

ULUSLARARASI 3B YAZICI TEKNOLOJİLERİ
VE DİJİTAL ENDÜSTRİ DERGİSİ

INTERNATIONAL JOURNAL OF 3D PRINTING
TECHNOLOGIES AND DIGITAL INDUSTRY

ISSN:2602-3350 (Online)

URL: <https://dergipark.org.tr/ij3dptdi>

HAVACILIK ENDÜSTRİSİNDE KULLANILAN KARBON PREPREG KOMPOZİT MALZEMELERİN TALAŞLI İMALAT PROSES ÖZELLİKLERİNİ ETKİLEYEN PARAMETRELERİN İNCELENMESİ

INVESTIGATION OF THE PARAMETERS AFFECTING
MACHINING PROCESS PROPERTIES OF CARBON
PREPREG COMPOSITE MATERIALS USED IN THE
AEROSPACE INDUSTRY

Yazarlar (Authors): Latif Alper GAGA^{ID*}, Savaş DİLİBAL^{ID}

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Gaga L. A., Dilibal S., "Havacılık Endüstrisinde Kullanılan Karbon Prepreg Kompozit Malzemelerin Talaşlı İmalat Proses Özelliklerini Etkileyen Parametrelerin İncelenmesi" *Int. J. of 3D Printing Tech. Dig. Ind.*, 4(3): 225-238, (2020).

DOI:10.4651/ij3dptdi.817343

Araştırma Makale/ Research Article

Erişim Linki: (To link to this article): <https://dergipark.org.tr/en/pub/ij3dptdi/archive>

HAVACILIK ENDÜSTRİSİNDE KULLANILAN KARBON PREPREG KOMPOZİT MALZEMELERİN TALAŞLI İMALAT PROSES ÖZELLİKLERİNİ ETKİLEYEN PARAMETRELERİN İNCELENMESİ

Latif Alper GAGA^a ^{*}, Savaş DİLİBAL^a 

^a İstanbul Gedik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mekatronik Mühendisliği Programı, Türkiye

**Sorumlu Yazar: alpergaga@gmail.com*

(Geliş/Received: 27.10.2020; Düzeltme/Revised: 04.11.2020; Kabul/Accepted: 08.12.2020)

ÖZ

Fiber takviyeli kompozit malzemelerin yüksek mekanik özellikleri, hafifliği ve çevresel faktörlere gösterdikleri dayanım nedeniyle endüstride kullanım alanları artmaktadır. Kalıplar üzerinde farklı üretim yöntemleri ile üretilen kompozitler, kalıplardan çıkartıldıktan sonra geleneksel talaşlı imalat yöntemlerinden farklı bir şekilde işlenirler. Şekil verme işlemleri kalıpta tamamlanmış olan kompozit malzemelere son şeklini vermek için frezeleme işlemleri uygulanır. Çalışma sırasında CNC tezgâhta sırasıyla 3 ağızlı karbür takım, 4 ağızlı Ti-Al kaplamalı karbür takım ve 7 ağızlı Ti-Al kaplamalı karbür takım kullanılmıştır. Takımlar ile birlikte CNC tezgâhta dönme devri olarak 1000, 2000 ve 3000 dev/dk, ilerleme olarak ise 100, 150 ve 200 mm/dk kullanılmıştır. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda malzeme yüzey pürüzlülük değerleri, deformasyon faktörü değerleri ve talaşlı imalatın yapıldığı CNC tezgâhtan alınan kuvvet değerleri ile birlikte grafikler yardımıyla hangi parametrelerin en iyi sonuç verdiği karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Deneysel çalışmalarda ağız sayısı arttıkça yüzey pürüzlülüğü, deformasyon faktörü ve kesme kuvveti değerleri azaldığı ve devir arttıkça yüzey pürüzlülüğü, deformasyon faktörü ve kesme kuvveti değerleri azaldığı tespit edilmiştir. İlerleme hızı arttıkça deformasyon faktörü ve kesme kuvveti değerleri artmış, yüzey pürüzlülüğü değeri ise azalmıştır.

Anahtar Kelimeler: Talaşlı İmalat, Frezeleme, Karbon Prepreg, Kesme Kuvveti, CNC tezgahı

INVESTIGATION OF THE PARAMETERS AFFECTING MACHINING PROCESS PROPERTIES OF CARBON PREPREG COMPOSITE MATERIALS USED IN THE AEROSPACE INDUSTRY

ABSTRACT

The industrial application of fiber-reinforced composite materials is increasing due to their high mechanical properties, lightweight, and resistance to environmental factors. Composites which have been produced by different production techniques after being removed from the mold are processed in a different way from the traditional machining techniques. The composite materials gain the final shape with the formative manufacturing techniques such as milling operations. During the experimental studies, the effect of using 3-flute carbide tool, 4-flute Ti-Al coated carbide tool, and 7-flute Ti-Al coated carbide tool on the machine were investigated. The spindle speed of 1000, 2000, 3000 rev/min and the feeding rates of 100, 150, 200 mm/min have been conducted for each tool during the machining process. The convenient machining parameters are evaluated via analyzing the surface roughness values, the deformation factors, and the obtained cutting forces from the CNC machine. As a result of the experimental study, the increase in the number of flutes, the values of surface roughness, the deformation factor, and the cutting force evaluated. In the case of the increased spindle speed, the values of surface roughness, the deformation factor, and the cutting force decreased. The increased feed rate caused the increase of the deformation factor and the cutting force values along with the decrease in surface roughness value.

Keywords: Machining, Milling, Carbon Prepreg, Cutting Force, CNC Machine

1. GİRİŞ

Teknolojik gelişmeler havacılık sektöründe kullanılan ileri mühendislik malzemelerinin imalatını kolaylaştırarak [1-2], mekanik özelliklerinin geliştirilmesini [3-4] ve uygulama alanlarının yaygınlaştırılmasını [5-7] sağlamıştır. Özellikle, parça üzerinden malzeme azaltarak yapılan talaşlı imalat ve malzeme üzerine katmanlar eklenerek elde edilen katmanlı imalat yöntemleri kullanılarak geliştirilen yeni nesil kompozit malzemeler, havacılık sektöründe kullanılan hava araçlarının kanat ve gövde yapıları başta olmak üzere tüm araç yapısında kullanılır hale gelmiştir [8].

Kompozit malzemelerin hava araçlarında kullanımı ile ilgili ilk çalışmalarda, hava araçları için gerekli mekanik özellikleri gösterebilen düşük ağırlıklı kompozitler sadece araç içi uygulamalarda tercih edilmiştir [9-10]. Günümüze gelindiğinde, hava araçlarında artık her alt sistemde kullanılan kompozitler farklı talaşlı imalat işlemlerinin kullanılmasını zorunlu kılmıştır. Kalıplar yardımıyla belirli üretim yöntemleri kullanılarak üretimi gerçekleştirilen kompozitler frezeleme ile son şekillerini alıp delik delme işlemleri ile montaj operasyonlarına hazır hale getirilmektedir [11-12]. Yapılan talaşlı imalat işlemlerinin malzeme üzerinde kabul edilebilir oranda hasar oluşturacak şekilde gerçekleştirilmesi gerekmektedir [13-14]. Frezeleme işlemlerinde kompozit malzemenin işlem uygulanan bölgelerinde deformasyon oluşmaması ve delik delinen bölgeler içinde delaminasyon oluşmaması için gerekli önlemler alınması gerekmektedir [15-16]. Bu önlemler; imalatı yapılacak malzemeye uygun tezgah seçimi, uygun takım seçimi, doğru ilerleme ve dönme devri ile çalışılması, uygun fisktürleme yöntemi kullanımı temel parametreleri kapsayan önlemlerdir [16].

Karbon prepreg malzemelerin talaşlı imalatı ile ilgili yapılan araştırmalar incelendiğinde, Canpolat [17] tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda cam fiber takviyeli kompozitlerde HSSi, TiN ve karbür matkaplar kullanılarak delik delme imalatı üzerine araştırmaların yapıldığı ve verilen kesme girdilerinin yüzey pürüzlülük değeri üzerinde etkilerini araştırıldığı görülmektedir. Yapılan deneysel çalışmalar sonrasında ilerleme hızının artması ile yüzey pürüzlülük değerinin arttığını tespit etmişlerdir. Yapılan çalışmada en yüksek yüzey kalitesi karbür matkaplarla delinen malzemelerde elde edilmiştir. Literatürde, cam fiber takviyeli kompozit malzemeler üzerinde 2, 3 ve 4 diş sayılı frezelerle yapılan çalışmalarda kesme girdilerinin yüzey pürüzlülüğü üzerinde etkisi incelemişlerdir. Ayrıca, artırılan ilerleme hızı ile yüzey pürüzlülüğü değerinin artış gösterdiğini, artırılan freze diş sayısı ve kesme hızı ile yüzey pürüzlülük değerinin azalma eğiliminde olduğu tespit edilmiştir. Elde edilen deneysel sonuçlarda en yüksek yüzey kalitesi 4 diş sayılı frezede görülmüştür [18]. Aynı zamanda düşük ilerleme hızı ve yüksek dönme devrinde yüzey pürüzlülüğü için en iyi sonuçlar elde edilmiştir. Elyaf takviyeli kompozit malzemelerin uygun girdiler altında talaşlı imalatının araştırıldığı deneysel çalışmalarda, frezeleme işleminin parça üzerinde oluşturduğu deformasyon faktörünü azaltmanın düşük ilerleme ve yüksek kesme hızı ile sağlanabileceği gösterilmiştir. Ayrıca, kompozit malzemelerde delme parametrelerinin ve kesme parametrelerinin oluşacak deformasyona ve yüzey pürüzlülüğüne etkileri araştırılmıştır [18].

Parametrik verilerle sistematik olarak gerçekleştirilen bu çalışmada, havacılık sektöründe yaygın olarak kullanılan karbon prepreg numunenin farklı dönme devri ve ilerleme şartlarında frezelenmesi üzerine deneyler çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Dönme devri ve ilerleme hızı parametreleri kullanılarak karbon prepreg malzemenin üzerinde aynı talaş derinliğinde kanallar açılarak elde edilen talaşlı imalat sonuçları incelenmiştir. Malzemenin işlenmesi sırasında tezgahtan çektiği yük oranı, yüzey pürüzlülük değerleri, deformasyon faktörü değerinin nasıl etkilendiği tespit edilmiştir. Elde edilen deneysel sonuçlar değerlendirilerek, karbon prepreg malzemenin talaşlı imalat kalitesini etkileyen parametreler ve uygun takım seçim parametreleri ile ilgili öneriler sunulmuştur.

1.1. Karbon Prepreg Kompozit Malzemeler

Prepreg, önceden reçine emridirilmiş ve basınçlı üretim yöntemi ile üretilmiş lifli polimer takviyesidir. Prepregler belirli sıcaklık ve basınç altında kürlenir ve kürlenme sonucunda emdirilmiş olan bu reçine sertleşerek kimyasal ve ısıl dayanımı yüksek, dayanıklı ve hafif bir kompozit yapı oluştururlar. Karbon prepreg kompozitler termoset ve termoplastik olarak iki ana kategoriye ayrılır. Karbon prepreg malzemelerin yapısı ve üretim yöntemleri kullanılacak amaca göre değişiklik gösterir. Bu değişiklikler malzemenin durum karşısında nasıl davranış göstereceğini etkiler [20]. Ayrıca, karbon prepreg

malzemelerin havacılık alanında dayanıklılık, hafiflik, yüksek mukavemet ve tokluk yanında ısıl direnç özellikleri sayesinde de günümüzde havacılık endüstrisinde kullanılan ileri seviye kompozit malzemeler olmuştur. Karbon prepreg malzemelerin ileri mekanik özellikleri sayesinde uzay, ulaşım, denizcilik, enerji, savunma ve inşaat alanlarında kullanılabilir potansiyel malzemelerden biri olmuştur [14].

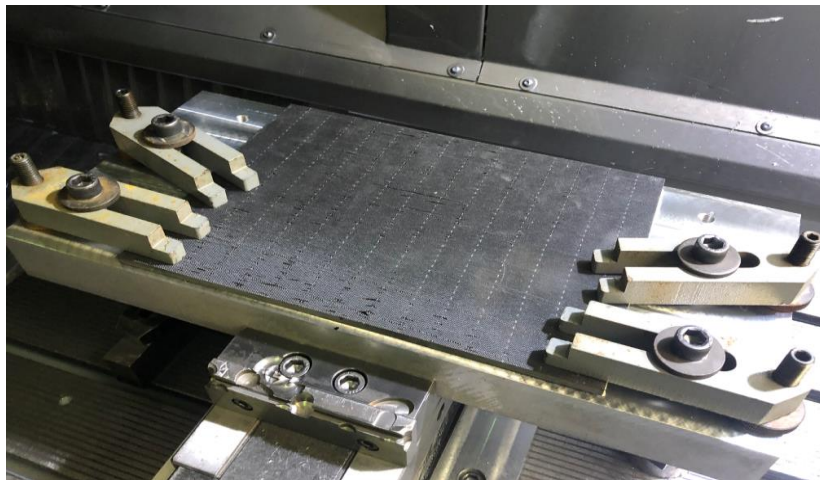
1.2. Kompozit Malzemelerin Talaşlı İmalatı

Geleneksel talaşlı imalatta metaller ve alaşımlarının işlenmesi ile kompozit malzemelerin işlenmesi arasında ciddi farklılıklar vardır. Bu farklılıklar kompozit malzemelerin homojen olmayan, anizotropik ve genellikle tabakalı bir şekilde hazırlanmasından kaynaklanmaktadır [16]. Teknolojide geline son nokta ile metallerin yerini almaya başlayan kompozit malzemelerin kullanım alanına göre üretilip şekil verilmesiyle birlikte bir takım ihtiyaçlar oluşmaya başlamıştır. Bu ihtiyaçlar neticesinde üretilmiş olan kompozit malzemelerin kullanılacak yerine göre yüzey pürüzlülüğünün sağlanıp kullanılacağı yere uygun hale getirilmesi gerekmektedir. Bu yapılacak işlemlerde geleneksel talaşlı imalat yöntemlerinin haricinde çeşitli gereklilikler ortaya çıkmıştır [13]. Bu sorunlar için çözüm arayışına giren üreticiler çeşitli çalışmalar yapmışlardır. Üretimi gerçekleştirilen kompozit malzemelerin istenilen ölçü ve yüzey pürüzlülüğü toleranslarına getirilmesi için uygun talaşlı imalat işlemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Frezeleme işlemi düzlemsel parçalar için sıklıkla kullanılan ve iş parçasını istenen tolerans aralığında işlememizi için uygulanan son işlemdir. Ancak yapılan frezeleme işlemlerinde kompozit malzeme üzerinde oluşan yüzey hasarları ve pürüzlülük istenmeyen bir durumdur. Ayrıca kompozit malzeme yapı itibarıyla yüksek sertlik derecesine sahip olduğundan işlenebilirliği zorlaştırmaktadır [21]. Bu sebeplerle uygun talaşlı imalat parametrelerini belirlemek yüzey hasarlarını ortadan kaldırmak için önemlidir. Yapılan deneysel çalışmalarda havacılık alanında en fazla kullanılan karbon prepreg malzemelerin talaşlı imalatı sırasında oluşabilecek sorunların önüne geçmek amacıyla uygun parametrelerin seçiminin tespiti için deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

2. MATERYAL VE METOT

2.1. Materyal

Bu çalışmada havacılık ve uzay sanayisinde çok sık kullanıldığı için frezeleme işlemlerinde karbon prepreg malzemesi tercih edilmiştir. Seçilen karbon prepreg malzemesi için özellikler üretim yöntemine göre farklılık göstermektedir. Temin edilen numune, vakum infüzyon yöntemi ile 10 tabaka olacak şekilde üretilmiş ve oryantasyon açısı $0/90^\circ$ dir. Numune kalınlığı 7 mm'dir. Deneyde kullanılan karbon prepreg malzemenin çekme dayanımı 4220 MPa'dır. Karbon prepreg kompozit malzeme için işlemek için 400 mm genişlik ve 500 mm uzunluğunda bir fikstür kullanılmıştır. Malzemelerin kaymaması için üzerine 6 adet pabuç ile basılmıştır.



Şekil 1. Karbon prepreg malzemenin fikstürlenmesi [24].



Şekil 2. Karbon prepeg malzemenin deney çalışmalar sonrası görünümü [24].

Frezeleme işlemleri için çapları 16 mm olan 3 farklı takım kullanılmıştır. Frezelemede kullanılan takımlar 3 ağızlı karbür freze, 4 ağızlı karbür freze ve 7 ağızlı karbür freze takımlarıdır. Takım uç açıları 3 Ağızlı karbür takım için $2,99^\circ$, 4 Ağızlı Ti-Al karbür takım için $2,01^\circ$ ve 7 Ağızlı Ti-Al karbür takım $2,01^\circ$ 'dir. Frezeleme işlemlerinde (835×510) mm² tabla boyutlarına sahip DMG 835V CNC tezgahı kullanılmıştır. Tezgahın kontrol ünitesi Heidenhein ITCN530'dur. Tezgahın x-y-z strok boyları 810x510x510 mm'dir. Tezgah maksimum 18000 devir yapabilmektedir. Tezgahta pozisyonlama hassasiyeti 0,025 mm'dir. Programlama için Catia programı içerisinde profile contouring takım yolu hazırlanmıştır. Devir, ilerleme, takım kesme derinliği ve takımın izleyeceği yol program içerisinde hazırlanmıştır. Catia üzerinde takım yollarının hazırlanması sonucunda alınan G kodları Manus Post Processor V3 üzerinde çevrilmiştir. Yapılan frezeleme çalışmaları sonrasında karbon prepeg malzeme üzerinde yüzey pürüzlülüğü ölçümleri yapılmıştır. Ölçümler için Mahr Perthometer S2 cihazı kullanılmıştır. Cihaz için uzunluk, genişlik ve yükseklik bilgileri; 330 mm x 60 mm x 120 mm'dir. Frezeleme ve delik delme işlemlerinden sonra kanal etrafında oluşan deformasyon miktarını ölçmek için proment x1000 usb mikroskop kullanılmıştır.

Çizelge 1. Kullanılan Takım Kesme Parametreleri [24].

| Deney No | a Talaş Derinliği (mm) | n Dönme devri (dev/dak) | F İlerleme (mm/dk) | s İlerleme (mm/dev) | X Mesafe (mm) | Y Mesafe (mm) |
|----------|------------------------|-------------------------|--------------------|---------------------|---------------|---------------|
| 1 | 3 | 1000 | 100 | 0,1 | 0 | 85 |
| 2 | 3 | 1000 | 150 | 0,15 | 0 | 85 |
| 3 | 3 | 1000 | 200 | 0,2 | 0 | 85 |
| 4 | 3 | 2000 | 100 | 0,5 | 0 | 85 |
| 5 | 3 | 2000 | 150 | 0,075 | 0 | 85 |
| 6 | 3 | 2000 | 200 | 0,1 | 0 | 85 |
| 7 | 3 | 3000 | 100 | 0,033 | 0 | 85 |
| 8 | 3 | 3000 | 150 | 0,05 | 0 | 85 |
| 9 | 3 | 3000 | 200 | 0,066 | 0 | 85 |

Deney çalışmaları sonrasında Şekil 2'de gösterilen fotoğrafta da görüldüğü üzere kesme bölgelerinde lifleri ayrılmıştır. Kesme işlemi malzemenin lif oryantasyon yönlerine dik olarak hazırlanmıştır. Çizelge 2'de verilen girdi bilgileri ile birlikte yapılan çalışmada birim zamanda kaldırılan talaş miktarı (M_{RR}), devir başına ilerleme (F_n), diş başı ilerleme değerleri (F_z) ve kesme hızı (V_c) hesaplanacaktır.

Çizelge 2. Deney düzeneğinde kullanılan parametreler [24].

| Takım | Deney No | Ağız Sayısı Z_c | Takım Çapı (mm) | Kesme Derinliği (mm) | n Dönme devri (dev/dk) | F İlerleme (mm/dk) |
|--------------|----------|----------------------|-----------------|----------------------|------------------------|--------------------|
| | 1 | 3 | 16 | 3 | 1000 | 100 |
| | 2 | 3 | 16 | 3 | 1000 | 150 |
| | 3 | 3 | 16 | 3 | 1000 | 200 |
| 3 Ağızlı | 4 | 3 | 16 | 3 | 2000 | 100 |
| Karbür | 5 | 3 | 16 | 3 | 2000 | 150 |
| Takım | 6 | 3 | 16 | 3 | 2000 | 200 |
| | 7 | 3 | 16 | 3 | 3000 | 100 |
| | 8 | 3 | 16 | 3 | 3000 | 150 |
| | 9 | 3 | 16 | 3 | 3000 | 200 |
| | 1 | 4 | 16 | 3 | 1000 | 100 |
| | 2 | 4 | 16 | 3 | 1000 | 150 |
| 4 Ağızlı Ti- | 3 | 4 | 16 | 3 | 1000 | 200 |
| Al | 4 | 4 | 16 | 3 | 2000 | 100 |
| Kaplamalı | 5 | 4 | 16 | 3 | 2000 | 150 |
| Karbür | 6 | 4 | 16 | 3 | 2000 | 200 |
| Takım | 7 | 4 | 16 | 3 | 3000 | 100 |
| | 8 | 4 | 16 | 3 | 3000 | 150 |
| | 9 | 4 | 16 | 3 | 3000 | 200 |
| | 1 | 7 | 16 | 3 | 1000 | 100 |
| | 2 | 7 | 16 | 3 | 1000 | 150 |
| 7 Ağızlı Ti- | 3 | 7 | 16 | 3 | 1000 | 200 |
| Al | 4 | 7 | 16 | 3 | 2000 | 100 |
| Kaplamalı | 5 | 7 | 16 | 3 | 2000 | 150 |
| Karbür | 6 | 7 | 16 | 3 | 2000 | 200 |
| Takım | 7 | 7 | 16 | 3 | 3000 | 100 |
| | 8 | 7 | 16 | 3 | 3000 | 150 |
| | 9 | 7 | 16 | 3 | 3000 | 200 |

Deney düzeneklerinde Çizelge 2’de verildiği üzere takım ağız sayıları, takıma verilen devir ve ilerleme ile ilgili karşılaştırmalar yapılmıştır. Deneylerde talaş derinliği 3 mm sabit olarak kullanılmıştır. Takım çapları sabit ve 16 mm olarak seçilmiştir. 3, 4 ve 7 ağızlı karbür takımlar için alınan uç açısı sırasıyla 2,99°, 2,01° ve 2,01° olarak bulunmuştur. Tüm takımlar tezgah üzerinde tutucuya 40 mm ara mesafe verilerek bağlanmışlardır.

Çizelge 2’de verilen bilgilere göre hesaplamalar aşağıdaki gibi olmaktadır;

Kesme hızlarının hesaplanması;

$$V_c = (\pi \cdot d \cdot n) / 1000$$

(1)

Deney no. 1’de bulunan verileri kullandığımızda sonuç aşağıdaki gibi hesaplanacaktır;

$$V_c = (3,14 \times 16 \times 1000) / 1000 = 50,24 \text{ m/dk}$$

Devir başına ilerlemenin hesaplanması;

$$F_n = F/n$$

(2)

Deney no. 1’de bulunan verileri kullandığımızda sonuç aşağıdaki gibi hesaplanacaktır;

$$F_n = 100/1000 = 0,1 \text{ mm/dev}$$

Diş başına ilerlemenin hesaplanması;

$$F_z = F/(n \cdot Z_c)$$

(3)

Deney no. 1'deki verileri kullandığımızda sonuç aşağıdaki gibi hesaplanacaktır;

$$F_z = 100/(1000 \times 3) = 0,0333 \text{ mm/dev}$$

Birim zamanda kaldırılan talaş miktarının hesaplanması;

$$M_{RR} = a \times d \times F$$

(4)

Deney no. 1'deki verileri kullandığımızda sonuç aşağıdaki gibi hesaplanacaktır;

$$M_{RR} = 3 \times 16 \times 100 = 4800 \text{ mm}^3/\text{dk}$$

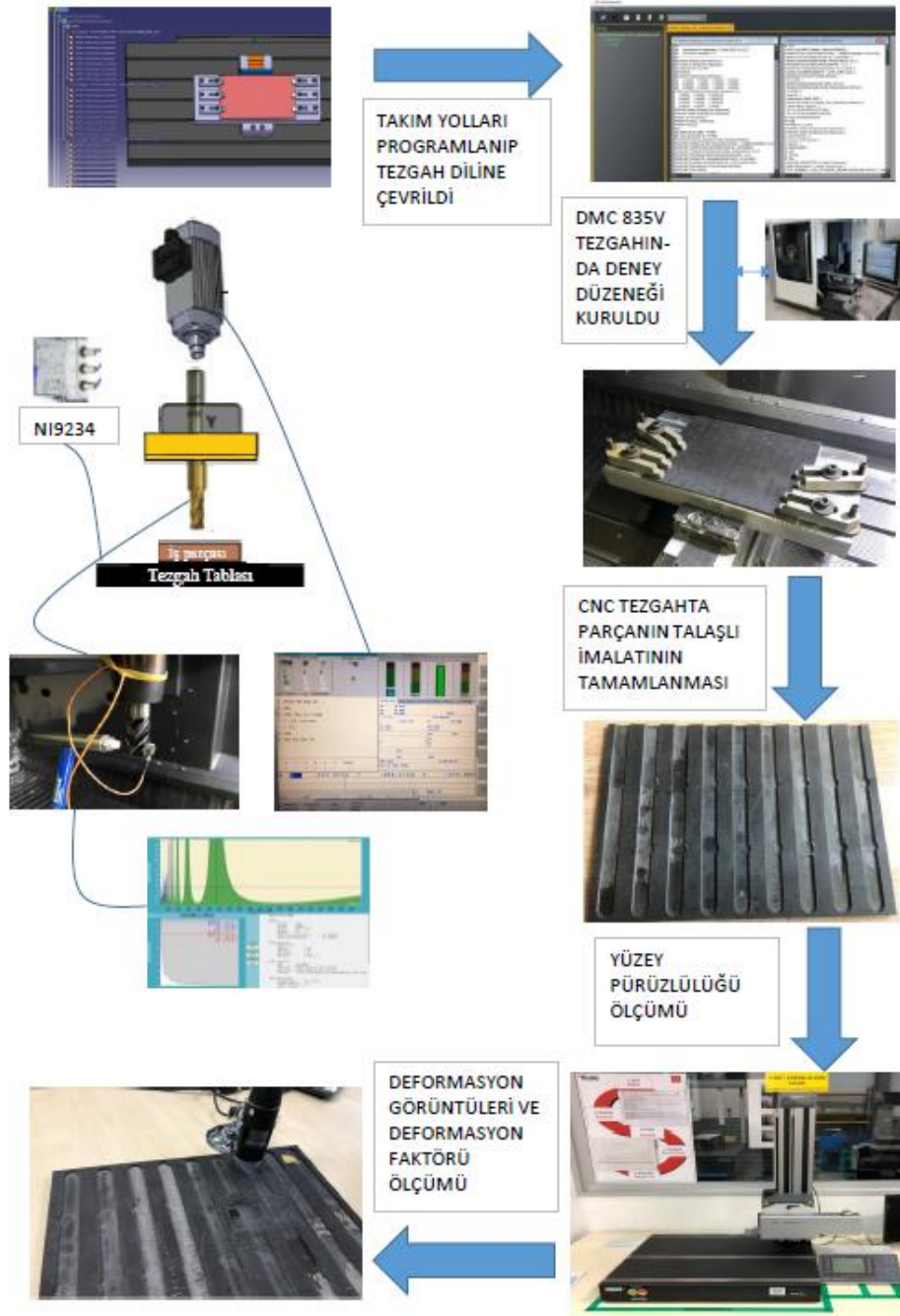
Hesaplanan veriler sonucunda elde edilen parametrik değerler Çizelge 3'de gösterildiği gibidir;

Çizelge 3. Deney verileri ile hesaplanan tüm değerler [24].

| Deney No | Material Removal Rate $M_{rr} = w.d.f$ $= \text{mm}^3/\text{dk}$ | Devir Başına İlerleme $F_n = F/n$ $= \text{mm}/\text{dev}$ | Dış Başı İlerleme $F_z = F/(n \cdot Z_c)$ $= \text{mm}/\text{dev}$ | Kesme Hızı $V_c =$ $(3,14 \cdot d \cdot n)/1000$ $= \text{m}/\text{dk}$ |
|----------|--|--|--|--|
| 1 | 4800 | 0,1000 | 0,0333 | 50,24 |
| 2 | 7200 | 0,1500 | 0,0500 | 50,24 |
| 3 | 9600 | 0,2000 | 0,0667 | 50,24 |
| 4 | 4800 | 0,0500 | 0,0167 | 100,48 |
| 5 | 7200 | 0,0750 | 0,0250 | 100,48 |
| 6 | 9600 | 0,1000 | 0,0333 | 100,48 |
| 7 | 4800 | 0,0333 | 0,0111 | 150,72 |
| 8 | 7200 | 0,0500 | 0,0167 | 150,72 |
| 9 | 9600 | 0,0667 | 0,0222 | 150,72 |
| 1 | 4800 | 0,1000 | 0,0250 | 50,24 |
| 2 | 7200 | 0,1500 | 0,0375 | 50,24 |
| 3 | 9600 | 0,2000 | 0,0500 | 50,24 |
| 4 | 4800 | 0,0500 | 0,0125 | 100,48 |
| 5 | 7200 | 0,0750 | 0,0188 | 100,48 |
| 6 | 9600 | 0,1000 | 0,0250 | 100,48 |
| 7 | 4800 | 0,0333 | 0,0083 | 150,72 |
| 8 | 7200 | 0,0500 | 0,0125 | 150,72 |
| 9 | 9600 | 0,0667 | 0,0167 | 150,72 |
| 1 | 4800 | 0,1000 | 0,0143 | 50,24 |
| 2 | 7200 | 0,1500 | 0,0214 | 50,24 |
| 3 | 9600 | 0,2000 | 0,0286 | 50,24 |
| 4 | 4800 | 0,0500 | 0,0071 | 100,48 |
| 5 | 7200 | 0,0750 | 0,0107 | 100,48 |
| 6 | 9600 | 0,1000 | 0,0143 | 100,48 |
| 7 | 4800 | 0,0333 | 0,0048 | 150,72 |
| 8 | 7200 | 0,0500 | 0,0071 | 150,72 |
| 9 | 9600 | 0,0667 | 0,0095 | 150,72 |

2.2. Metot

Karbon prepreg kompozit malzemenin frezeleme işlemleri ile ilgili deneysel akış diyagramının sistematik ilerleyişi Şekil 3’de detaylı olarak açıklanmıştır.



Şekil 3. Deneysel akış diyagramı [24].

Deneylerde kullanılan takımların kesme parametreleri, kullanılacak CNC tezgah, deney sonuçlarının gözlemlenebilmesi ve ölçülebilmesi için kullanılacak ölçüm aletleri göz önüne alınarak belirlenmiştir. Deneyde kullanılan kesme takımları için belirlenen deney parametreleri Çizelge 1’de verildiği gibidir.

3. DENEYSEL ANALİZLERİN SONUÇLARI

Talaşlı imalat işlemlerinde, imalat aşamasında kesici takım ile iş parçası arasında gerçekleşen temas bir sürtünme meydana getirmektedir. Bu sürtünme devir, ilerleme, iş parçası ve kesici takım malzemesi gibi

birçok parametreden etkilenmektedir. Seçilen bu parametrelerin yanlış olması takıma binen yüklerin ve titreşimlerin artmasına sebep olur. Bu olumsuz durum iş parçasından beklenen kalitenin düşmesine sebep olur. Karbon prepreg kompozit malzemesinin farklı talaşlı imalat parametreleri ile frezelenmesinin, kesme kuvveti, yüzey pürüzlülüğü ve deformasyon faktörü üzerine etkileri araştırılmış ve sonuçları değerlendirmek üzere Çizelge 4’de verilmiştir.

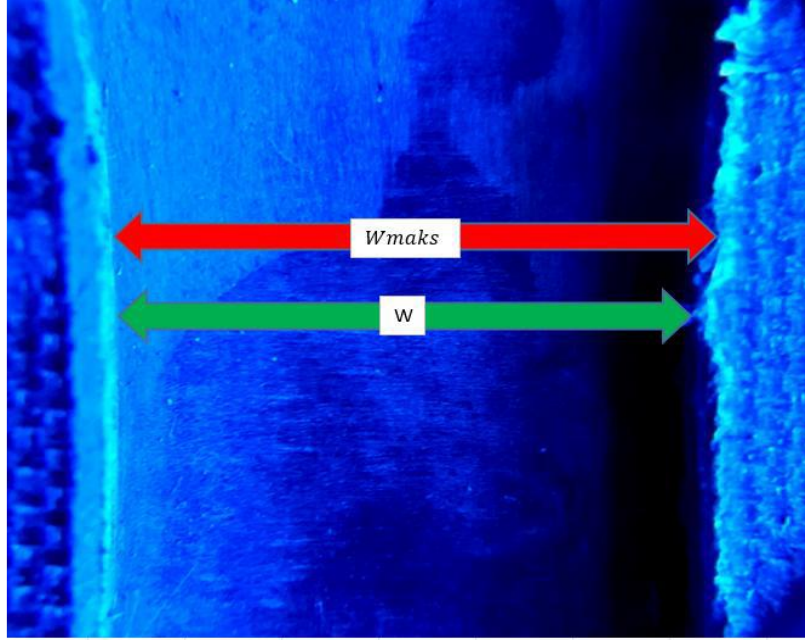
Çizelge 4’te verilen kesme kuvveti imalat sırasında tezgah ünitesinden alınmıştır. Alınan bilgiler tezgahın y ekseninde yaptığı düz bir hat üzerinde 85 mm’lik bir takım yolu boyunca alınmıştır. Alınan kesme kuvveti, takım yolu boyunca alınan üç farklı değer in ortalaması olarak kabul edilmiştir. Çizelge 4’te verilen yüzey pürüzlülüğü değeri Mahr Perthometer S2 cihazı ile ölçülmüştür. Cihaz takım yolunun çalıştığı kanallar içerisinde içerisinde 0,25 mm ilerleyerek çalışmıştır. Cihazdan okunan değerler sonucunda her verilen deney grubu için ayrı ayrı sonuçlar tespit edilmiştir. Her ölçüm üç kere tekrarlanmıştır ve ortalaması alınmıştır. Yüzey pürüzlülük ölçümleri her deneyde kanal içerisinde orta bölümden alınmıştır. Çizelge 4’te verilen deformasyon faktörü, malzeme üzerinde açılan her kanal içerisinde deformasyona uğramış maksimum kesit alanı (W_{maks}), tüm frezeleme işlemleri için ölçüldü. Ölçülen deforme olmuş kesit, frezelenmiş kanalın nominal genişliğine (W), başka bir ifade ile kesici takım çapına oranlanarak deformasyon faktörü (F_d) hesaplanmıştır. Deformasyon miktarları proment x1000 mikroskop ile görüntülenmiştir ve mikroskop altında kumpas ile ölçüm yapılmıştır.

Deformasyon faktörünün hesaplanması;

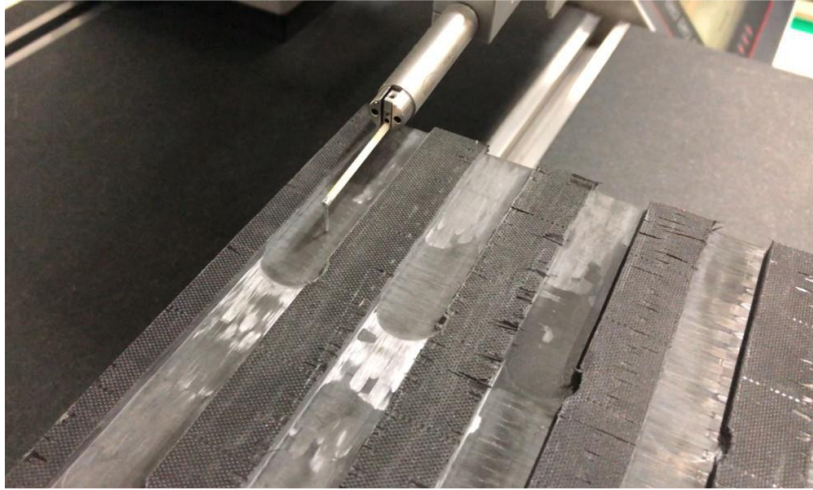
$$F_d = W_{maks}/W \quad (5)$$

Çizelge 4. Karbon prepreg kompozit malzemesinin farklı parametrelerle frezelenme sonuçları [24].

| Takım | Deney No | n Dönme devri (dev/dk) | F İlerleme (mm/dk) | Kesme Kuvveti (N) | Deformasyon Faktörü (F_d) | Yüzey Pürüzlülüğü Ra (μ m) |
|--|----------|---------------------------------|--------------------------|-------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|
| 3 Ağızlı Karbür Takım | 1 | 1000 | 100 | 66,84 | 1,0308 | 1,23 |
| | 2 | 1000 | 150 | 67,65 | 1,0331 | 1,336 |
| | 3 | 1000 | 200 | 69,58 | 1,0563 | 1,772 |
| | 4 | 2000 | 100 | 63,12 | 1,0244 | 1,163 |
| | 5 | 2000 | 150 | 64,99 | 1,0338 | 1,296 |
| | 6 | 2000 | 200 | 68,73 | 1,0498 | 1,513 |
| | 7 | 3000 | 100 | 55,34 | 1,0091 | 0,907 |
| | 8 | 3000 | 150 | 60,35 | 1,0144 | 1,053 |
| | 9 | 3000 | 200 | 66,23 | 1,0431 | 1,431 |
| 4 Ağızlı Ti-Al Kaplmalı Karbür Takım | 1 | 1000 | 100 | 62,65 | 1,0300 | 1,207 |
| | 2 | 1000 | 150 | 64,27 | 1,0358 | 1,325 |
| | 3 | 1000 | 200 | 65,17 | 1,0538 | 1,585 |
| | 4 | 2000 | 100 | 58,64 | 1,0213 | 1,158 |
| | 5 | 2000 | 150 | 59,52 | 1,0373 | 1,253 |
| | 6 | 2000 | 200 | 59,94 | 1,0471 | 1,507 |
| | 7 | 3000 | 100 | 50,88 | 1,0094 | 0,954 |
| | 8 | 3000 | 150 | 55,23 | 1,0104 | 1,045 |
| | 9 | 3000 | 200 | 61,62 | 1,0406 | 1,35 |
| 7 Ağızlı Ti-Al Kaplmalı Karbür Takım | 1 | 1000 | 100 | 56,23 | 1,0263 | 1,191 |
| | 2 | 1000 | 150 | 57,95 | 1,0350 | 1,315 |
| | 3 | 1000 | 200 | 58,22 | 1,0513 | 1,556 |
| | 4 | 2000 | 100 | 52,45 | 1,0175 | 1,076 |
| | 5 | 2000 | 150 | 53,51 | 1,0321 | 1,245 |
| | 6 | 2000 | 200 | 54,56 | 1,0456 | 1,436 |
| | 7 | 3000 | 100 | 48,56 | 1,0088 | 0,787 |
| | 8 | 3000 | 150 | 49,96 | 1,0100 | 0,972 |
| | 9 | 3000 | 200 | 51,33 | 1,0384 | 1,338 |



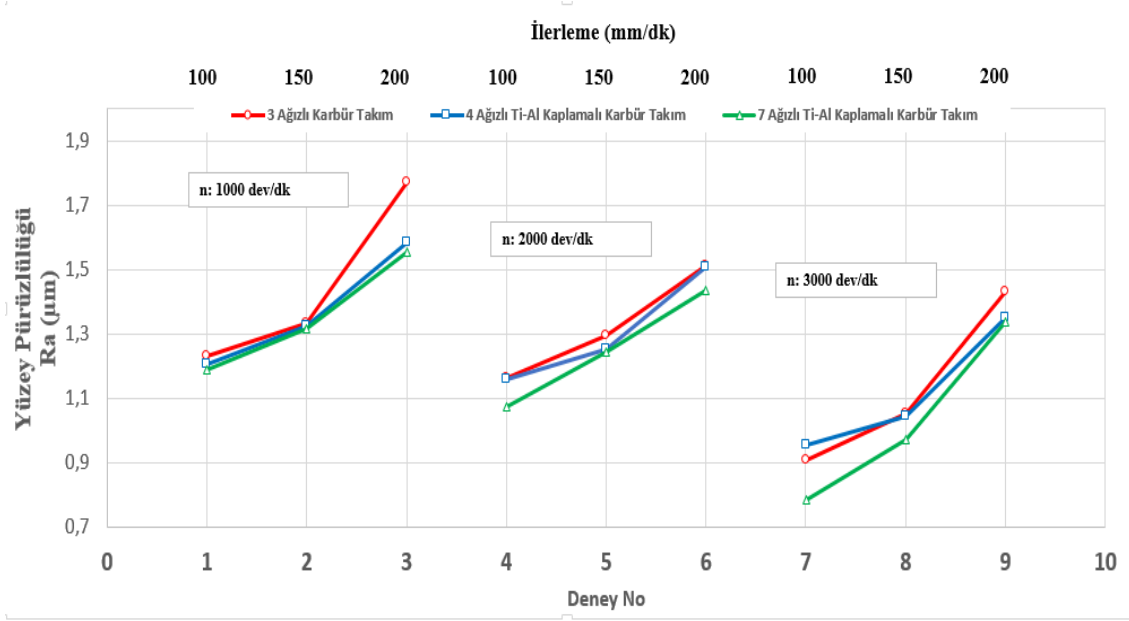
Şekil 4. Deformasyon faktörünün gösterimi [24].



Şekil 5. Yüzey pürüzlülük değerlerinin Mahr Perthometer S2 cihazı ile ölçümü [24].

3.1. Frezeleme İşlemlerinin Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi

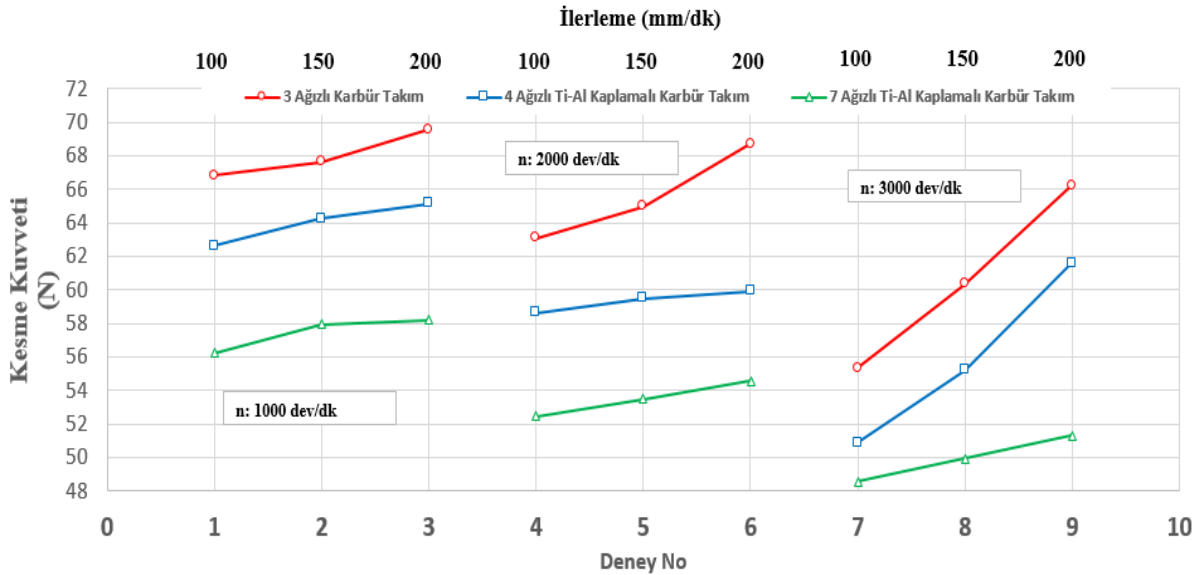
Talaşlı imalat parametrelerine bağlı iş parçasının kalite özelliklerini belirleyen en önemli unsurlardan biri yüzey pürüzlülüğüdür. İmalatı tamamlanmış bir iş parçasının kalitesi, parçanın performans kalitesi ile belirlenir. Yüzey pürüzlülüğünün istenen değerlerde yakalanamamış olması parçanın mekanik özelliklerindeki negatif yönde etkileyebilir ve imal edilmiş olan parçanın kullanım ömrünü azaltabilir [18]. Kompozit malzemelerin talaşlı imalatı yapılırken yüzey pürüzlülük değerinin belirli bir kalitede olması beklenir. Kompozit malzemelerin mekanik özellikleri, talaşlı imalat sırasında kullanılan takımın geometrisi, ilerlemesi, takımın dönme devri ve talaş derinliği gibi işleme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerinde önemli etkileri vardır. Bu parametrelerin birbiri ile uyumlu olması talaşlı imalat işlemlerinin verimli olmasını ve yüzey pürüzlülüğünün talep edilen toleranslar dahilinde gerçekleşmesini sağlar [17]. Yapılan literatür çalışmalarında tespit edildiği üzere ilerleme arttıkça yüzey pürüzlülüğü değeri artmış, dönme devri ve ağız sayısı azaldıkça yüzey pürüzlülüğü değeri azalmıştır. Karbon prepreg malzemeler için farklı talaşlı imalat parametrelerinden elde edilen yüzey pürüzlülük değeri grafikleri Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 6. İlerleme, dönme devri ve takım cinsine bağlı yüzey pürüzlülüğünün karşılaştırılması [24].

3.2. Frezeleme İşlemlerinin Kesme Kuvvetlerine Etkisi

Talaşlı imalat işlemlerinde iş parçasına şekil verebilmek ve talaş kaldırmak için gerekli olan kuvvete kesme kuvveti denir. Talaşlı imalat sırasında oluşan kesme kuvvetleri malzemeyi oluşturan bileşenlere, mikroyapısına, kullanılan kesici takım malzemesine, sertliğine, takımın uç geometrisine, imalat parametrelerine, tezgahdaki rijitlik ve oluşan ısı gibi imalatı etkileyen parametrelere bağlıdır [22]. Bu durumda kesme kuvvetlerinin ilerleme miktarı, kesici takım devri ve kesme ortamı gibi talaşlı imalat parametrelerinden ne şekilde etkilendiğini bilmek gerekmektedir. Bu bilgiler doğrultusunda karbon prepreg kompozit malzemelerin frezelenmesinde elde edilen kesme kuvvetleri hesaplanmıştır ve grafikler ile parametrelerin değişimiyle kesme kuvvetlerinin karşılaştırılması yapılmıştır [23]. Kesme kuvvetleri üzerinde ilerleme, dönme devri ve takım cinsinin oluşturduğu etkinin grafikleri Şekil 7’de verilmiştir.

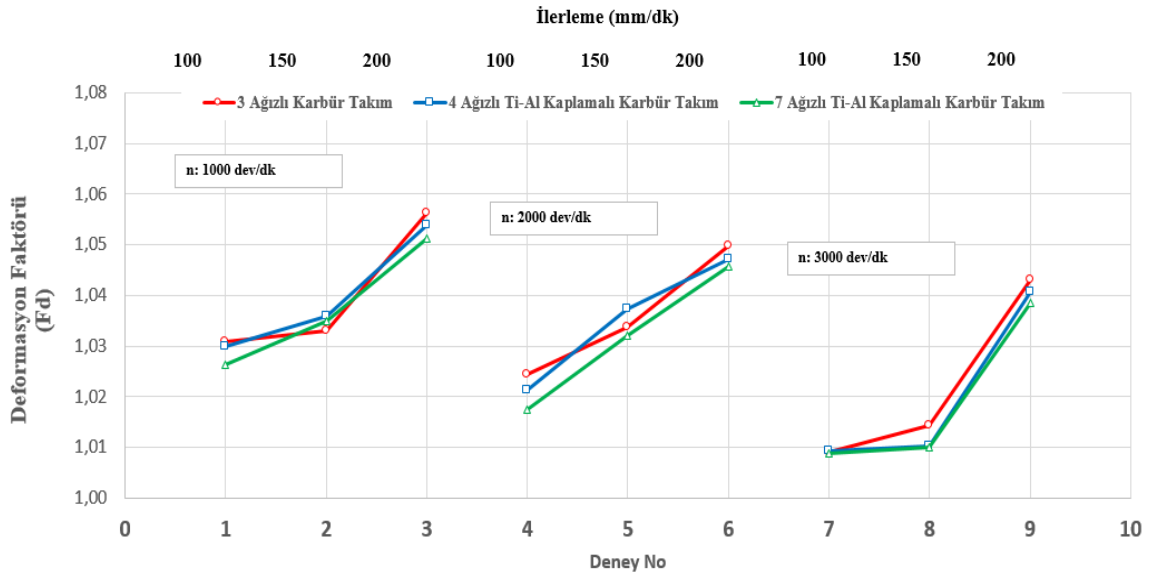


Şekil 7. İlerleme hızı, dönme devri ve takım cinsine bağlı kesme kuvveti grafiklerinin karşılaştırılması [24].

3.3. Frezeleme İşlemlerinin Deformasyon Faktörüne Etkisi

Kompozit malzemelerin işlenmesi sırasında meydana gelen hasarlar genel olarak deformasyon, fiber/matris yüzey ayrılması ve elyaf kırılmasıdır. Bu hasarlar sebebiyle kompozit malzemenin mekanik özellikleri zayıflamakta ve malzemenin ömrü azalmaktadır. Aynı zamanda bu hasarlar kontrol edilemezse kalitede ciddi olumsuzluklar ortaya çıkacaktır. Bu sebeple kompozit malzemeler işlenirken oluşabilecek hasarları minimuma indirmek gerekmektedir. Minimum hasar oluşması için talaşlı imalat girdilerinin, kesici takım cinsinin, malzemesinin ve takım geometrisinin imalatı yapılacak malzemeye uygun seçilmesi gerekmektedir [15].

Karbon prepreg malzemelerin talaşlı imalatı sonrasında kanallar arasında oluşan deformasyon miktarları ölçülmüştür. Bu ölçümler sonucunda deformasyon faktörü hesaplanmış ve talaşlı imalat sırasında kullanılan dönme devri, ilerleme ve kesici takım cinsine göre grafikleri oluşturulmuştur. Karbon prepreg malzemelerin ilerleme, dönme devri ve takım cinsine göre grafikleri Şekil 8’de verilmiştir.



Şekil 8. İlerleme hızı, dönme devri ve takım cinsine bağlı deformasyon faktörü grafiklerinin karşılaştırılması [24]

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

4.1. Sonuçlar

Yapılan çalışmalar sonucunda elde edilen sonuçlar literatür çalışmaları ile benzerlik göstermektedir. Karbon prepreg malzeme üzerinde aynı çaptaki takımlar dönme devri, ilerleme ve takım ağız sayılarına göre farklı şekillerde çalışılmış ve alınan sonuçların literatürde bulunan deneysel çalışma sonuçları ile tutarlı olduğu tespit edilmiştir. Literatürde yer alan Canpolat [17] ve Erkan ve Işık [18] tarafından gerçekleştirilen çalışmalarda ilerlemenin artması ile yüzey pürüzlülüğünün arttığı, ağız sayısının artması ile yüzey pürüzlülüğünün azaldığı ve dönme devrinin artması ile yüzey pürüzlülüğünün azaldığı tespit edilmiştir. Yapılan deneysel analiz sonuçlarının gösterildiği grafikler incelendiğinde sonuçların makalede elde edilen deneysel sonuçlarla uyumlu olduğu tespit edilmiştir. Alp [8] tarafından jüt ve keten fiber takviyeli kompozitlerin frezelenme performansının belirlenmesi ile ilgili tez çalışmasında farklı dönme devri, ilerleme ve takım ağız sayısı ile deney düzenekleri kurulmuş ve alınan sonuçlarda ilerlemenin artması ile yüzey pürüzlülüğünün arttığı, ağız sayısının artması ile yüzey pürüzlülüğünün azaldığı ve dönme devrinin artması ile yüzey pürüzlülüğünün azaldığı tespit edilmiştir. Sonuçlar makalede yer alan deneysel analizlerde tespit edilen sonuçlar ile karşılaştırıldığında benzer sonuçların elde edildiği görülmektedir.

Bu çalışmada karbon prepreg kompozitlerin 3 ağızlı karbür takım, 4 ağızlı Ti-Al kaplamalı karbür takım ve 7 ağızlı Ti-Al kaplamalı karbür takım parmak freze takımları ile frezelenmesinde, takım cinsinin,

dönme devrinin ve ilerlemenin kesme kuvveti, yüzey pürüzlülüğü ve deformasyon faktörü üzerinde nasıl sonuçlar ortaya çıkardığı deneyler ile incelenmiştir. Çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıda sunulmuştur.

Frezeleme parametrelerinin kesme kuvveti üzerindeki etkileri;

Yapılan deneysel çalışmalarda dönme devrinin artması ile kesme kuvvetleri azalma eğilimi göstermiştir. Kesme kuvvetleri üzerinde en etkili parametre olarak ilerleme değişmesi tespit edilmiştir. İlerlemenin yüksek olduğu durumlarda takım kompozit malzeme üzerinde fiberleri kopartmıştır. Dolayısıyla artan ilerleme hızı ile kesme kuvveti artma eğilimi göstermiştir. Kesici takımların kesme kuvvetine etkileri incelendiğinde, kesme kuvveti değişimleri küçükten büyüğe doğru 7 ağızlı Ti-Al kaplamalı karbür takım, 4 ağızlı ti-Al kaplamalı karbür takım ve 3 ağızlı karbür takımlarından elde edilmiştir. Literatür çalışmaları ile yapılan deneysel çalışma karşılaştırıldığında literatür çalışmalarında aynı şekilde takım ağız sayısı ve dönme devri arttıkça kesme kuvveti değerleri azalmış ve ilerleme hızı arttığında kesme kuvveti değerleri artmıştır.

Frezeleme parametrelerinin deformasyon faktörü üzerindeki etkileri;

İlerleme hızının artmasıyla deformasyon faktörü artma eğilimi göstermiştir. Dönme devrinin artmasıyla deformasyon faktörü azalma eğilimi göstermiştir. Yapılan deneyler sonucunda en yüksek değerdeki deformasyon faktörü 3 ağızlı karbür parmak freze takımı ile kesilen kanallarda, en düşük deformasyon faktörü ise 7 ağızlı Ti-Al kaplamalı karbür parmak freze takımı ile kesilen kanallarda oluşmuştur. Literatür çalışmaları ile yapılan deneysel çalışmalar karşılaştırıldığında literatür çalışmalar ile benzer şekilde takım ağız sayısı ve dönme devri arttıkça deformasyon faktörü değerleri azalmış ve ilerleme hızı arttığında deformasyon faktörü değerleri artmıştır.

Frezeleme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri;

Yapılan deneysel çalışmalarda dönme devrinin artması ile yüzey pürüzlülüğü azalma eğilimi ve ilerleme hızının artması ile yüzey pürüzlülüğü artma eğilimi göstermiştir. İlerleme hızının artmasıyla kesici takım kompozit malzemeyi kesmek için daha yüksek kuvvet gerektirmiştir. Yüzey pürüzlülüğü üzerinde takım cinsine bağlı etkiler karşılaştırıldığında takımların ağız sayısı arttıkça yüzey pürüzlülüğü azalmıştır. Yüzey pürüzlülüğü için en yüksek değer 3 ağızlı karbür parmak freze takımından sonra 4 ağızlı Ti-Al kaplamalı karbür parmak freze takımında ve son olarak 7 ağızlı Ti-Al kaplamalı karbür parmak freze takımında görülmüştür. Literatür çalışmaları ile yapılan deneysel çalışma karşılaştırıldığında literatür çalışmalarında aynı şekilde takım ağız sayısı ve dönme devri arttıkça yüzey pürüzlülüğü değerleri azalmış ve ilerleme hızı arttığında yüzey pürüzlülüğü değerleri artmıştır.

4.2. Öneriler

Havacılık sektöründe en fazla kullanılan kompozit malzemelerden biri olan karbon prepreg malzemelerin talaşlı imalatında karşılaşılan sorunların başında yüzey pürüzlülüğünün istenen değerlerde olmaması ve deformasyon faktörünün yüksek olması gelmektedir. Talaşlı imalatı yapılmış malzemenin deneyler sonucunda dönme devri, ilerleme hızı ve takım cinsine bağlı parametrelerin talaşlı imalat ile ilgili önemli sonuçlar verdiği görülmektedir. Malzemenin uygun şartlar altında üretilmesi ve talaşlı imalat için uygun mikroyapıya sahip olması, imalat sonucunda kaliteyi artıracak parametrelerden biridir. Malzeme mikroyapısında bulunabilecek boşlukların ve üretim hatalarından kaynaklı oluşabilecek sorunların kaliteyi etkileyeceği kesindir. Bu sebep ile talaşlı imalat yapılacak malzemenin öncelikle belirli standartlara uygun proseslerden geçirilmesi gerekmektedir. Bununla birlikte talaşlı imalatın yapılacağı tezgah ve kullanılacak ekipmanların talaşlı imalatı yapılacak malzemeye uygun seçilmesi önemlidir. Kullanılacak alana uygun üretim yöntemleri ile üretilmiş kompozit malzemenin uygun tezgah ve kesme parametreleri ile işlenmesinde başarılı sonuçlar alınabilir. Ayrıca, çeşitli talaşlı imalat işlemlerinde soğutma sıvısı kullanılabilme olanağı olması kaliteyi artıracak bir diğer faktördür. Malzeme ve kesici takım arasındaki talaşın dışarıya atılabilmesi hem takım ömrünü artıracak, hem de yüzey pürüzlülüğü ve deformasyon faktörünü iyileştirecektir. Yapılan deneysel çalışmalarda görüldüğü üzere, takım ağız sayısı arttıkça kompozit malzemenin kalite değerleri iyileşmiştir. Bu durumda takımlarda yüksek ağız sayısı olması ve kesilecek kompozit malzemenin talaş derinliğine göre ağız geometrilerinin belirlenmesi bir diğer önemli parametre olacaktır. Takımın girdiği talaş derinliğinin bulunduğu bölgede ağız

geometrisinin ters açılı olması vasıtasıyla malzemenin üst kısmında bulunan fiberler kaldırılarak deformasyon faktörü azaltılabilir.

TEŞEKKÜR

Makalenin yazarları, yapılan deneysel çalışmalarda verilen ekipman desteği için Kale Havacılık şirketine teşekkürlerini bildirmektedir.

KAYNAKLAR

1. Peduk G., Dilibal S., Harrysson O., Ozbek S., West H., “Characterization of Ni–Ti alloy powders for use in additive manufacturing”, *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*, Vol. 59, Issue 4, Pages 433-439, 2018.
2. Dilibal S., “Nikel-titanyum şekil bellekli alaşım üretimi ve şekil bellek eğitimi”, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2005.
3. Dilibal S., “The effect of long-term heat treatment on the thermomechanical behavior of NiTi shape memory alloys in defense and aerospace applications”, *Defense Science Journal*, Vol. 15, Issue 2, Pages 1-23, 2016.
4. Dilibal S., Hamilton R.F, Lanba A., “The effect of employed loading mode on the mechanical cyclic stabilization of NiTi shape memory alloys”, *Intermetallics*, Vol. 89, Issue 1, Pages 1-9, 2017.
5. Altug G.S., Ozistek T.D., Dilibal S., Ozbek S., “Transparent armour systems and general applications”, *MSI Defense Rev*, Vol. 1, Issue 1, Pages 1-8, 2015.
6. Dilibal S., Sahin H., “Sanayi 4.0 kapsamında robotlu ark kaynağı ile eklemeli imalat uygulaması, Sanayi 4.0 Teknolojik Alanları ve Uygulamaları”, Sayfa 261-270, Pegem Akademi, İstanbul, 2019.
7. Dilibal S., Sahin H., Dursun E., Engeberg E.D., “Nickel–titanium shape memory alloy-actuated thermal overload relay system design”, *Electrical Engineering*, Vol. 99, Issue 3, Pages 923-930, 2017.
8. Alp, M.S., “Jüt ve keten fiber takviyeli kompozitlerin frezelenme performansının belirlenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Batman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Batman, 2019.
9. Naresh, N., Rajasekhar, K. and Reddy, P. V. B., “Parametric analysis of GFRP composites in CNC milling machine using Taguchi method”, *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)*, Vol. 6, Issue 1, Pages 102-111, 2013.
10. Rajmohan, T., Vinayagamorthy, R. and Mohan K., “Review on effect machining parameters on performance of natural fibre–reinforced composites (NFRCS)”, *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, Vol. 32, Issue 9, Pages 1-21, 2018.
11. Yan, L., Chouw, N. and Jayaraman, K., “Flax fibre and its composites”, *Composites Part B: Engineering*, Vol. 56, Issue 1, Pages 296-317, 2014.
12. Vinayagamorthy, R., Rajeswari, N. and Karuppiyah, B., “Optimization studies on thrust force and torque during drilling of natural fiber reinforced sandwich composites”, *Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering*, Vol. 8, Issue 6, Pages 385-392, 2014.
13. Bayraktar Ş., Turgut Y., “Elyaf takviyeli polimer kompozit malzemelerin delinmesi üzerine bir araştırma”, 3. Ulusal Talaşlı İmalat Sempozyumu, Ankara, Sayfa 4-5, 2012.
14. Bayraktar, Ş., “Karbon Elyaf Takviyeli Polimer Kompozit Malzemelerin Frezeleme İşleminde İşlenebilirliğinin Deneysel Araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2011.
15. Çelik, Y. H., Kilickap, E. and Koçyiğit, N., “Evaluation of drilling performances of nanocomposites reinforced with graphene and graphene oxide”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 9, Issue 12, Pages 2371-2385, 2019.
16. Çakır, M. C., *Modern talaşlı imalatın esasları*, Vipas Yayınları, Sayfa 1-324, 1999.

17. Canpolat, N., “Değişik takviyeli kompozit malzemenin matkapla delinebilirliğinin ve yüzey pürüzlülüğünün araştırılması”, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 2008.
18. Erkan, Ö. ve Işık, B., “Cam elyaf takviyeli kompozit malzemenin işlenmesi esnasında kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkilerinin incelenmesi”, 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09), Karabük, Sayfa 1-6, 2009.
19. Kılıçkap, E., “CETP Kompozitlerin Delinmesinde Oluşan Deformasyona Delme Parametrelerinin Etkisinin İncelenmesi”, 2. Ulusal Tasarım İmalat ve Analiz Kongresi, Sayfa 76-84, İstanbul, 2010.
20. Yıldız R., “Karbon prepeg, cam prepeg, basalt elyaf ile üretilmiş hibrit kompozitlerin mekanik özelliklerinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi, İstanbul, 2019.
21. Nassar, M. M. A., Arunachalam, R. and Alzebdeh, K. I., “Machinability of natural fiber reinforced composites: A review”, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 9, Issue 12, Pages 2985-3004, 2017.
22. Neşeli, S., “Tornalamada takım geometrisi ve tırlama titreşimlerinin yüzey pürüzlülüğüne etkileri”, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 2006.
23. Sarı, H., “Frezelemede takım geometrisi ve tırlama titreşimlerinin yüzey pürüzlülüğüne etkileri”, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 2008.
24. Gaga, L. A., “Havacılık Alanında Kullanılan Karbon Prepeg Kompozit Malzemelerin Talaşlı İmalatını Etkileyen Parametrelerin Analizi,” Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Gedik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2020.