

**T.C.  
BURDUR MEHMET AKİF ERSOY ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**NOMEX KOMPOZİT MALZEMELERİNİN  
İŞLENEBİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI**

**Fatih ERGENÇİÇEĞİ**

**Danışman: Doç. Dr. Ahmet UYUMAZ  
II. Danışman: Doç. Dr. Gültekin BASMACI**

**BURDUR, 2023**

## ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Eğitim Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin ilgili hükümleri uyarınca **Yüksek Lisans Tezi** olarak sunduğum “**Nomex Kompozit Malzemelerinin İşlenebilirliğinin Araştırılması**” başlıklı bu tezin;

- Kendi çalışmam olduğunu,
- Sunduğum tüm sonuç, doküman, bilgi ve belgeleri bizzat ve bu tez çalışması kapsamında elde ettiğimi,
- Bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara atıf yaptığımı ve bunları kaynaklar listesinde usulüne uygun olarak verdiğimi,
- Kullandığım verilerde değişiklik yapmadığımı,
- Tez çalışması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını,
- Bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya diğer bir üniversitede başka bir tez çalışması içinde sunmadığımı,
- Bu tezin planlanmasından yazımına kadar bütün safhalarda bilimsel etik kurallarına uygun olarak davrandığımı,

bildirir, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul edeceğimi beyan ederim.

25/05/2023

**Fatih ERGENÇİÇEĞİ**

## ÖNSÖZ

Bu araştırma için beni yönlendiren, karşılaştığım zorlukları aşmamda tecrübe ve birikimi ile yardımcı olan değerli danışman hocalarım Doç. Dr. Ahmet UYUMAZ ve Doç. Dr. Gültekin BASMACI'ya teşekkürlerimi sunarım. Deneylemlerimi yapmam için laboratuvarlarını bana açan ve araştırmalarımnda hiçbir yardımı esirgemeyen Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi'nden değerli hocam Prof. Dr. Uğur KÖKLÜ'ye teşekkür ederim.

Malzeme temini konusundaki yardımı, teknik desteği ve vermiş olduğu manevi destekler için kıymetli dostum Kimya Mühendisi Barış Koray BOZDAĞ'a teşekkür ederim.

0740-YL-21 numaralı proje ile tezimi maddi olarak destekleyen Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü'ne teşekkür ederim.

Hayatımın tüm aşamalarında beni her anlamda destekleyen, haklarını asla ödeyemeyeceğim sevgili annem Ferah ERGENÇİÇEĞİ ve babam Mustafa ERGENÇİÇEĞİ'ne; varlığıyla beni güçlendiren biricik kardeşim Yüksel ERGENÇİÇEĞİ'ne; bu tezin hazırlanması esnasında bana sürekli moral veren, destek olan sevgili eşim Tuğçe Burcu ERGENÇİÇEĞİ'ne sonsuz sevgi ve şükranlarımı sunarım.

**Mayıs, 2023**

**Fatih ERGENÇİÇEĞİ**

# İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖNSÖZ .....	i
İÇİNDEKİLER .....	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	iv
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	vii
ÖZET.....	viii
ABSTRACT.....	ix
1. GİRİŞ.....	1
2. GENEL BİLGİLER.....	3
2.1. Kompozit Malzemeler .....	3
2.1.1. Kompozit Malzemelerin Yapısı .....	3
2.1.2. Kompozit Malzemelerin Matris Yapıya Göre Sınıflandırılması.....	4
2.1.2.1.Metal matrisli kompozitler .....	4
2.1.2.2.Seramik matrisli kompozitler .....	5
2.1.2.3.Polimer matrisli kompozitler .....	5
2.1.3. Kompozit Malzemelerin Takviye Elemanına Göre Sınıflandırılması.....	6
2.1.3.1.Elyaf takviyeli kompozitler .....	6
2.1.3.2.Parçacık takviyeli kompozitler .....	7
2.1.3.3.Tabakalı kompozitler .....	8
2.1.3.4.Karma kompozitler .....	10
2.2. Balpeteği (Honeycomb) Yapılar .....	10
2.2.1. Balpeteği Yapıların Şekillendirilmesi .....	12
2.2.1.1.Uzatarak şekil verme .....	12
2.2.1.2.Kıvrılarak şekil verme .....	12
2.3. Nomex.....	13
2.4. Nomex Balpeteği Yapılar .....	14
2.5. Nomex Balpeteği Yapıların İşlenebilirliği.....	15
2.5.1. Nomex Balpeteği Yapıların Geleneksel Yöntemlerle İşlenmesi .....	15
2.5.1.1.Nomex balpeteği yapıların kesici takımlarla işlenmesi .....	15
2.5.1.2.Nomex balpeteği yapıların aşındırıcı sujeti ile işlenmesi.....	16
2.5.2. Nomex Balpeteği Yapıların Geleneksel Olmayan Yöntemlerle İşlenmesi (Ultrasonik Titreşim Destekli Kesme Teknolojisi ile İşleme).....	16
2.6. Delaminasyon .....	17
2.6.1. Delaminasyon Modları.....	17
2.6.2. Kompozitlerin Delinmesinde Delaminasyon .....	18
2.6.3. Delme İşleminde Delaminasyon Faktörü.....	19
2.7. Kaynak Özetleri .....	20
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	26
3.1. Materyal .....	26
3.2. Aletler ve Cihazlar .....	27
3.2.1. Deneilerde Kullanılan Kesici Takımlar.....	27
3.2.2. Deneilerde Kullanılan CNC İşleme Merkezi .....	30
3.2.3. Deneilerde Kullanılan Kuvvet Ölçüm Sistemi.....	31
3.2.4. Deneilerde Kullanılan Görüntüleme Sistemi .....	31
3.3. Yöntem.....	32
3.3.1. Taguchi Deney Tasarım Metodu.....	33

3.3.2. Kesme ve İlerleme Parametreleri .....	33
3.3.3. DeneY Düzenegİ .....	34
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA.....	35
4.1. Kesme Kuvvetleri Ölçümü .....	35
4.2. Deliklerin Dijital Mikroskop Görüntüsü.....	38
4.3. Delaminasyon Değerleri .....	42
4.3.1. Giriş Delaminasyonları .....	42
4.3.2. Çıkış Delaminasyonları .....	45
5. SONUÇ VE ÖNERİLER .....	48
KAYNAKLAR .....	50
EKLER.....	54
EK 1 - Çizelge 4.1. DeneYlerde elde edilen kesme kuvvetleri.....	54
EK 2 - Çizelge 4.2. DeneYlerde elde edilen giriş delaminasyon faktörü değerleri .....	55
EK 3 - Çizelge 4.3. DeneYlerde elde edilen çıkış delaminasyon faktörü değerleri .....	55
EK 4 - Çizelge 4.4. RRFE 040 Takımı ile 2.000 dev/dak iş mili hızında delinen deliklerdeki giriş delaminasyon ölçümleri .....	56
EK 5 - Çizelge 4.5. RRFE 040 Takımı ile 8.000 dev/dak iş mili hızında delinen deliklerdeki giriş delaminasyon ölçümleri .....	57
EK 6 - Çizelge 4.6. RCFE 040 Takımı ile 2.000 dev/dak iş mili hızında delinen deliklerdeki giriş delaminasyon ölçümleri .....	58
EK 7 - Çizelge 4.7. RCFE 040 Takımı ile 8.000 dev/dak iş mili hızında delinen deliklerdeki giriş delaminasyon ölçümleri .....	59
EK 8 - Çizelge 4.8. RRFE 040 Takımı ile 2.000 dev/dak iş mili hızında delinen deliklerdeki çıkış delaminasyon ölçümleri.....	60
EK 9 - Çizelge 4.9. RRFE 040 Takımı ile 8.000 dev/dak iş mili hızında delinen deliklerdeki çıkış delaminasyon ölçümleri.....	61
EK 10 - Çizelge 4.10. RCFE 040 Takımı ile 2.000 dev/dak iş mili hızında delinen deliklerdeki çıkış delaminasyon ölçümleri.....	62
EK 11 - Çizelge 4.11. RCFE 040 Takımı ile 8.000 dev/dak iş mili hızında delinen deliklerdeki çıkış delaminasyon ölçümleri.....	63

## ŞEKİLLER DİZİNİ

	<b>Sayfa</b>
Şekil 2.1. Kompozit yapıdaki matris(reçine), takviye(fiber) .....	4
Şekil 2.2. Elyaf takviyeli kompozitler .....	7
Şekil 2.3. Parçacık takviyeli kompozitler .....	8
Şekil 2.4. Tabakalı kompozitler .....	8
Şekil 2.5. Sandviç kompozit malzemeler.....	9
Şekil 2.6. Petekli yapılarda geometrik parametreler.....	11
Şekil 2.7. Balpeteği kompozit yapılar.....	11
Şekil 2.8. Uzatarak şekil verme yöntemiyle balpeteği üretimi .....	12
Şekil 2.9. Kıvrılarak şekil verme yöntemiyle balpeteği üretimi .....	13
Şekil 2.10. Nomex elyafının moleküler yapısı.....	13
Şekil 2.11. Kompozitlerde delaminasyon modları.....	17
Şekil 2.12. Delme işlemi sırasında meydana gelen delaminasyonlar. ....	19
Şekil 2.13. Delme işleminde delaminasyon bölgesi ve maksimum hasar çapı.....	20
Şekil 3.1. 185 x 118 x 10 mm Nomex kompozit malzeme.....	26
Şekil 3.2. RRFE 040 Kesici takım görüntüsü.....	27
Şekil 3.3. RRFE 040 Kesici takımın dijital mikroskop görüntüsü. ....	28
Şekil 3.4. RCFE 040 Kesici takım görüntüsü.....	29
Şekil 3.5. RCFE 040 Kesici takımın dijital mikroskop görüntüsü. ....	29
Şekil 3.6. Deneyde kullanılan CNC tezgâhı. ....	30
Şekil 3.7. Kistler 9257 B tip dinamometre ve Kistler 5070 S tip amplifikatör.....	31
Şekil 3.8. Keyence dijital mikroskop ve deney numunesi .....	32
Şekil 3.9. Deney düzeneği. ....	34
Şekil 4.1. 2.000 dev/dak fener mili hızındaki kesme kuvvetlerinin ilerleme hızına göre değişimi.....	35
Şekil 4.2. 8.000 dev/dak fener mili hızındaki kesme kuvvetlerinin ilerleme hızına göre değişimi .....	36
Şekil 4.3. RRFE 040 kesici takımının farklı iş mili devirlerindeki kesme kuvvetlerinin ilerleme hızına göre değişimi.....	37
Şekil 4.4. RCFE 040 kesici takımının farklı iş mili devirlerindeki kesme kuvvetlerinin ilerleme hızına göre değişimi .....	37

<b>Şekil 4.5.</b>	RRFE 040 ve RCFE 040 kesici takımlarıyla 2.000 dev/dak iş mili hızı ile delinen deliklerde oluşan giriş delaminasyonları .....	42
<b>Şekil 4.6.</b>	RRFE 040 ve RCFE 040 kesici takımlarla 8.000 dev/dak iş mili hızı ile delinen deliklerde oluşan giriş delaminasyonları .....	43
<b>Şekil 4.7.</b>	RRFE 040 Kesici takımı ile farklı iş mili devirlerinde açılan deliklerdeki giriş delaminasyonunun ilerleme hızına göre değişimi.....	44
<b>Şekil 4.8.</b>	RCFE 040 Kesici takımı ile farklı iş mili devirlerinde açılan deliklerdeki giriş delaminasyonunun ilerleme hızına göre değişimi.....	44
<b>Şekil 4.9.</b>	RRFE 040 ve RCFE 040 kesici takımlarıyla 2.000 dev/dak iş mili hızı ile delinen deliklerde oluşan çıkış delaminasyonları.....	45
<b>Şekil 4.10.</b>	RRFE 040 ve RCFE 040 kesici takımlarıyla 8.000 dev/dak iş mili hızı ile delinen deliklerde oluşan çıkış delaminasyonları.....	46
<b>Şekil 4.11.</b>	RRFE 040 Kesici takımı ile farklı iş mili devirlerinde açılan deliklerdeki çıkış delaminasyonunun ilerleme hızına göre değişimi .....	46
<b>Şekil 4.12.</b>	RCFE 040 kesici takımı ile farklı iş mili devirlerinde açılan deliklerdeki çıkış delaminasyonunun ilerleme hızına göre değişimi .....	47

## ÇİZELGELER DİZİNİ

	<b>Sayfa</b>
<b>Çizelge 3.1.</b> Deneyde kullanılan Nomex balpeteği kompozit sandviçin özellikleri .....	26
<b>Çizelge 3.2.</b> RRFE 040 Kesici takımın özellikleri.....	28
<b>Çizelge 3.3.</b> RCFE 040 Kesici takımın özellikleri.....	30
<b>Çizelge 3.4.</b> Deneyde kullanılan dinamometre özellikleri.....	31
<b>Çizelge 3.5.</b> Dijital mikroskop özellikleri.....	32
<b>Çizelge 3.6.</b> Deneyde kullanılan kesme parametreleri.....	34
<b>Çizelge 4.1.</b> Nomex kompozit malzemede açılan deliklerin giriş deformasyonlarının 50 kat büyütülmüş görüntüleri .....	39
<b>Çizelge 4.2.</b> Nomex kompozit malzemede açılan deliklerin çıkış deformasyonlarının 50 kat büyütülmüş görüntüleri.....	41
<b>EK 1 - Çizelge 4.1.</b> Deneylerde elde edilen kesme kuvvetleri .....	54
<b>EK 2 - Çizelge 4.2.</b> Deneylerde elde edilen giriş delaminasyon faktörü değerleri .....	55
<b>EK 3 - Çizelge 4.3.</b> Deneylerde elde edilen çıkış delaminasyon faktörü değerleri.....	55
<b>EK 4 - Çizelge 4.4.</b> RRFE 040 Takımı ile 2.000 dev/dak iş mili hızında delinen deliklerdeki giriş delaminasyon ölçümleri .....	56
<b>EK 5 - Çizelge 4.5.</b> RRFE 040 Takımı ile 8.000 dev/dak iş mili hızında delinen deliklerdeki giriş delaminasyon ölçümleri .....	57
<b>EK 6 - Çizelge 4.6.</b> RCFE 040 Takımı ile 2.000 dev/dak iş mili hızında delinen deliklerdeki giriş delaminasyon ölçümleri .....	58
<b>EK 7 - Çizelge 4.7.</b> RCFE 040 Takımı ile 8.000 dev/dak iş mili hızında delinen deliklerdeki giriş delaminasyon ölçümleri .....	59
<b>EK 8 - Çizelge 4.8.</b> RRFE 040 Takımı ile 2.000 dev/dak iş mili hızında delinen deliklerdeki çıkış delaminasyon ölçümleri.....	60
<b>EK 9 - Çizelge 4.9.</b> RRFE 040 Takımı ile 8.000 dev/dak iş mili hızında delinen deliklerdeki çıkış delaminasyon ölçümleri.....	61
<b>EK 10 - Çizelge 4.10.</b> RCFE 040 Takımı ile 2.000 dev/dak iş mili hızında delinen deliklerdeki çıkış delaminasyon ölçümleri.....	62
<b>EK 11 - Çizelge 4.11.</b> RCFE 040 Takımı ile 8.000 dev/dak iş mili hızında delinen deliklerdeki çıkış delaminasyon ölçümleri.....	63



## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<b><math>\mu\text{m}</math></b>	: Mikrometre
<b>AI</b>	: Yapay zeka
<b><math>\text{Al}_2\text{O}_3</math></b>	: Alüminyum Oksit
<b>AWJ</b>	: Aşındırıcı Su Jeti
<b><math>\text{B}_4\text{C}</math></b>	: Bor Karbür
<b>CNC</b>	: Bilgisayar Destekli Numerik Kontrolü
<b>CVD</b>	: Kimyasal buhar birikimi
<b>DAQ</b>	: Dijital bilgi edinim sistemi
<b>dev/dak</b>	: Devir/dakika
<b>DIN</b>	: Alman Standartları Enstitüsü
<b><math>\text{kg/m}^3</math></b>	: Kilogram/metreküp
<b>kHz</b>	: Kilohertz
<b>HSS</b>	: Yüksek hız çeliği
<b>MMK</b>	: Metal Matrisli Kompozit
<b>m/s</b>	: Metre/saniye
<b>mm</b>	: Milimetre
<b>mm/dak</b>	: Milimetre/dakika
<b>mm/dev</b>	: Milimetre/devir
<b>PMK</b>	: Polimer Matrisli Kompozit
<b>PVC</b>	: Polivinilklorür
<b>SiC</b>	: Silisyum Karbür
<b>SMK</b>	: Seramik Matrisli Kompozit
<b>SVM</b>	: Destek vektör makineleri
<b>TiAlN</b>	: Titanyum Alüminyum Nitrür
<b>TiN</b>	: Titanyum Nitrür
<b>UVA</b>	: Ultrasonik Titreşim Destekli İmalat
<b>USTC</b>	: Amerika Federal Ticaret Komisyonu
<b>WC</b>	: Sinterlenmiş Karbür
<b>ZrN</b>	: Zirkonyum Nitrür

# ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

**Nomex Kompozit Malzemelerin İşlenebilirliğinin Araştırılması**

**Fatih ERGENÇİÇEĞİ**

**Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi**

**Fen Bilimleri Enstitüsü**

**Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Danışman: Doç. Dr. Ahmet UYUMAZ**

**II. Danışman: Doç. Dr. Gültekin BASMACI**

**Mayıs, 2023**

Başta havacılık ve uzay çalışmaları olmak üzere, denizcilik, motor sporları ve otomotiv gibi sektörlerde; yüksek mukavemet, hafiflik, yanmazlık gibi üstün özellikleri sebebi ile yaygın olarak kullanılan Nomex kompozit malzemelerin işlenmesi anizotropik yapıları nedeniyle karmaşıktır. Perçin ve cıvata gibi bağlantı elemanları ile birleştirilen bu tür kompozitlerde delme işleminin kalitesi, bağlantı kalitesini belirleyen önemli bir faktördür. Bu çalışmada delme işlemi sırasında oluşan kesme kuvvetleri ile oluşan delaminasyonlar; en uygun kesici takım geometrisi, fener mili hız ve ilerleme hızını tespit edebilmek amacıyla incelenmiştir. Deneylerde cam fiber prepreg kaplı Nomex balpeteği sandviç malzeme; Helisel üç ağızlı kesici takım ve iki ağızlı kırıcı tip kesici takımlarla; 100, 200, 300, 400 ve 500 mm/dak ilerleme hızı ve 2.000, 8.000 dev/dak fener mili hızı parametreleri kullanılarak dik işleme merkezinde doğrudan delme metoduyla işlenmiştir. Kesme kuvvetleri dinamometre ile ölçülmüştür. Delinen deliklerin alınan görüntüleri üzerinden delaminasyon hesaplaması yapılmıştır. Deneyler sonucunda en iyi kesme kuvveti ve çıkış delaminasyonu değerleri iki ağızlı kırıcı tip kesici takımla düşük ilerleme hızlarıyla elde edilmiştir. Yüksek fener mili hızı ile kesme kuvvetleri azalmıştır. Yüksek fener mili hızı, iki ağızlı kırıcı tip kesici takımla yapılan deneylerde çıkış delaminasyonu değerlerini artırmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** kompozit malzeme, nomex, balpeteği, delaminasyon, işlenebilirlik

Hazırlanan bu Yüksek Lisans tezi Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü tarafından 0740-YL-21 proje numarası ile desteklenmiştir.

# ABSTRACT

M. Sc. Thesis

## Investigation of Machinability of Nomex Composite Materials

Fatih ERGENÇİÇEĞİ

Burdur Mehmet Akif Ersoy University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Assoc. Prof.Dr. Ahmet UYUMAZ  
Co-Supervisor: Assoc. Prof.Dr. Gültekin BASMACI

May, 2023

The processing of Nomex composite materials, which are widely used in sectors such as aerospace, marine, motorsports and automotive due to their superior properties such as high strength, light weight and non-flammability, is complex due to their anisotropic structure. In such composites, which are joined with fasteners such as rivets and bolts, the quality of the drilling process is an important factor determining the quality of the connection. In this study, the delaminations caused by the cutting forces generated during the drilling process were investigated in order to determine the most suitable cutting tool geometry, spindle speed and feed rate. In the experiments, glass fiber prepreg coated Nomex honeycomb sandwich material; Helical three flute cutting tool and two flute breaker type cutting tools; 100, 200, 300, 400 and 500 mm/min feed rate and 2000, 8000 rpm. and spindle speed parameters of 2.000 and 8.000 rpm on a vertical machining center using the direct drilling method. Cutting forces were measured with a dynamometer. Delamination was calculated from the images of the drilled holes. As a result of the experiments, the best cutting force and exit delamination values were obtained at low feed rates with a two-flute breaker type cutting tool. Cutting forces decreased with higher spindle speed. High spindle speed increased the exit delamination values in the experiments with the two-flute breaker type cutting tool.

**Keywords:** composite materials, nomex, honeycomb, delamination, machinability

The present M.Sc. Thesis was supported by Burdur Mehmet Akif Ersoy University Scientific Research Projects Coordinatorship under the Project number of 0740-YL-21.

# 1. GİRİŞ

İnsanlığın başlangıcından bu yana, insanlar hayatlarında kullanmak için çeşitli araç gereçler geliştirmişlerdir. Medeniyetle birlikte gelişen bu araç, gereç üretme faaliyetleri; bu işle uğraşan, ölçerek, biçerek tasarlayan “mühendisler” yetiştirmiştir. Mühendisler araç, gereç, alet ya da makinelerin yapımında, yapılan tasarımın teknik ve sosyal gerekliliklerini göz önüne alarak binlerce malzeme kullanmışlardır.

Bu malzemeler dayanıklılık, sertlik, yoğunluk, erime sıcaklıkları gibi temel özellikleri baz alınarak temel bir sınıflandırma ile;

- Metaller
- Plastikler
- Seramikler
- Kompozitler olarak sınıflandırılmışlardır (Mazumdar, 2001).

Gelişen teknoloji ve üretim yöntemleri, kompozit malzemelerin, tarihi çok daha eskiye dayanan ilk üç sınıftaki malzemedan birçoğunun yerini almasına neden olmuştur. Mühendislikte gereksinim duyulan yüksek mukavemet özelliklerinin yanı sıra düşük ağırlık, yüksek yorulma ve korozyon direnci, yüksek darbe dayanımı, yüksek ve düşük sıcaklıklarda çalışma yeteneği, yüksek ya da düşük ısı/elektrik iletkenliği gibi özellikleri ile kompozit malzemeler, birçok sektörde en çok kullanılan malzeme sınıfı haline gelmiştir.

Oldukça fazla olan avantajının yanında kompozit malzemelerin de dezavantajlı olduğu alanlar mevcuttur. Üretim maliyetlerinin yüksek olması, bazı kompozitlerin dış koşullardan fazlaca etkilenmesi, darbe davranışının ve hasar mekanizmalarının karmaşık olması, talaşlı imalatlarda istenilen toleransları sağlamak için ikincil işleme gereksinim duyulması gibi etkenler; kompozit malzemeler konusunda çok sayıda araştırma yapılması ihtiyacına yol açmıştır.

İnşaat yapıları, uzay teknolojileri, otomotiv, havacılık ve denizcilik gibi öncü birçok alanda kullanılan kompozit malzemelerin imalat yöntemleri de geleneksel malzemelere nazaran daha karmaşıktır. Özellikle darbe emilimi ve hafiflik gerektiren alanlarda kullanılan kompozitlerin işlenmesinde talaşlı imalat yöntemleri önem arz etmektedir.

Kompozit yapıların birleştirilmesinde pimli, perçinli ve cıvatalı bağlantılar yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu nedenle kompozitlerin işlenmesinde en çok kullanılan talaşlı imalat yöntemlerinden biri delme işlemidir. Heterojen yapıda ve anizotropik

özelliğindeki kompozit malzemelerin delinmesinde matrizen lif kopması, kesilmemiş lif ve delaminasyon gibi işleme kusurları, delik toleransları, kesici takım ömrü gibi üretim için oldukça değerli nitelikleri elde etmek için farklı kesici takım malzemeleri ve geometrileri, çeşitli kesme ve ilerleme hızları, değişken sıcaklık ve işleme şartları kullanılmıştır. Kompozit malzemenin yapısal özellikleri dikkate alınarak bu parametreler değiştirilmekte, en uygun maliyet ve kalitede ürünler ortaya çıkarılmaktadır.

Kesici takımın delme işlemi gerçekleştirilirken tabakaların birbirinden ayrılması ile kompozit malzemeye girişi ile çıkışı sırasında parçaya verdiği hasara delaminasyon denmektedir. Literatürde yapılan çalışmalarda delaminasyona etki eden faktörler incelenmiş; kesici takım malzemesi ile kaplamasının çeşidi, kesici takım geometrisi, ilerleme hızı ve kesme hızının delaminasyona en çok etki eden parametreler olduğu saptanmıştır.

Bal peteği sandviç kompozit yapılar; düşük ağırlıkları, düşük üretim maliyetleri, yüksek dayanımları ile havacılık, uzay çalışmaları, otomotiv gibi alanlarda yoğunlukla kullanılan önemli bileşenlerdir. Bal peteği şeklindeki çekirdek malzemesinin alt ve üst yüzeyleri farklı materyaller ile birleştirilerek kompozit malzemeler oluşturulur. Çekirdek malzemesi olarak hafifliği ile öne çıkan Alüminyum gibi geleneksel malzemelerin yanı sıra bir metaaramid türeviden olan Nomex gibi yenilikçi kompozit malzemeler de yaygın olarak kullanılmaktadır.

Bu çalışmada günümüzde havacılık, uzay teknolojileri, ulaşım teknolojilerinde çok yaygın olarak kullanılan Nomex balpeteği çekirdekli sandviç kompozit malzemelerin işlenebilirliği araştırılmış; kompozit malzemelerin birleştirilmesinde kullanılan vidalı ve perçinli bağlantılar için gerekli olan delme işlemi esnasındaki kesici takım, fener mili hızı, ilerleme hızı gibi faktörlerin kesme kuvvetleri ve delaminasyona etkisini incelemek amaçlanmıştır.

## 2. GENEL BİLGİLER

### 2.1. Kompozit Malzemeler

İki ya da daha fazla bileşenden mamul anlamına gelen kompozit kelimesi, mühendislikte; makro ölçüde bir araya gelmiş, kendi özelliklerini büyük ölçüde koruyan birbirinden farklı iki ya da daha fazla bileşenden meydana gelen malzemeleri tanımlamaktadır (Kaya, 2016).

Genel olarak yukarıdaki gibi tanımlanabilen kompozit malzemeler; metal alaşımları, plastik polimerler, çeşitli mineraller, ahşap bileşenlerden meydana gelebilir. Yeni oluşturulan, mikro düzeyde homojen olan malzemede bileşenlerin üstün özelliklerini taşıması beklenir. Kompozit malzemelerin nihai özellikleri bileşen malzemelerinkinden daha iyidir (Mazumdar, 2001).

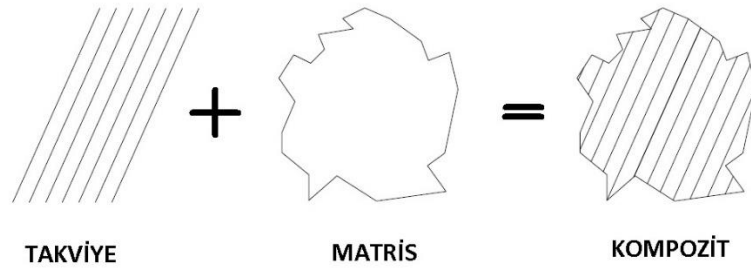
Kompozit malzemeler; iyileştirilmiş bazı özellikler elde etmek amacıyla üretilmektedirler. Kompozitlerde, bileşenlerine nazaran gelişmiş olması beklenen özelliklerden bazıları ağırlık, mukavemet, korozyon dayanımı, ısıya dayanım, iletkenlik, akustik özellik ve maliyet olarak sıralanabilir.

#### 2.1.1. Kompozit Malzemelerin Yapısı

Kompozitler matris ana fazı ve ana faz içinde dağılmış halde bulunan takviye fazından meydana gelmektedir (Tsai ve Hahn, 1980). Bu iki ana faz arasında bağlayıcılık görevi yapan; ara yüzey olarak tanımlanabilen bağlayıcı ve katkıları da kompozitlerin üçüncü ana ögesi sayılırlar.

Matris fazı; takviyeleri bir arada tutar, kompozite yapısal bütünlük kazandırır. Malzemeye uygulanan yük ve kuvvetlerin takviye fazına iletilmesini sağlar. Takviye fazını oluşturan lif ve/veya tanecikleri birbirinden ayırmakta, böylece yapıda oluşacak deformasyonları azaltmakta ya da engellemektedir. Takviye fazının hava şartlarından ya da kimyasal etkilerden korunmasını sağlamaktadır. Oluşturulan malzemenin darbe dayanımı, tokluk ya da sünekliği gibi performans özellikleri seçilen matris ile doğrudan ilgilidir. Matris fazı oluşturulan kompozitlerin yüzey özelliklerini belirlemektedir.

Takviye fazı; kompozit yapıya gelen yükleri paylaşarak taşıyan lif, parçacık ya da tabakalardan oluşur. Kompozite mukavemet, sertlik, ses ve ısı iletkenliği gibi yapısal özelliklerini kazandırmaktadır. Şekil 2.1.'de (Mazumdar, 2001) kompozit malzeme bileşenleri gösterilmiştir.



**Şekil 2.1.** Kompozit yapıdaki matris(reçine), takviye(fiber)

### 2.1.2. Kompozit Malzemelerin Matris Yapıya Göre Sınıflandırılması

Kompozit yapılarda matrisler polimer, alaşım ya da seramik malzemeden meydana gelmektedir. Matris malzemesinin seçimi; oluşturulacak olan kompozitten beklenen yapısal özelliklere göre belirlenmektedir.

#### 2.1.2.1. Metal matrisli kompozitler

Yüksek mukavemet, yüksek çalışma sıcaklığı, yüksek yorulma direnci gerektiren durumlarda tercih edilen metal matrisli kompozitlerde (MMK); Matris metal ya da metal alaşımlarından oluşur. Tek bileşenli olan alaşımlarda elde edilemeyen yapısal özellikler; metal içerikli matris içine tanecik, kısa fiber veya sürekli fiber formundaki takviyeler eklenerek elde edilir.

Metal malzemelerin avantajlarından olan süneklik, şekil değiştirme kabiliyeti, seçilen takviye elemanının üstün özellikleriyle birleşerek düşük yoğunluklu, esnekliği ve mukavemeti yüksek, tokluk ve darbe dayanımı metallere göre üstün, iletkenliği yüksek, yüzey sertliğine sahip ve sıcaklık değişikliklerine karşı hassasiyeti düşük kompozitler meydana getirmektedir (Kalemtaş, 2014).

Metal matrisli kompozitlerde en yaygın kullanılan matris malzemesi doğada bol bulunmaları, hafif olmaları ve kolay işlenebilmeleri sebebiyle Alüminyum (Al) ve Al alaşımlarıdır; bunun yanı sıra Magnezyum (Mg), Çinko (Zn), Bakır (Cu), Titanyum (Ti) ve Nikel (Ni) de yaygın metal matris olarak yaygın kullanıma sahiptir.

Metal matrisli kompozitlerde takviye elemanı olarak alüminyum oksit ( $Al_2O_3$ ), silisyum karbür (SiC), titanyum nitrür (TiN), bor karbür ( $B_4C$ ), bor (B), Wolfram (W) ve Molibden (M) yaygın olarak kullanılan malzemelerdir (Countrier vd., 1997).

### **2.1.2.2.Seramik matrisli kompozitler**

Metal ve metal olmayan elementlerden meydana gelen inorganik malzemeler olarak tanımlanan seramik malzemeler düşük yoğunluklu, aşınma direnci yüksek, yüksek sıcaklıklara dayanıklı yapıdadırlar. Ancak kırılganlıkları sebebiyle çatlaklara karşı hassas olmaları endüstrideki kullanım alanlarını sınırlandırmıştır. Gelişen teknoloji ile birlikte, kompozit yapılarda matris olarak kullanılan seramik, uygun takviye elemanları ile desteklenerek ulaşım endüstrisinde, savunma sanayi ve uzay teknolojilerinde büyük bir paya sahip olmuştur.

Seramik Matrisli kompozitlerde (SMK) sürekli ya da sürekli olmayan fiber takviye elemanlarının en mühim görevi; kırılma tokluğu düşük olan seramik malzemelere gelen ani yükleri absorbe edebilmektir (Kalemtaş, 2014).

Seramik Matrisli kompozitler yüksek çalışma sıcaklığı (2.000°C'ye kadar) gerektiren alanlarda ve düşük elektriksel iletkenlik gerektiren yerlerde kullanımı yaygın olan kompozitlerdir. Seramik Matrisli kompozitlerin en büyük handikabı ise üretim maliyetlerinin çok yüksek olmasıdır.

### **2.1.2.3. Polimer matrisli kompozitler**

En yaygın ve çeşitli kullanım alanına sahip olan kompozit matrisi polimerlerdir. Polimerler; doğal ve sentetik olarak karbon (C), hidrojen (H) ve metalik olmayan çeşitli elementlerden meydana gelen tekrarlı ve uzun zincirli yapılardır. Üretim kolaylığı ve düşük maliyet, polimerlerin en büyük avantajı olsa da polimerlerin yüksek sıcaklıklara dayanıksızlığı ve düşük mukavemet özellikleri, kullanımları için takviye elemanları ile güçlendirilmelerini gerektirmektedir (Chawla, 2012).

Polimer matrisler; cam, karbon, bor elyafları ve diğer organik elyaflar ile takviye edilerek, düşük yoğunluklu, yorulma direnci, sertliği ve mukavemeti yüksek kompozitler oluştururlar; bu da endüstride kullanım oranlarını en yüksek kompozit sınıfı olmalarını sağlamaktadır (Vasiliev ve Morozov, 2001).

Polimer matrisli kompozitler (PMK) iki ana başlık altında sınıflandırılırlar. Bunlar Termoset polimerli kompozitler ve termoplastik polimerli kompozitlerdir.

Termoset polimerli matrislerde polimer molekülleri birbirlerine kovalent bağ ile çaprazlanırlar ve bu nedenle moleküller arasındaki bağ kuvvetlidir. Dolayısıyla plastik deformasyona dayanıklıdırlar (Chawla, 2012).

Düşük viskoziteli sıvı halde ya da düşük erime noktasına sahip katı halde bulunan termoset polimerler, bir katalizör ve/veya ısının etkisi ile katılaştırıldığından imalatı



kolaydır. Bu sebeple en çok tercih edilen kompozit matris malzemesi termosetlerdir. En yaygın termoset matris malzemeleri: epoksiler, polyester, vinylester reçine ve fenolik reçinedir (Yıldızhan, 2008).

Epoksi reçineler; yüksek korozyon dayanımına, yüksek elektriksel yalıtkanlığa ve yüksek mekanik özelliklere sahiptir. Epoksilerin yapıştırıcı özellikleri güçlüdür. Bu yönleriyle balpeteği yapıların ve katmanlı kompozitlerin oluşturulmasında sıklıkla tercih edilmektedir.

Fenolik reçineler, düşük yoğunluğa sahip matris malzemeleridir. Yüksek tutuşma dayanımı en belirgin özelliğidir. Bunların yanı sıra elektriksel yalıtkanlıkları da yüksektir. Elektronik ve balistik alanlarında sıklıkla kullanılmaktadırlar (Alçı, 2016).

Termoplastik polimerli matrislerde termoplastik polimer molekülleri birbirlerine zayıf Van-der Waals ya da hidrojen bağları ile bağlı olmalarından ötürü sıcaklıkla birbirleri üzerinde kayabildiklerinden, binlerce kez özelliklerini yitirmeden şekillendirilmeleri mümkündür. Ancak şekillendirilmeleri için yüksek basınç ve yüksek sıcaklık gerektirdiğinden üretimleri donanım gerektirmekte ve maliyetli olmaktadır. Kimyasal dirençleri, termosetlere nazaran yüksektir. Yüksek tokluğa ve yüksek darbe direncine sahip olduklarından daha çok bu amaçla kullanılmaktadırlar.

Termoset polimerler sıcaklığa, termoplastiklere nazaran daha dayanıklıdır. Buna rağmen ısıtıldıklarında ayrışır, bu nedenle ısı ile bir defa şekillendirilirler daha sonra tekrar tekrar şekillendirilmeleri mümkün değildir. Bu da geri dönüşüm ihtimalini zayıflatmaktadır. Mukavemet ve yüksek sıcaklığa dayanımları termoplastik matrisli yapılara göre daha yüksektir, ancak daha kırılğan olduklarından darbe emilimi potansiyeli termoplastiklerden daha düşüktür.

### **2.1.3. Kompozit Malzemelerin Takviye Elemanına Göre Sınıflandırılması**

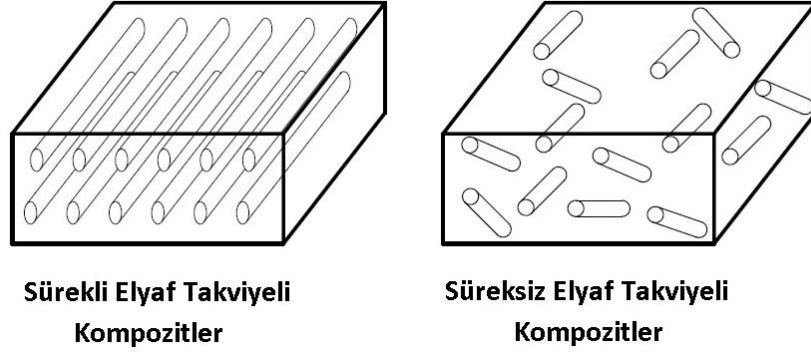
Elyaf takviyeli olarak da tanımlanabilen lif takviyeli kompozitlerde, lifler uzun, kısa, sürekli ya da dokunmuş halde bulunmaktadır.

#### **2.1.3.1. Elyaf takviyeli kompozitler**

Elyaf takviyeli olarak da tanımlanabilen lif takviyeli kompozitlerde, lifler uzun, kısa, sürekli ya da dokunmuş halde bulunurlar. Daha çok polimer matrislerle kullanılan lif takviyeli kompozitler günümüzde en yaygın kullanılan kompozit malzeme sınıfını oluşturmaktadırlar. Oluşturulan kompozitin özellikleri; kullanılan lif takviyesinin

sürekliliğine, boyutuna ve malzeme içinde uzanımına bağımlı olarak değişmektedir (Kaya, 2016).

Sürekli ve süreksiz elyaf takviyeli kompozitlerin yapısı Şekil 2.2.'de (Sahu, 2014) verilmiştir.



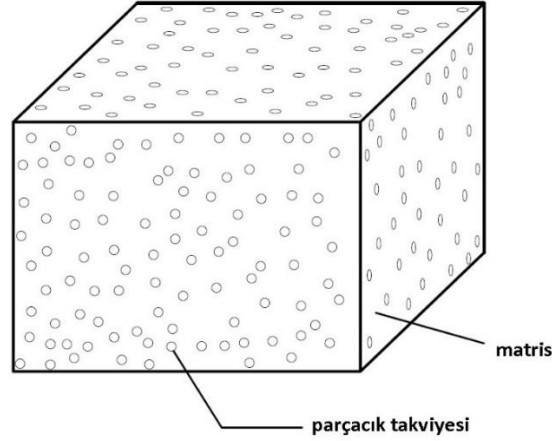
Şekil 2.2. Elyaf takviyeli kompozitler

### 2.1.3.2.Parçacık takviyeli kompozitler

Parçacık takviyeli kompozitlerde amaçlanan daha çok malzemeye sertlik ya da sıra dışı diğer özellikleri kazandırmaktır. Parçacık şeklindeki takviyeler mukavemet özelliklerine etki etseler de bu etki fiber takviyelerinki kadar büyük değildir.

Çimentonun matris olduğu, çakıl ve kumun ise takviye elemanı olduğu beton yapılar günlük hayatta kullandığımız makro yapıdaki bir parçacık takviyeli kompozit örneğidir.

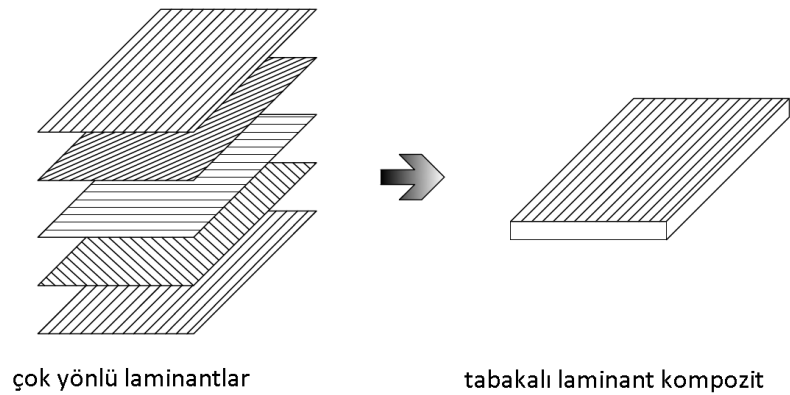
Parçacık takviyeli kompozitlerin özellikleri, matris için bulunan takviye parçacıklarının malzeme özellikleri, boyutları ve dağılımlarına bağlı olarak değişir. Parçacık takviyeli kompozitte bulunan matris fazı ve parçacık takviyeleri Şekil 2.3.'te (Sahu, 2014) verilmiştir.



**Şekil 2.3.** Parçacık takviyeli kompozitler

### 2.1.3.3. Tabakalı kompozitler

Yaygın bir kullanım alanına sahip bulunan tabakalı kompozitler, farklı uzanımlarda bulunan lifli yapıların tabakalar halinde birleştirilmesi ile oluşmaktadır. Yüksek mukavemet özelliklerine sahip olmalarının yanı sıra muadil malzemelere göre hafif olmaları uzay yapılarında, havacılıkta, ulaşım teknolojileri ve diğer birçok alanda tercih edilmelerine neden olmuştur (Solmaz ve Gür, 2007). Tabakalı kompozit malzemelerin en büyük handikabı ise hasar mekanizmalarının karmaşık olmasıdır. Bu çeşit kompozitlerde meydana gelen hasarlar fiberlerin kırılması, matris malzemenin kırılması/kopması, delinme ve delaminasyon olarak karşımıza çıkmaktadır (Turan, 2007). Farklı yönlendirilmiş laminantlardan meydana gelen bir tabakalı kompozitin görüntüsü Şekil 2.4.'te (Alçı, 2016) görülmektedir.



**Şekil 2.4.** Tabakalı kompozitler

Tabakalı kompozitlerin özel bir yapısı olarak sandviç kompozitler ele alınabilir. Hafiflik ile birlikte yüksek mukavemet ve yüksek eğilme direnci gerektiren otomotiv, havacılık ve uzay teknolojilerinde sandviç kompozitler sıklıkla kullanılmaktadır.

Sandviç kompozitler; alt ve üst yüzeylerde bulunan ince ve dayanıklı levha şeklinde iki katmanın arasında kalan, hafif ve kalın çekirdek (core) yapısından oluşur. Çekirdek bölümü kompozit malzemenin yoğunluğunu, dolayısı ile ağırlığını düşürmektedir. Alt ve üst yüzeyde bulunan sert tabakalar ise malzemenin mukavemetini arttırmaktadır. Şekil 2.5.'te (Potoğlu, 2012) sandviç kompozit malzemelerin yapısı gösterilmektedir.



**Şekil 2.5.** Sandviç kompozit malzemeler

Çekirdek malzemesi olarak yoğunluğu düşük malzemeler kullanılabileceği gibi, hücre formunda ya da oluklu formda şekillendirilmiş yoğunluğu yüksek malzemelerde kullanılabilir. Hücre formunda en yaygın kullanılan yapılar, balpeteği olarak adlandırılan gözenekli malzemelerdir.

Çekirdek ile yüzey arasındaki bağın özellikleri kompozitin özelliklerini doğrudan etkilemektedir. Yüzey ve çekirdeği metalik malzemelerde lehim ya da kaynakla bu bağ sağlanırken, yüzeyi çekirdeğe yapıştırmak da bir diğer yöntemdir. Bu yöntemde yapıştırıcı maddenin seçimi çok önemlidir. Zira yapıştırıcı maddenin hem yüzey ile hem de çekirdek ile uyumlu olması, ihtiyaç duyulan mukavemeti sağlaması gerekir.

Sandviç kompozitlerin yoğunluğu düşüktür, eğilme dayanımı ve rijitliği yüksektir. Yüksek hasar toleransına sahiptir. Boşluklu yapılar olarak tasarlanan sandviç kompozitlerde titreşim sönümlenme özelliği dikkat çekmektedir. Sandviç kompozitlerin ihtiyaç duyulan özelliklere göre tasarlanması; çekirdek ve yüzey malzemesinin çeşitlendirilmesi sayesinde mümkün olmaktadır. Bu avantajlarının yanında üretim

maliyetlerinin yüksekliği, işlenmesinin karmaşıklığı ve tamiratlarının güçlüğü sandviç kompozitlerin dezavantaja sahip olduğu konulardır (Potoğlu, 2012).

#### **2.1.3.4.Karma kompozitler**

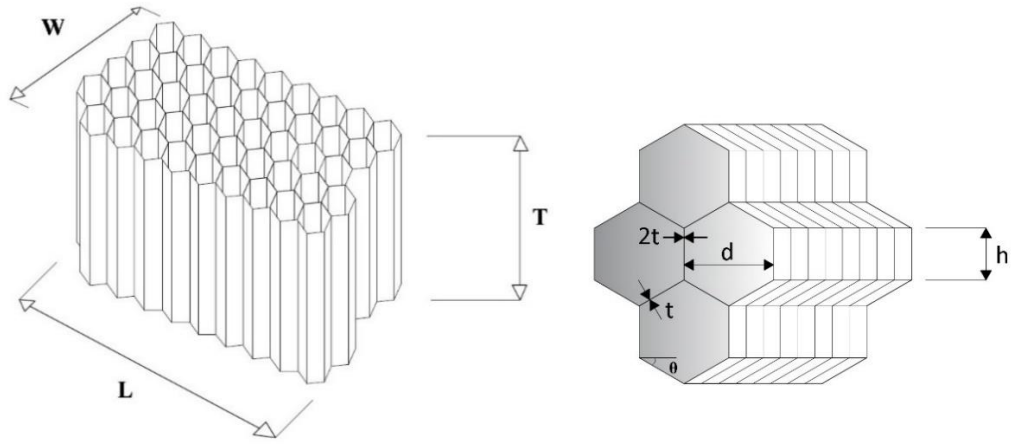
Bir kompozitte, iki veya ikiden fazla çeşit takviye elemanı bulunuyorsa bu tip malzemelere karma kompozitler adı verilir. Hibrit kompozit de denilen bu malzemelerde istenen yapısal özellikler, farklı çeşit lif ya da tabakalar kullanılarak optimize edilir. Hem mukavemet, hafiflik, darbe dayanımı ve yalıtkanlık (ısı, ses, elektrik) gibi yapısal özellikler hem de maliyetin kontrolü sağlanır. Yenilikçi ve sınırsız kullanım potansiyeli olan kompozit çeşididir.

#### **2.2. Balpeteği (Honeycomb) Yapılar**

Kompozit malzemelerin endüstride tercih edilmesinde en büyük etkenlerden biri de hafifliktir. Hafif ama dayanımı yüksek kompozitler elde etmek için hücreli boşluklu tasarımlar kullanılmaktadır. Çok ince tabakaların hücre formunda şekillendirilerek bir araya getirilmesi ile dayanımı yüksek ve hafif yapılar oluşturulmaktadır. Bu tür yapılar bal arılarının doğal olarak yaptıkları bal petekleri ile benzerlik gösterdiği için Balpeteği yapı ismini almıştır. Petekli yapılar genelde sandviç yapılarda dolgu elemanı olarak kullanılır. Bal peteği sandviçler alt ve üst yüzeyde ince ve mukavemeti yüksek faceshit denilen malzeme arasına çekirdek yapının bir yapıştırıcı yardımı ile birleştirilmesi ile oluşturulmaktadır. Petekli kompozit yapıların yaygın kullanımı 1940'lı yıllardan sonra olmuş; havacılık sektörü en yaygın kullanıldığı alan olmuştur.

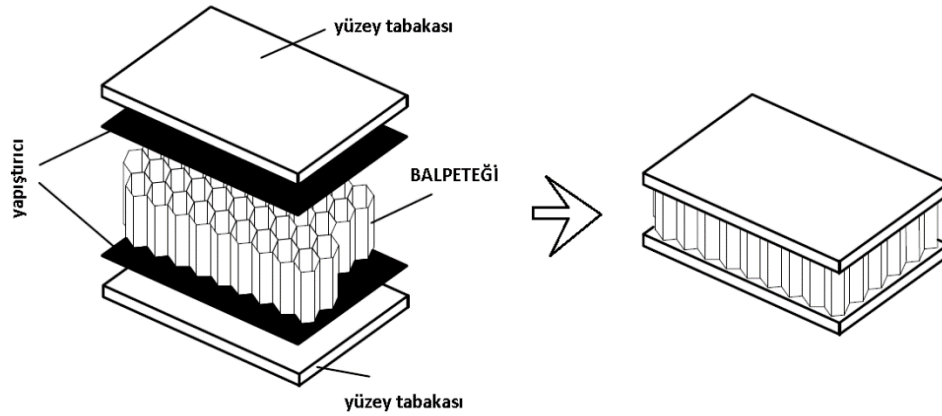
Bal peteği yapılar hafifliğin ve yüksek dayanımın önemli olduğu yerlerde (otomotiv, demiryolu, hava araçları gibi) kullanılmaktadır. Aynı zamanda çarpışmalarda enerji sönmemesi gereken yerlerde kullanılmaktadırlar. Bu amaçla kullanımına otomotiv ve raylı sistemler sektörleri örnek verilebilir.

Balpeteği yapılardaki yapısal parametreler: Genişlik(W), uzunluk(L), yükseklik (T), hücre duvarı kalınlığı(t), hücre aralığı/çapı(d), hücre yüksekliği(h) ve hücre duvarı açısı( $\theta$ ) olarak sıralanabilir. Şekil 2.6'da (Foo vd., 2007) yapısal parametreler gösterilmektedir.



**Şekil 2.6.** Petekli yapılarda geometrik parametreler

Çekirdeğin altıgen yapı şeklinde olması, en küçük yüzey alanında en geniş kaplamayı elde etmemizi sağlamaktadır. Yani yüzey malzemelerle birleştiği noktada plakalara temas yüzeyleri az olmasına karşın kapladığı alan geniştir. Bu sayede altıgen yapı ile az malzeme kullanımı ile istenen kafes yapı elde edilmektedir. Balpeteği kompozit sandviç yapıların bileşenleri Şekil 2.7.'de (Xie vd., 2020) gösterilmektedir.



**Şekil 2.7.** Balpeteği kompozit yapılar

Çekirdek; bal peteği yapılarda esas mekanik davranışı karşılayan kısımdır. Bal peteği yapılardaki çekirdekler farklı yapılarda (altıgen, kare, dikdörtgen, zigzag, elipsoit, yumurta kolisi vb.), içi boşluklu, içi dolu, farklı malzemelerden (alüminyum, Nomex, köpük, balsa ağacı, bakır, kâğıt, epoksi vb.), farklı birleştirme yöntemleriyle (yapıştırma, kalıplama vb.) oluşturulmaktadır.

Alt ve üst katmanın esas görevi eğme ve kayma direnci sağlamaktır. Alt üst katman alüminyum çelik, paslanmaz çelik, karbon/epoksi, cam elyaf/epoksi, aramid/epoksi, kontrplak, kâğıt gibi yapılardan oluşmaktadır. Genelde çalışmalarda alt üst tabaka aynı kullanılmaktadır. Farklı yüzeyler farklı genleşme katsayılarına sahip olacaklarından yapıda yüzey bozulmasına sebep olmaktadır.

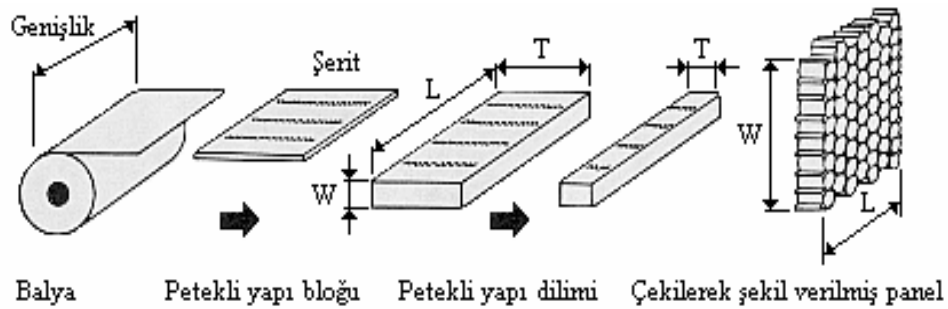
### 2.2.1. Balpeteği Yapıların Şekillendirilmesi

Petekli yapıların üretiminde en yaygın olarak kullanılan iki yöntem uzatma ve kıvrılarak şekil vermedir (Arslan ve Kaman, 2002).

#### 2.2.1.1. Uzatarak şekil verme

Metal ve Metalik olmayan malzemelere bal peteği şekli verilmesinde çoğunlukla kullanılan yöntemdir. Bu yöntemde levhalar şeritler halinde kesilir. Ardından yapıştırıcı uygulaması yapılır ve levhalar üst üste dizilir. Petekli yapı pres içinde çeşitli sıcaklıklarda işlenir. Oluşan bloklar çekme işleminden önce istenilen kalınlıkta dilimlere ayrılır. Dilimler kalıpta çekilirken, komşu hücrelerle birleşmenin olmadığı noktalarda akma görülür; böylece levhalara bal peteği şekli verilmiş olur.

Metalik olmayan malzemeler kalıp içerisinde çekme işlemi sırasında kendi şekillerini koruyamayacaklarından, bu malzemeler öncesinde reçineye batırılarak reçineye doyurulur ve kalıpta daha uzun süre bekletilir. Şekil 2.8.'de (Arslan ve Kaman, 2002) uzatarak şekil verme yöntemi gösterilmektedir.

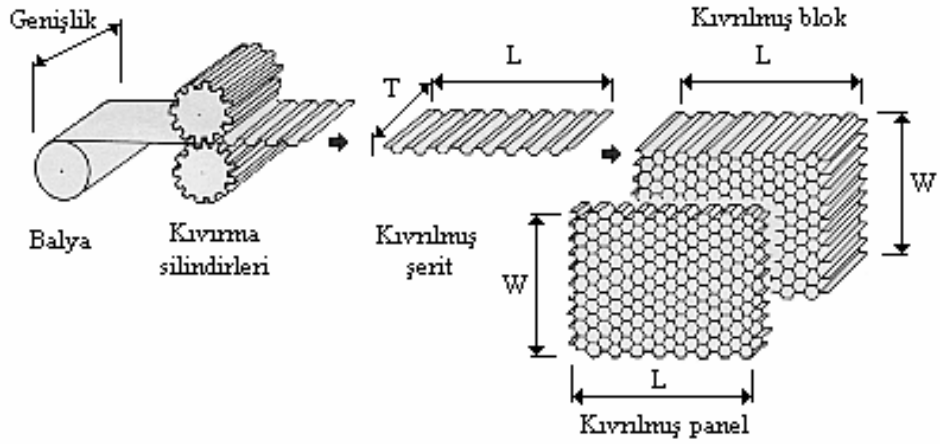


Şekil 2.8. Uzatarak şekil verme yöntemiyle balpeteği üretimi

#### 2.2.1.2. Kıvrılarak şekil verme

Yüksek sıcaklık altında çalışan, et kalınlığı ve yoğunluğu yüksek malzemelerin bal peteği haline getirilmesinde kullanılan yöntemdir. Bu yöntemde şerit levhalar istenilen biçimde kıvrılarak düğüm noktalarına yapıştırıcı tatbik edilir. Ardından şekil

verilen levhalar üst üste konarak; kıvrılmış blok seçilen sıcaklıkta bekletilir. Şekil 2.9.'da (Arslan ve Kaman, 2002) kıvrarak şekil verme yöntemi gösterilmektedir.



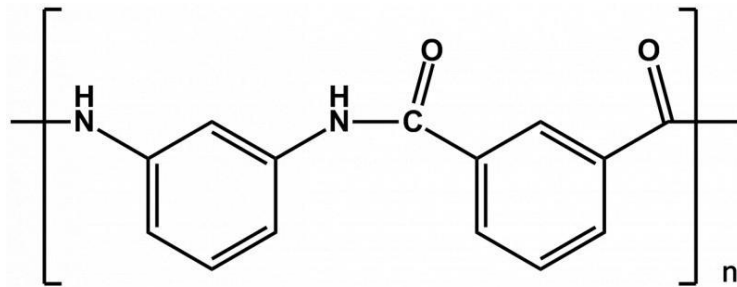
Şekil 2.9. Kıvrarak şekil verme yöntemiyle balpeteği üretimi

### 2.3. Nomex

Naylon adı da verilen Aromatik poliamidler, Amerika Federal Ticaret Komisyonu'nun (USTC) 1974'te verdiği ismiyle aramidler; yüksek mukavemet özelliklerine sahip ileri kompozitlerin oluşturulmasında kullanılan ilk takviye malzemesidir (Çelikkanat, 2002).

İlk ticari aramid lifi, Amerika Birleşik Devletlerindeki DuPont firması tarafından 1960'lı yılların ilk yarısında üretilerek piyasaya sürülmüştür. Bu meta-aramidin adı Nomex'tir. DuPont firması uzun yıllar ticari piyasadaki tek aramid üreticisi olarak kalmıştır. Günümüzde hala dünyaya aramid tedariği yapan çok az sayıda firma bulunmaktadır (DuPont, Teijin, Kolon).

Nomex aramid elyaflar; hafiflik, yüksek çekme mukavemeti, yüksek darbe direnci gibi özelliklere sahip, anizotropik özellik gösteren malzemelerdir (Foo vd., 2007). Şekil 2.10.'da Nomex'in moleküler yapısı verilmektedir.



Şekil 2.10. Nomex elyaflarının moleküler yapısı



Nomex lifleri yüksek ısı dayanımı, tutuşma direnci, erimemesi gibi özelliklerle kişisel koruma alanlarında tekstil malzemesi olarak; darbe direnci, yüksek mukavemeti ve hafifliği ile havacılık, denizcilik ve otomotiv alanlarında sandviç yapılarda fenolik reçineli kâğıt bal peteği yapısında çekirdek malzemesi olarak kullanılmaktadırlar.

#### 2.4. Nomex Balpeteği Yapılar

Nomex balpeteği yapılar; bir meta-aramid olan Nomex liflerinden oluşan Nomex kağıdının fenolik reçineye batırılmış şeritlerinin birleştirilmesiyle üretilmektedirler. Özellikle havacılık alanında; çok iyi olan mukavemet/ağırlık oranı, geç tutuşma özellikleri ve dielektrik özellikleri nedeniyle sıklıkla kullanılmaktadırlar.

Nomex balpeteği yapılar, uzatarak şekil verme yöntemiyle üretilmektedir. Fenolik reçineye daldırılır ve kürlenmesi beklenir. Nomex çekirdekler 1,6 mm'den 19 mm'ye kadar değişen hücre boyutlarında; 29 kg/m<sup>3</sup>'den 144 kg/m<sup>3</sup>'e değişen yoğunlukta ve çeşitli hücre yüksekliğine sahip olarak temin edilebilmektedirler. Hücre duvarı kalınlıkları 0,05 mm'den başlayarak, 0,13 mm'ye kadar değişmektedir.

Nomex balpeteği yapılar;

- Yüksek mukavemet
- Düşük bağıl yoğunluk
- Yüksek yorulma direnci
- Korozyona dayanım
- Hafiflik
- Tutuşma direnci

gibi özellikleri nedeniyle uzay, havacılık, denizcilik ve motorsporları gibi sektörlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Havacılık sektöründe; zemin, kapılar, yan duvarlar, kuyruk, kanat gövdesi kaportaları, uçak dümeni, motor bölümünde; denizcilik sektöründe dış gövde, asma tavan, kamara bölümünde; uydu teknolojilerinde gövde malzemesi olarak Nomex balpeteği sandviç yapılar kullanılmaktadır. Günümüz üretim teknolojisi şartlarında tasarımlar, tekdüze kalınlığa sahip parçalarla sınırlıdır. Çünkü yontulmuş yüzeylerin kullanımı Nomex malzemelerde üretim maliyetlerini önemli ölçüde arttırmaktadır.

Sandviç yapılarda çekirdek malzemesi olarak kullanılan Nomex yapı yatay ekseninde kendisine yapıştırılan levha halindeki alt ve üst tabakalarla kullanılmaktadır. İhtiyaç durumuna göre ve tabakalar: alüminyum, çelik alaşımları, karbon fiber ya da cam elyaf takviyeli kompozit malzemeden imal edilmiş olabilir. Çekirdek yapı ile

yüzeyler arasında yapıştırma yoluyla bağlantı sağlanır. Bu bağlantının karşılaşılan kesme kuvvetlerine dayanıklılığı son derece önemlidir. Fenolik reçine ile kürlenmiş nomex kağıdından balpetekleri, yine fenolik reçineli kompozit yüzeylerle birleştirilirse oldukça yüksek dayanıma sahip sandviç yapılar elde edilmektedir.

## **2.5. Nomex Balpeteği Yapıların İşlenebilirliği**

Havacılık gibi dayanımın yanında hafifliğin gerekli olduğu alanlarda üstün özellikleriyle yaygın olarak tercih edilen Nomex balpeteği malzemenin işlenebilirliği hem endüstrinin hem de akademinin bu konu üzerinde araştırmalar yapmasına neden olmuştur.

Hacminin %90'ı boşluktan oluşmasına rağmen, Nomex balpeteğinin işlenmesinde, takım aşınmaları, yüzey kusurlarının yüksekliği, işlemede istenilen hassasiyetin sağlanamaması gibi sorunlarla karşılaşmaktadır (Gill vd., 2017).

Nomex balpeteği sandviç kompozitlerin işlenmesinde en yaygın yöntem halen geleneksel talaş kaldırma yöntemidir. Hızlı ve ekonomik olması geleneksel yöntemlerin avantajı olarak görülse de takım aşınmasının yüksekliği, yüksek kesme kuvveti sebebi ile oluşan yüzey kusurları, ortaya çıkan talaş ve tozların çevreye ve sağlığa zararlı etkileri geleneksel yöntemin dezavantajlarıdır.

Geleneksel olmayan ve işlenmesinde kullanılan diğer yöntem ise; Ultrasonik titreşim destekli (Ultrasonic Vibration Assisted–UVA) yöntemidir. Daha düşük kesme kuvvetleri, daha iyi yüzey kalitesi, daha az takım aşınması imkânı sunan UVA daha maliyetli ve daha çok zaman alan bir işleme yöntemidir.

### **2.5.1. Nomex Balpeteği Yapıların Geleneksel Yöntemlerle İşlenmesi**

#### **2.5.1.1. Nomex balpeteği yapıların kesici takımlarla işlenmesi**

Nomex balpeteğinin nüve olarak kullanıldığı sandviç kompozitlere istenilen şeklin verilmesinde geleneksel yöntemler hala en büyük paya sahiptir. Bilgisayar destekli Nümerik Kontrollü (CNC-Computer Numerical Control) tezgâhlarda kompozit malzemelerinin işlenmesi ve delinmesi gibi işlerde kesme kuvvetlerinin azaltılması, çapak oluşumlarının önüne geçilmesi, takım aşınmasının engellenmesi için özel tipte freze çakıları ve matkap uçları kullanılmaktadır. Kesme hızı ve ilerleme miktarı optimize edilmektedir. Takım aşınmasının yüksek olduğu kesici takımlarla yapılan işlemlerde; çıkan talaş miktarının fazla olması, istenilen hassasiyetin sağlanamaması durumunu ortaya çıkarmaktadır.

Nomex balpeteğinin işlenmesindeki en yaygın geleneksel yöntem matkap ile delme işlemidir. Nomex balpeteğinden mamul parçaların bir başka malzemeye ya da birbirleriyle birleştirilmesi için çeşitli bağlantı elemanları kullanıldığından delme işlemi büyük bir öneme sahiptir (Ghabezi vd., 2020).

#### **2.5.1.2. Nomex balpeteği yapıların aşındırıcı su jeti ile işlenmesi**

Diğer bir geleneksel yöntem ise Aşındırıcı Su Jeti ile işlemdir. (AWJ-Abrasive Water-Jet Machining). Bu yöntemle kesmenin yanı sıra delme işlemi de yapılmaktadır. Bu yöntemde paslanmaz çelik, yakut yada safirden yapılmış nozullardan çıkan çok yüksek hızdaki (900 m/s) su jeti içine 60, 80, 100, 120 mikrometre( $\mu\text{m}$ ) çapındaki aşındırıcı tanecekler (garnet, alüminyum oksit, silika, vs.) eklenir; malzemeye uygun bir açıyla, yüksek basınçla püskürtülür. Kesici takım ile yapılan işlemlerin meydana getirdiği yüzey ve kesme kusurları su jeti ile minimize edilebilir. Takım aşınması riski de ortadan kalkmaktadır (Akkurt, 2006).

#### **2.5.2. Nomex Balpeteği Yapıların Geleneksel Olmayan Yöntemlerle İşlenmesi (Ultrasonik Titreşim Destekli Kesme Teknolojisi ile İşleme)**

Nomex balpeteği yapıların işlenmesi esnasında meydana gelen parçalanma, ezilme, saçaklanma, ayrılmamış lifler gibi sorunları ortadan kaldırmak için yollar arayan bilim adamları, Ultrasonik Titreşim Destekli (UVA) işleme yöntemini ortaya koymuşlardır.

Ultrasonik terimi, frekansı insan kulağının üst frekans limiti olan 20kHz'den yüksek olan bir titreşim dalgasını tanımlar. Bu işleme yönteminde; ultrasonik olarak oluşturulan titreşimlerin, özel olarak tasarlanmış olan takıma gönderilmesi ve aşındırıcı sıvı-tane karışımı ile, gevrek ve sert malzemelerde düzenli delikler ve sıra dışı şekiller oluşturulabilmektedir. Geleneksel işleme yöntemlerinden farklı olarak, Ultrasonik Titreşim Destekli işleme, daha düşük kesme kuvveti ve daha yüksek yüzey kalitesi, daha düşük kesme sıcaklığı, daha az takım aşınması, daha düşük plastik deformasyon gibi avantajlara sahiptir. Ancak düşük malzeme kaldırma oranı ile üründe oluşabilen geometrik tutarsızlıklar ultrasonik titreşim destekli işlemin dezavantajlarıdır. Ultrasonik işlemede yüksek frekanslı elektrik sinyali, akustik olarak iletilen mekanik harekete çevrilmektedir (Ahmad vd., 2020).

Bu yöntemde yüksek frekanslı bir güç, dönüştürücü vasıtası ile takımın bağlandığı başlığa aktarılır. Güç dönüştürücü elektriksel sinyalleri dikey titreşim hareketine çevirir.

Titreşimin kurs boyu aşındırıcı tanelerin çapına eşittir ve 50µm civarındadır. Bu titreşimle aşındırıcı sıvı içindeki aşındırıcı tanecikler yüksek hızlara ulaşarak, kendi ağırlığından çok daha büyük bir yük ile iş parçasına çarparak bir nevi dönme suretiyle talaş kaldırmayı sağlar. İş parçasının şekli takım şeklinin negatiftir.

## 2.6. Delaminasyon

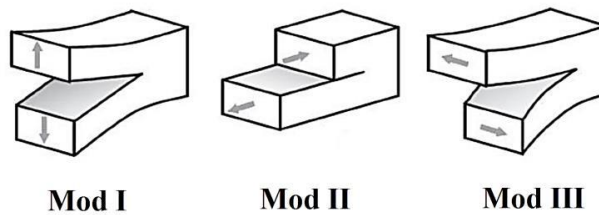
Kompozit malzemeleri oluşturan tabakaların birbirlerinden ayrılmasına delaminasyon adı verilir. Özellikle tabakalı yapıda bulunan kompozitlerde en çok meydana gelen hasarlardır. Tabakalı kompozitlerde tabakalar arası mukavemetlerin düşük olması delaminasyonun temel sebebidir.

Delaminasyon sonucunda oluşabilecek bazı sakıncalar malzeme kenarlarında ve süreksizlik bölgelerinde gerilme yığılması, parçaya etki eden basma yüklerinin oluşturabileceği burulma etkisi, malzemenin yapısal bütünlüğüne zarar veren ayrılma ve kopmalar ile malzemenin servis ömrünün kısılması, nem ve havanın oluşan boşluklardan sızarak diğer hasarları tetiklemesi şeklinde sıralanabilir (Korkut, 2017).

### 2.6.1. Delaminasyon Modları

Kompozit malzemelerde kırılma, metalik malzemelere göre karmaşıktır. Bunun sebebi metalik malzemeler izotropik iken, kompozitlerin çoğunlukla anizotropik olmasıdır. Kompozitlerde kırılma; tabakaların içinde, tabakalar arası ve tabakaları kesen şekilde gerçekleşmektedir. Tabakalar arası kırılma direnci, tabakaları kesen kırılma direncine göre oldukça düşük olduğundan daha çok bu şekilde hasarlara rastlanmaktadır.

Delaminasyonu oluşturan yükler kompozite, normal ve kayma doğrultularında etki eder. Mod I çekme gerilmesi ile, Mod II ve Mod III kayma gerilmesi ile gerçekleşen delaminasyonlardır. Şekil 2.11.'de (Korkut, 2017) delaminasyon modları görülmektedir.



Şekil 2.11. Kompozitlerde delaminasyon modları

Mod I'de çatlak yüzeylerinin yer değiştirmesi çatlak yüzeyine dik olarak gerçekleşir ve çekme ya da açılma olarak isimlendirilir. Mod II'de yüzeylere paralel bir yer değiştirme gerçekleşir ve kesme yüklemesi adını alır. Mod III'de de yine yüzeyler çatlak yüzeyine paralel şekilde yer değiştirirler buna da yırtılma yüklemesi adı verilir (Korkut, 2017).

### **2.6.2. Kompozitlerin Delinmesinde Delaminasyon**

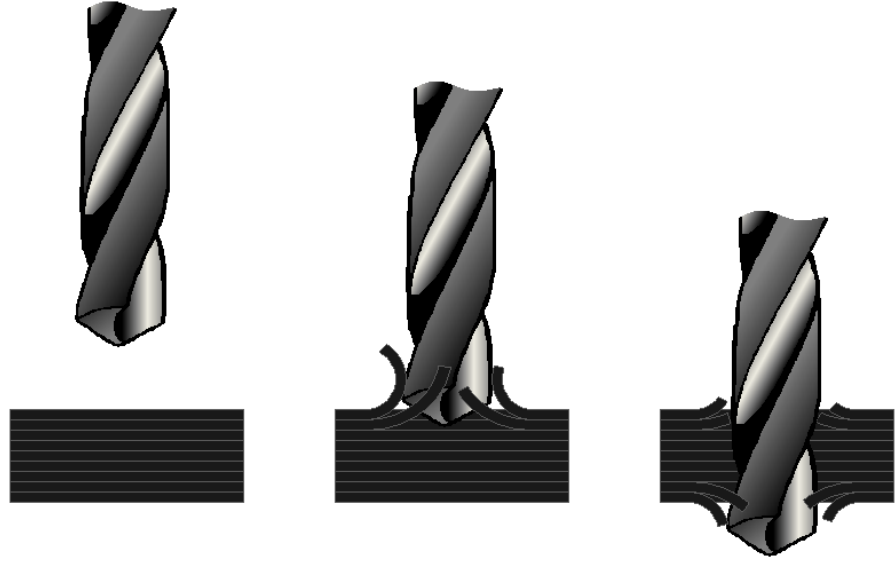
Havacılık ve uzay teknolojinde yaygın olarak kullanılan kompozitlerin birbiriyle birleştirilmesinde pimli bağlantıların kullanılması, delme işlemini kaçınılmaz kılmaktadır. Bu yüzden delme işlemi sırası ve sonrasında kompozitte meydana gelen deformasyonların incelenmesi büyük önem arz eder. Kompozitlerin delinmesinde görülen en yaygın deformasyon ile delaminasyondur.

Delme işlemi, kesici takımın, iş parçasına göre bağıl hareketiyle talaş kaldırması ile yapılır. Delme işlemi için kesici takım, iş parçası yahut her ikisi birden döndürülür. Seri ve ekonomik bir talaşlı imalat yöntemi olsa da meydana gelen talaşın ve kesme sıvısının tahliyesi delme işlemini zorlaştırmaktadır.

Kompozitlerin delinmesinde genelde en çok helisel matkaplar kullanılır. Kesici takım olarak ise en yaygın olanlar Yüksek Hız Çeliği (HSS) takımlar ve sinterlenmiş karbürlerdir (WC). Yüksek Hız Çeliği (HSS) takımların ömrü ve kesme hızı karbür matkaplara göre daha azdır ama ekonomik olmaları nedeniyle yaygın bir şekilde kullanılırlar. İşlenecek malzeme özelliklerine göre (malzemenin sertliği, delik çapı ve derinliği, istenen yüzey durumu ve delik yüzey kalitesi vb.) matkap malzemesi ve kullanılacak tezgâh saptanır.

Delme işleminden elde edilen verim çeşitli parametrelere bağlıdır. Gereken güç, dönme hızı, ilerleme hızı ve şayet kullanılacaksa kesme sıvısı özellikleri; işlenecek malzeme, kullanılacak takım ve tezgâha göre optimize edilmelidir (Canpolat, 2007).

Kompozitlerin delinmesi sırasında delaminasyon, matkabın malzemeye nüfuz ettiği noktada tabaka ayrılması şeklinde ve kompozitten çıkışı noktasında saçaklanma şeklinde görülür. Şekil 2.12.'de (Sezer, 2011) laminant kompozit malzemenin giriş ve çıkış anında oluşan delaminasyonlar görülmektedir.



**Şekil 2.12.** Delme işlemi sırasında meydana gelen delaminasyonlar

Delaminasyon kompozite girişte (peel-up delamination), ve malzemedan çıkarken (push-down delamination) şekildeki gibi gerçekleşmektedir. Çıkıştaki delaminasyon faktörünün girişte gerçekleşene oranla daha büyük olduğu gözlemlenir.

Delaminasyon faktörü, delme bölgesindeki hasar çapının, matkap çapına oranı ile saptanan, kompozitlerin yüzey hasarı için önemli bir etkidir. Delaminasyon faktörüne, kompozitteki takviye ve matris yapısının, delme parametrelerinin (kesme hızı, ilerleme oranı), matkap ucu geometrilerinin etki ettiği görülmüştür (Bayraktar ve Turgut, 2012).

### 2.6.3. Delme İşleminde Delaminasyon Faktörü

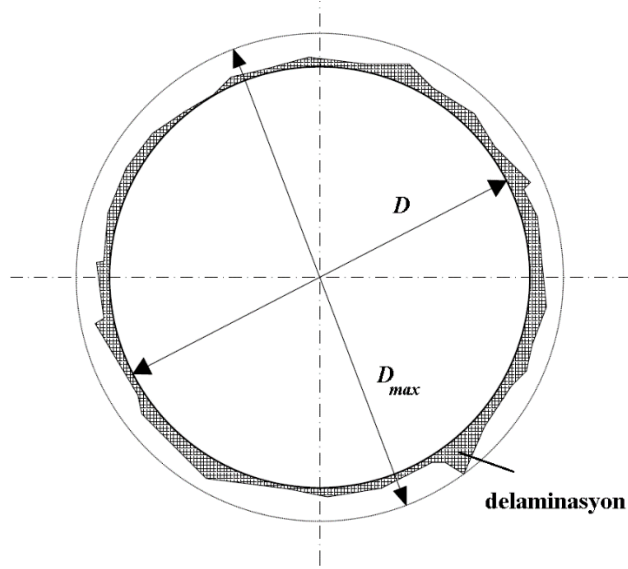
Delme işlemindeki deformasyonun niteliğinin saptanmasında delaminasyon faktörü kullanılmaktadır. Delik etrafındaki delaminasyon faktörünün ( $F_d$ ) hesaplanabilmesi için deformasyon çapı, delik çapına oranlanır. Şekil 2.13.'te (Kuş ve Ekici, 2017) delme işleminde delaminasyon bölgesi ve maksimum hasar çapı gösterilmiştir.

$F_d$  : Delaminasyon Faktörü

$D_{max}$ : Maksimum Hasar Çapı

$D$  : Kesici Takım Çapı

$$F_d = \frac{D_{max}}{D} \quad (2.1)$$



**Şekil 2.13.** Delme işleminde delaminasyon bölgesi ve maksimum hasar çapı

Kompozitlerin delinmesinde en sık rastlanılan kusur olan delaminasyon hasarı, delaminasyon faktörü ile tanımlanarak; kullanılan kompozitin yapısı, takımın malzemesi ve şekli, delme parametrelerinin delme işlemine etkisinin saptanmasında etkili olmuştur.

## 2.7. Kaynak Özetleri

Khoran vd., (2015) sandviç kompozitler üzerine yaptıkları çalışmada farklı çekirdek yapısına sahip sandviç kompozitlerde dijital fotoğraflama tekniğini kullanarak delaminasyon ve kesilmemiş lif kusurlarını araştırmışlardır. Cam elyaf takviyeli kompozit yüzeyler arası 10mm kalınlığında PVC köpük, balsa ağacı ve trapez oluklu PVC çekirdeklerden oluşan kompozit malzemelere; DIN 338 standardında 4 mm, 7 mm ve 9 mm çapında matkap uçları ile; 500, 1.600 ve 2.500 dev/dak olmak üzere üç iş mili hızında; 50, 200 ve 400 mm/dak ilerleme hızında delme işlemleri uygulanmıştır. Yapılan deney sonrası oluşan delikler fotoğraflanarak delaminasyon ve kesilmemiş lif faktörleri ölçülmüştür. Çalışma sonucunda ilerleme hızının delaminasyona en çok etki eden faktör olduğu, bunu sırasıyla iş mili hızı ve matkap çapının takip ettiği görülmüştür. Kesilmemiş lif kusuruna en çok etki eden faktör yine ilerleme hızıdır; İlerleme hızını matkap çapı ve iş mili hızı takip eder. Balsa ahşap kompozit sandviç panelin delinmesinin en iyi kaliteye sahip olduğu ve onu sırasıyla oluklu-köpük ve PVC köpük sandviç panellerin takip ettiği saptanmıştır. Kompozit sandviç yapılarda

delaminasyon faktörünün, kesilmemiş fiber faktöründen daha fazla olduğu çıkarımı yapılmıştır.

Jaafar vd., (2017) yaptıkları çalışmada; Nomex Balpeteği yapıların işlenmesi esnasındaki kesici takım geometrisi ve işleme parametrelerinin (takım devri, ilerleme(besleme)hızı) kesme kuvvetleri ile yüzey kusurlarına etkisini üç boyutlu Sonlu Elemanlar Modellemesi yöntemiyle incelemiştir; deneysel olarak yapılan çalışmalarla bu sonuçları karşılaştırmıştır. 3,2 mm boyutunda altıgen hücrelerden oluşan, yoğunluğu 48 kg/m<sup>3</sup> olan Nomex balpeteği numuneler; iki parçalı özel bir kesici takım ile işlenmiştir. Birinci parça yüksek hız çeliğinden imal edilmiş 16 mm çapında on helezonlu talaş kırıcı kesici gövdedir. İkinci parça, 18,3 mm çapında ve 22° talaş açısına ve 2,5° kenar açısına sahip, tungsten karbürden yapılmış dairesel bir kesici diskidir. Deneyler 2.000, 15.000, 23.000 dev/dak fener mili hızı ile 200 mm/dak ve 3.000 mm/dak ilerleme hızları ile yapılmıştır. Yapılan deneysel çalışmalarda; aynı ilerleme miktarında iş mili devri arttıkça yırtılma ve kesilmemiş lif kusurlarının azaldığı; aynı devirde ilerleme miktarı arttıkça kusurların arttığı gözlemlenmiştir. Dolayısıyla düşük ilerleme hızı ve yüksek devir ikilisi ile en iyi sonuçların elde edildiği görülmüştür.

Kuş ve Ekici, (2017) yaptıkları çalışmada alüminyum ve Nomex balpeteği yapıların delinmesinde delaminasyona etki eden faktörleri incelemiştir. Karbon elyaf takviyeli plastik kompozit arası nomex balpeteği ve alüminyum balpeteği çekirdekli sandviç kompozit numuneler, DIN 6539 Karbür üzeri TiAlN kaplama 6,3 mm çapında, 140° nokta açısı, 20° helis açılı matkap ile 60 m/dak, 84 m/dak ve 118 m/dak kesme hızı ve 0,05 mm/dev, 0,07 mm/dev, ve 0,1 mm/dev ilerleme miktarı ile işlenmiştir. Deneysel çalışmalarda giriş delaminasyonuna en büyük oranda etki eden faktörün kesme hızı olduğu, bunu ilerleme hızı ve çekirdek malzeme cinsi takip ettiği; çıkış delaminasyonuna en çok etki eden faktörün ilerleme hızı olduğu, ilerleme hızını çekirdek malzeme tipi ve kesme hızı takip ettiği değerlendirilmiştir. İlerleme hızı ve kesme hızının artmasıyla delaminasyonun arttığı gözlenmiş olup alüminyum balpeteği çekirdeğin, Nomex oranla daha iyi performans verdiği tespit edilmiştir.

Gill vd., (2017) yapmış oldukları çalışmada kesici takım aşınmasını irdelemişlerdir. Nomex balpeteği malzemenin düşük sertliğine rağmen işleme sırasında meydana gelen aşırı sürtünme ve oluşan yüksek sıcaklıkların takım aşınmasına büyük oranda etki ettiği hipotezi üzerine çalışmışlardır. 12,5 mm çapındaki parçalayıcı kesici takım ile 17.500 dev/dak fener mili hızı, 3.810 mm/dak ilerleme hızıyla yaptıkları deneylerde video kaydı alarak belirli aralıklarda takım aşınmasını incelemişlerdir. İlk 7-



8 dakikada takım geometrisinde anlamlı bir değişiklik saptanmamış, 73. dakikada kesici takım yüzeyindeki aşınmalar dikkati çekmiş, 96. dakikadan sonra Nomex balpeteği malzeme talaşlarının uzayarak takıma sarmaya başladığı, hücre duvarlarının kesilmeksizin koptuğu görülerek kesici takım kullanılamaz hale gelmiş olarak kabul edilmiştir. Hücre duvarının kesişim noktalarında karşılaşılan güçlüklerin sürtünmeyi arttırdığı saptansa da ısı üretimi yeterince doğrulanamamıştır. Gill ve arkadaşları kesici takımdaki kesici ağız sarmal açısının ve kesme kenar sayısının azaltılması ile takım aşınmasının azaltılabileceği çıkarımını yapmışlardır.

An vd., (2019) alüminyum balpeteğinin frezelenmesi üzerine yaptıkları çalışmada malzemenin işlenmesini hem deneysel olarak incelemiş hem de yaptıkları sayısal simülasyonlarla deneysel sonuçları karşılaştırmışlardır. Deneysel olarak kullanılan Alüminyum balpeteği hücre duvarının uzunluğu 3 mm ve kalınlığı 0,06 mm'dir. Kullanılan kesici takım, ZrN kaplamalı, keskin tırtıklı yüzeye sahip entegre tip bir freze takımıdır. Hem deneysel çalışmalarda hem sayısal simülasyonlarda işleme kusurlarının kesme kuvvetlerine, kesme parametreleri ve sıcaklıkla doğrudan bağlantılı olduğu; giriş açılarının değiştirilerek yüzey deformasyonlarının azaltılabileceği sonuçlarına ulaşmışlardır.

Knittel vd., (2019) Nomex balpeteği kompozitin frezelemesindeki yüzey pürüzlülüklerini makine öğrenmesi yöntemiyle teşhis etmeye çalışmışlardır. Çalışmada iki parçalı ve birleştirilmiş özel bir kesici takım kullanılmıştır. İlk parça yüksek hız çeliğinden imal edilmiş 16 mm çapında talaş kırıcılı helisel bir yapıdadır. Bu parçaya entegre tungsten karbür, 18,3 mm çapında 2,5° kesme açılı bir kesme bıçağı bulunmaktadır. Bu çalışmada, frezelenmiş yüzeylerin düzlük teşhisine odaklanılmıştır. Bunu yapmak için, öncelikle ölçülen frezeleme kuvvetleri saptanmış, ardından birkaç Yapay Zekâ (AI) tabanlı model, etiketli özellikler dizisi tarafından eğitilmiştir. En iyi sonuçlar SVM algoritması ile elde edilmiştir. Geliştirilen yaklaşımın diğer malzemelerin frezelemesine de uygulanabileceği öngörülmüştür.

Ghabezi vd., (2020) Nomex balpeteğinin delinmesi üzerine yaptıkları çalışmada delaminasyon ve kesilmemiş lif gibi işleme kusurlarını literatürde daha önce denenmemiş bir dijital fotoğraflama yöntemi kullanarak incelemişlerdir. Deneysel numunesi, alt ve üst yüzeyinde 1 mm kalınlığında alın sacı bulunan uzunluğu 240 mm, genişliği 40 mm ve kalınlığı 12 mm olan bir petek sandviç paneldir. Kesme takımı 4 mm, 7 mm, 9 mm kalınlığındaki DIN 338A 118° nokta açılı HSS helezonik matkap uçlarıdır. Deneysel hızlar 500, 1.600, 2.500 dev/dak fener mili hızı ile 50 mm/dak ve 200

mm/dak ilerleme hızları ile yapılmıştır. Ghabezi ve arkadaşları delaminasyon ve kesilmemiş lif kusurlarına en büyük oranda etki eden faktörün ilerleme hızı olduğunu, ilerleme hızını sırayla iş mili hızı ve takım çapının takip ettiğini tespit etmişlerdir. İlerleme hızının delaminasyonu arttırdığı, iş mili devrinin artmasıyla belirli bir noktaya kadar büyük ölçüde delaminasyonun azaldığı, takım çapının artması ile hem delaminasyon faktörünün hem de kesilmemiş lif faktörünün arttığı gözlemlenmiştir. Delme işlemi için soğutma sıvısı ve takım geometrisi gibi delme parametrelerinin delme hasarı üzerinde çok az etkisi olduğu fakat soğutucu ve yağlayıcının deliğin kalitesini etkilediği tespit edilmiştir. Delme kaynaklı hasarları değerlendirmek için dijital fotoğraflamanın ve ayrıca hasar alanını ölçmek için görüntü yoğunluğuna dayalı bir görüntü işleme tekniği kullanıldığı çalışma ile bu optik yöntemin, bir kompozit imalat ve montaj endüstriyel ortamında potansiyel bir hızlı tahribatsız muayene aracı olarak hizmet edebileceği ön görülmüştür.

Yang vd., (2021) karbonfiber destekli plastik kompozitler ile Nomex balpeteği çekirdekli sandviç kompozitlerin delinmesi üzerine çalışmış; matkap geometrisinin ve çapının, ilerleme hızı ve iş mili devrinin ve de destek koşullarının kompozitlerdeki tepe kesme kuvvetleri ile delaminasyona etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. Oluşturdukları sonlu elemanlar modellemesi ile kesme parametrelerinin delaminasyona etkilerini tahmin etmeye çalışmışlar, edindikleri sonuçları deneysel çalışmalarla karşılaştırmışlardır. Oda sıcaklığında (22-24 °C) 1.000 dev/dak fener mili hızıyla, 60 ve 300 mm/dak ilerleme hızlarında; deliksiz, 6 mm delikli, 12 mm delikli destek plaklarıyla her deney 5 kez yapılmıştır. Deneylerde helisel matkap ve hançer tipi matkap kullanılmış, deneysel sonuçlar ve mekanizma analizi, hançer matkap ucunun, helisel matkap ucuna göre daha düşük itme kuvvetleri ve daha az delaminasyon alanı sağladığını ortaya koymuştur. Bu durum hançer tip matkap ucunun delik delme için daha iyi olduğunu göstermektedir. Helisel matkap ile yapılan deneylerde ilerleme hızı ile delaminasyonun ve tepe itme kuvvetinin büyük oranda arttığı tespit edilmiştir. Sonlu elemanlar modellemesi ile helisel matkap talaşlarının hançer tipi matkabın talaşlarından 4 kat büyük olduğu saptanmış, dolayısıyla hançer tip matkapta itme kuvvetinin daha küçük olduğu, bunun da delaminasyona olumlu etkisi olduğu çıkarımını yapmışlardır. Sandviç yapının üst yüzeyinde oluşan giriş delaminasyonunun, alt yüzeyde oluşandan çıkış delaminasyonundan daha az olduğu gözlemlenmiştir.

Jiang ve Liu, (2021) Nomex balpeteği petek duvarın kesilmesi işlemi sırasında çeşitli giriş açıları ile kesme kuvvetlerinin değişimini teorik olarak incelemiştir. Nomex

peteklerin farklı giriş açılarında kesim simülasyonu sonlu elemanlar yöntemi ile yapılmış; deneysel çalışmalarla bu model doğrulanmıştır. Yapılan çalışmada giriş açısının kontrol edilmesi ile yırtılma kusurlarının azaltılabileceği bir yöntem önerilmiştir. Peteklerin çift cidarlarına 40° ile 70° giriş açısı ile yapılan işlemlerde yırtılma kusurunun minimum olduğu saptanmıştır.

Zarrouk vd., (2021) Nomex balpeteği yapıların frezelenmesini etkileyen parametreleri tahmin ve analiz etmek için sağlam bir sayısal model sunmak amacıyla izotropik elasto-plastik yaklaşımı kullanarak takım geometrisinin ve duvar kalınlığının kesme kuvvetleri üzerindeki etkisini analiz etmişlerdir. Malzeme ortotropik ve izotropik olarak modellenerek deneysel çalışma sonuçları ile yapılan projeksiyonlar karşılaştırılmış olup; elde edilen sayısal sonuçlar, izotropik elastoplastik yaklaşımın performanslarını doğrulamış ve sayısal modelin uygunluğunu göstermiştir. Ortotropik yaklaşımın çok zaman alması ve maliyeti dikkat çekmiştir. Farklı iki takım ile yapılan projeksiyonlarda MABC isimli takımın 3 eksenindeki ve ortalama kesme kuvvetinin, CZ10 isimli takıma nazaran düşük olduğu görülmüştür. 4 farklı devirde (2.000, 10.000, 15.000, 23.000 dev/dak) ve 3.000 mm/dak ilerleme hızında yapılan simülasyonda, kesme hızının azalması ile kesme kuvvetinin azaldığı tespit edilmiştir. CZ10 takımı ile yapılan simülasyonlarda Z eksenindeki kesme kuvvetinin büyüklüğü göze çarpmıştır. MABC takımında ise diğer eksenlerdeki kuvvetlere paralel bir kuvvet görülmüştür. CZ10 takımı ile farklı duvar kalınlıkları (0,03 mm, 0,06 mm, 0,10 mm ve 0,15 mm) için yapılan simülasyonlarda duvar kalınlığı ile kesme kuvvetlerinin arttığı tespit edilmiştir. Daha yoğun bir duvar, küçük bir hacimde daha fazla aramid lif bulunduğunu gösterir ve bu da malzemenin sertliğini artırır ve öğütme sırasında kesme kuvvetlerinin artmasına neden olmaktadır. Öte yandan, Fz bileşeninin değerinin, Fx ve Fy'ye kıyasla çok yüksek olduğuna dikkat çekmişlerdir. Bu farkın, ortotropik bir davranış olarak kabul edilen ve dolayısıyla yükleme yönüne bağlı olan bal peteğinin mekanik davranışı ile ilgili olduğu saptanmıştır.

Zarrouk vd., (2022) başka bir çalışmada Nomex balpeteğinin frezelemedeki talaş oluşumunun modellemesini ve sayısal simülasyonunu yapmışlardır. İşleme koşullarının kesme kuvvetleri üzerindeki etkisini ve oluşan talaşların morfolojisini araştırmışlardır. Düşük dönme hızı (5.000 dev/dak) ve yüksek ilerleme hızı (3.000 mm/dak) ile kesici takım en büyük işleme kuvvetlerini ürettiği kaydedilmiştir. Yüksek dönüş hızı (23.000 dev/dak) ve düşük ilerleme hızı (200 mm/dak) için minimum kuvvetler gözlemlenmiştir. İlerleme hızının düşürülmesi kesme kuvvetlerini de

azaltmıştır. Araştırmada kesme kuvvetlerinin fener mili devir sayısı arttıkça azaldığını, ilerleme hızı arttıkça arttığını gözlemlemişlerdir.

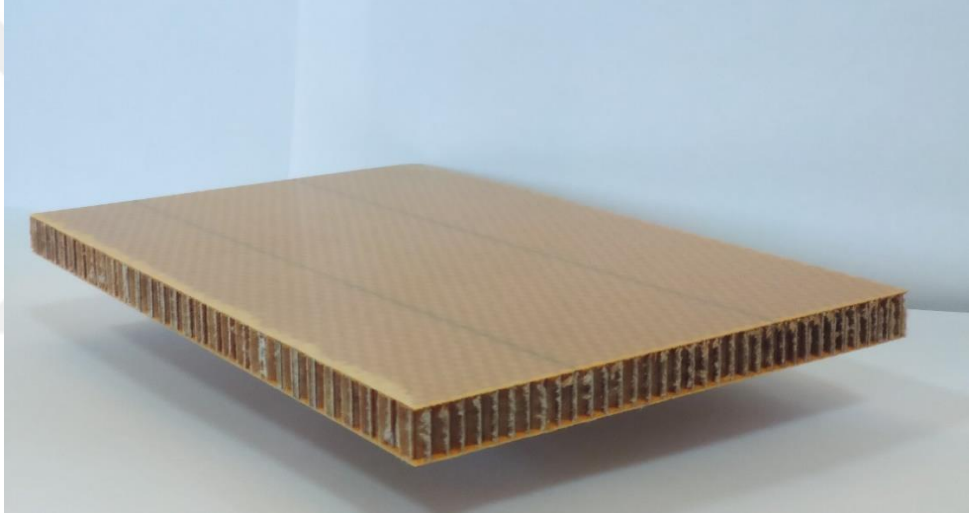
Liu vd., (2022) yaptıkları çalışmada Alüminyum balpeteği ve Nomex balpeteğini döner ultrasonik işleme yöntemiyle dairesel ultrasonik kesici takımı kullanarak işlemişlerdir. Yaptıkları deneylerle minimum yüzey kusurlarına ulaşmak için optimum ultrasonik koşulları bulmayı amaçlamışlardır. Alüminyum balpeteği çekirdek iş parçası için, çapaklanma, yırtılma ve disk kesme aletiyle ezilmesi katlanması gibi kusurlarla karşılaşmışlardır. Ultrasonik iş mili hızı ve disk takım ilerleme hızı arttıkça çapak ve yırtılmanın azaldığını, mil hızının artması malzeme üzerindeki kesme etkisini bir dereceye kadar arttırdığını tespit etmişlerdir. Nomex balpeteği çekirdek iş parçası için, yüzey morfolojisinde çapak, yırtılma ve kesilmemiş elyaf kusurları gözlemlenmiştir. Ultrasonik iş mili hızı artırıldığında çapak ve yırtılma azalmıştır. Bununla birlikte, kesici takımın malzeme kaldırma hacminin artması nedeniyle disk takım ilerleme hızındaki artışın yırtılma kusurunu arttırdığını görmüşlerdir.

Zarrouk vd., (2023) Nomex balpeteğinin frezelenmesini, sonlu elemanlar yöntemi kullanarak simüle etmiş, kesici takımın kama açısı ve çapı cinsinden geometrik parametrelerin malzeme birikimi, talaş boyutu, oluşturulan yüzey ve kesme kuvvetleri üzerindeki etkisini ve takım yüzey aşınmasına etkilerini analiz etmişlerdir. Yaptıkları analizlerle uygun talaş açısı ve takım çapı açısından kesme koşulları ve kesici takım geometrisi seçiminin üretilen parçanın yüzey kalitesini iyileştirdiğini ve kesici takımın bütünlüğünü optimize ettiğini tespit etmişlerdir. Araştırmacılar sonlu elemanlar yöntemini kullanarak Nomex balpeteğinin ve kesici takımın karmaşık parametrelerini göz önüne alan sayısal bir model geliştirmişler ve deneysel çalışmalarla bu modellemeyi doğrulamışlardır. Yüksek iş mili devirlerinde yüzey kalitesinin arttığı, X eksenindeki kesme kuvvetlerinin malzeme birikmesine bağlı olarak yüksek olduğu saptanmıştır. Kombine olarak bir parçalayıcı helisel kesici takım ile bir kesme diskinin kullanıldığı deneylerde, kesme diskinin kama açısının, kesici takım üzerindeki malzeme birikimini doğrudan etkilediği; besleme yönünde kesme kuvvetinin büyüyen kama açısıyla birlikte arttığı, Z ekseninde ise anlamlı bir değişikliğe yol açmadığı tespit edilmiştir.

### 3. MATERYAL ve YÖNTEM

#### 3.1. Materyal

Tez çalışmasındaki deneylerde kullanılan kompozit malzeme Kordsa Teknik Tekstil A.Ş. firmasından temin edilen, alt ve üst yüzeyi 0,2 mm fenolik reçineli cam elyaf kompozit kaplı, Nomex balpeteği çekirdekli sandviç kompozittir. Deney malzemesi 185 mm x 118 mm ebadında ve 10 mm kalınlığındadır. Malzemenin tezgâha entegre olan dinamometreye bağlanabilmesi için, numuneye 8 mm çapında 4 adet bağlantı deliği açılmıştır. Deneyde kullanılan kompozit malzemenin resmi Şekil 3.1.'de görülmektedir. Kompozit malzemenin sahip olduğu özellikler ise Çizelge 3.1.'de (Kordsa, 2023) verilmektedir.



Şekil 3.1. 185 x 118 x 10 mm Nomex kompozit malzeme

Çizelge 3.1. Deneyde kullanılan Nomex balpeteği kompozit sandviçin özellikleri

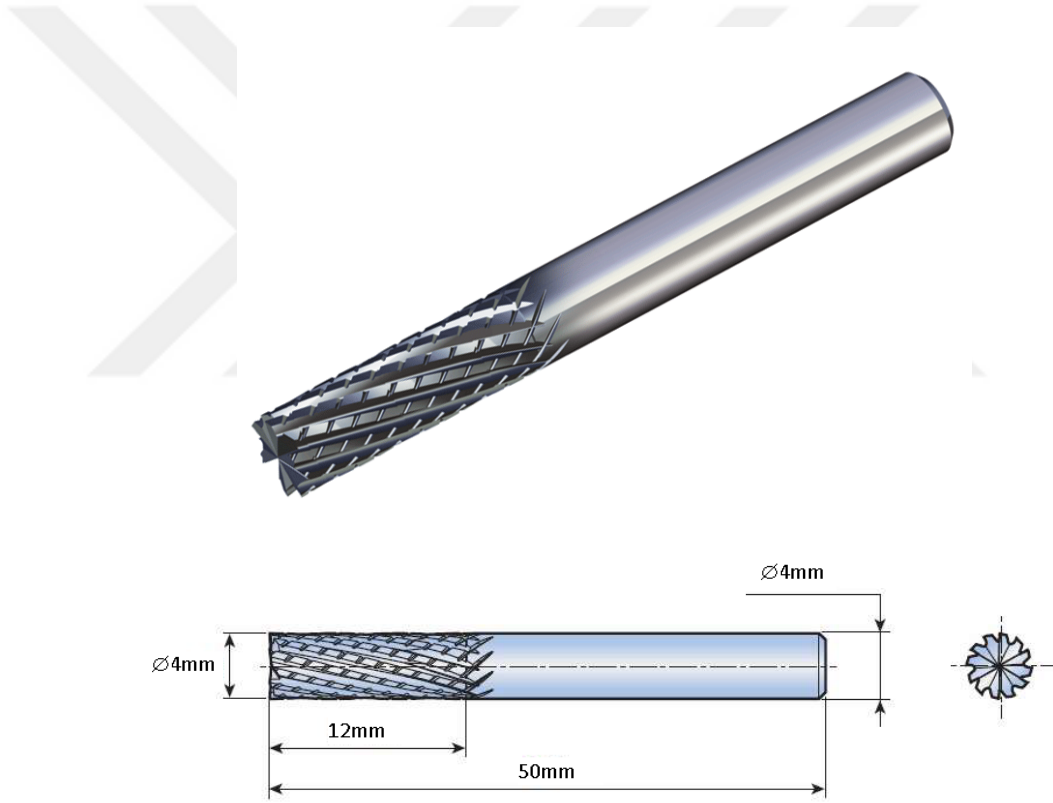
Yüzey Kaplaması	Fiber Tipi	S2 sınıfı Cam Elyaf
	Dokuma Tipi	8H Satin
	Matris	%50 Fenolik Reçine
	Metrekare Gramaj	305 gr/m <sup>2</sup>
	Kalınlığı	0,2 mm
Çekirdek	Malzeme	Nomex Balpeteği
	Yoğunluğu	48 gr/m <sup>3</sup>
	Hücre Aralığı	3,2 mm
	Hücre Yüksekliği	9,6 mm

## 3.2. Aletler ve Cihazlar

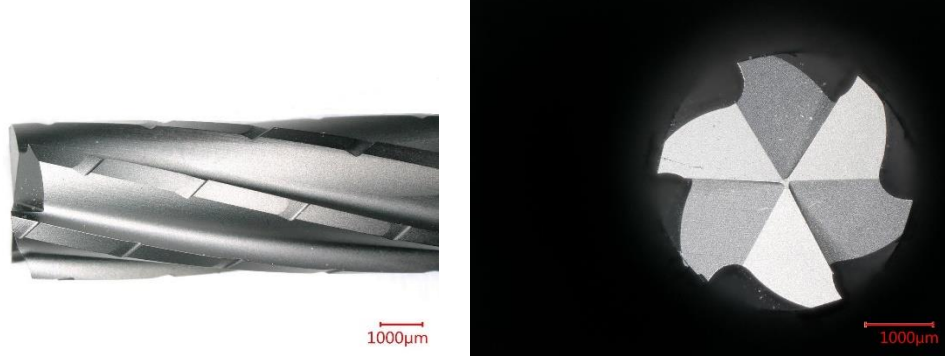
### 3.2.1. Deneylerde Kullanılan Kesici Takımlar

Tez çalışmasındaki deneylerde Taegutec firmasının ürettiği, kompozit malzemelerin işlenmesine özel iki tip kesici takım kullanılmıştır. Kesici takımlar elmas malzemedен olup CVD (Chemical Vapor Deposition) kaplamadır. Her iki kesici takımın çapı da 4 mm'dir.

Yapılan çalışmalarda kullanılan kesici takımlardan ilki Taegutec firması tarafından RRFE 040 olarak adlandırılan  $15^\circ$  helis açısına sahip 3 ağızlı bir kesici takımdır. RRFE 040 kesici takımının görüntüsü ve ölçüleri Şekil 3.2.'de (Taegutec, 2023), Kesici takımının dijital mikroskop ile alınan görüntüleri Şekil 3.3.'te verilmiştir.



Şekil 3.2. RRFE 040 Kesici takım görüntüsü



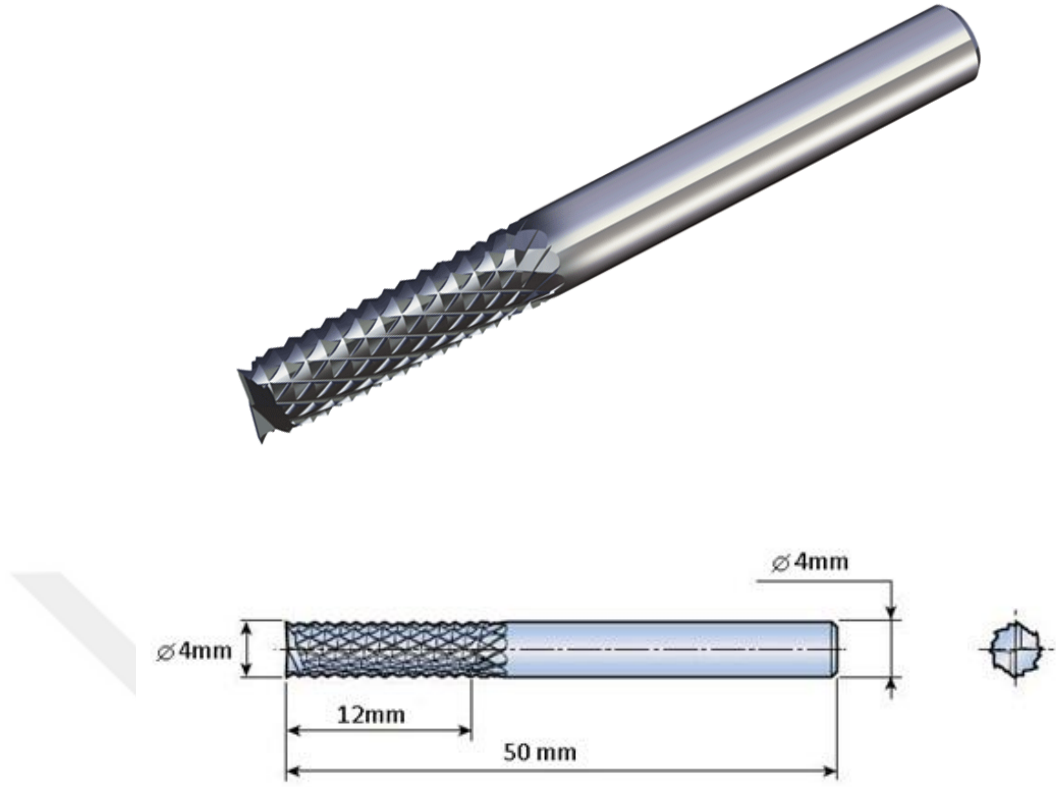
**Şekil 3.3.** RRFE 040 Kesici takımın dijital mikroskop görüntüsü

RRFE 040 kesici takımına ait özellikler Çizelge 3.2.'de (Taegutec, 2023) verilmiştir.

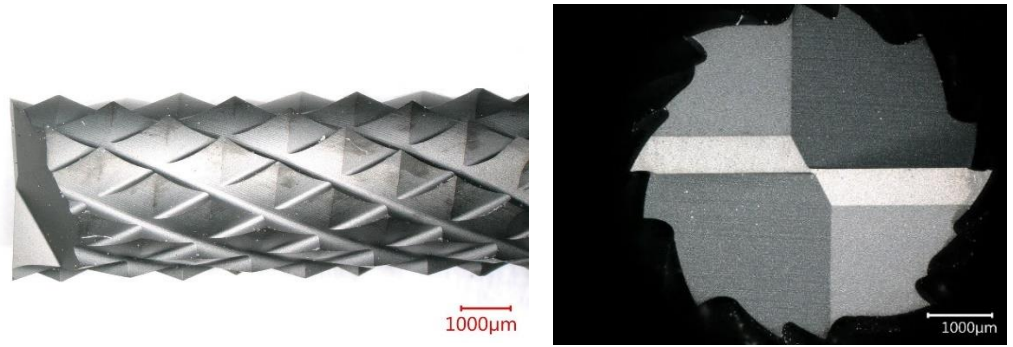
**Çizelge 3.2.** RRFE 040 Kesici takımın özellikleri

Malzeme	Elmas
Kaplama	CVD
Takım çapı	Ø 4 mm
Helis Açısı	15°
Gövde Kalınlığı	Ø 4 mm
Takım Uzunluğu	12 mm
Tam Boy	50 mm
Kesici Ağız	Üç Ağız

Yapılan çalışmalarda kullanılan ikinci kesici takım Taegutec firması tarafından RCFE 040 olarak adlandırılan 28° helis açısına ve kırıcı yanal yüzeylere sahip kesici takımdır. RCFE 040 kesici takımının görüntüsü Şekil 3.4.'te (Taegutec, 2023); Kesici takımın dijital mikroskop ile alınan görüntüleri Şekil 3.5.'de verilmiştir.



Şekil 3.4. RCFE 040 Kesici takım görüntüsü



Şekil 3.5. RCFE 040 Kesici takımın dijital mikroskop görüntüsü

RCFE 040 kesici takımına ait özellikler Çizelge 3.3.'te (Taegutec, 2023) verilmiştir.



**Çizelge 3.3.** RCFE 040 Kesici takımın özellikleri

Malzeme	Elmas
Kaplama	CVD
Takım çapı	Ø 4 mm
Helis Açısı	15°
Gövde Kalınlığı	Ø 4 mm
Takım Uzunluğu	12 mm
Tam Boy	50 mm
Kesici Ağız	İki Ağızlı

### 3.2.2. Deneylerde Kullanılan CNC İşleme Merkezi

Bu tezdeki deneyler Quaser MV154C dik işlem tezgâhında yapılmıştır. Tezgâh 3 eksenli olup; maksimum 17,5 kW güce, 10.000 dev/dak maksimum fener mili hızına sahiptir. İşleme merkezi tablasına entegre edilmiş olan Kistler 9257 B dinamometre ile deney esnasındaki kesme kuvvetleri ölçülmüştür. Şekil 3.6.'da Quaser MV154C dik işlem tezgâhı görülmektedir.



**Şekil 3.6.** Deneyde kullanılan CNC tezgâhı

### 3.2.3. Deneylerde Kullanılan Kuvvet Ölçüm Sistemi

Kuvvetlerin ölçümünde Kistler 9257 B tip dinamometre, yüksek empedanslı bağlantı kabloları ile Kistler 5070 S tip amplifikatöre; amplifikatör bağlantı kablolarıyla Kistler 5697 A tipi DAQ kartına bağlıdır. Bu kart ile işlenen veriler bilgisayarımızdaki DynoWare adlı yazılımla sayısal olarak elde edilmiştir. Dinamometre ve amplifikatöre ait resimler Şekil 3.7.'de verilmiştir.



Şekil 3.7. Kistler 9257 B tip dinamometre ve Kistler 5070 S tip amplifikatör  
Kistler 9257 B dinamometreye ait teknik veriler Çizelge 3.4.'te verilmiştir.

Çizelge 3.4. Deneyde kullanılan dinamometre özellikleri

Model	Kistler 9257 B
Ölçüm Aralığı	-5 kN – 5 kN
Duyarlılık	$F_x - F_y = \sim 7.5 \text{ pC/N}$ ; $F_z = \sim 3.7 \text{ pC/N}$
Çalışma Sıcaklık Aralığı	0°C - 70°C
Uzunluk	= ~ 170 mm
Genişlik	= ~ 100 mm
Yükseklik	= ~ 60 mm

### 3.2.4. Deneylerde Kullanılan Görüntüleme Sistemi

Yapılan deneylerde Nomex Balpeteği sandviç malzemenin giriş ve çıkışlarında kesilmemiş lif ve delaminasyon kusurlarını tespit etmek için Keyence VHX-900 dijital mikroskobu ile görüntüler alınmış; alınan görüntüler üzerinden yapılan ölçümlerle

kompozite giriş ve çıkışlardaki delaminasyon faktörleri hesaplanmıştır. Ayrıca kesici takımların görüntüleri de bu dijital mikroskop ile detaylandırılmıştır. Deney numunesi ve dijital mikroskobun görüntüsü Şekil 3.8.'te gösterilmiştir.



Şekil 3.8. Keyence dijital mikroskop ve deney numunesi

Dijital mikroskopa ait özellikler Çizelge 3.5.'te verilmiştir.

Çizelge 3.5. Dijital mikroskop özellikleri

Görüntü Çözünürlüğü	18 MP
Büyütme Oranı	200
Çalışma Mesafesi	23 cm
Işık Rengi	Beyaz

### 3.3. Yöntem

Bu tez çalışmasında Nomex bal peteği sandviç kompozit malzemelerin delinmesinde; kesici takım geometrisinin, fener mili devir hızının ve kesme hızının kesme kuvvetlerine ve delaminasyona etkisinin incelenmesi amaçlanmıştır. Bu çalışmada 10 mm kalınlığında alt ve üst yüzeyi cam elyaf prepreg ile kaplı Nomex bal peteği sandviç kompozit malzemeye; 4 mm çapında üç ağızlı helisel kesici takım (Taegutec RRFE 040) ve yine 4 mm çapında iki ağızlı parçalayıcı yüzeye sahip kesici takım (Taegutec RRFE 040) ile 2.000 ve 8.000 dev/dak fener mili hızlarında 100, 200, 300, 400 ve 500 mm/dak ilerleme hızları ile delme işlemleri yapılmıştır. Her iki kesici

takım ile her bir parametre ile 3 defa delme olmak üzere toplam 60 adet delme işlemi gerçekleştirilmiştir. Delme işlemi deneyleri, kuru ortam şartlarında, desteksiz olarak; üç eksenli CNC tezgâhında yapılmıştır. Delme işlemi esnasında ortaya çıkan kesme kuvvetleri dinamometre vasıtasıyla ölçülmüş; açılan deliklerin görüntüleri dijital mikroskop ile görüntüleri alınmıştır. Toplam 60 adet delikte hasar analizi yapılmış; delinen malzemeden çap ölçümleri yapılarak delaminasyon değerleri hesaplanmıştır. Kesme kuvvetleri ve delaminasyon faktörleri hesaplanarak kesme takımı tipi, ilerleme hızı ve kesme hızına göre karşılaştırılmıştır.

### **3.3.1. Taguchi Deney Tasarım Metodu**

Deney tasarımı; araştırma ve geliştirme faaliyetlerinde kaliteyi artıran maliyeti düşüren, deney sürecindeki girdiler ile deney sonucundaki çıktılar arasındaki ilişkiyi belirleyen bir yöntemdir. Süreçten elde edilebilecek en iyi çıktıyı sağlamak için, girdileri yönetmeye, gerekli bilgiyi bulmayı sağlar.

Dr. Genuchi Taguchi geleneksel deney tasarımı yöntemlerinde çok sayıda deney yapma gerekliliği ve işleme parametrelerinin sayısının artmasıyla karşılaşılan zorlukları ortadan kaldıracak bir yaklaşım ortaya koymuştur. Taguchi metodunda deney öncesinde detaylı analiz ve değerlendirmeler yapılarak; yapılması gereken deney sayısında kayda değer bir azalma sağlanmıştır. Bu metotta girdiler kontrol edilebilir ve kontrol edilemeyen değişkenler olarak ikiye ayrılmıştır. Kontrol edilebilir değişkenler sürece olan etkisinin kolaylıkla ayarlanabileceği değişkenlerdir. Kontrol edilemeyen değişkenlerin süreç ve sonuca etkisini ayarlamak ise çok zor, çok maliyetli ya da imkânsızdır. Bu nedenle Dr. Taguchi kontrol edilebilir değişkenlerin değerlerini mümkün olduğu kadar iyi seçerek, kontrol edilemeyen değişkenlerin etkisini minimuma indirmeyi amaçlamaktadır (Taguchi ve Wu, 1979).

Bu tez çalışmasında yapılacak deneylerin kontrol edilebilen değişkenleri olan kesici takım tipi, fener mili hızı ve ilerleme hızı Taguchi Deney Tasarım Metodu ile belirlenmiştir.

### **3.3.2. Kesme ve İlerleme Parametreleri**

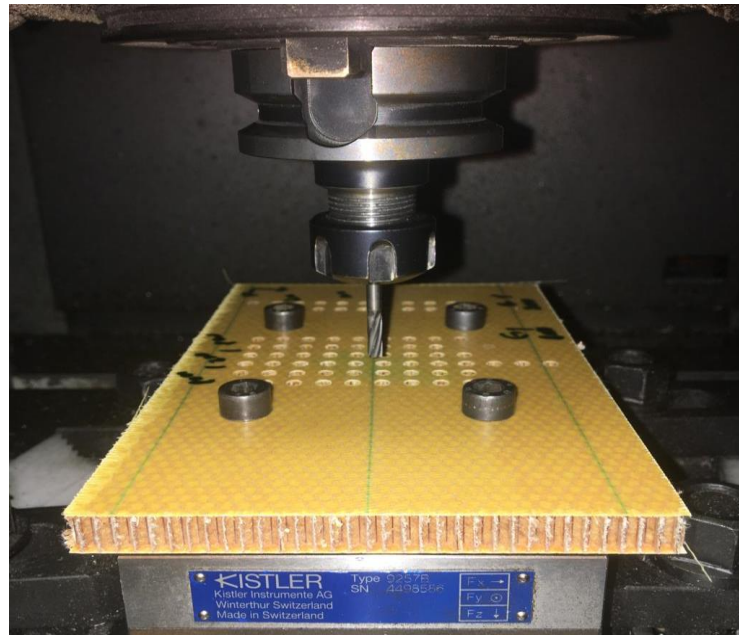
Yapılan deneylerde 2 farklı kesici takım ile 2 farklı fener mili hızı, 5 farklı ilerleme hızı ile desteksiz olarak kuru şartlarda kesme işlemi yapılmıştır. Her bir kesici takım ile her bir parametrede üçer kez deney yapılmıştır. Kesme parametreleri Çizelge 3.6.'da verilmiştir.

**Çizelge 3.6.** Deneyde kullanılan kesme parametreleri

Kesici Takım		İşleme Koşulları	Fener Mili Hızı (dev/dak)	İlerleme Hızı (mm/dak)
RRFE 040	RCFE 040	Kuru	2000	100
RRFE 040	RCFE 040			200
RRFE 040	RCFE 040			300
RRFE 040	RCFE 040			400
RRFE 040	RCFE 040			500
RRFE 040	RCFE 040		8000	100
RRFE 040	RCFE 040			200
RRFE 040	RCFE 040			300
RRFE 040	RCFE 040			400
RRFE 040	RCFE 040			500

### 3.3.3. Deney Düzenegi

Yapılan deneylerdeki kesme kuvvetlerinin saptanması için; dinamometre CNC işleme merkezinin tablasına paralel ve rijit olarak sabitlenmiş olup, dinamometre üzerine delme işlemini gerçekleştirmek için imal edilmiş bağlama kalıbı monte edilmiştir. Her iki kesme takımı ile tüm parametrelerle üçer kez delme işlemi yapılmıştır. Şekil 3.9.'da deney düzenegine bağlanmış kompozit malzeme görülmektedir.



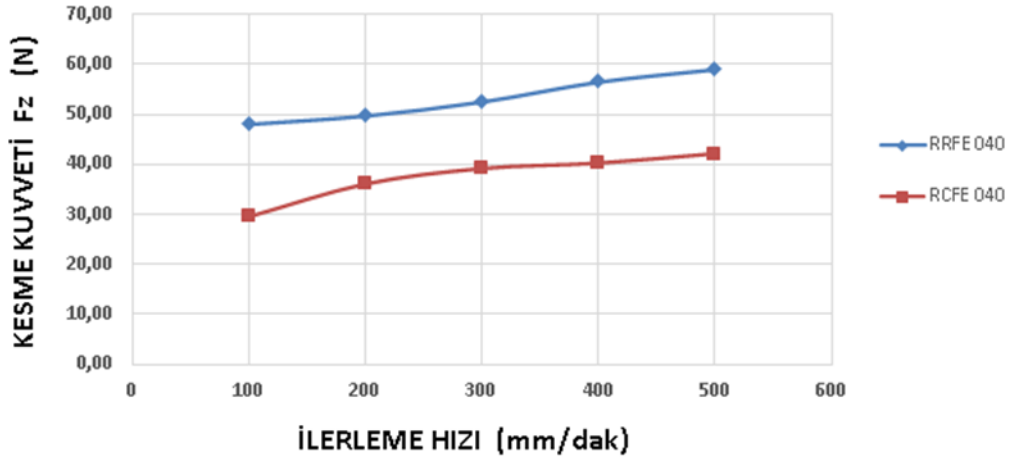
**Şekil 3.9.** Deney Düzenegi

## 4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Nomex bal peteği sandviç kompozit malzemelerin delinmesinde; kesici takım geometrisinin, fener mili devir hızının ve kesme hızının kesme kuvvetlerine ve delaminasyona olan etkisi deneysel olarak araştırılmıştır. Yapılan çalışmalardan elde edilen veriler aşağıda sunulmuştur.

### 4.1. Kesme Kuvvetleri Ölçümü

Nomex bal peteği sandviç kompozit malzemelerin delinmesinde kesme kuvvetleri; oluşan delaminasyon, kesilmemiş lif kusuru ve takım aşınması gibi hususların değerlendirilmesinde önemli bir parametre olarak öne çıkmaktadır. Çalışma kapsamındaki deneylerde kuvvet ölçümleri Kistler 9257 B tipi dinamometre ile yapılmıştır. Deney düzeneğinde Z eksenini olarak belirtilen yöndeki kuvvet kesme kuvveti olarak kullanılmıştır. Her bir parametre ile 3 kez ölçüm yapılarak ortalamaları alınmıştır. Ölçülen kuvvetler EK 1- Çizelge 4.1.'de verilmiştir. 2.000 dev/dak fener mili hızındaki kesme kuvvetlerinin ilerleme hızına göre değişimi Şekil 4.1.'de verilmiştir.

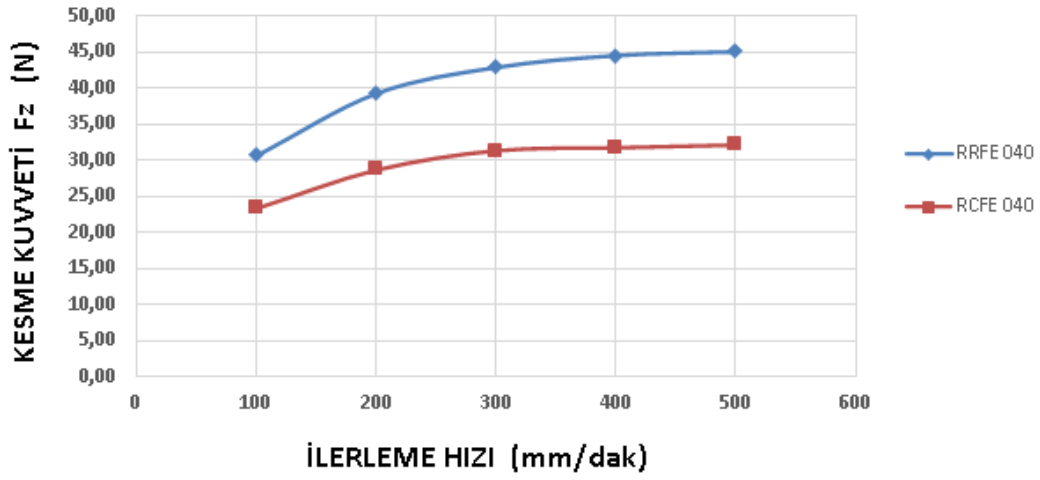


Şekil 4.1. 2.000 dev/dak fener mili hızındaki kesme kuvvetlerinin ilerleme hızına göre değişimi

2.000 dev/dak fener mili hızında yapılan deneylerde, her iki kesici takımda da ilerleme hızı arttıkça meydana gelen kesme kuvvetinin arttığı görülmüştür. Helisel üç ağızlı kesici takım ile yapılan deneylerdeki kesme kuvvetleri, iki ağızlı kırıcı tip kesme takımıyla yapılan deneylerde elde edilen kuvvetlerden büyüktür. Her iki kesici takımla

en yüksek kesme kuvvetleri 500 mm/dak ilerleme hızında elde edilmiştir. 2.000 dev/dak iş mili hızında yapılan deneylerde en küçük kesme kuvvetleri RCFE 040 olarak tanımlanan iki ağızlı kırıcı tip kesici takımla 100 mm/dak ilerleme hızında elde edilmiştir.

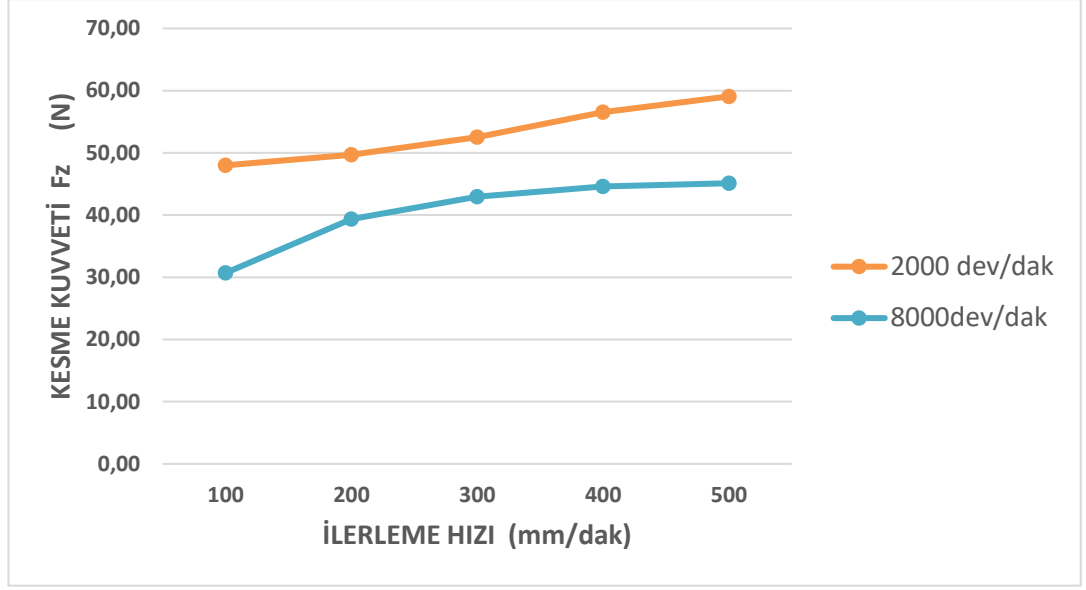
Fener mili hızının 8.000 dev/dak olduğu deneylerdeki kesme kuvvetlerinin ilerleme hızıyla değişimi Şekil 4.2.'de verilmiştir.



Şekil 4.2. 8.000 dev/dak fener mili hızındaki kesme kuvvetlerinin ilerleme hızına göre değişimi

Fener mili hızı 8.000 dev/dak ile yapılan deneylerde oluşan kesme kuvvetlerinin de ilerleme hızı ile birlikte arttığı görülmüştür. RRFE 040 ile yapılan deneylerdeki kesme kuvvetleri, aynı ilerleme hızında RCFE 040 ile yapılan kesme kuvvetlerinden daha yüksektir. 8.000 dev/dak iş mili hızında yapılan deneylerde kesme kuvvetindeki artışa ilerleme hızının etkisinin RRFE 040'da daha fazla olduğu görülmektedir.

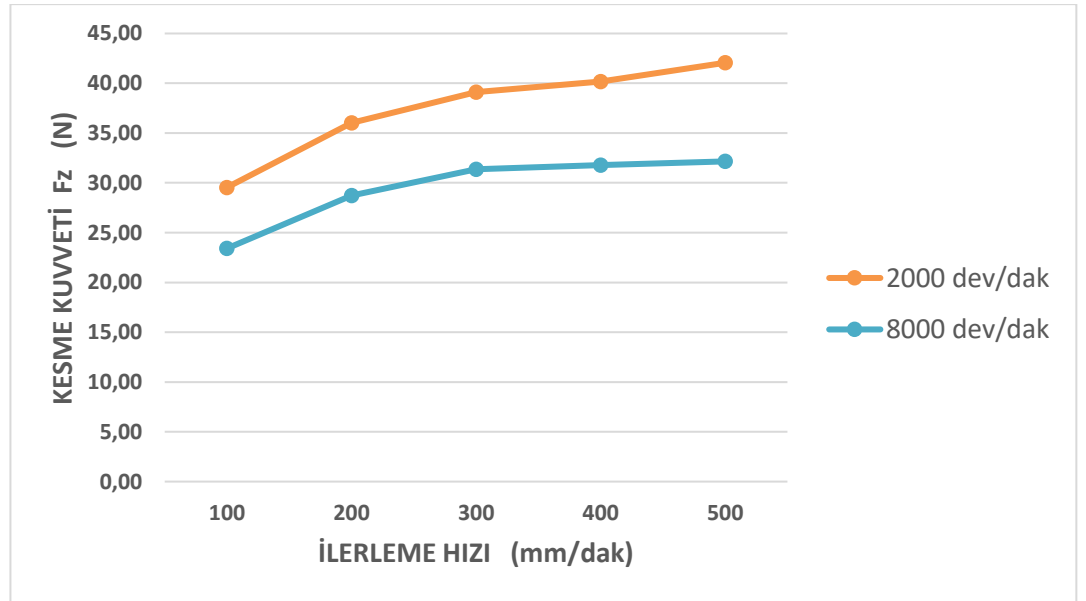
RRFE 040 kesici takımıyla yapılan deneylerin farklı iş mili hızında oluşturdukları kesme kuvvetleri de Şekil 4.3.'te gösterilmiştir.



Şekil 4.3. RRFE 040 kesici takımının farklı iş mili devirlerindeki kesme kuvvetlerinin ilerleme hızına göre değişimi

RRFE 040 kesici takımı ile yapılan deneylerde 2.000 dev/dak iş mili hızında oluşan kesme kuvvetlerinin 8.000 dev/dak iş mili hızında oluşan kuvvetlere nazaran yüksek olduğu görülmektedir. Her iki iş mili hızında da ilerleme miktarı ile kesme kuvvetlerinin artış gösterdiği görülmektedir.

RCFE 040 kesici takımıyla yapılan deneylerin farklı iş mili hızında oluşturdukları kesme kuvvetleri de Şekil 4.4.'te gösterilmiştir.



Şekil 4.4. RCFE 040 kesici takımının farklı iş mili devirlerindeki kesme kuvvetlerinin ilerleme hızına göre değişimi




















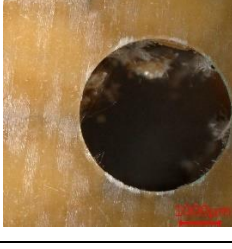
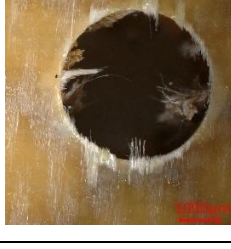

RCFE 040 kesici takımıyla yapılan deneylerin farklı iş mili hızında oluşturdukları kesme kuvvetleri de Şekil 4.4.'te gösterilmiştir. RCFE 040 kesici takımı ile yapılan deneylerde 2.000 dev/dak iş mili hızında oluşan kesme kuvvetlerinin 8.000 dev/dak iş mili hızında oluşan kuvvetlere nazaran yüksek olduğu görülmektedir. Her iki iş mili hızında da ilerleme miktarı ile kesme kuvvetlerinin artış gösterdiği görülmektedir.

Çalışmada kullanılan her iki fener mili hızında ve tüm ilerleme hızlarında da RRFE 040 kesici takımının RCFE 040 kesici takımına oranla daha büyük kesme kuvvetleri oluşturduğu tespit edilmiştir.

#### **4.2. Deliklerin Dijital Mikroskop Görüntüsü**

Nomex kompozit malzemede RRFE 040 ve RCFE 040 kesici takımlarıyla aynı çapta delikler açılmıştır. Delik delme işleminde farklı fener mili hızları ve ilerleme hızları ile delme işlemleri yapılmış; deliklerin kesici takım giriş ve çıkış noktalarındaki görüntüleri Keyence Dijital mikroskobu ile alınmıştır. Kesici takımların 2.000 ve 8.000 dev/dak fener mili hızlarında, farklı ilerleme hızlarında oluşturdukları giriş deformasyonlarının mikroskop ile 50 kat büyütülmüş görüntüleri Çizelge 4.1.'de verilmiştir.

**Çizelge 4.1.** Nomex kompozit malzemede açılan deliklerin giriş deformasyonlarının 50 kat büyütülmüş görüntüleri





















	RRFE 040		RCFE 040	
	2000 dev/dak	8000 dev/dak	2000 dev/dak	8000 dev/dak
100 mm/dak				
200 mm/dak				
300 mm/dak				
400 mm/dak				
500 mm/dak				

Görüntüler incelendiğinde, her iki takımında ve her iki fener mili hızında ilerleme hızlarının artırılmasıyla delaminasyon ve kesilmemiş lif kusurunun arttığı görülmektedir. RCFE 040 takımı ile açılan deliklerde delaminasyonun RRFE 040 takımı ile açılanlardan daha yüksek olduğu görülmektedir. Aynı takımlarla aynı ilerleme hızlarında yapılan deneylerde 2.000 dev/dak fener mili hızında oluşan deformasyonların 8.000 dev/dak fener mili hızındakinden daha fazla olduğu görülmüştür.

Kesici takımların 2.000 ve 8.000 dev/dak fener mili hızlarında, farklı ilerleme hızlarında oluşturdukları çıkış deformasyonlarının mikroskop ile 50 kat büyütülmüş görüntüleri Çizelge 4.2.'de verilmiştir.



**Çizelge 4.2.** Nomex kompozit malzemede açılan deliklerin çıkış deformasyonlarının 50 kat büyütülmüş görüntüleri

	RRFE 040		RCFE 040	
	2000 dev/dak	8000 dev/dak	2000 dev/dak	8000 dev/dak
100 mm/dak				
200 mm/dak				
300 mm/dak				
400 mm/dak				
500 mm/dak				

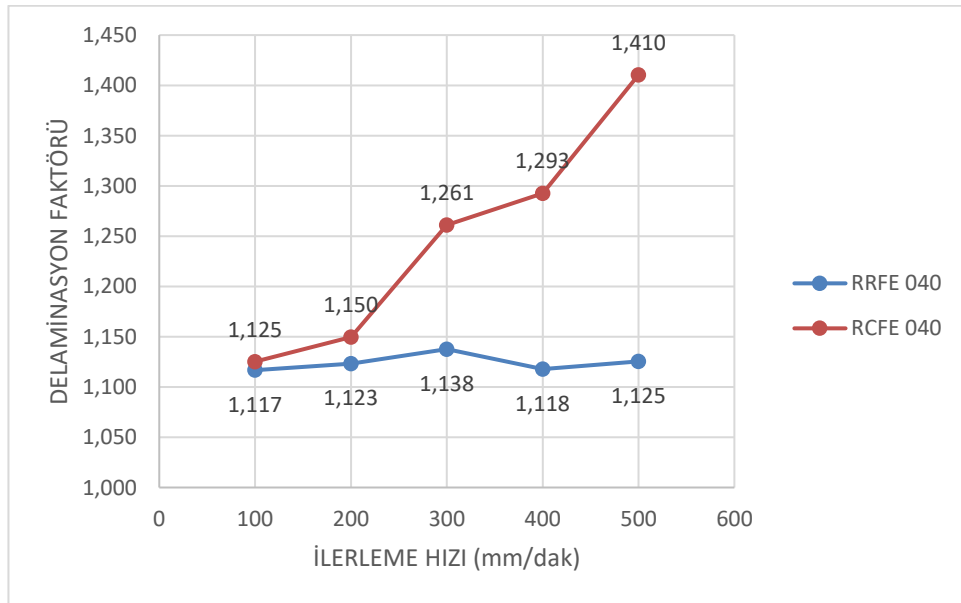
Görüntüler incelendiğinde çıkış deformasyonları konusunda yorum yapılır ise 2.000 dev/dak iş mili hızında yapılan deneylerde RRFE 040 takımının oluşturduğu delaminasyonun RCFE 040 takımından daha yüksek olduğu; fakat 8.000 dev/dak hızındaki deneylerde RRFE 040 takımının oluşturduğu delaminasyonun RCFE 040 takımından daha az olduğu görülmüştür.

### 4.3. Delaminasyon Değerleri

Yapılan bu çalışma kapsamında her iki takım ve iki fener mili hızında 100, 200, 300, 400, 500 mm/dak ilerleme hızında üçer kez delme işlemi yapılmış; ardından dijital mikroskop ile her bir deliğin görüntüsü alınmıştır. Görüntüler üzerinden yapılan ölçümler EK 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 ve EK 11’de verilmiştir. Delaminasyonlu çapın kesici takımın çapına oranlanması ile Delaminasyon Faktörü ( $F_d$ ) elde edilmiştir. Ölçülen giriş delaminasyonu değerleri EK 2 - Çizelge 4.2.’de; çıkış delaminasyonu değerleri EK 3 - Çizelge 4.3.’de verilmiştir.

#### 4.3.1. Giriş Delaminasyonları

2.000 dev/dak fener mili hızında her iki takım ile yapılan delme işlemleri sonucu deliklerde oluşan giriş delaminasyon değerleri Şekil 4.5.’te verilmiştir.

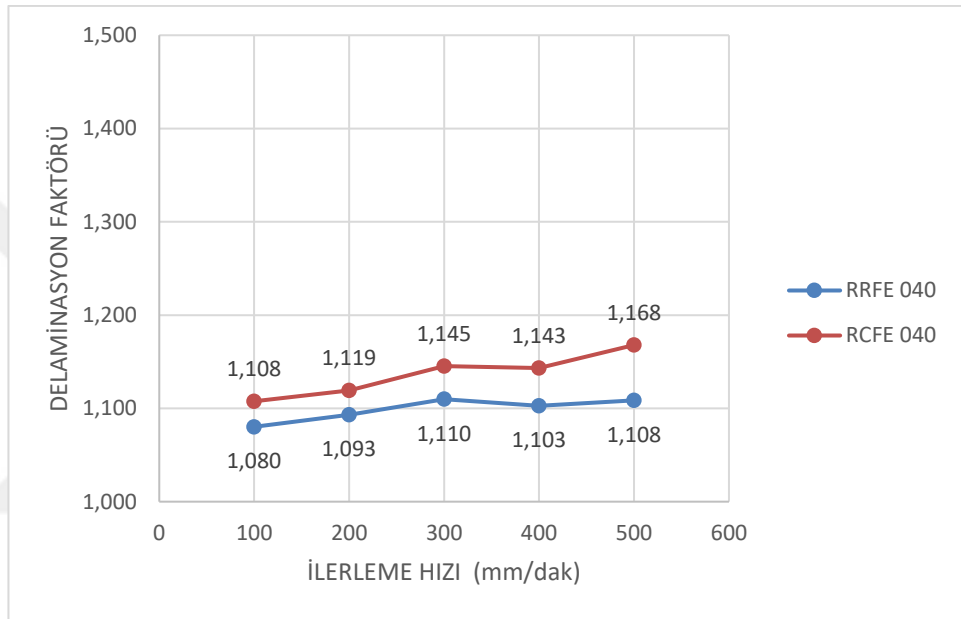


Şekil 4.5. RRFE 040 ve RCFE 040 kesici takımlarıyla 2.000 dev/dak iş mili hızı ile delinen deliklerde oluşan giriş delaminasyonları



2.000 dev/dak fener mili hız ile yapılan deneylerde RRFE 040 kesici takımıyla delinen deliklerde oluşan giriş delaminasyonunun, RCFE 040 takımı ile delinen deliklerde oluşan delaminasyondan düşük değerlerde olduğu görülmektedir. Artırılan ilerleme hızı ile RRFE 040'a ait değerlerde oluşan değişim az iken; RCFE 040 kesici takımı ile yapılan delme işlemlerinde ilerleme hızı arttıkça delaminasyon değerlerinin yüksek oranda arttığı görülmüştür.

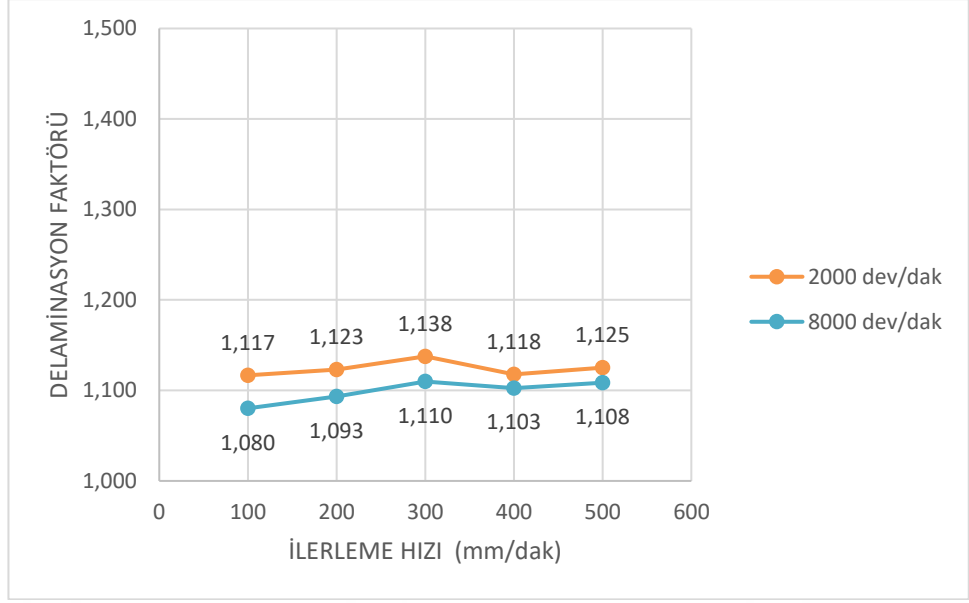
8.000 dev/dak fener mili hızında her iki takımla yapılan delme işlemleri sonucu oluşan deliklerde oluşan giriş delaminasyon değerleri Şekil 4.6.'da verilmiştir.



**Şekil 4.6.** RRFE 040 ve RCFE 040 kesici takımlarla 8.000 dev/dak iş mili hızı ile delinen deliklerde oluşan giriş delaminasyonları

8.000 dev/dak fener mili hız ile yapılan deneylerde de RRFE 040 kesici takımıyla delinen deliklerde oluşan delaminasyonun, RCFE 040 takımı ile delinen deliklere nazaran düşük olduğu görülmüştür. Her iki takımında da en düşük delaminasyon değerleri 100 mm/dak ilerleme hızında elde edilmiş, artan ilerleme hızıyla oluşan delaminasyonun artma eğiliminde olduğu değerlendirilmiştir.

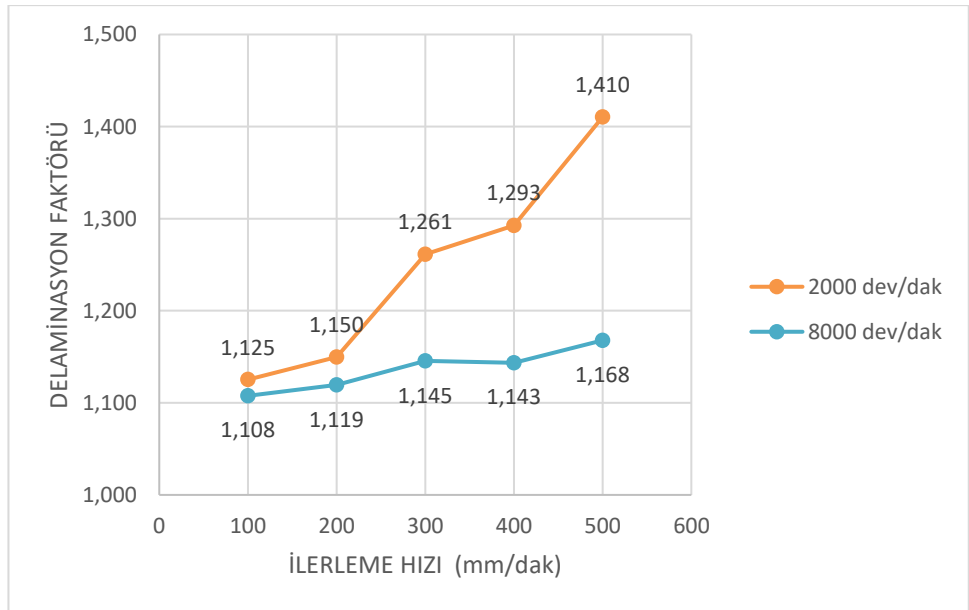
RRFE 040 kesici takım ile açılan deliklerde oluşan giriş delaminasyonlarının ilerleme hızına göre değişimi Şekil 4.7.'de verilmiştir.



**Şekil 4.7.** RRFE 040 Kesici takımı ile farklı iş mili devirlerinde açılan deliklerdeki giriş delaminasyonunun ilerleme hızına göre değişimi

RRFE 040 kesici takımı ile delinen deliklerdeki delaminasyonlar incelendiğinde 2.000 dev/dak iş mili hızıyla açılan deliklerdeki delaminasyonun, 8.000 dev/dak iş mili hızıyla açılan deliklerdeki delaminasyonlardan yüksek olduğu görülmektedir. İlerleme hızının giriş delaminasyonuna etkisinin kısıtlı olduğu görülmektedir.

RCFE 040 kesici takım ile açılan deliklerde oluşan delaminasyon faktörlerinin ilerleme hızına göre değişimi Şekil 4.8.'de verilmiştir.

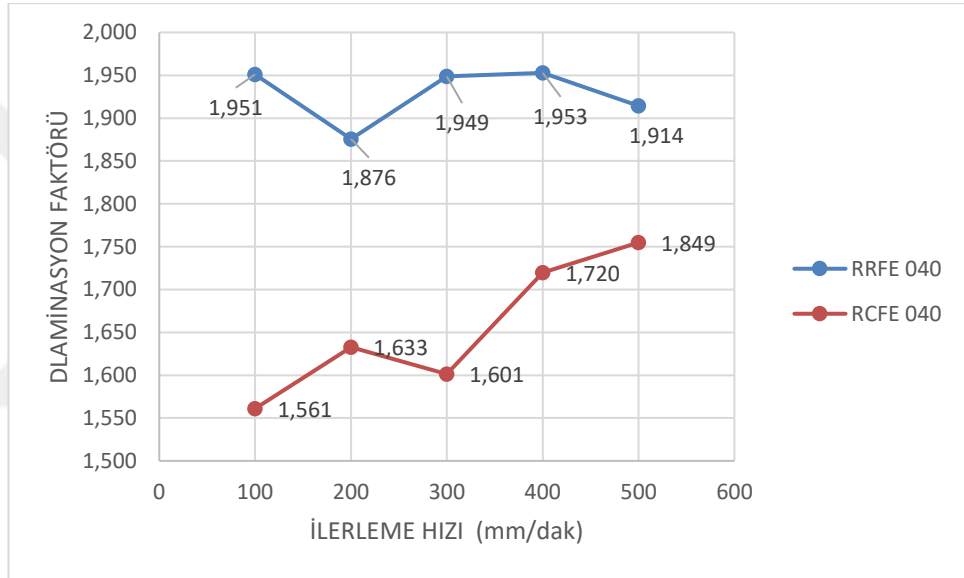


**Şekil 4.8.** RCFE 040 Kesici takımı ile farklı iş mili devirlerinde açılan deliklerdeki giriş delaminasyonunun ilerleme hızına göre değişimi

RCFE 040 kesici takımını ile delinen deliklerdeki delaminasyonlar incelendiğinde her iki iş mili hızında da ilerleme hızı arttıkça delaminasyonun arttığı görülmektedir. 2.000 dev/dak iş mili hızıyla açılan deliklerdeki delaminasyonun, 8.000 dev/dak iş mili hızıyla açılan deliklerdeki delaminasyonlardan yüksek olduğu, ilerleme hızı arttıkça 2.000 dev/dak iş mili hızı ile yapılan işlemlerde oluşan delaminasyonun 8.000 dev/dak ile yapılan işlemlerdekinden daha büyük oranda artış gösterdiği görülmüştür.

#### 4.3.2. Çıkış Delaminasyonları

2.000 dev/dak fener mili hızında her iki takım ile yapılan delme işlemleri sonucu oluşan deliklerde oluşan çıkış delaminasyon değerleri Şekil 4.9.'da verilmiştir.

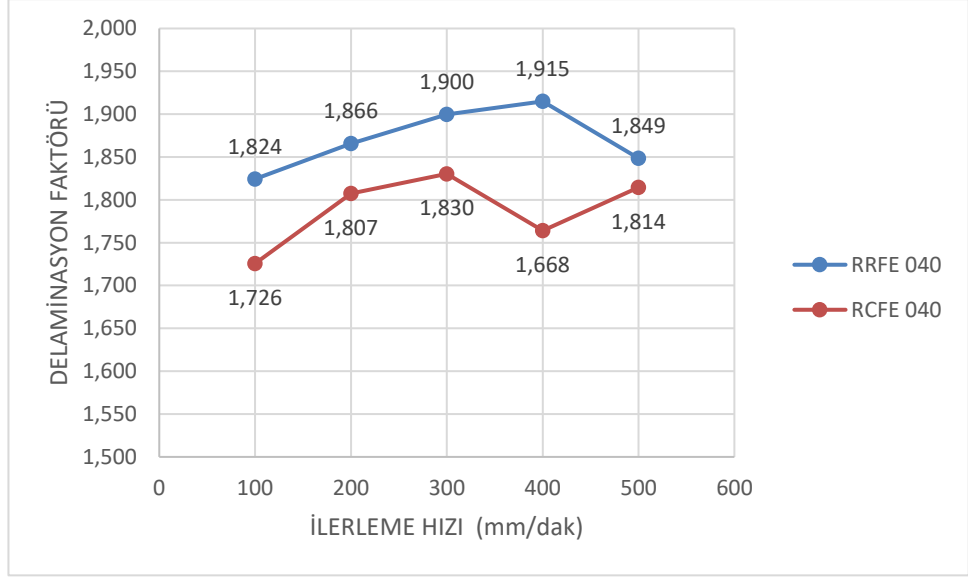


Şekil 4.9. RRFE 040 ve RCFE 040 kesici takımlarıyla 2.000 dev/dak iş mili hızı ile delinen deliklerde oluşan çıkış delaminasyonları

2.000 dev/dak fener mili hızında yapılan deneylerde RRFE 040 takım ile açılan deliklerdeki delaminasyonun, RCFE 040 takım ile açılan deliklerdeki delaminasyondan fazla olduğu görülmüştür. İlerleme hızı değişiminin delik delaminasyonuna etkisi doğrusal bir görünümde değildir.

8.000 dev/dak fener mili hızında her iki takım ile yapılan delme işlemleri sonucu deliklerde oluşan çıkış delaminasyon değerleri Şekil 4.10.'da verilmiştir.

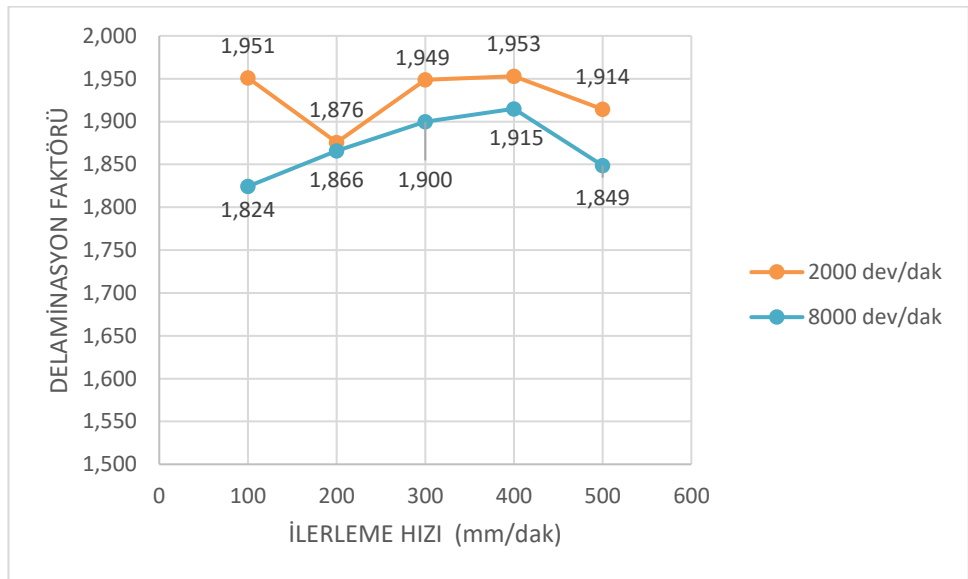




**Şekil 4.10.** RRFE 040 ve RCFE 040 kesici takımlarıyla 8.000 dev/dak iş mili hızı ile delinen deliklerde oluşan çıkış delaminasyonları

8.000 dev/dak fener mili hızında yapılan deneylerde de RRFE 040 takımıyla açılan deliklerdeki delaminasyonun, RCFE 040 takımı ile açılan deliklerdeki delaminasyondan fazla olduğu görülmüştür. İlerleme hızı ile delaminasyon faktörü arasında doğrusal bir ilişki göze çarpmamaktadır.

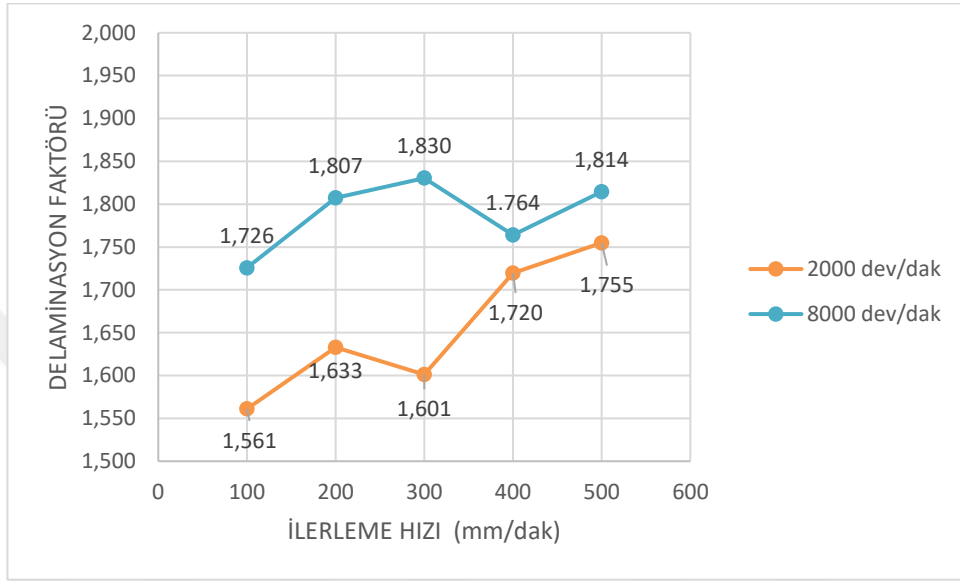
RRFE 040 kesici takım ile açılan deliklerde oluşan çıkış delaminasyonlarının ilerleme hızına göre değişimi Şekil 4.11.'de verilmiştir.



**Şekil 4.11.** RRFE 040 Kesici takımı ile farklı iş mili devirlerinde açılan deliklerdeki çıkış delaminasyonunun ilerleme hızına göre değişimi

RRFE 040 kesici takımı ile delinen deliklerdeki çıkış delaminasyonları incelendiğinde 2.000 dev/dak iş mili hızıyla açılan deliklerdeki delaminasyonun, 8.000 dev/dak iş mili hızıyla açılan deliklerdeki delaminasyonlardan yüksek olduğu görülmektedir.

RCFE 040 kesici takım ile açılan deliklerde oluşan çıkış delaminasyonunun ilerleme hızına göre değişimi Şekil 4.12.'de verilmiştir.



**Şekil 4.12.** RCFE 040 kesici takımı ile farklı iş mili devirlerinde açılan deliklerdeki çıkış delaminasyonunun ilerleme hızına göre değişimi

RCFE 040 kesici takımı ile delinen deliklerdeki çıkış delaminasyonları incelendiğinde ise 8.000 dev/dak iş mili hızıyla açılan deliklerdeki delaminasyonun, 2.000 dev/dak iş mili hızıyla açılan deliklerdeki delaminasyonlardan yüksek olduğu görülmektedir.

## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında Nomex balpeteği çekirdekli sandviç kompozit malzemenin iki farklı geometrideki kesici takım ile kuru şartlar altında delme işlemi, farklı kesme parametreleri kullanılarak yapılmıştır. Çapı 4 mm olan helisel üç ağızlı kesici takım ve aynı çapta kırıcı özellikli iki ağızlı kesici takım ile 2.000 ve 8.000 dev/dak fener mili hızı kullanılarak, 100, 200, 300, 400 ve 500 mm/dak ilerleme hızı ile desteksiz olarak delme işlemleri yapılmıştır. Deneysel çalışma sırasında tezgâh tablasına bağlanan dinamometre yardımıyla kesme kuvvetleri ölçülmüştür. Deneylerin ardından delinen deliklerin görüntüleri dijital mikroskop ile alınarak delaminasyon hasarları incelenmiştir. Çalışma ile elde edilen sonuçlar aşağıda sunulmuştur.

Helisel üç ağızlı kesici takım (RRFE 040) ile aynı fener mili hızında yapılan delme işlemleri sırasında oluşan kesme kuvvetleri, kırıcı özellikli iki ağızlı kesici takım (RCFE 040) ile yapılan delme işlemleri sırasında oluşan kesme kuvvetlerinden daha büyüktür.

Deneylerdeki en küçük kesme kuvveti 8.000 dev/dak iş mili hızı ve 100 mm/dak ilerleme hızında kırıcı özellikli iki ağızlı kesici takım (RCFE 040) ile en büyük kesme kuvveti ise 2.000 dev/dak iş mili hızı ve 500 mm/dak ilerleme hızında helisel üç ağızlı kesici takım (RRFE 040) ile elde edilmiştir. Deneyler sonucunda delme işlemlerinde, fener mili hızının artırılması ile kesme kuvvetlerinin azaldığı; aynı fener mili hızında, ilerleme hızı arttıkça kesme kuvvetlerinin arttığı görülmüştür. Bu sonuçlar literatürdeki çalışmalarla benzerlik göstermektedir.

Delik görüntüleri üzerinden yapılan ölçümlere göre; aynı kesme parametreleri ile helisel üç ağızlı kesici takım (RRFE 040) ile açılan deliklerdeki giriş delaminasyonu değerlerinin, kırıcı özellikli iki ağızlı kesici takım (RCFE 040) ile açılan deliklerdeki giriş delaminasyon değerlerinden küçük olduğu görülmüştür.

Fener mili hızının 2.000 dev/dak'dan 8000 dev/dak'ya çıkarılması ile oluşan giriş delaminasyonu değerleri azalmıştır. İlerleme hızı arttıkça giriş delaminasyonlarının artış eğiliminde olduğu görülmüştür. En küçük giriş delaminasyonu değerlerini elde etmek için yüksek fener mili hızı ve düşük ilerleme hızının seçilmesi gerektiği tespit edilmiştir.

Çıkış delaminasyonu konusunda kırıcı özellikli iki ağızlı kesici takımın (RCFE 040), helisel üç ağızlı kesici takımdan (RRFE 040) daha başarılı performans sergilediği görülmüştür.

Helisel üç ağızlı kesici takım (RRFE 040) ile yapılan deneylerde yüksek fener mili hızında daha düşük çıkış delaminasyonları elde edilirken, kırıcı özellikli iki ağızlı kesici takım (RCFE 040) ile düşük fener mili hızında daha düşük çıkış delaminasyonları elde edilmiştir. En küçük çıkış delaminasyonu kırıcı özellikli iki ağızlı kesici takım (RCFE 040) ile 2.000 dev/dak fener mili hızında, 100 mm/dak ilerleme hızında elde edilmiştir.

Deneyler sonucunda çıkış delaminasyonlarının giriş delaminasyonlarından çok daha büyük olduğu görülmüştür.

İlerleme hızının artırılması ile kesme kuvvetlerinin ve oluşan delaminasyonların arttığı saptanmıştır.

Fener mili hızının artırılmasıyla kesme kuvvetleri ve giriş delaminasyonu değerleri azalmıştır. Ancak fener mili hızının artırılmasının; çıkış delaminasyon değerlerini farklı kesici takım geometrilerinde farklı etkilediği dikkati çekmiştir. Arttırılan fener mili hızı; helisel üç ağızlı kesici takımında (RRFE 040) çıkış delaminasyonunu azaltırken; kırıcı özellikli iki ağızlı kesici takımında (RCFE 040) çıkış delaminasyonunu arttırmıştır.

DeneySEL çalışmalarından elde edilen veriler sonucunda, oluşan kesme kuvvetleri ve delik kalitesi açısından en iyi sonuçları kırıcı özellikli iki ağızlı kesici takımın (RCFE 040) verdiği tespit edilmiştir.

Yapılan bu çalışmadan elde edilen sonuçların, literatürdeki çalışmalarla benzerlik gösterdiği görülmüştür.

## KAYNAKLAR

- Ahmad, S., Zhang, J., Feng, P., Yu, D., Wu, Z., ve Ke, M. (2020). Processing technologies for Nomex honeycomb composites (NHCs): A critical review. *Composite Structures*, 250, 112545.
- Akkurt, A. (2006). Aşındırıcılı Su Jeti Uygulamaları ve Üretimde Yoğun Kullanıma Sahip Malzemelerin Delinmesi. *Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 7(2), 161-169.
- An, Q., Dang, J., Ming, W., Qiu, K., ve Chen, M. (2019). Experimental and numerical studies on defect characteristics during milling of aluminum honeycomb core. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 141(3).
- Alçı, M. (2016). *Katmanlı Kompozit Plakalar ile Desteklenmiş Nomex Bal Peteği Sandviç Yapıların Düşük Hızlı Darbe Davranışının İncelenmesi*, (Yüksek Lisans Tezi). Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri, Türkiye.
- Arslan, N., ve Kaman, M. O. (2002). Alüminyum, Kağıt ve Cam Elyaf Petek Yapılı Kompozitlerin Üretim Teknikleri ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 4(3), 113-123.
- Bayraktar, Ş., ve Turgut, Y. (2012). Elyaf Takviyeli Polimer Kompozit Malzemelerin Delinmesi Üzerine Bir Araştırma. 3. *Ulusal Talaşlı İmalat Sempozyumu*, 04-05.
- Canpolat, N. (2008). *Değişik Takviyeli Kompozit Malzemenin Matkapla Delinebilirliğinin ve Yüzey Pürüzlülüğünün Araştırılması*, (Yüksek Lisans Tezi). Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, Türkiye.
- Çelikkanat, A. B. (2002). *Teknik Tekstiller*, (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.
- Chawla, K. K., 2012. *Composite materials: science and engineering*. Springer Science & Business Media.
- Couturier, R., Ducret, D., Merle, P., Disson, J. P., & Joubert, P., 1997. Elaboration and characterization of a metal matrix composite: Al/AlN. *Journal of the European Ceramic Society*, 17(15-16), 1861-1866
- Foo, C. C., Chai, G. B., ve Seah, L. K. (2007). Mechanical properties of Nomex material and Nomex honeycomb structure. *Composite structures*, 80(4), 588-594.
- Ghabezi, P., Farahani, M., Shahmirzaloo, A., Ghorbani, H., & Harrison, N. M. (2020). Defect evaluation of the honeycomb structures formed during the drilling process. *International Journal of Damage Mechanics*, 29(3), 454-466.

- Gill, D. D., Yip-Hoi, D. M., Meaker, M., Boni, T., Eggeman, E. L., Brennan, A. M., & Anderson, A. (2017). Studying the mechanisms of high rates of tool wear in the machining of aramid honeycomb composites. *International Manufacturing Science and Engineering Conference 12*. Vol.50732.
- Jaafar, M., Atlati, S., Makich, H., Nouari, M., Moufki, A., ve Julliere, B. (2017). A 3D FE modeling of machining process of Nomex® honeycomb core: influence of the cell structure behaviour and specific tool geometry. *Procedia Cirp*, 58, 505-510.
- Jiang, J., ve Liu, Z. (2021). Formation mechanism of tearing defects in machining Nomex honeycomb core. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 112, 3167-3176.
- Kalemtaş, A., (2014). Metal Matrisli Kompozitlere Genel Bir Bakış. *Putech&Composites*, 22, 18-30.
- Kaya, A. İ. (2016). Kompozit malzemeler ve özellikleri. *Putech & Composite Poliüretan ve Kompozit Sanayi Dergisi*, 29, 38-45.
- Khoran, M., Ghabezi, P., Frahani, M., ve Besharati, M. K. (2015). Investigation of drilling composite sandwich structures. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 76, 1927-1936.
- Knittel, D., Makich, H., ve Nouari, M. (2019). Milling diagnosis using artificial intelligence approaches. *Mechanics & Industry*, 20(8), 809.
- Kordsa, (2020). Technical Data Sheet 8909398, Kordsa Teknik Tekstil A.Ş., 2020.
- Korkut, S. (2017). *Statik ve Dinamik Yükler Altında Kompozit Plakaların Hasar Durumlarına Karşı Davranışlarının İncelenmesi*, (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.
- Kuş, A., Ekici, E. (2017). Sandviç Kompozitlerin Delinmesinde Delaminasyon Faktörünün İncelenmesi. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 22(3), 153-162.
- Liu, G., Yang, J., Zhang, L., Gao, Q., Qian, L., ve Zhang, R. (2022). Surface Quality Experimental Study on Rotary Ultrasonic Machining of Honeycomb Composites with a Circular Knife Cutting Tool. *Crystals*, 12(5), 725.
- Mazumdar, S. (2001). *Composites manufacturing: materials, product, and process engineering*. CrC press.
- Potoğlu, U. (2012). *Sandviç Kompozit Plakaların Darbe Davranışları* (Doktora Tezi). Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, Türkiye.
- Sahu, Y. K. (2014). *Study on the effective thermal conductivity of fiber reinforced epoxy composites* (Doktora Tezi). Department of Mechanical Engineering National Institute of Technology, Rourkela, Odisha, India.

- Sezer, İ. (2011). *Determination of Mode II Delamination Resistance of Carbon/epoxy Laminated Composites*, (Doctoral Dissertation). İstanbul Technical University Institute of Science and Technology, İstanbul, Turkey.
- Solmaz, M. Y.ve Gür, M. (2007). Tabakalı Kompozit Plakalarda Takviye Malzemesi ve Oryantasyon Açısının Gerilme Analizine Etkisi. *Doğu Anadolu Bölgesi Araştırmaları*, 16-26.
- Taegutec Cutting Tools – RRFE 040 Catalog (2023a), Erişim adresi: <https://www.imc-companies.com/taegutec/ttkatalog/item.aspx?cat=6146656&fnum=10254&mapp=ML&app=401&GFSTYP=M&isoD=1> , (10.04.2023)
- Taegutec Cutting Tools – RCFE 040 Catalog (2023b), Erişim adresi: <https://www.imc-companies.com/taegutec/ttkCatalog/item.aspx?cat=6146641&fnum=10255&mapp=IT&app=0&GFSTYP=M&isoD=1> , (10.04.2023)
- Taguchi, G., Wu, Y., Introduction To Off-line Quality Control, Central Japan Quality Control Association, Nagaya.
- Tsai, S. W., & Hahn, H. T. (1980). Introduction to composite materials, Technomic Publ. Co., Westport.
- Turan, M. (2007). Tabakalı kompozit malzemelerde yüksek hızlı darbe hasarı. *Mühendis ve Makina*, 48(575), 3-8.
- Vasiliev, V.V., ve Morozov, E.V. (2001). *Mechanics and analysis of composite materials*. Elsevier.
- Xie, S., Jing, K., Zhou, H., ve Liu, X. (2020). Mechanical properties of Nomex honeycomb sandwich panels under dynamic impact. *Composite Structures*, 235, 111814.
- Yang, B., Wang, H., Chen, Y., Fu, K., ve Li, Y. (2021). Experimental evaluation and modelling of drilling responses in CFRP/honeycomb composite sandwich panels. *Thin-Walled Structures*, 169, 108279.
- Yıldızhan, H. (2008). *Polimer matrisli kompozitlerin mekanik özelliklerinin incelenmesi*, (Yüksek Lisans Tezi). Süleyman Demiral Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, Türkiye.
- Zarrouk, T., Salhi, J. E., Atlati, S., Nouari, M., Salhi, M., ve Salhi, N. (2021). Study on the behavior law when milling the material of the Nomex honeycomb core. *Materials Today: Proceedings*, 45, 7477-7485.
- Zarrouk, T., Salhi, J. E., Atlati, S., Nouari, M., Salhi, M., ve Salhi, N. (2022). Modeling and numerical simulation of the chip formation process when machining Nomex. *Environmental Science and Pollution Research*, 1-8.

Zarrouk, T., Nouari, M., ve Makich, H. (2023). Simulated Study of the Machinability of the Nomex Honeycomb Structure. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 7(1), 28.





## EKLER

**EK 1 - Çizelge 4.1. Deneylerde elde edilen kesme kuvvetleri**

			Tekrarlar-Fz			Fort
			1	2	3	
RRFE 040	2000	100	45,09	51,72	47,2	48,00
		200	51,29	49,86	47,98	49,71
		300	50,47	57,07	50,09	52,54
		400	61,20	51,84	56,64	56,56
		500	55,84	55,90	65,50	59,08
	8000	100	30,80	32,32	28,99	30,70
		200	38,37	39,17	40,50	39,35
		300	44,61	42,53	41,71	42,95
		400	39,35	42,07	52,36	44,59
		500	43,79	51,04	40,53	45,12
			1	2	3	
RCFE 040	2000	100	28,80	28,05	31,77	29,54
		200	34,41	37,93	35,77	36,04
		300	39,11	39,20	39,04	39,12
		400	39,38	39,52	41,63	40,18
		500	41,63	40,58	43,96	42,06
	8000	100	23,04	23,46	23,74	23,41
		200	28,43	28,86	28,86	28,72
		300	30,19	30,62	33,31	31,37
		400	31,09	31,60	32,65	31,78
		500	32,07	29,46	34,93	32,15

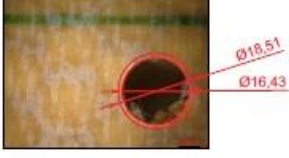
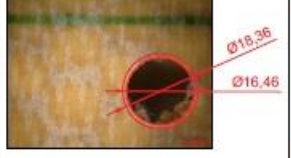
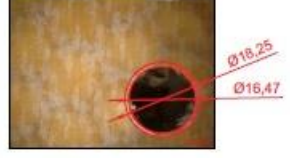
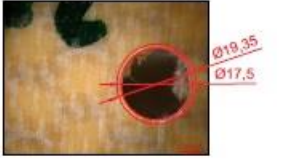
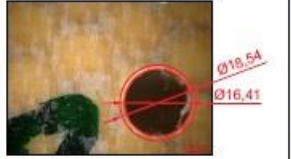
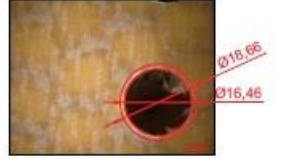

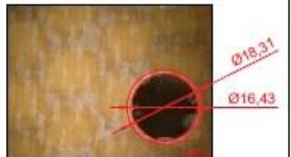
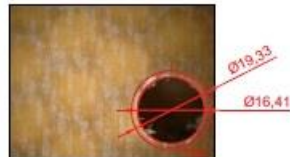

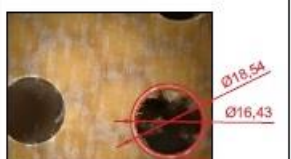


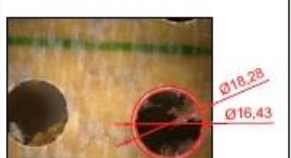
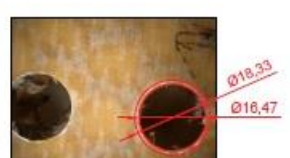
**EK 2 - Çizelge 4.2. Deneylerde elde edilen giriş delaminasyon faktörü değerleri**

	Devir / dak	İlerleme mm/dak	1. ölçüm			2. ölçüm			3. ölçüm			ort. Fd
			Nom. Çap	Max. Çap	Fd	Nom. Çap	Max. Çap	Fd	Nom. Çap	Max. Çap	Fd	
RRFE 040	2000	100	16,43	18,51	1,13	16,46	18,36	1,12	16,47	18,25	1,11	1,117
		200	17,5	19,35	1,11	16,41	18,54	1,13	16,46	18,66	1,13	1,123
		300	16,43	18,41	1,12	16,43	18,31	1,11	16,41	19,33	1,18	1,138
		400	16,42	18,45	1,12	16,43	18,54	1,13	16,44	18,10	1,10	1,118
		500	16,42	18,89	1,15	16,43	18,28	1,11	16,47	18,33	1,11	1,125
	8000	100	16,39	18,1	1,10	16,49	17,36	1,05	16,38	17,75	1,08	1,080
		200	16,43	17,48	1,06	16,39	18,19	1,11	16,39	18,13	1,11	1,093
		300	16,47	18,24	1,11	16,45	18,37	1,12	16,44	18,17	1,11	1,110
		400	16,49	18,21	1,10	16,39	17,95	1,10	16,40	18,18	1,11	1,103
		500	16,51	18,39	1,11	16,45	18,11	1,10	16,45	18,27	1,11	1,108
RCFE 040	2000	100	16,56	18,51	1,12	16,49	18,84	1,14	16,55	18,46	1,12	1,125
		200	16,48	19,57	1,19	16,51	18,30	1,11	16,50	19,02	1,15	1,150
		300	16,5	20,07	1,22	16,50	22,25	1,35	16,50	20,11	1,22	1,261
		400	16,5	20,53	1,24	16,45	22,67	1,38	16,46	20,67	1,26	1,293
		500	16,41	24,14	1,47	16,47	23,96	1,45	16,47	21,50	1,31	1,410
	8000	100	16,55	18,21	1,10	16,57	18,46	1,11	16,59	18,39	1,11	1,108
		200	16,54	18,25	1,10	16,55	18,27	1,10	16,52	19,01	1,15	1,119
		300	16,63	18,7	1,12	16,70	19,04	1,14	16,65	19,51	1,17	1,145
		400	16,7	19,22	1,15	16,69	19,07	1,14	16,53	18,79	1,14	1,143
		500	16,6	18,85	1,14	16,63	18,99	1,14	16,67	20,44	1,23	1,168

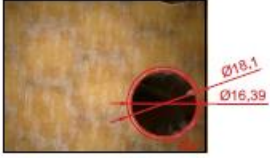
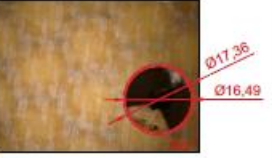
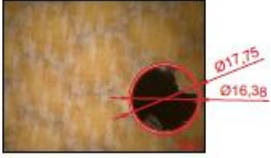
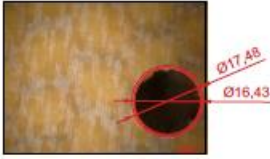
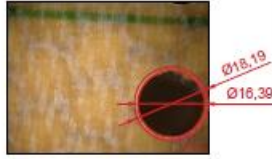
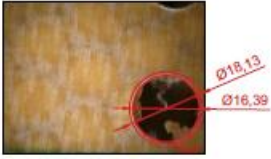


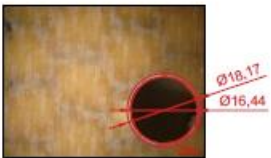
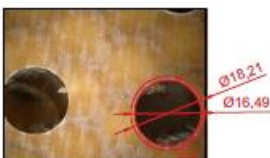

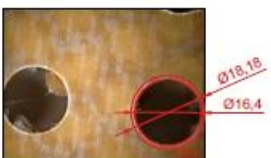
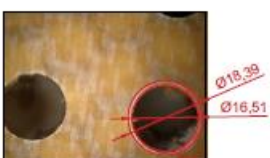

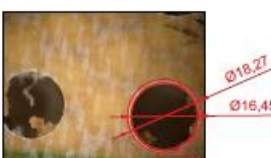
**EK 3 - Çizelge 4.3. Deneylerde elde edilen çıkış delaminasyon faktörü değerleri**

	Devir / dak	İlerleme mm/dak	1. ölçüm			2. ölçüm			3. ölçüm			ort. Fd
			Nom. Çap	Max. Çap	Fd	Nom. Çap	Max. Çap	Fd	Nom. Çap	Max. Çap	Fd	
RRFE 040	2000	100	16,36	30,15	1,84	16,33	33,28	2,04	16,31	32,17	1,97	1,951
		200	17,31	30,62	1,77	16,27	32,53	2,00	16,34	30,37	1,86	1,876
		300	16,32	30,73	1,88	16,29	32,26	1,98	16,25	32,22	1,98	1,949
		400	16,31	32,81	2,01	16,30	32,16	1,97	16,33	30,60	1,87	1,953
		500	16,29	31	1,90	16,30	30,13	1,85	16,27	32,40	1,99	1,914
	8000	100	16,35	28,49	1,74	16,55	29,99	1,81	16,41	31,48	1,92	1,824
		200	16,47	30,01	1,82	16,39	29,34	1,79	16,47	32,69	1,98	1,866
		300	16,49	30,67	1,86	16,45	32,53	1,98	16,45	30,63	1,86	1,900
		400	16,53	31,66	1,92	16,30	30,38	1,86	16,31	32,06	1,97	1,915
		500	16,34	29,63	1,81	16,38	28,93	1,77	16,32	32,09	1,97	1,849
RCFE 040	2000	100	16,35	23,82	1,46	16,35	25,48	1,56	16,23	27,07	1,67	1,561
		200	16,25	24,78	1,52	16,24	28,34	1,75	16,20	26,38	1,63	1,633
		300	16,25	25,39	1,56	16,21	28,45	1,76	16,17	24,03	1,49	1,601
		400	16,24	27,33	1,68	16,22	26,71	1,65	16,17	29,58	1,83	1,720
		500	16,16	29,56	1,83	16,10	29,14	1,81	16,15	26,25	1,63	1,755
	8000	100	16,21	26,3	1,62	16,32	31,76	1,95	16,30	26,22	1,61	1,726
		200	16,31	30,33	1,86	16,39	26,60	1,62	16,27	31,55	1,94	1,807
		300	16,31	30,39	1,86	16,34	29,07	1,78	16,33	30,19	1,85	1,830
		400	16,35	25,28	1,55	16,39	30,55	1,86	16,34	30,76	1,88	1,764
		500	16,35	28,85	1,76	16,28	29,64	1,82	16,44	30,55	1,86	1,814
















**EK 4 - Çizelge 4.4. RRFE 040 Takımı ile 2.000 dev/dak iş mili hızında delinen deliklerdeki giriş delaminasyon ölçümleri**

	1. deney	2. deney	3. deney
100mm/dak			
200 mm/dak			
300mm/dak			
400mm/dak			
500mm/dak			





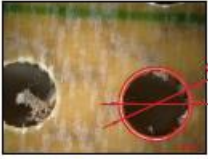
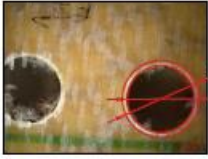
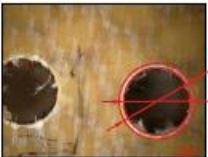








**EK 5 - Çizelge 4.5. RRFE 040 Takımı ile 8.000 dev/dak iş mili hızında delinen deliklerdeki giriş delaminasyon ölçümleri**

	1. deney	2. deney	3. deney
100mm/dak			
200mm/dak			
300mm/dak			
400mm/dak			
500mm/dak			

**EK 6 - Çizelge 4.6.** RCFE 040 Takımı ile 2.000 dev/dak iş mili hızında delinen deliklerdeki giriş delaminasyon ölçümleri

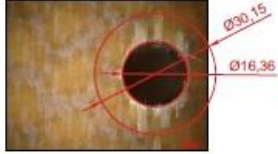
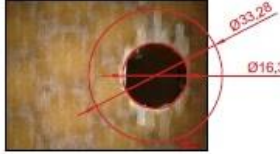

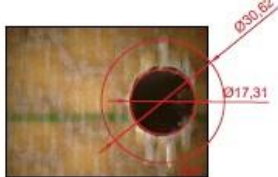







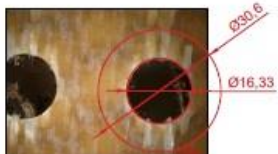


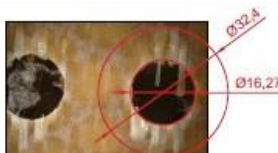
	1. deney	2. deney	3. deney
100mm/dak	 Ø18,51 Ø16,56	 Ø18,84 Ø16,49	 Ø18,46 Ø16,55
200mm/dak	 Ø19,57 Ø16,48	 Ø18,3 Ø16,51	 Ø19,02 Ø16,5
300mm/dak	 Ø20,07 Ø16,5	 Ø22,25 Ø16,5	 Ø20,11 Ø16,5
400mm/dak	 Ø20,53 Ø16,5	 Ø22,67 Ø16,45	 Ø20,67 Ø16,46
500mm/dak	 Ø24,14 Ø16,41	 Ø23,96 Ø16,47	 Ø21,5 Ø16,47

**EK 7 - Çizelge 4.7.** RCFE 040 Takımı ile 8.000 dev/dak iş mili hızında delinen deliklerdeki giriş delaminasyon ölçümleri

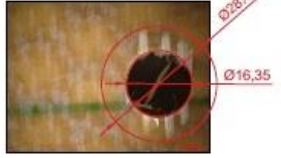
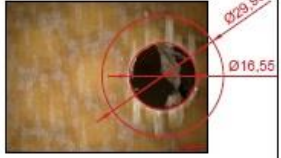
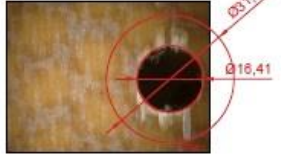
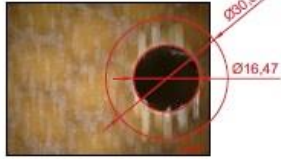
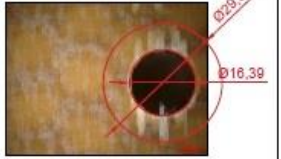
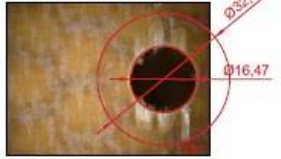
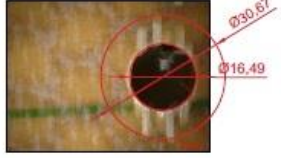

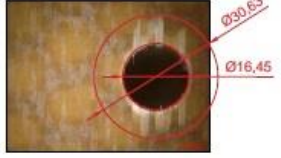
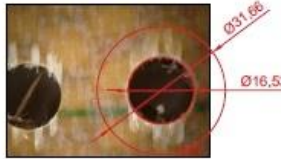
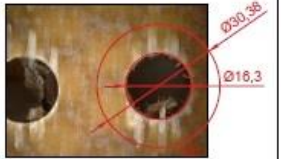
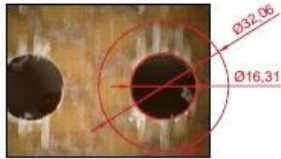
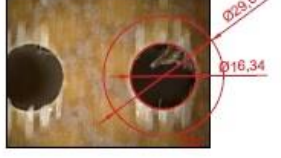
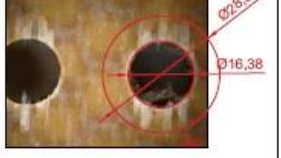
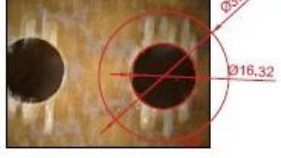
	1. deney	2. deney	3. deney
100mm/dak	 $\varnothing 18,21$ $\varnothing 16,55$	 $\varnothing 18,46$ $\varnothing 16,57$	 $\varnothing 18,39$ $\varnothing 16,59$
200mm/dak	 $\varnothing 18,25$ $\varnothing 16,54$	 $\varnothing 18,27$ $\varnothing 16,55$	 $\varnothing 19,01$ $\varnothing 16,52$
300mm/dak	 $\varnothing 18,7$ $\varnothing 16,63$	 $\varnothing 19,04$ $\varnothing 16,7$	 $\varnothing 19,51$ $\varnothing 16,65$
400mm/dak	 $\varnothing 19,22$ $\varnothing 16,7$	 $\varnothing 19,07$ $\varnothing 16,69$	 $\varnothing 18,79$ $\varnothing 16,53$
500mm/dak	 $\varnothing 18,85$ $\varnothing 16,6$	 $\varnothing 18,99$ $\varnothing 16,63$	 $\varnothing 20,44$ $\varnothing 16,67$



**EK 8 - Çizelge 4.8.** RRFE 040 Takımı ile 2.000 dev/dak iş mili hızında delinen deliklerdeki çıkış delaminasyon ölçümleri

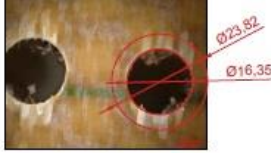
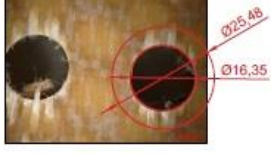

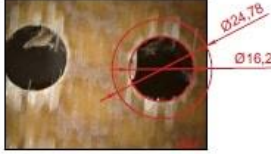
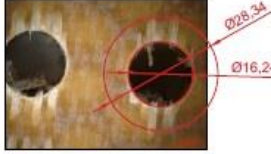
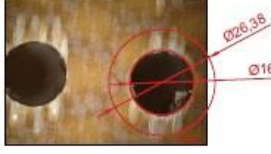
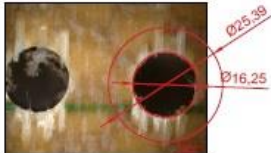

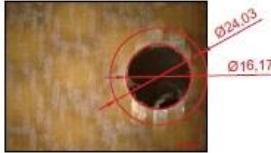



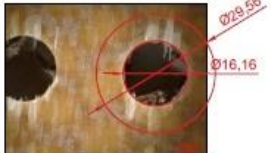


	1. deney	2. deney	3. deney
100mm/dak			
200mm/dak			
300mm/dak			
400mm/dak			
500mm/dak			

**EK 9 - Çizelge 4.9. RRFE 040 Takımı ile 8.000 dev/dak iş mili hızında delinen deliklerdeki çıkış delaminasyon ölçümleri**

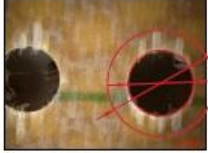
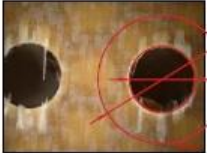



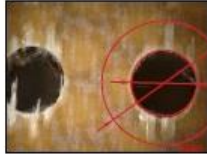


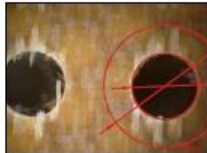


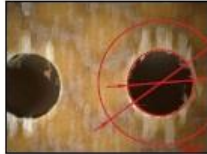
	1. deney	2. deney	3. deney
100mm/dak			
200mm/dak			
300mm/dak			
400mm/dak			
500mm/dak			



**EK 10 - Çizelge 4.10.** RCFE 040 Takımı ile 2.000 dev/dak iş mili hızında delinen deliklerdeki çıkış delaminasyon ölçümleri

	1. deney	2. deney	3. deney
100mm/dak			
200mm/dak			
300mm/dak			
400mm/dak			
500mm/dak			

**EK 11 - Çizelge 4.11.** RCFE 040 Takımı ile 8.000 dev/dak iş mili hızında delinen deliklerdeki çıkış delaminasyon ölçümleri

	1. deney	2. deney	3. deney
100mm/dak			
200mm/dak			
300mm/dak			
400mm/dak			
500mm/dak	