





Dolgunuz ve GR/B₄C Dolgulu Hibrit Kompozitlerin Mekanik Özelliklerinin ve İşlenebilirliğinin İncelenmesi

Hüseyin GÜRBÜZ¹, Mehmet Emin DEMİR², Şehmus BADAY², İbrahim Halil AKCAN³

¹Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Batman Üniversitesi, Batman, Türkiye

²Beşiri Organize Sanayi MYO, Batman Üniversitesi, Batman, Türkiye

✉: huseyin.gurbuz@batman.edu.tr  ¹0000-0003-1391-172X  ²0000-0001-9630-6378  ³0000-0003-4208-8779
 ⁴0009-0007-8075-2323

Geliş (Received): 24.09.2024

Düzeltilme (Revision): 30.10.2024

Kabul (Accepted): 18.11.2024

ÖZ

Bu çalışmada B₄C ve Gr dolguları kullanılarak üretilen cam elyafli takviyeli kompozitlerin (CETK) çekme, eğme ve delik delme özellikleri incelenmiştir. %7,5 B₄C ve %7,5 Gr dolgulu hibrit kompozitlerde dolgu parçacıkları hem çekme hem eğme dayanımlarını düşürmüştür. Çekme numunelerinin kopmuş kesitlerinin SEM görüntüleri analiz edildiğinde dolgulu kompozitlerde matris boşluklarının daha fazla olduğu belirlenmiştir. Hibrit kompozitlerden elde edilen delaminasyon değerleri dolgunuz kompozitlerden daha düşük, ilerleme kuvvetleri ise dolgunuz kompozitlerden daha yüksek çıkmıştır. Kesme hızı arttıkça delaminasyon değerlerinin arttığı, ilerleme oranının artmasıyla delaminasyon değerlerinin düştüğü tespit edilmiştir. Elde edilen ilerleme kuvvetleri ilerleme oranının artmasıyla artmakta, kesme hızının artırılmasıyla ise azalmaktadır. Hibrit ve dolgunuz kompozitlerin titreşim ve moment değerlerinin yakın olduğu gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Delik delme, Dolgu, Elyaf takviyeli kompozit, Mekanik özellikler

Investigation of Mechanical Properties and Machinability of Unfilled and Gr/B₄C Filled Hybrid Composites

ABSTRACT

In this study, the tensile, flexural and drilling properties of unfilled and filled glass fiber reinforced composites (CETK) produced using B₄C and Gr fillers were investigated. In hybrid composites with 7.5% B₄C and 7.5% Gr fillers, filler particles reduced both tensile and flexural strengths. The SEM images of the fractured sections of the tensile specimens revealed that there are more matrix voids in the filled composites. The delamination values obtained from hybrid composites were lower than unfilled composites, and the thrust forces were higher. The delamination values obtained from hybrid composites were lower than unfilled composites, and the feed forces were higher than unfilled composites. It was determined that delamination values increased as the cutting speed increased, and delamination values decreased as the feed rate increased. It was revealed that the obtained thrust forces increased depending on the increase in the feed rate, and decreased depending on the increase in the cutting speed. It was observed that the vibration and moment values of hybrid and unfilled composites were close.

Keywords: Drilling, Fiber reinforced composite, Filler, Mechanical properties

GİRİŞ

Son yıllarda epoksi reçineler düşük maliyet, kimyasal tepkimeye ilgisizlik, yüksek korozyon direnci, kolay işlenebilirlik ve hidrofobik özellikleri sayesinde geleneksel parçaların yerine kullanılmaktadır [1-3]. Ancak epoksi reçinelerin dayanımlarının düşük olması ve termal özelliklerinin kötü olması bu malzemeleri dezavantajlı kılmaktadır. Epoksi reçinelerin uygun dolgu ve elyaflarla takviyelendirilmesi reçinenin, mekanik, aşınma ve işlenebilirliğini etkilemektedir. Kullanılan dolguların boyutu, şekli ve miktarları da elde edilecek olan kompozitin özelliklerini değiştirmektedir [2].

Birçok araştırmacı polimer kompozitlere farklı elyaf türleri ve dolgular ilave ederek bu kompozitlerin istenen özelliklerini geliştirmeyi hedeflenmişlerdir [4-9]. Grafit, B₄C, SiC, TiN, Al₂O₃ gibi farklı sert dolgu parçacıklarının epoksi reçineye ilave edilmesinin kompozitin mekanik ve aşınma özelliklerini iyileştirdiği yapılan çalışmalarda ortaya konmuştur [8,10-11]. Böylece epoksi matrisli kompozitlerin, silindirler, dişliler, tekerlekler ve aktarma kayışı gibi endüstriyel malzemelerin üretiminde kullanılması kolaylaşmaktadır [12,13]. Farklı dolgular kullanılarak üretilen kompozitlerin mekanik, tribolojik ve işlenebilirlik

özelliklerinin araştırıldığı birçok çalışma mevcuttur [14-16]. Suresha ve ark. [6] SiO₂ dolgusunun CETK'lerin çekme, eğme dayanımını ve sertliğini arttırdığını belirtmişlerdir. Ayrıca SiC dolgusunun aşınma direncini arttırdığı ve COF değerini düşürdüğünü belirlemişlerdir. Abenojar ve ark. [11] B₄C dolgusunun kompozitin sertliğini 75 Shore D değerinden 79 Shore D değerine çıkardığı, eğilme dayanımını ise 102 MPa'dan 113 MPa'ya yükselttiğini belirlemişlerdir. Manjunath ve ark. [17] %7 SiO₂, %3 nano Al₂O₃, ve %5 mikro-alümina trihidrat parçacık dolgulu cam elyafı kompozitlerin mekanik özelliklerini araştırmışlardır. Dolguların eğme, çekme ve darbe dayanımını arttırdığını gözlemlemişlerdir. Hariprasad ve ark. [18] B₄C ve SiO₂ dolgularının elyaf takviyeli hibrit kompozitin çekme, eğme ve darbe özelliklerine etkisini araştırmışlardır. %20 SiO₂ dolgulu kompozitin çekme, eğme ve darbe direncinin %15 SiO₂ ve %5 B₄C dolgulu kompozitten daha düşük olduğunu belirlemişlerdir. Suresha ve ark. [19] Gr dolgusunun kompozitin aşınma direncini geliştirdiğini belirlemişlerdir. Artan dolgu oranının kütle kaybını düşürdüğünü gözlemlemişlerdir. Hulugappa ve ark. [20] CETK'lere %5 Gr ilavesinin çekme dayanımını 305 MPa'dan 342 MPa'a yükselttiğini belirtmişlerdir. CETK'lere SiC dolgusunun Gr dolgusundan daha fazla mukavemet kazandırdığını belirlemişlerdir. CETK'lerin sahip oldukları özelliklerinden dolayı havacılık, otomotiv ve uzay gibi birçok alanda kullanılmaktadır [21,22]. Kompozit iş parçalarının birleştirilmesi ve montajında delik delme büyük bir önem arz etmektedir. Bu duruma en iyi örnek bir uçağın yapılmasıdır. Çünkü uçağın birçok aksamında kompozit malzemeler kullanılmakta ve yaklaşık olarak 55,000 deliğe ihtiyaç duyulmaktadır [23,24]. Bu yüzden kompozitlere uygulanan delik delme işleminde kullanılan kesme parametreleri ve işleme koşulları büyük bir önem arz etmektedir. Literatürde CETK ile ilgili yapılan çalışmalar aşağıda özetle verilmiştir [25-32]. Mohan ve ark. [25] kesme parametrelerin CETK'lerin delinmesinde oluşan ilerleme kuvveti ve tork üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Optimum işleme parametrelerini, tork ve ilerleme kuvveti için iş parçası kalınlığı 3 mm, ilerleme 50 mm/dk, kesme hızı 1500 dev/dk ve matkap çapı 3 mm olarak bulmuşlardır. Liu ve ark. [26] CETK'lerin delinmesinde delaminasyonu ve ilerleme kuvveti değerlerini araştırmışlardır. Buldukları sonuçlara bağlı olarak uygun geometrik açılar oluştuğunda delaminasyon ve ilerleme kuvveti değerlerinin düştüğünü tespit etmişlerdir. Natarajan ve ark. [27] CETK'lerin delinmesinde farklı matkap uç açılarının delaminasyon ve ilerleme kuvvetleri üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Elde ettikleri sonuçlar ışığında matkap uç açısının artması ilerleme kuvvetlerini azaldığını bulmuşlardır. Azalan ilerleme kuvvetleri delaminasyon değerlerinin düşmesine ve takım aşınmasının azalmasına katkı bulunduğunu ve bu da yüzey kalitesinin arttırdığını tespit etmişlerdir. Tian ve ark. [28] CETK'lerin delinmesi sonucu oluşan ilerleme kuvvetlerini ve delaminasyon değerlerini incelemişlerdir. Kesme hızı arttıkça delaminasyon miktarının arttığını ve ilerleme

kuvvetinin azaldığını bulmuşlardır. Ayrıca yazarlar, ilerleme miktarı arttığında ilerleme kuvvetinin arttığını ve delaminasyon miktarının azaldığını tespit etmişlerdir. Khashaba ve ark. [29] farklı kalınlıklarda ürettikleri CETK'lerin delinmesinde esnasında elde ettikleri ilerleme kuvvetlerini, delaminasyon ve ısıdan etkilenmiş bölgeyi incelemişler. Elde ettikleri sonuçlardan delaminasyon değerleri üzerinde kesme sıcaklığı ve ilerleme kuvvetlerinin önemli bir etkiye sahip olduğunu bulmuşlardır. Kompozitlerin kalınlıkları arttıkça ısıdan etkilenmiş bölgenin arttığını ve delme zamanı arttıkça ilerleme kuvvetlerinin arttığını tespit etmişlerdir. Erturk ve ark. [30] CETK'lerin delinmesinde kesme sıcaklığı üzerinde işleme parametrelerini etkisini araştırmışlardır. Kesme sıcaklığı üzerinde kesme hızı ve ilerlemeden çok HSS-R matkabın önemli bir etkiye sahip olduğunu tespit etmişlerdir. Jessy ve ark. [31] CETK'lerin delinmesinde farklı soğutma metotların matkap sıcaklığı üzerinde etkisini araştırmışlardır. İçten soğutma metodunun diğer metotlara göre takım aşınması ve matkap sıcaklığı üzerinde ciddi katkıları olduğunu ortaya koymuşlardır. Khashaba ve ark. [32] CETK'lerin delme analizini yapmışlardır. Yazarlar, ilerleme oranlarının artmasıyla matkapta oluşan aşınmanın arttığını ve delaminasyon miktarı üzerinde yüksek ilerleme ve kesme hızının etkili olduğunu bulmuşlardır.

Bu çalışmanın temel amacı farklı iki dolgu kullanarak üretilen hibrit ve dolgusuz CETK'lerin mekanik ve delik delme performansının incelenmesidir. Hibrit dolgulu kompozitlerin işlenebilirliği ve mekanik özellikleri hakkında kısıtlı bilimsel çalışma olması bu konunun irdelenmesinin temel motivasyonudur. Delik delme işlemi, CFRP kompozitlerde önemli bir rol oynar. Çünkü yanlış delinmiş bir delik, delik kalitesini, boyutsal hassasiyetini, boyut doğruluğunu ve kompozit parçanın montajını olumsuz etkileyecektir. Bundan ötürü eklenecek dolguların elyaf takviyeli kompozitlerdeki delik delme performansını nasıl etkileyeceğinin belirlenmesi bu çalışmayı literatürden farklı kılmaktadır.

MATERYAL ve YÖNTEM

Kompozit iş parçalarının üretilmesi

Epoksi malzeme olarak düşük viskoziteye sahip, otomotiv ve gemi endüstrisinde yaygın bir şekilde faydalanılan ARC 152 reçine ve sertleştirici kullanılmıştır. B₄C ve Gr tozları Ege nanotek, Plain dokuma tip cam elyaf ise karbomid firmasından temin edilmiştir. Cam elyaf 220 gr/m² ağırlığında, 1300 MPa çekme dayanıma, 65 GPa elastisite modülüne ve % 2,50 kopma uzamasına sahiptir. Kompozitler el yatırma yöntemi ile üretilmiştir. Kompozit malzemelerin üretiminde epoksi/sertleştirici oranı ürün kataloğunda belirtildiği üzere 4:1 olarak kullanılmıştır. Kullanılan B₄C dolgusu, 2,52 g/cm² yoğunluğa ve 30 mikron parçacık boyutuna ve %96 saflığa sahiptir. Gr dolgusu ise 2,09 g/cm³ yoğunluk ve 30 mikron boyutunda ve %99 saflıktadır. Kompozitlerdeki cam elyaf ve matris/dolgu oranı %50/%50 olarak belirlenmiştir. Ağırlıkça %7,5

B₄C ve %7,5 Gr dolgu parçacıkları hassas terazide tartılarak aynı anda reçineye ilave edilmiştir. Dolgu parçacıkları matris içine ilave edildikten sonra homojen dağılması için 15 dakika karıştırılmıştır. Dokuma kumaşlar 300 mm x 300 mm boyutlarında kesilerek, her kumaş katmanına hazırlanan dolgu, matris ve sertleştirici karışımı rulo yardımıyla sürülerek 13 katmanlı plakalar üretilmiştir. Kompozitler oda sıcaklığında 24 saat boyunca kürleşmeye bırakılmıştır. Elde edilen plakalar 4±0,05 mm kalınlığa sahiptir. Çekme, eğme ve delik delme işlemleri için plakalardan ASTM standartlarına uygun numuneler kesilmiştir.

Çekme ve eğilme testi

Kompozitlerin mukavemetlerinin ölçülmesi amacıyla çekme testleri 250 kN kapasiteli universal *Shimadzu AG-IC* marka cihazda 1 mm/dak hızda ASTM D638 standartlarına göre yapılmıştır. Çekme numuneleri ölçüleri 250 mmx 25 mm ve eğme numunesi ölçüleri ise 150 mm x 12,7 mm'dir. Eğme deneyleri, malzemelerin eğme ve kırılma mekanizmalarının belirlenmesinde kullanılan bir test yöntemidir [33]. İki destek üstüne konulan daire ya da dikdörtgen kesitli malzemelerin orta noktasına malzeme kırılana dek kuvvet uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Eğme testleri ASTM D790 standartlarına göre Shimadzu AG-IC marka cihazda 80 mm destek aralığı bırakılarak gerçekleştirilmiştir. Dolgusuz ve hibrit dolgulu kompozitlerin çekme ve eğme dayanımlarını test etmek için 3 kez deney tekrarı yapıldıktan sonra elde edilen değerlerin ortalaması alınmıştır.

Kesici takımlar ve tezgâh

Delik delme deneyleri kuru işleme şartlarında CNC dik işleme tezgâhında dört devir sayısı (500 -1000 - 2000 - 4000 dev/dak), dört ilerleme (0,025 - 0,05 - 0,1 - 0,2 mm/dev) ve dört kesme hızında (6,25 - 12,5- 25- 50 m/dak) gerçekleştirilmiştir. 4 mm kalınlığında 25 mm x 130 mm boyutlarında kompozit numunelerin boydan boya delik delme işlemleri için kaplamalı karbür matkaplar kullanılmıştır. Matkaplar *KARCAN* kesici takım firmasından temin edilmiştir. Delme deneylerinde kullanılan matkaplar PVD kaplamalı, kaplama kalınlığı 1,78µm, kaplama bileşimi (AlTiN), kaplama katman sayısı 4, helis açısı 30°, uç açısı 118° ve boşluk açısı 11° dir.

Delaminasyon faktörü ve SEM ölçümleri

Delaminasyon, kompozit malzemelerin delik delme operasyonları sonrası ölçülen en önemli ölçümlerinden bir tanesidir. Delaminasyon değerleri, delik çıkışından ölçülmüş olup Eşitlik 1'deki denklemden yararlanılarak hesaplanmıştır.

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

Burada D_o ; delik çapı, F_d ; delaminasyon faktörü ile D_{max} ; deliğin çevresindeki en büyük hasar çapını ifade edilmektedir. *Quanta 650 Field Emission* markalı Taramalı Elektron Mikroskop (SEM) cihazı, çekme sonrası kopma yüzeylerin görüntüleri için kullanılmıştır.

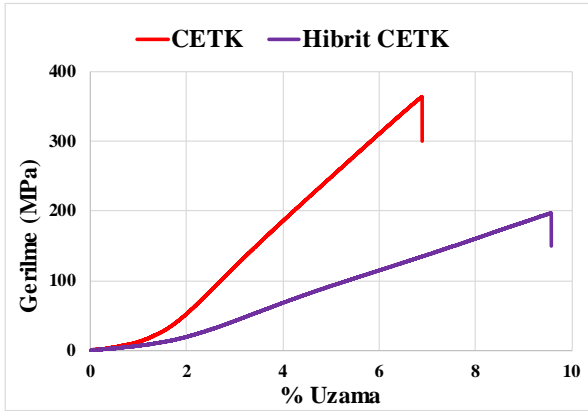
İlerleme kuvveti, titreşim ve moment

Delik delme işlemleri esnasında oluşan ilerleme kuvvetleri ve moment değerleri *Kistler* marka *9257B model* dinamometre vasıtasıyla, kompozitlerin delinmesinde oluşan titreşimler ise *NI-9230* aparatı yardımıyla hesaplanmıştır.

TARTIŞMA

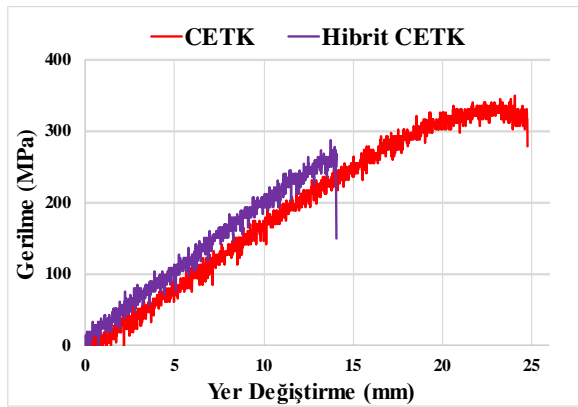
Çekme ve eğme deney sonuçları

Epoksi reçineli kompozitlerde dolgu parçacıklarının matris içinde homojen dağılması ve matris tarafından iyice ıslatılması mekanik özellikler üzerinde olumlu bir etkiye sahiptir. Dolgusuz CETK ve %7,5 B₄C+%7,5 Gr dolgulu hibrit kompozitin çekme dayanım grafiği Şekil 1'de verilmiştir. B₄C ve Gr dolgularının CETK'nin çekme dayanımını düşürdüğü görülmüştür. Dolgusuz CETK'nin çekme dayanımı 363 MPa iken, hibrit kompozitin çekme dayanımı 197 MPa'a düşerek çekme dayanımında %54'lük bir kayba neden olmuştur. Uygulanan çekme yükü önce matris çatlamasına neden olur, daha sonra oluşan gerilim elyaf ve dolgu parçacıklarına transfer edilir. Dolgu parçacıklarının reçine içinde homojen bir dağılıma sahip olmaması ve reçine ile dolgu arasındaki zayıf arayüzey bağlanması dolguların yük taşıma kapasitesini düşürür ve mekanik özellikleri kötüleştirir [34, 35]. Ayrıca dolguların sahip olduğu keskin köşeli geometrik şekilden dolayı matris içinde çatlak oluşumu destekleyerek gerilme yığılma noktaları oluşturmaktadır ve çekme dayanımını düşürebilmektedir [11]. Dolgu ilavesinin mekanik özelliklerde artış sağlayabilmesi parçacıkların homojen dağılımına ve elyaflardaki hidrojen bağlarını güçlendirmesine atfedilebilir [36]. Optimum bir orana kadar dolgular, elyaf takviyeli kompozitlerin çekme dayanımlarına katkı sunarken, bu oranın aşılması topraklanmaya, yetersiz matris ıslatılmasına ve mekanik özelliklerin düşmesine neden olmaktadır [13]. Deneysel sonuçlar yapılan benzer çalışmalarla paralellik arz etmektedir [37-39]. Anjum ve ark. [37] SiO₂ dolgulu CETK'lerde dolgu oranı artışının ve dolgu ilavesinin, kompozitin çekme dayanımını düşürdüğünü belirtmişlerdir. Fathy ve ark. [39] SiO₂ dolgulu elyaf takviyeli kompozitlerde çekme dayanımının %0,5 dolgu oranına kadar arttığını, bu oranın üzerine çıkıldığında ise dayanımın düşme trendine girdiğini belirlemişlerdir.



Şekil 1. Hibrit dolgulu ve dolgusuz kompozitlerin çekme dayanımları

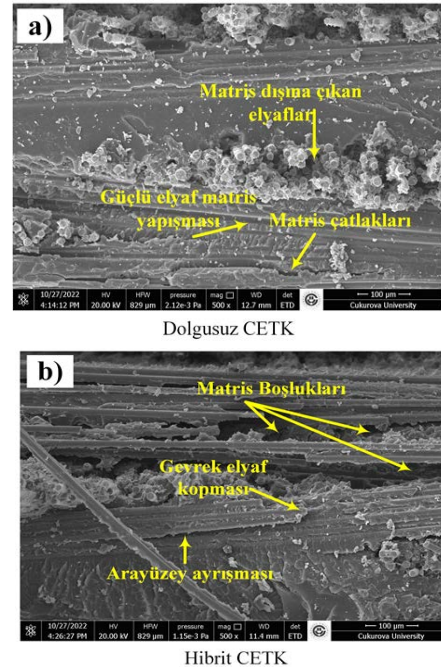
Şekil 2'de dolgusuz ve B₄C/Gr CETK'lerin eğme dayanımı grafiği verilmiştir. B₄C ve Gr dolgusunun CETK'lerin eğme dayanımını düşürdüğü görülmektedir. Dolgusuz kompozit ve B₄C/Gr dolgulu hibrit CETK'lerin eğilme dayanımları sırasıyla 350 MPa ve 287 MPa olarak elde edilmiştir. Dolguların kompozit yapıda belirli bölgelere yığılması yeterli homojen bir yapı sağlayamaması, yük taşıma kapasitesini düşürmüştür. Hossain ve ark. [40] CETK'lerde yüksek dolgu oranlarının matris içinde farklı bölgelerde mikro toprak alanları oluşturarak, kompozitin eğme dayanımını düşürdüğünü ifade etmişlerdir. Dolgu kullanarak eğilme dayanımında artış sağlanan çalışmalarda eğilme dayanımındaki iyileşmeyi, yeterli homojen dağılıma ve dolguların matrisle güçlü bağ kurmasına atfedilmiştir [41, 42].



Şekil 2. B₄C/Gr hibrit dolgulu ve dolgusuz kompozitlerin eğme dayanımı grafiği

SEM morfolojisi

Çekme testi sonrası dolgusuz ve hibrit kompozitlerin kırılma yüzeyleri Şekil 3'te gösterilmiştir. Şekil 3a'da elyaf matrisinde daha az boşluk olduğu, matris ile elyaflar arasında arayüzey bağının daha iyi olduğu gözlenmektedir.



Şekil 3. Çekme testi sonrası numune kopma yüzeyleri

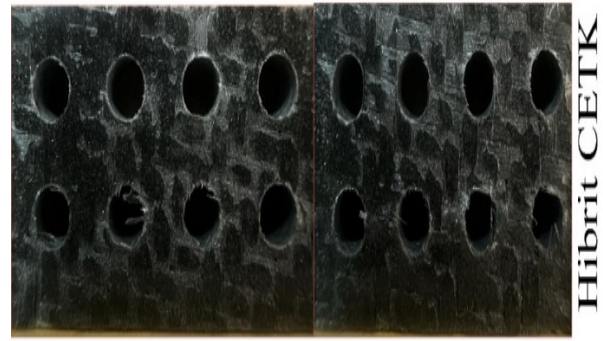
Matris süreksizliğinin daha az olması, kompozitin yük taşıma kapasitenin daha yüksek olmasını sağlamaktadır [43-44]. Şekil 3b'de matris/elyaf yapışmasının zayıf olduğu, gevrek elyaf kopmalarının ve boşlukların fazla olduğu görülmüştür. Matris içindeki süreksizliklerin kopma dayanımını düşürdüğü anlaşılmıştır.

Delaminasyon ölçümlerinin değerlendirilmesi

Farklı kesme parametrelerinde dolgusuz ve B₄C/Gr dolgulu CETK'lerin delik delme işlemi sonrası delik çıkışından delaminasyon ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Dolgusuz ve B₄C/Gr dolgulu CETK'lerin delik delme sonrası ölçülen delaminasyon değişimleri Şekil 4 ve Şekil 5'te verilmiştir. Şekil 4 ve Şekil 5 incelendiğinde, ilerleme oranının artmasıyla delaminasyon değerlerinin azaldığı görülmüştür. Ghasemi ve ark. [45] ile Sunny ve ark. [46] yaptıkları çalışmalarda ilerlemenin artmasına bağlı olarak delaminasyon değerlerinin düştüğünü tespit etmişlerdir [45, 46]. Bu durum elde edilen sonuçlarla paralellik arz etmektedir. Kompozitin düşük ilerleme hızında delinmesi, delme süresini artırarak kompozit ile matkap arasındaki sürtünmenin artmasına ve delik çevresinde yüksek ısı oluşumuna yol açmaktadır. Delik çıkışındaki termal hasarların artışı, delaminasyon miktarı üzerinde negatif bir etki oluşturmuştur. Kesme hızının etkisi incelendiğinde, kesme hızı artışının delaminasyon değerlerini arttırdığı belirlenmiştir. Elde edilen bu sonuç literatürdeki çalışmalarla paralellik arz etmektedir [47, 48]. Kesme hızını artmasına bağlı olarak artan sürtünmeden dolayı sıcaklığın artması kompozitin matris tokluğunun düşürmesine neden olmaktadır. Ayrıca delik çapının büyümesine ve bundan dolayı delaminasyon değerlerinin yükselmesine yol açacaktır. Şekil 4 - Şekil 5'teki grafikler incelendiğinde, en düşük delaminasyon değeri hibrit CETK'te 1,09 mm, en yüksek delaminasyon

değeri ise dolgusuz CETK'te 1,23 mm olarak elde edilmiştir. Dolgusuz ve hibrit dolgulu CETK'lerin delik delme sonrası delaminasyon görüntüleri Şekil 6.'da verilmiştir. Şekil 6.'daki delaminasyonlar incelendiğinde dolgusuz kompozitte delik çevresinde belirgin şekilde deformasyonların dolgulu kompozite kıyasla daha fazla olduğu gözlenmiştir.

Hibrit dolgulu ve dolgusuz CETK'lerin delaminasyon değerleri karşılaştırıldığında, dolgusuz kompozitlerin delaminasyon değerlerinin hibrit dolgulu kompozitlerden daha yüksek çıktığı Şekil 4 - Şekil 5'teki grafiklerden anlaşılmaktadır. Hibrit kompozit içinde yer alan Gr dolgu parçacıklarının yağlayıcı özelliğe ve B₄C dolgu parçacıklarının ise yüksek sertliğe sahip olmaları delaminasyon değerlerinin daha düşük olmasını sağlamaktadır. Delik delme sırasında kesici takım ile kompozit arasında oluşan sürtünmelerin, hibrit kompozitte bulunan dolgular sayesinde azalması, delik çıkışlarındaki deformasyonların daha az olmasını sağlamıştır. Şekil 6.'da verilen delik çıkışlarına ait görüntüler Şekil 4 ve Şekil 5'te verilen grafiklerin doğruluğunu teyit etmektedir. Şekil 4a'da 0,025 ilerleme hızında dolgusuz kompozitin delaminasyon faktörü 1,145 mm iken hibrit kompozitin delaminasyon değeri ise 1,09 mm olarak ölçülmüştür. Dolgu parçacıklarının CETK'in delaminasyon faktörünü yaklaşık %5 iyileştirdiği görülmüştür. En düşük delaminasyon değeri 0,2 mm/dev ilerleme oranında hibrit kompozitte 1,075 mm iken en yüksek değer ise 1,145 mm'dir.

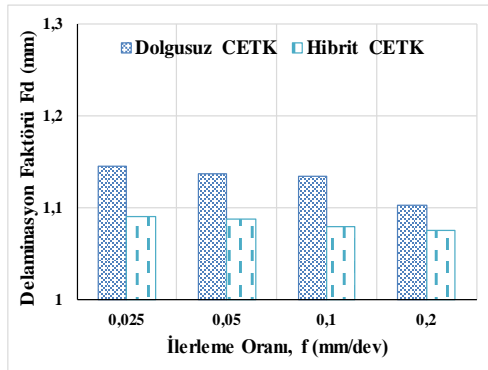


Hibrit CETK

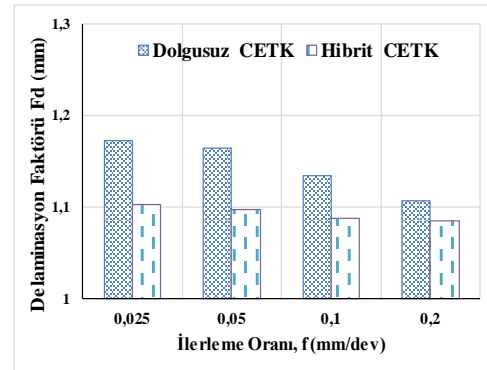


Dolgusuz CETK

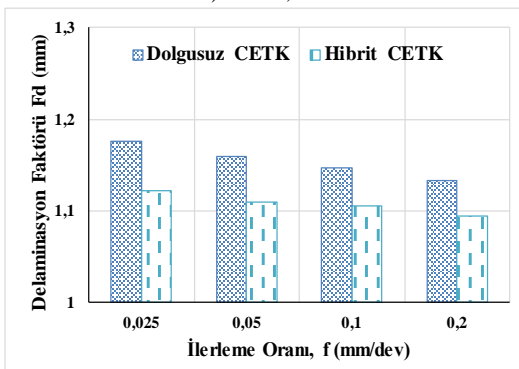
Şekil 6. Dolgusuz ve hibrit dolgulu CETK'lerin delme sonrası deformasyon görüntüleri



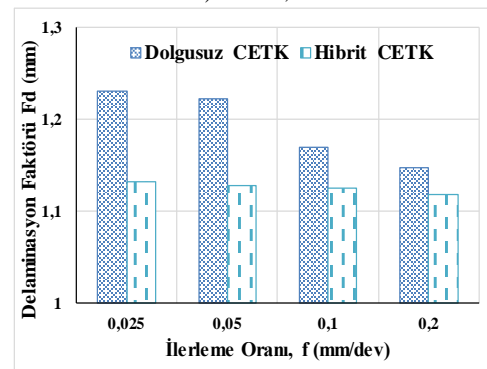
a) V: 6,25 m/dk



b) V: 12,5 m/dk

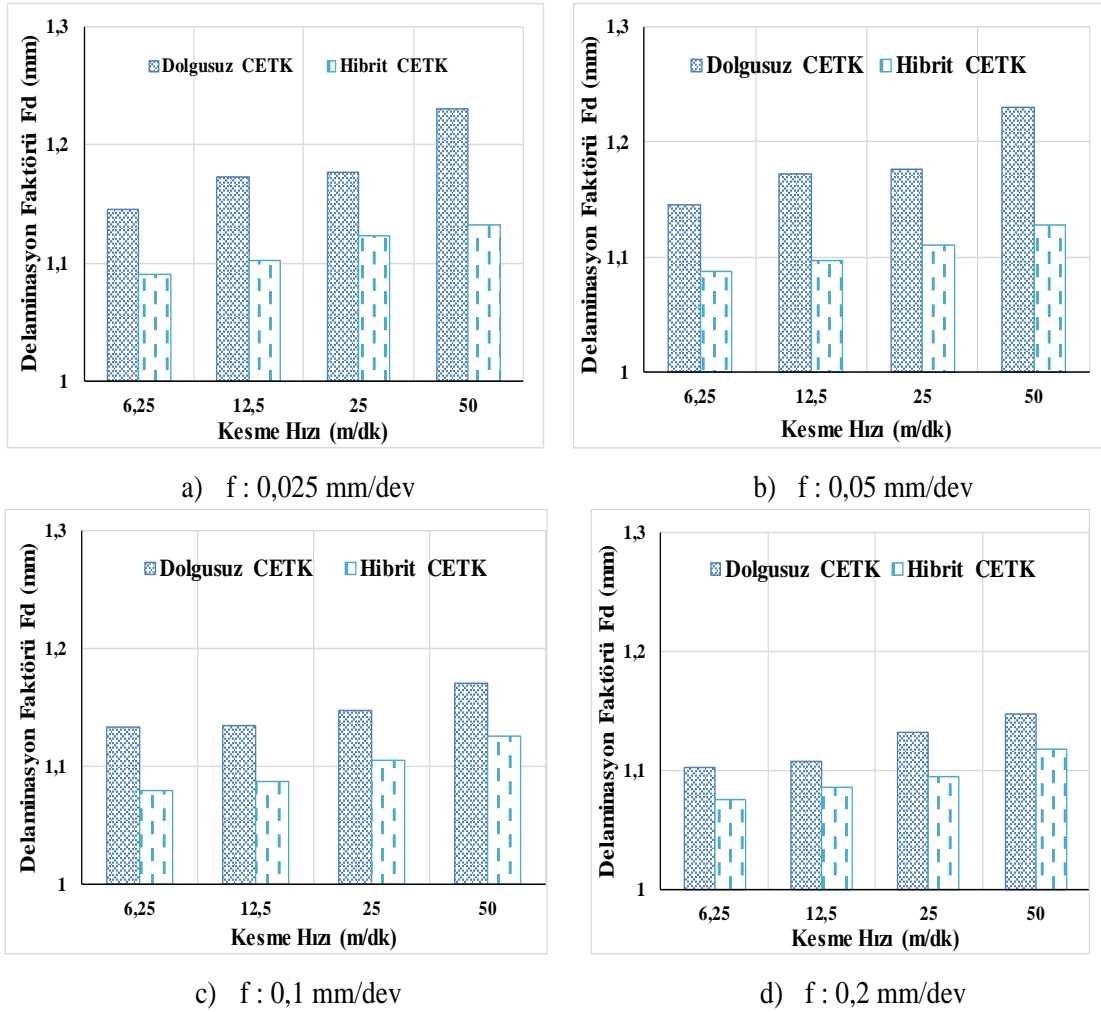


c) V: 25 m/dk



d) V: 50 m/dk

Şekil 4. B₄C/Gr dolgulu ve dolgusuz kompozitlerin farklı ilerleme oranlarında ölçülen delaminasyon değerleri



Şekil 5. Dolguşuz ve B₄C/Gr dolgulu kompozitlerin kesme hızına bağı delaminasyon miktarları

Titreşim ve momentlerin değerlendirilmesi

Dolgulu ve dolguşuz CETK'lerine ait hem titreşim hem de moment değerleri Tablo 1'de verilmiştir. Farklı kesme parametrelerinde dolguşuz ve B₄C/Gr dolgulu CETK'lerin delik deleme esnasında oluşan moment değerleri birbirine yakın olduğu tespit edilmiştir. En yüksek ve en düşük işleme şartlarında bile moment değerleri arasında belirgin bir fark oluşmamıştır. Benzer durum titreşim değerlerinin ölçümlerinde de meydana gelmiştir. Tablo 1'de en düşük ve en yüksek moment ve titreşim değerlerinin elde edildiği işleme parametreleri sonuçları incelendiğinde, B₄C/Gr CETK'lerin moment ve titreşim değerleri, dolguşuz CETK'lerin moment ve titreşim ölçümlerinden daha fazla çıktığı tespit edilmiştir. İlerleme hızının 0,025 mm/dev'den 0,2 mm/dev'e çıkarılması moment değerinin % 428 artışla 0,22'den 1,163'e çıkartmıştır. Aynı şartlarda titreşim değerleri ise 0,085210'dan 0,085459'a çıkarak % 0,29 bir artış meydana gelmiştir. Ortaya çıkan bu durum, dolgulu kompozit içerisinde yer alan B₄C dolgu parçacıkların sert olması delme esnasında kesici takımı daha fazla

zorlayarak moment değerlerinin yüksek çıkmasına yol açmıştır. Metal malzemelere kıyasla, epoksi matrisli elyaf takviyeli kompozitlerin düşük sertliğe sahip olması ve sönümlenme gücünün yüksek olmasından ötürü, düşük miktarlarda titreşimler meydana gelmektedir.

Tablo 1. CETK'lerin titreşim ve moment değerleri

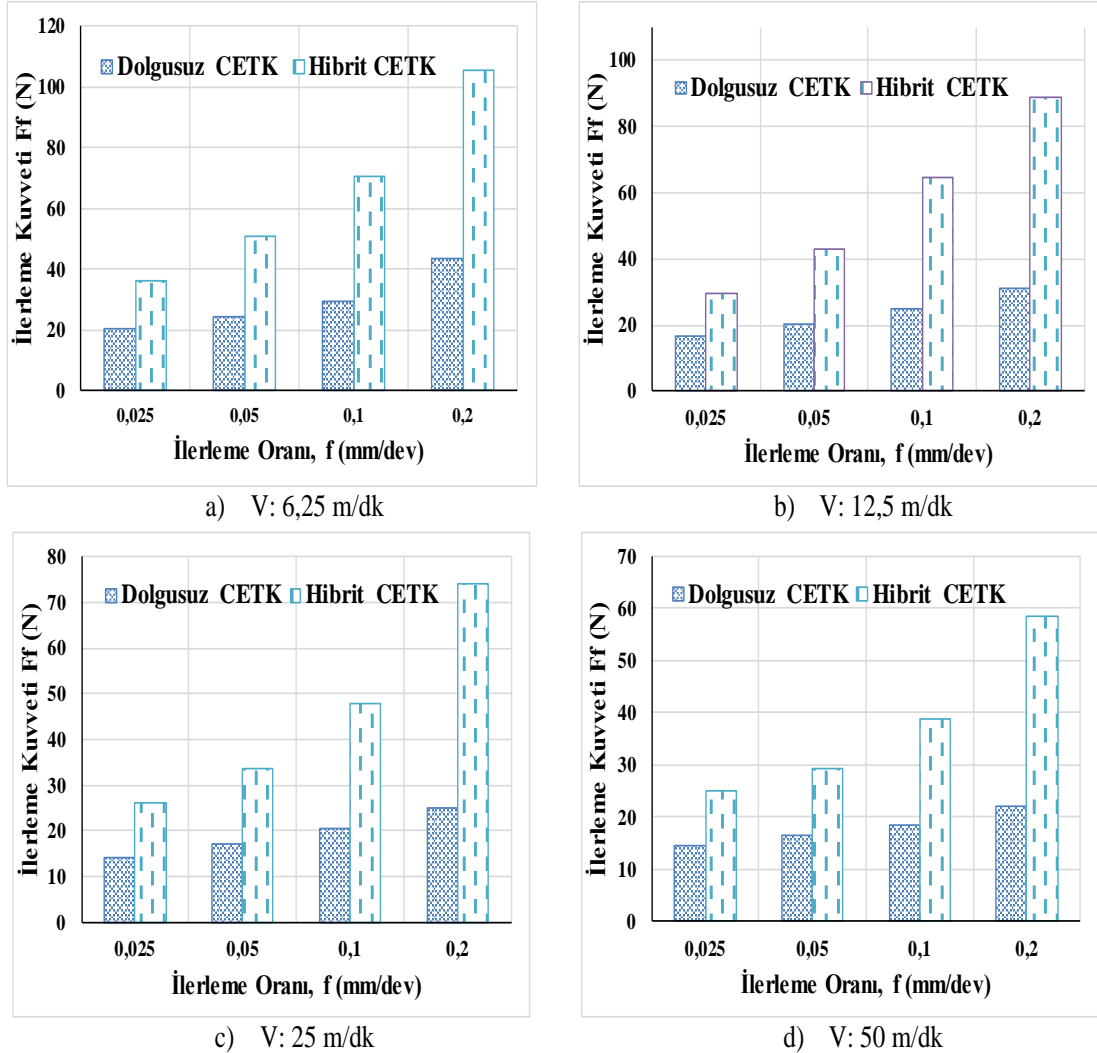
Kesme parametreleri (f: mm/dev; V: m/dak)	Malzeme tipi	Moment	Titreşim
f ₄ : 0,2 ve V ₁ : 6,25	Dolguşuz	1,163	0,085459
f ₁ : 0,025 ve V ₄ : 50	CETK	0,22	0,085210
V ₁ : 6,25 ve f ₄ : 0,2	B ₄ C/Gr	2,93	0,087153
V ₄ : 50 ve f ₁ : 0,025	(Hibrit)	0,48	0,086950

İlerleme kuvvetlerinin değerlendirilmesi

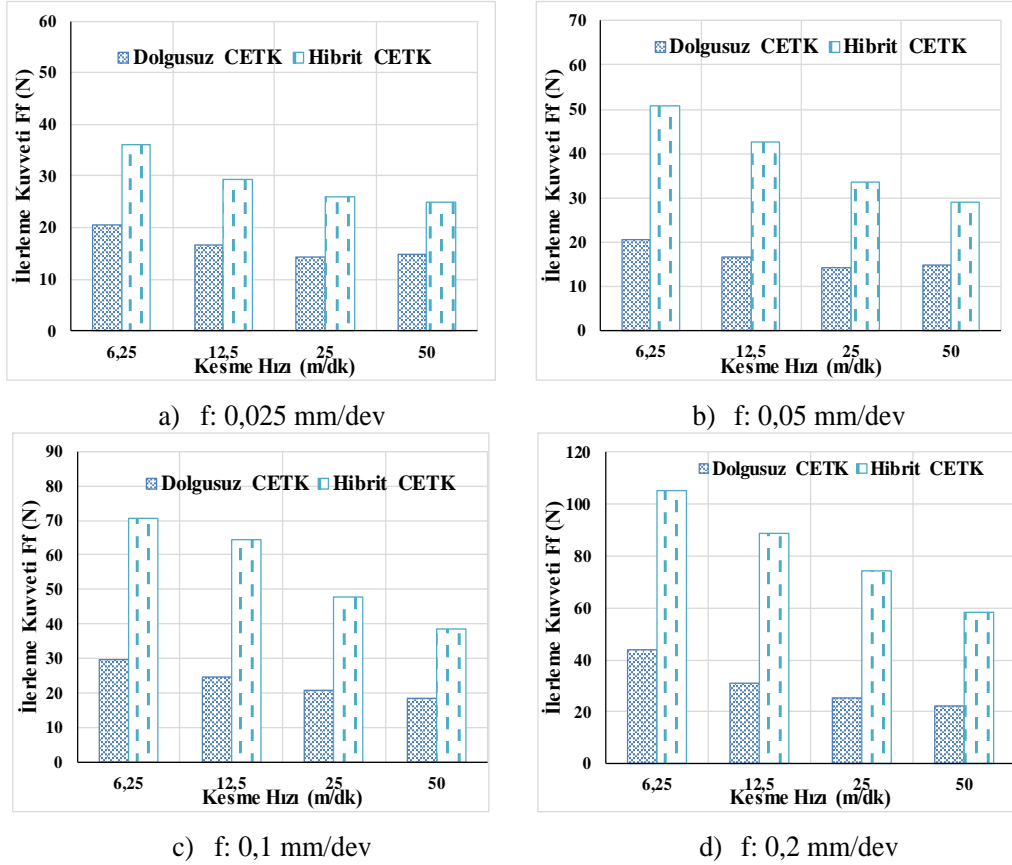
Hibrit dolgulu ve dolguşuz CETK'lere 4 farklı ilerleme oranında ve 4 farklı kesme hızında 4 mm çapında delikler açılmıştır. Dolguşuz ve hibrit dolgulu CETK'lerin farklı işleme koşullarında delik delinirken kesici takımda meydana gelen ilerleme kuvvetleri Şekil 7 ve Şekil 8'de

sunulmuştur. Şekil 7 ve Şekil 8 incelendiğinde, ilerleme oranının artmasıyla ilerleme kuvvetlerinin arttığı tespit edilmiştir. Ortaya çıkan bu sonuç literatürdeki çalışmalarla paralellik göstermiştir [12,49]. İlerleme oranı artışıyla birim zamandaki talaş kaldırma hacminin artması matkaba gelen yük artmaktadır. Bununla birlikte delme esnasında ilerlemeye bağlı olarak artan sürtünme ve talaş sıkışmaları ilerleme kuvvetlerinin yüksek çıkmasına katkı sağlamıştır. Hibrit ve dolgunsuz CETK'lerin delinmesinde, kesme hızı artışına bağlı olarak ilerleme kuvvetlerinde düşüş tespit edilmiştir. Literatürde yapılan çalışmalar ile elde edilen sonuçlar örtüşmektedir [50]. Kompozit malzemenin delinmesi esnasında kesme hızının artışına bağlı olarak kesme bölgesindeki sıcaklığının artması kompozitin yumuşamasına yardımcı olacaktır. Bu da delme işlemini kolaylaştırarak ilerleme kuvvetlerinin azalmasına katkı

sağlayacaktır. Dolgunsuz ve hibrit dolgu CETK'lerin ilerleme kuvvetleri karşılaştırıldığında, hibrit kompozitlerin dolgunsuz CETK'lerden daha yüksek ilerleme kuvvetlerine sahip olduğu görülmüştür. Ortaya çıkan bu sonuç hibrit kompozitlerin yapısında bulunan B₄C dolgu parçacıklarından kaynaklanmaktadır. B₄C parçacıklarının sertliğinin yüksek olmasından ötürü delme sırasında matkabin daha fazla yüke maruz kalarak ilerleme kuvvetlerinin yükselmesine yol açmıştır. Şekil 7 ve Şekil 8 incelendiğinde en yüksek ilerleme kuvveti değeri hibrit CETK'den ($f_4=0,2$ mm/dev ve $V_1=6,25$ m/dk'da elde edilirken en düşük ilerleme kuvveti değeri ise dolgunsuz CETK'den ($f_1=0,025$ mm/dev ve $V_4=50$ m/dk'da kesme parametrelerinde elde edilmiştir.



Şekil 7. B₄C/Gr dolgu ve dolgunsuz kompozitlerin farklı ilerleme oranlarında ölçülen delaminasyon değerleri



Şekil 8. Dolgusuz ve B₄C/Gr dolgulu kompozitlerin kesme hızına bağlı delaminasyon miktarları

SONUÇ

El yatırma yöntemiyle üretilen dolgusuz ve B₄C/Gr dolgulu CETK hibrit kompozitlerin mekanik ve işlenebilirlik özelliklerinin incelenmesi sonucunda elde edilen önemli bulgulardan bazıları şunlardır.

- B₄C ve Gr dolgularının CETK'in çekme dayanımını 363 MPa'dan 197 MPa'a düşürmüştür. Eğme dayanımı ise 350 MPa'dan 287 MPa'a düşürmüştür. Dolgu parçacıklarının kompozit yapıda homojen dağılmadığı ve yüksek dolgu oranlarının reçine içinde topaklanmaya neden olduğu anlaşılmıştır.
- Kopma yüzeylerinin SEM görüntülerinde dolgusuz kompozitlerdeki matris boşlukları, dolgulu hibrit kompozite göre daha azdır.
- En düşük delaminasyon değeri en düşük kesme hızı ve en yüksek ilerleme oranında hibrit CETK'te 1,09 mm olarak elde edilirken en yüksek delaminasyon değeri ise en yüksek kesme hızı ve en düşük ilerleme oranında dolgusuz CETK'te 1,23 mm olarak elde edilmiştir. Delaminasyon değerlerinin kesme hızı ile doğru orantılı, ilerleme hızı ile ters orantılı olduğu tespit edilmiştir.
- Hibrit kompozitlerin dolgusuz kompozitlere kıyasla daha düşük delaminasyon değerlerine ve daha yüksek ilerleme kuvvetlerine sahip olduğu tespit edilmiştir.

Her iki kompozit türünde de titreşim ve moment değerleri birbirine yakın elde edilmiştir.

- Dolgusuz ve hibrit kompozitlerde yüksek ilerleme hızları ilerleme kuvvetlerinin yükselmesine neden olur iken, yüksek kesme hızları ise ilerleme kuvvetlerinin düşmesini sağlamıştır.
- En yüksek ilerleme kuvveti değeri en yüksek ilerleme ve en düşük kesme hızında hibrit CETK'den 105,2 N elde edilirken en düşük ilerleme kuvveti değeri ise en düşük ilerleme ve en yüksek kesme hızında dolgusuz CETK'den 14,7 N elde edilmiştir.

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.

KAYNAKÇA

- [1] Chan JX, Wong JF, Petrú M, et al. Effect of nanofillers on tribological properties of polymer nanocomposites: A review on recent development, *Polymers*.13(17)1-47, 2021.
- [2] Bhatia S, Khan S, Angra S. Effect of the content of silane-functionalized boron carbide on the mechanical and wear

- performance of B4C reinforced epoxy composites, *High Performance Polymers*. 33(10) 1165-1180, 2021.
- [3] Chelliah A. Mechanical properties and abrasive wear of different weight percentage of TiC filled basalt fabric reinforced epoxy composites, *Materials Research*. 22(2), 2019.
- [4] Albayrak M, Kaman MO, Bozkurt I. Experimental and numerical investigation of the geometrical effect on low velocity impact behavior for curved composites with a rubber interlayer, *Applied Composite Materials*. 30(2) 507-538, 2023.
- [5] Albayrak M, Kaman MO, Bozkurt I. The effect of lamina configuration on low-velocity impact behaviour for glass fiber/rubber curved composites, *Journal of Composite Materials*. 57(11) 1875-1908, 2023.
- [6] Suresha B, Chandramohan G, Rao PRS, Sampathkumaran P, Seetharamu S. Influence of SiC filler on mechanical and tribological behavior of glass fabric reinforced epoxy composite systems, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 26(6) 565-578, 2007.
- [7] Demir M. E., Çelik Y. H., and Kilickap E. Effect of matrix material and orientation angle on tensile and tribological behavior of jute reinforced composites, *Materials Testing*. 61(8) 806-812, 2019.
- [8] Cetkin E, Demir ME, Ergün RK. 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*. 237(2) 418-429, 2023.
- [9] Demir ME, Investigation of the abrasive wear behavior of GFRP and CFRC with different parameters using taguchi and artificial neural networks method, *Politeknik Dergisi*. 1-1, 2024.
- [10] Bhatia S, Angra S, Khan S. A review on mechanical and tribological characterization of boron carbide reinforced epoxy composite, *Advanced Composite Materials*. 30(4) 307-337, 2021.
- [11] Abenojar J, Martínez MA, Velasco F, Pascual-Sánchez V, Martín-Martínez JM. Effect of boron carbide filler on the curing and mechanical properties of an epoxy resin, *The Journal of Adhesion*. 85(4-5) 216-238, 2009.
- [12] Raju BR, Suresha B, Swamy RP, Kanthraju BSG. Investigations on Mechanical and Tribological Behaviour of Particulate Filled Glass Fabric Reinforced Epoxy Composites, *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*. 01(04) 160-167, 2013.
- [13] Kharat WS, Sidhu JS. Development of Epoxy Based Composites Filled With Boron Carbide (B₄C), Tungsten Disulphide (WS₂) and Evaluation of its Mechanical Properties, *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics*. 6(1) 19-30, 2016.
- [14] Demir ME, Cetkin E, Ergün RK, Denizhan O. Tribological and mechanical properties of nanofilled glass fiber reinforced composites and analyzing the tribological behavior using artificial neural networks, *Polymer Composites*. 45(5) 4233-4249, 2024.
- [15] Kose H, Bayar I, Ergün RK. Experimental optimization of CuO and MgO hybrid nanoparticle reinforcement ratios to enhance fatigue life of GFRP composites. *Polymer Composites* 11125-11137, 2024.
- [16] Ergün RK, Köse H. Experimental optimization of Al₂O₃ microparticles ratio in epoxy layered glass fiber to improve tensile fatigue performance, *Journal of Composite Materials*. 57(16) 2563-2572, 2023.
- [17] Manjunath M, Renukappa NM, Suresha B. Influence of micro and nanofillers on mechanical properties of pultruded unidirectional glass fiber reinforced epoxy composite systems, *Journal of Composite Materials*. 50(8) 1109-1121, 2016.
- [18] Hariprasad P, Kannan M, Ramesh C, et al. Mechanical and Morphological Studies of Sansevieria trifasciata Fiber-Reinforced Polyester Composites with the Addition of SiO₂ and B₄C, *Advances in Materials Science and Engineering*. 1-5, 2022.
- [19] Suresha B, Ramesh BN, Subbaya KM, Ravi Kumar BN, Chandramohan G. Influence of graphite filler on two-body abrasive wear behaviour of carbon fabric reinforced epoxy composites, *Materials & Design*. 31(4) 1833-1841, 2010.
- [20] Hulugappa B, Achutha M V., Suresha B. Effect of Fillers on Mechanical Properties and Fracture Toughness of Glass Fabric Reinforced Epoxy Composites. *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering* 2016;04(01):1-14.
- [21] Başar G, Fedai Y, Kirli Akin H. Kompozit Malzemelerin Delme İşleminde İtme Kuvvetinin Taguchi Metodu ile Optimizasyonu ve Regresyon Analizi ile Tahmini, Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi. 35(4) 969-982. 2020.
- [22] Karaca F. Investigation of Drilling Parameters Effect On Delamination Factor in With Glass Fiber Reinforced Plastic Composites, *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*. 28(2) 23-27, 2016.
- [23] Uzay Ç. Investigating the Wear Behaviors of Silane Coated Silica Filled Glass/Epoxy Nanocomposites, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*. 23(1) 260-269, 2023.
- [24] Çelik A, Lazoglu I, Kara A, Kara F. Investigation on the performance of SiAlON ceramic drills on aerospace grade CFRP composites, *Journal of Materials Processing Technology*. 223 39-47, 2015.
- [25] Mohan NS, Ramachandra A, Kulkarni SM. Influence of process parameters on cutting force and torque during drilling of glass-fiber polyester reinforced composites, *Composite Structure*. 71(3-4) 407-413, 2005.
- [26] Liu L, Qi C, Wu F, Zhang X, Zhu X. Analysis of thrust force and delamination in drilling GFRP composites with candle stick drills, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 95(5-8) 2585-2600, 2018.
- [27] Natarajan E, Markandan K, Sekar SM, et al. Drilling-Induced Damages in Hybrid Carbon and Glass Fiber-Reinforced Composite Laminate and Optimized Drilling Parameters, *Journal of Composites Science*. 6(10) 2022.
- [28] Tian J, Wu F, Zhang P, Lin B, Liu T, Liu L. The coupling effect and damage analysis when drilling GFRP laminates using candlestick drills. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 102(1-4):519-531. 2019.
- [29] Khashaba UA, Abd-Elwahed MS, Najjar I, et al. Heat-affected zone and mechanical analysis of GFRP composites with different thicknesses in drilling processes, *Polymers*. 13(14) 2021.
- [30] Erturk AT, Vatanserver F, Yazar E, Guven EA, Sinmazcelik T. Effects of cutting temperature and process optimization in drilling of GFRP composites, *Journal of Composite Materials*. 55(2) 235-249, 2021.
- [31] Jessy K, Satish kumar S, Dinakaran D, Seshagiri Rao V. Influence of different cooling methods on drill temperature in drilling GFRP, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 76(1-4) 609-621, 2015.
- [32] Khashaba UA, El-Keran AA. Drilling analysis of thin woven glass-fiber reinforced epoxy composites, *Journal of Materials Processing Technology*. 249 415-425, 2017.
- [33] Zuo JP, Xie HP, Dai, F, Ju, Y. Three-point bending test investigation of the fracture behavior of siltstone after thermal treatment, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 70 133-143, 2014.
- [34] Latha PS, Rao MV. Investigation into Effect of Ceramic Fillers on Mechanical and Tribological Properties of Bamboo-Glass Hybrid Fiber Reinforced Polymer Composites, *Silicon*. 10(4) 1543-1550, 2018.
- [35] Ozsoy I, Demirkol A, Mimaroglu A, Unal H, Demir Z. The influence of micro- And nano-filler content on the mechanical properties of epoxy composites, *Strojniški vestnik Journal of Mechanical Engineering*. 61(10) 601-609, 2015.
- [36] Raju BR, Suresha RPSB, Bharath KN. The Effect of Silicon Dioxide Filler on the Wear Resistance of Glass Fabric Reinforced Epoxy Composites, *Advances in polymer science and technology - an international journal*. 2(4) 51-57, 2012.
- [37] Anjum N, Ajit Prasad SL, Suresha B. Role of silicon dioxide filler on mechanical and dry sliding wear behaviour of glass-epoxy composites, *Advances in Tribology*. 1-13, 2013.

- [38] Abuali Galehdari N, Kelkar AD. Effect of neutron radiation on the mechanical and thermophysical properties of nanoengineered polymer composites, *Journal of Materials Research*. 32(2) 426-434, 2017.
- [39] Fathy A, Shaker A, Hamid MA, Megahed AA. The effects of nano-silica/nano-alumina on fatigue behavior of glass fiber-reinforced epoxy composites. *Journal of Composite Materials* 51(12):1667-1679, 2017.
- [40] Hossain MK, Hossain ME, Hosur M V., Jeelani S. Flexural and compression response of woven E-glass/polyester-CNF nanophased composites, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 42(11) 1774-1782, 2011.
- [41] Raja T, Devarajan Y. Investigation on boron carbide nanofiller-influenced epoxy polymer composite for thermal barrier applications, *Biomass Convers Biorefinery*. 14 12623 2023.
- [42] Siddhartha, Patnaik A, Bhatt AD. 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.
- [43] Singh MM., Kumar H, Kumar GH, Sivaiah P, Nagesha KV, Ajay KM, Vijaya G. Determination of strength parameters of glass fibers reinforced composites for engineering applications, *Silicon*. 12 1-11, 2020.
- [44] Ou Y, Zhu D, Zhang H, Huang L, Yao Y, Li G, Mobasher B. Mechanical characterization of the tensile properties of glass fiber and its reinforced polymer (GFRP) composite under varying strain rates and temperatures, *Polymers*. 8(5) 1-16, 2016.
- [45] Ghasemi FA, Hyvadi A, Payganeh G, Arab NBM. Effects of drilling parameters on delamination of glass-epoxy composites, *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*. 5(12) 1433-1440, 2011.
- [46] Sunny T, Babu J, Philip J. Experimental Studies on Effect of Process Parameters on Delamination in Drilling GFRP Composites Using Taguchi Method, *Procedia Materials Science*, 6:1131-1142, 2014.
- [47] Krishnaraj V, Prabukarthi A, Ramanathan A, et al. Optimization of machining parameters at high speed drilling of carbon fiber reinforced plastic (CFRP) laminates, *Composite Part B Engineering*. 43(4) 1791-1799, 2012.
- [48] Melentiev R, Priarone PC, Robiglio M, Settineri L. Effects of Tool Geometry and Process Parameters on Delamination in CFRP Drilling: An Overview, *Procedia CIRP*. 45 31-34. 2016.
- [49] Bayraktar S, Turgut Y. Investigation of the cutting forces and surface roughness in milling carbon-fiber-reinforced polymer composite material, *Material Tehnology*. 50(4) 591-600, 2016.
- [50] Parasuraman S, Elamvazuthi I, Kanagaraj G, Natarajan E, Pugazhenti A. Assessments of process parameters on cutting force and surface roughness during drilling of aa7075/tib2 in situ composite, *Materials*. 14(7) 2021.