



Dolgu ve hibrit kompozitlerin delme performansının ve mekanik özelliklerinin incelenmesi

Investigation of drilling performance and mechanical properties of unfilled and hybrid composites

Hüseyin Gürbüz^{1,*}, Şehmus Baday², Mehmet Emin Demir³, İbrahim Halil Akcan⁴

^{1,4} Batman Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 72060, Batman, Türkiye
^{2,3} Batman Üniversitesi, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, 72060, Batman, Türkiye

Öz

Kompozit malzemelerin içerdiği dolgu ve takviye parçacıklarının özellikleri ve oranları kompozit malzemelerin çekme ve eğme gibi mekanik özelliklerini etkilemektedir. Ayrıca kompozit malzemelerin montaj ve bağlantıları için delme işlemi büyük bir önem arz etmektedir. Bu yüzden farklı işleme parametrelerde kompozit malzemelerin delinmesinde meydana gelen delaminasyonlar ve ilerleme kuvvetleri birçok araştırmaya konu olmuştur. Bu çalışmanın amacı Gr ve B₄C dolgularının karbon elyaf takviyeli kompozitlere ilave ederek dolguların kompozitin mekanik özellikleri ve işlenebilirliği üzerindeki etkilerini araştırmaktır. El yatırma yöntemiyle %7.5 B₄C ve %7.5 Gr dolguları kullanılarak üretilen kompozitlerin çekme ve eğilme dayanımları belirlenmiştir. Dolgu parçacıklarının kompozitin çekme dayanımını düşürdüğü, eğilme dayanımını ise arttırdığı anlaşılmıştır. Kompozit iş parçalarına 4 farklı ilerleme oranı ve kesme hızında boydan boya delik delme işlemi uygulanmıştır. Ayrıca dolgu ve hibrit dolgu kompozitlerin delinmesinde ilerleme oranı ve kesme hızı gibi işleme parametrelerinin ilerleme kuvveti ve delaminasyon faktörü üzerindeki etkisi incelenmiştir. İlerleme oranının artması delaminasyon faktörünü olumlu etkilerken, kesme hızının artması olumsuz etkilemektedir. Karbon elyaf takviyesine dolgu ilave edilmesi ise delaminasyon miktarını düşürmüş, ilerleme kuvvetlerini ise arttırmıştır.

Anahtar kelimeler: Mekanik özellikler, Delme, Delaminasyon, Karbon Elyaf, B₄C, Gr

1 Giriş

Polimer malzemelerin sahip olduğu, kimyasal direnç, hafiflik, düşük maliyet, kolay üretim, su iticilik ve kolay işlenebilirlik gibi birçok olumlu özellik, bu malzemelerin mühendislik alanında kullanımını arttırmaktadır [1, 2]. Fakat polimerlerin ısı dirençlerinin düşük olması ve mekanik dayanımlarının yeterli olmaması bu malzemeleri dezavantajlı kılmaktadır. Polimerlerin mekanik özellikleri, hem B₄C, SiO₂, Al₂O₃, Gr gibi partiküllerle, hem de jüt, keten gibi doğal ya da aramid, karbon, cam gibi sentetik elyaflarla geliştirilebilmektedir. Polimerler elyafların

Abstract

The properties and ratios of filler and reinforcement particles in composite materials affect the mechanical properties of composite materials such as tensile and flexural. In addition, the drilling process is of great importance for the assembly and connections of composite materials. Therefore, delaminations and feed forces that occur in drilling composite materials at different machining parameters have been the subject of many studies. The aim of this study is to investigate the effects of adding Gr and B₄C fillers to carbon fiber-reinforced composites on the mechanical properties and machinability of the composites. Tensile and flexural strengths of the composites, produced using hand lay-up method with 7.5% B₄C and 7.5% Gr fillers, were determined. It was found that the filler particles reduced the tensile strength of the composites but increased their flexural strength. Through-hole drilling was applied to composite workpieces at 4 different feed rates and cutting speeds. Additionally, the effects of machining parameters such as feed rate and cutting speed on thrust force and delamination factor during the drilling of both unfilled and hybrid-filled composites were examined. While an increase in feed rate positively affected the delamination factor, an increase in cutting speed had a negative impact. Moreover, the addition of fillers to carbon fiber reinforcement reduced the amount of delamination but increased the thrust forces.

Keywords: Mechanical properties, Drilling, Delamination, Carbon Fiber, B₄C, Gr

dağılmasını ve kompozite uygulanan yükün liflere aktarılmasını sağlamaktadır. Bir polimer türü olan epoksi reçineler, yüksek boyutsal kararlılıkları, kolay imal edilebilmeleri, lifleri iyi ıslatma ve yapışma özellikleri sayesinde kompozitlerde yoğun bir şekilde tercih edilmektedir [3, 4]. Karbon elyaf sahip olduğu yüksek mukavemet, aşınma ve korozyon direnci gibi özellikler sayesinde, otomotiv, denizcilik ve uçak sanayi gibi çok farklı mühendislik alanlarında kullanılan malzemeler arasındadır [5]. Elyaf takviyeli kompozitlerin sertlik, mekanik özellik, işlenebilirlik ve aşınma gibi özelliklerinin iyileştirilmesi için

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: huseyin.gurbuz@batman.edu.tr (H. Gürbüz)
Geliş / Received: 21.10.2024 Kabul / Accepted: 20.11.2024 Yayınlanma / Published: 15.01.2025
doi: 10.28948/ngumuh.1571365

mikro ya da nano boyutlu dolgu parçacıkları yaygın başvurulan bir yöntemdir. Dolgu parçacıklarının ağırlıkça ya da hacimsel oranı, geometrik şekli, kimyasal ve fiziksel özelliği kompozitlerin özelliklerini farklı şekillerde etkileyebilmektedir. Yapılan bazı çalışmalarda SiO₂, Gr, TiO₂, Al₂O₃, B₄C gibi parçacıkların polimer matrisli kompozitlerin mekanik, termal, yorulma, aşınma, işlenebilirlik gibi özellikleri üzerine etkileri araştırılmıştır [6-10]. Farklı dolgu tipleri ve elyaf çeşitleriyle ilgili yapılan birçok çalışma mevcuttur. Ramesh ve Suresha [11], MoS₂ ve Al₂O₃ dolgululu karbon elyaf takviyeli kompozitlerde (KETK) Al₂O₃ dolgusunun kompozitlerin aşınma direncini MoS₂ dolgusundan daha fazla artırdığını belirlemişlerdir. Suresha vd. [12] Gr dolgusunun KETK'in aşınma kaybını düşürdüğünü, kayma mesafesi artışının ise aşınma hacmini artırdığını belirlemişlerdir. Cetkin vd. [8] aramid, mika ve B₄C dolgululu kompozitlerde aramid dolgusunun aşınma direncini daha fazla artırdığını gözlemlemişlerdir. Artan yükün dolgusuz ve dolgululu kompozitlerin aşınma kaybını artırdığını belirlemişlerdir. Suresha vd [13] Gr dolgu oranının KETK'lerde, kayma hızının, yükün ve kayma mesafesinin kompozitin tribolojik özellikleri üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Yüksek dolgu oranlarının kütle kaybını düşürdüğünü, yük artışının ise kütle kaybının artırdığını tespit etmişlerdir. Artan kayma mesafesi ile aşınma hacmi arasında doğrusal bir ilişki olduğunu belirlemişlerdir. Shalwan ve Yousif [14] %3 Gr ilavesinde epoksinin çekme mukavemetinin düştüğünü, sertliğini ise artırdığını, belirtmişlerdir. Arslan vd. [15] karbon elyaf polipropilen matrisli kompozitlere sisal ilavesinin sertliği ve çekme mukavemetini düşürdüğünü ve sürtünme katsayısını ise artırdığını belirlemişlerdir. Lin vd. [16] polietereterekon matrisli kompozitlerde karbon elyaf ilavesinin ve artan karbon takviye oranının, kompozitin çekme mukavemetini artırdığını belirlemişlerdir. Karbon elyaf dolgusunun ZrO₂ dolgusuna kıyasla çekme dayanımını daha fazla artırdığını belirlemişlerdir. Her iki dolgu çeşidinin de (karbon elyaf, ZrO₂) kompozitin aşınma oranını düşürdüğü belirlemişlerdir. Omrani vd. [17] artan elyaf içeriğinin, kompozitin eğilme ve aşınma direncini geliştirdiğini tespit etmişlerdir. Sürtünme katsayısı ve aşınma hacminin karbon elyaf oranı artışına bağlı olarak düştüğünü gözlemlemişlerdir. Hossain vd. [18] cam elyaf takviyeli kompozitlere farklı oranlarda nano karbon elyaf dolgusunun çekme ve eğme dayanımları üzerindeki etkisini araştırmışlardır. En iyi çekme ve eğme dayanımlarını % 0.2 nano karbon dolgu oranında elde etmişlerdir. %0.2 dolgu oranında eğilme ve çekme mukavemetlerinin sırasıyla %49 ve %43 geliştiğini tespit etmişlerdir. Gao vd. [19] kısa karbon elyaf, kısa cam elyaf, Gr ve SiO₂ dolgululu epoksi kompozitlerde dolgu tiplerinin ve oranlarının tribolojik özellikler üzerindeki etkisini incelemişlerdir. En yüksek sürtünme katsayısını dolgusuz epokside elde ederken, en düşük sürtünme kuvvetini ise Gr/SiO₂/kısa karbon dolgululu epoksidede elde etmişlerdir. Artan kayma hızında sürtünme katsayısının düştüğünü vurgulamışlardır. Karbon elyafın, cam elyaftan daha iyi bir aşınma performansı sergilediğini belirtmişlerdir.

KETK'lerin delinmesiyle ilgili çeşitli literatür çalışmaları bulunmaktadır [20-24]. Quan ve Zhong [20] matkap geometrisinin KETK'nin delinmesi üzerindeki etkisini araştırmıştır. Elde ettiği sonuçlarla matkap çapı arttığında delaminasyon değerinin arttığını, aynı zamanda ilerleme kuvveti ve torkun, delaminasyon üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu bulmuştur. Tamura vd. [21] KETK'nin değişken ilerleme oranları ile delinmesini artırmışlardır. Düşük ilerleme oranının ilerleme kuvveti ve delaminasyon üzerinde olumlu bir etkiye sahip olduğunu tespit etmişlerdir. Qiu vd. [22] KETK'nin delinmesi sırasında ilerleme ve kesme hızını etkisini araştırmışlardır. İlerleme ve kesme hızı arttığında ilerleme kuvvetlerinin arttığını tespit etmişlerdir. Hrechuk vd. [23] 3 farklı tip matkabın KETK'nin delinmesi üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Delme testleri sonucunda her üç matkap içinde delinen delik sayısının artmasıyla birlikte delaminasyon faktörünün, ilerleme kuvveti ve takım aşınmasının arttığını belirlemişlerdir. Durao vd. [24] kompozit malzemelerin delinmesinde farklı tip matkapların etkisini araştırmışlardır. İlerleme oranı arttığında ilerleme kuvvetinin arttığını aynı zamanda ilerleme kuvvetleri ile delaminasyon değerleri arasında doğru orantı olduğunu bulmuşlardır.

Bu çalışmanın amacı aynı oranda iki farklı dolgu tipi kullanarak üretilen KETK'lerin farklı işleme parametrelerinde, delme sırasında oluşan kuvvetleri ile delaminasyon oranının belirlenmesi ve mekanik özelliklerinin araştırılmasını amaçlamaktadır.

2 Materyal ve metod

2.1 Delaminasyon faktörü ve ilerleme kuvvetlerinin ölçümleri

Kompozit malzemelerin delinmesinde en çok karşılaşılan hasar tiplerinden biri de delaminasyondur. Delik delme operasyonu sonucu oluşan delaminasyonlar delik çıkışından ölçülmüştür. Delik çıkışında oluşan delaminasyon değerleri hesaplanmasında Denklem 1'deki denklem kullanılmıştır. Delik delme sonrası kompozitlerin delik çıkışlarına ait görüntüler yüksek çözünürlüğe sahip kamerayla çekildikten sonra ImageJ programında bir cetvel yardımıyla ölçeklendirilerek delaminasyonlar hesaplanmıştır.

$$F_d = \frac{D_{max}}{D_o} \quad (1)$$

Burada F_d, D_o ve D_{max} sırasıyla; delaminasyon faktörünü, delik çapını ve deliğin çevresindeki en büyük hasar çapını temsil etmektedir. Delik delme esnasında kompozit malzemelerde oluşan ilerleme yönündeki kuvvetler 9257B model Kistler marka Dinamometre ile ölçülmüştür.

2.2 CNC tezgâhi ve kesici takım

Delik delme deneyleri kuru kesme şartlarında Brother marka CNC dik işleme tezgahında gerçekleştirilmiştir. Deneylerde kullanılan matkaplar Karcan kesici takım firmasından K3DF serili kesici takımlar satın alınmıştır. Matkaplar PVD kaplamalı olup geometrik özellikleri matkap

çapı 4 mm, uç açısı 118°, helis açısı 30° ve boşluk açısı 11° dir. İşleme deneylerinde kullanılan kesme parametreleri **Tablo 1**'de verilmiştir. Kompozit malzemelerin delinmesinde kullanılan Karcan kesici takım firmasına ait matkap **Şekil 1**'de verilmiştir.

Tablo 1. Kesme parametreleri

Kesme hızı, Vc (m/dak)	Devir Sayısı, n (dev/dak)	İlerleme, f (mm/dev)
6.25	500	0.025
12.5	1000	0.05
25	2000	0.1
50	4000	0.2



Şekil 1. Deneylerde kullanılan matkap

2.3 Kompozitlerin üretimi

Dolgulu kompozitlerin üretiminde elyaf tipi olarak unidirectional karbon elyaf kumaş ve dolgu çeşidi olarak ise bor karbür (B₄C) ve grafit (Gr) kullanılmıştır. Karbon elyaf Karbomid firmasından, dolgu parçacıkları ise Ege nanotek firmasından temin edilmiştir. Kompozit malzemelerin üretiminde elle yatırma yöntemi uygulanmıştır. Arc marine firmasından temin edilen ARC 152 epoksi reçine ve sertleştiricisi, matris malzemesi olarak kullanılmıştır. Katalog bilgileri doğrultusunda epoksi/sertleştirici oranı 4:1 oranında uygulanmıştır. Hassas terazi kullanılarak dolgu parçacıkları, karbon elyaf ve reçine miktarları belirlenen parametrelere tartılarak hazırlanmıştır. Ağırlıkça %7.5 B₄C ve %7.5 Gr parçacıkları epoksi reçine içine katılarak homojen bir dağılım sağlanması için uzun süre karıştırılmış ve sonrasında epoksi içine sertleştirici ilave edilerek karbon elyaflara sürülmek üzere hazır hale getirilmiştir. 30 cm x 30 cm boyutlarında kesilen karbon elyafların her katmanına, hazırlanan epoksi/dolgu karışımı bir rulo yardımıyla sürülerek 13 katmanlı dolgusuz ve hibrit dolgulu plakalar üretilmiştir. **Şekil 2**'de kompozitlerin üretim aşamaları ve deneysel kısımları gösterilmiştir.



Şekil 2. Malzemelerin üretim ve deneysel aşamaları

Tablo 2'de karbon elyaf ve dolgu parçacıklarının fiziksel ve mekanik özellikleri verilmiştir.

Tablo 2. Karbon elyaf, B₄C ve Gr katalog bilgileri

	Karbon Elyaf	Gr	B ₄ C
Çekme Dayanımı	2500 MPa	Toz Boyutu 30 mikron	30 mikron
Elastite Modülü	230 GPa	Yoğunluk 2.09 - 2.23 g/cm ³	2.52 g/cm ³
Alansal Ağırlık	230 gr/m ²	Safılık %99.9	% 96
Kopma Uzaması	%1.4	Sertlik 0.25 GPa	27.4 - 34.3 GPa

2.4 Çekme ve eğilme testi

Eğme deneyleri, iş parçalarının kırılma ve eğme mekanizmalarının tespit edilmesinde uygulanan bir test yöntemidir. İki destek üstüne konulan dikdörtgen ya da daire kesitli malzemelerin orta noktasına iş parçası kırılana dek kuvvet uygulanarak yapılmıştır. Eğme testleri Shimadzu AG-IC marka cihazda ASTM D790 standartlarına göre 80 mm destek aralığı bırakılarak gerçekleştirilmiştir. Kompozitlerin mukavemetlerinin ölçülmesi amacıyla çekme testleri ASTM D638 standartlarına göre 250 kN kapasiteli universal Shimadzu AG-IC marka cihazda 1 mm/dak hızda yapılmıştır. Eğme numunesi ölçüleri 150 mm x 12.7 mm ve çekme numuneleri ölçüleri ise 250 mm x 25 mm'dir. Hibrit dolgulu ve dolgusuz kompozitlerin eğme ve çekme dayanımları 3 kez tekrarlanarak elde edilen değerlerin ortalaması alınarak hesaplanmıştır.

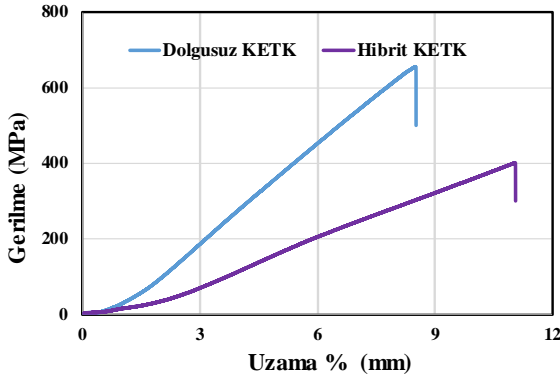
3 Bulgular ve tartışma

3.1 Çekme ve eğme test sonuçları

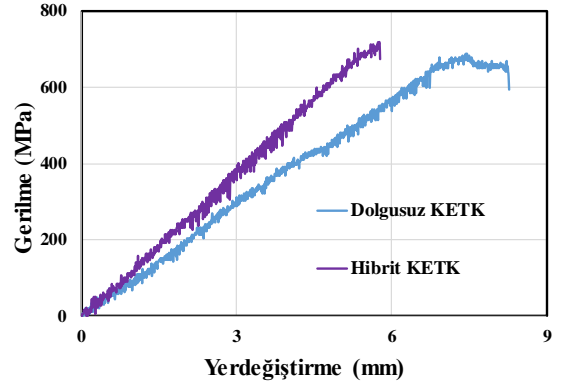
Çekme testi kompozit malzemelerin mekanik özelliklerin belirlenmesinde en yaygın kullanılan test metodlarından biridir. Çekme cihazından bilgisayar yardımıyla alınan veriler sayesinde numunelerin gerilme - birim şekil değiştirme değerleri belirlenmiştir. Dolgusuz ve hibrit dolgulu kompozitlerin gerilme - % uzama grafiği **Şekil 3**'te verilmiştir. **Şekil 3**'teki gerilme - % uzama grafiği incelendiğinde B₄C ve Gr dolgu ilavesinin KETK'in çekme mukavemetini azalttığı anlaşılmaktadır. Dolgusuz ve B₄C/Gr dolgulu hibrit kompozitin çekme mukavemetleri sırasıyla 655 MPa ve 401 MPa olarak elde edilmiştir. Dolguların elyaf takviyeli kompozitin çekme dayanımına olumsuz etki yapmasının sebebi artan dolgu ilavesinin matris içinde belirli alanlara yığılması, homojen dağılmaması, parçacıkların matris içinde gerilme yığılma bölgeleri oluşturmasından kaynaklanmaktadır. Ozsoy vd. [25] elyaf takviyeli kompozitlerde dolguların mekanik özellikleri düşürmesinin nedenini, epoksi-dolgu-elyaf arasındaki zayıf bağlanma ve dolgu parçacıklarının homojen dağılmamasına atfetmişlerdir. Raju vd. [26] ise %10 dolgu ilavesinin elyaf takviyeli kompozitin çekme dayanımını iyileştirdiğini, bunun nedeninin ise ilave edilen partiküllerin hem homojen dağılması hemde elyaf yüzeyi ile etkileşime girerek hidrojen bağlarını güçlendirmesi olduğunu bildirmişlerdir.

Dolgulu elyaf takviyeli epoksi matrisli kompozitlerde dolgu ile matris arasında yüzey bağlarının/yapışmalarının ve

uniform dolgu dağılımının, partikül takviyeli kompozitlerin mekanik özellikleri üzerindeki etkisi büyüktür. Matris ve elyaf arasındaki kuvvetli yüzey bağı, daha yüksek eğilme dayanımlarının elde edilmesini sağlamaktadır. Dolgusuz ve B₄C/Gr hibrit dolgulu kompozitlerin eğilme test sonuçları Şekil 4'te gösterilmiştir. Dolgu ilavesi KETK'in eğilme dayanımının 689 MPa'dan 719 MPa'a yükselmesini sağlamıştır. Dolgu malzemeleri eğilme yükleri altında kompozitlerin yük taşıma kapasitesinin artmasını sağlamaktadır. Bu dolgular, çekme yüklemelerinde çatlak açılma mekanizmalarının aksine basma yükleri altında çatlakları kapatma işlevi görmektedir [27, 28]. Dolgu parçacıklarının gerilim oluşturmaktan ziyade, oluşan gerilimi elyaflara aktarma işlevi görmesi eğilme dayanımının artışı açıklamaktadır [28, 29]. Belirli bir dolgu oranının üstüne çıkılması durumunda eğilme dayanımının olumsuz etkileneceği yapılan önceki çalışmalarda ortaya konmuştur [25, 30, 31].



Şekil 3. Dolgusuz ve Gr/B4C dolgulu kompozitlerin gerilme % uzama grafiği

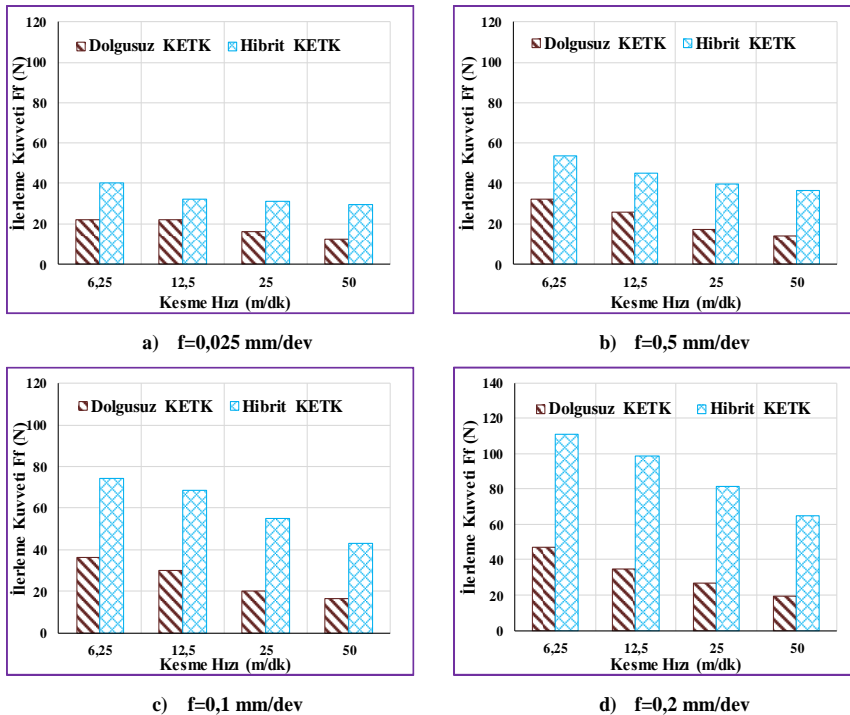


Şekil 4. Dolgusuz ve Gr/B₄C dolgulu kompozitlerin eğilme dayanımı grafiği

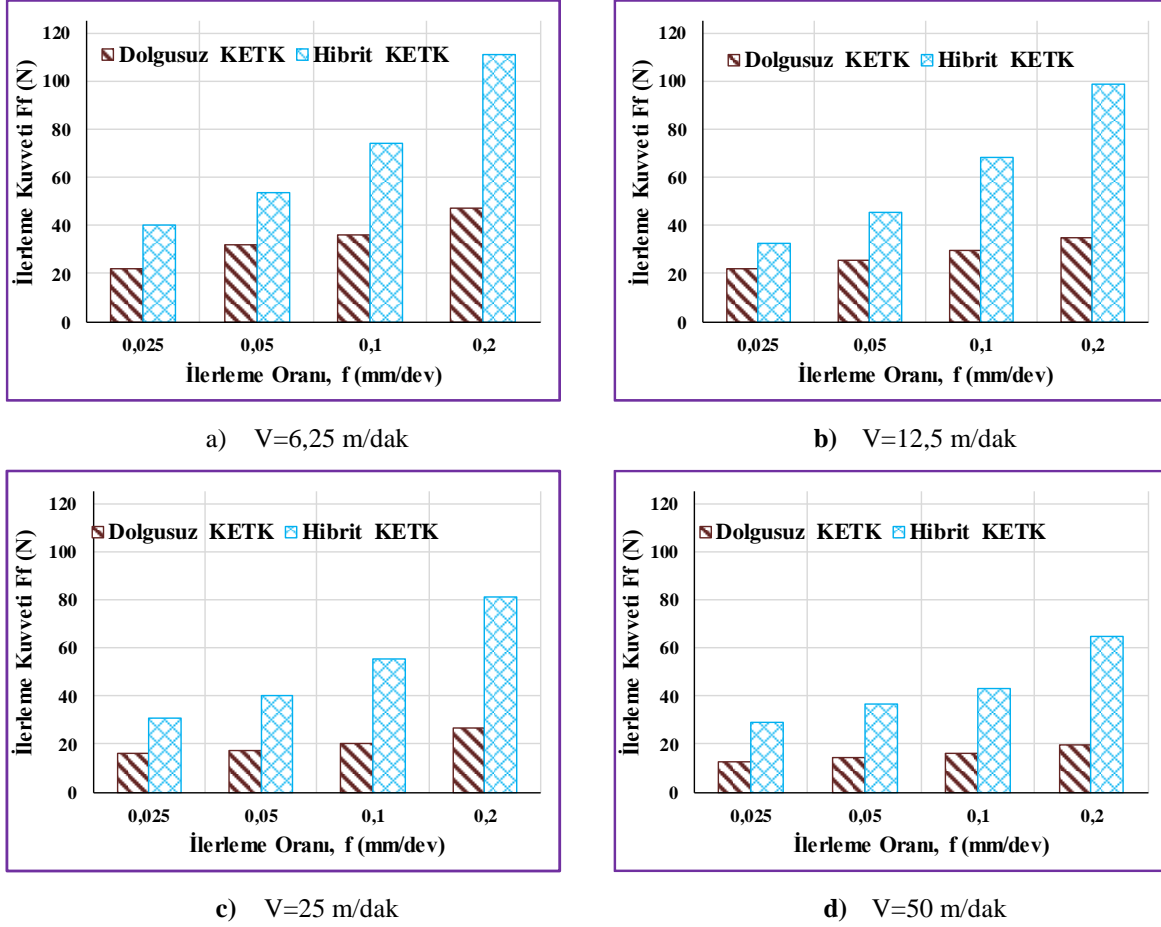
3.2 İlerleme kuvvetlerinin değerlendirilmesi

Dolgusuz ve hibrit KETK'lerin dört farklı ilerleme ve dört farklı kesme hızında delinmesi esnasında kesici takımdan elde edilen ilerleme kuvvetleri değişimleri Şekil 5 ve Şekil 6'da grafiksel olarak gösterilmiştir. Şekil 5'teki grafiklere bakıldığında, ilerleme oranının artmasına paralel olarak ilerleme kuvvetlerinde bir artış olduğu görülmüştür.

Benzer sonuçları Durao vd. [32] çalışmalarında ortaya koymuşlardır. Quan vd. [33] ilerleme oranının artması ile ilerleme kuvvetlerinin arttığını ifade etmişlerdir. İlerleme kuvvetindeki bu artışın sebebi delik delme esnasında kesici takıma gelen birim zamandaki talaş yükünün artması ile açıklanabilir. Artan talaş miktarı kesici takımın daha fazla zorlanmasına ve bundan dolayı ilerleme kuvvetinin artmasına sebep olmaktadır. Tamura vd. [34] çalışmalarında düşük ilerleme oranlarının ilerleme kuvveti üzerinde olumlu bir etkiye sahip olduğunu belirtmişlerdir.



Şekil 5. Dolgusuz ve hibrit KETK'lerin farklı ilerleme oranlarında elde edilen ilerleme kuvvetleri değerleri



Şekil 6. Dolgusuz ve hibrit KETK'lerin farklı kesme hızlarında elde edilen ilerleme kuvvetleri değerleri

Bu çalışmada da düşük ilerleme oranları ilerleme kuvveti üzerinde olumlu etkiye sahip olmuştur. Kesme hızının artışına bağlı olarak dolgusuz ve hibrit KETK'lerin ilerleme kuvvetleri değişimine bakıldığında, artan kesme hızının dolgusuz ve hibrit kompozitlerde ilerleme kuvvetlerini düşürdüğü anlaşılmaktadır [35, 36]. Artan kesme hızı ile delinen kompozitlerin işlenmiş yüzeylerinde sıcaklık artışı meydana gelmekte ve bu durumda kompozitlerin daha kolay bir şekilde işlenmesini sağlamaktadır. Dolgusuz ve hibrit kompozitlerin ilerleme kuvvetleri karşılaştırıldığında, hibrit kompozitlerin ilerleme kuvveti değerlerinin dolgusuz kompozitlerden daha yüksek çıktığı Şekil 5 ve Şekil 6'da görülmektedir. Hibrit kompozitlerde yüksek ilerleme kuvvetlerinin nedeni kompozit yapıda bulunan sert parçacıklara atfedilebilir.

3.3 Delaminasyon ölçümlerinin değerlendirilmesi

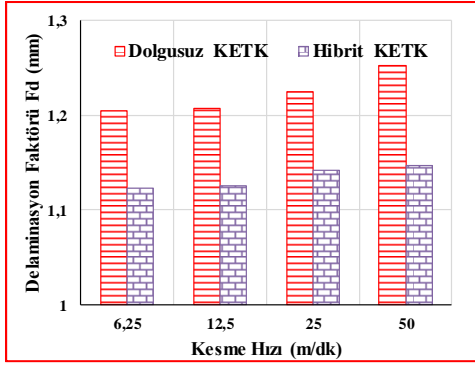
Hibrit ve dolgusuz KETK'lerin dört farklı kesme hızı ve dört farklı ilerleme hızlarında delinmesi sonucunda deliklerin çıkışında meydana gelen delaminasyonlar ölçülmüş olup, Şekil 7 ve Şekil 8'de grafiksel olarak verilmiştir.

Grafiklere bakıldığında, dolgusuz KETKlerin delaminasyon değerleri hibrit KETK'lerinkinden daha yüksek olduğu anlaşılmıştır. Kesme hızının artışı dolgusuz ve hibrit KETKlerin delaminasyon değerlerini arttırmıştır. Ortaya çıkan bu durum literatür ile paralellik arz etmektedir [37]. Kesme hızının artışına paralel olarak delik çevresindeki

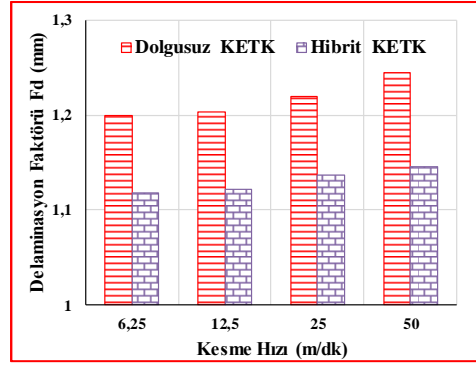
sıcaklık artmakta ve bu durumda deliğin çevresinde delaminasyon değerlerinin artmasına sebep olduğu düşünülmektedir. Kesme hızının artması ile işlenen kompozitin delik çevresinde sıcaklık artışı olmakta ve bu da kompozitin yapısını bozarak delaminasyon değerlerinin artmasına sebep olmaktadır.

Abroa vd. [38] yapmış oldukları çalışmada yüksek kesme hızlarının kesme bölgesindeki sıcaklık artışından dolayı bu bölgede delinmiş deliğin alanında daha fazla hasara uğradığını ifade etmişlerdir. İlerleme oranının artışı ise dolgusuz ve hibrit KETKlerin delaminasyon değerlerinde düşüşe sebep olmuştur. Qiu vd. [39] yapmış oldukları çalışmada benzer sonuç bulmuşlardır. Bu durum düşük ilerleme hızlarında kesme anında birim zamanda alması gerek yol daha düşük olduğu için kesici takım birim zamanda daha az malzeme kesmekte ve bu durumda kompozitin fiberlerine zarar vermektedir. Fakat Tamura vd. [34] yapmış oldukları çalışmada ilerleme oranının artması ile delik çevresindeki delaminasyonun arttığını ifade etmişlerdir.

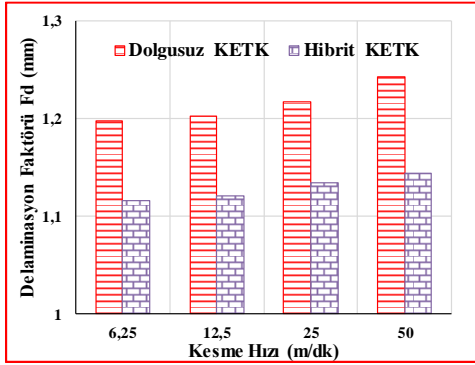
Dolgusuz ve hibrit KETK'lerin farklı işleme koşullarında delik delinmesi sonucunda delik çevresinde meydana gelen delaminasyonların görüntüsü Şekil 9'da verilmiştir. Dolgusuz ve hibrit KETK'lerin Şekil 9'daki görüntüleri karşılaştırıldığında, dolgusuz kompozitlerin delik çevresinde meydana gelen deformasyonların hibrit kompozitlere kıyasla daha yüksek çıktığı görülmüştür.



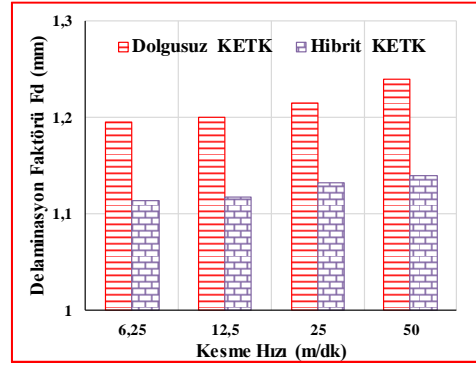
a) $f=0,025$ mm/dev



b) $f=0,5$ mm/dev

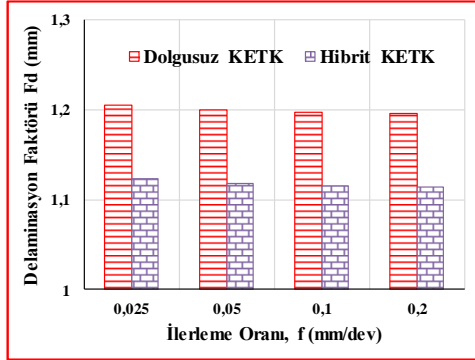


c) $f=0,1$ mm/dev

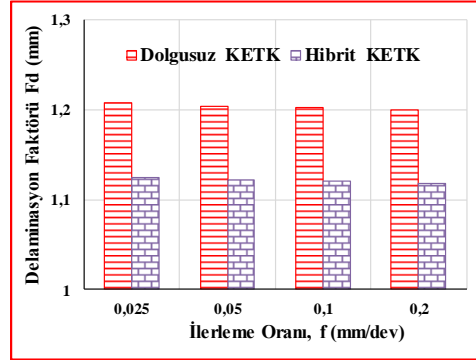


d) $f=0,2$ mm/dev

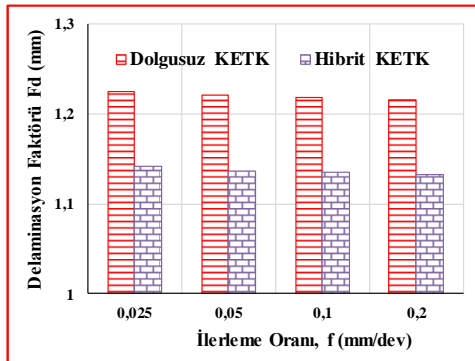
Şekil 7. Dolgusuz ve hibrit KETK'lerin farklı ilerleme oranlarında ölçülen delaminasyon değerleri



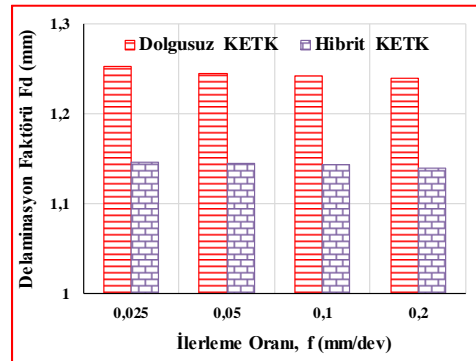
a) $V=6,25$ m/dak



b) $V=12,5$ m/dak

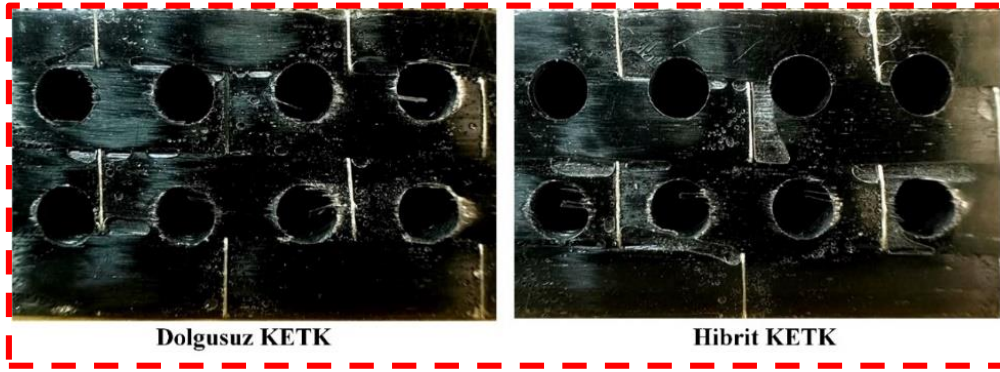


c) $V=25$ m/dak



d) $V=50$ m/dak

Şekil 8. Dolgusuz ve hibrit KETK'lerin farklı kesme hızlarında ölçülen delaminasyon değerleri



Şekil 9. Dolgunsuz ve hibrit KETK'lerin delik delme sonrası delaminasyon görüntüleri

4 Sonuçlar

İki farklı dolgu tipi (B_4C ve Gr) kullanılarak üretilen hibrit KETK'lerin mekanik ve delik delme özellikleri dolgunsuz kompozitle kıyaslanmış ve önemli sonuçlar aşağıda sıralanmıştır.

- B_4C /Gr dolgulu hibrit kompozitlerin çekme dayanımı dolgunsuz KETK'ten daha düşük çıkmıştır. Dolgu parçacıkları çekme dayanımını olumsuz etkilemiştir.
- Eğme dayanımında ise dolgulu hibrit kompozit, dolgunsuz kompozitten daha yüksek bir dayanıma sahiptir. B_4C /Gr dolguları eğme dayanımı artışına katkı sunmuştur.
- Dolgunsuz ve hibrit KETK'lerin işleme parametrelerinde delinmesinde, ilerleme oranının artması ile ilerleme kuvvetlerinin arttığı, kesme hızının artmasıyla ise ilerleme kuvvetini düşürdüğü görülmüştür.
- Hibrit kompozitlerin ilerleme kuvvetleri dolgunsuz kompozitlerden yüksek çıkmıştır.
- İlerleme oranının artması delaminasyon faktörünün azalmasını sağlarken, kesme hızının artması ise delaminasyon faktörünü arttırmıştır.
- Dolgunsuz kompozitlerin delik çevresinde meydana gelen delaminasyon, hibrit kompozitlerden daha fazla olmuştur.

Teşekkür

Yazarlar, bu deneysel çalışmanın gerçekleştirilmesinde her türlü katkı ve desteklerini sağlayan Batman Üniversitesi BAP birimine (BTÜBAP-2021-YL-020 no'lu proje) teşekkür eder.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %12

Kaynaklar

[1] J. X. Chan, J. F. Wong, M. Petru, A. Hassan, U. Nirmal, N. Othman and R. A. Ilyas, Effect of nanofillers on tribological properties of polymer nanocomposites: A review on recent development. *Polymers*, 13 (17), 2867, 2021. <https://doi.org/10.3390/polym13172867>.

- [2] S. Basavarajappa, A. G. Joshi, K. Arun, A. P. Kumar and M. P. Kumar, Three-body abrasive wear behaviour of polymer matrix composites filled with SiC particles. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 49 (1), 8-12, 2009. <https://doi.org/10.1080/03602550903206407>.
- [3] G. Divya, and B. Suresha, Role of metallic nanofillers on mechanical and tribological behaviour of carbon fabric reinforced epoxy composites. *Materials Sciences and Applications*, 9 (9), 740-750, 2018. <https://doi.org/10.4236/msa.2018.99054>.
- [4] H. Rajashekaraiyah, S. Mohan, P. K. Pallathadka, and S. Bhimappa, Dynamic mechanical analysis and three-body abrasive wear behaviour of thermoplastic copolyester elastomer composites. *Advances in Tribology*, 2014 (1), 210187, 2014. <https://doi.org/10.1155/2014/210187>.
- [5] S. Shahabaz, P. Mehrotra, H. Kalita, S. Sharma, N. Naik, D. J. Noronha, and N. Shetty, Effect of Al_2O_3 and SiC nano-fillers on the mechanical properties of carbon fiber-reinforced epoxy hybrid composites. *Journal of Composites Science*, 7 (4), 133, 2023. <https://doi.org/10.3390/jcs7040133>.
- [6] D. Bazgari, F. Moztaarzadeh, A. Sabbagh-Alvani, M. Rasoulboroujeni, M. Tahriri, and L. Tayebi, Mechanical properties and tribological performance of epoxy/ Al_2O_3 nanocomposite. *Ceramics International*, 44 (1), 1220-1224, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.10.068>.
- [7] A. Nabhan, M. Taha, and N. M. Ghazaly, Filler loading effect of Al_2O_3/TiO_2 nanoparticles on physical and mechanical characteristics of dental base composite (PMMA). *Polymer Testing*, 117, 107848, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2022.107848>.
- [8] E. Çetkin, M. E. Demir, and R. K. Ergün, The effect of different fillers, loads, and sliding distance on adhesive wear in woven e-glass fabric composites. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, 237 (2), 418-429, 2023. <https://doi.org/10.1177/09544089221136808>.
- [9] C. Kanchanomai, N. Noraphaipaksa, and Y. Mutoh, Wear characteristic of epoxy resin filled with crushed-silica particles, *Composites Part B: Engineering*, 42

- (6), 1446-1452, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2011.04.046>.
- [10] T. Raja, and Y. Devarajan, Investigation on boron carbide nanofiller-influenced epoxy polymer composite for thermal barrier applications. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 14, 12623, 2023. <https://doi.org/10.1007/s13399-023-04334-2>.
- [11] B. Ramesh, and B. Suresha, Optimization of tribological parameters in abrasive wear mode of carbon-epoxy hybrid composites. *Materials & Design*, 59, 38-49, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.02.023>.
- [12] B. Suresha, B. Ramesh, K. Subbaya, B. R. Kumar, and G. Chandramohan, Influence of graphite filler on two-body abrasive wear behaviour of carbon fabric reinforced epoxy composites. *Materials & Design*, 31 (4), 1833-1841, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.11.006>.
- [13] B. Suresha, S. Seetharamu, and P. S. Kumaran, Investigations on the influence of graphite filler on dry sliding wear and abrasive wear behaviour of carbon fabric reinforced epoxy composites. *Wear*, 267 (9-10), 1405-1414, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2009.01.026>.
- [14] A. Shalwan, and B. Yousif, Influence of date palm fibre and graphite filler on mechanical and wear characteristics of epoxy composites. *Materials & Design*, 59, 264-273, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.02.066>.
- [15] M. Aslan, M. Tufan, and T. Küçükömeroğlu, Tribological and mechanical performance of sisal-filled waste carbon and glass fibre hybrid composites. *Composites Part B: Engineering*, 140, 241-249, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.12.039>.
- [16] G. M. Lin, G. Y. Xie, G. X. Sui, and R. Yang, Hybrid effect of nanoparticles with carbon fibers on the mechanical and wear properties of polymer composites. *Composites Part B: Engineering*, 43 (1), 44-49, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2011.04.029>.
- [17] E. Omrani, B. Barari, A. D. Moghadam, P. K. Rohatgi, and K. M. Pillai, Mechanical and tribological properties of self-lubricating bio-based carbon-fabric epoxy composites made using liquid composite molding. *Tribology International*, 92, 222-232, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2015.06.007>.
- [18] M. K. Hossain, M. E. Hossain, M. Hosur, and S. Jeelani, Flexural and compression response of woven E-glass/polyester-CNF nanophased composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 42 (11), 1774-1782, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2011.07.033>.
- [19] C. Gao, G. Guo, F. Zhao, T. Wang, B. Jim, B. Wetzel, G. Zhang, and Q. Wang, Tribological behaviors of epoxy composites under water lubrication conditions. *Tribology International*, 95, 333-341, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2015.11.041>.
- [20] Y. Quan, W. Zhong, Investigation on drilling-grinding of CFRP. *Frontiers of Mechanical Engineering in China*, 4, 60-63, 2009. <https://doi.org/10.1007/s11465-009-0008-y>.
- [21] S. Tamura, T. Matsumura, Delamination-free drilling of carbon fiber reinforced plastic with variable feed rate. *Precision Engineering*, 70, 70-76, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2021.01.003>.
- [22] X. Qiu, P. Li, C. Li, Q. Niu, A. Chen, P. Ouyang, T.J. Ko, Study on chisel edge drilling behavior and step drill structure on delamination in drilling CFRP. *Composite Structures*, 203, 404-413, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.07.007>.
- [23] A. Hrechuk, V. Bushlya, R. M'Saoubi, J.E. Ståhl, Experimental investigations into tool wear of drilling CFRP. *Procedia Manufacturing*, 25, 294-301, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.06.086>.
- [24] L.M.P. Durão, D.J. Gonçalves, J.M.R. Tavares, V.H.C. de Albuquerque, A.A. Vieira, A.T. Marques, Drilling tool geometry evaluation for reinforced composite laminates. *Composite structures*, 92 (7), 1545-1550, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2009.10.035>.
- [25] I. Ozsoy, A. Demirkol, A. Mimaroglu, H. Unal, and Z. Demir, The influence of micro-and nano-filler content on the mechanical properties of epoxy composites. *Strojnicki Vestnik/Journal of Mechanical Engineering*, 61 (10) ,601-609, 2015. <https://doi.org/10.5545/sv-jme.2015.2632>.
- [26] B. R. Raju, B. Suresha, R. P. Swamy, and B. S. G. Kanthraju, Investigations on mechanical and tribological behaviour of particulate filled glass fabric reinforced epoxy composites. *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, 1, 160-167, 2013. <https://doi.org/10.4236/jmmce.2013.14027>.
- [27] A. Patnaik, and A. D. Bhatt, Mechanical and dry sliding wear characterization of epoxy-TiO₂ particulate filled functionally graded composites materials using Taguchi design of experiment. *Materials & Design*, 32 (2), 615-627, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.08.011>.
- [28] P. O. Hagstrand, F. Bonjour, and J. A. Manson, The influence of void content on the structural flexural performance of unidirectional glass fibre reinforced polypropylene composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 36 (5), 705-714, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2004.03.007>.
- [29] B. Hulugappa, M. V. Achutha, and B. Suresha, Effect of fillers on mechanical properties and fracture toughness of glass fabric reinforced epoxy composites. *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, 4 (1), 1-14, 2016. <https://doi.org/10.4236/jmmce.2016.41001>.
- [30] Bhatia, S. Angra, and S. Khan, A review on mechanical and tribological characterization of boron carbide reinforced epoxy composite. *Advanced Composite Materials*, 30 (4), 307-337, 2021. <https://doi.org/10.1080/09243046.2020.1759482>.
- [31] Rodrigues, and J. Broughton, Silane surface modification of boron carbide in epoxy composites.

- International Journal of Adhesion and Adhesives, 46, 62-73, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.jadhadh.2013.05.014>.
- [32] L. M. P. Durão, D. J. Gonçalves, J. M. R. Tavares, V. H. C. de Albuquerque, A. A. Vieira, and A. T. Marques, Drilling tool geometry evaluation for reinforced composite laminates. *Composite structures*, 92 (7), 1545-1550, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2009.10.035>.
- [33] Y. Quan, and W. Zhong, Investigation on drilling-grinding of CFRP. *Frontiers of Mechanical Engineering in China*, 4, 60-63, 2009. <https://doi.org/10.1007/s11465-009-0008-y>.
- [34] S. Tamura, and T. Matsumura, Delamination-free drilling of carbon fiber reinforced plastic with variable feed rate. *Precision Engineering*, 70, 70-76, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2021.01.003>.
- [35] X. Qiu, P. Li, C. Li, Q. Niu, A. Chen, P. Ouyang, T. J. Ko, Study on chisel edge drilling behavior and step drill structure on delamination in drilling CFRP. *Composite Structures*, 203, 404-413, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.07.007>.
- [36] V. Krishnaraj, A. Prabukarthi, A. Ramanathan, N. Elanghovan, M. S. Kumar, R. Zitoune, and J. Davim, Optimization of machining parameters at high speed drilling of carbon fiber reinforced plastic (CFRP) laminates. *Composites Part B: Engineering*, 43 (4), 1791-1799, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.01.007>.
- [37] J. P. Davim, J. C. Rubio, and A. Abrao, A novel approach based on digital image analysis to evaluate the delamination factor after drilling composite laminates. *Composites Science and Technology*, 67 (9), 1939-1945, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2006.10.009>.
- [38] A. Abrao, P. Faria, J. C. Rubio, P. Reis, and J. P. Davim, Drilling of fiber reinforced plastics: A review. *Journal of Materials Processing Technology*, 186 (1-3), 1-7, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.11.146>.
- [39] X. Qiu, P. Li, Q. Niu, A. Chen, P. Ouyang, C. Li, and T. J. Ko, Influence of machining parameters and tool structure on cutting force and hole wall damage in drilling CFRP with stepped drills. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 97, 857-865, 2018. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-1981-2>.

