

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

**NOMEX (BAL PETEĞİ) KOMPOZİT  
MALZEMESİNİN FREZELENMESİNİN  
ARAŞTIRILMASI**

**Mehmet Esad NACAR**

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

**BURDUR, 2024**

## 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 (Bal Peteği) Kompozit Malzemesinin Frezelenmesinin 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.

29/07/2024

**Mehmet Esad NACAR**

## ÖNSÖZ

Bu araştırma için beni yönlendiren, karşılaştığım zorlukları bilgi ve tecrübesi ile aşmamda yardımcı olan değerli Danışman Hocam **Doç. Dr. Gültekin BASMACI**'ya teşekkürlerimi sunarım. Deneylerimi yapmam için laboratuvarlarını bana açan ve araştırmalarımnda hiçbir yardımı esirgemeyen Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi'nden değerli hocam Prof. Dr. Uğur KÖKLÜ'ye teşekkür ederim.

Araştırmalarım sırasında yardımlarını gördüğüm laboratuvar arkadaşım Yüksek Makine Mühendisi Fatih ERGENÇİÇEĞİ'ne teşekkür ederim.

0947-YL-23 No'lu Proje ile tezimi maddi olarak destekleyen Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü'ne teşekkür ederim.

Eğitim hayatımın her aşamasında beni her anlamda destekleyen sevgili eşim Hatice NACAR'a sonsuz sevgilerimi sunarım.

**Temmuz, 2024**

**Mehmet Esad NACAR**

# 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. TEMEL KAVRAMLAR.....                                                    | 4     |
| 2.1. Kompozit Malzemelerin Özellikleri .....                               | 4     |
| 2.1.1. Kompozit Malzemelerin Yapısal Özellikleri .....                     | 4     |
| 2.1.2. Kompozitlerin Matris Malzemeye Göre Sınıflandırılması .....         | 5     |
| 2.1.2.1. Metal Matrisli Kompozitler.....                                   | 5     |
| 2.1.2.2. Seramik Matrisli Kompozitler.....                                 | 5     |
| 2.1.2.3. Polimer Matrisli Kompozitler .....                                | 6     |
| 2.1.3. Takviye Türlerine Göre Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması..... | 6     |
| 2.1.3.1. Elyaf Takviyeli Kompozitler.....                                  | 6     |
| 2.1.3.2. Parçacık Takviyeli Kompozitler .....                              | 7     |
| 2.1.3.3. Katmanlı Kompozitler.....                                         | 7     |
| 2.1.3.4. Hibrit Kompozitler .....                                          | 9     |
| 2.2. Bal Peteği Yapılar .....                                              | 9     |
| 2.2.1. Bal Peteği Yapıların Formlandırılması .....                         | 10    |
| 2.2.1.1. Uzatma Yöntemiyle Şekillendirme .....                             | 10    |
| 2.2.1.2. Kıvrırma Yöntemiyle Şekillendirme .....                           | 11    |
| 2.3. Nomex.....                                                            | 11    |
| 2.4. Nomex Bal Peteği Yapıları .....                                       | 12    |
| 2.5. Nomex Bal Peteği Yapılarının İşlenebilirliği .....                    | 13    |
| 2.5.1. Geleneksel Yöntemlerle Nomex Bal Peteğinin İşlenmesi .....          | 13    |
| 2.5.1.1. Nomex Bal Peteği Yapıların Frezelenmesi .....                     | 13    |
| 2.5.2. Geleneksel Olmayan Yöntemlerle Nomex Bal Peteğinin İşlenmesi.....   | 13    |
| 2.6. Kompozit Malzemede Hasar Tipleri.....                                 | 14    |
| 2.6.1. Delaminasyon.....                                                   | 14    |
| 2.6.2. Kompozit Frezeleme İşleminde Delaminasyon .....                     | 14    |
| 2.6.3. Kompozit Frezeleme İşleminde Delaminasyon Faktörü.....              | 14    |
| 2.7. Kaynak Özetleri .....                                                 | 15    |
| 3. MATERYAL VE YÖNTEM .....                                                | 19    |
| 3.1. Materyal .....                                                        | 19    |
| 3.2. Aletler ve Cihazlar .....                                             | 19    |
| 3.2.1. Kesici Takımlar .....                                               | 19    |
| 3.2.2. CNC İşleme Merkezi.....                                             | 21    |
| 3.2.3. Kuvvet Ölçüm Cihazları .....                                        | 22    |
| 3.2.4. Görüntüleme Sistemleri .....                                        | 23    |
| 3.3. Yöntem.....                                                           | 23    |
| 3.3.1. Taguchi Deney Tasarımı .....                                        | 24    |
| 3.3.2. Kesme ve İlerleme Parametreleri .....                               | 24    |
| 3.3.2. Deney Düzeneği .....                                                | 25    |

|                                                                                                                                                  |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA.....                                                                                                          | 26 |
| 4.1. Kesme Kuvvetlerinin Ölçümü .....                                                                                                            | 26 |
| 4.2. Kanalların Mikroskop Altında İncelenmesi.....                                                                                               | 34 |
| 4.3. Delaminasyon Değerlendirmesi.....                                                                                                           | 36 |
| 5. SONUÇ VE ÖNERİLER .....                                                                                                                       | 39 |
| KAYNAKLAR .....                                                                                                                                  | 41 |
| EKLER.....                                                                                                                                       | 49 |
| EK 1 - Çizelge 4.1. X eksenindeki kesme kuvvetleri .....                                                                                         | 49 |
| EK 2 - Çizelge 4.2. Y eksenindeki kesme kuvvetleri .....                                                                                         | 49 |
| EK 3 - Çizelge 4.3. Z eksenindeki kesme kuvvetleri .....                                                                                         | 50 |
| EK 4 - Çizelge 4.4. RRFE060 kesici takım ve 2500 dev/dak fener mili hızı ile yapılan kanal açma işleminin sonucu üzerinde yapılan ölçümler ..... | 51 |
| EK 5 - Çizelge 4.5. RRFE060 kesici takım ve 7500 dev/dak fener mili hızı ile yapılan kanal açma işleminin sonucu üzerinde yapılan ölçümler ..... | 52 |
| EK 6 - Çizelge 4.6. RCFE060 kesici takım ve 2500 dev/dak fener mili hızı ile yapılan kanal açma işleminin sonucu üzerinde yapılan ölçümler ..... | 53 |
| EK 7 - Çizelge 4.7. RCFE060 kesici takım ve 7500 dev/dak fener mili hızı ile yapılan kanal açma işleminin sonucu üzerinde yapılan ölçümler ..... | 54 |
| EK 8 - Çizelge 4.8. Delaminasyon faktörleri ve maksimum kesilmemiş lif uzunlukları .....                                                         | 55 |

## ŞEKİLLER DİZİNİ

|                                                                                                                        | Sayfa |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Şekil 1.1. Bal peteği kompozit malzeme yapısı .....                                                                    | 2     |
| Şekil 2.1. Kompozit yapıdaki matris (reçine), takviye (lif) .....                                                      | 4     |
| Şekil 2.2. Elyaf takviyeli kompozitler .....                                                                           | 6     |
| Şekil 2.3. Temel elyaf takviyeleri .....                                                                               | 7     |
| Şekil 2.4. Parçacık takviyeli kompozitler .....                                                                        | 7     |
| Şekil 2.5. Katmanlı kompozitlerin oluşumu .....                                                                        | 8     |
| Şekil 2.6. Sandviç kompozitlerin yapısı .....                                                                          | 8     |
| Şekil 2.7. Bal peteği çekirdek yapılı sandviç kompozit.....                                                            | 9     |
| Şekil 2.8. Bal peteği çekirdek yapılı sandviç kompozitlerin önemli parametreleri .....                                 | 10    |
| Şekil 2.9. Bal peteği çekirdek yapılarının uzatılarak imal edilmesi .....                                              | 11    |
| Şekil 2.10. Bal peteği çekirdek yapılarının kıvrılarak imal edilmesi.....                                              | 11    |
| Şekil 2.11. Nomex lifi zincirinin moleküler halkası .....                                                              | 12    |
| Şekil 2.12. Frezeleme işleminde delaminasyon faktörü parametreleri .....                                               | 14    |
| Şekil 3.1. 185 mm x 118 mm x 10 mm Nomex kompozit malzeme .....                                                        | 19    |
| Şekil 3.2. RRFE 060 kesici takım görüntüleri .....                                                                     | 20    |
| Şekil 3.3. RCFE 060 kesici takım görüntüleri .....                                                                     | 21    |
| Şekil 3.4. Quaser MV154C dik işleme tezgâhı.....                                                                       | 22    |
| Şekil 3.5. Kistler 9257B, Kistler 5070S, Kistler 5697A.....                                                            | 22    |
| Şekil 3.6. Keyence VHX-900 mikroskop düzeneği.....                                                                     | 23    |
| Şekil 3.7. Deney düzeneği .....                                                                                        | 25    |
| Şekil 4.1. 2500 dev/dak fener mili hızında X ekseninde oluşan kesme kuvvetinin<br>ilerleme hızına göre değişimi. ....  | 26    |
| Şekil 4.2. 2500 dev/dak fener mili hızında Y ekseninde oluşan kesme kuvvetinin<br>ilerleme hızına göre değişimi. ....  | 27    |
| Şekil 4.3. 2500 dev/dak fener mili hızında Z ekseninde oluşan kesme kuvvetinin<br>ilerleme hızına göre değişimi. ....  | 28    |
| Şekil 4.4. 7500 dev/dak fener mili hızında X ekseninde oluşan kesme kuvvetinin<br>ilerleme hızına göre değişimi. ....  | 29    |
| Şekil 4.5. 7500 dev/dak fener mili hızında Y ekseninde oluşan kesme kuvvetinin<br>ilerleme hızına göre değişimi . .... | 29    |

|                                                                                                                           |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Şekil 4.6.</b> 7500 dev/dak fener mili hızında Z ekseninde oluşan kesme kuvvetinin ilerleme hızına göre değişimi. .... | 30 |
| <b>Şekil 4.7.</b> RRFE060 için X ekseninde oluşan kesme kuvvetinin ilerleme hızına göre değişimi. ....                    | 31 |
| <b>Şekil 4.8.</b> RRFE060 için Y ekseninde oluşan kesme kuvvetinin ilerleme hızına göre değişimi. ....                    | 31 |
| <b>Şekil 4.9.</b> RRFE060 için Z ekseninde oluşan kesme kuvvetinin ilerleme hızına göre değişimi. ....                    | 32 |
| <b>Şekil 4.10.</b> RCFE060 için X ekseninde oluşan kesme kuvvetinin ilerleme hızına göre değişimi ....                    | 33 |
| <b>Şekil 4.11.</b> RCFE060 için Y ekseninde oluşan kesme kuvvetinin ilerleme hızına göre değişimi. ....                   | 33 |
| <b>Şekil 4.12.</b> RCFE060 için Z ekseninde oluşan kesme kuvvetinin ilerleme hızına göre değişimi. ....                   | 34 |
| <b>Şekil 4.13.</b> 2500 dev/dak fener mili hızında oluşan delaminasyon faktörleri.....                                    | 36 |
| <b>Şekil 4.14.</b> 7500 dev/dak fener mili hızında oluşan delaminasyon faktörleri.....                                    | 37 |
| <b>Şekil 4.15.</b> RRFE060 kesici takımla işlemede oluşan delaminasyon faktörleri .....                                   | 37 |
| <b>Şekil 4.16.</b> RCFE060 kesici takımla işlemede oluşan delaminasyon faktörleri. ....                                   | 38 |

## ÇİZELGELER DİZİNİ

|                                                                                                                                                     | Sayfa |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Çizelge 3.1. Seçilen Nomex balpeteği kompozit sandviçin özellikleri .....                                                                           | 19    |
| Çizelge 3.2. Seçilen kesici takımların özellikleri.....                                                                                             | 21    |
| Çizelge 3.3. Keyence VHX-900 mikroskop özellikleri .....                                                                                            | 23    |
| Çizelge 3.4. Deney parametreleri.....                                                                                                               | 25    |
| Çizelge 4.1. Nomex kompozit malzemede açılan kanallarda oluşan deformasyonlarının<br>50 kat büyütülmüş görüntüleri .....                            | 35    |
| EK 1 - Çizelge 4.1. X eksenindeki kesme kuvvetleri.....                                                                                             | 49    |
| EK 2 - Çizelge 4.2. Y eksenindeki kesme kuvvetleri.....                                                                                             | 49    |
| EK 3 - Çizelge 4.3. Z eksenindeki kesme kuvvetleri .....                                                                                            | 50    |
| EK 4 - Çizelge 4.4. RRFE060 kesici takım ve 2500 dev/dak fener mili hızı ile yapılan<br>kanal açma işleminin sonucu üzerinde yapılan ölçümler.....  | 51    |
| EK 5 - Çizelge 4.5. RRFE060 kesici takım ve 7500 dev/dak fener mili hızı ile yapılan<br>kanal açma işleminin sonucu üzerinde yapılan ölçümler.....  | 52    |
| EK 6 - Çizelge 4.6. RCFE060 kesici takım ve 2500 dev/dak fener mili hızı ile yapılan<br>kanal açma işleminin sonucu üzerinde yapılan ölçümler.....  | 53    |
| EK 7 - Çizelge 4.7. RCFE060 kesici takım ve 7500 dev/dak fener mili hızı ile yapılan<br>kanal açma işleminin sonucu üzerinde yapılan ölçümler ..... | 54    |
| EK 8 - Çizelge 4.8. Delaminasyon faktörleri ve maksimum kesilmemiş lif<br>uzunlukları.....                                                          | 55    |

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

|                        |                                                              |
|------------------------|--------------------------------------------------------------|
| <b>AJW</b>             | : Aşındırıcı su jeti                                         |
| <b>CFRP</b>            | : Karbon elyaf takviyeli polimer kompozit                    |
| <b>CNC</b>             | : Bilgisayarlı nümerik kontrol                               |
| <b>CVD</b>             | : Kimyasal buhar biriktirme                                  |
| <b>DAQ</b>             | : Dijital bilgi edinim sistemi                               |
| <b>dev/dak</b>         | : Devir/dakika                                               |
| <b>DIN</b>             | : Alman Standartları Enstitüsü                               |
| <b>F<sub>d</sub></b>   | : Delaminasyon faktörü                                       |
| <b>F<sub>x</sub></b>   | : X eksenini doğrultusunda oluşan kesme kuvveti              |
| <b>F<sub>y</sub></b>   | : Y eksenini doğrultusunda oluşan kesme kuvveti              |
| <b>F<sub>z</sub></b>   | : Z eksenini doğrultusunda oluşan kesme kuvveti              |
| <b>GFRP</b>            | : Cam elyaf takviyeli polimer kompozit                       |
| <b>HSS</b>             | : Yüksek hız çeliği                                          |
| <b>m/dak</b>           | : Metre/dakika                                               |
| <b>mm/dak</b>          | : Milimetre/dakika                                           |
| <b>USTC</b>            | : Amerika Birleşik Devletleri Uluslararası Ticaret Komisyonu |
| <b>W</b>               | : Kanal genişliği                                            |
| <b>W<sub>max</sub></b> | : En geniş hasarlı kanal genişliği                           |

# ÖZET

## Yüksek Lisans Tezi

### Nomex (Bal Peteği) Kompozit Malzemesinin Frezelenmesinin Araştırılması

Mehmet Esad Nacar

Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Gültekin BASMACI

Temmuz, 2024

Kompozit malzemeler, çeşitli yapısal özelliklere sahip iki veya daha fazla malzemenin birleşimiyle oluşturulan malzemelerdir. Bu tür malzemeler genellikle bir matris ve güçlendirici lifler veya dolgu maddeleri içerir. Kompozitlerin özellikleri, kullanılan bileşenlerin türüne ve düzenlenmesine bağlı olarak değişkenlik gösterir. Nomex, bal peteği yapısında üretilen ve havacılık, uzay, denizcilik, otomotiv gibi sektörlerde sıkça tercih edilen bir malzemedir. Yüksek mukavemet, hafiflik ve yanmazlık gibi üstün nitelikler sunar. Çekirdek yapısı kare prizma, altıgen prizma gibi farklı geometri ve boyutlarda üretilebilir, ancak anizotropik yapıları nedeniyle işlenmeleri zordur. Bu tür kompozitler genellikle perçin ve cıvata gibi bağlantı elemanlarıyla birleştirilir ve CNC frezeleme işlemi ile bağlantı yuvaları veya istenen yüzeyler oluşturulur.

Bu araştırmada, CNC frezeleme işlemi sırasında meydana gelen kesme kuvvetleri ve işlem sonrası oluşan delaminasyonlar incelenmiştir. Araştırmanın amacı, en uygun kesici takım geometrisi, fener mili hızı ve ilerleme hızını belirlemektir. Deneylerde cam lif prepreg kaplı Nomex balpeteği sandviç malzeme kullanılmış, helisel üç ağızlı (RRFE060) ve iki ağızlı kırıcı tip (RCFE060) kesici takımlarla çalışılmıştır. Farklı ilerleme hızları (150, 300, 450, 600, 750 mm/dk) ve fener mili hızları (2500, 7500 dev/dk) kullanılarak kanal açma yöntemi uygulanmıştır. Kesme kuvvetleri dinamometre ile ölçülmüş ve açılan kanalların görüntüleri üzerinden delaminasyon sonuçları değerlendirilmiştir. Genel olarak, fener mili hızı 7500 dev/dk iken kesme kuvvetlerinin ve kesilmemiş lif sayısının belirgin şekilde azaldığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, ilerleme hızı arttıkça delaminasyonların arttığı ve kesme kuvvetlerinin yükseldiği görülmüştür. RRFE060 kesici takımla yapılan işlemede, RCFE060'a kıyasla daha yüksek kesme kuvvetleri elde edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** kompozit malzeme, nomex bal peteği, işlenebilirlik, frezeleme, kesme kuvvetleri, delaminasyon

Hazırlanan bu Yüksek Lisans tezi Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü tarafından 0947-YL-23 proje numarası ile desteklenmiştir.

# **ABSTRACT**

**M.Sc. Thesis**

## **Investigation of Milling Nomex (Honeycomb) Composite Material**

**Mehmet Esad Nacar**

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

**Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Gültekin Basmacı**

**July, 2024**

Composite materials are created by combining two or more materials with different structural properties. These materials typically consist of a matrix and reinforcing fibers or fillers. The properties of composites vary depending on the choice and arrangement of the components used. Nomex, produced in a honeycomb geometry, is widely preferred in sectors such as aerospace, aviation, marine, and automotive due to its high strength, light weight, and flame resistance. The core structure can be manufactured in various geometries and sizes, such as square prism or hexagonal prism, but their anisotropic nature makes machining processes quite complex. These types of composites are usually assembled using fasteners like rivets and bolts. CNC milling is performed to create slots for fasteners or to achieve a desired surface.

In this research, the cutting forces and delaminations that occur during the CNC milling process were examined. The aim of this study is to determine the most suitable cutting tool geometry, spindle speed, and feed rate. The experiments used glass fiber prepreg-coated Nomex honeycomb sandwich material and were conducted with helical three-flute (RRFE060) and two-flute chip breaker type (RCFE060) cutting tools. The processes were carried out using different feed rates (150, 300, 450, 600, 750 mm/min) and spindle speeds (2500, 7500 rpm) with the slotting method. Cutting forces were measured using a dynamometer, and delamination results were evaluated based on images of the cut slots. Generally, it was observed that at a spindle speed of 7500 rpm, the cutting forces and the number of uncut fibers significantly decreased. Additionally, as the feed rate increased, delaminations became more frequent, and cutting forces increased. The cutting forces were higher with the RRFE060 cutting tool compared to the RCFE060 tool.

**Keywords:** composite material, nomex honeycomb, machinability, milling, cutting forces, delamination

The present M.Sc. Thesis was supported by Burdur Mehmet Akif Ersoy University Scientific Research Projects Coordinatorship under the project number of 0947-YL-23.

# 1. GİRİŞ

Günümüz mühendislik uygulamalarında, yüksek performanslı malzemelerin kullanımı her geçen gün artmakta ve bu malzemeler, özellikle havacılık, otomotiv ve inşaat sektörlerinde kritik roller üstlenmektedir. Malzeme seçimi ve kullanımı, tarih boyunca insanlığın teknolojik ve kültürel gelişiminin temel taşlarından birini oluşturmuştur. Çağlar boyu çevresindeki materyalleri kendi amacına yönelik şekillendiren ve kullanan insanoğlu, malzeme biliminde hatırı sayılır mesafeler kat etmiştir. Bu alandaki sürekli gelişmeler, mühendislik uygulamalarını dönüştürmekte ve daha etkileyici çözümler sunmaktadır. Malzeme bilimindeki süregelen bu gelişmeler, bilimsellik adına, malzemeleri çeşitli sınıflara ayırma ihtiyacını doğurmuştur. Bu sınıflar en temelde şu şekildedir:

- Metaller
- Seramikler
- Polimerler
- Kompozit malzemeler

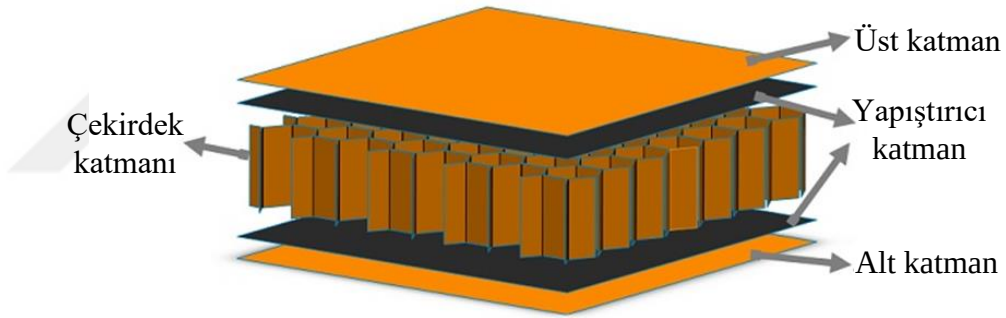
Metal, seramik ve polimer malzemeler, zaman içinde sınırları zorlayan teknolojik gelişmelere yeterince iyi cevap veremedikleri için kompozit malzemelere olan ihtiyaç ortaya çıkmıştır (Godara vd., 2021). Kompozit malzemeler, iki yahut daha fazla malzeme bileşeni makro düzeyde bir araya getirilerek elde edilir (Lal vd., 2024). Ortaya çıkan kompozit malzeme bileşenlerinin oluşturduğu sinerjiden dolayı genellikle daha farklı ve gelişmiş fiziksel, kimyasal veya mekanik özelliklere sahip olur. Mukavemet, yorulma, darbe dayanımı, yoğunluk, hafiflik, termal direnç, elektrik iletkenliği, aşınma ve korozyon direnci gibi konularda daha iyi performans ve işlevsellik sunan kompozit malzemeler; inşaat, otomotiv, denizcilik, havacılık ve uzay sanayii gibi öncü ve uç sektörler başta olmak üzere geniş bir uygulama yelpazesine sahiptir (Windhorst ve Blount, 1997; Ogawa ve Masuda, 2021).

Birçok sektörde avantajlarından ötürü kullanılmasına karşın kompozit malzemelerin dezavantajları da vardır (Choi vd., 2009). İmalat sürecinin daha masraflı olması kompozit malzemelerin dezavantajlarının başında gelir (Goh vd., 2006; Choi vd., 2008). Bunun yanı sıra kompozit malzemelerin darbe davranışı ve hasar mekanizmaları daha karmaşıktır. Bu nedenle üzerine arge faaliyetleri yapılmasını gerekli kılar. Dış koşullardan gereğinden fazla etkilenen bazı kompozit malzemeler de aynı şekilde arge çalışmaları gerektirir (Ibekwe vd., 2007; Hawyes vd., 2001; Ju vd., 2020). Kompozit

malzemelerin bir dezavantajı da kullanıma hazır hale gelebilmesi için ikincil bir işleme ihtiyaç duymasıdır. Bu ikincil işlem genellikle talaş kaldırma işlemidir (Grilo vd., 2013).

Kompozit malzemelerin montajında bağlantı elemanı olarak pim, perçin ve cıvata yaygın olarak kullanılmaktadır (Xi vd., 2016). Bu bağlantıları sağlayabilmek için oldukça sık kullanılan delme işleminin (Brinksmeier, 1990; Morkavuk vd. 2024) yanı sıra frezeleme işlemi de gerek montaj için gerekse istenilen yapıyı elde etmek için oldukça tercih edilen talaş kaldırma işlemleridir (Yuanyushkin vd., 2014; Geng vd., 2015; Yazman vd., 2020).

Çeşitli yapılarda birleştirilerek oluşturulan kompozit malzemelerin yaygın olarak kullanılan bir çeşidi ise bal peteği yapılardır. Petekli yapıda üretilmiş çekirdek katmanının yapıştırıcı yardımıyla üst ve altına plakalar yerleştirilerek bütün haline getirilir ve bu şekilde kullanıma sunulur (Oiwa vd., 2021). Şekil 1.1’de bal pateği yapıli kompozit malzeme şematik olarak görölmektedir. Bal peteği (honeycomb) yapılar çoğunlukla özgül dayanımı yüksek olması nedeniyle tercih edilir (Wang vd., 2011).



**Şekil 1.1.** Bal peteği kompozit malzeme yapısı

Bal peteği yapılarda arzulanan özelliklere göre birçok malzeme ve geometri kullanılabilir. İlk kez Amerika Birleşik Devletleri menşeli bir firma olan Dupont, aramid malzeme kullanarak Nomex isimli bal peteği yapıdaki kompozit malzemeyi üretmiştir. Lifli yapıda olan Nomex’in üretimi ihtiyaca binaen; hücre yapısı, hücre boyutları, malzeme özellikleri gibi parametreler değiştirilerek gerçekleştirilebilir (Prasad ve Carlsson, 1994; Dinesh vd., 2018; Okur vd., 2018; Kier ve Waas, 2018; Kıyak ve Kaman, 2018).

Nomex, malzemeler arasında öne çıkan, termal ve kimyasal direnci yüksek, alev almaz ve yüksek mekanik dayanıklılığa sahip bir aramid liftir. Nomex, özellikle yüksek sıcaklık ve aşınma koşullarına maruz kalan uygulamalarda tercih edilirken, işlenebilirliği

mühendislik açısından önemli bir araştırma konusudur (Kirkwood, 1977; Kleinheinz ve T'ien, 2007).

Nomex malzemesinin işlenmesi, geleneksel metal işleme teknikleriyle karşılaştırıldığında önemli farklılıklar göstermektedir (Zarrouk vd., 2021). Bu farklılıklar, malzemenin kendine özgü yapısal özelliklerinden kaynaklanmakta olup, işleme sürecinin optimizasyonunu zorunlu kılmaktadır (Jaafar vd., 2017). Frezeleme, Nomex gibi kompozit malzemelerin şekillendirilmesi için yaygın olarak kullanılan bir işleme yöntemidir. Ancak, bu süreç sırasında malzemenin ısı ve mekanik özellikleri üzerinde oluşabilecek etkiler ve işleme hataları, malzemenin uygulama alanlarının performansını doğrudan etkileyebilir (Zarrouk vd., 2023; Zarrouk vd., 2024).

Lifli yapıdaki kompozit malzemelere, delme ve frezeleme gibi geleneksel işleme yöntemleri uygulandığında çeşitli hatalar meydana gelmektedir (Daniel ve Ishai, 2007) ve bu da malzemenin mekanik özelliklerinde zayıflamalara yol açmaktadır (Ovesy vd., 2012). Bu hatalardan birisi de delaminasyondur, yapıştırıcı bağın kopmasıyla ve malzemeyi oluşturan katmanların birbirinden ayrılmasıyla oluşur (Altus ve Ishai, 1986; Okada, 2002). Bu çalışmada, işleme sırasında kesici takım, fener mili hızı ve ilerleme hızı parametrelerinin kesme kuvvetleri ve delaminasyona etkisi incelemek amaçlanmıştır.

Bu tez çalışması, Nomex malzemesinin frezelenmesi sürecini incelemekte, işleme parametrelerinin malzemenin yapısal bütünlüğü ve üzerinde oluşan hasarlar üzerindeki etkilerini analiz etmektedir. Bu çalışma; işleme sonrasında oluşan deformasyonları, talaş kaldırma esnasındaki kesme kuvvetlerini ve giriş parametrelerinin bunlar üzerindeki etkilerini ele alacaktır. Bu analizler, Nomex malzemesinin daha etkin şekilde kullanılabilmesi için işleme parametrelerinin optimizasyonuna katkıda bulunmayı amaçlamaktadır.

## 2. TEMEL KAVRAMLAR

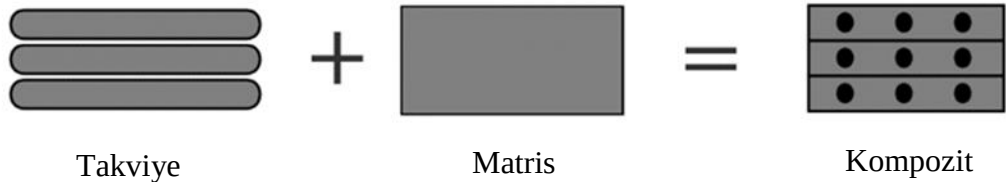
### 2.1. Kompozit Malzemelerin Özellikleri

Kompozit malzemelerin kullanımı günümüzde oldukça yaygındır ve daha da yaygınlaşmaktadır. Kompozit malzemeler farklı özelliklere sahip iki veya daha fazla bileşenin genellikle makro düzeyde bir araya gelmesiyle oluşur. Ortaya çıkan malzeme bir araya gelen bu bileşenlerden daha iyi özellikler ortaya koymaktadır (Hsissou vd., 2021). Metal alaşımlara göre daha iyi sertlik, mekanik dayanım; daha yüksek korozyon direnci, yorulma direnci, özgül mukavemet değerlerine sahip olabildiği bilinmektedir (Bielawski vd., 2015; Zhang vd., 2018).

#### 2.1.1 Kompozit Malzemelerin Yapısal Özellikleri

Kompozit malzemeleri oluşturan bileşenlere matris ve takviye adları verilir. Matris malzemesi toplam içeriğin %10 ila %80'ini oluşturur. Takviye elemanları arasındaki boşluğu doldurur ve yapısal bütünlüğü sağlar; bağlayıcı, koruyucu, gerilimi takviye üzerine dağıtıcı özellikler gösterir (Skoczylas vd., 2019). Kompozitin dayanım, tokluk ve süneklik gibi özellikleri sisteme katılan matris malzemeyle doğrudan ilişkilidir.

Takviye elemanı matris içinde dağılmış halde bulunan lif, parçacık veya tabakalardan oluşur. Kompozit malzeme; ses ve ısı yalıtkanlığının iyi olması, dayanımının ve sertliğinin yüksek olması gibi özelliklerini takviye elemanından alır (Peters, 2013; Thomas vd., 2016). Şekil 2.1'de kompozit malzemenin bileşenleri görülmektedir. Elde edilen bu yeni malzeme heterojen ve anizotropik yapıdadır (Rod vd., 2019).



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

### **2.1.2 Kompozitlerin Matris Malzemeye Göre Sınıflandırılması**

Kompozitlerin matris yapıları metal, seramik veya polimer malzemeler seçilerek oluşturulabilir. Elde edilmek istenen özelliklere göre malzeme seçmek önem arz etmektedir.

#### **2.1.2.1 Metal Matrisli Kompozitler**

Metallerin matris malzemesi olarak seçildiği kompozitlere metal matrisli kompozitler denir. Mukavemet ve yorulma direncinin yüksek olması ve/veya yüksek sıcaklığa sahip bir ortamda kullanılacak bir malzeme elde edilmek istendiğinde metal matrisli kompozitler tercih edilir. Metallerin matris malzemesi olarak kullanılmasıyla beraber süneklik, işlenebilirlik, iletkenlik gibi özellikler de kompozit malzemenin avantajları arasında yer alır (Xavior ve Kumar, 2017).

Alüminyum, magnezyum ve bakır gibi metaller; özgül dayanımlarının yüksek olmaları sebebiyle araştırmalarda ve üretimde öncelikli tercih edilmişlerdir. Özellikle alüminyum ve magnezyum, işlenebilirlikleri ve düşük yoğunluklu olmaları sebebiyle daha ön plandadır. Yeterli çözünürlüğe sahip olmalarından dolayı silikon ve çinko gibi metaller de alaşımlarda ve kompozitlerde kullanılabilir (Thakur vd., 2007; Lu vd., 2013; Poovazhagan vd., 2013).

İki veya daha fazla takviye elemanı ile güçlendirilerek oluşturulan metal matrisli kompozitlere de hibrit metal matrisli kompozitler denir (Esawi vd., 2010).

#### **2.1.2.2 Seramik Matrisli Kompozitler**

Seramikler metal ve metal olmayan malzemelerden oluşan ve inorganik malzemelerdir. Öne çıkan özellikleri ısı geçirgenliğinin düşük olması ve yapısını kaybetmeden yüksek sıcaklıklara dayanabilmesidir. Bunların yanı sıra elektrik iletkenlikleri ve yoğunlukları düşüktür, aşınma ve korozyon dirençleri yüksektir. En büyük dezavantajları ise kırılganlıklarıdır. Bu kırılganlık özelliklerini dengeleyecek ve yüksek performans gösterdikleri özellikleri ön plana çıkaracak şekilde takviye edilerek seramik matrisli kompozit malzemeler üretilmektedir. Genellikle lif takviye elemanlarıyla güçlendirilip kullanıma hazır hale getirilir ancak üretim maliyetleri çok yüksektir (Rosso, 2006; Ghosh, 2015).

### 2.1.2.3 Polimer Matrisli Kompozitler

Polimerler kendilerine; paketleme malzemelerinden inşaatlardaki hafif yapı malzemelerine, havacılık sektöründen otomotiv sektörüne, biyomedikalden su arıtımına kadar çok geniş bir yelpazede kullanım alanı bulurlar (Du vd., 2019; Hsissou vd., 2021). Polimer matrisli kompozitlerin avantajları arasında üretim kolaylığı, düşük yoğunlukları ve iyi mekanik özellikleri vardır ancak bunların yanı sıra dezavantaj olarak ısı dayanımlarının azlığı ve yüzey çizilmelerine görece daha açık olmaları sayılabilir (Cheng vd., 2020). Ayrıca çevre dostu ve biyobozunur olmaları da yaygınlaşmalarında büyük rol oynamıştır (Devnani ve Sinha, 2019).

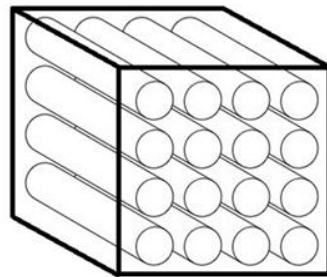
Polimerler termoset ve termoplastik olarak iki sınıfta incelenirler. En yaygın kullanılan termosetlere örnek olarak doymamış polyester, epoksi reçine, fenolformaldehit verilebilirken termoplastiklere polietilen, poliolefin, polivinilklorür ve polistiren örnek olarak verilebilir (Pickering vd., 2016).

### 2.1.3. Takviye Türlerine Göre Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

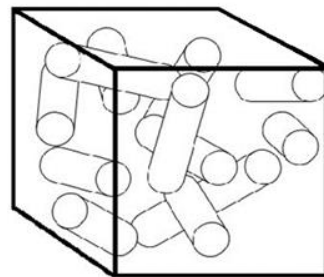
Kompozit malzemeler takviye elemanlarına göre sınıflandırıldıklarında elyaf takviyeli, parçacık takviyeli, katmanlı ve hibrit kompozit olmak üzere dört temel sınıfa ayrılırlar.

#### 2.1.3.1. Elyaf Takviyeli Kompozitler

Matris yapısının içinde yayılmış lifler bulunan kompozit malzemelere elyaf takviyeli kompozitler denir. Bu lifler uzun ya da kısa; sürekli, süreksiz ya da dokunmuş halde bulunabilir. Şekil 2.2’de sürekli ve süreksiz elyaf takviyeli kompozitlerin yapısı gösterilmiştir (Sahu, 2014).



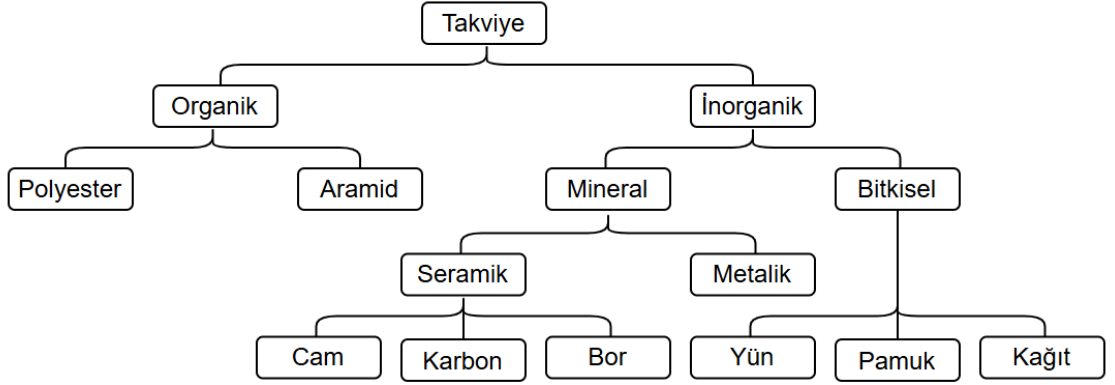
Sürekli elyaf takviyeli kompozit



Süreksiz elyaf takviyeli kompozit

**Şekil 2.2.** Elyaf takviyeli kompozitler

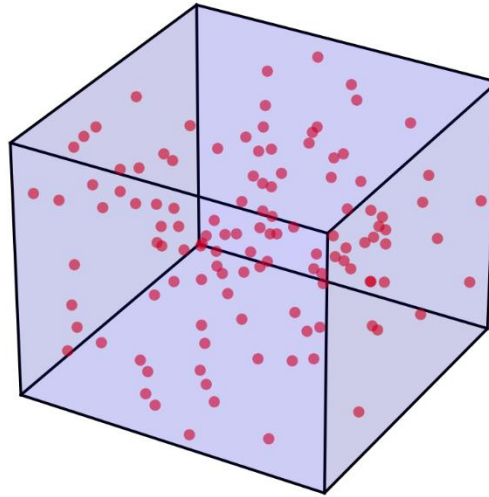
Takviye elemanı olarak kullanılan lifler doğal ya da yapay çeşitli malzemelerden seçilebilir (Prashanth vd., 2017; Li vd., 2018). Şekil 2.3'te takviye olarak kullanılan temel elyaflar verilmiştir (Hsissou vd.,2021)



Şekil 2.3. Temel elyaf takviyeleri

#### 2.1.3.2.Parçacık Takviyeli Kompozitler

Matris malzemesinin; içinde çözünmeyen, rasgele dağılmış parçacıklarla takviye edilmesiyle oluşan kompozit malzemelere parçacık takviyeli kompozit malzeme denir. Üretimi için kullanılan birçok yöntem vardır (Lloyd, 1994; Xavior ve Kumar, 2017). Şekil 2.4'te parçacık takviyeli kompozitlerin şematik gösterimi verilmiştir.

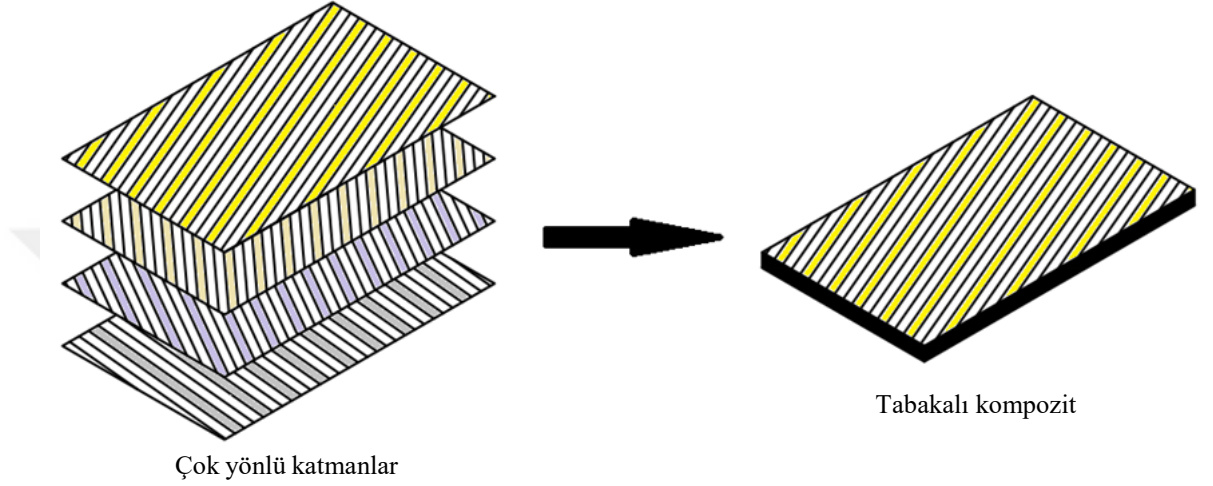


Şekil 2.4. Parçacık takviyeli kompozitler

#### 2.1.3.3.Katmanlı Kompozitler

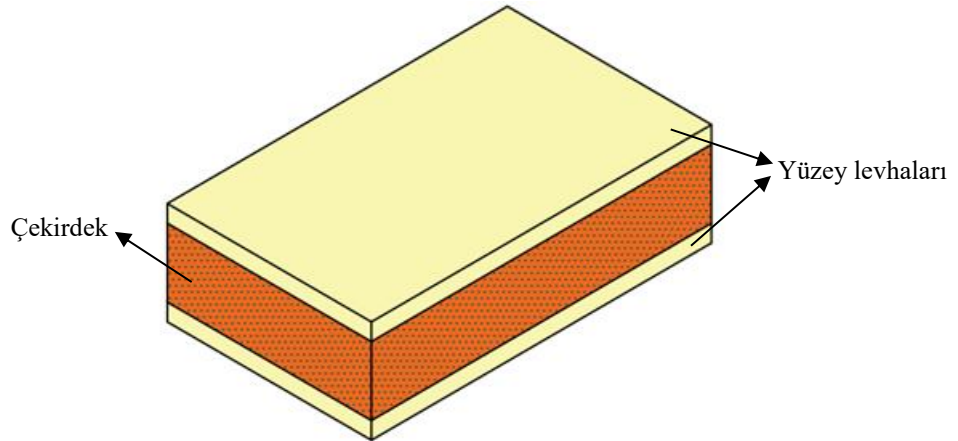
Değişen yönlerde uzanan lifli yapıların veya kumaşların tabakalar halinde istiflenmesiyle oluşan kompozitlere katmanlı kompozit malzemeler denir. Tabakalı ya da lamine kompozit adıyla da bilinirler. Şekil 2.5'te katmanlı kompozitlerin oluşturulması

şematik olarak gösterilmiştir. Hafif ve yüksek dayanımlı olmalarından dolayı havacılıkta ve uzay araçlarında sıkça kullanılırlar (Abrate, 1994; He vd., 2000). İstenilen şekilde imalatının diğer yöntemlere göre kolay olması tercih edilmelerini sağlar ancak hasar mekanizmalarının karmaşık olması dezavantajlı bir durum oluşturur. Liflerin kopması, matris malzemesinin kırılması ve katmanların birbirinden ayrılması gibi durumlar söz konusu olabilir (Nikbakt vd., 2018).



**Şekil 2.5.** Katmanlı kompozitlerin oluşumu

Katmanlı kompozitlerin bir diğer çeşidi ise sandviç kompozitlerdir. İki ince levha (facesheet) arasında çekirdek (core) yapısının birleştirilmesiyle oluşur. Yüzey levhaları dayanımı yüksek malzemelerden de seçilebilir ancak malzemenin asıl mukavemetini aldığı yer çekirdek yapısıdır (Librescu ve Hause, 2000). Şekil 2.6’da sandviç kompozitlerin yapısı şematik olarak gösterilmiştir.



**Şekil 2.6.** Sandviç kompozitlerin yapısı

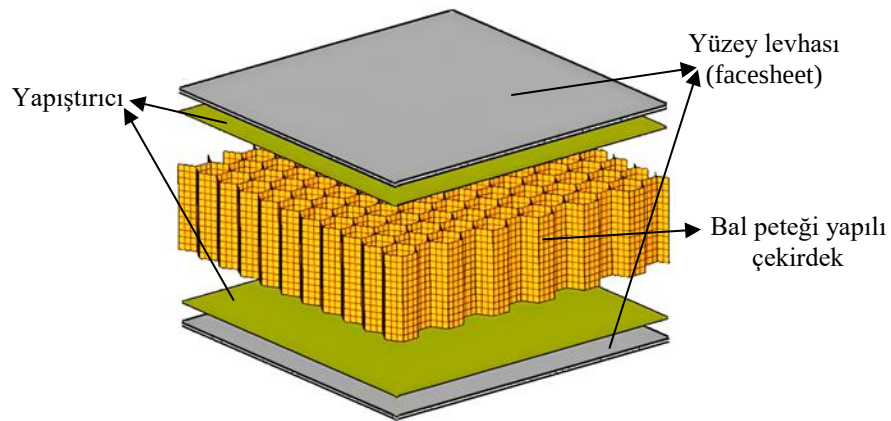
Sandviç kompozitlerde çekirdek malzemesi olarak hafif malzemeler seçilir veya adına hücre denilen içi boş prizma kesitli bir yapı benimsenir (Suresh, 2020). Bundan dolayı hacminin çoğunun boşluktan oluşması sebebiyle yoğunluğu düşüktür. Aynı zamanda eğme mukavemeti, darbe dayanımı gibi üstün özellikler göstermektedir (Hohe ve Librescu, 2004). Bunlara karşın üretim maliyeti yüksektir, anizotropik yapıları nedeniyle kolay işlenemezler ve onarılmaları güçtür (Zhou vd., 2021).

#### 2.1.3.4.Hibrit Kompozitler

Birden fazla çeşit takviye elemanı bulunduran kompozitlere hibrit kompozit denir. Bir takviye elemanı ile oluşturulan kompozitin muhtelif özelliklerinin daha da iyileştirilmesi amaçlanır (Le Guen vd., 2016). Ek olarak gelen takviye elemanı ile beraber hasar mekanizmaları daha da karmaşılaşır ancak böylelikle istenilen spesifik özellikler elde edilebilir, yorulma dayanımı gibi özellikler artırılabilir (Chen ve Gao, 2019).

#### 2.2. Bal Peteği Yapılar

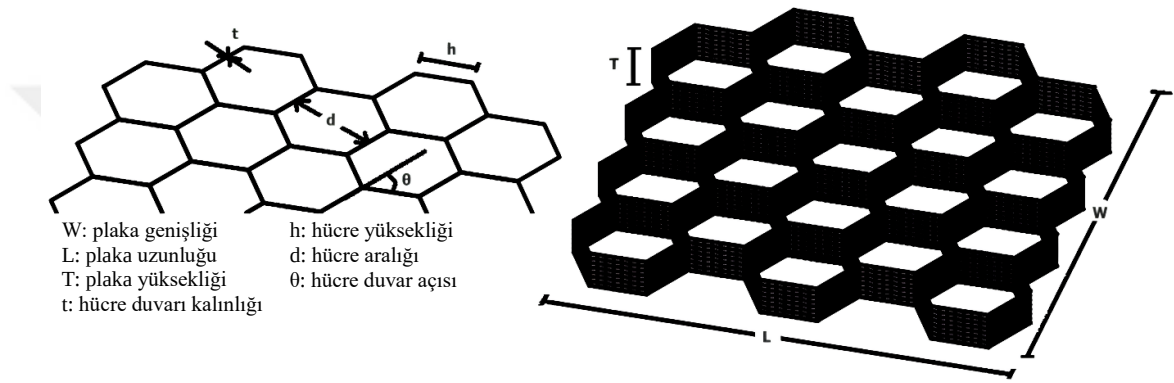
Kompozit malzemelerin cazibesi özgül dayanımının yüksek olmasıdır. Bu özelliği daha da pekiştirmek amacıyla sandviç kompozitlerde hücreli boşluklu yapılar tercih edilmektedir. Bu boşluklu yapıyı oluşturmak için farklı yöntemler kullanılarak ince levhalar işlenir. Çeşitli hücre kesiti geometrileri olmasına rağmen genel olarak Yapı itibarıyla arıların yaptığı bal peteklerine benzemesi sebebiyle bu yapılara bal peteği kompozitler denmektedir. Çekirdek tabakası olarak kullanılan bal peteği hücrelerinin içi gerekirse köpük malzemelerle doldurulabilir. Tek başına kararlı bir yapı göstermeyen bu çekirdek katmanının üst ve alt yüzeyine yüzey plakaları yapıştırıcılar yardımıyla yerleştirilir. Şekil 2.7’de bal peteği kompozitlerin yapısı verilmiştir (Xie vd., 2020).



Şekil 2.7. Bal peteği çekirdek yapılı sandviç kompozit

Bal peteği malzeme, mekanik özelliklerini çoğunlukla çekirdek katmanından alır. Çekirdek katmanında düzgün veya düzgün olmayan altıgen, kare, dikdörtgen, eşkenar dörtgen, elipsoid, yumurta kolisi, zigzag geometrileri tercih edildiği gibi malzeme olarak köpük, bakır, alüminyum, kağıt, nomex gibi materyaller seçilebilir.

Bal peteği yapılar özellikle hava ve uzay araçları otomatik gibi hafifliğin ön planda olduğu sektörlerde ağırlıklı olarak kullanılmaktadır. Darbe sönümleme özelliği olması sebebiyle gövde yapıları üzerinde kullanıldığı sıkça görülür. Şekil 2.8’de (Foo vd., 2007) altıgen prizma geometrisindeki bal peteği çekirdek yapısı için önem arz eden ( $t$ ,  $h$ ,  $d$ ,  $\theta$ ,  $T$ ,  $L$ ,  $W$ ) gibi yapısal parametreler görülebilmektedir.



**Şekil 2.8.** Bal peteği çekirdek yapılı sandviç kompozitlerin önemli parametreleri

Şekil 2.7’de görülen ve yapıştırıcı katman sayesinde çekirdek katmanı ile bütünlüğu sağlanan alt ve üst katmanların işlevi, eğilme ve kayma direnci oluşturarak yapıyı stabil hale getirmektir. Bu katmanlar metal, metal alaşım, karbon, ahşap, kağıt veya lif takviyeli kompozitlerden oluşabilir. Bu katmanlar aynı zamanda yapıyı dış etkenlerden koruyarak malzemenin bozulmasını da önlemektedir.

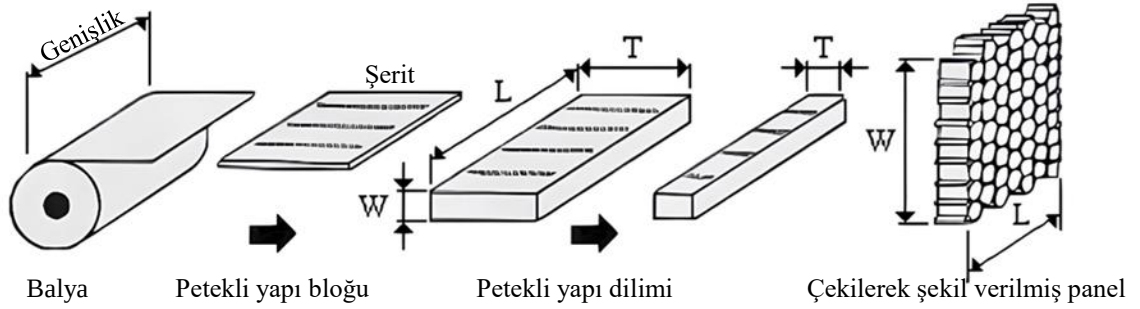
### 2.2.1. Bal Peteği Yapıların Formlandırılması

Bal peteği malzemelerin imalatında sıklıkla kullanılan iki yöntem vardır. Bunlar uzatma yöntemi ile şekillendirme ve bükme yöntemi ile şekillendirme.

#### 2.2.1.1 Uzatma Yöntemi ile Şekillendirme

Şeritler halinde kesilen levhalara yapıştırıcı uygulanır. İstiflenenen levhalar preslerle yüksek sıcaklıklarda istenen forma getirilir. İstenen kalınlıkta dilimlendikten sonra kalıplarda çekilerek petek şekli verilmiş olur. Malzeme metal bazlı değilse önceden

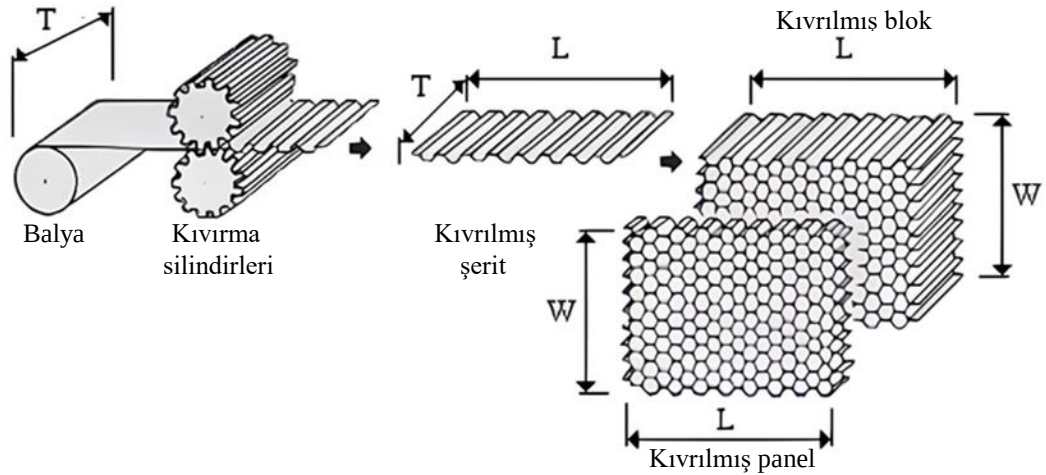
reçineye daldırılarak kalıplarda belli bir süre bekletilir. Şekil 2.9’da imalat süreci görülebilir (Arslan ve Kaman, 2002).



**Şekil 2.9.** Bal peteği çekirdek yapılarının uzatılarak imal edilmesi

### 2.2.1.2 Kıvrırma Yöntemiyle Şekillendirme

Bu yöntem genelde et kalınlığı fazla ve malzeme yoğunluğu yüksek olan durumlarda kullanılır. Levhalar yine şeritler halinde kesilerek istenen formda kıvrılır. Bir sonraki şerit hizalanarak düğüm noktalarına bağlanır. Bu sırada punta kaynak, yapıştırıcı gibi bağlantı metotları kullanılabilir. İsteğe bağlı olarak ek işlemler (ısıl işlem vb.) uygulanabilir. Şekil 2.10’da imalat süreci görülebilir (Arslan ve Kaman, 2002).



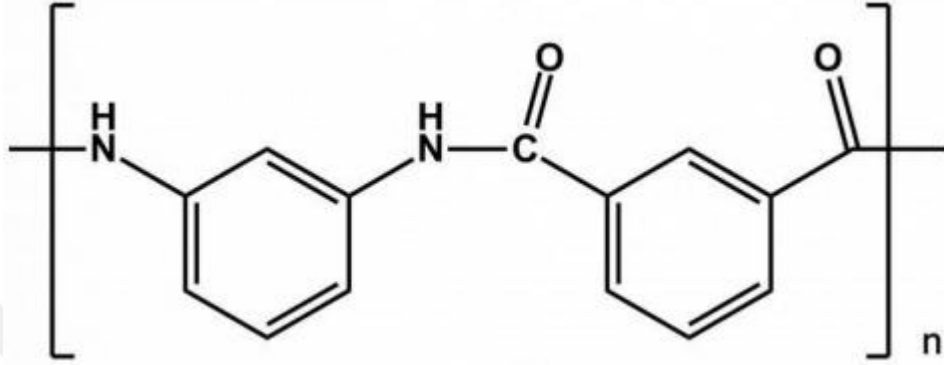
**Şekil 2.10.** Bal peteği çekirdek yapılarının kıvrılarak imal edilmesi

## 2.3. Nomex

Amerika Birleşik Devletleri Uluslararası Ticaret Komisyonu (USTC) tarafından 1974’te aromatik poliamidlere aramid ismi verilmiştir, günümüzde naylon da

denmektedir. Yüksek dayanımlı kompozit malzemelerin yapımında ilk kullanılan malzeme olma özelliği taşımaktadır (Çelikkanat, 2002).

ABD menşeli DuPont firması aramid lifi ticarileştirerek ilk defa 1960'ların başlarında piyasaya sürmüştür. Bir meta-aramid olan bu malzemenin adı Nomex'tir. Günümüze kadar uzun yıllar geçmiş olmasına karşın DuPont'la beraber aramid tedarikçisi olarak hala sayılı firma bulunmaktadır.



**Şekil 2.11.** Nomex lifi zincirinin moleküler halkası

Aramid zincirinin tek halkası Şekil 2.11'de görülebilen Nomex'in yüksek ısı ve tutuşma direnci, çekme mukavemeti, darbe direnci gibi özelliklerinin yanı sıra düşük yoğunlukta olması giyilebilir ve donanılabılır kişisel koruyucu ekipman yapımında kullanılmasını tetiklemiştir. Ayrıca fenolik reçineli bal peteği formunda çekirdek malzemesi olarak kullanılmıştır ve bu oluşan kompozit malzeme uzay ve hava araçlarında, denizcilikte ve otomotivde tercih edilmiştir (Foo vd., 2007).

#### **2.4. Nomex Bal Peteği Yapıları**

Nomex bal peteği, bir meta-aramid olan nomex liflerinin fenolik reçineye daldırılıp şeritlerin birleştirilmesiyle imal edilir. Bir tür sentetik polimer olan fenolik reçine ısı, elektrik direnciyle ve mekanik dayanımıyla yapıştırıcı görevini üstlenirken aynı zamanda Nomex'in yapısını da destekler. Daha çok uzatma yöntemiyle şekil verilir, yapıştırma sonrasında kürlenir. Nomex 1,6-19 mm arası hücre boyutlarına, 29-144 kg/m<sup>3</sup> arası yoğunluğuna sahip olacak şekilde üretilmektedir. Hücre duvar kalınlığı ise 50-130 mikron arasında değişebilir. Üretim maliyetlerinin fazla olması nedeniyle tasarımlarda genellikle tekdüze kalınlığa sahip hazır parçalar kullanılmaktadır. Havacılıkta zemin, dümen, kapılar, kuyruk, kanat gövdesi kaportası, duvarlar ve motor çevresinde

kullanılabilirler. Denizcilikte dış gövde ve iç dizaynda kullanımlarına rastlanır. Uydularda ise gövde malzemesi olarak kullanılmaktadır. (Ergençiceği, 2023).

## **2.5. Nomex Bal Peteği Yapılarının İşlenebilirliği**

Nomex'in hacminin %90 civarı boşluktan oluşmaktadır. Bu boşluklu yapıya sahip olmasına karşın anizotropik ve heterojen yapısı nedeniyle talaş kaldırma esnasında yüzey kusurları, takım aşınması ve boyut hassasiyetinin sağlanamaması gibi problemler baş gösterebilmektedir (Gill vd., 2017). Nomex plakaları belli standart ölçülerde üretilmektedir. Üretim sonrası bu hazır ürüne, genellikle bağlantı elemanlarının yuvalarını açmak için yahut istenen bir yüzeyi elde etmek amacıyla ek olarak talaşlı işleme uygulanmaktadır. Son ürün elde edilmesinde bu en sık kullanılan yöntemdir.

### **2.5.1. Geleneksel Yöntemlerle Nomex Bal Peteğinin İşlenmesi**

Nomex bal peteği kompozit malzemenin işlenmesinde en yaygın yöntem geleneksel talaş kaldırma yöntemleridir. Bunun sebepleri arasında hızlı ve ekonomik olması gösterilebilir ancak kesme kuvvetleriyle oluşan yüzey kusurları, çıkan talaş ve tozların çevreye ve sağlığa etkisi ve takım aşınmaları gibi talaş kaldırmanın doğasında olan dezavantajlar da beraber gelir.

#### **2.5.1.1. Nomex Bal Peteği Yapıların Frezelenmesi**

Nomex'in işleme yöntemlerini geliştirebilmek için günümüze kadar birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalar, değişen özelliklere sahip Nomex bal peteği kompozit malzemesi üzerinde gerçekleştirilmiş; çalışmaların çoğu kesme kuvvetleri, kesici takım performansı ve yüzey kalitesine odaklanmıştır. Frezeleme esnasında kesme parametrelerinin bu çıktılarına etkileri incelenmiştir. Özellikle frezeleme için ilerleme hızı ve fener mili dönme hızı gibi seçilecek parametreler malzemeye ve işleme şartlarına uygun olarak belirlenmelidir (Xu ve Zhang, 2015; Jafaar vd., 2017; Ahmad vd., 2019).

### **2.5.2. Geleneksel Olmayan Yöntemlerle Nomex Bal Peteğinin İşlenmesi**

Geleneksel olmayan yöntemlere örnek olarak su jeti ile kesim, lazer kesim ve ultrasonik titreşim destekli kesim verilebilir. Bu yöntemlerle daha düşük kesme kuvvetleri ve takım aşınması ile daha iyi yüzey kalitesi elde edilebilir ancak daha maliyetli ve daha çok zaman alan işlemlerdir (Akkurt, 2006; Ahmad vd., 2020).

## 2.6. Kompozit Malzemede Hasar Tipleri

Birçok endüstriyel uygulamada kullan kompozit malzemeler, matris ve takviye elemanlarından oluşur. Bu çok bileşenli yapıları, çeşitli durumlarda avantaj olsa da çeşitli hasar türlerine maruz kalabilirler. Bu hasar türleri şunlardır; delaminasyon, lif kırılması, matris çatlaması, lif-matris arayüz hasarı, lif çıkarılması (fiber pull-out), termal hasar, darbe hasarı, yorulma hasarı, nem ve kimyasal hasar.

Bu hasar tipleri malzemenin ilk üretim aşamalarından son ürün aşamasına kadar geçen süre içerisinde, imalat sürecinde gerçekleşebileceği gibi ürünün kullanımı sırasında yorulmaya vb. bağlı olarak da gerçekleşebilir.

### 2.6.1. Delaminasyon

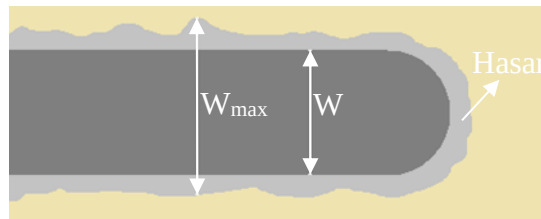
#### 2.6.1.1. Kompozit Frezeleme İşleminde Delaminasyon

Kompozit malzemelerde gerçekleşebilecek hasar tiplerinden olan delaminasyon, kompozitin katmanları arasındaki yapışkan bağın kaybolması ve katmanların ayrılması olarak tanımlanır. Üretim hatalarından kaynaklanabileceği gibi aşırı mekanik yüklenmeler ve darbe hasarlarından da kaynaklanabilir. Malzemenin yapısal bütünlüğünü bozar veya zayıflatır dolayısıyla parçanın mukavemetini azaltır.

Kompozit malzemelerde hasar modları metallere ve alaşımlara göre daha karmaşıktır çünkü yapısal özelliklerin yöne bağlı olarak değişmesi durumu olarak tanımlanan anizotropi kompozitlerde genelde mevcuttur (Zhou vd., 2021).

#### 2.6.1.2. Kompozit Frezeleme İşleminde Delaminasyon Faktörü

Delaminasyon faktörü bir kompozit yapıdaki hasar mekanizmalarından biridir. Bu değer yükseldikçe malzemenin yapısal kalitesinin azalması beklenir. Delaminasyon faktörü esasen kesme hızı, ilerleme hızı, kesme derinliği ve kesici takım gibi parametrelere göre değişmektedir. Frezeleme işleminde delaminasyon faktörü ( $F_d$ ) maksimum hasar genişliğinin kanal genişliğine bölünmesiyle bulunur ( $F_d = W_{max}/W$ ), aşağıda Şekil 2.12’de gösterilmiştir (Raj vd., 2012).



Şekil 2.12. Frezeleme işleminde delaminasyon faktörü parametreleri

Delaminasyon faktörü, kompozitlerin frezelenmesinde oldukça sık karşılaşılan kusurlardan biri olan delaminasyonun ölçümlenebilir ve kesme parametreleriyle aralarındaki ilişkinin gözlemlenebilir olmasına olanak sağlamıştır.

## 2.7. Kaynak Özetleri

Liu vd., (2022) Nomex bal peteği malzemesiyle yaptıkları çalışmada, bal peteği malzemelerin işleme sonrası oluşan yüzey hatalarının ve malzemenin kullanım ömrünün arasındaki ilişkiyi incelemişlerdir. Yüksek kalite bal peteği malzeme elde etmek amacıyla kurdukları deney düzeneğinde ultrasonik dairesel bıçak kullanarak döner ultrasonik işlemler (kesme) gerçekleştirmişlerdir. 500, 600, 700, 800 dev/dak fener mili hızlarıyla, 500 mm/dak ilerleme hızıyla ve 8 mm kesici takım çapıyla bir deney; 500, 1000, 1500, 2000 mm/dak ilerleme hızlarıyla, 800 dev/dak fener mili hızı ve 8 mm kesici takım çapıyla başka bir deney; 4, 6, 8, 10 kesici takım çaplarında, 2000 mm/dak ilerleme hızıyla ve 800 dev/dak fener mili hızında üçüncü bir deney gerçekleştirmişlerdir. Bulgularının arasında ilerleme hızının ve kesme derinliğinin artmasıyla yırtılmaların azaldığı, kesici takım çapının artmasıyla yırtılmaların ve hasarların arttığını gözlemlemişlerdir. Çeşitli kademelerde yaptıkları bu deneylerde parametreler arasındaki ilişkiyi önem sırasına göre ilerleme hızı, fener mili hızı ve kesici takım çapı şeklinde bulmuşlardır

Jafaar vd., (2021) A10-72-50X şeklinde tanımlanmış bir Nomex bal peteği malzemesiyle yaptıkları çalışmada, Nomex bal peteği malzemesi için yeni bir yüzey kalitesi değerlendirme kriteri ortaya koymuşlardır. Parçalayıcı ve talaş kırıcı özelliğe sahip Evatec firmasına ait NACNA 011 kesici takımını kullanan ekip; 2000, 10000, 15000 ve 23000 dev/dak fener mili hızlarında ve 150, 1000, 1500, 3000 mm/dak ilerleme hızlarında deneyler gerçekleştirmişlerdir. Bu deneyler sonucunda düşük ilerleme hızı ve yüksek fener mili hızının, işlemeden doğan hasarı minimize etmeyi sağladığını bulmuşlardır. Optimum kesme koşullarını ise 23000 dev/dak ve 200 mm/dak olarak bulmuşlardır. Aşırı yüksek fener mili hızının da lokal sıcaklığı arttıracak ve bozunmaya yol açacağını da eklemişlerdir.

Ghalme vd., (2016) Taguchi metoduyla gerçekleştirdikleri deneylerde cam elyaf takviyeli plastik kompoziti farklı derinliklerde frezelemişler ve bu işlemlerde 200, 300, 550 dev/dak fener mili hızı; 30, 40, 100 mm/dak ilerleme hızı parametrelerini kullanmışlardır. Bu değişkenlerden yüzey kalitesi üzerinde ağırlıkça en önemlisinin yaklaşık %50 ile fener mili hızı olduğunu, buna karşın yaklaşık %3 ile ilerleme hızının pek de önem arz etmediğini bulmuşlardır. Yüzey kalitesi açısından optimum

parametreleri 1,2 mm kesme derinliği, 200 dev/dak fener mili hızı ve 40 mm/dk ilerleme hızı olarak saptamışlardır.

Harun vd., (2017) organik bir lif olan kenaf lifi takviyeli plastik kompozit üzerinde parametre optimizasyonu için deneyler gerçekleştirmişlerdir. Yaptıkları deneylerde numuneye 16 ve 32 dev/dak fener mili hızlarıyla; 0,1 ve 0,3 mm/dak ilerleme hızlarıyla 1 ve 2 mm kesme derinliğinde kanal açma işlemi uygulamışlardır. Taguchi deney tasarım metodunu kullandıkları bu deneyler sonucunda yatayda oluşan delaminasyon faktörü üzerinde en etkili giriş parametresinin %66 ağırlıkla fener mili hızı olduğunu; dikeyde oluşan delaminasyon faktörü üzerinde en etkili giriş parametresinin ise %84 ağırlıkla ilerleme hızı olduğunu tespit etmişlerdir. Seçilen giriş değerleri arasında optimum parametrelerin yüksek kesme derinliği (2 mm), düşük fener mili hızı (16 dev/dak) ve düşük ilerleme hızı (0,1 mm/dak) olduğu sonucuna ulaşmışlardır.

Sheikh-Ahmad vd., (2017) yaptıkları çalışmada karbon elyaf takviyeli polimer kompozit üzerinde frezeleme işleminde oluşan delaminasyonları incelemişlerdir. 100, 200, 300 m/dak kesme hızları; 5000, 10000, 15000 dev/dak fener mili hızları ve 2,5; 5,1; 10,2 m/dak ilerleme hızları seçerek yaptıkları deneylerde delaminasyonun artmasına en önemli etkenin ilerleme hızının artması olduğunu ve ardından kesme hızının geldiğini bulmuşlardır.

Zarrouk vd., (2021) Nomex balpeteği yapıların frezeleme işlemlerini etkileyen parametreleri tahmin etmek ve analiz etmek amacıyla dayanıklı bir sayısal model geliştirmişlerdir. Bu çalışmada, takım geometrisinin ve duvar kalınlığının kesme kuvvetleri üzerindeki etkilerini incelemek için izotropik elasto-plastik yaklaşım kullanılmıştır. Malzeme hem ortotropik hem de izotropik olarak modellenmiş ve deneysel çalışma sonuçları ile karşılaştırılarak, elde edilen sayısal sonuçlar izotropik elasto-plastik yaklaşımın doğruluğunu ve sayısal modelin uygunluğunu ortaya koymuştur. Ortotropik yaklaşımın ise zaman alıcı ve maliyetli olduğu belirtilmiştir. İki farklı takımla yapılan projeksiyonlar sonucunda, MABC isimli takımın üç eksenindeki ve ortalama kesme kuvvetinin, CZ10 isimli takıma kıyasla daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Dört farklı devirde (2000, 10000, 15000, 23000 dev/dak) ve 3000 mm/dak ilerleme hızında gerçekleştirilen simülasyonlarda, kesme hızının azalması ile kesme kuvvetinin azaldığı gözlemlenmiştir. CZ10 takımı ile yapılan simülasyonlarda, Z eksenindeki kesme kuvvetinin büyüklüğü dikkat çekmiştir. MABC takımında ise diğer eksenlerdeki kuvvetlere paralel bir kuvvet oluşmuştur. CZ10 takımı ile farklı duvar kalınlıkları (0,03 mm, 0,06 mm, 0,10 mm ve 0,15 mm) için yapılan simülasyonlarda, duvar kalınlığı

arttıkça kesme kuvvetlerinin de arttığı belirlenmiştir. Daha yoğun bir duvar, küçük bir hacimde daha fazla aramid lif bulunduğunu ve bu durumun malzemenin sertliğini artırarak frezeleme sırasında kesme kuvvetlerinin artmasına neden olduğunu göstermektedir. Ayrıca,  $F_z$  bileşeninin değerinin,  $F_x$  ve  $F_y$ 'ye kıyasla çok yüksek olduğu vurgulanmıştır. Bu farkın, bal peteği yapısının ortotropik davranışına ve dolayısıyla yükleme yönüne bağlı mekanik özelliklerine dayandığı belirtilmiştir.

Zarrouk vd., (2022) tarafından yapılan başka bir çalışmada, Nomex balpeteğinin frezelenmesi sırasında talaş oluşumunun modellenmesi ve sayısal simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Çalışma, işleme koşullarının kesme kuvvetleri üzerindeki etkilerini ve ortaya çıkan talaşların morfolojisini incelemeyi amaçlamıştır. Düşük dönme hızında (5000 dev/dak) ve yüksek ilerleme hızında (3000 mm/dak) kesici takımın en yüksek işleme kuvvetlerini ürettiği tespit edilmiştir. Yüksek dönüş hızı (23000 dev/dak) ve düşük ilerleme hızı (200 mm/dak) ile minimum kuvvetlerin elde edildiği gözlemlenmiştir. İlerleme hızının düşürülmesinin kesme kuvvetlerini de azalttığı belirlenmiştir. Araştırma, kesme kuvvetlerinin fener mili devir sayısı arttıkça azaldığını, ancak ilerleme hızı arttıkça yükseldiğini ortaya koymuştur.

Zarrouk vd., (2023) yaptıkları simüle edilmiş çalışmada Nomex bal peteği yapısının işlenebilirliğini incelemişlerdir Evatec firması tarafından temin edilen CZ10 kesici takımla frezeleme işlemi gerçekleştirmişlerdir. Sabit 200 mm/dak ilerleme hızıyla 2000 ve 23000 dev/dak fener mili hızlarında işlemleri gerçekleştirmişlerdir. Çalışma bulguları arasında, yüzey kalitesini iyileştirmek için yüksek fener mili hızı tercih edilmesi gerektiği de bulunmaktadır.

Karbon lif takviyeli polimer kompozit malzeme üzerinde, Wang vd., (2015) tarafından yapılan çalışmada 3000, 4500, 6000 dev/dak fener mili hızları ve 350, 450, 600 mm/dak ilerleme hızları kullanılmıştır. Bu deneysel çalışma sonucunda ilerleme hızının karbon lif takviyeli polimer kompozit malzemenin frezelenmesinde anahtar rol oynadığı sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca, bu çalışmaya göre, düşük kesme hızı ve minimum ilerleme hızı yüzey kalitesini arttırmak adına optimum tercihler olacaktır.

Chibane vd., (2017), karbon lif takviyeli polimer kompozit malzemelerde kesme sıcaklığı, titreşim ve kesme kuvvetlerini ölçmüşlerdir. Farklı talaş kalınlıkları (0,06; 0,1; 0,2; 0,3; 0,34 mm) ve 200, 450, 700 ve 803,5 m/dak kesme hızlarıyla gerçekleştirdikleri deneylerde titreşim eşiğinin aşıldığında delaminasyon hasarının düzenli olarak ortaya çıktığını ve titreşim seviyesinin artmasıyla bu hasarın daha da arttığını tespit etmişlerdir. Ayrıca, kesme hızı ve kesme derinliği arttıkça titreşim seviyesinin yükseldiğini

gözlemlemişlerdir. Titreşimlerle beraber ortaya çıkan hasarın arttığını, numune sıcaklığı ve kesme kuvveti değerlerinin ise kesme hızı ve talaş kalınlığının artmasıyla birlikte yükseldiğini belirlemişlerdir.

Yapay sinir ağları kullanarak cam lif takviyeli polimer kompozitlerin hasar tahmini üzerine çalışma yapan Erkan vd., (2012) numuneye; 62, 88, 113, m/dak kesme hızı; 1, 2, 3 mm kesme derinliği parametreleriyle frezeleme işlemi uygulamışlardır. Farklı ilerleme hızlarıyla (0,04; 0,08; 0,12 mm/dev) deneyleri gerçekleştiren ekip; kesme ve ilerleme hızının artmasıyla plastik deformasyon ve hasar faktörlerinin arttığı sonucuna ulaşmışlardır.

M'Saoubi ve Chandrasekaran, (2005) talaş kırıcı kullanarak eğik ve dik kesim gerçekleştirdikleri ve işleme esnasındaki kesici takım sıcaklık dağılımlarını inceledikleri çalışmalarında kırıcı yanal yüzeylerin işlemeyi kolaylaştırdığını ve sonuç olarak aynı şartlarda düşük kesme kuvvetleri oluşturabileceğini öngörmüşlerdir.

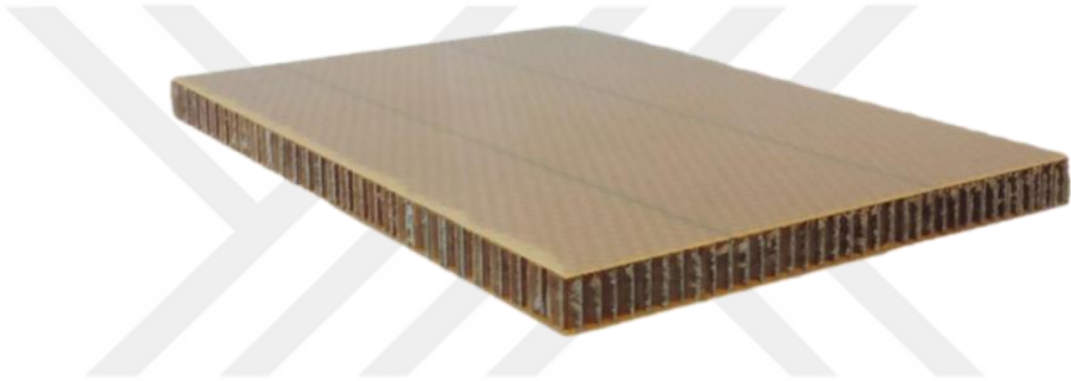
Helis açısının frezeleme üzerine etkisini inceledikleri çalışmalarında Dombovari ve Stepan, (2012) yavaş gerçekleştirilen işlemlerde helis açısı değişkeninin önemi olsa da fener mili hızı arttıkça bu önemin kaybolduğunu ortaya koymuşlardır.

Li vd., (2020) gerçekleştirdikleri çalışmada üç boyutlu sonlu elemanlar analiziyle yan frezeleme işlemindeki kesme kuvvetlerini tahmin etmeye çalışmışlardır. Ardından deneysel çalışmayla da analizlerini destekleyen ekip kesme kuvvetlerinin ve deformasyonların ilerleme hızı arttıkça belli bir seviyeye kadar arttığını, sonrasında ise düşüş gösterdiğini bulmuşlardır. Bu düşüşün sebebini kesici takımın sıcaklığının artmasına bağlı olarak malzemenin dayanımının azalmasına bağlamışlardır.

### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

#### 3.1. Materyal

Bu tez çalışması dahilinde kullanılacak Nomex bal peteği malzeme; Kordsa Teknik Tekstil A.Ş firması tarafından satılan, alt ve üst yüzeyleri 0,2 milimetre fenolik reçineli, cam elyaf takviyeli kompozit yüzey plakalarıyla kaplı olarak seçilmiştir. 10 mm kalınlığa sahip malzemenin ebatları 185 mm x 118 mm olacak şekilde kesilerek numuneler hazırlanmıştır. Ayrıca numunelere, takım tezgahına bağlanabilmesi için 4 adet 8 mm çapında delikler açılmıştır. Malzemenin resmi Şekil 3.1’de, özellikleri ise Çizelge 3.1’de görülebilmektedir.



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

**Çizelge 3.1.** Seçilen Nomex balpeteği kompozit sandviçin özellikleri

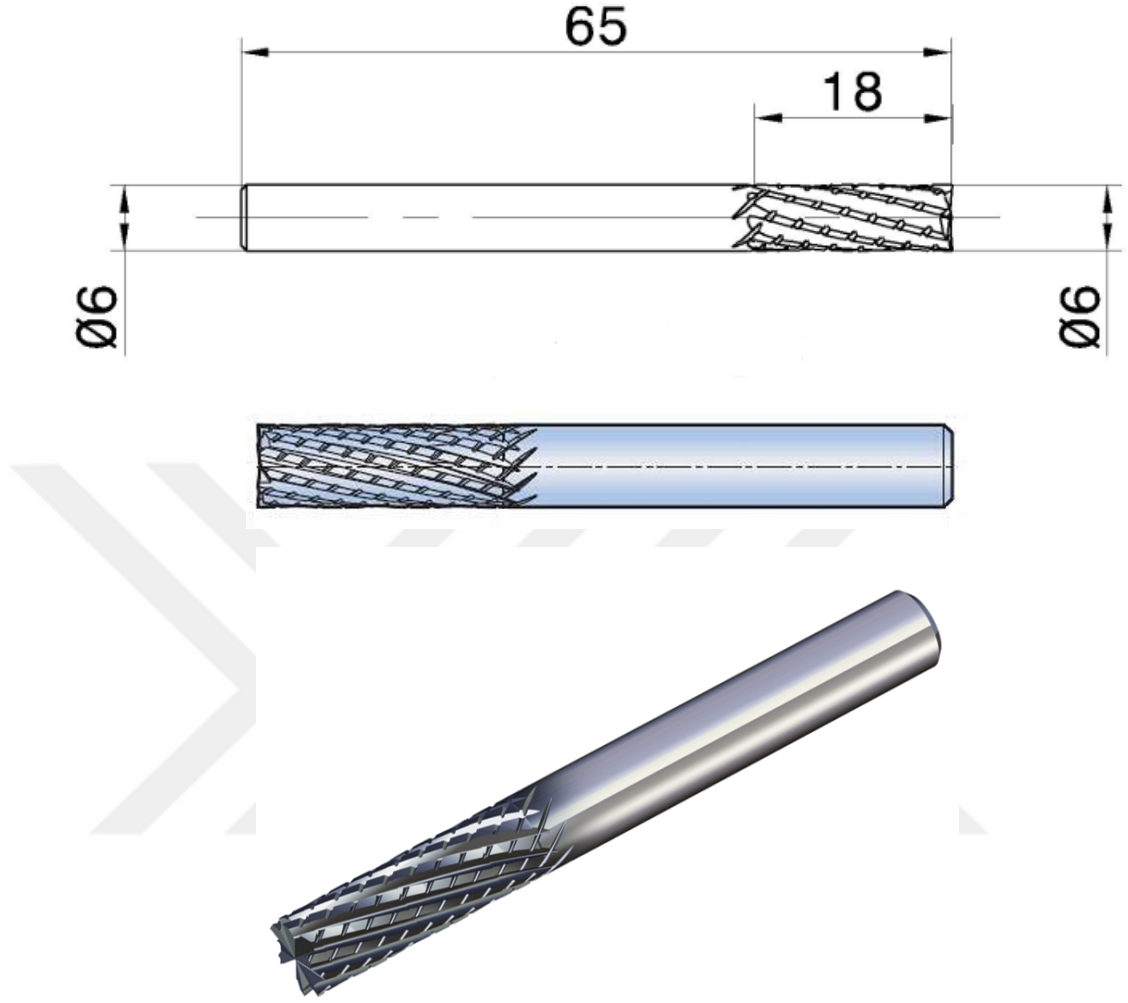
|                              |                  |                       |
|------------------------------|------------------|-----------------------|
| Yüzey Plakaları (Facesheets) | Lif Tipi         | S2 sınıfı Cam Elyaf   |
|                              | Dokuma Tipi      | 8H Satin              |
|                              | Matris           | %50 Fenolik Reçine    |
|                              | Gramaj           | 305 gr/m <sup>2</sup> |
|                              | Kalınlık         | 0,2 mm                |
| Çekirdek Yapısı              | Malzeme          | Nomex Balpeteği       |
|                              | Yoğunluk         | 48 gr/m <sup>3</sup>  |
|                              | Hücre Aralığı    | 3,2 mm                |
|                              | Hücre Yüksekliği | 9,6 mm                |

#### 3.2. Aletler ve Cihazlar

##### 3.2.1. Kesici Takımlar

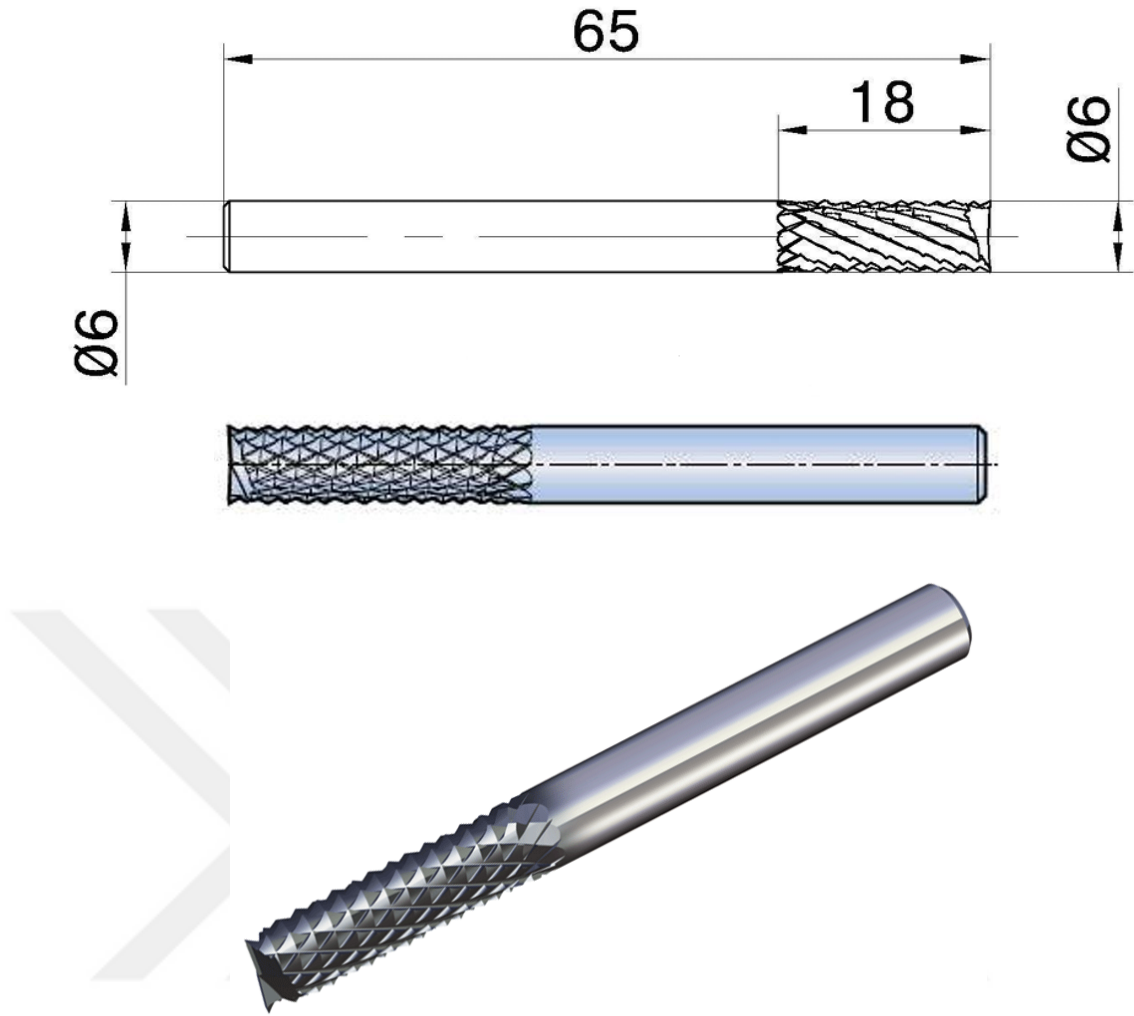
Bu tez çalışması dahilinde kullanılacak kesici takımlar Taegutec firmasından satın alınmıştır. Kompozit malzemelerin frezelenmesinde özel olarak kullanılan iki farklı kesici takım tercih edilmiştir. Firmaya ait RCFE060 ve RRFE060 kodlu elmas kesici takımlar 6 mm çapa sahip olup CVD kaplamadır. RRFE060 15° helis açısına sahip 3 ağızlı

bir kesici takımdır ve görüntüleri Şekil 3.2’de, ölçüleri ise Çizelge 3.2’de verilmiştir (Taegutec, 2023).



**Şekil 3.2.** RRFE 060 kesici takım görüntüleri

Çalışmada kullanılan diğer kesici takım ise RCFE060 kodlu, 28° helis açılı, kırıcı yanal yüzeylere sahip kesici takımdır ve görüntüleri Şekil 3.3’te, ölçüleri ise yine Çizelge 3.2’de verilmiştir (Taegutec, 2023).



**Şekil 3.3.** RCFE 060 kesici takım görüntüleri

**Çizelge 3.2.** Seçilen kesici takımların özellikleri

| Kesici Takım         | RRFE060 | RCFE060 |
|----------------------|---------|---------|
| Malzeme              | Elmas   | Elmas   |
| Kaplama              | CVD     | CVD     |
| Takım Çapı (mm)      | 6       | 6       |
| Helis Açısı (Derece) | 15      | 28      |
| Gövde Kalınlığı (mm) | 6       | 6       |
| Takım Uzunluğu (mm)  | 18      | 18      |
| Takım Boyu (mm)      | 65      | 65      |
| Kesici Ağız Sayısı   | 3       | 2       |

### 3.2.2. CNC İşleme Merkezi

Bu çalışmada; deneyler yapılırken üç eksenli, azami 17,5 kW güce ve 10000 dev/dak fener mili hızına sahip Quaser MV154C dik işleme tezgâhı kullanılmıştır. Ayrıca tablaya entegre edilen Kistler 9257B tipi dinamometre yardımıyla işleme esnasında

kesme kuvvetleri ölçülmüştür. Quaser MV154C takım tezgahı Şekil 3.4'te görülebilmektedir.



Şekil 3.4. Quaser MV154C dik işleme tezgâhı

### 3.2.3. Kuvvet Ölçüm Cihazları

Deney esnasında oluşan kuvvetler Kistler 9257B tip dinamometre yardımıyla ölçülmüştür. Dinamometre yüksek dirençli kablolarla Kistler 5070S tip amplifikatöre, amplifikatör ise Kistler 5697A tipi DAQ (Data Acquisition System) kartına bağlanmıştır. DynoWare isimli yazılım yardımıyla da çıktılar elde edilmiştir. Cihazların görüntüleri Şekil 3.5'te verilmiştir.



Şekil 3.5. Kistler 9257B, Kistler 5070S, Kistler 5697A

### 3.2.4. Görüntüleme Sistemleri

Deneylerin sonucunda Nomex bal peteği sandviç malzemede oluşan delaminasyon kusurlarının ve kesilmemiş liflerin tespiti için numuneler Keyence VHX-900 model dijital mikroskopla görüntülenmiştir. Görüntüler üzerinde yapılan çalışmada maksimum kesilmemiş lif uzunlukları ve maksimum hasar genişlikleri belirlenmiştir. Bunun yanı sıra delaminasyon faktörleri hesaplanmıştır. Şekil 3.6’da mikroskop düzeneği ve Çizelge 3.3’te mikroskop özellikleri verilmiştir.



Şekil 3.6. Keyence VHX-900 mikroskop düzeneği

Çizelge 3.3. Keyence VHX-900 mikroskop özellikleri

| Keyence VHX-900  |       |
|------------------|-------|
| Çözünürlük       | 18MP  |
| Büyütme Oranı    | 200   |
| Çalışma Mesafesi | 23 cm |
| Işık Rengi       | Beyaz |

### 3.3. Yöntem

Bu tez çalışmasında Nomex bal peteği çekirdek yapıllı sandviç kompozit malzemenin kanal açma yöntemiyle frezelenmesi sırasında kesici takım geometrisi, fener mili hızı ve kesme hızı parametrelerinin; kesme kuvvetleri ve delaminasyon hasarına olan etkisi incelenmiştir. Yapılan deneylerde 10 mm kalınlığa sahip ve 0,2 mm alt ve 0,2 mm üst yüzey plakalarıyla (cam lif takviyeli) kaplanmış Nomex bal peteği sandviç kompozit malzeme kullanılmıştır. Malzemeye Taegutec firmasından temin edilen 6 mm çaplı RCFE060 ve RRFE060 kesici takımlarıyla, 2500 dev/dak ve 7500 dev/dak fener mili hızlarıyla; 150, 300, 450, 600, 750 mm/dak ilerleme hızlarıyla 4 mm derinliğinde kanal açma işlemi uygulanmıştır. Her bir parametreyle deneyler üçer defa tekrarlanarak

toplamda 60 adet deney gerçekleştirilmiştir. Kuru kesme şartlarında ve destek plakası olmaksızın gerçekleştirilen frezeleme işlemlerinde oluşan kesme kuvvetleri dinamometre ile ölçülmüştür ve sonuçlar mikroskop altında görüntülenmiştir. Görüntüler üzerinde yapılan hasar analizi sonucunda maksimum hasar genişliklerinin ölçülmesi ve delaminasyon faktörlerinin hesaplanmasının yanı sıra maksimum kesilmemiş lif uzunlukları da tespit edilmiştir. Elde edilen değerler doğrultusunda giriş parametrelerine göre değerlendirmeler yapılmıştır

### **3.3.1. Taguchi Deney Tasarımı**

Taguchi metodu Dr. Genichi Taguchi tarafından geliştirilen yenilikçi bir deneysel tasarım tekniğidir. Değişkenleri azaltarak ürün ve süreç kalitesini arttırmayı ve sistemleri dış etkilere karşı güçlü kılmayı hedefler. Parametreleri optimize etmesi ve yapılması gereken deney sayısını azaltmasıyla verimliliği arttırmaktadır. Bu yönüyle maliyetleri azaltmakta ve fazla iş yükünden kurtarmaktadır. Bu sebeple Taguchi metodu, endüstride ve akademide, deney tasarımlarında yaygın olarak kullanılmaktadır.

Bu metotta deney öncesi analizler ve değerlendirmeler gerçekleştirilerek giriş parametreleri kontrol edilebilir ve kontrol edilemez olarak iki gruba ayrılır. Kontrol edilemez değişkenlerin sonuca etkisini kestirmek oldukça zahmetli olduğundan kontrol edilebilir değerler mümkün olduğunca optimize edilerek kontrol edilemez değişkenlerin etkisi minimize edilmeye çalışılır (Taguchi ve Wu, 1979).

Bu çalışmadaki fener mili hızı, ilerleme hızı, kesici takım tipi gibi deney giriş parametreleri de Taguchi deney tasarım metoduyla kontrol edilebilir değişkenler olarak belirlenmiştir.

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

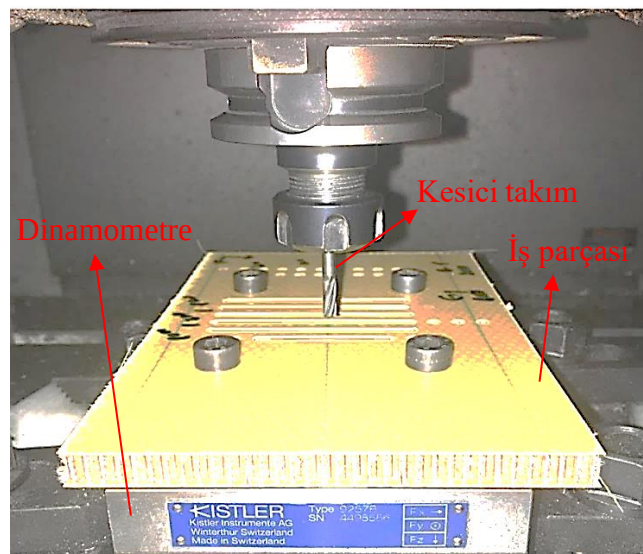
Gerçekleştirilen frezeleme işlemlerinde iki farklı kesici takım, iki farklı fener mili hızı ve 5 farklı ilerleme hızı kullanılmıştır. Herhangi bir soğutucu yahut yağ kullanılmaksızın kuru olarak gerçekleştirilen işlemede destek plakasına yer verilmemiştir. Her biri üçer kere gerçekleştirilen deneylerin parametreleri Çizelge 3.4'te verilmiştir.

|         |      |     |
|---------|------|-----|
| RCFE060 | 2500 | 300 |
|         |      | 450 |
|         |      | 600 |
|         |      | 750 |
|         | 7500 | 150 |
|         |      | 300 |
|         |      | 450 |
|         |      | 600 |
|         |      | 750 |
|         |      |     |

|         |      |     |
|---------|------|-----|
| RCFE060 | 2500 | 300 |
|         |      | 450 |
|         |      | 600 |
|         |      | 750 |
|         | 7500 | 150 |
|         |      | 300 |
|         |      | 450 |
|         |      | 600 |
|         |      | 750 |
|         |      |     |

### 3.3.3. Deney Düzenneği

Quaser MV154C dik işleme tezgâhında her bir parametreyle üçer kere tekrarlanan deneylerde tablaya paralel ve rijit şekilde bağlanan Kistler 9257B dinamometre vasıtasıyla kuvvetler ölçülmüştür. Şekil 3.7’de, hazırlanan deney düzeneği gösterilmiştir.



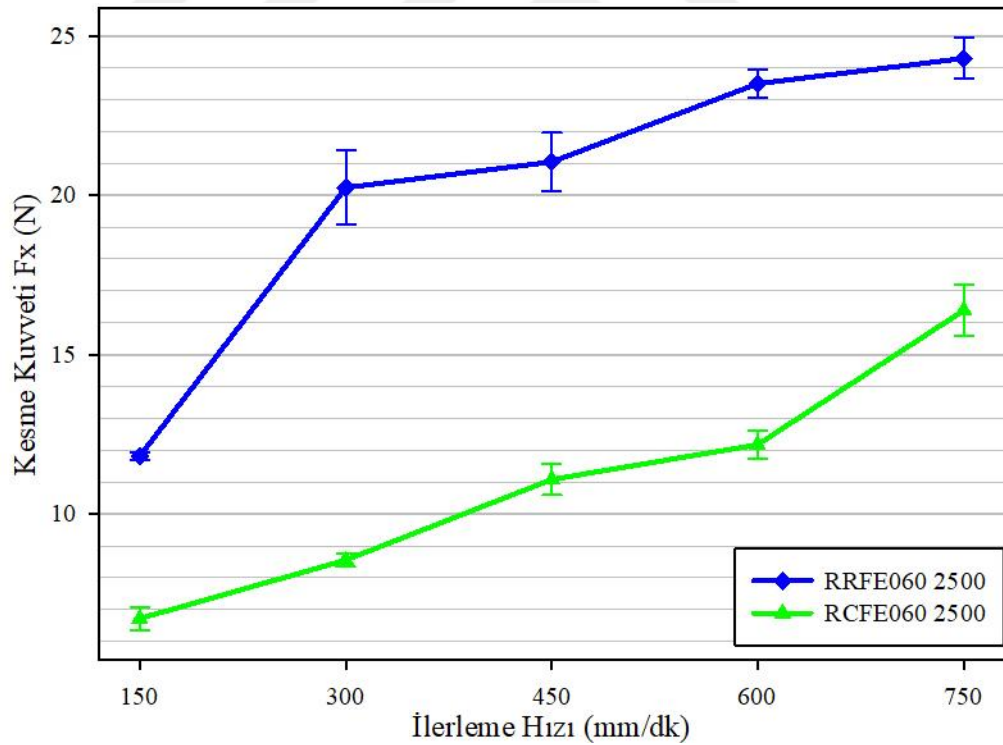
### Şekil 3.7. Deney düzeneği

## 4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Kanal açma işlemi esnasında kesici takım geometrisi, fener mili hızı ve ilerleme hızının Nomex bal peteği sandviç kompozit malzemesinin üzerindeki kesme kuvvetlerine ve delaminasyona etkisi deneysel olarak incelenmiştir ve deney çıktıları sunulmuştur.

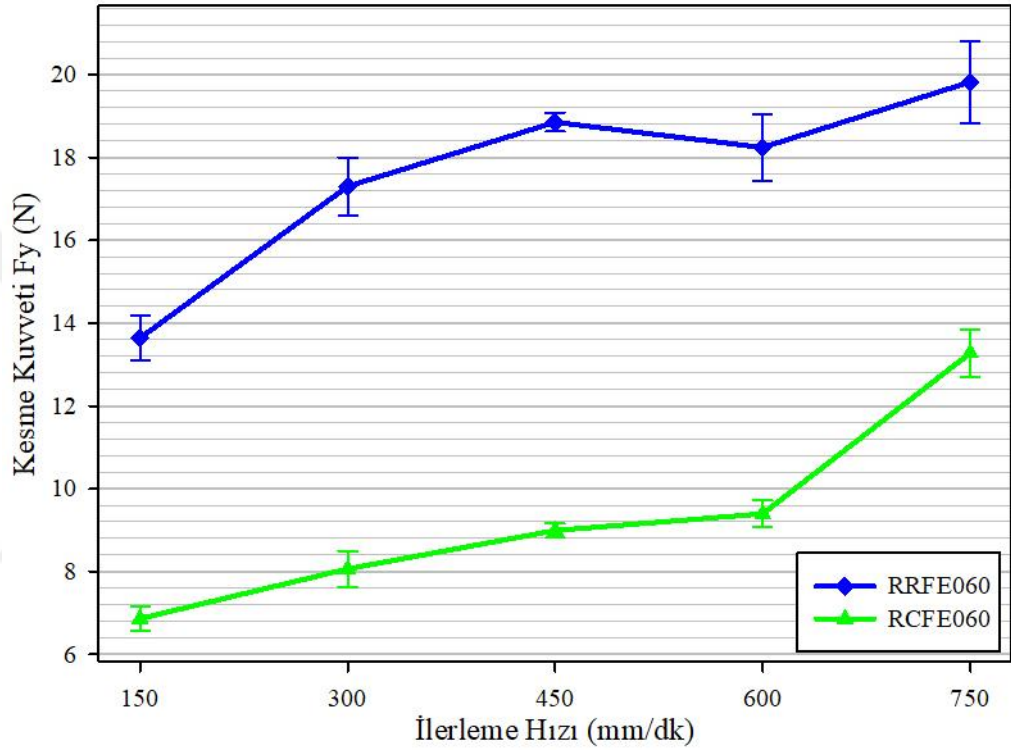
### 4.1. Kesme Kuvvetlerinin Ölçümü

Frezeleme işleminde kesme kuvvetleri; takım aşınması, delaminasyon ve kesilmemiş lif hatalarının değerlendirilmesinde göz önünde bulundurulması gereken hayati bir parametre olarak görülmektedir (Wang vd., 2016). Kistler 9257B dinamometre yardımıyla ve her bir parametre için üçer kere ölçülen kesme kuvvetlerinin, ortalamaları alınarak sonuçların gerçeğe yakınsaması amaçlanmıştır. Bu değerler EK 1-Çizelge 4.1, EK 2-Çizelge 4.2 ve EK 3-Çizelge 4.3'te görülebilir. Ayrıca 2500 dev/dak fener mili hızında oluşan kesme kuvvetlerinin ilerleme hızıyla arasındaki ilişkiyi gösteren grafikler Şekil 4.1, Şekil 4.2, Şekil 4.3'te verilmiştir.



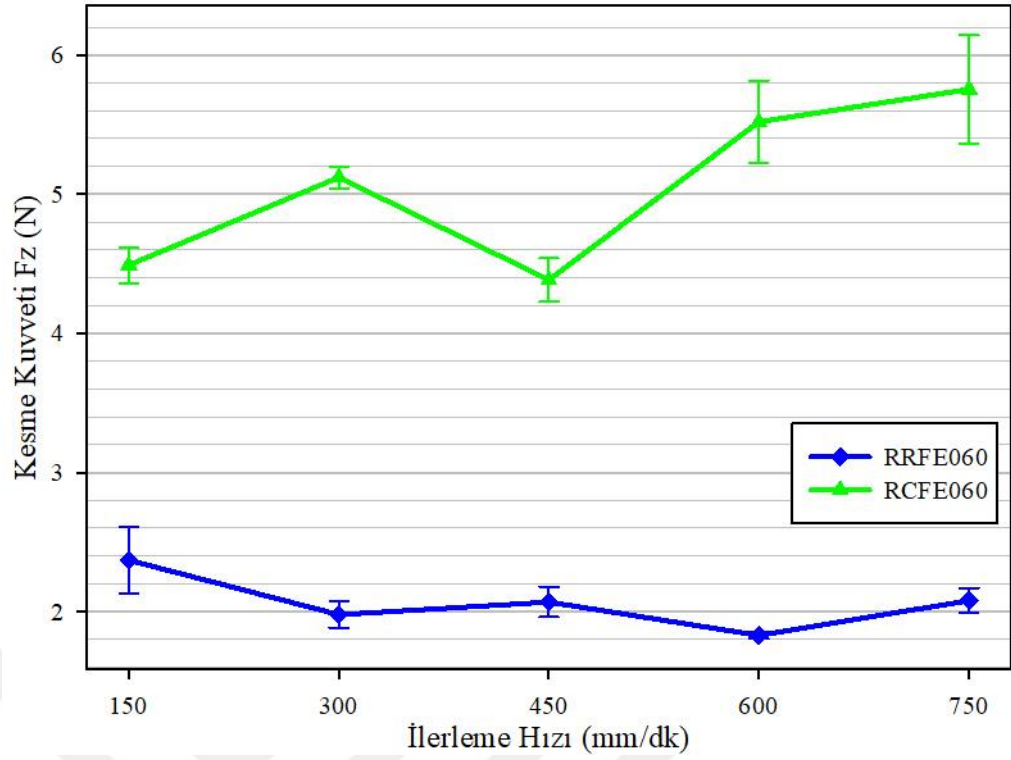
Şekil 4.1. 2500 dev/dak fener mili hızında X ekseninde oluşan kesme kuvvetinin ilerleme hızına göre değişimi

2500 dev/dak fener mili hızıyla yapılan işlemlerde her iki kesici takım için de X eksenindeki kesme kuvvetinin ilerleme hızıyla arttığı gözlemlenmiştir. RRFE060 çok ağızlı kesici takımın kesme kuvveti çıktıları RCFE060 iki ağızlı kesici takıma nispeten daha yüksektir. Her iki kesici takım da en düşük kesme kuvveti değerini 150 mm/dk ilerleme hızında, en yüksek kesme kuvveti değerini 750 mm/dk ilerleme hızında vermiştir. Minimum kesme kuvveti ise RCFE060 kesici takımıyla 150 mm/dk ilerleme hızıyla gerçekleştirilen işlemede oluşmuştur.



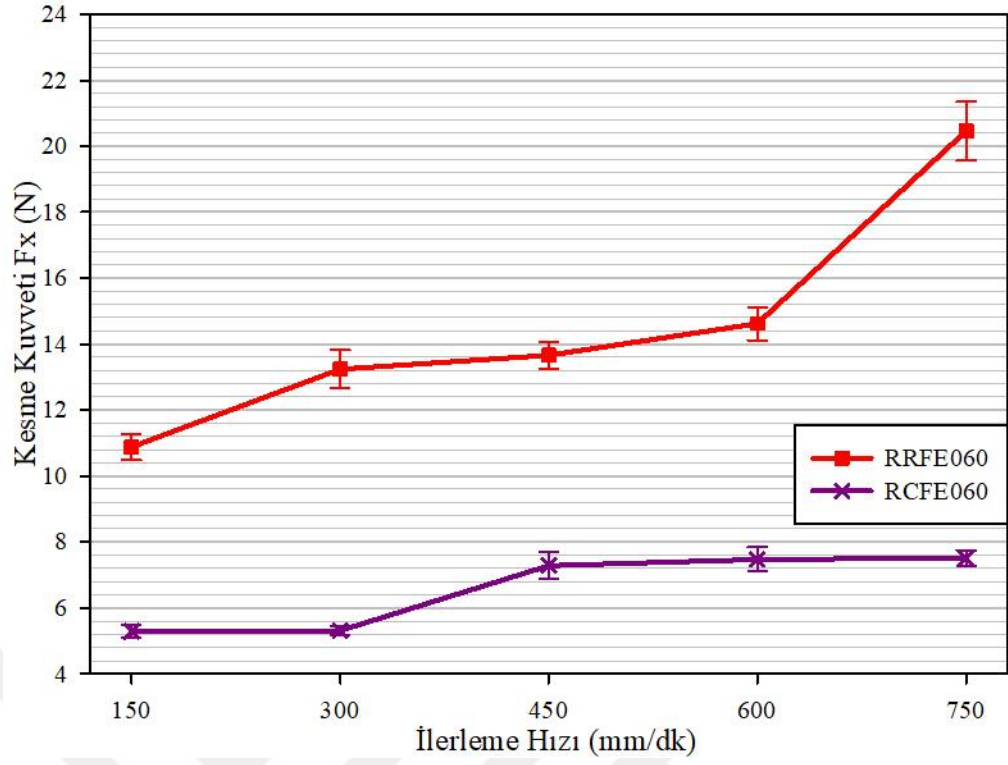
**Şekil 4.2.** 2500 dev/dak fener mili hızında Y ekseninde oluşan kesme kuvvetinin ilerleme hızına göre değişimi

Y ekseninde oluşan kuvvetler için Şekil 4.2'ye bakılacak olursa; X ekseninde oluşan kuvvetlere benzer bir ilişki görülebilir. RRFE060 üç ağızlı kesici takımla gerçekleştirilen işlemlerde kesme kuvveti RCFE060 iki ağızlı kesici takıma nazaran hatırı sayılır miktarda yüksek çıkmıştır. İlerleme hızıyla beraber kesme kuvvetlerinin artmasının yanı sıra yine her iki takım da en düşük kesme kuvveti değerini 150 mm/dk ilerleme hızında, en yüksek kesme kuvveti değerini ise 750 mm/dk ilerleme hızında vermiştir. İkisi arasında Y ekseninde oluşan azami kesme kuvveti RRFE060 kesici takımla 750 mm/dk ilerlemeyle yapılan kanal açma işleminde meydana gelirken asgari kesme kuvveti RCFE060 kesici takımla 150 mm/dk ilerleme değerinde gerçekleşmiştir.

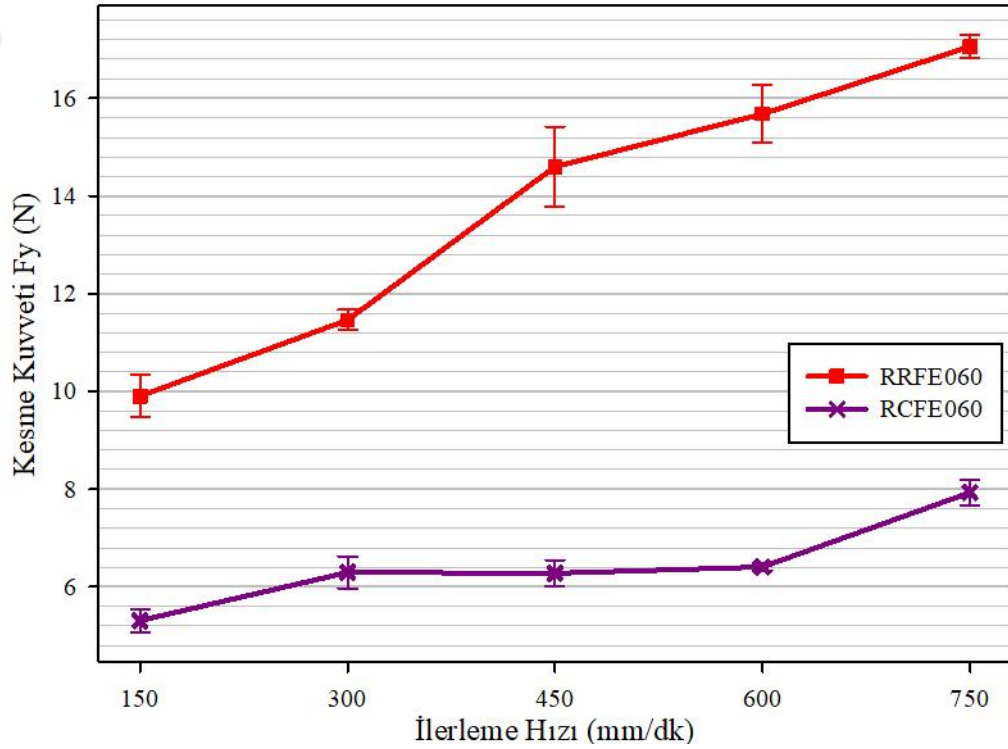


**Şekil 4.3.** 2500 dev/dak fener mili hızında Z ekseninde oluşan kesme kuvvetinin ilerleme hızına göre değişimi

Şekil 4.3'te görülebildiği üzere RCFE060 iki ağızlı ve kırıcı yanıl yüzeylere sahip kesici takım ile gerçekleştirilen talaşlı işlemede oluşan Z eksenindeki kesme kuvvetleri RRFE060'a göre yaklaşık 2-3 kat yüksek çıkmıştır. Ayrıca hem RRFE060 ile gerçekleştirilen işlemlerde hem de RCFE060 ile gerçekleştirilen işlemlerde dalgalanmalar olmasına karşın kesme kuvvetleri hemen hemen sabit kalmış ve ilerleme hızına göre değişiklik göstermemiştir.

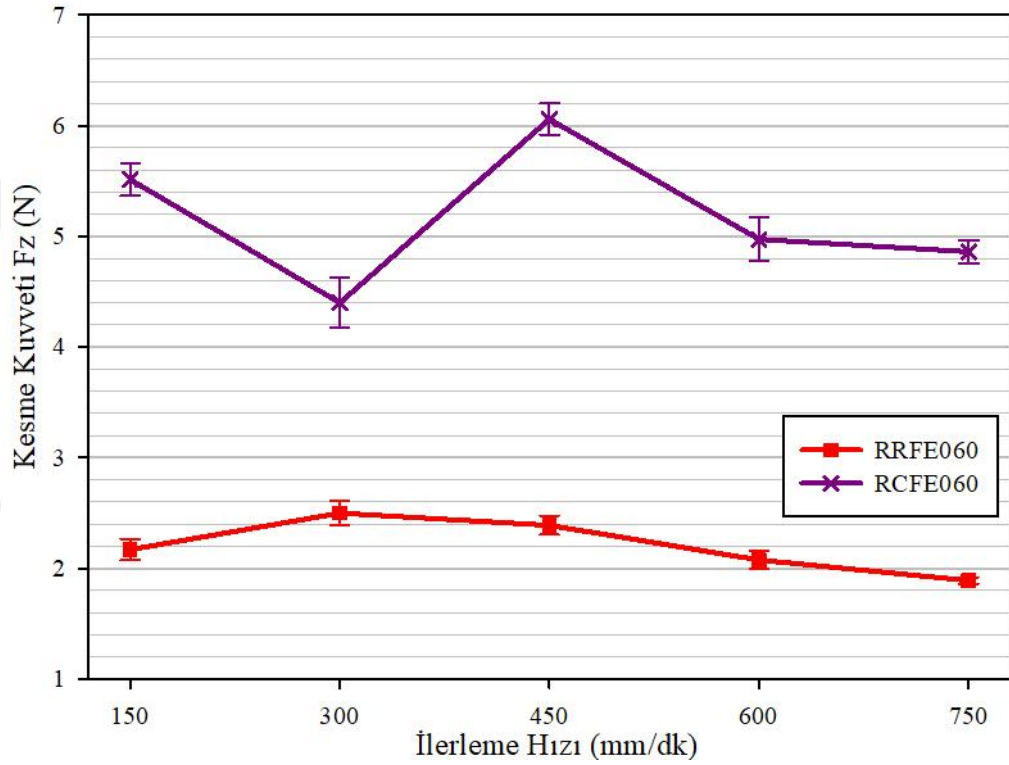


Şekil 4.4. 7500 dev/dak fener mili hızında X ekseninde oluşan kesme kuvvetinin ilerleme hızına göre değişimi



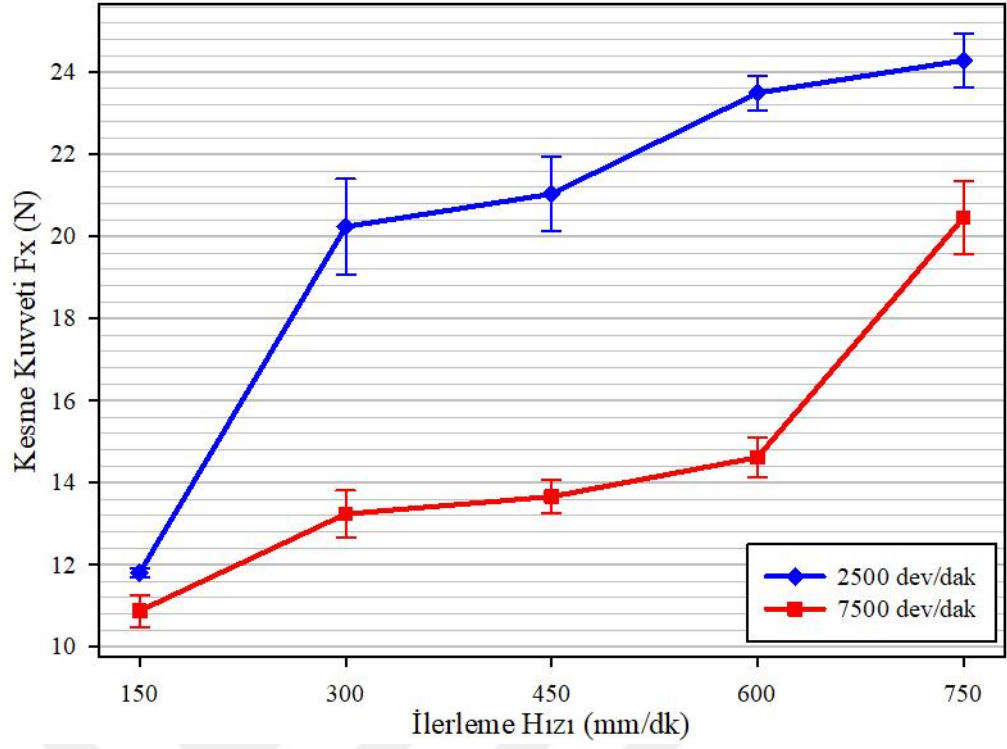
Şekil 4.5. 7500 dev/dak fener mili hızında Y ekseninde oluşan kesme kuvvetinin ilerleme hızına göre değişimi

Şekil 4.4 ve Şekil 4.5'te görülebildiği üzere 7500 dev/dak fener mili hızında yapılan işlemlerde, ilerleme hızı arttıkça, X ve Y doğrultularında oluşan kesme kuvvetleri de artmaktadır. Ancak RCFE060 iki ağızlı ve kırıcı yanal yüzeylere sahip kesici takım hafif bir artış gösterirken RRFE060 daha agresif bir yükseliş göstermektedir. İki kesici takım arasında kıyaslama yapıldığında RRFE060'ın oluşturduğu bütün kesme kuvveti değerlerinin RCFE060'ın oluşturduğu bütün değerlere göre yüksek kaldığı görülebilir. Doğal olarak oluşan maksimum kuvvetler 750 mm/dak ilerleme hızında oluşurken minimum kuvvetler 150 mm/dak ilerleme hızında oluşmuştur.

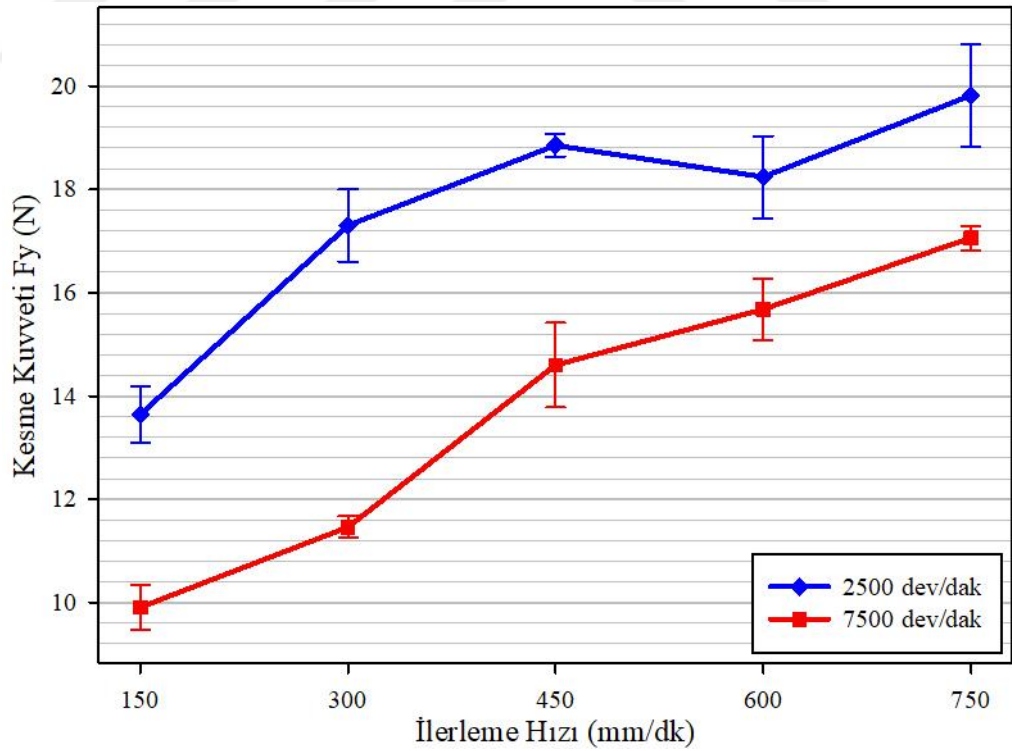


**Şekil 4.6.** 7500 dev/dak fener mili hızında Z ekseninde oluşan kesme kuvvetinin ilerleme hızına göre değişimi

Şekil 4.6 incelendiğinde ise Z ekseninde oluşan kesme kuvvetlerinin yine dalgalanma yapsalar bile genel hatlarıyla ilerleme hızından etkilenmedikleri ve sabit kaldıkları fark edilebilir. 2500 dev/dak fener mili hızında olduğu gibi Z ekseninde oluşan kesme kuvvetleri incelendiğinde RCFE060'ın daha yüksek kesme kuvvetleri oluşturduğu görülebilir. Yine 2500 dev/dak fener mili hızında olduğu gibi RCFE060'ın Z ekseninde oluşturduğu kesme kuvvetleri 2-3 kat fazla çıkmaktadır.

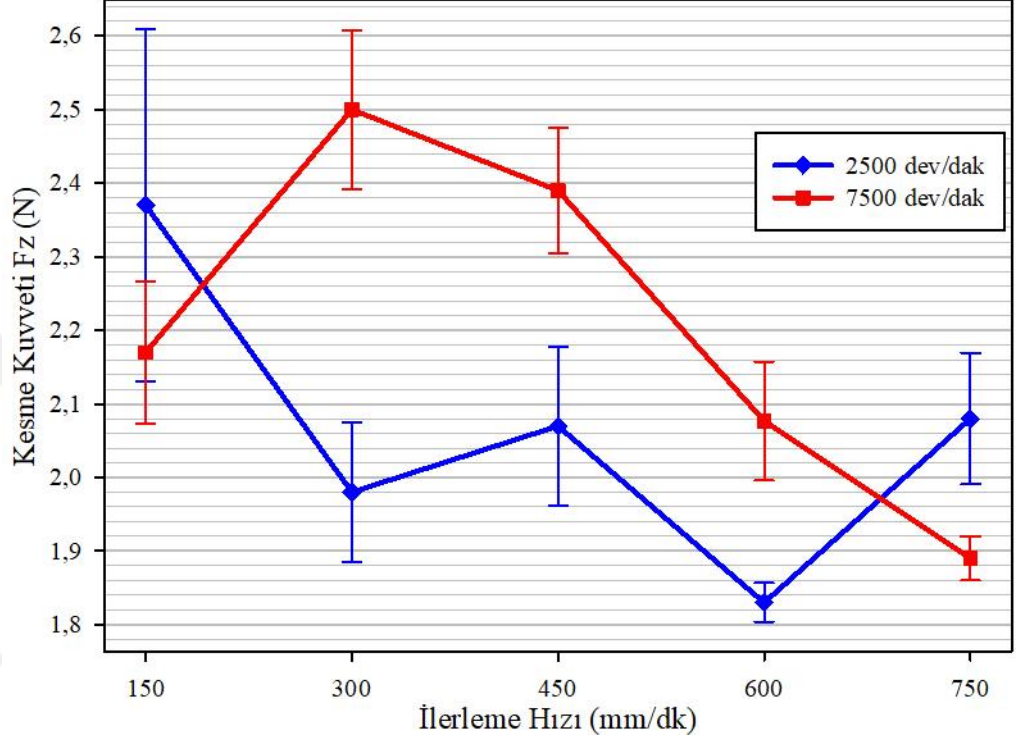


Şekil 4.7. RRFE060 için X ekseninde oluşan kesme kuvvetinin ilerleme hızına göre değişimi



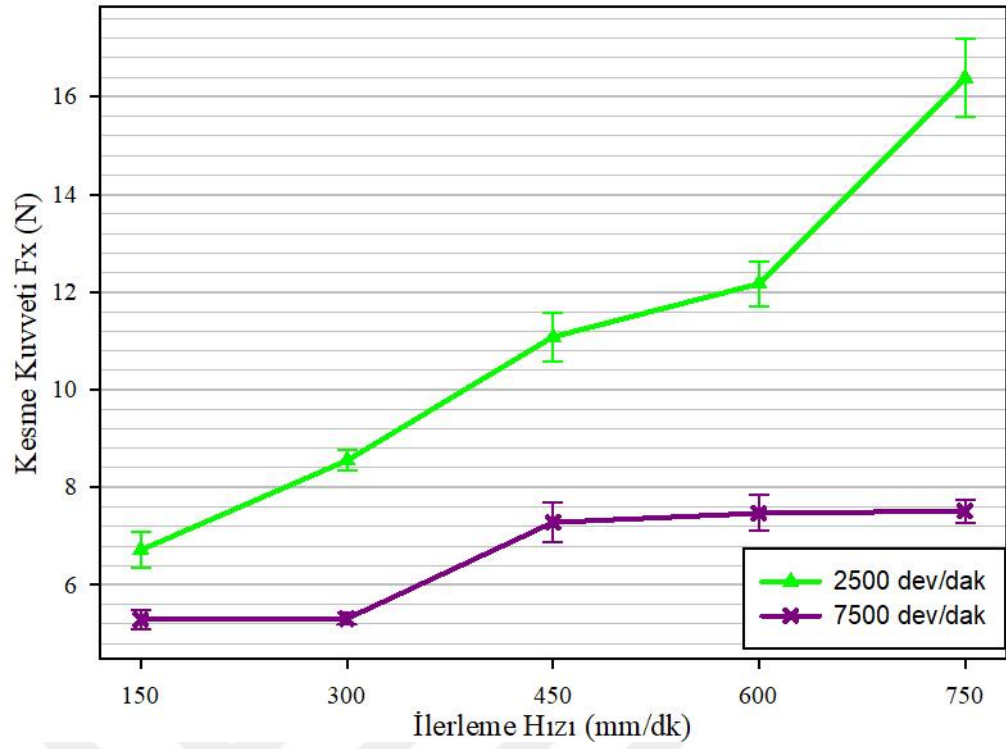
Şekil 4.8. RRFE060 için Y ekseninde oluşan kesme kuvvetinin ilerleme hızına göre değişimi

Şekil 4.7, Şekil 4.8, Şekil 4.9’da RRFE060 kesici takım için farklı fener mili hızlarında, kesme hızlarının ilerleme hızına göre değişimleri gösterilmiştir. Şekil 4.7’ye ve Şekil 4.8’e bakıldığında, X ve Y yönündeki kesme kuvvetleri benzer davranışlar göstererek ilerleme hızıyla beraber artmıştır. Her iki grafikte de kesme kuvvetleri, 2500 dev/dak fener mili hızında 7500 dev/dak fener mili hızına göre daha yüksek çıkmıştır.

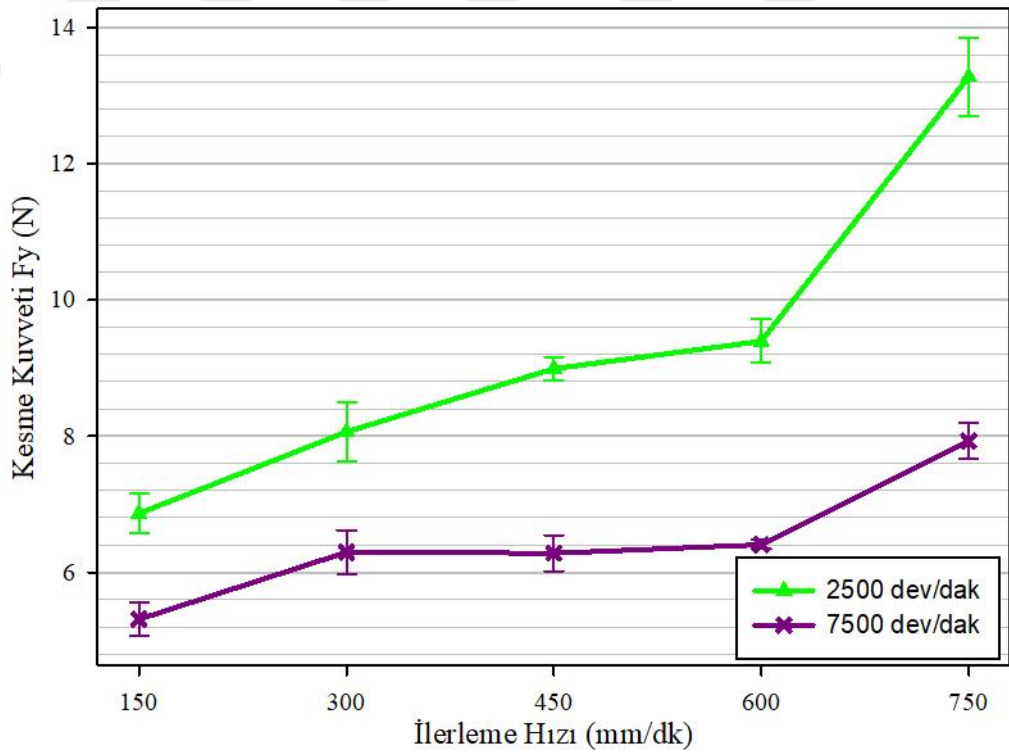


**Şekil 4.9.** RRFE060 için Z ekseninde oluşan kesme kuvvetinin ilerleme hızına göre değişimi

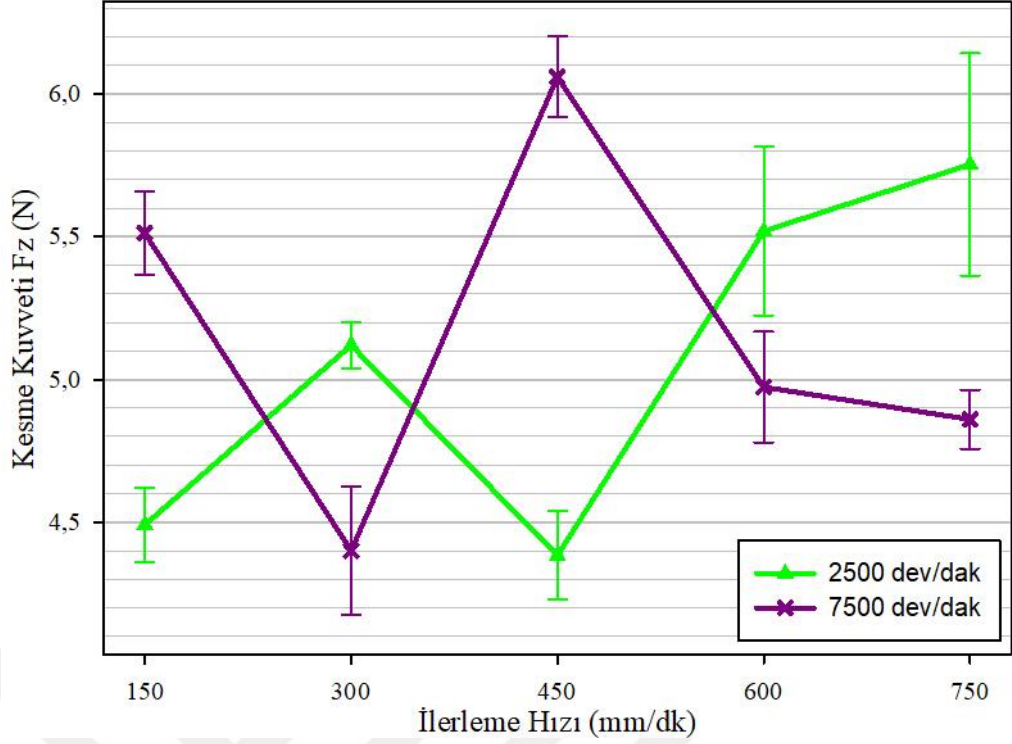
Şekil 4.9’da görülebildiği üzere RRFE060 için Z ekseninde kesme kuvvetleri, farklı fener mili hızlarında dalgalanmalar yapsa dahi birbirine yakın görülmüştür ve yaklaşık olarak sabit kalmıştır.



Şekil 4.10. RCFE060 için X ekseninde oluşan kesme kuvvetinin ilerleme hızına göre değişimi



Şekil 4.11. RCFE060 için Y ekseninde oluşan kesme kuvvetinin ilerleme hızına göre değişimi



**Şekil 4.12.** RCFE060 için Z ekseninde oluşan kesme kuvvetinin ilerleme hızına göre değişimi

Şekil 4.10, Şekil 4.11, Şekil 4.12’de ise RCFE060 kesici takım için farklı fener mili hızlarında, kesme hızlarının ilerleme hızına göre değişimleri gösterilmiştir. Şekil 4.10 ve Şekil 4.11’e bakıldığında, X ve Y yönündeki kesme kuvvetleri yine benzer eğilimler göstererek ilerleme hızıyla beraber artmıştır. Her iki grafikte de kesme kuvvetleri, 2500 dev/dak fener mili hızında 7500 dev/dak fener mili hızına göre daha yüksek çıkmıştır. Ancak her iki grafikte de dikkat çeken husus 7500 dev/dak fener mili hızında kesme kuvveti artış hızının 2500 dev/dak fener mili hızına nazaran daha yavaş olduğudur.

RRFE060 için Z eksenindeki kesme kuvvetleri Şekil 4.12’de incelenirse görülebilir ki farklı fener mili hızlarında yine dalgalanmalar yapsa dahi birbirine yakın görülmüştür ve yaklaşık olarak sabit kalmıştır.

#### 4.2. Kanalların Mikroskop Altında İncelenmesi

RRFE060 ve RCFE060 kesici takımlarıyla Nomex bal peteği sandviç kompozit malzemede 4 mm derinliğinde kanal açma işlemleri uygulanmıştır. Uygulanan işlemler sonrasında Keyence VHX-900 model mikroskopla kanallar görüntülenmiştir. Her bir parametre için üçer defa deneye tabi tutulan numuneler 50 kat büyütülerek tepeden fotoğraflanmıştır. Bu görüntüler Çizelge 4.1.’de görülebilir.

**Çizelge 4.1.** Nomex kompozit malzemede açılan kanallarda oluşan deformasyonlarının 50 kat büyütülmüş görüntüleri

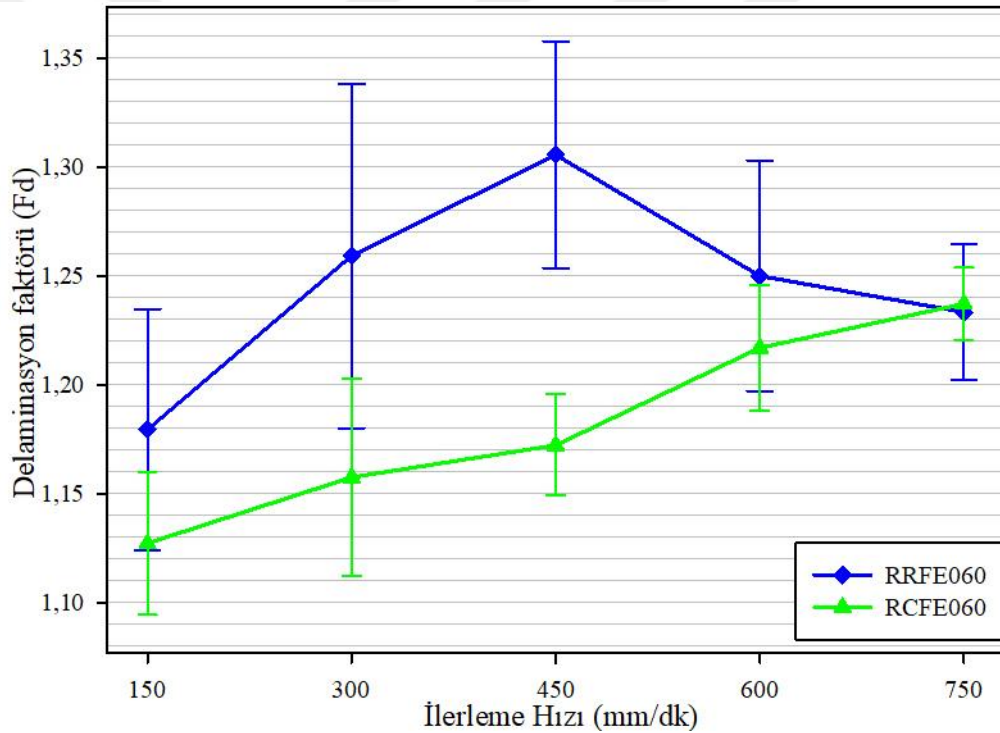
| Fener mili hızı (dev/dak) | İlerleme (mm/dak) | RRFE |  |  | RCFE |  |  |
|---------------------------|-------------------|------|--|--|------|--|--|
| 2500                      | 150               |      |  |  |      |  |  |
|                           | 300               |      |  |  |      |  |  |
|                           | 450               |      |  |  |      |  |  |
|                           | 600               |      |  |  |      |  |  |
|                           | 750               |      |  |  |      |  |  |
| 7500                      | 150               |      |  |  |      |  |  |
|                           | 300               |      |  |  |      |  |  |
|                           | 450               |      |  |  |      |  |  |
|                           | 600               |      |  |  |      |  |  |
|                           | 750               |      |  |  |      |  |  |

Görüntüler ışığında her bir kesici takım ve fener mili hızı gruplarında, ilerleme hızı arttıkça delaminasyon ve kesilmemiş lif kusurlarının arttığı açıkça görülmektedir. Ayrıca RRFE060 kesici takımıyla açılan kanallarda, RCFE060 kesici takım ile açılan kanallara nazaran aynı kusurların daha fazla olduğu görülmektedir. Fener mili hızları karşılaştırıldığında ise 2500 dev/dak fener bile hızı ile açılan kanallar 7500 dev/dak fener mili hızıyla açılan kanallara göre daha fazla kusur sergilemektedir.

#### 4.3. Delaminasyon Değerlendirmesi

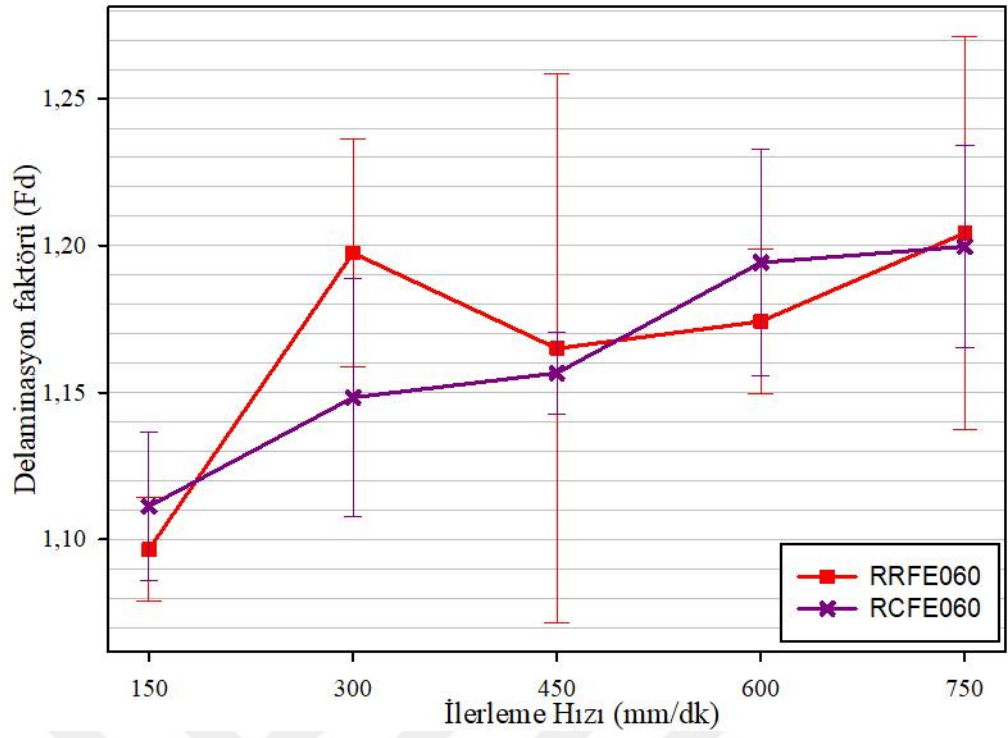
Gerçekleştirilen deneyler sonrasında açılan kanalların mikroskop altında görüntüleri alınmıştır. Görüntüler üzerinde kesici takım genişliği (W) ve maksimum hasarlı kanal genişliği (W<sub>max</sub>) ölçümleri yapılarak delaminasyon faktörü (F<sub>d</sub>) elde edilmiştir. Yapılan her bir ölçüm birbirinden bağımsız görüntüler üzerinden gerçekleştirildiği için sayısal değerler gerçek ölçüleri vermemektedir ancak birbirine oranlandığı zaman delaminasyon faktörünü vermektedir (Harun vd., 2017).

Maksimum kesilmemiş lif uzunluğu ölçümleri görüntülerin sağ al köşesinde bulunan ölçekten yararlanılarak bulunmuştur. Yapılan ölçümlerin görüntüleri EK 4, EK 5, EK 6 ve EK 7’de verilmiştir. Ölçülen ve elde edilen delaminasyon faktörü değerleri ve maksimum kesilmemiş lif uzunlukları EK 8-Çizelge 4.4’te tablo halinde verilmiştir.

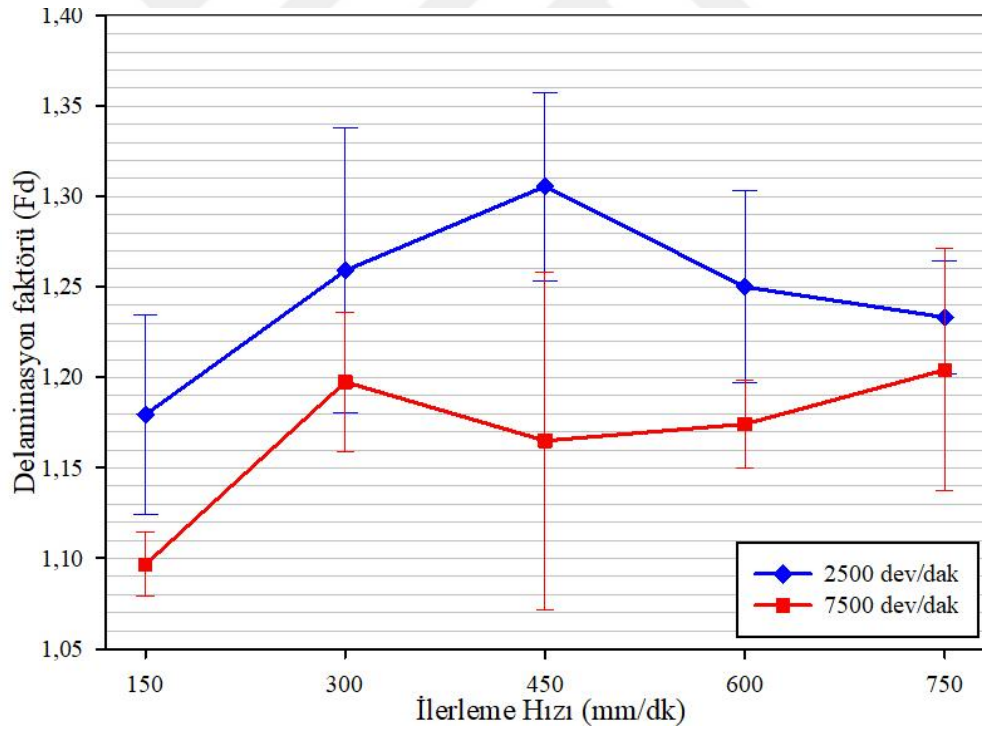


**Şekil 4.13.** 2500 dev/dak fener mili hızında oluşan delaminasyon faktörleri

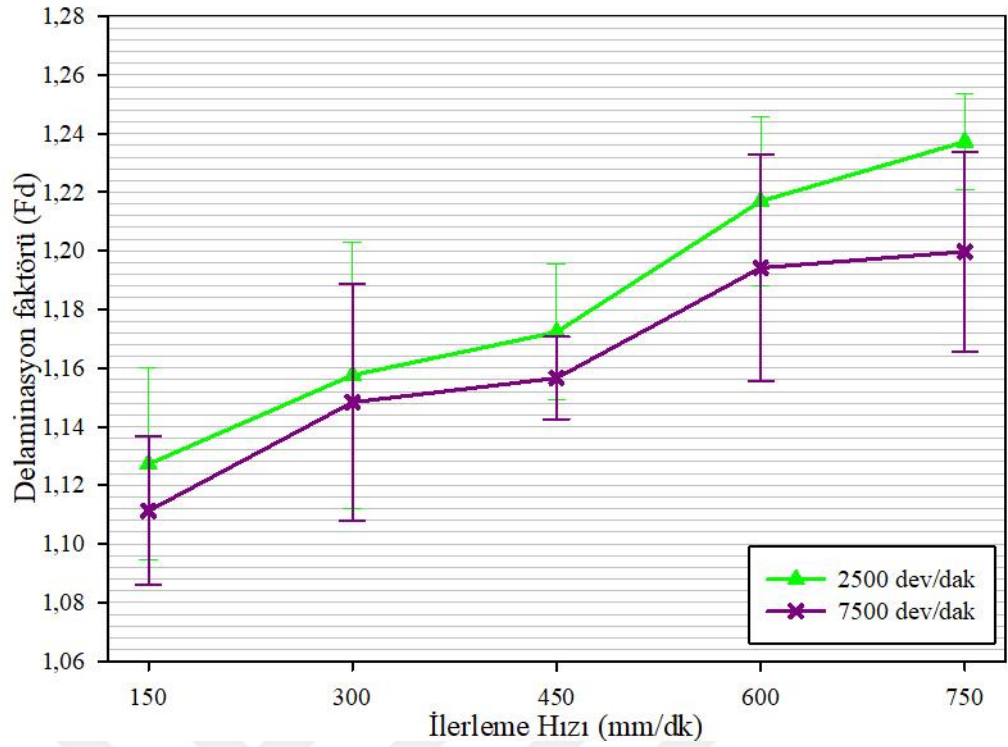
Şekil 4.13’te RCFE060 kesici takım için 2500 dev/dak fener mili hızında ilerleme hızı arttıkça delaminasyonun arttığı gözlemlenmiştir. RRFE060’ta ise ilk etapta delaminasyonlarda bir yükseliş, 450 mm/dak ilerlemeyi aştıktan sonra bir düşüş görülmektedir. Ancak genel trend yukarı yönlüdür. Şekil 4.14 incelendiğinde 7500 dev/dak’da her iki kesici takımla gerçekleştirilen işlemlerde delaminasyonlar artmıştır. Bununla beraber 300 mm/dak hariç diğer ilerleme hızlarında kesici takımlar birbirine yakın değerler vermiştir.



Şekil 4.14. 7500 dev/dak fener mili hızında oluşan delaminasyon faktörleri



Şekil 4.15. RRFE060 kesici takımla işlemede oluşan delaminasyon faktörleri



**Şekil 4.16.** RCFE060 kesici takımla işlemede oluşan delaminasyon faktörleri

Şekil 4.15’te görülebildiği üzere delaminasyonlar her iki fener mili hızı değerinde de artış eğilimindedir ancak 2500 dev/dak fener mili hızı yaklaşık %5-20 aralığında fazla delaminasyon faktörü üretmektedir. Şekil 4.16 incelendiğinde ise delaminasyon değerlerinin ilerleme hızlarıyla beraber arttıkları ve 2500 dev/dak fener mili hızı hafif yüksek çıktılar verse de eğrilerin hemen hemen birbirine paralel oldukları görülebilir.

## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması dahilindeki araştırmada Nomex bal peteği çekirdekli sandviç kompozit malzemenin oda sıcaklığında kuru şartlarda frezelenmesi incelenmiştir. Belirli ölçülerde kesilen numunelere iki farklı kesici takım kullanılarak iki farklı fener mili hızı ve 5 farklı ilerleme hızı parametreleriyle 4 mm derinliğinde kanal açma işlemi uygulanmıştır. Bunlardan biri kırıcı yanal yüzeylere sahip iki ağızlı kesici takımken diğeri üç ağızlı bir kesici takımdır ve her ikisinin de çapı 6 mm'dir. 2500 ve 7500 dev/dak fener mili hızları; 150, 300, 450, 600 ve 750 mm/dk ilerleme hızları kullanılarak gerçekleştirilen işlemede herhangi bir destek plakası kullanılmamıştır. İşleme tezgahının tablasına dinamometre bağlanmıştır ve işlem süresince kesme kuvvetleri ölçülmüştür. Deneyler tamamlandıktan sonra numuneler üzerine açılan kanalların mikroskop altında delaminasyon ve kesilmemiş lif uzunlukları incelenmiş ve görüntülenmiştir. İşlemenin giriş ve çıkış esnasındaki kuvvet ve delaminasyon değerleri ele alınmamış, yalnızca değerlerin stabil olduğu aşamalar incelenmek üzere dikkate alınmıştır.

Ortaya çıkan bütün veriler incelendiğinde ilerleme hızı ve fener mili hızının artmasıyla X ekseninde oluşan kuvvetlerin azaldığı sonucuna ulaşılmıştır. Y ekseninde oluşan kuvvetler için de benzer etkiler görülmüştür. Delaminasyon açısından fener mili hızları karşılaştırıldığında kesici takım farketmeksizin fener mili hızının artmasıyla hataların azaldığı sonucuna varılmıştır. Ulaşılan bu sonuçlar literatürle örtüşmektedir (Ghalme vd., 2016).

X ve Y eksenlerindeki kuvvetler için kesici takımlar karşılaştırıldığında ilerleme hızının artmasıyla her iki kesici takım için de kuvvetlerin arttığı gözlenmiştir. Bunun yanı sıra RRFE060 15° helis açılı sahip 3 ağızlı kesici takımın; RCFE060 28° helis açılı, kırıcı yanal yüzeylere sahip kesici takıma göre daha yüksek kuvvetler oluşturduğu açıkça görülmektedir. Bunun sebebi olarak kırıcı yanal yüzeylerin X ve Y yönlerinde etkin bir şekilde çalışması öne sürülebilir. Bununla beraber RRFE060, RCFE060'a nispeten düşük devirde daha yüksek delaminasyona sebep olsa da devir yükseldikçe iki kesici takımın oluşturduğu delaminasyon faktörleri arasındaki fark azalmıştır. Daha önce yapılmış çalışmalarda benzer sonuçlar görülmüştür (Harun vd., 2017). Ayrıca düşük devirde kırıcı yanal yüzeyleri etkin şekilde çalışıp avantajlı konuma geçen RCFE060'ın yüksek devirde pek de fark yaratmadığı ortaya konmuştur. X ve Y eksenlerinde oluşan delaminasyon ve kesme kuvvetlerine göre öne çıkan parametreler; RCFE060 28° helis açılı, kırıcı yanal

yüzeylere sahip kesici takım, 7500 dev/dak fener mili hızı ve 150 mm/dak ilerleme hızı olarak tespit edilmiştir.

Z ekseninde oluşan kuvvetlerin ilerlemeyle ve fener mili hızıyla dalgalandığı fakat kayda değer şekilde değişmediği gözlemlenmiştir. Açıkça ortaya konulan sonuçlardan biri RCFE060 kesici takımın RRFE060'a göre çok daha yüksek kesme kuvveti değeri oluşturduğudur. İki ayrı kesici takımın dikey ekseninde oluşturduğu kesme kuvvetlerinin aralarında yaklaşık üç kata varan farklar görülebilmektedir. Bunun sebebi olarak da ağız sayısının fazla olması öngörülebilmektedir. Daha önce yapılmış çalışmalarda benzer sonuçlara ulaşılmıştır (Harun vd., 2017; Habib vd., 2021).

Elde edilen bulguların tamamı daha önce yapılmış çalışmalarla örtüşmektedir. Yalnız 2500 dev/dak fener mili hızında RRFE060 kesici takımı ile yapılan çalışmada 450 mm/dak ilerleme hızından sonra gerçekleşen dramatik düşüş beklenmedik şekilde gerçekleşmiştir. Bununla ilgili olarak Li vd., (2020)'nin yaptığı çalışmada gerçekleşen durum göz önünde bulundurularak ilerleme hızı arttıkça kesici takım etrafında ortam sıcaklığının arttığı ve buna bağlı olarak kesme kuvvetlerinin ve deformasyonların azaldığı öngörülmüştür.

## KAYNAKLAR

- Abrate, S. (1994). Impact on laminated composites: Recent advances. *Applied Mechanics Reviews*, 47(11), 517–544. <https://doi.org/10.1115/1.3111065>
- Ahmad, S., Zhang, J., Feng, P., Yu, D., Wu, Z., ve Ke, M. (2019). Research on design and FE simulations of novel ultrasonic circular saw blade (UCSB) cutting tools for rotary ultrasonic machining of nomex honeycomb composites. *2019 16th International Bhurban Conference on Applied Sciences and Technology (IBCAST)*. IEEE. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.1109/ibcast.2019.8667182>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112545>
- Akkurt, A. (2006). *Aşındırıcılı Su Jeti Uygulamaları ve Üretimde Yoğun Kullanıma Sahip Malzemelerin Delinmesi*. Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 7(2), 161-169.
- Altus, E., ve Ishai, O. (1986). Transverse cracking and delamination interaction in the failure process of composite laminates. *Composites Science and Technology*, 26(1), 59–77. [https://doi.org/10.1016/0266-3538\(86\)90056-4](https://doi.org/10.1016/0266-3538(86)90056-4)
- Bielawski, R., Rządkowski, W., Augustyn, S., ve Pyrzanowski, P. (2015). Nowoczesne materiały stosowane w konstrukcjach lotniczych – wybrane problemy oraz kierunki rozwoju. *Scientific Letters of University of Rzeszow Technology - Mechanics*, 203–216. <https://doi.org/10.7862/rm.2015.20>
- Brinksmeier, E. (1990). Prediction of tool fracture in drilling. *CIRP Annals*, 39(1), 97–100. [https://doi.org/10.1016/s0007-8506\(07\)61011-7](https://doi.org/10.1016/s0007-8506(07)61011-7)
- Chen, J., ve Gao, X. (2019). Thermal and electrical anisotropy of polymer matrix composite materials reinforced with graphene nanoplatelets and aluminum-based particles. *Diamond and Related Materials*, 100, 107571. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2019.107571>
- Cheng, Q., Jiang, H., ve Li, Y. (2020). Effect of fiber content and orientation on the scratch behavior of short glass fiber reinforced PBT composites. *Tribology International*, 146, 106221. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2020.106221>
- Chibane, H., Serra, R., ve Leroy, R. (2017). Optimal milling conditions of aeronautical composite material under temperature, forces and vibration parameters. *Journal of Composite Materials*, 51(24), 3453–3463. <https://doi.org/10.1177/0021998316687626>
- Choi, H, Kwon, G., Lee, G., ve Bae, D. (2008). Reinforcement with carbon nanotubes in aluminum matrix composites. *Scripta Materialia*, 59(3), 360–363. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2008.04.006>

- Choi, Hyunjoo, Shin, J., Min, B., Park, J., ve Bae, D. (2009). Reinforcing effects of carbon nanotubes in structural aluminum matrix nanocomposites. *Journal of Materials Research*, 24(8), 2610–2616. <https://doi.org/10.1557/jmr.2009.0318>
- Çelikkanat, A. B. (2002). *Teknik Tekstiller*, (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.
- Daniel, I. M., ve Ishai, O. (2007). *Engineering Mechanics of Composite Materials* (2nd ed.). Oxford : Oxford university press.
- Devnani, G. L., ve Sinha, S. (2019). Effect of nanofillers on the properties of natural fiber reinforced polymer composites. *Materials Today: Proceedings*, 18, 647–654. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.06.460>
- Dinesh, S., Rajasekaran, T., Dhanasekaran, M., ve Vigneshwaran, K. (2018). Experimental testing on mechanical properties of sandwich structured carbon fibers reinforced composites. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 402, 012180. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/402/1/012180>
- Dombovari, Z., ve Stepan, G. (2012). The effect of helix angle variation on milling stability. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 134(5). <https://doi.org/10.1115/1.4007466>
- Du, Y., Huang, L., Wang, Y., Yang, K., Tang, J., Wang, Y., ... Ranil, W. S. (2019). Recent developments in graphene-based polymer composite membranes: Preparation, mass transfer mechanism, and applications. *Journal of Applied Polymer Science*, 136(28). <https://doi.org/10.1002/app.47761>
- Ergençiceği, F. (2023). *Nomex kompozit malzemelerinin işlenebilirliğinin araştırılması*. (Yüksek Lisans Tezi). Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Burdur, Türkiye
- Erkan, Ö., Işık, B., Çiçek, A., ve Kara, F. (2012). Prediction of Damage Factor in end Milling of Glass Fibre Reinforced Plastic Composites Using Artificial Neural Network. *Applied Composite Materials*, 20(4), 517–536. <https://doi.org/10.1007/s10443-012-9286-3>
- Esawi, A. M. K., Morsi, K., Sayed, A., Taher, M., ve Lanka, S. (2010). Effect of carbon nanotube (CNT) content on the mechanical properties of CNT-reinforced aluminium composites. *Composites Science and Technology*, 70(16), 2237–2241. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2010.05.004>
- 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
- Geng, D., Zhang, D., Xu, Y., He, F., Liu, D., ve Duan, Z. (2015). Rotary ultrasonic elliptical machining for side milling of CFRP: Tool performance and surface integrity. *Ultrasonics*, 59, 128–137. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2015.02.006>

- Ghalme, S., Mankar, A., ve Bhalerao, Y. J. (2016). Parameter optimization in milling of glass fiber reinforced plastic (GFRP) using DOE-Taguchi method. *SpringerPlus*, 5(1). <https://doi.org/10.1186/s40064-016-3055-y>
- Ghosh, S. (2015). Thermal barrier ceramic coatings — A review. In *Advanced Ceramic Processing*. InTech. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.5772/61346>
- Gill, D. D., Yip-Hoi, D. M., Meaker, M., Boni, T., Eggeman, E. L., Brennan, A. M., ve 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
- Goh, C. S., Wei, J., Lee, L. C., ve Gupta, M. (2006). Simultaneous enhancement in strength and ductility by reinforcing magnesium with carbon nanotubes. *Materials Science and Engineering: A*, 423(1–2), 153–156. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2005.10.071>
- Godara, S. S., Yadav, A., Goswami, B., ve Rana, R. S. (2021). *Review on history and characterization of polymer composite materials*. *Materials Today: Proceedings*, 44, 2674–2677. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.680>
- Grilo, T. J., Paulo, R. M. F., Silva, C. R. M., ve Davim, J. P. (2013). Experimental delamination analyses of CFRPs using different drill geometries. *Composites Part B: Engineering*, 45(1), 1344–1350. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.07.057>
- Habib, N., Sharif, A., Hussain, A., Aamir, M., Giasin, K., Pimenov, D. Y., ve Ali, U. (2021). Analysis of hole quality and chips formation in the dry drilling process of al7075-t6. *Metals*, 11(6), 891. <https://doi.org/10.3390/met11060891>
- Harun, A., Ting, S. T., Che Haron, C. H., Ghani, J., A., ve Mokhtar, S. (2017). A Study on Parameter Optimization of the Delamination Factor (Fd) in Milling Kenaf Fiber Reinforced Plastics Composite Materials Using DOE Method. *Journal of Mechanical Engineering*, 3(1).
- Hawyes, V. J., Curtis, P. T., ve Soutis, C. (2001). Effect of impact damage on the compressive response of composite laminates. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 32(9), 1263–1270. [https://doi.org/10.1016/s1359-835x\(01\)00072-0](https://doi.org/10.1016/s1359-835x(01)00072-0)
- He, K., Hoa, S. V., ve Ganesan, R. (2000). The study of tapered laminated composite structures: A review. *Composites Science and Technology*, 60(14), 2643–2657. [https://doi.org/10.1016/s0266-3538\(00\)00138-x](https://doi.org/10.1016/s0266-3538(00)00138-x)
- Hohe, J., ve Librescu, L. (2004). Advances in the structural modeling of elastic sandwich panels. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 11(4–5), 395–424. <https://doi.org/10.1080/15376490490451561>

- Hsissou, R., Seghiri, R., Benzekri, Z., Hilali, M., Rafik, M., ve Elharfi, A. (2021). Polymer composite materials: A comprehensive review. *Composite Structures*, 262, 113640. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.113640>
- Ibekwe, S. I., Mensah, P. F., Li, G., Pang, S.-S., ve Stubblefield, M. A. (2007). Impact and post impact response of laminated beams at low temperatures. *Composite Structures*, 79(1), 12–17. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2005.11.025>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.03.255>
- Ju, B., Yang, W., Shao, P., Hussain, M., Zhang, Q., Xiu, Z., ... Wu, G. (2020). Effect of interfacial microstructure on the mechanical properties of GNPs/Al composites. *Carbon*, 162, 346–355. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2020.02.069>
- Kier, Z. T., ve Waas, A. M. (2018). Determining effective interface fracture properties of 3D fiber reinforced foam core sandwich structures. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 37(7), 490–503. <https://doi.org/10.1177/0731684417753298>
- Kirkwood, B. H. (1977). Microscopical observations of the abrasive and ultraviolet deterioration of nomex® aramid fiber. *Textile Research Journal*, 47(3), 171–177. <https://doi.org/10.1177/004051757704700303>
- Kiyak, B., ve Kaman, M. O. (2018). Mechanical properties of new-manufactured sandwich composite having carbon fiber core. *Journal of Composite Materials*, 53(22), 3093–3109. <https://doi.org/10.1177/0021998318810899>
- Kleinhenz, J. E., ve T'ien, J. S. (2007). Combustion of nomex® III fabric in potential space habitat atmospheres: cyclic flame spread phenomenon. *Combustion Science and Technology*, 179(10), 2153–2169. <https://doi.org/10.1080/00102200701386172>
- Kordsa, (2020). *Technical Data Sheet 8909398*, Kordsa Teknik Tekstil A.Ş., 2020.
- Lal, C., Dhiman, B., Tejyan, S., ve Singh, V. (2024). Aluminum 6061 alloy and metal matrix composites: A bibliometric analysis (1973–2023). *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2024.04.018>
- Le Guen, M. J., Newman, R. H., Fernyhough, A., Emms, G. W., ve Staiger, M. P. (2016). The damping–modulus relationship in flax–carbon fibre hybrid composites. *Composites Part B: Engineering*, 89, 27–33. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.10.046>
- Li, J., Cai, X., An, Q., ve Chen, M. (2020). A hybrid approach for cutting force prediction in flank milling based on analytical and 3D finite element method. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 110(5–6), 1601–1613. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05889-4>

- Li, Y., Yi, X., Yu, T., ve Xian, G. (2018). An overview of structural-functional-integrated composites based on the hierarchical microstructures of plant fibers. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 1(2), 231–246. <https://doi.org/10.1007/s42114-017-0020-3>
- Librescu, L., ve Hause, T. (2000). Recent developments in the modeling and behavior of advanced sandwich constructions: A survey. *Composite Structures*, 48(1–3), 1–17. [https://doi.org/10.1016/s0263-8223\(99\)00068-9](https://doi.org/10.1016/s0263-8223(99)00068-9)
- 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. <https://doi.org/10.3390/cryst12050725>
- Lloyd, D. J. (1994). Particle reinforced aluminium and magnesium matrix composites. *International Materials Reviews*, 39(1), 1–23. <https://doi.org/10.1179/095066094790150982>
- Lu, D., Jiang, Y., ve Zhou, R. (2013). Wear performance of nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particles and CNTs reinforced magnesium matrix composites by friction stir processing. *Wear*, 305(1–2), 286–290. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2012.11.079>
- Morkavuk, S., Aslantaş, K., Gemi, L., Köklü, U., ve Yazman, Ş. (2024). The influence of drilling-induced damages and hole quality on hoop tensile and fatigue behavior of CFRP tubes. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 179, 108005. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2024.108005>
- M'Saoubi, R., ve Chandrasekaran, H. (2005). Experimental tool temperature distributions in oblique and orthogonal cutting using chip breaker geometry inserts. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 128(2), 606–610. <https://doi.org/10.1115/1.2162904>
- Nikbakt, S., Kamarian, S., ve Shakeri, M. (2018). A review on optimization of composite structures Part I: Laminated composites. *Composite Structures*, 195, 158–185. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.03.063>
- Ogawa, F., ve Masuda, C. (2021). Fabrication and the mechanical and physical properties of nanocarbon-reinforced light metal matrix composites: A review and future directions. *Materials Science and Engineering: A*, 820, 141542. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2021.141542>
- Oiwa, M., Ogasawara, T., Yoshinaga, H., Oguri, T., ve Aoki, T. (2021). Numerical analysis of face sheet buckling for a CFRP/Nomex honeycomb sandwich panel subjected to bending loading. *Composite Structures*, 270, 114037. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.114037>
- Okada, R. (2002). The role of the resin fillet in the delamination of honeycomb sandwich structures. *Composites Science and Technology*, 62(14), 1811–1819. [https://doi.org/10.1016/s0266-3538\(02\)00099-4](https://doi.org/10.1016/s0266-3538(02)00099-4)

- Okur, M. Z., Kangal, S., ve Tanoğlu, M. (2018). *Development of aluminum honeycomb cored carbon fiber reinforced polymer composite based sandwich structure*. MDPI AG. Retrieved from MDPI AG website: <http://dx.doi.org/10.20944/preprints201812.0195.v1>
- Ovesy, H. R., Taghizadeh, M., ve Kharazi, M. (2012). Post-buckling analysis of composite plates containing embedded delaminations with arbitrary shape by using higher order shear deformation theory. *Composite Structures*, 94(3), 1243–1249. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2011.11.011>
- Peters, S. T. (2013). *Handbook of composites*. Springer Science ve Business Media.
- Pickering, K. L., Efendy, M. G. A., ve Le, T. M. (2016). A review of recent developments in natural fibre composites and their mechanical performance. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 83, 98–112. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2015.08.038>
- Poovazhagan, L., Kalaichelvan, K., Rajadurai, A., ve Senthilvelan, V. (2013). Characterization of hybrid silicon carbide and boron carbide nanoparticles-reinforced aluminum alloy composites. *Procedia Engineering*, 64, 681–689. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.09.143>
- Prasad, S., ve Carlsson, L. A. (1994). Debonding and crack kinking in foam core sandwich beams—II. Experimental investigation. *Engineering Fracture Mechanics*, 47(6), 825–841. [https://doi.org/10.1016/0013-7944\(94\)90062-0](https://doi.org/10.1016/0013-7944(94)90062-0)
- Prashanth, S., Subbaya, K. M., Nithin, K., ve Sachhidananda, S. (2017). [Review of *Fiber Reinforced Composites - A Review*]. 6(3).
- Raj, P., P., Perumal, E., A., ve Ramu, P. (2012). Prediction of surface roughness and delamination in end milling of GFRP using mathematical model and ANN . *Indian Journal of Engineering ve Materials Sciences*, 19, 107–120.
- Rod, K. A., Nguyen, M.-T., Elbakhshwan, M., Gills, S., Kutchko, B., Varga, T., ... Fernandez, C. A. (2019). Insights into the physical and chemical properties of a cement-polymer composite developed for geothermal wellbore applications. *Cement and Concrete Composites*, 97, 279–287. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.12.022>
- Rosso, M. (2006). Ceramic and metal matrix composites: Routes and properties. *Journal of Materials Processing Technology*, 175(1–3), 364–375. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.04.038>
- Sheikh-Ahmad, J. Y., Dhuttargaon, M., ve Cheraghi, H. (2017). New tool life criterion for delamination free milling of CFRP. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 92(5–8), 2131–2143. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0240-2>

- Skoczylas, J., Samborski, S., ve Kłonica, M. (2019). The application of composite materials in the aerospace industry. *Journal of Technology and Exploitation in Mechanical Engineering*, 5(1). <https://doi.org/10.35784/jteme.73>
- Suresh, M., Sanders, A., Prajapati, P., Kaipa, K., ve Kravchenko, O. G. (2020). Composite sandwich repair using through-thickness reinforcement with robotic hand micro-drilling. *Composite Structures*, 248, 112473. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112473>
- Taegutec Cutting Tools – *RCFE060 Catalog (2023b)*, Erişim adresi: <https://www.imc-companies.com/taegutec/ttkcatalog/item.aspx?cat=6146642&fnum=10255&map=ML&app=0&GFSTYP=M&isoD=1> , (16.08.2023)
- Taegutec Cutting Tools – *RRFE060 Catalog (2023a)*, Erişim adresi: <https://www.imc-companies.com/TaeguTec/ttkCatalog/item.aspx?cat=6146657&fnum=10254&mapp=ML&app=59&GFSTYP=M&isoD=1> , (16.08.2023)
- Taguchi, G., Wu, Y., *Introduction To Off-line Quality Control*, Central Japan Quality Control Association, Nagaya.
- Thakur, S. K., Kwee, G. T., ve Gupta, M. (2007). Development and characterization of magnesium composites containing nano-sized silicon carbide and carbon nanotubes as hybrid reinforcements. *Journal of Materials Science*, 42(24), 10040–10046. <https://doi.org/10.1007/s10853-007-2004-0>
- Thomas, S., Abraham, J., Parambil, A. M., Krishnan, A., Maria, H. J., Ilschner, B., ... McCullough, R. L. (2016). *Compsite Materials* (2nd ed.). Hoboken: Wiley.
- Wang, B., Wu, L.-Z., Ma, L., ve Feng, J.-C. (2011). Low-velocity impact characteristics and residual tensile strength of carbon fiber composite lattice core sandwich structures. *Composites Part B: Engineering*, 42(4), 891–897. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2011.01.007>
- Wang, H., Sun, J., Li, J., Lu, L., ve Li, N. (2015). Evaluation of cutting force and cutting temperature in milling carbon fiber-reinforced polymer composites. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 82(9–12), 1517–1525. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7479-2>
- Windhorst, T., ve Blount, G. (1997). Carbon-carbon composites: A summary of recent developments and applications. *Materials veamp; Design*, 18(1), 11–15. [https://doi.org/10.1016/s0261-3069\(97\)00024-1](https://doi.org/10.1016/s0261-3069(97)00024-1)
- Xavior, M. A., ve Kumar, J. P. A. (2017). Machinability of hybrid metal matrix composite - A review. *Procedia Engineering*, 174, 1110–1118. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.01.264>
- Xi, F., Lin, Y., ve Lin, Y., (2016). A Robotic Percussive Riveting System for Aircraft Assembly Automation. D. Zhang, B. Wei (Ed.), *Advanced Mechatronics and MEMS Devices II* içinde (443–468 s). Toronto;Oshawa: Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-32180-6\\_20](https://doi.org/10.1007/978-3-319-32180-6_20)

- Xie, S., Jing, K., Zhou, H., ve Liu, X. (2020). Mechanical properties of Nomex honeycomb sandwich panels under dynamic impact. *Composite Structures*, 235, 111814. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111814>
- Xu, W.-X., ve Zhang, L.-C. (2015). Ultrasonic vibration-assisted machining: Principle, design and application. *Advances in Manufacturing*, 3(3), 173–192. <https://doi.org/10.1007/s40436-015-0115-4>
- Yazman, Ş., Köklü, U., Urtekin, L., Morkavuk, S., ve Gemi, L. (2020). Experimental study on the effects of cold chamber die casting parameters on high-speed drilling machinability of casted AZ91 alloy. *Journal of Manufacturing Processes*, 57, 136–152. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.05.050>
- Yuanyushkin, A. S., Rychkov, D. A., ve Lobanov, D. V. (2014). Surface quality of the fiberglass composite material after milling. *Applied Mechanics and Materials*, 682, 183–187. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.682.183>
- Zarrouk, T., Nouari, M., Benbouaza, A., ve Bouali, A. (2023). Influence of cutting tool geometry when milling Nomex honeycomb structure. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 130(1–2), 649–663. <https://doi.org/10.1007/s00170-023-12729-8>
- 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. <https://doi.org/10.3390/jmmp7010028>
- Zarrouk, T., Nouari, M., Salhi, J.-E., ve Benbouaza, A. (2024). Numerical simulation of rotary ultrasonic machining of the nomex honeycomb composite structure. *Machines*, 12(2), 137. <https://doi.org/10.3390/machines12020137>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.02.110>
- Zhang, X., Chen, Y., ve Hu, J. (2018). Recent advances in the development of aerospace materials. *Progress in Aerospace Sciences*, 97, 22–34. <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2018.01.001>
- Zhou, Y., Liu, A., Xu, Y., Guo, Y., Yi, X., ve Jia, Y. (2021). Frequency-dependent orthotropic damping properties of Nomex honeycomb composites. *Thin-Walled Structures*, 160, 107372. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.107372>

## EKLER

**EK 1 - Çizelge 4.1. X eksenindeki kesme kuvvetleri**

| Fx (N)       |                           |                   |         |         |         |                 |
|--------------|---------------------------|-------------------|---------|---------|---------|-----------------|
| Kesici Takım | Fener mili hızı (dev/dak) | İlerleme (mm/dak) | 1.Deney | 2.Deney | 3.Deney | Ortalama Fx (N) |
| RRFE060      | 2500                      | 150               | 11,83   | 11,68   | 11,92   | 11,81           |
|              |                           | 300               | 19,13   | 21,45   | 20,14   | 20,24           |
|              |                           | 450               | 22,04   | 20,83   | 20,25   | 21,04           |
|              |                           | 600               | 23,03   | 23,86   | 23,61   | 23,50           |
|              |                           | 750               | 24,49   | 23,57   | 24,82   | 24,29           |
|              | 7500                      | 150               | 11,31   | 10,53   | 10,8    | 10,88           |
|              |                           | 300               | 12,96   | 13,9    | 12,86   | 13,24           |
|              |                           | 450               | 13,49   | 14,13   | 13,37   | 13,66           |
|              |                           | 600               | 15,02   | 14,06   | 14,78   | 14,62           |
|              |                           | 750               | 20,99   | 20,96   | 19,43   | 20,46           |
| RCFE060      | 2500                      | 150               | 6,39    | 7,11    | 6,65    | 6,72            |
|              |                           | 300               | 8,31    | 8,69    | 8,66    | 8,55            |
|              |                           | 450               | 10,84   | 10,75   | 11,65   | 11,08           |
|              |                           | 600               | 11,94   | 12,7    | 11,87   | 12,17           |
|              |                           | 750               | 17,24   | 16,26   | 15,66   | 16,39           |
|              | 7500                      | 150               | 5,5     | 5,25    | 5,12    | 5,29            |
|              |                           | 300               | 5,38    | 5,38    | 5,17    | 5,31            |
|              |                           | 450               | 6,85    | 7,66    | 7,33    | 7,28            |
|              |                           | 600               | 7,89    | 7,27    | 7,25    | 7,47            |
|              |                           | 750               | 7,25    | 7,72    | 7,57    | 7,51            |

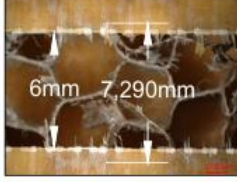
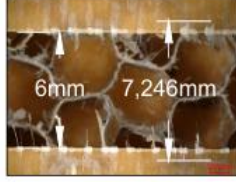
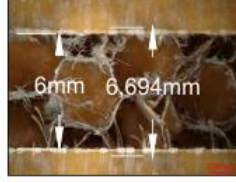
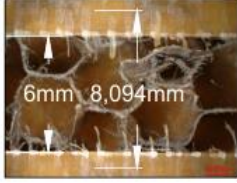
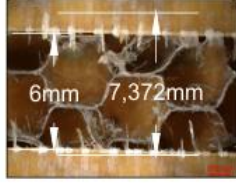
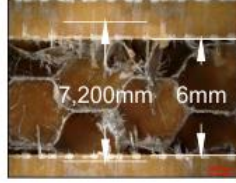
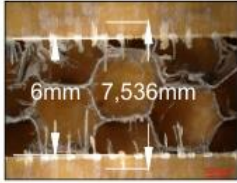
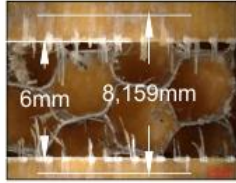
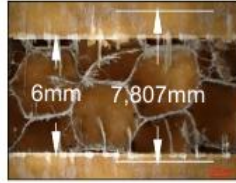
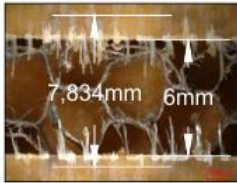
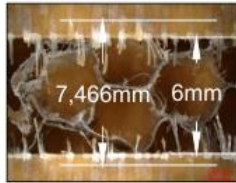
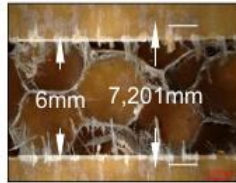
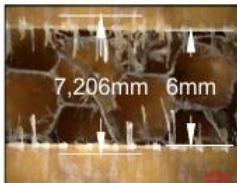
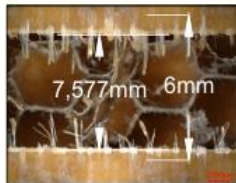
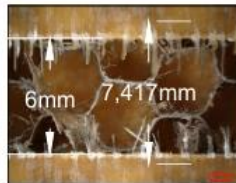
**EK 2 - Çizelge 4.2. Y eksenindeki kesme kuvvetleri**

| Fy (N)       |                           |                   |         |         |         |                 |
|--------------|---------------------------|-------------------|---------|---------|---------|-----------------|
| Kesici Takım | Fener mili hızı (dev/dak) | İlerleme (mm/dak) | 1.Deney | 2.Deney | 3.Deney | Ortalama Fy (N) |
| RRFE060      | 2500                      | 150               | 14,27   | 13,26   | 13,39   | 13,64           |
|              |                           | 300               | 18,1    | 17      | 16,8    | 17,30           |
|              |                           | 450               | 18,61   | 19,05   | 18,89   | 18,85           |
|              |                           | 600               | 18,88   | 18,49   | 17,35   | 18,24           |
|              |                           | 750               | 19,37   | 20,96   | 19,13   | 19,82           |
|              | 7500                      | 150               | 10,13   | 10,19   | 9,4     | 9,91            |
|              |                           | 300               | 11,36   | 11,33   | 11,7    | 11,46           |
|              |                           | 450               | 14,55   | 15,44   | 13,81   | 14,60           |
|              |                           | 600               | 16,26   | 15,71   | 15,07   | 15,68           |
|              |                           | 750               | 17,05   | 17,3    | 16,83   | 17,06           |
| RCFE060      | 2500                      | 150               | 7,1     | 6,54    | 6,95    | 6,86            |
|              |                           | 300               | 7,67    | 8,53    | 7,99    | 8,06            |
|              |                           | 450               | 8,8     | 9,14    | 9,03    | 8,99            |
|              |                           | 600               | 9,29    | 9,14    | 9,75    | 9,39            |
|              |                           | 750               | 13,78   | 12,65   | 13,39   | 13,27           |
|              | 7500                      | 150               | 5,29    | 5,08    | 5,56    | 5,31            |
|              |                           | 300               | 6,61    | 5,96    | 6,32    | 6,30            |
|              |                           | 450               | 6,25    | 6,03    | 6,56    | 6,28            |
|              |                           | 600               | 6,44    | 6,33    | 6,45    | 6,41            |
|              |                           | 750               | 8,23    | 7,75    | 7,81    | 7,93            |

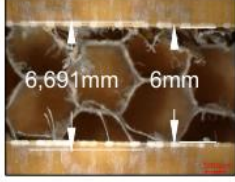
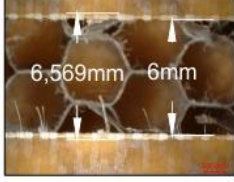
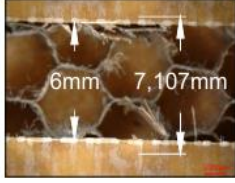
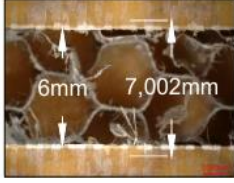
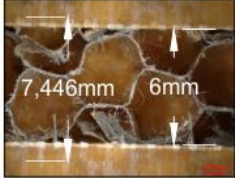
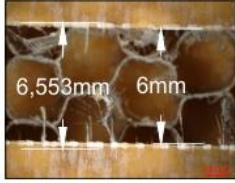
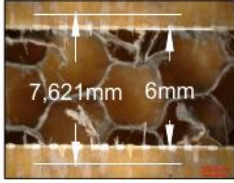
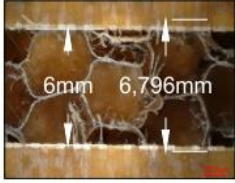
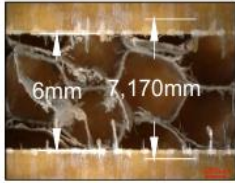
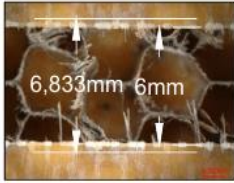
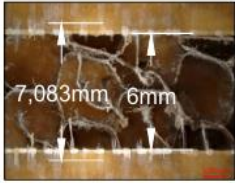
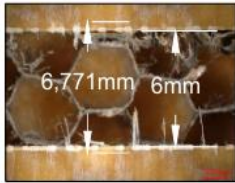
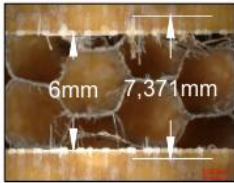
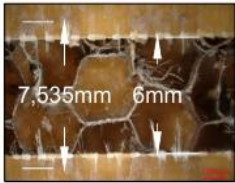
**EK 3- Çizelge 4.3. Z eksenindeki kesme kuvvetleri**

| Fz (N)          |                              |                      |         |         |         |                    |
|-----------------|------------------------------|----------------------|---------|---------|---------|--------------------|
| Kesici<br>Takım | Fener mili hızı<br>(dev/dak) | İlerleme<br>(mm/dak) | 1.Deney | 2.Deney | 3.Deney | Ortalama<br>Fz (N) |
| RRFE060         | 2500                         | 150                  | 2,42    | 2,58    | 2,11    | 2,37               |
|                 |                              | 300                  | 2,03    | 1,87    | 2,04    | 1,98               |
|                 |                              | 450                  | 1,95    | 2,16    | 2,10    | 2,07               |
|                 |                              | 600                  | 1,82    | 1,86    | 1,81    | 1,83               |
|                 |                              | 750                  | 2,11    | 1,98    | 2,15    | 2,08               |
|                 | 7500                         | 150                  | 2,28    | 2,1     | 2,13    | 2,17               |
|                 |                              | 300                  | 2,38    | 2,53    | 2,59    | 2,50               |
|                 |                              | 450                  | 2,4     | 2,3     | 2,47    | 2,39               |
|                 |                              | 600                  | 2,03    | 2,17    | 2,03    | 2,08               |
|                 |                              | 750                  | 1,92    | 1,86    | 1,89    | 1,89               |
| RCFE060         | 2500                         | 150                  | 4,63    | 4,47    | 4,37    | 4,49               |
|                 |                              | 300                  | 5,03    | 5,18    | 5,15    | 5,12               |
|                 |                              | 450                  | 4,27    | 4,56    | 4,32    | 4,38               |
|                 |                              | 600                  | 5,28    | 5,85    | 5,43    | 5,52               |
|                 |                              | 750                  | 5,83    | 6,1     | 5,33    | 5,75               |
|                 | 7500                         | 150                  | 5,45    | 5,68    | 5,41    | 5,51               |
|                 |                              | 300                  | 4,51    | 4,14    | 4,55    | 4,40               |
|                 |                              | 450                  | 6,22    | 6,01    | 5,95    | 6,06               |
|                 |                              | 600                  | 5,1     | 4,75    | 5,07    | 4,97               |
|                 |                              | 750                  | 4,92    | 4,74    | 4,92    | 4,86               |

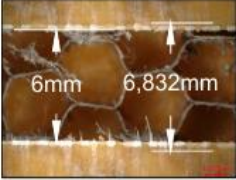
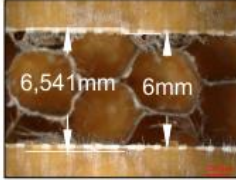
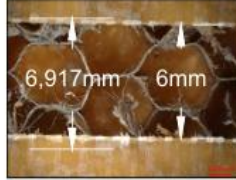
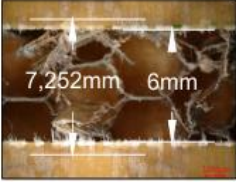
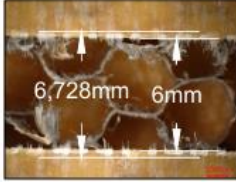
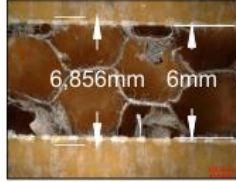
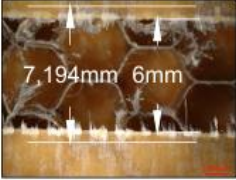
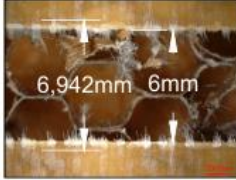
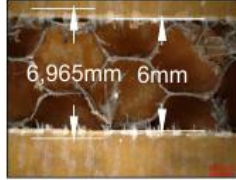
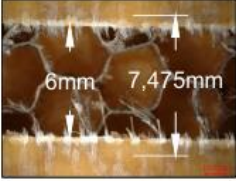
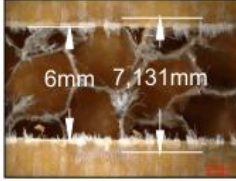
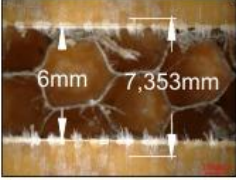
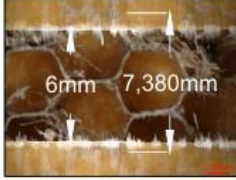
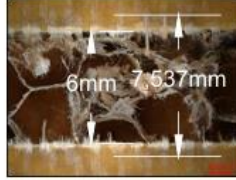
**EK 4 - Çizelge 4.4.** RRFE060 kesici takım ve 2500 dev/dak fener mili hızı ile yapılan kanal açma işleminin sonucu üzerinde yapılan ölçümler

|            | 1. Deney                                                                            | 2. Deney                                                                             | 3. Deney                                                                              |
|------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| 150 mm/dak |    |    |    |
| 300 mm/dak |    |    |    |
| 450 mm/dak |    |    |    |
| 600 mm/dak |  |  |  |
| 750 mm/dak |  |  |  |

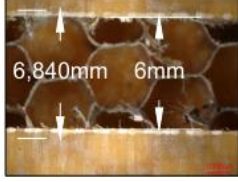
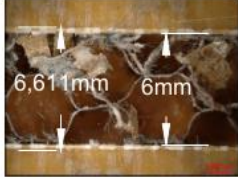
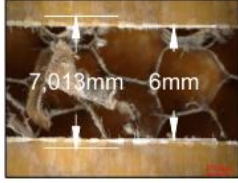
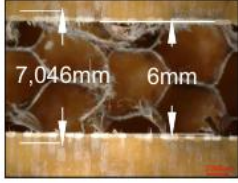
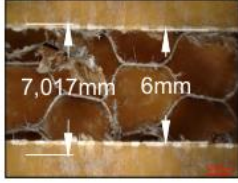
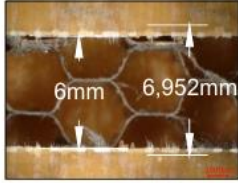
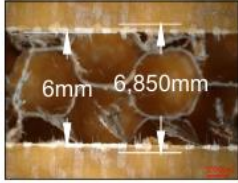
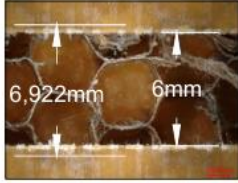
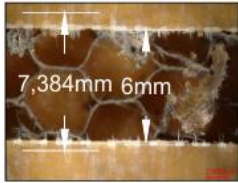
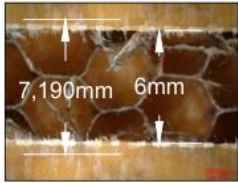
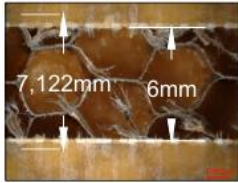
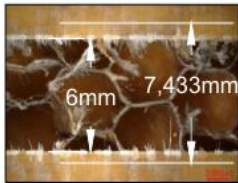
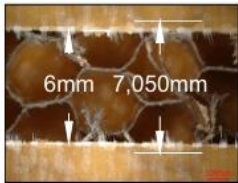
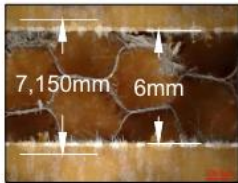
**EK 5 - Çizelge 4.5.** RRFE060 kesici takım ve 7500 dev/dak fener mili hızı ile yapılan kanal açma işleminin sonucu üzerinde yapılan ölçümler

|            | 1. Deney                                                                            | 2. Deney                                                                             | 3. Deney                                                                              |
|------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| 150 mm/dak |    |    |    |
| 300 mm/dak |    |    |    |
| 450 mm/dak |    |    |    |
| 600 mm/dak |  |  |  |
| 750 mm/dak |  |  |  |

**EK 6 - Çizelge 4.6.** RCFE060 kesici takım ve 2500 dev/dak fener mili hızı ile yapılan kanal açma işleminin sonucu üzerinde yapılan ölçümler

|            | 1. Deney                                                                            | 2. Deney                                                                             | 3. Deney                                                                              |
|------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| 150 mm/dak |    |    |    |
| 300 mm/dak |    |    |    |
| 450 mm/dak |    |    |    |
| 600 mm/dak |  |  |  |
| 750 mm/dak |  |  |  |

**EK 7 - Çizelge 4.7.** RCFE060 kesici takım ve 7500 dev/dak fener mili hızı ile yapılan kanal açma işleminin sonucu üzerinde yapılan ölçümler

|            | 1. Deney                                                                            | 2. Deney                                                                             | 3. Deney                                                                              |
|------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| 150 mm/dak |    |    |    |
| 300 mm/dak |    |    |    |
| 450 mm/dak |    |    |    |
| 600 mm/dak |  |  |  |
| 750 mm/dak |  |  |  |

**EK 8 - Çizelge 4.8.** Delaminasyon faktörleri ve maksimum kesilmemiş lif uzunlukları

| Kesici<br>Takım | Fener Mili<br>Hızı<br>(dev/dak) | İlerleme<br>Hızı<br>(mm/dak) | 1. Deney     |           |       | 2. Deney     |           |       | 3. Deney     |           |       | Ortalama<br>Fd | Maksimum<br>Kesilmemiş Lif<br>Uzunluğu (mm) |
|-----------------|---------------------------------|------------------------------|--------------|-----------|-------|--------------|-----------|-------|--------------|-----------|-------|----------------|---------------------------------------------|
|                 |                                 |                              | Wmax<br>(mm) | W<br>(mm) | Fd    | Wmax<br>(mm) | W<br>(mm) | Fd    | Wmax<br>(mm) | W<br>(mm) | Fd    |                |                                             |
| RRFE060         | 2500                            | 150                          | 7,29         | 6         | 1,215 | 7,246        | 6         | 1,208 | 6,694        | 6         | 1,116 | 1,179          | 2,373                                       |
|                 |                                 | 300                          | 8,094        | 6         | 1,349 | 7,372        | 6         | 1,229 | 7,2          | 6         | 1,200 | 1,259          | 1,718                                       |
|                 |                                 | 450                          | 7,536        | 6         | 1,256 | 8,159        | 6         | 1,360 | 7,807        | 6         | 1,301 | 1,306          | 2,305                                       |
|                 |                                 | 600                          | 7,834        | 6         | 1,306 | 7,466        | 6         | 1,244 | 7,201        | 6         | 1,200 | 1,250          | 3,049                                       |
|                 |                                 | 750                          | 7,206        | 6         | 1,201 | 7,577        | 6         | 1,263 | 7,417        | 6         | 1,236 | 1,233          | 2,699                                       |
|                 | 7500                            | 150                          | 6,691        | 6         | 1,115 | 6,569        | 6         | 1,095 | 6,479        | 6         | 1,080 | 1,097          | 2,061                                       |
|                 |                                 | 300                          | 7,107        | 6         | 1,185 | 7,002        | 6         | 1,167 | 7,446        | 6         | 1,241 | 1,198          | 2,256                                       |
|                 |                                 | 450                          | 6,553        | 6         | 1,092 | 7,621        | 6         | 1,270 | 6,796        | 6         | 1,133 | 1,165          | 1,500                                       |
|                 |                                 | 600                          | 7,17         | 6         | 1,195 | 6,883        | 6         | 1,147 | 7,083        | 6         | 1,181 | 1,174          | 2,256                                       |
|                 |                                 | 750                          | 6,771        | 6         | 1,129 | 7,371        | 6         | 1,229 | 7,535        | 6         | 1,256 | 1,204          | 2,012                                       |
| RCFE060         | 2500                            | 150                          | 6,832        | 6         | 1,139 | 6,541        | 6         | 1,090 | 6,917        | 6         | 1,153 | 1,127          | 1,376                                       |
|                 |                                 | 300                          | 7,252        | 6         | 1,209 | 6,728        | 6         | 1,121 | 6,856        | 6         | 1,143 | 1,158          | 0,824                                       |
|                 |                                 | 450                          | 7,194        | 6         | 1,199 | 6,942        | 6         | 1,157 | 6,965        | 6         | 1,161 | 1,172          | 1,825                                       |
|                 |                                 | 600                          | 7,475        | 6         | 1,246 | 7,131        | 6         | 1,189 | 7,299        | 6         | 1,217 | 1,217          | 1,802                                       |
|                 |                                 | 750                          | 7,353        | 6         | 1,226 | 7,38         | 6         | 1,230 | 7,537        | 6         | 1,256 | 1,237          | 1,566                                       |
|                 | 7500                            | 150                          | 6,84         | 6         | 1,140 | 6,552        | 6         | 1,092 | 6,611        | 6         | 1,102 | 1,111          | 0,522                                       |
|                 |                                 | 300                          | 7,013        | 6         | 1,169 | 7,046        | 6         | 1,174 | 7,017        | 6         | 1,102 | 1,148          | 0,705                                       |
|                 |                                 | 450                          | 6,952        | 6         | 1,159 | 6,85         | 6         | 1,142 | 6,922        | 6         | 1,170 | 1,157          | 0,694                                       |
|                 |                                 | 600                          | 7,384        | 6         | 1,231 | 7,19         | 6         | 1,198 | 7,112        | 6         | 1,154 | 1,194          | 1,018                                       |
|                 |                                 | 750                          | 7,433        | 6         | 1,239 | 7,05         | 6         | 1,175 | 7,15         | 6         | 1,185 | 1,200          | 1,998                                       |