

Karbon Nano Tüp Katkılı Cam Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemenin Delme Parametrelerinin Taguchi Tabanlı CRITIC-CoCoSo Metoduyla Optimizasyonu

Yusuf FEDAI*

¹Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 80010, Osmaniye

¹<https://orcid.org/0000-0003-4546-8830>

*Sorumlu yazar: yusuffedai@osmaniye.edu.tr

Araştırma Makalesi

Makale Tarihiçesi:

Geliş tarihi: 19.11.2023

Kabul tarihi:06.02.2024

Online Yayınlanma: 11.03.2024

Anahtar Kelimeler:

Delme

Nano CETK

Çok kriterli karar verme

CRITIC metodu

CoCoSo metodu

ÖZ

Bu makale, çok duvarlı karbon nanotüp (ÇDKNT) ile takviye edilmiş cam elyaf takviyeli polimer (CETP) kompozitlerin işleme verimliliğini, Taguchi ve Taguchi tabanlı CRITIC ağırlıklandırma metoduyla ağırlıklandırılarak, CoCoSo (Combined Compromise Solution) metoduyla optimizasyonu yapılmıştır. Çalışmada delik delme işlemlerinde, farklı oranlarda çok duvarlı karbon nano tüp katkılı CETP malzemelerin, farklı takım tipiyle, işleme parametrelerinin, yüzey pürüzlülüğü, delaminasyon ve itme kuvveti üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Deneysel Taguchi L_{27} ortogonal dizilimine göre planlanarak her bir kontrol parametresinin çıktılar üzerindeki etkileri S/N oranı yöntemiyle belirlenmiştir. Yapılan çalışmada, CETP matrix kompozit malzemenin işlenmesinde kullanılan parametrelerin optimum değerlerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Elde edilen çıktı sayısının birden fazla olması, farklı ve çelişkili cevap değerlerinin birbirleri üzerindeki etkilerinin de dikkate alınmasını gerektirmektedir. Bu sebeple bütün çıktıların tek bir amaç fonksiyonu olarak değerlendirilebilmesi için uygulamada sıklıkla kullanılan çok kriterli karar verme yöntemleri (ÇKKV) kullanılmaktadır. Önce tüm çıktı değerlerinin minimizasyonunu sağlamak için veriler CRITIC metoduyla ağırlıklandırılmış daha sonra, CoCoSo metodu kullanılarak karşılaştırmalı analizi yapılmıştır. Optimizasyon sonucunda optimum değerler 17 nolu deney koşullarında ($A_2B_3C_2D_1$) gerçekleşmiştir. Bu şartlara göre optimum değerler $R_a=5,786 \mu m$, $D_m=1,128$ ve $F_t=45,01$ N olarak elde edilmiştir.

Optimization of Drilling Parameters of Carbon Nanotube Doped Glass Fiber Reinforced Composite Material Using Taguchi Based CRITIC-CoCoSo Method

Research Article

Article History:

Received: 19.11.2023

Accepted: 06.02.2024

Published online: 11.03.2024

Keyword

Drilling

Nano GFRP composites

Multi criteria decision method

CRITIC method

CoCoSo method

ABSTRACT

This article focuses on optimizing the processing efficiency of multi-walled carbon nanotube (MWCNT) reinforced glass fiber reinforced polymer (GFRP) composites, utilizing the Taguchi method and Taguchi-based CRITIC, weighted with the CoCoSo (the Combined Compromise Solution) method. In the study, the effects of machining parameters on surface roughness, delamination and thrust force of CETP materials doped with different ratios of multi-walled carbon nanotubes in drilling operations with different tool types were investigated. The experiments were planned according to Taguchi L_{27} orthogonal arrangement and the effects of each control parameter on the outputs were determined by the S/N ratio method. The study aimed to determine the optimum values of the parameters used in the processing of GFRP matrix composite material. The fact that the number of outputs obtained is more than one requires that the effects of different and conflicting response values on each other should also be taken into account.

For this reason, multi-criteria decision-making methods (MCDM), which are frequently used in practice, are used to evaluate all outputs as a single objective function. First, the data were weighted with the CRITIC method to ensure the minimization of all output values, and then a comparative analysis was made using CoCoSo method. As a result of the optimization, the optimum values were achieved under experimental conditions numbered 17 (A2B3C2D1). According to these conditions, the optimum values are obtained as $R_a=5.786 \mu\text{m}$, $D_m=1.128$, and $F_t=45.01 \text{ N}$.

To Cite: Fedai Y. Karbon Nano Tüp Katkılı Cam Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemenin Delme Parametrelerinin Taguchi Tabanlı CRITIC-CoCoSo Metoduyla Optimizasyonu. *Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi* 2024; 7(2): 729-750.

1. Giriş

Fiber takviyeli polimer (FRP) kompozitler, çeşitli mühendislik uygulamalarında, özellikle havacılık ve otomobil sporları gibi alanlarda yaygın bir biçimde kullanılmaktadır. Bu kompozitler, geleneksel kompozitlere göre daha yüksek korozif dayanıklılık ve darbe direnci gibi özel elyaf özellikleri sunmaktadır (Davim ve ark., 2003). Bu nedenle, cam elyaf takviyeli polimer (CETP) kompozit ürünleri, özellikle otomotiv, havacılık ve inşaat sektörlerinde özel üretim malzemeler olarak giderek daha fazla popülerlik kazanmıştır (Davim ve ark., 2004).

Cam elyaf takviyeli polimer kompozit malzemeler, yapısına nano ölçekte malzemelerin katılmasıyla, mukavemet, dayanıklılık ve hafiflik gibi özellikleri artırılabilir. Bu tür nano malzemeler, CETP kompozitlerin hem mekanik, hem de termal ve elektriksel özelliklerini iyileştirmek için kullanılabilir. Böylece nano malzemelerin cam elyaf destekli polimer kompozitlere katılması, mühendislik uygulamalarında daha yüksek performans ve özellikler elde etme potansiyelini sunar. Çok duvarlı Karbon nanotüpler (ÇDKNT), grafen, silika vb gibi nano malzemeler cam elyaf takviyeli polimer (CETP) kompozitlerde sıkça kullanılan bazı nano malzemelerdir. Çok duvarlı karbon nanotüplerin üstün mekanik özellikleri, onları kompozit malzemelere takviye için tercih edilen dolgu maddesi haline getirmektedir (Ceritbinmez ve ark., 2020). Özellikle takviyeli cam elyaf takviyeli kompozitler içerisinde katılan çok katmanlı karbon nanotüp, düşük oranlarda bile kullanıldığında, güçlendirilmiş bileşenlerin aşındırıcı özelliğinden dolayı, kompozitlerde istenen malzeme özelliklerini göstermektedir. Singh ve arkadaşları çok duvarlı karbon nanotüplerin, çok duvarlı karbon nanotüp gömülü epoksi/cam kumaş polimerik nanokompozitlerin delinmesi üzerindeki etkisini araştırmıştır. Delinmiş deliklerin kalitesini ve özelliğini etkileyen delme kaynaklı delaminasyonu ve yüzey pürüzlülüğünü analiz etmek için çok duvarlı karbon nanotüp içeriğinin ağırlık yüzdesi değişen kompozitler üzerinde deneyler yapmışlardır. Kontrol parametreleri olarak iş mili hızı, ilerleme hızı ve matkap çapını, delaminasyon ve yüzey pürüzlülüğünü dikkate almışlardır (Singh ve ark., 2018).

Kompozit malzemelerin üretimindeki esnekliklerinden dolayı kolay şekillendirilme özelliğine sahiptir. Bu nedenle genellikle son şekline yakın üretilmelerine rağmen çoğu montaj işlemlerinden dolayı talaşlı işlemlere tabi tutulurlar. Talaşlı işlemler içerisinde ise genellikle delme işlemi ön plan çıkmaktadır. Yapılan literatür araştırmasında, birçok araştırmacı, işleme esnasındaki yanlış parametre seçiminden dolayı kompozit üzerinde istenmeyen birçok hata türü ortaya çıktığını belirtmiştir (Pérez-Salinas ve ark., 2023). Bu hataların başlıcalarını, Delaminasyon, Fiber Kopmaları, fiber kırılmaları, mikro çatlamalar,

matris yanması ve delik genişlemesi olarak sayabiliriz (Mahesh ve ark., 2023).

Taguchi'nin yöntemi mühendislik optimizasyon problemlerinin çözümlenmesinde oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. Taguchi yöntemiyle deney tasarımı yapılarak bu deneylerden elde edilen sonuçlar analiz edilebilmektedir. Böylece düşük maliyetle yüksek kaliteli ürünler elde edilmektedir (Palanikumar ve ark., 2012). Shanmugam ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, hibrit yapısal bir kompozitin delme performansını test etmişlerdir. Taguchi L_{27} ortogonal dizisi kullanılarak yaptıkları delme işleminde delik kalitesini artırmak için birçok parametre kullanarak, bu parametrelerin, itme kuvveti, delaminasyon ve çapak oluşumu üzerindeki etkisini analiz etmişlerdir (Shanmugam ve ark., 2021). Çalışmalarda cam elyaf takviyeli kompozitlerin delinmesinde çok farklı parametreler kullanılmıştır. Ancak genel olarak, çalışmalarda iş mili hızı, ilerleme hızı matkap çapı ve matkap çeşidi gibi parametreleri kullanılmaktadır (Engin ve ark., 2023). Zitoune ve ark., (2010) delik delmede optimum proses parametrelerini seçmek için çeşitli çaplarda düz karbür K20 matkaplar kullanarak Karbon Fiber Takviyeli Plastik (CFRP)/Al üzerinde delme deneyleri yaptı ve itme kuvveti, tork ve yüzey kalitesi üzerindeki etkileri değerlendirdi. Yazarlar deney sonuçlarına göre doğru kesme parametrelerinin seçimi ile delik kalitesinin iyileştirilebileceğini bildirmişlerdir. Rajamurugan ve ark., cam elyaf takviyeli polyster kompozitleri araştırdı. Artan ilerleme hızının parça ayrılmasını artırdığını, ancak artan iş mili hızının delaminasyonu azalttığını buldu (Rajamurugan ve ark., 2013). Fakat Davim ve ark., karbon fiber takviyeli epoksi kompozitleri için hem artan ilerleme hızının, hem de kesme hızının delaminasyonu artırdığını bildirmişlerdir (Davim ve ark., 2003).

Kompozitlerin işlenmesi esnasında kesme bölgesinde oluşan yüksek ısı, kısa takım ömrü ve uzun işleme çevrimi gibi çeşitli problemler ortaya çıkmaktadır. Delme işlemi sırasında ortaya çıkan ısıyla ilgili olarak, bazı çalışmalar ÇDKNT'ler gibi nano katkı maddelerinin geleneksel soğutma yağlayıcılarına uygun bir alternatif olduğunu öne sürülmektedir. Ayrıca, kullanılan nano katkı maddeleri, işleme prosesleri sırasında indüklenen sürtünmeyi azaltmak için iş parçası-takım arayüz alanında ara yağlayıcı görevi yapmaktadır. CETP nanokompozitini delme mekanizması geleneksel malzemelerden farklıdır. Bunun nedeni, delme işlemi sırasında gözlemlenen plastik deformasyon, bükülme kırılması, kesme vb. gibi kompozit malzemelerin benzersiz davranışlarıdır. Dolayısıyla iyi bir sonuç elde etmek için hem işleme sürecini hem de malzeme özelliklerini daha iyi anlamak gerekir (Anand ve ark., 2018).

Yüzey bütünlüğüne ek olarak, ÇDKNT'ler, özellikle katmanlar arası yapısal bütünlüğü sağlamak ve kompozitleri güçlendirmek için mükemmel bir seçimdir. Yapılan bazı çalışmalarda kompozitlerdeki termal artık gerilmelerin ÇDKNT'lerin eklenmesi yoluyla bir dereceye kadar azaldığını göstermiştir (Shokrieh ve ark., 2014; Tabatabaeian ve ark., 2020). Özellikle çok duvarlı karbon nanotüpler eklenmiş cam elyaf takviyeli plastikler, düşük ağırlık yüzdelerinde, takviyeli bileşenlerinin aşındırıcı doğası nedeniyle sanayi kullanımına uygun malzeme özellikleri sergiler (Panchagnula ve ark., 2022).

Mühendislik araştırma ve geliştirme çalışmaları, tasarlanan sistemin ve geliştirilen ürünün en yüksek performansa erişmesini hedeflemektedir. Bu maksimum performansı elde etmek amacıyla öncelikle tanımlanan özellikler belirlenir ve daha sonra bu özellikleri etkileyen faktörler detaylı bir şekilde

incelenir. Belirlenen özelliklerin performans üzerindeki etkilerini saptamak ve en uygun kombinasyonu bulmak için çeşitli deneyler gerçekleştirilir. Deneyler sonucunda elde edilen performans göstergeleri değerlendirilir ve optimum koşullara ulaşmak için bu verilere dayalı kararlar alınır. Taguchi deney tasarımı, optimizasyon problemlerini çözmek için etkili bir yöntem olarak kabul edilmektedir (Palanikumar ve ark., 2012). Bu yöntem, sadece deney sayısını minimumda tutmakla kalmaz, aynı zamanda yüksek kaliteli süreçlerin ve ürünlerin geliştirilmesine de katkı sağlar. Aynı zamanda, bu yöntem, istatistiksel bir yaklaşım olmanın ötesinde, araştırma ve geliştirme faaliyetlerinin her aşamasında kullanılabilen, kaliteyi artıran, maliyetleri düşüren ve sonuçların güvenilirliğini artıran bir teknik olarak önemli bir rol oynar.

Üretimde, maliyetin düşürülmesi ve kalitenin iyileştirilmesi için en uygun proses parametrelerinin seçimi büyük önem taşır. Bir deney sürecinde uygun proses parametrelerinin seçimi, optimal veya en iyi deneysel koşulu belirlemede önemli bir katkıya sahiptir. Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) yöntemleri çeşitli ve çelişkili faktörlere ilişkin uygun süreç parametrelerinin seçiminde kullanılan etkili bir sıralama tekniklerini içerir. ÇKKV tekniklerinden herhangi birinin uygulanması, temel olarak, çok sayıda çelişen hedefin (kriter) varlığında bir dizi aday çözümden en iyi alternatifin veya hareket tarzının belirlenmesini amaçlar. Bugüne kadar, özellikle imalat sanayinde parametre optimizasyonuna yönelik 20'den fazla farklı ÇKKV tekniği kullanılmıştır (Chakraborty ve ark., 2022).

Bir çalışmada birden fazla çıktı elde ediliyorsa, bu çıktıların tek değişkenli sonuçlarının analizi anlamsızdır. Bu durumda birden fazla yanıtın değerlerinin eş zamanlı olarak eniyilemesinin yapılması gerekmektedir. Girdi değişkenlerinin belirsiz faktörlere bağlı olduğu şartlarda tüm çıktıları kapsayan en ideal tek bir çözümün bulunması gerekir (Lin ve ark., 2002). Bu amaçla genel olarak çok kriterli karar verme teknikleriyle birlikte taguchi yöntemi birleşik olarak uygulanabilir.

Bir çok kriterli karar verme yöntemi sınırlı sayıda bilinen alternatiflere çözüm bulmaktadır çok sayıda araştırmacı ve bilim adamı sezgiselden karmaşık Analitik yöntemlere kadar birçok çok kriterli karar verme yöntemi geliştirmiştir Bu yöntemler tek bir en uygun alternatifi belirlemek alternatifleri sıralamak sınırlı sayıda alternatif seçmek veya basitçe kabul edilebilir alternatifleri kabul edilemez alternatiflerden ayırmak için kullanılmaktadır (Panchagnula ve ark., 2022). Bu sebeple birçok çalışmada çok kriterli karar verme yöntemi uygulanarak Optimum delme koşullarının optimizasyonu araştırılmıştır (Lukic ve ark., 2020).

ÇKKV problemlerinde optimumum parametrelerin bulunmasını ağırlıkların seçilmesi oldukça önemlidir. Literatürde kriter ağırlıklandırma metotları olarak subjektif, objektif veya bu iki yöntemin kombinasyonu şeklinde yapılmaktadır (Paramasivam ve ark., 2020). Bu tekniklerden, Entropi metodu, CRITIC metodu AHP metodu, Bulanık AHP metodu En Küçük Kareler Yöntemi SWARA metodu vb. birçok metot önceki yapılan çalışmalarda kullanılmıştır (Kumar ve ark., 2021).

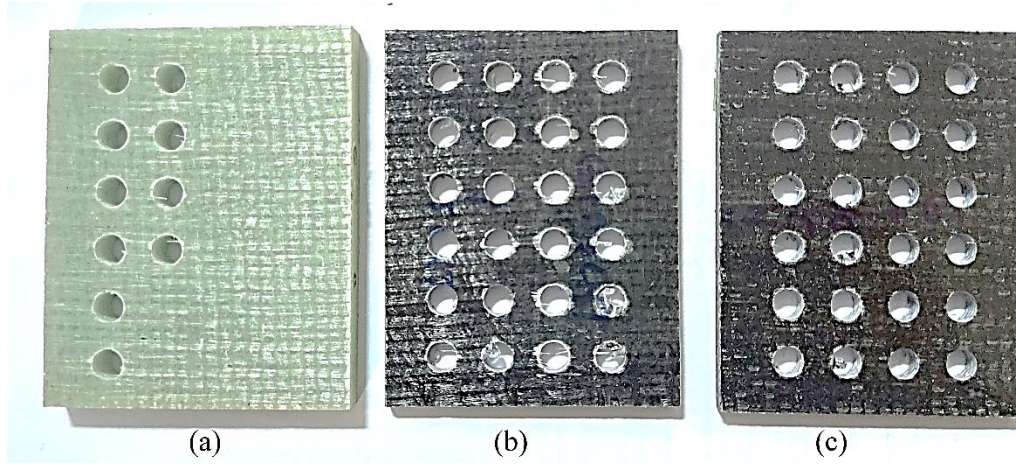
Talaşlı işleme operasyonlarının çıktılarının çoğu, tek bir performans ölçüsü ile nitelenemez (Barua ve ark., 2019). Delaminasyon, yüzey pürüzlülüğü ve itme kuvveti, bu çalışmanın çoklu değerlendirme kriterleridir.

Bu makalede, ÇDKNT içeren CETP/epoksi nanokompozitin delinmesi işlemlerinin çok yanıtlı optimizasyonu önerilmektedir. Yüzey pürüzlülüğü (R_a) ve itme kuvveti (F_t), ve delaminasyon çıktıları, ağırlıkça karbon nanotüp takviye dolgu içeriği, kesme hızı ilerleme ve üç farklı matkaptan oluşan takım tipi gibi değişken faktörler dikkate alınarak Taguchi yaklaşımıyla birleştirilmiş bir uzlaşma çözümü CoCoSo aracılığıyla optimize edilmiştir. Bu araştırma, yüzey pürüzlülüğü, delaminasyon ve itme kuvvetini azaltmak için işlem parametrelerinin optimum seviyesini tahmin etmeyi amaçlamaktadır. Nano-polimer kompozitlerin delinmesinde etkili olan en önemli parametreleri incelemek için ANOVA kullanılmıştır. Bu nedenle, Taguchi S/N oranı ve CoCoSo metoduyla optimize edilerek, ÇDKNT içeren CETP/epoksi nanokompozitin delme işlemi için uygun işlem parametrelerini belirlemek için kullanılmıştır.

2. Malzeme ve Metot

2.1. İş parçası, Kesici Takım ve deneysel çıktıların Ölçümü

Yapılan çalışmada, CETK kompozit malzemelerin delinmesi işleminde delme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü delaminasyon ve itme kuvveti üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Çalışmada kullanılan malzeme ticari bir firmaya özel olarak imal ettirilmiştir. CETK Kompozit, ağırlık olarak ÇDKNT oranı katkısız, %0,5 ve %1 katkısına sahip olacak şekilde üretilmiştir. (Şekil 1).



Şekil 1. Kompozit malzeme, (a) saf CETK, (b) %0,5 ÇDKNT+ CETK, (c) %1 ÇDKNT+ CETK

Kompozit malzemeler özel bir firmaya üretilmiştir. Kompozitin üretilmesinde vakum infzyon yöntemi kullanılmıştır. Kompozitler 0-90 açıyla yönlendirilmiştir. Üretilen kompozitler hacimce % 55 cam elyaftan oluşmaktadır. Kompozit 8 katmandan meydana gelmektedir. Kompozit ebatları 7 mm kalınlığında ve 80x100 boyutlarındadır (Fedai ve ark., 2022).

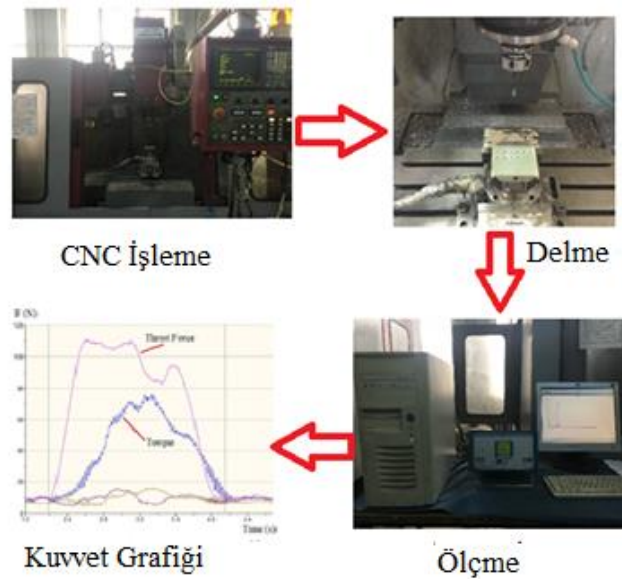
Kompozitlerin delme deneyleri Johnford VMC 850 marka CNC dik işleme merkezinde gerçekleştirilmiştir. Delme işlemi kuru kesme şartlarında gerçekleştirilmiştir. Deneylerde Ø8 mm çapında kaplamasız HSS, karbür ve TiAlN kaplamalı olmak üzere üç farklı tipte kesici takım kullanılmıştır (Şekil 2). Deneylerde kullanılan takımların çapları ve deney parametreleri üretici firmanın tavsiyeleri, deneyler öncesinde yapılan kontrol deneyleri ve literatürde yapılan benzer çalışmalardan

faздalanılarak belirlenmiştir. Takım ucu aşınmalarının deneylere etkisini her deneyde önlemek amacıyla yeni bir kesici takım kullanılmıştır.



Şekil 2. Delme takım çeşitleri, (a) HSS, (b) Karbür, (c) TialN

İtme kuvveti, nanokompozitlerin işlenebilirliğini belirleyen delme işleminde önemli bir rol oynamaktadır. Deneylerde itme kuvveti, CNC dik işleme merkezinin tablasına bağlanmış olan kistler 9257B tipi bir dinamometre yardımıyla ölçülmüştür. Dinamometreden alınan datalar DynoWare yazılımı sayesinde bilgisayarda kayıt altına alınmıştır. Kuvvet değerlerinin elde edilme döngüsü Şekil 3'te görülmektedir. Delik delme aşamalarına göre, elde edilen itme kuvveti sinyalleri Şekil 3'te sunulmaktadır. Şekilde delme işleminin üç aşamada gerçekleştiği görülmektedir. İlk aşamada delme işleminin başlangıcını gösterir. Matkap ucunun açılı kısmının malzeme içerisinde ilk girişinden tam delik çağına ulaşınca kadar olduğu kısımdır ve kuvvet ve torkta dik bir artış gözlemlenir. İkinci aşamada kompozitin malzeme kalınlığı boyunca delinmesidir. Kuvvet değerleri belirli bir çizgide kararlı değişim gösterir ve üçüncü aşama ise yine açılı kısmın malzemeyi terk edişine kadar olan bölümdür. Takımla malzeme arasındaki temas giderek azalacağı için kuvvet değeri de dikey bir azalmayla başlangıç seviyesine geri dönmektedir.

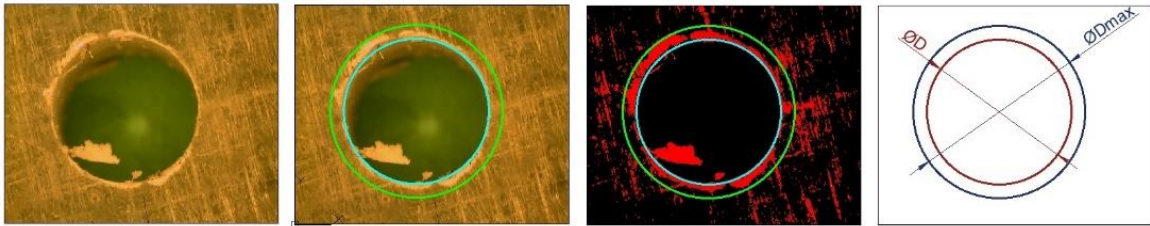


Şekil 3. İtme kuvveti ölçümü akış şeması

Delaminasyon, tabakalı üretilen kompozitlerin delinmesi esnasında meydana gelen en önemli hasar çeşididir. Kompozitlerin delinmesi esnasında iş parçası üzerindeki delik giriş ve çıkışlarında sıkça görülmektedir. Delik etrafında oluşan delaminasyon faktörünü belirlemek için, delaminasyon bölgesindeki maksimum çapın (D_{max}) bulunması gerekmektedir. Delaminasyon faktörü (D_m) Şekil 4'ten de görüleceği üzere, delme esnasında hasar bölgesinde oluşan maksimum hasar çapının (D_{max}) matkap çapına (D) oranlanmasıyla hesaplanan sayısal bir değerdir. Delaminasyon faktörü aşağıdaki formülle belirlenmektedir (Kavad ve ark., 2014; Ceritbinmez ve ark., 2020).

$$D_m = \frac{D_{max}}{D} \quad (1)$$

Bu faktör, kompozit malzemelerin delik delme işlemlerinde oluşan yüzey hasarlarının değerlendirilmesi için önemli bir parametredir (Osmond ve ark., 2021). Kompozit malzemelerde yapılan talaşlı imalat işlemlerinde oluşan yüzey hasarları iş parçası işleme kalitesinin değerlendirilmesi için önemli bir etkidir (Ceritbinmez ve ark., 2020; Zitoun ve ark., 2010). Daha büyük delaminasyon faktörü, nominal matkap çapına göre daha fazla hasarı gösterir (Bilge ve ark., 2017). Numunelerin delaminasyon hasarı, iki delaminasyon faktörü (her yüzey için bir tane) hesaplanarak ölçülmüş ve ortalaması alınmıştır (Osmond ve ark., 2021).



Şekil 4. Delaminasyon hasarının ölçülme aşamaları

Delinmiş kompozitlerin delaminasyon ve delik yüzey pürüzlülük ölçümü görülmektedir. Delik yüzey pürüzlülüğü delik içerisinde dört noktadan ölçüm yapılarak ortalaması alınmıştır.



(a)

(b)

Şekil 5. (a) Delaminasyon ölçümü, (b) Delik yüzey pürüzlülük ölçümü

2.2. Deneysel Tasarım

Delme deneyleri, Taguchi L_{27} Ortogonal dizi kullanılarak farklı matkap takım tipleri ve ağırlıkça ÇDKNT yüzdesi ile CETPK üzerinde gerçekleştirilmiştir. Çalışmada üç seviyeli olarak seçilen giriş parametrelerinin diğer ikisi; kesme hızı ve ilerlemedir. Bu parametreler ve seviyeleri Tablo 1'de gösterilmektedir.

Girdi parametrelerinin ve sürecin performanslarının matematiksel ilişkilerinin karmaşıklığı ve doğrusal olmadığı varsayılarak, her bir parametre için üç varyasyon seviyesi seçilmiştir. Parametrelerin değerleri seçilirken, literatür önerileri, makine ve aletlerin teknik ve teknolojik sınırlamaları, iş parçası malzemesinin özellikleri ve önceki deneysel araştırmalar dikkate alınmıştır.

Tablo 1. Faktörler ve seviyeleri

Faktörler	Sembol	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
Takım tipi	TT	HSS	Karbür	TialN
Ağırlıkça % ÇDKNT	W%	0	0,5	1
Kesme hızı	V	25	50	75
İlerleme	f	0,1	0,15	0,2

Yapılan çalışmada faktörlerin sayısı ve seviyeleri göz önüne alınarak, deneyleri gerçekleştirmek için Taguchi'nin L_{27} ortogonal dizisi Tablo 2'de gösterildiği gibi dizayn edilmiştir.

Tablo 2. Taguchi L_{27} Deney tasarımı ve kodlanmış değerler

Deney. No	TT	W%	V	f	Deney No	TT	W%	V	f
1	1	1	1	1	15	2	2	3	1
2	1	1	2	2	16	2	3	1	3
3	1	1	3	3	17	2	3	2	1
4	1	2	1	2	18	2	3	3	2
5	1	2	2	3	19	3	1	1	1
6	1	2	3	1	20	3	1	2	2
7	1	3	1	3	21	3	1	3	3
8	1	3	2	1	22	3	2	1	2
9	1	3	3	2	23	3	2	2	3
10	2	1	1	1	24	3	2	3	1
11	2	1	2	2	25	3	3	1	3
12	2	1	3	3	26	3	3	2	1
13	2	2	1	2	27	3	3	3	2
14	2	2	2	3					

Çalışmada süreç değişkenlerinin delme performansı üzerindeki etkilerini incelemek için Taguchi tekniği kullanılmıştır. Taguchi yöntemi, uygulandığı ürünlerin ve operasyonların kalite optimizasyonu için basit ve etkili bir tekniktir. Yöntem ile daha az sayıda deneysel çalışma imkânı olduğu için çalışmalarda çok

fazla sayıda tercih edilen bir yöntemdir. Taguchi yöntemi kalite özelliklerini belirlemek için sinyal-gürültü oranı adı verilen istatistiksel bir performans ölçüsü kullanır. S/N oranı sayesinde hem parametrelerin ortalaması, hem de parametreler arasında meydana gelen değişkenler ortaya çıkar. S/N oranı, ortalamanın (Sinyal) standart sapmaya (Gürültü) oranıdır. Optimizasyonu yapılacak parametrenin özelliklerine göre S/N oranı, “daha küçük daha iyi”, “daha büyük daha iyi” ve “nominal (Ortalama) değer en iyidir” şeklinde üç farklı özellikte kullanılır. Bu çalışmada tüm çıktılarının minimum değerleri en iyiyi verdiği için denklem 2 de verilen daha küçük daha iyidir prensibi kullanılmıştır.

$$\frac{S}{N} = -10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right] \quad (2)$$

Burada amaç S/N oranını maksimize etmektir. Dolayısıyla değerlendirmelerde, her bir parametre için hesaplanan ortalama S/N oranları içinde en büyük S/N oranına sahip seviye, en iyi sonucu belirlemede kullanılmaktadır

2.3. CRITIC Metodu Kullanarak Ağırlıkların Belirlenmesi

Çok amaçlı karar verme problemi, çelişen amaçlara dayalı en iyi alternatifin seçimi ile ilgilidir. Bazı ÇKKV yöntemlerinin sonuçlarının tutarlılığı hala sorgulanabilmektedir (Akçakanat ve ark., 2017). Yapılan çalışmada, kontrol parametrelerini optimize edebilmek için çok kriterli karar verme yöntemlerinden CoCoSo metodu kullanılmıştır. Yönteminin ihtiyaç duyduğu kriter ağırlıklandırması için CRITIC metoduna başvurularak bir sıralama elde edilmiştir.

Objektif ağırlıklandırma yöntemlerinden birisi olan CRITIC metodu, sıralaması yapılacak kriterlerin kendi aralarındaki önemlerinin objektif olarak hesapladığı bir ağırlıklandırma yöntemidir. Yöntem 1995 yılında Diakoulaki ve arkadaşları tarafından önerilen bir tekniktir. Genel olarak karşıtlık ve uyumsuzluğa yoğunlaştığı için korelasyon analizi ve standart sapma kullanılır. Öncelikli olarak normalizasyon parametrelerin maksimumu ya da minimum kriterine göre belirlenir. Minimum yapmak için maliyet yönlü kriter alınır, maksimum yapmak için Fayda yönlü kriter alınır (Denklem 3 ve 4).

$$x_j^* = \max_i \{x_{ij}\}, \quad r_{ij} = \frac{x_{ij} - x_j^-}{x_j^* - x_j^-} \quad \text{Fayda kriterleri} \quad (3)$$

$$x_j^- = \min_i \{x_{ij}\}, \quad r_{ij} = \frac{x_j^* - x_{ij}}{x_j^* - x_j^-} \quad \text{Maliyet Kriterleri} \quad (4)$$

Korelasyon katsayısı ile kriterler arasındaki ilişki katsayısının hesaplanması.

Bu aşamada kriterler arasında normallik testi uygulanır. Test sonucunda dağılım normal ise Pearson korelasyon katsayısı formülü (Denklem 5), veriler non-linear dağılım gösteriyorsa Spearman korelasyon katsayısı formülü (Denklem 6) uygulanır.

$$p_{jk} = \frac{\sum_{i=1}^m (x_{ij}^* - \bar{x}_j) (x_{ik} - \bar{x}_k)}{\sqrt{\sum_{i=1}^m (x_{ij}^* - \bar{x}_j)^2 \sum_{i=1}^m (x_{ik} - \bar{x}_k)^2}} \quad (5)$$

$$p_{jk} = 1 - \frac{6 \cdot \sum d_r^2}{n(n^2 - 1)} \quad (6)$$

Bu aşamada her bir kriter için zıtlık yoğunluğu (contrast intensity) ve çelişkilerden (conflicts) oluşan bilgi miktarını temsil eden c_j değeri hesaplanır (Denklem 7). C_j bilgi miktarı, normalize edilmiş karar matrisinin sütun değerlerinin standart sapması (σ_j) da kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$C_j = \sigma_j \sum_{k=1}^n 1 - p_{jk} \quad (7)$$

Son aşamada kriterlere ait ağırlıklar aşağıdaki formülle hesaplanır.

$$w_j = \frac{C_j}{\sum_{k=1}^n c_k} \quad (8)$$

2.4. CoCoSo Metodu

CoCoSo yöntemi (Yazdani ve ark., 2019) tarafından geliştirilen CoCoSo metodu Simple Additive Weighting (SAW) ve Exponically Weighted Product (EWP) metotlarının birleşiminden meydana gelmiştir ve 5 aşamadan oluşmaktadır:

1. Aşama: Deney sayısını satırların oluşturduğu, parametrelerin ise satırların oluşturduğu bir karar matrisi oluşturulur.
2. Aşama: Fayda kriterler için denklem (3)'i kullanarak, maliyet kriterleri için ise eşitlik (4) kullanarak normalize karar matrisi oluşturulur.
3. Aşama: Ağırlıklı karşılaştırılabilirlik dizisi toplamı S_i , denklem (9) kullanılarak bulunur. Her bir alternatif için karşılaştırılabilirlik dizilerinin güç ağırlığının toplamı P_i ise denklem (10) kullanılarak bulunur.

$$S_i = \sum_{j=1}^n w_j r_{ij} \quad (9)$$

$$P_i = \sum_{j=1}^n (r_{ij})^{w_j} \quad (10)$$

3. Aşama: Alternatiflerinin değerlendirme stratejileri denklem (11, 12 ve 13)'ye göre bulunur.

$$k_{ia} = \frac{S_i + P_i}{\sum_{i=1}^m (S_i + P_i)} \quad (11)$$

$$k_{ib} = \frac{S_i}{\min S_i} + \frac{P_i}{\min P_i} \quad (12)$$

$$k_{ic} = \frac{\lambda S_i + (1 - \lambda)(P_i)}{(\lambda \max S_i + (1 - \lambda) \max P_i)} \quad (13)$$

4. Aşama: Tüm alternatiflerin sıralaması değerlere göre yüksekten düşüğe doğru belirlenir (Denk. 14)

$$k_i = (k_{ia} k_{ib} k_{ic})^{\frac{1}{3}} + \frac{1}{3} (k_{ia} + k_{ib} + k_{ic}) \quad (14)$$

3. Sonuçlar ve Tartışma

Gerçekleştirilen deneyler sonucu elde edilen yüzey pürüzlülük, ortalama delaminasyon ve itme kuvvetiyle bu bulgulara ait Minitab programıyla hesaplanan sinyal gürültü değerleri Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. R_a, D_m, F_t deney sonuçları ve S/N oranları

Ex. No	R _a	S/N R _a	D _m	S/N D _m	Kuvvet	S/N Ft
1	6,850	-16,71	1,167	-1,34	66,53	-36,46
2	6,593	-16,38	1,185	-1,48	79,14	-37,97
3	6,479	-16,23	1,256	-1,98	86,87	-38,78
4	5,672	-15,07	1,206	-1,62	79,78	-38,04
5	5,273	-14,44	1,208	-1,64	80,73	-38,14
6	6,584	-16,37	1,160	-1,29	59,93	-35,55
7	4,950	-13,89	1,257	-1,98	88,14	-38,90
8	5,463	-14,75	1,157	-1,26	59,34	-35,47
9	5,672	-15,07	1,179	-1,43	68,86	-36,76
10	7,287	-17,25	1,135	-1,10	50,66	-34,09
11	7,097	-17,02	1,161	-1,29	61,94	-35,84
12	6,622	-16,42	1,180	-1,44	71,86	-37,13
13	6,004	-15,57	1,162	-1,30	62,95	-35,98
14	6,156	-15,79	1,172	-1,38	67,2	-36,55
15	6,612	-16,41	1,099	-0,82	44,24	-32,92
16	5,235	-14,38	1,181	-1,45	75,01	-37,50
17	5,786	-15,25	1,128	-1,04	45,01	-33,07
18	5,139	-14,22	1,131	-1,07	44,5	-32,97
19	7,315	-17,28	1,246	-1,91	84,77	-38,56
20	7,040	-16,95	1,287	-2,19	97,24	-39,76
21	7,287	-17,25	1,312	-2,36	101,46	-40,13
22	6,508	-16,27	1,270	-2,07	93,42	-39,41
23	6,422	-16,15	1,277	-2,13	95,13	-39,57
24	7,239	-17,19	1,185	-1,48	78,91	-37,94
25	5,947	-15,49	1,332	-2,49	105,69	-40,48
26	6,584	-16,37	1,204	-1,61	79,43	-38,00
27	6,669	-16,48	1,239	-1,86	81,86	-38,26

Tablo 2’de verilen Taguchi L_{27} ortogonal deney tasarımına göre deneyler yapılmış ve Kontrol faktörlerinin seviyeleri aşağıda Tablo 6 de verilen yüzey pürüzlülük, ortalama delaminasyon değeri ve kuvvet değerleri elde edilmiştir. Çıktıların tamamı için en küçük sonuçlar en iyi değerleri temsil etmektedir. Deneylerden elde edilen ölçümlere göre her bir deney sonucu birbirinden bağımsız olarak, en düşük yüzey pürüzlülük değeri $R_a = 4,950 \mu m$ ve $-13,89$ S/N oranı ile $A_1B_3C_1D_3$ şartlarını sağlayan 7 numaralı deneyde, en düşük delaminasyon değeri $D_m = 1,099$ ve $-0,82$ S/N oranı ile $A_2B_2C_3D_1$ şartlarını sağlayan 15 numaralı deneyde ve en düşük itme kuvveti $F_t = 44,24$ N ve $-32,92$ S/N oranı ile $A_2B_2C_3D_1$ şartlarını sağlayan 15 no’lu deneyde elde edilmiştir.

3.3. ANOVA Analizi

ANOVA, genellikle girdi parametrelerinin yanıtlar üzerindeki etkisini analiz etmek için kullanılan istatistiksel bir yöntemdir. Modelin geçerliliğini doğrulamak için ANOVA yapılmıştır. Tahmin modellerinin istatistiksel önemi, "P" olasılık değeri ve "F" Fisher değeri ile değerlendirilir. P değeri 0,05'ten büyükse ($P > 0,05$), çalışılan parametre anlamsız, diğer tarafta ($P < 0,05$) ise anlamlı kabul edilir (Haoues ve ark). Tablo 4’de tek değişkenli varyans analizi (ANOVA) sonuçları bütün yanıtlar için toplu halde gösterilmektedir. TT, W%, V ve F_t 'nin, çıkış parametreleri olan R_a , D_m ve F_t için ANOVA sonuçları %95'lik bir güven düzeyiyle tahmin edilmiştir. Her çıkış parametresi için serbestlik derecesi değeri (FD) toplam kareler (SS), ortalama kareler (MS), olasılık değeri (P) ve Fisher değeri (F) Tablo'da verilmiştir.

ANOVA sonuçlarından en çok etkilenen parametrenin takım tipi (TT) ve %ÇDKNT olduğu ilerleme ve hız değerinin ise bu deneyde çıktılar üzerinde daha az etkisi olduğu tespit edilmiştir. Yüzey pürüzlülüğüne etki eden en önemli parametre % 51,62 oranıyla kompozit içerisine katılan nano malzeme oranı, delaminasyon ve itme kuvvetine ise sırasıyla olmak üzere %60,95 ve % 62,00 oranıyla Takım çeşidi olduğu görülmektedir. Bütün çıktı ANOVA tablosunda Yüzey pürüzlülüğündeki kesme hızı haricinde bütün P değerlerinin < 0.05 anlamlı çıktığı görülmüştür. ANOVA'ya dayanarak, uygun seçilen takım tipi ve kompozit içine katılacak %ÇDKNT oranının kontrol edilmesi kalite ve üretkenlik değerlerini artırarak iyileştirebileceği görülmektedir (Fedai ve ark., 2022).

Tablo 4. R_a , D_m ve F_t için Varyans Analizi (ANOVA)

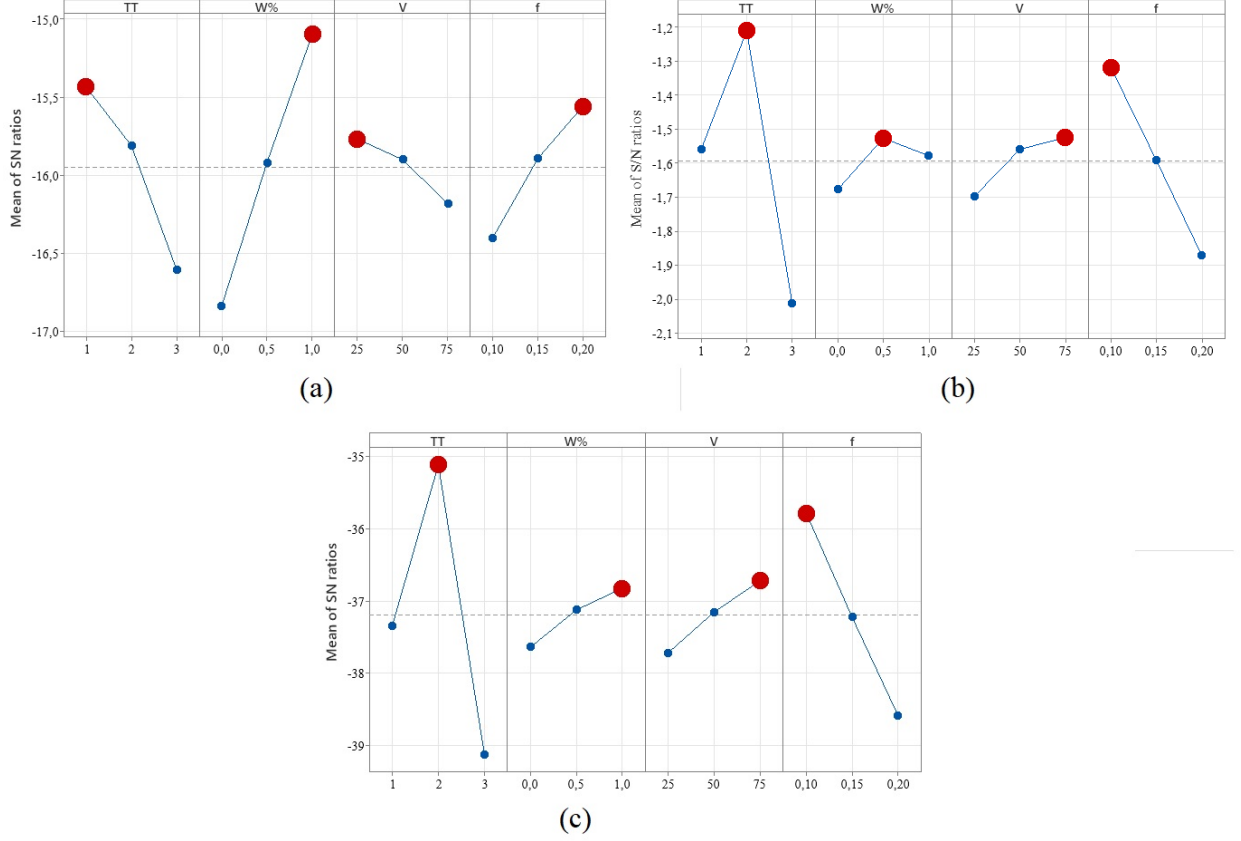
	Source	DF	Contr.	SeqSS	F-Value	P-Value
Yüzey Pürüzlülüğü	TT	2	24,23%	3,2376	23,87	0,00
	W%	2	51,62%	6,8978	50,85	0,00
	V	2	2,89%	0,3858	2,84	0,084
	f	2	12,13%	1,6207	11,95	0,00
	Error	18	9,14%	1,2209		
	Total	26	100,00%			
		S=0,260	R ² =90,86%		R ² (adj)=86,80%	
Delaminasyon	TT	2	0,056451	60,95%	113,57	0,00
	W%	2	0,002068	2,23%	4,16	0,033
	V	2	0,002934	3,17%	5,9	0,011
	f	2	0,026699	28,82%	53,72	0,00
	Error	18	0,004473	4,83%		
	Total	26	0,092625	100,00%		
		S=0,0158	R ² =95,17%		R ² (adj)=93,02%	
İtme Kuvveti	TT	2	4819,8	62,00%	188,98	0,00
	W%	2	164,3	2,11%	6,44	0,008
	V	2	264,6	3,40%	10,38	0,001
	f	2	2295,5	29,53%	90,01	0,00
	Error	18	229,5	2,95%		
	Total	26	7773,8	100,00%		
		S=3,571	R ² =97,05%		R ² (adj)=95,73%	

3.4. S/N Oranı Analizi

Kontrol faktörlerine ve seviyelerine göre tüm çıktılar için hesaplanan S/N grafikleri Şekil 6'da görülmektedir. Yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar tüm çıktılar için en küçük en iyidir prensibine göre değerlendirilmiştir. Buna göre optimum kesme koşulları, yüzey pürüzlülüğü için Şekil 7a'ya göre $A_1B_3C_1D_3$ (TT: HSS takım, %W: %1, V:25 m/dk, f:0,2 mm/dev) şartlarında, delaminasyon için Şekil 7b'ye göre $A_2B_2C_3D_1$ (TT: Karbür takım, %W: %0,5, V:75 m/dk, f:0, mm/dev) şartlarında, Şekil 7c'ye göre $A_2B_3C_3D_1$ (TT: Karbür takım, %W: %1, V:75 m/dk, f:0,1 mm/dev) şartlarında meydana geldiği görülmektedir. Yüzey pürüzlülüğü için HSS, delaminasyon ve itme kuvveti için Karbür, takım en iyi sonuçları vermiştir. % ÇDKNT değerlerinin artması R_a , F_t ve kısmen D_m değerlerinde iyileşmeye neden olmuştur. Tablolardan hız değerindeki düşüş R_a değerinde bir kötüleşmeye sebep olurken hızdaki artış F_t kuvvetinin de artmasına sebep olmaktadır. İlerleme azalması D_m ve F_t değerlerini olumsuz yönde etkilerken artışı R_a 'da iyileşmeye neden olmaktadır. Birçok makalede, proses parametrelerinin, ilerleme hızının ve kesme hızının kesme kuvvetleri ve ilişkili hasar üzerindeki etkilerini incelenmiştir. Hemen hemen tüm çalışmalar, hem itme kuvvetinin hem de delaminasyonun ilerleme hızıyla arttığını ortaya koydu (Biruk-Urban ve ark., 2022; Ünüvar ve ark., 2022). bazı çalışmalarda ise aksine kesme hızı değiştikçe farklı davranışlar gözlemlenmiştir (Kilickap, 2010). Ancak, bazı araştırmacılar yüksek hızlı

delme sırasında azalma olduğunu fark etmişlerdir (Karnik ve ark., 2008; Rubio ve ark., 2008).

Şekilden elde edilen sonuca göre, karbür takımının delaminasyonu azalttığı görülmektedir. Bu durum kaplamalı takımların benzer özellikler gösterdiği şeklinde açılarak literatürle paralellik göstermektedir (Kilickap, 2010).



Şekil 6. R_a , D_m ve F_t değerleri için Taguchi S/N oranı grafiği

Tablo 5'te yüzey pürüzlülüğü, delaminasyon ve itme kuvvet değerleri için S/N yanıt sonuçları tablosu görülmektedir. Tabloda seviyeler arasındaki değerlerin farkları alınarak Delta değerleri bulunmuştur. Elde edilen delta değerleri büyüklüklerine göre sıralaması yapılarak rank oranları bulunur. Bu sıralamada kontrol parametrelerinin çıktı üzerlerindeki etki değerini göstermektedir. Tablo 5'teki rank sıralamasına göre yüzey pürüzlülüğü için en etkili parametrenin 1,73 değeriyle yüzde karbon nanotüp katkı oranı olurken en etkisiz parametre ise 0,41 değeriyle kesme hızı olmuştur. Delaminasyon ve itme kuvvetleri içinde benzer oranlarla takım çeşidi en etkisiz parametrenin ise yüzde karbon nanotüp katkı oranı olduğu görülmektedir.

Tablo 5. R_a , D_m ve F_t değerleri için S/N yanıt sonuçları tablosu

Yüzey Pürüzlülüğü					Delaminasyon				İtme Kuvveti			
Level	TT	W%	V	f	TT	W%	V	f	TT	W%	V	f
1	-15,4	-16,8	-15,8	-16,4	-1,56	-1,68	-1,7	-1,32	-37,34	-37,64	-37,71	-35,78
2	-15,8	-15,9	-15,9	-15,9	-1,21	-1,53	-1,56	-1,59	-35,12	-37,12	-37,15	-37,22
3	-16,6	-15,1	-16,2	-15,6	-2,01	-1,58	-1,52	-1,87	-39,12	-36,82	-36,71	-38,57
Delta	1,17	1,73	0,41	0,84	0,801	0,151	0,174	0,553	4,01	0,81	1	2,79
Rank	2	1	4	3	1	4	3	2	1	4	3	2

3.3. CRITIC Ağırlıklandırılmış Taguchi S/N CoCoSo Metoduyla Parametrelerin Optimizasyonun

Verilerin değerlendirme kriterlerinin ağırlıkları CRITIC Metodu ile hesaplanacaktır. Tüm kriterler minimizasyon yönlü olduğundan CRITIC metodunun ilk adımında karar matrisi Denklem (4)'ten yararlanılarak normalize edilir. Tablo 6'da verilen normalize karar matrisi, seçilen kriterlerinin fayda ve maliyet özellikleri dikkate alınarak sırasıyla denklem (2) ve (3)'ün yardımıyla hesaplanmıştır.

Tablo 6. Verilerin normalize edilmesi.

Ex. No	R_a	D_m	F_t	Ex. No	R_a	D_m	F_t
1	0,197	0,708	0,637	15	0,297	1	1
2	0,305	0,63	0,432	16	0,88	0,647	0,499
3	0,353	0,328	0,306	17	0,647	0,878	0,987
4	0,695	0,543	0,422	18	0,751	0,864	0,939
5	0,863	0,534	0,406	19	0	0,368	0,34
6	0,309	0,739	0,745	20	0,116	0,194	0,138
7	1	0,325	0,286	21	0,012	0,088	0,069
8	0,783	0,754	0,754	22	0,341	0,269	0,2
9	0,695	0,659	0,599	23	0,378	0,236	0,172
10	0,012	0,847	0,896	24	0,032	0,63	0,436
11	0,092	0,736	0,712	25	0,578	0	0
12	0,293	0,655	0,551	26	0,309	0,551	0,427
13	0,554	0,733	0,696	27	0,273	0,402	0,388
14	0,49	0,687	0,626				

Elde edilen dağılımdan Korelasyon katsayıları hesaplanır. Kriterlere ait standart sapmalar hesaplanıp adım 4'te yer alan Denklem 7 kullanılarak C_j değerleri hesaplanmıştır. Buna göre 27 farklı kriterin verdikleri bilgilerle ortaya koydukları ağırlıklarıyla, her bir değerlendirme kriterine ait bilgi miktarını temsil eden C_j değerleri, Eşitlik (5) ve Eşitlik (6) doğrultusunda, standart sapma ve korelasyon katsayı değerleri de dikkate alınarak hesaplanmış ve elde edilen bulgular Tablo 7'de sunulmuştur. Tablo 7'de gösterildiği üzere, CRITIC metoduyla hesaplanan kriter ağırlıklarına göre en önemli kriter 0,515 değeri ile yüzey pürüzlülük değeri ve bu değeri sırasıyla 0,253 değeri ile delme kuvveti ve 0,233 değeri ile delaminasyon izlemektedir.

Tablo 7. σ_j , C_j , w_j değerleri tablosu

	R_a	D_m	Kuvvet
σ_j	0,294	0,256	0,278
C_j	0,519	0,234	0,255
w_j	0,515	0,233	0,253

3.4. CRITIC Ağırlıklandırılmış Taguchi S/N CoCoSo Metoduyla Parametrelerin Optimizasyonun

CoCoSo metoduna göre parametrelerin sıralanması için maliyet kriterlerine göre denklem 8 kullanılarak normalize karar matrisi oluşturulmuştur. Bu matris kullanılarak denklem 9 ve 10 yardımıyla S_i ve P_i değerleri hesaplanmıştır. Elde edilen S_i ve P_i değerleriyle, alternatiflerin değerlendirme stratejileri (k_{ia} , k_{ib} , k_{ic}) Denklem 11, 12 ve 13'e göre hesaplanır. Bulunan bu üç değerlendirme puanı, denklem 14 kullanılarak türetilen diğer seçeneklerin karşılaştırmalı ağırlıklarının (k_i) oluşturulması için kullanılır. Tablo 8'de alternatiflerin değerlendirme stratejileri (k_{ia} , k_{ib} , k_{ic}) ile CoCoSo endeksi (k_i) verilmiştir. Tablodaki endeksine göre en büyük en iyidir prensibine göre sıralama yapılarak S/N oranları da gösterilmektedir. Sıralamaya göre 18 numaralı deney en iyi sonuçları verirken 21 nolu deneyde de 27. Sıra ile en kötü sonucu vermektedir.

Tablo 9, Tablo 8'deki alternatiflerin k_i değerleri kullanarak hesaplanan yüzey pürüzlülüğü, delaminasyon ve itme kuvveti için ANOVA sonuçlarını vermektedir. Tablo 9'a göre, yüzey pürüzlülüğü, delaminasyon ve itme kuvvetinin maksimizasyonu aynı anda dikkate alındığında, TT faktörü, %61,66 ile en önemli katkıyı sağlarken %W 30,72'lik katkı sağlamaktadır. Diğer kontrol parametrelerinin katkısı önemsiz düzeydedir. Takım tipi ve ÇDKNT katkı oranında P değerlerinin <0.05 anlamlı çıktığı görülmüştür. Diğer parametrelerde istatistiki bakımdan anlamlı sonuçlar vermektedir. $S=0.676$, $R^2=95,54\%$, $R^2(\text{adj})=92,51\%$

Tablo 8. CoCoSo metoduna göre performans sıralaması ve Taguchi S/N oranı

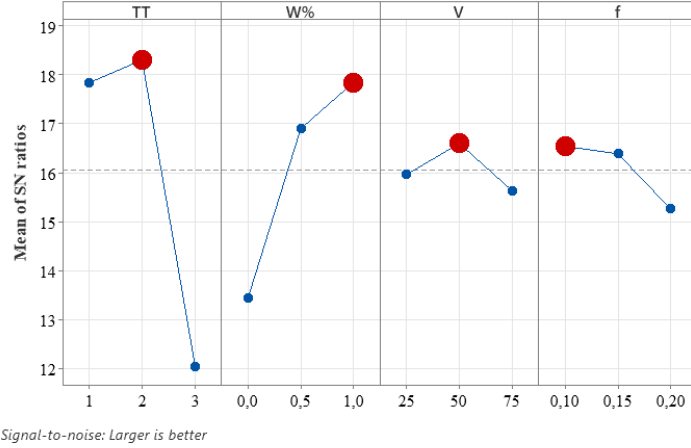
Deney No	S _i	P _i	k _{ia}	k _{ib}	k _{ic}	k _i	S/N	Sıralama
1	0,427	2,248	0,037	12,65	3,35	6,51	16,27	14
2	0,413	2,25	0,037	12,33	3,33	6,38	16,1	15
3	0,336	2,098	0,034	10,38	3,05	5,51	14,82	19
4	0,59	2,501	0,043	16,69	3,87	8,27	18,35	10
5	0,671	2,588	0,045	18,63	4,08	9,09	19,17	5
6	0,519	2,407	0,04	14,95	3,66	7,52	17,53	12
7	0,662	2,498	0,044	18,31	3,96	8,91	18,99	7
8	0,769	2,749	0,049	21,06	4,41	10,16	20,14	3
9	0,662	2,615	0,045	18,47	4,1	9,05	19,13	6
10	0,43	2,037	0,034	12,43	3,09	6,28	15,96	16
11	0,399	2,142	0,035	11,87	3,18	6,13	15,75	18
12	0,442	2,298	0,038	13,06	3,43	6,7	16,53	13
13	0,631	2,581	0,044	17,72	4,02	8,73	18,82	9
14	0,57	2,498	0,042	16,23	3,84	8,09	18,16	11
15	0,638	2,536	0,044	17,82	3,97	8,74	18,83	8
16	0,729	2,679	0,047	20,07	4,27	9,72	19,75	4
17	0,787	2,766	0,049	21,48	4,45	10,33	20,29	2
18	0,825	2,814	0,05	22,41	4,56	10,73	20,61	1
19	0,172	1,554	0,024	5,95	2,16	3,39	10,6	25
20	0,14	1,619	0,024	5,31	2,2	3,17	10,02	26
21	0,044	1,18	0,017	2,56	1,53	1,78	4,99	27
22	0,289	1,977	0,031	9,16	2,84	4,94	13,88	22
23	0,293	1,961	0,031	9,23	2,82	4,96	13,91	21
24	0,273	1,879	0,03	8,68	2,7	4,69	13,42	23
25	0,298	0,754	0,015	7,74	1,32	3,55	11,01	24
26	0,395	2,224	0,036	11,9	3,28	6,19	15,84	17
27	0,332	2,109	0,034	10,31	3,06	5,49	14,79	20

Tablo 9. CoCoSo için ANOVA analizi

Source	DF	Contr.	SeqSS	F-Value	P-Value
TT	2	61,66%	93,049	101,62	0,000
W%	2	30,72%	46,354	50,62	0,000
V	2	0,89%	1,34	1,46	0,258
f	2	1,28%	1,928	2,11	0,151
Error	18	5,46%	8,241		
Total	26	100,00%	100,00%		
S=0,676		R ² =95,54%		R ² (adj)=92,51%	

CoCoSo metoduna göre elde edilen Taguchi S/N oranı grafiğinden, yüzey pürüzlülüğü, delaminasyon ve itme kuvveti için aynı anda optimum değerleri sağlayan deney parametrelerinin Şekil 7'ye göre A₂B₃C₂D₁ şeklinde gerçekleştiği görülmektedir. Bu parametreler deney sıralamasındaki 17 no'lu deney karşılık gelmektedir. Buna göre Karbür takımla delinen, %1 ÇDKNT katkı oranıyla üretilen polimerin 50 m/dakika kesme hızıyla kesilmesi ve 0,1 mm/dev ile ilerlemesi ile yapılan deney şartları üç çıktı için

elde edilen optimum parametreler olarak karşımıza çıkmaktadır. 17. No'lu deney sonuçları ise $R_a=5,786$ μm , $D_m=1,128$ ve $F_t= 45,01$ N değerleridir.



Şekil 7. CoCoSo için için Taguchi S/N oranı grafiği

Tablo 10'da, S/N Oranları için Taguchi COCOSO Yanıt Tablosu verilmiştir. Tablodan kontrol parametrelerinin çıktılara etkisi görülmektedir. Tabloya göre takım tipi 2. Seviyedeki 18,3 ve 6,25 delta değeriyle en etkili parametredir. Takım tipini 4,39 değeriyle % ÇDKNT oranı takip etmekte diğer parametrelerin etkisi çok daha düşük düzeyler olduğu görülmektedir.

Table 10. S/N Oranları için Taguchi COCOSO Yanıt Tablosu

Level	TT	Wt%	V	f
1	17,83	13,45	15,96	16,54
2	18,3	16,9	16,6	16,38
3	12,05	17,84	15,63	15,26
Delta	6,25	4,39	0,97	1,28
Rank	1	2	4	3

4. Sonuçlar

Günümüz nanokompozitleri, genellikle işlenmesini gerektiren çeşitli mühendislik sektörlerinde yaygın uygulamalar bulmuştur. Bu çalışmada, çok duvarlı karbon nanotüpler takviyeli kompozitler, kuru delme koşulları altında farklı matkap türleri ile delme işlemine tabi tutulmuştur. ÇDKNT oranı, Matkap tipi, ilerleme ve kesme hızı gibi farklı delme parametrelerinin, delik hasarında meydana gelen delaminasyon faktörü, yüzey pürüzlülüğü ve itme kuvveti üzerindeki etkilerini araştırmak için 27 deneyden oluşan üç seviyeli Taguchi L_{27} ortogonal deneysel bir çalışma yapılmıştır. Delme parametrelerinin optimal kombinasyonunu belirlemek için, yakın zamanda geliştirilmiş birçok kriterli karar verme araçları arasından CoCoSo metodu kullanılmıştır. Bu çalışmada, karar verme sürecinde özneliği önlemek için çok kriterli karar verme yöntemlerinin ağırlıklandırılmasında CRITIC metodu kullanılmıştır. Çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır.

- Yapılan L_{27} deney sonuçlarına göre en düşük $R_a=4,95$ μm değeri ile 7 numaralı deneyde, en düşük Delaminasyon $D_m=1,099$ değeriyle 15 no'lu deneyde ve en düşük itme kuvveti $F_t=44,24$ N değeri ile yine 15 no'lu deneyden elde edilmiştir.
- ANOVA analizinde Yüzey pürüzlülüğü için en önemli katkı oranı %51,62 ile %ÇDKNT oranı etki ederken Delaminasyon için %60,95 ve itme kuvveti içinde % 62,00 ile Takım tipi etkin olmuştur.
- S/N oranlarına göre optimum deney şartları yüzey pürüzlülüğü için $A_1B_3C_1D_3$ (TT: HSS takım, %W: %1, V:25 m/dk, f:0,2 mm/dev) şartlarında, delaminasyon için $A_2B_2C_3D_1$ (TT: Karbür takım, %W: %0,5, V:75 m/dk, f:0, mm/dev) şartlarında, $A_2B_3C_3D_1$ (TT: Karbür takım, %W: %1, V:75 m/dk, f:0,1 mm/dev) şartlarında meydana geldiği görülmüştür.
- CRITIC metoduyla hesaplanan kriter ağırlıklarına göre en önemli kriter 0,515 değeri ile yüzey pürüzlülük değeri ve bu değeri sırasıyla 0,253 değeri ile delme kuvveti ve 0,233 değeri ile delaminasyondur.
- CoCoSo metoduna göre yapılan sıralamaya göre 18 numaralı deney en iyi sonuçları verirken 21 no'lu deneyde de 27. sıra ile en kötü sonucu vermektedir.
- CRITIC Ağırlıklandırılmalı Taguchi S/N tabanlı CoCoSo metodunda optimum değerleri sağlayan deney parametrelerinin $A_2B_3C_2D_1$ şeklinde gerçekleştiği görülmektedir.

Çıkar Çatışması Beyanı

Makale yazarı herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Araştırmacıların Katkı Oranı Beyan Özeti

Yazar makaleye %100 oranında katkı sağlamış olduğunu beyan eder.

Kaynakça

- Akçakanat Ö., Eren H., Aksoy E., Ömürbek V. Performance evaluation by entropy and WASPAS methods at banking sector. SDU the Journal of Faculty of Economics and Administrative Sciences 2017; 22(2): 285-300.
- Anand G., Alagumurthi N., Elansezhian R., Palanikumar K., Venkateshwaran N. Investigation of drilling parameters on hybrid polymer composites using grey relational analysis, regression, fuzzy logic, and ANN models. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering 2018; 40: 1-20.
- Barua A., Jeet S., Bagal DK., Satapathy P., Agrawal PK. Evaluation of mechanical behavior of hybrid natural fiber reinforced nano sic particles composite using hybrid Taguchi-CoCoSo method. International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering 2019; 8(10): 3341-3345.

- Bilge T., Motorcu R., Ivanov A. Kompakt laminat kompozit malzemenin tungsten karbür takımlarla delinmesinde delaminasyon faktörünün değerlendirilmesi. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi 2017; 23(4): 427-436.
- Biruk-Urban K., Bere P., Józwiak J., Lelęć M. Experimental Study and Artificial Neural Network Simulation of Cutting Forces and Delamination Analysis in GFRP Drilling. Materials 2022; 15(23): 8597.
- Ceritbinmez F., Yapıcı A. The effect of drill point angle And MWCNTs doped In drilling of composite materials. academic Perspective Procedia 2020; 3(1): 180-188.
- Chakraborty S., Chakraborty S. A scoping review on the applications of MCDM techniques for parametric optimization of machining processes. Archives of Computational Methods in Engineering 2022;29: 1-22.
- Davim JP., Reis P. Drilling carbon fiber reinforced plastics manufactured by autoclave—experimental and statistical study. Materials design 2003; 24(5): 315-324.
- Davim JP., Reis P., Antonio CC. Experimental study of drilling glass fiber reinforced plastics (GFRP) manufactured by hand lay-up. Composites Science and Technology 2004; 64(2): 289-297.
- Engin KE., Harun Y. Effect of drilling parameters on hole quality in drilling of pultruded GFRP composite material: Surface roughness, thrust force and delamination factor. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi 2023; 12(4): 1573-1580.
- Fedai Y., Basar G., Kirli Akin H. Multi-response optimization in drilling of MWCNTs reinforced GFRP using grey relational analysis. Tehnički Vjesnik 2022; 29(3): 742-751.
- Karnik S., Gaitonde V., Rubio JC., Correia AE., Abrão A., Davim JP. Delamination analysis in high speed drilling of carbon fiber reinforced plastics (CFRP) using artificial neural network model. Materials Design 2008; 29(9): 1768-1776.
- Haoues S., Yallese MA. Belhadi S., Chihaoui S., Uysal A. Modeling and optimization in turning of PA66- GF30% and PA66 using multi-criteria decision-making (PSI, MABAC, and MAIRCA) methods: A comparative study, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 2022; 1-21.
- Kavad B., Pandey, A., Tadavi, M., Jakharia H. A review paper on effects of drilling on glass fiber reinforced plastic. Procedia Technology 2014; 14: 457-464.
- Kilickap E. Optimization of cutting parameters on delamination based on Taguchi method during drilling of GFRP composite. Expert Systems with Applications 2010; 37(8): 6116-6122.
- Kumar R., Singh S., Bilga PS., Singh J., Singh S., Scutaru ML., Pruncu CI. Revealing the benefits of entropy weights method for multi-objective optimization in machining operations: A critical review. Journal of Materials Research and Technology 2021; 10: 1471-1492.
- Lin J., Lin C. The use of the orthogonal array with grey relational analysis to optimize the electrical discharge machining process with multiple performance characteristics. International Journal of Machine Tools and Manufacture 2002; 42(2): 237-244.

- Lukic D., Cep R., Vukman J., Antic A., Djurdjev M., Milosevic M. Multi-criteria selection of the optimal parameters for high-speed machining of aluminum alloy Al7075 thin-walled parts. *Metals* 2020; 10(12): 1570.
- Mahesh GG., Kandasamy J. Experimental investigations on the drilling parameters to minimize delamination and taperness of hybrid GFRP/Al₂O₃ composites by using ANOVA approach. *World Journal of Engineering* 2023; 20(2): 376-386.
- Osmond R., Mollahoseini Z., Singh J., Gautam A., Seethaler R., Golovin K., Milani AS. A group multicriteria decision making with ANOVA to select optimum parameters of drilling flax fibre composites: a case study. *Composites Part C: Open Access* 2021; 5: 100156.
- Palanikumar K., Latha B., Senthilkumar V., Davim JP. Analysis on drilling of glass fiber–reinforced polymer (GFRP) composites using grey relational analysis. *Materials and manufacturing Processes* 2012; 27(3): 297-305.
- Panchagnula KK., Sharma JP., Kalita K., Chakraborty S. CoCoSo method-based optimization of cryogenic drilling on multi-walled carbon nanotubes reinforced composites. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)* 2022; 1-19.
- Paramasivam SSS., Kumaran D., Natarajan H. Taguchi additive ratio assessment (ARAS) method in multicriteria decision making: a case study for treated drill tools performance. *International Journal of Modern Manufacturing Technologies* 2020; 2067-3604.
- Pérez-Salinas C., Castro-Miniguano C., Moya-Moya E., Goyos L. Analysis of surface roughness and delamination factor applied to the drilling of hybrid polymeric composite materials by the Taguchi method. *Materials Today: Proceedings*, online press 2023;
- Rajamurugan T., Shanmugam K., Palanikumar K. Analysis of delamination in drilling glass fiber reinforced polyester composites. *Materials Design* 2013. 45, 80-87.
- Rubio JC., Abrao A., Faria P., Correia AE., Davim JP. Effects of high speed in the drilling of glass fibre reinforced plastic: evaluation of the delamination factor. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 2008; 48(6): 715-720.
- Shanmugam V., Marimuthu U., Rajendran S., Veerasimman A., Basha AM., Majid MSBA., Esmaeely Neisiany R., Försth M., Sas G., Razavi N. Experimental investigation of thrust force, delamination and surface roughness in drilling hybrid structural composites. *Materials* 2021; 14(16): 4468.
- Shokrieh M., Daneshvar A., Akbari S. Reduction of thermal residual stresses of laminated polymer composites by addition of carbon nanotubes. *Materials Design* 2014; 53: 209-216.
- Singh KK., Kumar D. Experimental investigation and modelling of drilling on multi-wall carbon nanotube–embedded epoxy/glass fabric polymeric nanocomposites. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* 2018; 232(11): 1943-1959.

- Tabatabaeian A., Ghasemi AR. The impact of MWCNT modification on the structural performance of polymeric composite profiles. *Polymer Bulletin* 2020; 77(12): 6563-6576.
- Ünüvar A., Koyunbakan M., Bağci M. Optimization and effects of machining parameters on delamination in drilling of pure and Al₂O₃/SiO₂-added GFRP composites. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 2022; 119(1): 657-675.
- Yazdani M., Zarate P., Kazimieras Zavadskas E., Turskis Z. A combined compromise solution (CoCoSo) method for multi-criteria decision-making problems. *Management Decision* 2019; 57(9): 2501-2519.
- Zitoune R., Krishnaraj V., Collombet F. Study of drilling of composite material and aluminium stack. *Composite Structures* 2010; 92(5): 1246-1255.