



Evaluation and mathematical modeling of delamination and cutting forces in milling of carbon fiber reinforced composite (CFRP) materials

Selçuk Yağmur^{ID}, Abdullah Kurt^{ID}, Ulvi Şeker^{ID}

Department of Manufacturing Engineering, Gazi University, Ankara, 06500, Turkey

Highlights:

- Milling of carbon fiber reinforced composites
- Effects of different geometry tools on delamination
- ANOVA statistics for delamination and cut3

Keywords:

- Carbon Fiber Reinforced Composite
- Milling
- Delamination
- PCD
- ANOVA

Article Info:

Research Article
Received: 24.10.2018
Accepted: 29.04.2019

DOI:

10.17341/gazimmfd.479616

Acknowledgement:

Republic of Turkey
Ministry of Industry and
Technology
Karcan Cutting Tools

Correspondence:

Author: Selçuk Yağmur
e-mail: syagmur@gazi.edu.tr
phone: +90 537 301 1526

Graphical/Tabular Abstract

Nowadays, weight reducing is become possible with composite materials taking place of steel (60-80) and aluminum (20-50%). Composite materials have become the preferred materials for many engineering applications. However, besides the advantages of composite materials, there are problems in manufacturing. Manufacturing of fiber-reinforced composite materials are more difficult than other materials. This situation needs to be very selective in terms of cutting tools. In this study, contour millind was realized of carbon fiber reinforced composite materials with PCD cutting tolls. Delamination and cutting forces have been studied investigated. After the experiments, it has been seen that increasing the cutting speed has a positive effect on the delamination, cutting forces and the best performance has shown the T1. According to ANOVA statistics, the most effective parameter in terms of delamination is cutting speed. According to ANOVA statistics, the most effective parameter in terms of cutting forces is second clearance angle. A schematic representation of the experimental setup is shown in Figure 1.

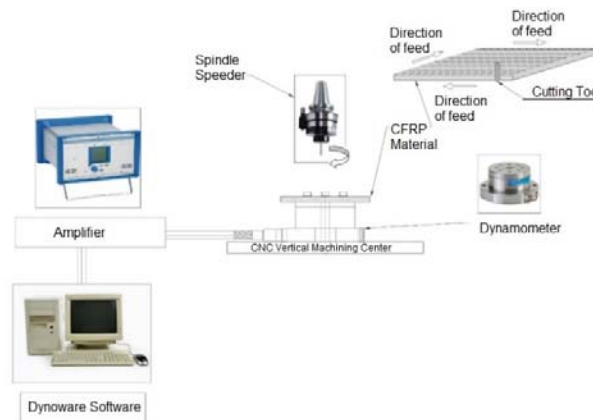


Figure A. Schematic representation of the experimental setup

Purpose: In this study, a unique PCD cutting tool design was devised which is capable of eliminating the encountered difficulties, especially the delamination problem on laminated/laminar formed composite board during machining carbon fiber reinforced composite (CFRC) materials. And cutting tools performance has been investigated in terms of delamination and cutting forces.

Theory and Methods:

Contour milling of KFTK materials was carried out with PCD cutting tools. The experiments were performed at the CNC vertical machining center. Three different cutting speed and constant feed rate used in experiments.

Results:

T1 tool has shown the best performance in terms of delamination and cutting forces between the designed and manufactured of the cutting tools. The best result in terms of delamination occurred at a cutting speed of 450 m / min with T1 tool. Cutting speed increase positively influenced delamination and cutting forces. According to model results the most important parameter affecting delamination is the cutting speed

Conclusion:

The performance of the designed and manufactured cutting tools are very good. The T1 coded cutting tool has the best performance among these cutting tool.



Karbon fiber takviyeli kompozit (KFTK) malzemelerin frezelenmesinde delaminasyon ve kesme kuvvetlerinin değerlendirilmesi ve matematiksel modellenmesi

Selçuk Yağmur*^{ID}, Abdullah Kurt^{ID}, Ulvi Şeker^{ID}

Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği Bölümü, Ankara, 06500, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Karbon fiber takviyeli kompozitlerin frezelenmesi
- Farklı geometriye sahip takımların delaminasyona etkileri
- Delaminasyon ve kesme kuvvetleri için ANOVA istatistikleri

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi
Geliş: 24.10.2018
Kabul: 29.04.2019

DOI:

10.17341/gazimmfd.479616

Anahtar Kelimeler:

Karbon fiber takviyeli
kompozit,
frezeleme,
delaminasyon,
PCD,
ANOVA

ÖZET

Günümüzde kompozit malzemelerin, çeliğin yerini almasıyla %60-80 oranında ve alüminyumun yerini almasıyla ise %20-50 oranında ağırlıktan kazanım mümkün hale gelmiştir. Kompozit malzemeler birçok mühendislik uygulaması için tercih edilen malzemeler haline gelmişlerdir. Fakat kompozit malzemelerin bu avantajlarının yanı sıra işlenmesinde yaşanan sıkıntılar söz konusudur. Farklı sektörlerde güncel teknolojinin vazgeçilmez malzemelerinden biri olarak görülen fiber takviyeli kompozit malzemelerin işlenmesi diğer malzemelere oranla daha zordur. Bu durum kesici takımlar açısından çok seçici olmayı gerektirir. Bu çalışmada, Karbon Fiber Takviyeli Kompozit (KFTK) malzemelerin işlenmesinde yaşanan güçlükleri ve özellikle de katmanlı/laminer yapıdaki levhalarda katman kalkması (delaminasyon) problemini bertaraf edebilecek özgün PCD kesici takım tasarımı yapılmıştır. Bu takımlar ile Karbon Fiber Takviyeli Kompozit malzemelerin frezelenmesinde meydana gelen delaminasyon ve kesme kuvvetleri araştırılmıştır. Kesme parametreleri olarak 350, 400 ve 450 m/dk. kesme hız ve 1270 mm/dk. sabit ilerleme miktarı seçilmiştir. Deneysel sonucunda en iyi performansı tasarımı ve üretimi gerçekleştirilen ve 1 numara ile kodlanan kesici takımın gösterdiği görülmüştür. Artan kesme hızının hasarı ve kesme kuvvetlerini olumlu yönde etkilediği görülmüştür. Ayrıca regresyon analizi sonrasında elde edilen ANOVA istatistiklerine göre hasar ve kesme kuvvetleri açısından etkili olan parametreler tespit edilmiştir.

Evaluation and mathematical modeling of delamination and cutting forces in milling of carbon fiber reinforced composite (CFRP) materials

H I G H L I G H T S

- Milling of carbon fiber reinforced composites
- Effects of different geometry tools on delamination
- ANOVA statistics for delamination and cutting forces

Article Info

Research Article
Received: 24.10.2018
Accepted: 29.04.2019

DOI:

10.17341/gazimmfd.479616

Keywords:

Carbon fiber reinforced
composite,
milling,
delamination,
PCD,
ANOVA

ABSTRACT

Nowadays, weight reducing is become possible with composite materials taking place of steel (60-80%) and aluminum (20-50%). Composite materials have become the preferred materials for many engineering applications. However, besides the advantages of composite materials, there are problems in manufacturing. Manufacturing of fiber reinforced composite materials are more difficult than other materials. This situation needs to be very selective in terms of cutting tools. In this study, a unique PCD cutting tool design was devised which is capable of eliminating the encountered difficulties, especially the exfoliation (delamination) problem on laminated/laminer formed composite board during machining carbon fiber reinforced composite (CFRC) materials. With this cutting tools delamination and cutting forces investigated on milling of CFRP materials. 350, 400, 450 m/min cutting speeds and 1270 mm/min constant feed rate were selected as cutting parameters. The first tool were showed the best performance in consequence of the tests. Increasing cutting speed influences the and cutting forces positively. Besides, the effective parameters on delamination and cutting forces, were determined according to the obtained ANOVA statistics after the regression analysis.

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: syagmur@gazi.edu.tr, akurt@gazi.edu.tr, useker@gazi.edu.tr / Tel: +90 537 301 1526

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Teknolojinin gelişimi, son yüzyılda bilgisayarların da devreye girmesiyle beraber büyük bir ivme kazanmıştır. Doğadan elde edilen malzemelerin sınırlı olmasından dolayı, malzeme özellikleri bu büyük gelişime ayak uyduramamış ve sanayi için temel bir girdi olan malzeme ve malzeme bilminde gelişme kaçınılmaz bir duruma gelmiştir [1]. Malzeme bilminde meydana gelen gelişmelere paralel kompozit malzemelerin üretilmesi ve endüstriyel alanda kullanımı hız kazanmıştır. Kompozit malzemelerde ana malzemeler genelde metaller, seramikler, cam ve polimerler olmak üzere dört sınıfa ayrılabilirler. Fiber takviyeli kompozit malzemeler bu dört grup malzemeden herhangi birinin fiberle takviye edilmesiyle elde edilirler. Fiberlerin gömüldüğü ana malzemeye matris denilir. Kompozit malzemelerde matrisin üç temel fonksiyonu vardır. Bunlar, fiberleri bir arada tutmak, yükü fiberlere dağıtmak ve fiberleri çevresel etkilerden korumaktır. İdeal bir matris malzemesi, düşük viskoziteli yapıda iken daha sonra fiberleri sağlam ve uygun bir şekilde çevreleyebilecek katı forma kolaylıkla geçebilmelidir [2].

Kompozit malzemelerin avantajlarının yanı sıra imalat güçlükleri gibi dezavantajlar da mevcuttur. Farklı sektörlerde yaygın olarak kullanılan fiber takviyeli kompozit malzemelerin işlenmesi diğer malzemelere oranla daha zordur. Bu durum kesici takımlar açısından çok seçici olmayı gerektirir. Bu malzemelere en yaygın uygulanan talaş kaldırma işlemleri delme, parmak freze ile işleme gibi işlemlerdir. Kompozitler keskin bir kesici uç ile işlenmelidir. Kesici kenarın aşırı aşınması halinde lifler kesilmeyip kopacak, bu da tabakaların ayrılmasına neden olacaktır.

Kompozit malzemelerin kullanımının yaygın olması bununla birlikte işlenmesinde yaşanan zorluklar çalışmacıların sıklıkla ilgisini çeken konular arasında yer almıştır. Literatürde, özellikle son yıllarda karbon fiber takviyeli malzemelerin delinmesinde meydana gelen delaminasyonun incelenmesi çalışmalarına fazlasıyla rastlanmaktadır [3-7]. Çalışmalarda farklı takımların ve takım geometrisinin delaminasyon ve kesme kuvvetlerine etkisinin araştırıldığı durumlara da rastlanmaktadır [8, 9]. Ayrıca fiber oryantasyonunun karbon fiber takviyeli kompozitlerin işlenmesindeki etkilerinin araştırıldığı çalışmalarda literatürde mevcuttur [10-13].

Literatürde genel olarak karbon fiber takviyeli kompozitlerin delinmesinde meydana gelen delaminasyon kesme kuvvetlerinin araştırıldığı çalışmalara sıklıkla rastlamak mümkün olsa da bu kompozitlerin frezelenmesinde meydana gelen delaminasyon ve kesme kuvvetlerinin araştırıldığı çalışmalar da oldukça fazladır. Akira ve arkadaşları çalışmalarında karbon fiber takviyeli kompozitlerin yan yüzeylerinin işlenmesi sırasında oluşan kesme kuvvetlerini araştırmışlardır. Çalışmada parmak freze kullanmışlar ve kesme kuvvetleri üzerinde kaplama uygulamasının daha etkili olduğu sonucuna ulaşmışlardır [14]. Bayraktar ve

Turgut çalışmalarında karbon fiber takviyeli kompozit malzemeleri parmak freze kullanarak işlemiştir. Deneyler sonucu, kaplamasız kesici takımların kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğü açısından daha iyi performans sergilediği sonucuna varılmıştır [15]. Sorrentino ve Turchetta karbon fiber takviyeli kompozitlerin frezelenmesinde meydana gelen kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüklerini incelemişlerdir. Çalışma neticesinde yana kayma mesafesinin artması ile kesme kuvvetlerinin arttığı sonucuna ulaşmışlardır [16]. Rusinek çalışmasında polimer matrisli karbon fiber kompozit malzemenin frezelenmesinde devir sayısı ve ilerleme miktarının kesme kuvvetleri üzerindeki etkisini araştırmıştır. Çalışma sonrasında devir sayısının artması ile kesme kuvvetlerinde azalma olduğu sonucuna ulaşmıştır [17].

Kompozit malzemelerin işlenebilirliğinin yanı sıra farklı kompozit malzemelerin mekanik, termal ve kimyasal özelliklerin araştırıldığı, kompozit plakalarda pim bağlantılarının deneysel olarak incelendiği çalışmalara literatürde rastlamak mümkündür [18-20]

Literatür araştırması neticesinde çalışmalarda genel olarak PCD ve sementit karbür takımların kullanıldığı gözlemlenmiştir. Genel olarak literatürdeki çalışmalarda ticari olarak temin edilebilen standart kesici takımların kullanıldı görülmektedir. Bu çalışmada literatürden farklı olarak, tasarımı ve üretimi gerçekleştirilen PCD takımlar ile KFTK malzemesinin çevre frezeleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Kesme parametreleri ve kesici takım geometrisinin delaminasyon ve kesme kuvveti üzerine etkileri araştırılmıştır. Yapılan çoklu regresyon analizi ile de KFTK malzemelerin işlenmesinde hangi parametrelerin daha etkin olduğu tespit edilmiştir.

2. MATERYAL METOT (MATERIAL METHOD)

Deneylerde kullanılacak olan karbon fiber takviyeli kompozit malzemeler havacılık sektöründe yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu malzemeler Odak Kompozit Teknolojileri A.Ş. tarafından havacılık sektöründe kullanılan malzeme özelliklerine uygun olarak üretilmiştir.

Malzemeler, 245 gr/m² 2x2 3K twill karbon fiber ile Huntsman XU3508 reçine sistemi kullanılarak prepreg olarak imal edilmiştir. Prepreg malzeme 80 kat boyunca 0° ve 45° fiber açıları ile cam bir yüzeye simetrik olarak serilmiş; vakum torbalama yöntemi ile plakalar elde edilmiştir. Plakalar 120°C de 4 saat kurlenmiştir. Yeterli miktarda prepreg üretiminden sonra prepreg malzeme istenilen ölçülere kesilmiştir. 20 mm plaka için 80 kat takviye malzemesi kullanılmıştır. Twill dokuma tipinde karbon lifler 0° ve 90° yönünde örgü oluştururlar. Bu nedenle serim açısı olarak sadece 0° ve 45° lik açılar kullanılmıştır.

Çalışma kapsamında tasarımı ve üretimi gerçekleştirilen üç farklı takım kullanılmıştır. Bu takımlar Takım 1, Takım 2 ve Takım 3 olarak adlandırılmış olup T1, T2 ve T3 şeklinde

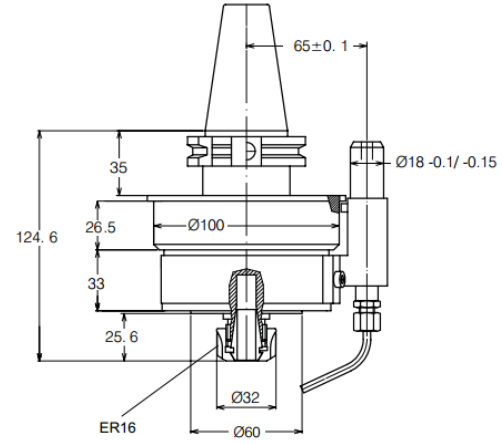
kodlanmıştır. 10 mm çapında geliştirilen takımların üç kesici ağzından biri sağ biri sol helis açısına sahipken üçüncü kenar, takımın dalmasını sağlamak amacıyla, düz olarak imal edilmiştir. Helis açıları aynı olan bu kesici takımlara iki ön boşluk açısı verilmiştir. Tasarımı ve üretimi yapılan 1 numaralı takımın birinci boşluk açısı 8°, ikinci boşluk açısı 17° dir. 2 numaralı takımın takımın birinci boşluk açısı 11°, ikinci boşluk açısı 20° ve 3 numaralı takımın birinci boşluk açısı 13°, ikinci boşluk açısı 25° dir. Takımların birbirinde ayıran bu boşluk açılarıdır. Geliştirilen bu takımlara ait teknik resimler Şekil 1’de verilmiştir.

a) T1 b) T2 c) T3

Kesme parametreleri havacılık sanayinde KFTK malzemelerin işlenmesinde kullanılan değerler ile birlikte takım üreten firmaların tavsiye ettiği değerler arasından seçilmiştir. Deneylerde kullanılan kesme parametreleri Tablo 1’de verilmiştir.

Talaş kaldırma deneyleri Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İmalat Mühendisliği Bölümünde Johnford VMC–550 marka CNC dik işleme merkezinde gerçekleştirilmiştir. Kompozit malzemelerin işlenebilmesi için yüksek kesme hızlarına ihtiyaç duyulmaktadır. Deneylerin yapılacağı takım tezgâhının en yüksek devir sayısının 6000 dev/dak olması sebebiyle hız kafası kullanma yolu seçilmiştir. Hız kafası tezgâh fener miline bağlanarak tezgâh fener milinin devir sayısını 4,8 kat arttırmaktadır. Hız kafasının şematik gösterimi Şekil 2’de verilmiştir. Kesme kuvvetlerinin deneysel olarak belirlenmesi için üç kesme kuvveti bileşenini (F_x , F_y , F_z) aynı anda ölçme kapasitesine sahip,

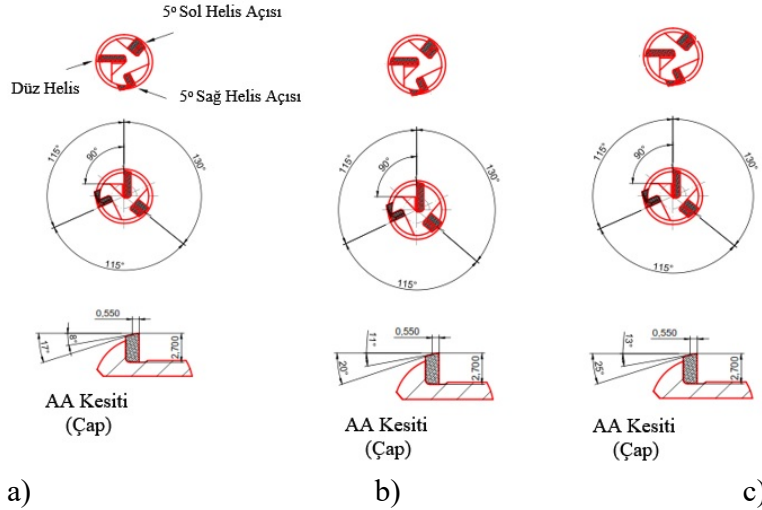
kuartz kristal esasıyla çalışan KISTLER 9272 tipi dinamometre ve Kistler Type 5070 yükseltici kullanılmıştır.



Şekil 2. Hız kafasının şematik gösterimi (Schematic representation of spindle speeder)

Deneyler sonucu oluşan delaminasyonu ölçmek için Dino Lite marka dijital kamera kullanılmıştır. Bu kamera ile 60X büyütme yapılarak fotoğraflar alınmıştır. Fotoğraf üzerinden alınan ölçüler ile grafikler oluşturulmuştur. Delaminasyon ölçümleri malzemelerde meydana gelen en yüksek delaminasyon esas alınarak belirlenmiştir.

KFTK malzemenin CNC dik işleme merkezinde işlendiği bu çalışmada malzeme, dinamometrenin maksimum taşıma sınırları gözetilerek dinamometre üzerine civata ve rondela

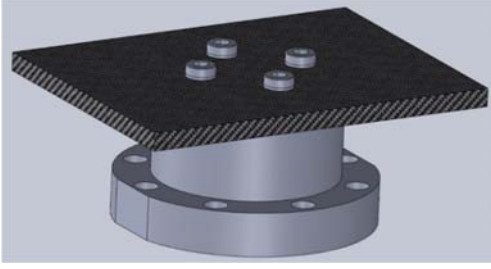


Şekil 1. Takımlara ait boşluk açıları (Clearance angles of cutting tools)

Tablo 1. Deneylerde kullanılan kesme parametreleri (Cutting parameters used in experiments)

Kesme Hızı (V m/dk.)	İlerleme (f mm/dk.)	Talaş Derinliği (mm)	Yana Kayma Mesafesi (mm)
350			
400	1270	10	2
450			

ile bağlanmıştır. İş parçasının dinamometreye bağlanması Şekil 3'te gösterilmiştir.



Şekil 3. KFTK malzemesinin dinamometreye bağlanması (Fixing the CFRP material to the dynamometer)

Regresyon analizi için 9 deneyde kullanılan X_1 , X_2 , X_3 bağımsız değişkenleri Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Deney/Analiz parametreleri (Experiment / Analysis parameters)

Deney no	girdi1 Kesme Hızı (X_1)	girdi2 Birinci boşluk açısı (X_2)	girdi3 İkinci boşluk açısı (X_3)
1	350	8	17
2	400	8	17
3	450	8	17
4	350	11	20
5	400	11	20
6	450	11	20
7	350	13	25
8	400	13	25
9	450	13	25

Çok değişkenli doğrusal regresyon analizi esasları referans alınarak S1 [21] için Eş. 1'de gösterilen lineer model geliştirilmiştir.

$$\hat{S}_1 = q \cdot X_1^{q_1} \cdot X_2^{q_2} \cdot X_3^{q_3} \cdot X_4^{q_4} \quad (1)$$

Eşitlikte q model sabitini; q_1 , q_2 ve q_3 ise sırasıyla X_1 , X_2 , X_3 bağımsız değişkenleri (girdiler) için sabitleri göstermektedir.

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

Çalışma kapsamında tasarlanmış ve üretimi yapılmış PCD parmak frezeler ile KFTK malzemelerin frezelenmesi sonrasında elde edilen veriler Tablo 3'te verilmiştir.

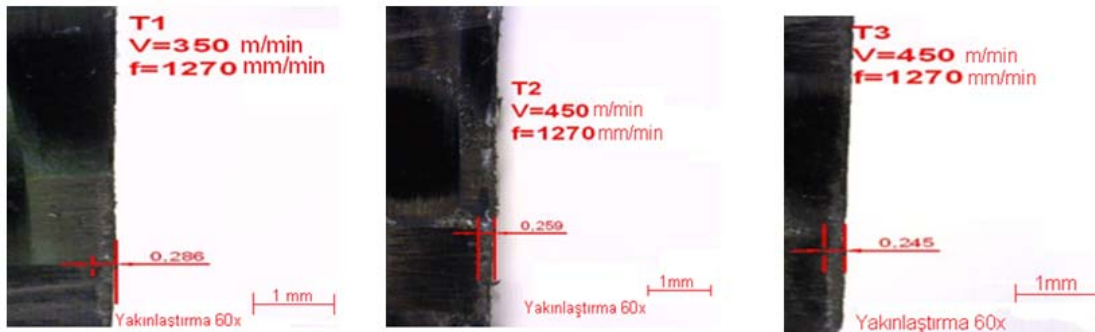
3.1. Delaminasyonun Değerlendirilmesi (Evaluation of Delamination)

Delaminasyon genişliği ile ilgili ölçümlere ait örnekler Şekil 4'te verilmiştir. Bu ölçümler sonrasında elde edilen değerler ışığında oluşturulan kesici takım ve kesme hızına göre delaminasyon değişimleri Şekil 5'te verilmiştir.

Sabit ilerleme hızında kesme hızında meydana gelen artışın delaminasyon miktarında azalmaya sebep olması literatürde karşılaşılabilen bir durumdur [22]. Sabit ilerleme miktarında kesme hızının artması kesici takım diş başı ilerlemesinin azalmasını sağlayacaktır. Bu da kesici takımın birim zamanda daha az talaş kaldırmasına sebep olarak kesicilerin lifleri koparma eğilimini nispeten azaltacaktır. Kesicilerin lifleri koparmak yerine kesmesinin sonucunda malzemelerde

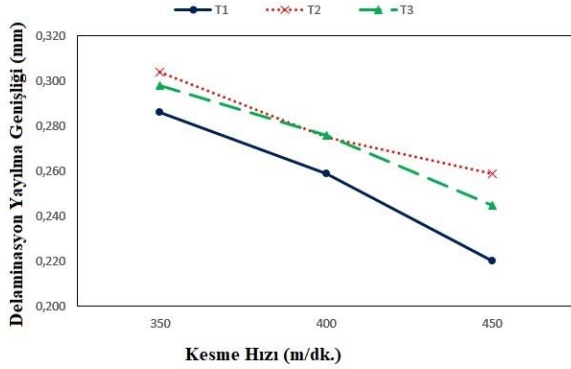
Tablo 3. Deney girdilerine bağlı olarak elde edilen çıktılar (Outputs based on experimental inputs)

Deney No	Kesme Hızı (m/dk.)	İlerleme (mm/dk.)	Kesici Takım	Bileşke Kesme Kuvvetleri (N)	Delaminasyon (mm)
1	350			54	0,286
2	400		T1	51	0,259
3	450			47	0,220
4	350			75	0,304
5	400	1270	T2	68	0,275
6	450			60	0,259
7	350			72	0,298
8	400		T3	62	0,276
9	450			57	0,245



Şekil 4. Delaminasyon ölçüm örnekleri (Delamination measurement samples)

meydana gelen delaminasyonda azalma olacağı düşünülmektedir.

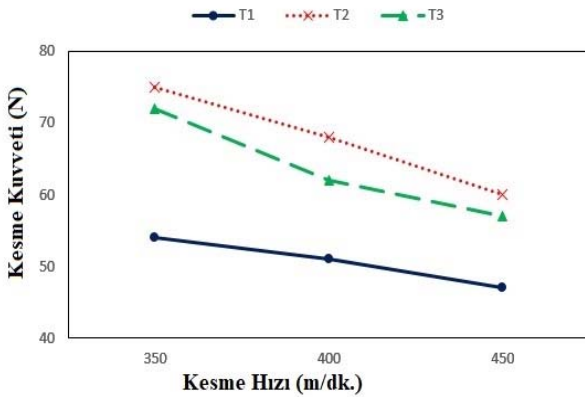


Şekil 5. Kesme hızı ve takım geometrisine bağlı olarak delaminasyon yayılması değişimi
(Change of delamination depending on cutting speed and tool geometry)

Delaminasyon bakımından her üç takım birlikte incelendiğinde, T1 kodlu takım diğer iki takımdan daha belirgin bir şekilde ayrılmaktadır. En düşük delaminasyon bütün parametrelerde T1 kodlu takım ile işlenen malzemelerde meydana gelirken, diğer iki takım (T2 ve T3) birbirine yakın eğilimler sergilemiştir. En iyi performansı gösteren T1 kodlu takım en düşük boşluk açlarına dolayısıyla en yüksek kama açısına sahiptir. T1 kodlu takımın en iyi performansı göstermesi, büyük kama açısına sahip olmasına atfedilebilir. Kama açısının büyük olması takımın aşınma direncini arttırmakta ve takım daha az aşınmaktadır. Bu sebeple delaminasyon miktarının azaldığı düşünülmektedir.

3.2. Kesme Kuvvetlerinin Değerlendirilmesi (Evaluation of Cutting Forces)

Kesici takım ve kesme hızına göre kesme kuvvetlerinin değişimini gösteren grafik Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 6. Kesme hızı ve takım geometrisine bağlı olarak kesme kuvvetlerindeki değişim
(Change of cutting forces depending on cutting speed and tool geometry)

Deneyler esnasında kesme kuvvetleri 47 N ile 72 N arasında ölçülmüştür. Diğer talaşlı imalat işlemleri ile özellikle metal işleme ile karşılaştırıldığında bu kesme kuvvetlerinin oldukça düşük olduğu görülmektedir. Bu durum kompozit malzemelerin özgül kesme dirençlerinin düşük olmasına bağlıdır. Karbon fiber takviyeli kompozit malzemeler işlenirken kesme kuvvetlerinin düşük çıkması literatürle örtüşen bir durumdur [23, 24].

Şekil 7'deki grafik incelendiğinde kesme hızındaki artış genel olarak kesme kuvvetlerinin düşmesine sebep olmuştur. Kesme kuvvetlerinde en düşük değerler de delaminasyonda olduğu gibi T1 kodlu takım ile yapılan deneylerde görülmüştür. T2 ve T3 kodlu takımlarla elde edilen kesme kuvveti değerleri birbirine yakın seyrederken T1 kodlu takım bu iki takımdan kesme kuvvetleri değerleri açısından nispeten ayrılmıştır. T1 kodlu takımın büyük kama açısına sahip olması bu takımı diğer iki takımdan belirgin bir şekilde ayırmıştır.

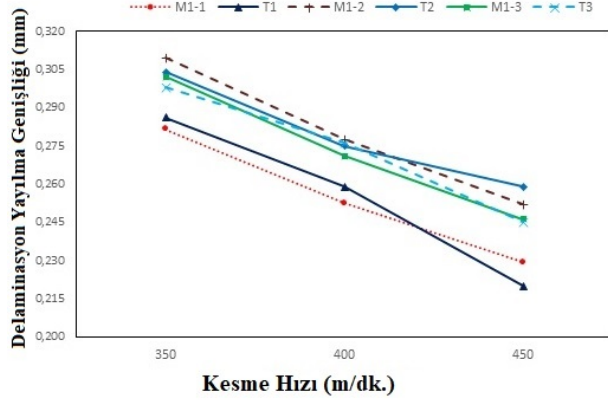
3.3. Deney Sonuçlarının Modellenmesi (Modeling of experimental results)

Deneyler sonucunda elde edilen kesme kuvvetleri (F) ve delaminasyon değerleri için regresyon denklemi çıkartılmıştır. Regresyon modelinde denklemin oluşturulması için Excel programı kullanılmıştır. Excel programında oluşturulan Model denklemine uygun olarak Minitab 15 Programı kullanılarak sağlama yapılmıştır. Minitab 15 programı ile elde edilen model sonuçları ile Excel programında elde edilen model sonuçları birbirini doğrulamıştır. Her bir deney için kesme kuvveti ve delaminasyon ölçümleri yapılarak ölçümler arasındaki değişimlerin hangi etmenlerden kaynaklandığının etkisini araştırmak için varyans analizi kullanılmıştır.

3.3.1. Modele Göre Delaminasyonun Değerlendirilmesi (Evaluation of Delamination by Model)

Delaminasyon değerleri için elde edilen regresyon istatistikleri ve varyans analizi sonuçları Tablo 4'te verilmiştir. Tablo 4'teki regresyon istatistiklerinde R^2 'nin 0,947 olduğu görülmektedir. R^2 , 1'e yakın olduğu için delaminasyon açısından geliştirilen modelin başarı oranının yüksek olduğunu söylemek mümkün olacaktır. ANOVA istatistiklerinde *Anlamlılık F* değerine bakıldığında bu değer 0,001258 olarak 0,05'den küçük olduğu görülür. Bu sebeple delaminasyon bakımından gruplar arasında anlamlı fark olduğu sonucu ortaya çıkar. Kesme hızı, birinci boşluk açısı ve ikinci boşluk açısı ayrı ayrı incelendiğinde kesme hızı ve birinci boşluk açısı P değerinin (0,000356 ve 0,026457) 0,05'den küçük olduğu görülmektedir. Fakat ikinci boşluk açısının P değeri 0,0706 olarak hesaplanmıştır. Yani ikinci boşluk açısı P değeri 0,05'ten büyük olduğu için delaminasyon açısından ikinci boşluk açısının etkisinin olmadığını söylemek doğru olacaktır. Kesme hızı ve birinci boşluk açısı arasında P değeri sıfıra daha yakın olan kesme hızının delaminasyon yayılma genişliği üzerinde en etkili parametre olduğunu söylemek mümkün olacaktır.

Model sonucunda elde edilen delaminasyon yayılma genişliği değerleri ile deney değerlerinin karşılaştırıldığı grafik Şekil 7’de verilmiştir.



Şekil 7. Model sonuçlarının deney sonuçları ile delaminasyon açısından karşılaştırılması
(Comparison of model results with test results in terms of delamination)

Şekil 7’deki grafik incelendiğinde deney sonuçları ile model sonuçlarının birbirine oldukça yakın olduğu görülmektedir. Bu durum deney sonuçları ile model sonuçları arasındaki uygunluğu göstermektedir.

3.3.2. Modele Göre Kesme Kuvvetlerinin Değerlendirilmesi (Evaluation of Cutting Forces by Model)

Modele göre kesme kuvvetleri için elde edilen regresyon istatistikleri ve varyans analizi sonuçları Tablo 5’te verilmiştir. Tablo 5’teki değerler ışığında modellenen regresyon istatistikleri incelendiğinde, gerçek deney sonuçları ile model sonuçları arasındaki uyumu gösteren R^2 değerinin 0,981671 olarak hesaplandığı görülebilir. Bu durumda kesme kuvvetleri açısından modelin başarı oranının oldukça yüksek olduğu söylenebilir.

ANOVA değerlerde ortalama yüzey pürüzlülüğü açısından Anlamlılık F değerinin 0,000092 olduğu ve sifıra oldukça yakın olduğu görülmektedir. Anlamlılık F değerinin 0,05’ten küçük olması sebebiyle gruplar arasında anlamlı fark olduğunu söylemek kesme

Tablo 4. Delaminasyon değerleri için regresyon istatistikleri ve ANOVA bilgileri
(Regression statistics and ANOVA information for delamination)

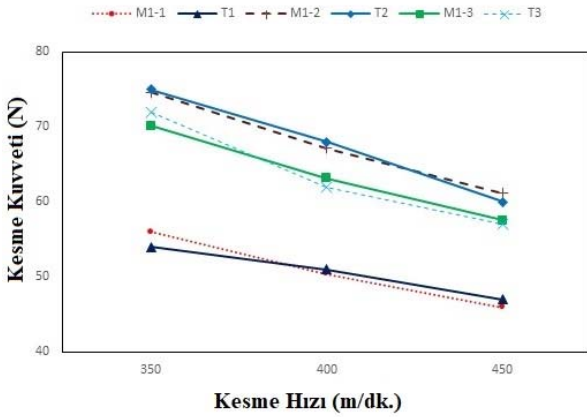
Regresyon İstatistikleri						
R^2	$R_{çoklu}$	R_{adj}^2	Standart Hata	Gözlem		
0,947	0,97	0,91	0,012	9		
ANOVA						
	df	SS	MS	F	Anlamlılık F	
Regresyon	3	0,014697	0,004899	30,1251	0,001258	
Hata (Fark)	5	0,000813	0,000163			
Toplam	8	0,015511	0,005062			
	Katsayılar	Std. Hata	T-değeri	P-değeri	Düşük %95	Yüksek %95
Model sabiti	1,671284	0,282255	5,9211776	0,001959	0,945724	2,396844
Kesme hızı	-0,817317	0,095337	-8,5728784	0,000356	-1,062389	-0,572244
β	0,570039	0,183108	3,1131357	0,026457	0,099346	1,040733
θ	-0,534120	0,233261	-2,2898012	0,070667	-1,133736	0,065495

Tablo 5. Kesme kuvvetleri için regresyon istatistikleri ve ANOVA bilgileri
(Regression statistics and ANOVA information for cutting forces)

Regresyon İstatistikleri						
R^2	$R_{çoklu}$	R_{adj}^2	Standart Hata	Gözlem		
0,981671	0,990793	0,970673	0,011746	9		
ANOVA						
	df	SS	MS	F	Anlamlılık F	
Regresyon	3	0,036948	0,012316	89,2619	0,000092	
Hata (Fark)	5	0,000690	0,000138			
Toplam	8	0,037638	0,012454			
	Katsayılar	Std. Hata	T-değeri	P-değeri	Düşük %95	Yüksek %95
Model sabiti	4,125633	0,259985	15,8687420	0,000018	3,457321	4,793946
Kesme hızı	-0,789321	0,087815	-8,9884306	0,000284	-1,015057	-0,563585
β	1,684996	0,168660	9,9904769	0,000172	1,251441	2,118551
θ	-1,537045	0,214856	-7,1538424	0,000829	-2,089350	-0,984740

kuvvetleri açısından da mümkün olacaktır. Parametrelerin ayrı ayrı P değerlerine bakıldığında; kesme hızı P değeri 0,000284, birinci boşluk açısı (β) P değeri 0,000172 ve ikinci boşluk açısı P değerinin (θ) 0,000829 $<0,05$ olduğu görülmektedir. Bu durumda kesme hızı, birinci boşluk açısı ve ikinci boşluk açısının kesme kuvvetleri bakımından aynı anda etkili olduğu sonucu ortaya çıkmıştır. Bu üç parametre arasında en etkili parametrenin P değeri sıfıra en yakın olan ikinci boşluk açısının olduğunu söylemek mümkün olacaktır. Onu kesme hızı ve ikinci boşluk açısı izlemektedir. Katsayılar bakıldığında, kesme hızı ve ikinci boşluk açısının artışının kesme kuvvetlerinin azalmasına sebep olduğu bununla birlikte birinci boşluk açısı artışının ise kesme kuvvetlerini arttırdığı söylenebilir.

Model sonucunda elde edilen kesme kuvvetleri ile deney değerlerinin karşılaştırıldığı grafikte Şekil 8'de verilmiştir.



Şekil 8. Model sonuçlarının deney sonuçları ile kesme kuvvetleri açısından karşılaştırılması
(Comparison of model results with test results in terms of cutting forces)

Şekil 8'deki grafik incelendiğinde deney sonuçları ile model sonuçlarının birbirine oldukça yakın olduğu görülmektedir. Bu durum deney sonuçları ile model sonuçları arasındaki uygunluğu göstermektedir.

4. SONUÇLAR (RESULTS)

Çalışma kapsamında tasarımı ve üretimi yapılan üç farklı geometriye sahip PCD takımla karbon fiber takviyeli kompozitlerin çevresel frezelenmesi deneysel olarak incelenmiştir.

- Çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir:
- Tasarımı ve üretimi yapılan kesici takımlar arasında delaminasyon ve kesme kuvvetleri açısından T1 kodlu takım en iyi performansı göstermiştir.

- Delaminasyon açısından en iyi sonuç T1 kodlu takımın 450 m/dak kesme hızında meydana gelmiştir.
- Kesme hızı artışı delaminasyonu ve kesme kuvvetlerini olumlu yönde etkilemiştir.
- Model sonuçlarına göre delaminasyonu etkileyen en önemli parametrenin kesme hızı olduğu görülmüştür.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENT)

Yazarlar bu çalışmayı 0109.STZ.2013-1 kodlu proje ile destekleyen T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı'na ve Proje ortağı Karcan Kesici Takımlar'a teşekkür eder.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Eren Y., Kompozit Yapıların Darbe Etkilerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya, 2007.
2. Tolun C., Dikdörtgen Elasto-Plastik Kompozit Plakların Dinamik Analizi, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2008.
3. Karnik S.R., Gaitonde V.N., Campos Rubio J., Esteves Correia A., Abrão A.M., Paulo D. J., Delamination analysis in high speed drilling of carbon fiber reinforced plastics (CFRP) using artificial neural network model, *Materials and Design*, 29 (9), 1768-1776, 2008.
4. Gaitonde V. N., Karnik S. R., Rubio J. C., Correia A. E., Abrão A. M., Davim J. P., Analysis of parametric influence on delamination in high-speed drilling of carbon fiber reinforced plastic composites. *Journal of materials Processing Technology*, 203(1), 431-438, 2008.
5. Shyha I.S., Aspinwall D.K., Soo S.L., Bradley S., Drill geometry and operating effects when cutting small diameter holes in CFRP, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 49 (12-13), 1008-1014, 2009.
6. Davim J.P., Rubio J.C., Abrão A.M., A novel approach based on digital image analysis to evaluate the delamination factor after drilling composite laminates, *Composite Science and Technology*, 67 (9), 1939-1945, 2007.
7. Urban, N. A., Analysis of machining quality in edge trimming of carbon fiber reinforced composite, Doctoral dissertation, Wichita State University, 21-36, 2005.
8. Tsao C. C., Hocheng H., Computerized tomography and C- Scan for measuring delamination in the drilling of composite materials using various drills, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 45 (11), 1282-1287, 2005.
9. Chen W. C., Some experimental investigations in the drilling of carbon fiber reinforced plastic (CFRP) composite laminates, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 37 (8), 1097-1108, 1997.
10. Robert V., Lukas S., Friedrich K., Konrad W., Influence of fibre orientation, tool geometry and process parameters on surface quality in milling of CFRP, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 18, 1875-91, 2017.

11. Henerichs M., Woß F., Wegener K., Machining of carbon fiber reinforced plastics: Influence of tool geometry and fiber orientation on the machining forces, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 9, 136-145, 2015.
12. Maegaea S., Morikawa Y., Hayakawa S., Itoigawa F., Mechanism for changes in cutting forces for down-milling of unidirectional carbon fiber reinforced polymer laminates: Modeling and experimentation, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 100, 7-13, 2015.
13. Hintze W., Cordes M., Koerkel G., Influence of weave structure on delamination when milling CFRP, *Journal of Materials Processing Technology*, 216, 199-205, 2015.
14. Akira H., Naoya H., Takashi U., Tatsuaki F., High-quality machining of CFRP with high helix endmill, *Manufacturing Technology*, 63 (1), 89-92, 2014.
15. Bayraktar Ş., Turgut Y., Investigation of cutting forces and surface roughness in milling of carbon fiber reinforced polymer composite material, *Materiali in Tehnologije / Materials and Technology*, 50(4), 591-600, 2016.
16. Sorrentino, L., Turchetta, S., Milling of Carbon Fiber-Reinforced Plastics: Analysis of Cutting Forces and Surface Roughness, 18th International Conference On Composite Materials, 1-6, 2011.
17. Rusinek R., Cutting process of composite materials: An experimental study, *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 45 (4), 458-462, 2010
18. Kara, Y., Akbulut, H., Mechanical behavior of helical springs made of carbon nanotube additive epoxy composite reinforced with carbon fiber, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 32(2), 417-427, 2017.
19. Eren, Ş., Poyraz, B., Gökçe, N., Şamandar, A., Aykanat, B., Subaşı, S., Investigation of the initiator effect on mechanical, thermal and chemical properties of polyesters used in composite material production, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 33(4), 1383-1396, 2018.
20. İnal, O., Ataş, A., Experimental investigation of pinned joints in NCF Glass-Fibre reinforced composite plates, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 33(4), 1445-1457, 2018.
21. Kurt, A., Talaş kaldırma sırasında oluşan kesme kuvvetleri ve mekanik gerilmelerin deneysel olarak incelenmesi ve matematiksel modellerinin oluşturulması, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2006.
22. Çavuş Y., Karbon Fiber Takviyeli Kompozit (KFTK) Malzemelerin Alışılmış Takımlarla İşlenebilirliği, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2015.
23. Slamani M., Gauthier S., Chatelain J. F., A study of the combined effects of machining parameters on cutting force components during high speed robotic trimming of CFRPs, *Measurement*, 59, 268-283, 2015.
24. Feito N., Diaz-Álvarez J., López-Puente J., Miguelez M. H., Numerical analysis of the influence of tool wear and special cutting geometry when drilling woven CFRPs, *Composite Structures*, 138, 285-294, 2016.

