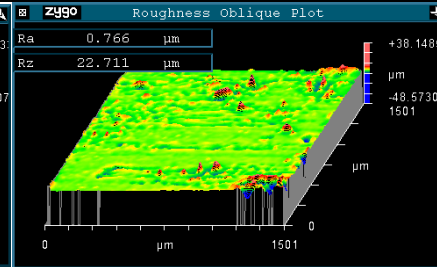
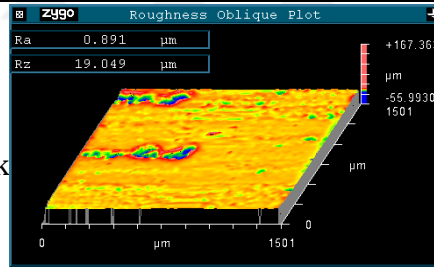
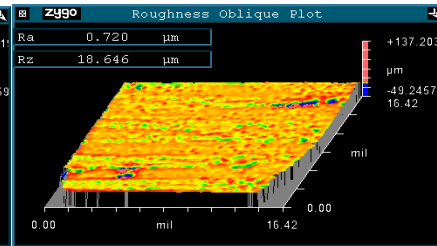
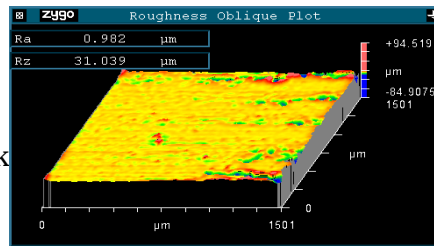
Şekil 4.11 : Desteksiz yüzey haritaları ve pürüzlülük değerleri.



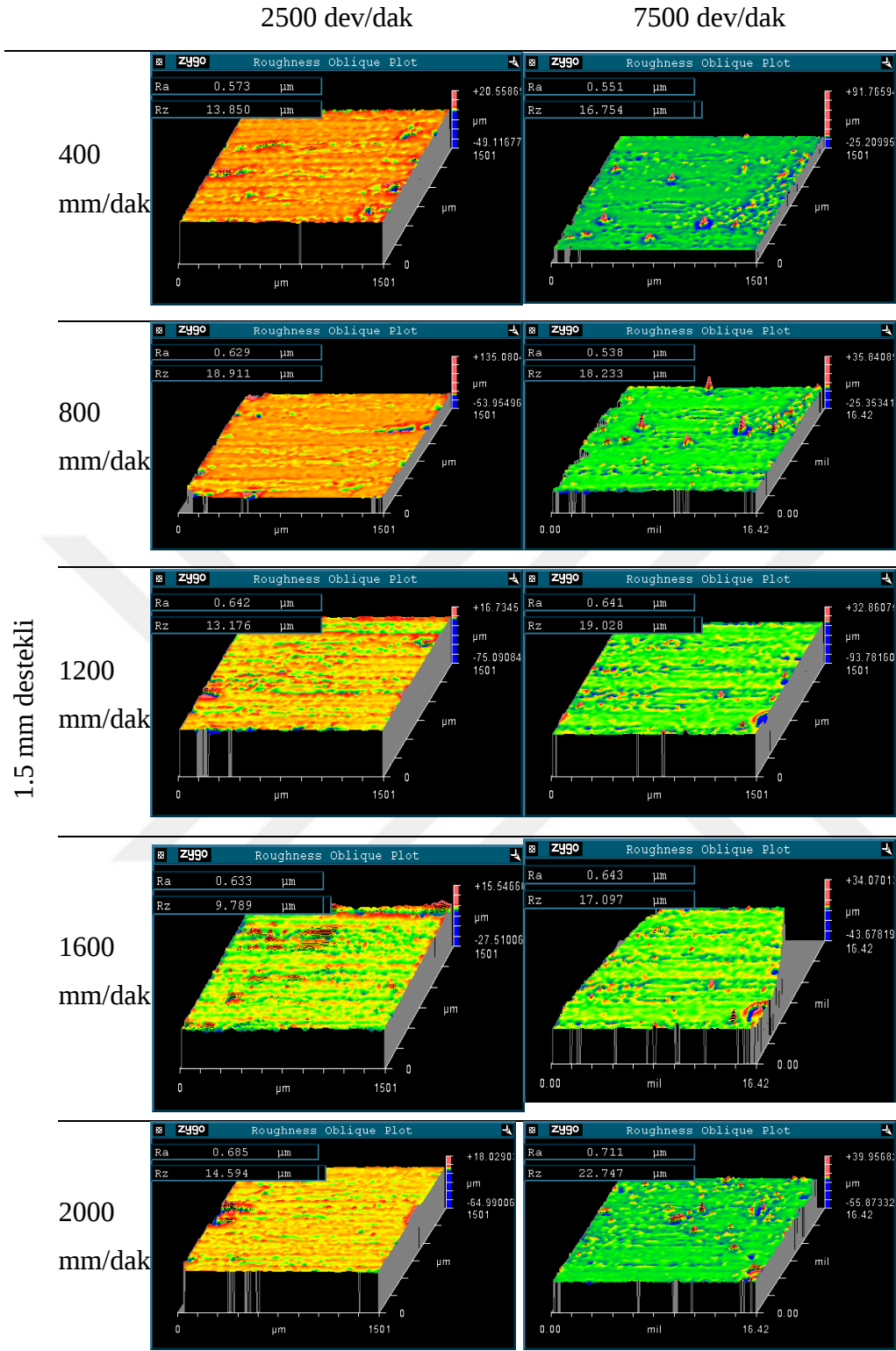
Şekil 4.12 : 0,5 mm destekli yüzey haritaları ve pürüzlülük değerleri.

2500 dev/dak

7500 dev/dak

400
mm/dak800
mm/dak1 mm destekli
1200
mm/dak1600
mm/dak2000
mm/dak

Şekil 4.13 : 1 mm destekli yüzey haritaları ve pürüzlülük değerleri.

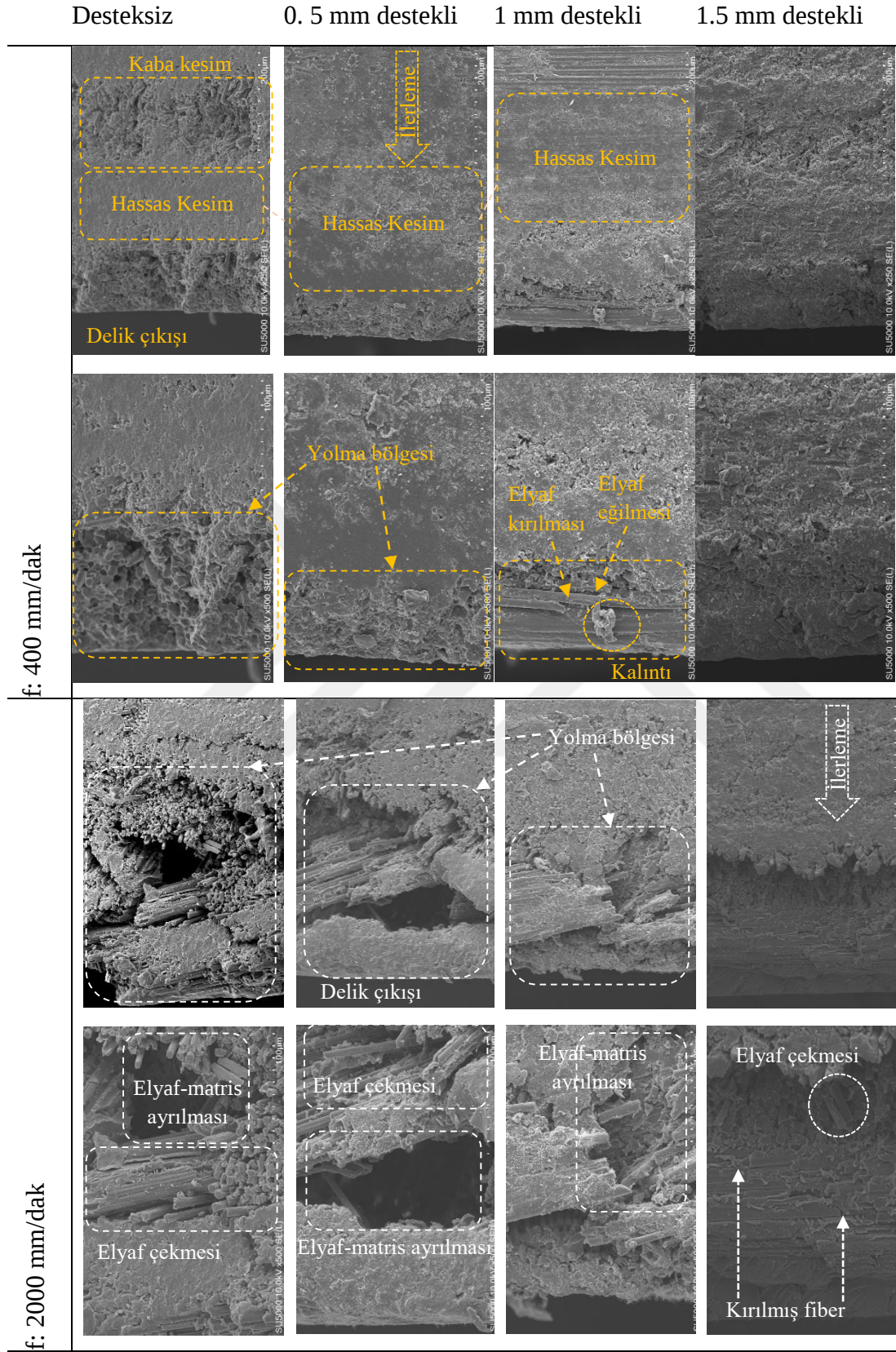


Şekil 4.14 : 1.5 mm destekli yüzey haritaları ve pürüzlülük değerleri.

4.5 İşlenen Deliklerin Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ile İncelenmesi

Şekil 4.15’de elektron mikroskobu ile hasar inceleme sonuçları verilmiştir. Desteksiz ve 3 farklı kalınlıkta destek plakaları kullanılarak 2500 dev/dak devir sayısı ve 400 mm/dak kesme parametreleri ile yapılan deneylerde delik içerisinde ve delik çıkışında oluşan hasarlar SEM ile görüntülenmiştir. 250 ve 500 kat büyütme ile incelemeler yapılmıştır. 250 kat büyütme ile alınan görüntüler incelendiğinde destek plakası olmadan delinen delik çıkışında, hasarın diğer numunelerden daha fazla olduğu görülmektedir. Yine bu numunenin delik yüzeylerinin de diğer numunelere göre kaba yüzey olduğu görülmektedir. 500 kat büyütme ile alınan görüntüler incelendiğinde ise 0.5 ve 1 mm destekli delinen deliklerde de oluşan hasarlar ortaya çıkmıştır. Bu kesme parametreleri için genel bir değerlendirme yapılacak olursa destek plakası olmadan delinen delikte hasarlar vardır. Diğer numunelerde ise ciddi bir hasar oluşumu gözlenmemiştir.

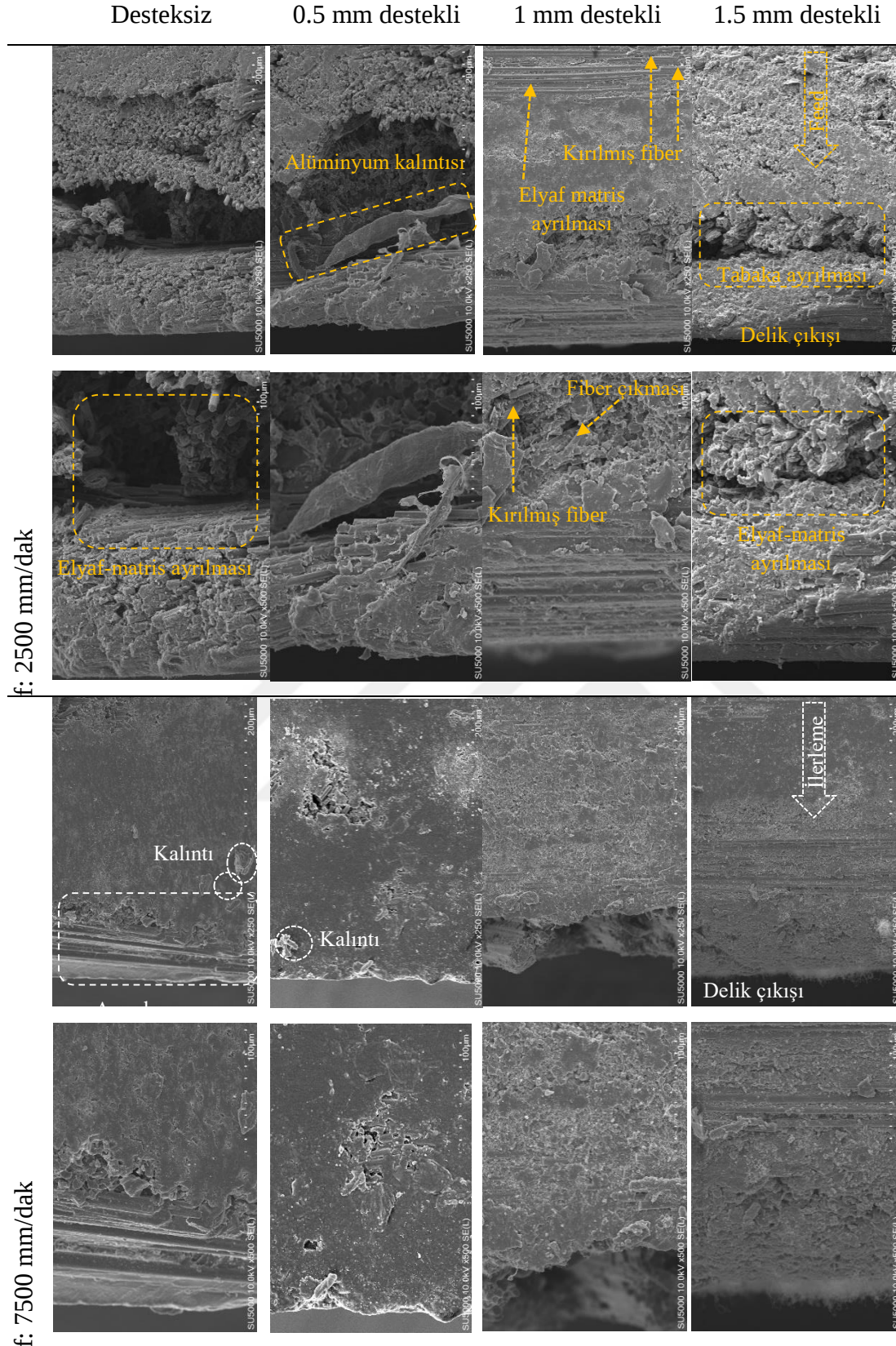
Desteksiz ve 3 farklı kalınlıkta destek kullanılarak 2500 dev/dak fener mili hızı ve 2000 mm/dak kesme parametreleri ile yapılan deneylerde delik çıkışında oluşan hasarlar Şekil 4.15’de verilmiştir. Bir önceki SEM ile kıyaslandığında (dönme hızı aynı, ilerleme hızı 400’den 2000’e artırılmıştır), tüm numunelerde ciddi hasarlar oluşmuştur. Delik yüzey ve delik çıkışlarında çok fazla hasar oluşmasının sebebi, ilerleme hızının çok yüksek olmasından kaynaklanmaktadır. En fazla hasar, desteksiz delinen numunede oluşurken en az hasar ise 1.5 mm destek kullanılarak yapılan numunede oluşmuştur. Deney anında destek kullanılması, hasar oluşumunu azaltmıştır. Desteksiz ve 0.5 mm destekli delinen numunelerin delik çıkışlarında çok aşırı debonding (elyaf-matris ayrılması) hasarı oluşmuştur. 1 mm destekli numunede de kısmen debonding (elyaf-matris ayrılması) hasarı oluşmuştur. Tüm numunelerde fiber pull-outlar (elyaf çekmesi), fiber bending (elyaf eyilmesi), debonding (elyaf-matris ayrılması), fiber breakage (elyaf kırılması), uncut fiber (kesilmemiş elyaf), broken (kırık) fiberler gözlenmiştir. Sonuç itibarıyla bu kesme parametresi ile elde edilen deliklerde ciddi hasar oluştuğu için bu kesme parametrelerinin kullanılmasının uygun olmadığı düşünülmektedir.



Şekil 4.15: S: 2500 dev/dak, f: 400 mm/dak ve 2000 mm/dak parametre ile delinen deliğin SEM görüntüleri.

Desteksiz ve 3 farklı kanlıkta destek kullanılarak 1200 mm/dak ilerleme ve 2500 dev/dak kesme parametreleri ile yapılan deneylerde, delik içinde oluşan hasarlar Şekil 4.16'de verilmiştir. En fazla hasar, desteksiz ve 0.5 mm destek plakası kullanılarak yapılan testlerdeki deliklerde oluşmuştur. Deneylerde 1 ve 1.5 mm destek kullanılması, hasar oluşumunu kısmen azaltmıştır. Fiber kırılması, debonding (elyaf-matris ayrılması), fiber yerinden (elyaf çekmesi) çıkması, fiber bending (eğilme) gibi birçok hasar; delik yüzeylerinde vardır. Desteksiz ve 0.5 mm destek kullanılarak yapılan testlerden oluşan yüzeylerin kabul edilebilir toleranslarda olduğu söylenemez.

Desteksiz ve 3 farklı kalınlıkta destek kullanılarak 7500 dev/dak devir sayısı ve 1200 mm/dak kesme parametreleri ile yapılan deneylerde delik çıkışında oluşan hasarlar Şekil 4.16'de verilmiştir. En fazla hasar, desteksiz yapılan testlerdeki deliklerde oluşmuştur. 0.5 mm destek kullanılarak yapılan testlerde çok az hasar oluşmuştur. Deneylerde 1 ve 1.5 mm destek kullanılması hasar oluşumu çok azdır. Sabit ilerleme değişken fener mili hızlarında (2500 dev/dak ve 7500 dev/dak) elde edilen hasar analizi kıyaslamasında; fener mili artışı hasar oluşumunu ciddi düzeyde azaltmıştır.



Şekil 4.16: f: 1200 mm/dak, s: 2500 dev/dak ve s: 7500 dev/dak parametre ile delinen deliğin SEM görüntüleri.

5.TARTIŞMA VE SONUÇLAR

Bu çalışmada CFRP malzemenin destek olmadan ve farklı kalınlıklarda (0.5, 1 ve 1.5 mm) alüminyum destekler kullanılarak kuru kesme şartlarında beş farklı ilerleme (400, 800, 1200, 1600 ve 2000 mm/dak), iki farklı fener mili hızı (2500 ve 7500 dev/dak) parametreleri kullanılarak delinmesi deneysel olarak araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar ve bulgular aşağıda belirtilmiştir.

- İlerleme hızının artmasıyla itme kuvveti artarken, fener mili hızının artması ile itme kuvveti azalmaktadır. Deneyler boyunca ölçülen en yüksek kuvvet 303,73 N olarak 2500 dev/dak fener mili hızında 2000 mm/dak ilerleme hızında 1,5 mm destek plakası kullanılmasıyla oluşurken en düşük kuvvet ise 68,12 N olarak 7500 dev/dak fener mili hızında 400 mm/dak ilerleme hızında 1 mm destek plakası kullanılmasıyla oluşmuştur. 2500 dev/dak fener mili hızında yapılan testlerde destek plakası kullanılması itme kuvvetini çok az artırmıştır.
- İlerleme hızının artmasıyla delaminasyon hasarı artarken, fener mili hızının artması ile delaminasyon hasarı azalmaktadır. En yüksek delaminasyon hasarı, destek kullanılmadan yapılan testlerde meydana gelmiştir. Deneylerde destek plakası kullanılması delaminasyon hasarı azaltılmıştır. En az delaminasyon hasarı 1,5 mm destek plakasının kullanıldığı testlerde oluşmuştur.
- Desteksiz delme testlerinde kesici takım üzerinde yığıntı talaş (built up edge-BUE) oluşumu gözlenmemiştir. Ancak delme deneylerinde destek plakası kullanımıyla kesici takımda BUE oluşmuştur. Destek plakası kalınlığı arttıkça BUE’de artmaktadır.
- İlerleme hızının artmasıyla yüzey pürüzlülük değeri artarken, fener mili hızının artması ile yüzey pürüzlülük değeri azalmaktadır. En yüksek pürüzlülük değeri 1 mm destek plakasında kullanılmasıyla oluşurken en düşük pürüzlülük değerleri ise 0,5 mm destek plakası kullanımında oluşmuştur. Dolayısıyla desteksiz delmeden ziyade düşük kalınlıkta destek kullanılmasıyla daha kaliteli yüzeyler elde edilebilmiştir.
- Delik içi hasar analizi incelemelerinde ise desteksiz delme koşullarında delik çıkışında ciddi hasarlar gözlenmiştir. Buna ilaveten ilerleme

hızının çok yüksek olması durumunda da destek kullanılan numunelerde de hasarlar gözlenmiştir.

- Desteksiz delme işleminde takım üzerinde BUE oluşmazken, destekli delmede destek plakası kalınlığı artıkça BUE oluşumu da artmıştır. Öte yandan, tüm deney koşullarında takım üzerinde radyal ağız aşınması gözlemlenmiştir ancak desteksiz delmede aşınma miktarı minimum seviyededir.



KAYNAKLAR

- Abrao , A. ve Faria , P. (2007). Drilling of fiber reinforced plastics: a review. *journal of mater process technology*, 186(1):1-7.
- Abrao, A., Rubio , J., Faria , P., Davim , J. (2008). The effect of cutting tool geometry on thrust force and delamination when drilling glass fibre reinforced plastic composite. *Materials & Design*, 29(2), 508-13.
- Abrao, A., Rubio, J., Faria , P., Davim , J. (2008). The effect of cutting tool geometry on thrust force and delamination when drilling glass fibre reinforced plastic composite. *Mater Des*, 29(2):508-13.
- Abrate , S. ve Walton , D. (1992). Machining of composite materials. Part I: traditional methods. . *Composites Manufacturing*, 3(2):75-83.
- Adam Khan, M., Senthil Kumar, A. (2011). Machinability of glass fibre reinforced plastic (GFRP) composite using alumina-based ceramic cutting tools. *Manuf Processes*, 13(1);67-73.
- Alam, S., Habib F, F., Irfan , M. (2010). Effect of orientation of glass fiber on mechanical properties of GRP composites. . *J. Chem. Society Pakistan*, 32: 265-269.
- Alberdi , A., Artaza , T., Suarez , A. (2015). An experimental study on abrasive waterjet cutting of CFRP/Ti6Al4V stacks for drilling operations. *Int J Adv Manuf Technol*, 1-14.
- Andersson, C. ve Warren, R. (1984). Silicon carbide fibres and their potential for use in composite materials. Part 1. *Composites*, 16-24.
- Arola, A., Ramulu, M., Wang, D. (1996). Chip Formation in Orthogonal Trimming of Graphite/Epoxy Composite. *Composites*, 27A;121-133.
- Aydın, E. (2019). *Karbon Fiber Takviyeli Polimer Kompozit (CFRP) İle Alüminyum Alaşımının (Al 7075) İstiflenmiş Halde Delinebilirlik Özelliklerinin Araştırılması*. Gazi Üniversitesi, İmalat Mühendisliği Ana Bilim Dalı. Ankara: Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

- Babu , G., Babu, K., Gowd , B. (2013;). Effect of machining parameters on milled natural fiber-reinforced plastic composites. *J Adv Mech Eng* , 1:1e12.
- Balasubramanian, M. (2014). *Composite materials and processing*. Taylor & Francis Group, LLCRC Press.
- Balasubramanian, M. (2014). *Composite Materials and Processing*. New York: Taylor & Francis Group, LLCRC Press.
- Beard, T. (1989). Machining Composites-New Rules and Tools. *Modern Machine Shop*, 74-85.
- Bella, G., Veniali, F., Di Ilio, A., Tagliafer, V. (1993). A 2-D Model for Temperature Evaluation in Drilling. *Proc. of the Symposium on Machining of Advanced Composites* (pp. 65-72). American Society of Mechanical Engineers, (MD-45IPED-66).
- Bhatnagar, N., Ramakrishnan, N., Naik, N. (1995). On the Machining of Fiber Reinforced Plastic (FRP) Composite Laminates. *Int. J. Mach. Tool. Manufact.*, 35(5);701-716.
- Bhattacharyya, D. (1998). A study of hole drilling in Kevlar composites. *Composites science and technology*, 267-283.
- Brinksmeier, E. ve Janssen, R. (2002). Drilling of multi-layer composite materials consisting fiber reinforced plastics (CFRP), titanium and aluminum alloys. *CIRP Ann.*, 87-90.
- Broutman, L. (1974). Micromechanics Strength Theories. In *Composite Materials*. New York: Academic Press.
- Brydson, J. (1999). *Plastics materials*. Butterworth-Heinemann.
- Bunsell, A. (2005). Oxide fibers for high-temperature reinforcement and insulation. *JOM*, , 57, 2:48 .
- Callister, W. (2007). *Materials Science and Engineering*. New York: John Wiley & Sons.
- Callister, W. D. (2014). *Materials Science and Engineering*. John Wiley & Sons.
- Carolin , A. (2003). *Carbon fibre reinforced polymers for strengthening of structural elements*. (Doctoral dissertation, Luleå tekniska universitet).
- Chand , S. (2000). Review carbon fibers for composites. *Journal of Materials Science* , 35: 1303-1313.
- Chawla, K. (2012). *Composite Materials: Science and Engineering*. . New York: Springer-Verlag, Inc.

- Chawla, N. ve Chawla, K. (2006). *Metal Matrix Composites*. New York: Springer.
- Chouhan, H., Singh, D., Parmar, V. (2016). Laser machining of Kevlar fiber reinforced laminates. Effect of polyetherimide versus polypropylene matrix. *Compos Sci Technology* , 134:267-74.
- Chung, D. D. (2003). *Composite Materials: Functional Materials for Modern Technologies*. Verlag London: Springer.
- Courtney, T. (1990). *Mechanical Behavior of Materials*. New York: McGraw-Hill.
- Davim , J. ve Reis, P. (2003). Study of delamination in drilling carbon fiber reinforced plastics (CFRP) using design experiments. *Compos Struct*, 59(4):481–7.
- Davim, J., Reis, P., António, C. (2004). Drilling fiber reinforced plastics (FRPs) manufactured by hand lay-up: influence of matrix (Viapal VUP 9731 and ATLAC 382-05). *Mater Proc Tech*, 155-156(0); 1828-1833.
- Davim, J., Reis, P., António, C. (2004). Experimental study of drilling glass fiber reinforced plastics (GFRP) manufactured by hand lay-up. *Compos Sci Technol.*, 64(2); 289-297.
- Davis, J. (1977). *Fibre reinforced materials; design and engineering applications*. London: INSTITUTION OF CIVIL ENGINEERS.
- Dhakal, H. N. (2018). Abrasive water jet drilling of advanced sustainable bio-fibre-reinforced polymer/hybrid composites: a comprehensive analysis of machining-induced damage responses. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2833-2847.
- Dhakal, H., Ismail, S., Ojo, S., Paggi, M., Smith, J. (2018). Abrasive water jet drilling of advanced sustainable bio-fibre-reinforced polymer/hybrid composites: a comprehensive analysis of machining-induced damage responses . *Adv. Manuf. Technol.* , 2833-2847.
- Dhingra, A. (1980). *Alumina Fibre FP*. London: Phil. Trans. R. Soc. Lond.
- Di Ilio, A., Tagliaferri, V., Veniali, F. (1993). Specific Cutting Energy in Drilling of Composites. *Proc. of the Symposium on Machining of Advanced Composites* (pp. 53-64). American Society of Mechanical Engineers, (MD-45IPED-66).
- Dogrusadik, A. (2017). Comparative assessment of support plates' influences on delamination damage in micro-drilling of CFRP laminates. *Composite Structures*, 173, 156-167.

- Dogrusadik, A. (2019). Experimental investigation of support plates' influences on tool wear in micro-drilling of CFRP laminates. *Journal of Manufacturing Processes*, 38, 214-222.
- Doğrusadık, A. (2017). Experimental Investigation of Influences of Support Plates On Micro-Drilling Of CFRP Laminates. 11. İstanbul: Marmara Üniversitesi Doktora Tezi.
- Donnet, J. ve Bansal , R. (1998). *Carbon fibers*. CRC Press.
- Durao , L., Gonçalves , D., Tavares, J. (2010). Drilling tool geometry evaluation for reinforced composite laminates. *Compos Struct*, 92(7):1545-50.
- Echaabi , J., Trochu , F., Gauvin , R. (1996). Review of failure criteria of fibrous composite materials. *Polym Compos*, 17(6):786-98.
- Ekici, E. ve Işık, B. (2009). Experimental investigation of surface damage in drilling of glass fiber reinforced polymer composite materials. In: *International advanced technologies symposium (IATS)*, (pp. 1-6).
- Eneyew, E. ve Ramulu , M. (2014). Experimental study of surface quality and damage when drilling unidirectional CFRP composites. *J Mater Res Technol*, 3(4):354-62.
- Erden , S., Sever, K., Seki , Y., & Sarikanat, M. (2010). Enhancement of the mechanical properties of glass/polyester composites via matrix modification glass/polyester composite siloxane matrix modification. *Fibers and Polymers* , 11: 732-737.
- Erkan , Ö. ve Işık, B. (2009). 0/90 elyaf oryantasyonuna sahip camelyaf takviyeli polimer kompozit malzemenin farklı kesme yönlerinde frezelenmesinin yüzey pürüzlülüğüne etkilerinin incelenmesi. *1st national symposium on machining*.
- Erkan , Ö. ve Işık, B. (2009). Investigation of cutting parameter effects on surface roughness during machining of glass fiber reinforced plastic composite material. *5th international advanced technologies symposium (IATS'09)*.
- Fu , S., Yu, B., Duan , L. (2015). Combined effect of interfacial strength and fiber orientation on mechanical performance of short Kevlar fiber reinforced olefin block copolymer. *Compos Sci Technol*, 108:23-31.
- G., L. (1982). *Handbook of Composites*. Berlin, Germany: Springer.
- Gaitonde , V., Karnik , S., Rubio , J., Correia, A. (2008). Analysis of parametric influence on delamination in high-speed drilling of carbon fiber reinforced plastic composites. *J Mater Process Technol*, 203(1):431-8.

- Gemi, L. K. (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*, 107787.
- Gemi, L. M. (2020). The effects of stacking sequence on drilling machinability of filament wound hybrid composite pipes: Part-2 damage analysis and surface quality. *Composite Structures*, 111737.
- Giasin, K. B. (2021). Microstructural investigation and hole quality evaluation in S2/FM94 glass-fibre composites under dry and cryogenic conditions. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 273-293.
- Gordon, J. (1976). *The New Science of Strong Materials or Why You Don't Fall*. Princeton, NJ: Princeton University Press.
- Grilo, T., Paulo, R., Silva, C., Davim, J. (2013). Experimental delamination analyses of CFRPs using different drill geometries. *Compos B Eng*, 45(1):1344-50.
- Hajduk, F. (2005). Carbon fibres overview; global outlook for carbon fibres 2005. In: *Intertech conferences*. San Diego: CA.
- Hart-Smith, L. (1987). *Engineered Materials Handbook*. Ohio: ASM International.
- Hashish, M. (2013). Trimming of CFRP aircraft components. In: *2013 WJTA-IMCA conference and expo*. Houston, Texas.
- Hearle, J. (2001). *High Performance Fibers*. Woodhead Publishing.
- Hertzberg, R. (1996). *Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials* (Vol. 4th Edition). New York: Wiley, New York.
- Hintze, W., Hartmann, D., Schütte, C. (2011). Occurrence and propagation of delamination during the machining of carbon fibre reinforced plastics (CFRPs)-An experimental study. *Compos Sci Technol*, 71(15):1719-26.
- Hintze, W., Hartmann, D., Schütte, C. (2011). Occurrence and propagation of delamination during the machining of carbon fibre reinforced plastics (CFRPs)-An experimental study. *Composite Science Technology*, 71(15):1719e26.
- History of Composite Materials*. (2021, 1 11). Retrieved from mar-bal: <https://www.mar-bal.com/language/en/applications/history-of-composites/>
- Ho-Cheng, H. ve Dharan, C. (n.d.). Delamination During Drilling in Composite Laminates. *Proc. of the Conference on Machining Composites, Winter Annual Meeting*. American Society of Mechanical Engineers (PED-35/MD-12) (1988) 39-44.

- Hocheng, H. T. (2016). Utilizing internal icing force to reduce delamination in drilling composite tubes. *Composite Structures*, 36-41.
- Hull, D. ve Clyne, T. (1996). *An Introduction to Composite Materials*. New York: Cambridge University Press.
- Hussein, R., Sadek, A., Elbestawi, M., Attia, M. (2019). Elimination of delamination and burr formation using high-frequency vibration-assisted drilling of hybrid CFRP/Ti6Al4V stacked material. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 859-879.
- Iliescu, D., Gehin, D., Gutierrez, M., Girot, F. (2010). Modeling and tool wear in drilling of CFRP. *Mach Tools and Manuf.*, 50(2); 204-213.
- J., F. (1995). *Metal Matrix Composites*. Springer Netherlands.
- J.C., A., P., K. L. (2003). *Materials Science for Engineers*. U.K.: Nelson Thornes.
- John, K. M. (2020). Backup support technique towards damage-free drilling of composite materials: A review. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, 357-364.
- Jones, R. (1999). *Mechanics of Composite Materials*. Philadelphia: Taylor Francis .
- Kar, K. (2017). *Composite Materials; Processing, Applications, Characterizations*. Verlag Berlin Heidelberg: Springer.
- Karbon fiber malzemelerin işlenmesi. (2020, 11 22). Retrieved from <http://www.sandvik.coromant.com/SiteCollectionDocuments/downloads/global/technical%20guides/en-gb/C-2920-30.pdf>
- Karnik , S., Gaitonde , V., Rubio , J. (2008). Delamination analysis in high speed drilling of carbon fiber reinforced plastics (CFRP) using artificial neural network model. *Mater Des*, 29(9):1768-76.
- Karpat , Y., Bahtiyar , O., Değer, B. (2012). Milling force modelling of multidirectional carbon fiber reinforced polymer laminates. *Procedia CIRP*, 1:460-5.
- Kelly, A. (1967). The Nature of Composite Materials. *Scientific American*.
- Khashaba, U. A.-S. (2010). Machinability analysis in drilling woven GFR/epoxy composites: Part I–Effect of machining parameters. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 391-400.
- Kılıçkap, E. (2010). CETP kompozitlerin delinmesinde oluşan deformasyona delme parametrelerinin etkisinin incelenmesi. *2nd national design manufacturing and analysis congress*, (p. 77).

- Koklu, U. (2022). An Experimental Investigation on Machinability of AZ31B Magnesium Alloy under Dry and Dipped Cryogenic Approaches. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 1285-1296.
- Koklu, U. (2019). Effects of the drill flute number on drilling of a casted AZ91 magnesium alloy. *Materials Testing*, 260-266.
- Komanduri, R. (1993). Machining of Fiber Reinforced Composite. *Mechanical Engineering*, 115(4);58-66.
- Konig, W., Wulf, C., Grab, P. (1989). Machining of Fiber Reinforced Plastics. *Annals of CIRP*, 34(2), 537-548.
- KoPlev , A., Lystrup , A., Vorm , T. (1983). The cutting process, chips, and cutting forces in machining CFRP. *Composites*, 14(4):371-6.
- Köpf, A., Feistritzer, S., Udier, K. (2006). Diamond coated cutting tools for machining of non-ferrous metals and fibre reinforced polymers. *Refract Metals and Hard Materials*, 24(5);354-359.
- Li, Y., Wang, S., Wang, Q. A. (2017). molecular dynamics simulation study on enhancement of mechanical and tribological properties of polymer composites by introduction of graphene. *Carbon* , 111, 538–545.
- Liu , D., Tang , Y., Cong , W. (2012). A review of mechanical drilling for composite laminates. *Compos Struct*, 94(4):1265-79.
- Mallick, P. (2007). *Fiber reinforced composites; Materials, Manufacturing and Design*. Dearborn, Michigan: Taylor & Francis Group, LLC.
- Marshall, I. (1991). *Composite Structures*. Netherlands: Elsevier Science Publishers LTD.
- Mathew , M., Padaki , N., Rocha , L., Gomes, J. (2007). Tribological properties of the directionally oriented warp knit GFRP composites. *Wear*(263), 930-938.
- Morkavuk, S. (2016). *Karbon Fiber Takviyeli Plastiklerin Kuru Ve Kriyojenik İşleme Koşullarında Frezelenmesi*. Selçuk Üniversitesi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı. Konya: Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Morley, J. (1976). Fibre reinforcement of metals and alloys. *Int. Metals Rev.*, (p. 21:153).
- Murphy , C., Byrne , G., Gilchrist , M. (2002). The performance of coated tungsten carbide drills when machining carbon fibre-reinforced epoxy composite materials. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B: J Eng Manuf*, 216(2):143-52.

- Nabi, D. ve Jog, J. (1999). Natural fiber polymer composites: a review, . *Adv.Polym. Tech.*, 18:351 .
- Nicholls, R. (1976). *Composite Construction Materials Handbook*. Englewood: Prentice-Hall.
- Nielsen, L. F. (2005). *Composite Materials: Properties as Influenced by Phase Geometry*. Berlin : Springer.
- Nor Khairusshima, M., Sharifah, I. (2017). Study on Tool Wear during Milling CFRP under Dry and Chilled Air Machining. *Procedia Engineering*, 184; 506–517.
- Orifici , A., Herszberg , I., Thomson , R. (2008). Review of methodologies for composite material modelling incorporating failure. *Composite Structures*, 194-210.
- Palanikumar, K. ve Davim, J. (2009). Assessment of some factors influencing tool wear on the machining of glass fibre-reinforced plastics by coated cemented carbide tools. *Mater Proc Tech*, 209(1);511-519.
- Palanikumar, K. ve Davim, J. (2007). Mathematical model to predict tool wear on the machining of glass fibre reinforced plastic composites. *Materials & Design*, 28(7) 2008-2014.
- Palanikumar, K., Karunamoorthy, L., Karthikeyan, R. (2006). Assessment of factors influencing surface roughness on the machining of glass fiber-reinforced polymer composites. *Materials & Desing*, 27(10); 862-871.
- Park, I. W. (2000). A study of burr formation processes using the finite element method: part I. *J. Eng. Mater. Technol.*, 229-237.
- Park, K. M. (2019). Evaluation of a hybrid cryogenic deburring method to remove uncut fibers on carbon fiber-reinforced plastic composites. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 1509-1523.
- Patel , S., Shaikh , A. (2013). A review on machining of fiber reinforced plastic using abrasive water jet. *Int J Innov Technol Adapt Manag (IJITAM)*, 1(3). ISSN: 2347-3622.
- Persson , E., Eriksson , I., Zackrisson , L. (1997). Effects of hole machining defects on strength and fatigue life of composite laminates. *Compos Appl Sci Manuf*, 28(2):141-51.
- Piggott, M. (1980). *Load-Bearing Fibre Composites*. Oxford: Pergamon Press.

- Qi, Z. Z. (2014). Critical thrust force predicting modeling for delamination-free drilling of metal-FRP stacks. *Critical thrust force predicting modeling for delamination-free drilling of metal-FRP stacks.*, 604-609.
- R., S. (1995). *Polymer Matrix Composites*. Netherland: Springer .
- Ramirez, C., Poulachon , G., Rossi , F., M'Saoubi , R. (2014). Tool wear monitoring and hole surface quality during CFRP drilling. *Procedia CIRP*, 13:163-8.
- Rawat, S. ve Attia, H. (2009). Wear mechanisms and tool life management of WC–Co drills during dry high speed drilling of woven carbon fibre composites. *WEAR*, 267(5-8);1022-1030.
- Renard, A. R. (2005). *Fundamentals of Fibre Reinforced Composite Materials*. IOP Publishing Ltd .
- Rideealgh, J., Rawlings, R., West, D. (1990). Laser Cutting of Glass Ceramic Matrix Composite. *Materials Science and Technology*, 395-398.
- Rosato , D. (2004). *Reinforced plastics handbook*. Elsevier.
- Rosato , D. ve Rosato, D. (2004). *Reinforced Plastics Handbook*. Elsevier Science.
- Sadat, A. B. (1992). Delamination of graphite/epoxy laminate during drilling operation. *Journal of Energy Resources Technology*, 139-141.
- Sakuma , K., Yokoo , Y., Masafumi , S. (1984). Study on drilling of reinforced plastics (GFRP and CFRP): relation between tool material and wear behavior. *Bull JSME* , 27(228):1237e44.
- Sathishkumar , T., Satheeshkumar, S., Naveen, J. (2014). Glass fiber-reinforced polymer composites: A review. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 33: 1258-1275.
- Shaw, M. (2005). *Metal Cutting Principles, 2nd edition*. Oxford: Oxford University Press.
- Sheikh Ahmad, J., Davim, J. (2012). *Tool wear in machining processes for composites*. Woodhead Publishing Limited.
- Shilpa, K., Nithin , K., Sachhidananda , S., Madhukar, B. (2017). Visibly transparent PVA/sodium doped dysprosia (Na₂Dy₂O₄) nano composite films, with high refractive index: An optical study. *Journal of Alloys and Compounds*(694), 884-891.
- Shinohara , A., Sato, T., Saito, F., Tomioka , T., Arai , Y. (1993). A novel method for measuring direct compressive properties of carbon fibres using a

- micromechanical compression tester. *Journal of Materials Science*, 28: 6611-6616.
- Shukla , M. (2013). *Nontraditional machining processes*. Springer.
- Shyha, I., Soo, S., Aspinwall, D., Bradley, S. (2010). Effect of laminate configuration and feed rate on cutting performance when drilling holes in carbon fibre reinforced plastic composites. *J. Mater. Process. Technol.*, 1023-103.
- Singh , A., Sharma , M., Singh , I. (2013). A review of modeling and control during drilling of fiber reinforced plastic composites. *Compos Part B: Eng*, 47: 118-25.
- Smith, W. (1990). *Principles of Material Science and Engineering*. New York: McGraw-Hill.
- Spur, G. ve Wunsch, U. (1988). Turning of fiber-reinforced plastics. *Manufacturing Review*, 1;124–129.
- Stephen , W., Hahn, H. (1980). *Introduction to Composite Materials*. Lancaster, PA : Technomic Publishing Co.
- Subramani, N., Kasargod Nagaraj , S., Shivanna , S., Siddaramaiah , H. (2016). Highly flexible and visibly transparent poly (vinyl alcohol)/calcium zincate nanocomposite films for UVA shielding applications as assessed by novel ultraviolet photon induced fluorescence quenching. *Macromolecules*, 2791-2801.
- Takmaz , A., Erkan, Ö., Yücel, E. (2016). Cam elyaf takviyeli plastik kompozit malzemenin kenar frezelenmesinde kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkilerinin istatistiksel olarak incelenmesi . *Düzce University Journal Science Technology*, 4(2).
- Teti, R. (2002). Machining of Composite Materials. *Manuf Techno,CIRP Annuals*, 51(2); 611-634.
- Trefilov, V. (1995). *Ceramic-and Carbon-matrix Composites*. Netherlands: Chapman & Hall.
- Tsao , C. ve Hocheng , H. (2007). Effect of tool wear on delamination in drilling composite material. *Int J Mech Sci*, 49(8):983-8.
- Turki , Y., Habak , M., Velasco , R. (2014). Experimental investigation of drilling damage and stitching effects on the mechanical behavior of carbon/epoxy composites. *Int J Mach Tool Manufact*, 87:61-72.

- Unde , P., Gayakwad , M., Patil , N. (2015). Experimental investigations into abrasive waterjet machining of carbon fiber reinforced plastic. *J Compos*, 2015.
- Unde, P. ve Ghodke, R. (2015). Investigations of delamination in GFRP material cutting using abrasive waterjet machining. *Proceeding of the 4th International Conference on Advances in Material in Mechanical, Aeronautical and Production Techniques*.
- W.D., K. (1976). *Introduction to Ceramics*. New York: John Wiley & Sons.
- Wang, D., Ramulu , M., Arola , D. (1995). Orthogonal cutting mechanisms of graphite/epoxy composite. Part I: unidirectional laminate. *Int J Mach Tool Manufact*, 35(12):1623-38.
- Wern, C. ve Ramulu, M. (1996). Investigation of Stresses in the Orthogonal Machining of Fiber-Reinforced Plastics. *Experimental Mechanics*, 33-41.
- Wong , T., Wu, S., Croy, G. (1982). An analysis of delamination in drilling composite materials. *14th national SAMPE technical conference*.
- Y., I., Cheshkov, V., Natova, M. (2001). *Polymer Composite Materials — Interface Phenomena & Processes*. Netherlands: Springer .
- Yoshinori, N. (2013). Fabrication and Recycling. In *Introduction to Metal Matrix Composites*. Japan: Springer .
- Zhang , Q., Liang , Y., Warner , S. (1994). Partial carbonization of aramid fibers. *Journal of Polymer Science*(32), 2207-2220.
- Zor, M. (2018). *Kompozit Malzemenin Mekaniği*. İzmir: Dokuzeylül Üniversitesi.



ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Çağlar BETGÜL

Doğum Tarihi ve Yeri :

E-posta :

Öğrenim Durumu:

Lise : 004-2000-Bucaresteniolu T.

Lisans : 09-2000 Afyon K. Tıp

Yüksek Lisans : 2013-2014, Hacettepe University

Yabancı Dil ve Düzeyi:

Mesleki Deneyim ve Ödüller: