

Research Article

Received: date: 06.02.2024  
Accepted: date: 04.03.2024  
Published: date: 30.06.2024

# Elyaf Metal Tabakalı (FML) Kompozitlerin Delinmesinde Ortalama İtme Kuvveti ve Delaminasyon Faktörü Üzerinde İşleme Parametrelerinin Etkilerinin Değerlendirilmesi ve ARAS Yöntemiyle Çok Kriterli Optimizasyonu

Ali Rıza Motorcu <sup>1\*</sup>, Ergün Ekici <sup>2</sup>, Gültekin Uzun <sup>3</sup>

<sup>1</sup>Çanakkale Onsekiz Mart University, Department of Industrial Engineering, Çanakkale, Türkiye; armotorcu@comu.edu.tr

<sup>2</sup>Çanakkale Onsekiz Mart University, Department of Industrial Engineering, Çanakkale, Türkiye; ergunekici@comu.edu.tr

<sup>3</sup>Gazi University, Department of Manufacturing Engineering, Ankara, Türkiye; uzun.gultekin@gazi.edu.tr

Orcid: 0000-0002-9129-8935<sup>1</sup> Orcid: 0000-0002-5217-872X<sup>2</sup> Orcid: 0000-0002-6820-8209<sup>3</sup>

\*Correspondence: armotorcu@comu.edu.tr

**Öz:** Bu çalışmada bir Elyaf Metal Laminat (FML) türü olan Karbon Elyaf Takviyeli Alüminyum Laminat (CARALL) kompozitin delinmesinde işleme parametrelerinin ortalama itme kuvveti ve delaminasyon faktörü üzerine etkileri araştırılmış ve çok kriterli olarak optimize edilmiştir. İşlenebilirlik deneyleri Taguchi Metodu L18 ( $1^2 \times 2^3$ ) ortogonal diziyeye göre gerçekleştirilmiştir. İşlenebilirlik deneyleri kontrol faktörleri olarak seçilen kesici takım geometrisi, kesme hızı ve ilerleme miktarı işleme parametrelerinin farklı seviyelerinde kuru olarak yapılmıştır. Bu çalışmanın iki temel motivasyonu bulunmaktadır: birincisi ortalama itme kuvveti ve delaminasyon faktörü üzerinde kontrol faktörlerinin etkilerini ayrı ayrı belirlemek ikincisi ise aynı anda minimum ortalama itme kuvveti ve delaminasyon faktörünü sağlayan optimum işleme parametreleri seviyelerini çok kriterli optimizasyon yöntemi ile belirlemektir. İşleme parametrelerinin çok kriterli optimizasyonu ARAS tekniği ile gerçekleştirilmiştir. ARAS tekniği için ağırlıklandırılmış karar matrislerinin hesaplanmasında kullanılan ağırlıklar Entropi Metodu ile belirlenmiştir. Gerçekleştirilen çok kriterli optimizasyon sonucunda CARALL'ın delinmesinde aynı zamanda minimum ortalama itme kuvveti ve delaminasyon faktörü değerlerinin elde edilmesinde işleme parametrelerinin etki sırası takım geometrisi (%87.60), ilerleme miktarı (%8.39) ve kesme hızı (%0.28) şeklinde olmuştur. Minimum ortalama itme kuvveti ve delaminasyon faktörü değerlerinin elde edilmesi için işleme parametrelerinin optimum seviyeleri standart geometri takım, 100 m/dak kesme hızı ve 0.06 mm/dev ilerleme miktarı olarak belirlenmiştir. **Anahtar Kelimeler:** Elyaf Metal Takviyeli Kompozit (FML); Ortalama itme kuvveti; Delaminasyon faktörü; Taguchi metodu; Optimizasyon; Katkı Oranı Değerlendirmesi (ARAS) Tekniği; Entropi metodu ile ağırlıklandırma

## Evaluation of the Influence of Machining Parameters on Average Thrust Force and Delamination Factor in Drilling Fiber Metal Layer (FML) Composites and Multi-Criteria Optimization with ARAS Method

**Abstract:** In this study, the effects of machining parameters on the average thrust force and delamination factor in drilling Carbon Fiber Reinforced Aluminum Laminate (CARALL) composite, a type of Fiber Metal Laminate

**Citation:** A.R. Motorcu , E. Ekinci and G. Uzun, " Elyaf Metal Tabakalı (FML) Kompozitlerin Delinmesinde Ortalama İtme Kuvveti ve Delaminasyon Faktörü Üzerinde İşleme Parametrelerinin Etkilerinin Değerlendirilmesi ve ARAS Yöntemiyle Çok Kriterli Optimizasyonu", Journal of Statistics and Applied Sciences, no. 9, pp. 29-44, June, 2024, doi:10.52693/jsas.jsas.1432520

(FML), were investigated and optimized with multi-criteria. Machinability tests were carried out according to the Taguchi Method L18 ( $1^2 \times 2^3$ ) orthogonal array test design. Machinability experiments were performed dry at different levels of machining parameters, such as cutting tool geometry, cutting speed, and feed rate, which were selected as control factors. This study has two main motivations: the first is to determine the effects of control factors on the average thrust force and delamination factor separately, and the second is to determine the optimum processing parameter levels that provide the minimum average thrust force and delamination factor simultaneously with the multi-criteria optimization method. Multi-criteria optimization of processing parameters was carried out with the ARAS technique. The weights used in calculating the weighted decision matrices for the ARAS technique were determined by the Entropy Method. As a result of the multi-criteria optimization performed, the order of effect of the machining parameters in obtaining the minimum average thrust force and delamination factor values in the drilling of CARALL was as follows: tool geometry (87.60%), feed amount (8.39%) and cutting speed (0.28%). The optimum levels of the machining parameters were determined as a standard geometry tool, 100 m/min cutting speed, and 0.06 mm/rev feed rate to obtain the minimum average thrust force and delamination factor values.

**Keywords:** Fiber Metal Reinforced Composite (FML), Average thrust force, Delamination factor, Taguchi method, Optimization, Addition Rate Assessment (ARAS) technique, Weighting with Entropy method

## 1. Giriş

Havacılık endüstrisinde uçakların ağırlığını azaltmanın bir yolu olarak, alüminyum ve titanyum alaşımlarına alternatif malzeme arayışları elyaf metal laminatlar (FML) kompozitlerin ortaya çıkmasını sağlamıştır [1]. FML'ler, alternatif ince metal katmanlarından ve elyaf takviyeli epoksi katmanlardan oluşan kompozitlerin otoklav tekniği kullanılarak bir araya getirilmesinden yapılır [2]. FML yapılar genel olarak kullanılan elyaf türüne göre adlandırılır. Karbon elyaf takviyeli alüminyum laminatlar CARALL, cam elyaf alüminyum takviyeli epoksiler GLARE ve Aramid takviyeli alüminyum laminatlar ARALL olarak isimlendirilirler. Bir yolcu uçağında, montaj amacıyla parçaların üzerine bağlantı elemanları için ortalama 1.5-3 milyon arasında delik açılmaktadır. Delme sırasında kompozitlerde delaminasyon sorunu, Al ve Ti gibi metal alaşımlarında çapak oluşmaktadır. Havacılık endüstrisinde jetlerin yaklaşık %60'ı kompozitlerdeki delaminasyondan kaynaklanmaktadır [3,4]. Literatürde geleneksel elyaf takviyeli kompozit yapıların delinmesinde kesici takım geometrisinin [5-9] ve işleme parametrelerinin [10-12] etkileri birçok kişi araştırmacı tarafından değerlendirilmiştir. Fakat FML'lerin delinmesi elyaf ve metal katmanların farklı işlenebilirlik özellikleri nedeniyle daha karmaşıktır. Literatürde FML'nin delinebilirliğini değerlendirmek üzere Ekici vd. CARALL kompozitin delinmesinde delaminasyon oluşumunu farklı hesaplama yaklaşımlarını kullanarak incelemişlerdir [13]. Ekici vd. CARALL kompozitlerin delinmesi üzerine yaptıkları diğer bir çalışmalarında, delme parametreleri ve kesici takım kaplama koşullarının delaminasyon faktörü, yüzey pürüzlülüğü ve itme kuvveti üzerindeki etkilerinin belirlenmesinde Gri İlişkisel Analiz (GRA), ağırlıkları belirlemek için ise Temel Bileşen Analizini (PCA) kullanmışlardır [14]. Giasin vd. 6 mm çapında TiAlN kaplı karbür matkaplar kullanarak tek yönlü (UD), 2B ve 3B kalite GLARE kompozitler üzerinde delme deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Araştırmacılar elyaf yöneliminin kesme kuvvetleri üzerinde hiçbir etkisinin olmadığını ve benzer kesme şartlarında 3B kalitenin yüzey pürüzlülüğünün kalite 2B'ye göre daha yüksek olduğunu belirlemişlerdir. Ayrıca, hem ilerleme miktarının hem de devir sayısının delik kalitesi ve kesme kuvvetleri üzerinde anlamlı bir etkiye sahip olduğunu görmüşlerdir [15]. Park vd. GLARE'in Yüksek Hız Çeliği (HSS), kobalt ve karbür takımlarla delinmesinde delme parametrelerinin (kesme hızı ve ilerleme miktarı) delik yüzeyi kalitesi, delaminasyon boyutu, tork, ve itme kuvvetine etkilerini araştırmışlardır. Çalışmada, ilerleme miktarının malzemenin kesilmemiş kalınlığı üzerindeki girintiyi önemli ölçüde etkilediği ve metal-prepreg ara yüzünde delaminasyonun başlangıcı üzerinde daha büyük bir etkiye yol açtığı belirtilmektedir. İlerleme miktarının artması nedeniyle kesici takımın iş parçasına daha hızlı bir şekilde nüfuz etmesi, kesici takımdaki delik sapmalarını ve titreşimleri artırarak daha yüksek dairesellik hatalarına neden olmuştur [16]. Ekici vd. CARALL kompozitin farklı geometri matkaplarla kesme parametrelerinin seviyelerinin değişimine bağlı olarak delinmesinde çıkış delaminasyonu ve kesilmemiş elyaf oluşumunu incelemişlerdir. Araştırmacılar ileri ve kapsamlı bir delaminasyon değerlendirmesi için çok haritalı bir görüntü işleme modeli (MMIPM)

geliştirilmişlerdir. Çalışmada ayrıca delaminasyon ve kesilememiş elyaf faktörünün (UCF) çok amaçlı optimizasyonunu gerçekleştirmek için PROMETHEE-GAIA yöntemi kullanılmıştır [17].

Bir araştırmada kontrol faktörleri ile kalite karakteristikleri arasındaki ilişkilerin belirlenmesi oldukça elzem ve gereklidir. Bu çalışmada, Taguchi Metodu kullanılarak kontrol faktörleri ile kalite karakteristikleri arasındaki ilişkiler belirlenmiş, CARALL'ın delinmesinde kesici takım geometrisi ve işleme parametrelerinin çıkış parametreleri (yani kalite karakteristikleri); ortalama itme kuvveti ve delaminasyon faktörü üzerindeki etkileri tespit edilmiştir. Böylelikle literatürde CARALL'ın işlenmesinde çok kısıtlı olarak çalışılmış olan kesici takım geometrisinin etkisinin belirlenmesiyle CARALL'ın işlenebilirliğine ciddi katkılar sağlanmış, bu konudaki yeni yapılacak çalışmalara öncülük edilmiştir. Bir malzemenin işlenebilirlik oranını belirleyen unsurların belirlenmesinde birçok çıktı parametresi (bağımlı değişken) bulunmaktadır ve giriş parametreleri ise (kontrol faktörleri/bağımsız değişkenler) çıktı parametreleri üzerinde farklı oranlarda etkili olmaktadır. Bir iş parçası işlendiğinde o malzemenin işlenebilirliğini tanımlayan/belirleyen ortalama itme kuvveti ve delaminasyon faktörü vd. tüm kriterlerin/karakteristiklerin en uygun değerlerinin aynı anda sağlanması gerekmektedir. Bu kalite karakteristiklerinin aynı anda, bir bütün olarak değerlendirilmesi ise çok kriterli optimizasyon teknikleri ile sağlanabilmektedir. Fakat literatürde CARALL'ın işlenebilirliğinin çok kriterli optimizasyon yöntemleri ile değerlendirildiği yeterli bir çalışma bulunmamaktadır. Bu nedenle, bu çalışmada CARALL'ın farklı geometri ile delinmesinde işleme parametrelerinin ortalama itme kuvveti ve delaminasyon faktörü üzerindeki araştırılmıştır. Delik delme işleminde minimum ortalama itme kuvveti ( $F_t$ ) ve delaminasyon faktörü ( $D_f$ ) değerleri için işleme parametrelerinin çok kriterli optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. İşleme parametrelerinin çok kriterli optimizasyonu Katkı Oranı Değerlendirmesi (ARAS) tekniği kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Böylelikle bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen sistematik optimizasyon çalışması sonucunda doğruluk ve güven seviyesi yüksek sonuç ve bulgularla literatürdeki bu eksiklik giderilmiştir. Bu araştırmanın bulgu ve sonuçların CARALL'ın işlenebilirlik veri tabanlarının gelişimine katkı sağlayacağı, yapılacak bilimsel ve akademik çalışmalara kaynak olacağı düşünülmektedir.

## 2. Materyal Ve Yöntem

CARALL'ın işlenmesinde kontrol faktörleri olarak seçilen işleme parametrelerinin ortalama itme kuvveti ve delaminasyon faktörü üzerindeki etkilerini belirlemek ve işleme parametrelerinin optimum seviyelerini belirlemek amacıyla yapılan deneysel çalışma ve bulgularının değerlendirilmesinde kullanılan materyal ve yöntemler bu başlık altında verilmiştir.

### 2.1. İş Parçalarının Üretimi, Kesici Takımlar, CNC Dik İşleme Merkezi ve Delme Deneyleri

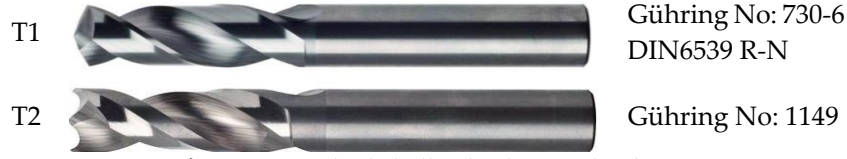
Deneysel iş parçası olarak kullanılmak üzere CARALL kompozit plakalar üretilmiştir. Üretilen CARALL malzemesi her biri üç kat 245 g/m<sup>2</sup> dokuma karbon kumaştan meydana gelen beş kat elyaf katmanı ve 0.5 mm kalınlığa sahip dört kat Al 5754 alaşımı katmanından oluşmaktadır (Figür 1).



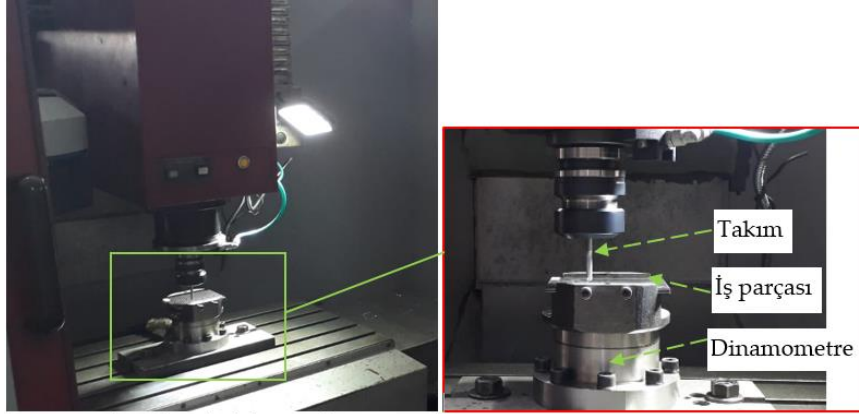
Figür 1. CARALL numunenin kesit görüntüsü.

Karbon elyaf-Al ara yüzey özelliklerini geliştirmek amacıyla Al 5754 alaşımı 400 mesh zımpara ile mekanik olarak zımparalanmış ve daha sonra saf su kullanılarak yüzeyler durulanarak kirlerden arındırılmıştır. Metal ve elyaf tabakalar arasında mekanik kitlenmenin geliştirilmesi yüzeydeki mikro gözeneklerin varlığını arttırmak ile mümkündür. Bu nedenle zımparalama işleminden doğan yüzey kirlilerinin giderilmesi ve yüzeyin düzenli mikro gözenek yapısına getirilmesi için sülfürik asit anotlama işlemi uygulanmıştır. Karbon elyaf ve alüminyum katmanlar Figür 1'de sunulan sıralama ile dizilerek 15 ton yük altında 125 °C'de 1 saat preslenmiştir.

Delme deneylerinde Gühring firmasından temin edilen 6 mm çapında ve toplam boyu 66 mm olan kaplamasız karbür matkaplar kullanılmıştır. T1 kodlu takım,  $118^\circ$  uç ve  $30^\circ$  helis açısında, T2 kodlu takım ise matkap çevresinde iki çıkıntılı kenar ile karakterize edilmektedir (Figür 2). Deneyler kuru delme şartlarında dik işleme merkezinde (Johnford VMC 850 marka) gerçekleştirilmiştir (Figür 3).



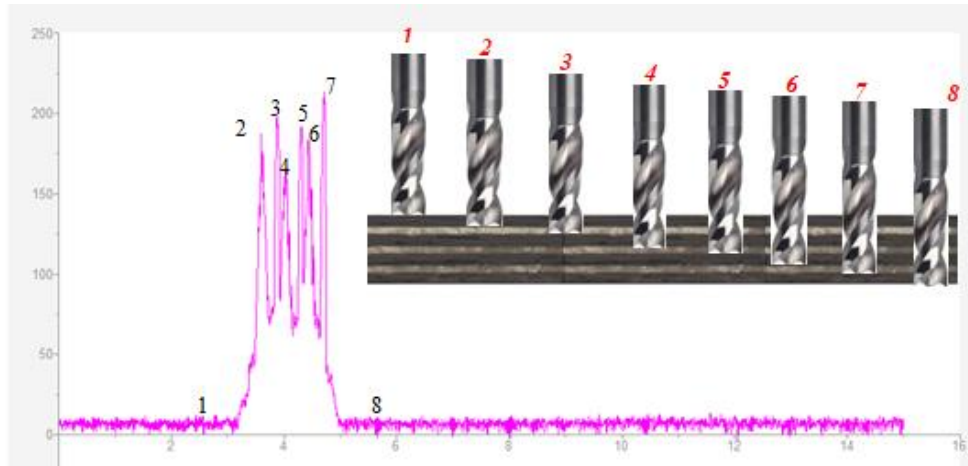
Figür 2. Deneylerde kullanılan kesici takımlar.



Figür 3. Delme deneyleri düzeneği.

## 2.2. İtme Kuvvetinin Ölçülmesi ve Delaminasyon Faktörünün Belirlenmesi

İtme kuvvetlerinin ölçümünde Kistler 9272 tipi dinamometre kullanılmıştır. İtme kuvveti verilerinin analizinde ise Dynoware yazılımı kullanılmıştır. Matkap ucunun CARALL tabakaya temas etmesi ile başlayan ve delik çıkışına kadar süren itme kuvvetinin değişimi Figür 4'te sunulmuştur. İtme kuvveti değerleri için en yüksek üç nokta alüminyum tabakanın delinmesinde elde edilirken kalan dört yükseliş karbon tabakalarda meydana gelmiştir. Delme sürecinde oluşan itme kuvveti değişimlerinin ortalaması dikkate alınmış ve bu çalışmada ortalama itme kuvveti incelenmiştir.



Figür 4. Dynoware yazılımı itme kuvveti sonuçları ve delme sürecinde takımın konumları.

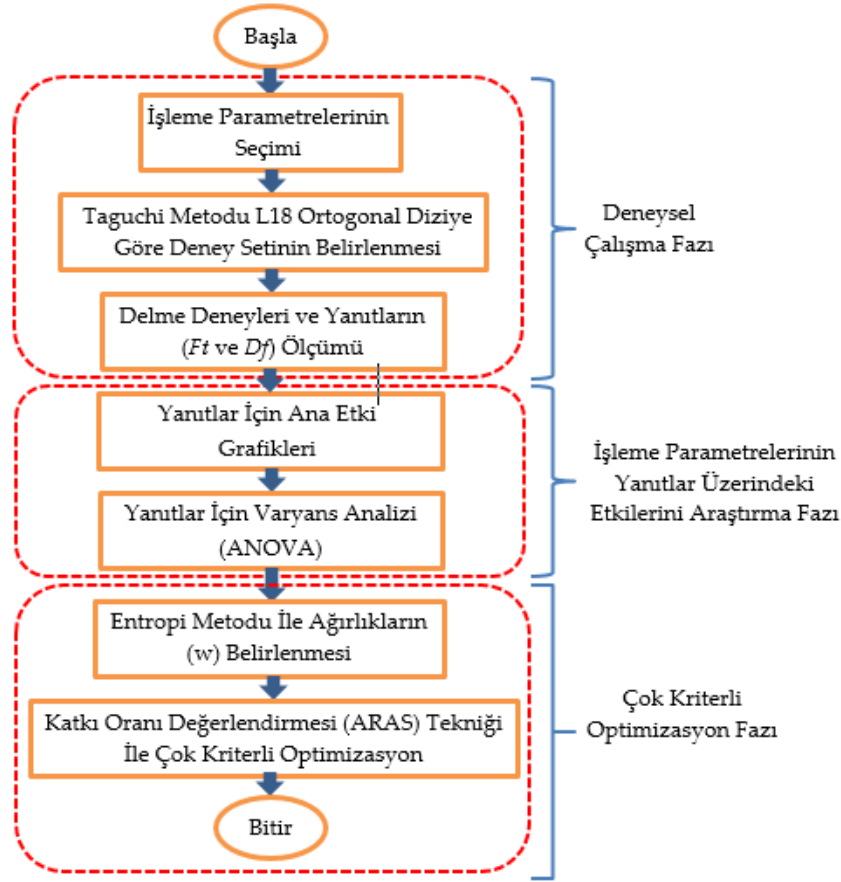
FRP'nin üstün mekanik ve termal özelliklerinden bağımsız olarak çok katmanlı yapının delinmesinde delaminasyon başlıca olmak üzere çentik ve elyaf kopması sıklıkla karşılaşılan ve bileşenleri tehlikeye atan kalıcı kusurlardır. Delik çıkış bölgesindeki delaminasyon hasarı itme kuvvetinden direkt olarak etkilenmektedir. Çünkü itme kuvveti, delaminasyon, mikro çatlamların ve diğer hasarların ana nedenidir. CFRP laminatlarının delinmesinde, takımın itme kuvveti laminalar arası kesme mukavemetini aşarsa, laminat kalınlığı içinde herhangi bir noktada iki bitişik elyaf tabakasının kopmasına neden olabilir [18, 19]. Bu durum, azaltılmış kesilmemiş laminat kalınlığının delme etkisine

karşı daha düşük dirence sahip olduğu, matkabın çıkış aşamasında daha kritik hale gelir ve Dışarı Doğru İtme Delaminasyonu olarak adlandırılır [18]. Delaminasyon faktörü birçok araştırmacı tarafından farklı şekilde incelenmiştir [20-22]. Fakat literatürde en kolay ölçüm yöntemi olan ve yaygın olarak kullanılan geleneksel delaminasyon boyut ölçümü esas alınarak Eşitlik 1’de sunulan en büyük delik hasar çapının ( $D_{max}$ ) nominal delik çapına ( $D$ ) oranı olarak belirlenmiştir. Delik çıkışında oluşan delaminasyon ölçümleri Dino-Lite optik mikroskop yardımıyla gerçekleştirilirken delaminasyon faktörün belirlenmesinde Dinocapture programı kullanılmıştır.

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

### 2.3. İşleme Parametreleri, Deneysel Tasarım, İstatistiksel Analiz ve Optimizasyon Prosedürleri

Bu çalışma için benimsenen süreç akış şeması Figür 5’te gösterilmektedir. Figür 5’te görüleceği üzere bu çalışma üç fazdan oluşmaktadır. Çalışmanın birinci fazını deneysel çalışma faaliyetleri içermektedir. Bu fazda, CARALL kompozitin farklı geometri kesici takımlarla delinmesinde kontrol faktörleri olarak kesici takım uç geometrisi ( $T$ ), kesme hızı ( $V$ ) ve ilerleme miktarı ( $f$ ) seçilmiş ve Tablo 1’de verilen seviyelerinde işlenebilirlik (delme) deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışma deseninin belirlenmesinde sistematik bir yaklaşım sunduğu ve deneysel çalışma maliyetlerini azalttığı için Taguchi metodu kullanılmış ve en uygun ortogonal dizi olan L18 ( $1^2 \times 2^3$ ) seçilmiştir.



Figür 5. Delme deneyleri, analiz ve optimizasyon çalışmaları akış diyagramı.

Tablo 1. Kontrol parametreleri ve parametre seviyeleri

Sembol	İşleme Parametreleri	Seviyeler		
		1	2	3
T	Takım geometrisi	Standart (T1)	Özel (T2)	-
V	Kesme hızı, (m/dak)	65	78	100
f	İlerleme miktarı, (mm/dev)	0.06	0.078	0.1

Araştırmanın ikinci fazı işleme parametrelerinin  $Ft$  ve  $Df$  üzerindeki etkilerini belirlemek ve işleme parametrelerinin her birinin seviyelerinin değişimine bağlı olarak  $Ft$  ve  $Df$ 'nin nasıl değiştiğini tespit etmekle ilgilidir. CARALL'ın delik delme işlemi sonrasında işleme parametrelerinin kalite karakteristikleri/yanıtlar ( $Ft$  ve  $Df$ ) üzerindeki ana etki derecelerini belirlemek için Varyans Analizi (ANOVA) uygulanmıştır. ANOVA, %95 güvenilirlik seviyesinde ve %5 anlamlılık seviyesinde gerçekleştirilmiştir. İstatistiksel analizler ve değerlendirmeler Minitab 18 paket programı kullanılarak yapılmıştır. Bu çalışmanın son fazı olan Çok Kriterli Optimizasyon Fazında (MOO) CARALL'ın delinmesinde aynı anda kalite karakteristikleri olarak seçilen minimum ortalama itme kuvveti ve delaminasyon faktörü değerlerini sağlayan optimum işleme parametrelerini belirlemek için Katkı Oranı Değerlendirmesi (ARAS) Çok Kriterli Karar Verme Tekniği kullanılmıştır. ARAS tekniğinin uygulama aşamalarında gerekli olan Ağırlıklandırılmış Karar Matrisinin elde edilmesi için kalite karakteristiklerinin önem dereceleri (ağırlıkları) Entropi metodu ile belirlenmiştir. Her iki tekniğin uygulama adımları aşağıdaki alt başlıklarda sunulmuştur.

### 2.3.1. Deneysel Tasarımı ve İstatistiksel Analiz

Bu çalışmada CARALL'ın farklı geometri ile kesici takımlarla delinmesinde en düşük ortalama itme kuvveti ( $Ft$ ) ve delaminasyon faktörü ( $Df$ ) değerlerini elde etmek için sinyal-gürültü oranını ( $S/N$ ) hesaplamada "daha küçük en iyi" yaklaşımı seçilmiş ve işleme parametrelerinin  $Ft$  ve  $Df$  üzerindeki etkileri yansıtan ana etki grafiklerinin çizdirilmesinde kullanılmıştır. Taguchi metodunda elde edilen deney sonuçları  $S/N$  oranına dönüştürülmektedir. Sinyal, istenen değeri belirtirken gürültü, istenmeyen değeri temsil etmektedir. Ortalama itme kuvveti ve delaminasyon faktörünün minimum olması gerektiğinden, "daha küçük en iyi" kriterine göre  $S/N$  oranları Eşitlik 2 kullanılarak hesaplanmıştır.

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

Bu Eşitlikte,  $n$  gözlem sayısını  $y$  ise gözlenen verileri temsil etmektedir.

### 2.3.2. Katkı Oranı Değerlendirmesi (ARAS) Tekniği İle Çok Kriterli Optimizasyon

Katkı Oranı Değerlendirmesi (ARAS), çok kriterli bir karar verme yöntemlerinden biridir [23-26]. Bu teknikte, birçok özneliteğe dayalı olarak en iyi alternatif seçilir ve her bir alternatifin fayda derecesi belirlenerek alternatiflerin nihai sıralaması yapılır. ARAS tekniği, nicel ölçümlere ve fayda teorisine dayanmaktadır. Fayda fonksiyonu değeri, bir alternatifin diğer alternatiflere göre göreceli verimliliğini belirler [23-26]. Telafi edici yöntemlerden biri olan ARAS, nitel nitelikler nicel niteliklere dönüştürülür ve nitelikler bağımsızdır. Bu tekniğin adımları sırasıyla aşağıda sunulmuştur:

**a) 1. Adım-Karar matrisinin elde edilmesi:** ARAS tekniğinin ilk adımı alternatiflerin kriterlere ait skorlarının gösterildiği karar matrisinin elde edilmesidir. ARAS tekniğinde her bir kriter için optimal değerlerden oluşan bir satır da karar matrisinde bulunmaktadır [23-26].  $m$  sayıdaki alternatiften ve  $n$  sayıdaki kriterden oluşan bir  $X$  karar matrisi Eşitlik 3'teki gibi ifade edilir.

$$X = \begin{bmatrix} x_{01} & \dots & x_{0j} & \dots & x_{0n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{i1} & \dots & x_{ij} & \dots & x_{in} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & \dots & x_{mj} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix}; \quad i = 0,1, \dots, m \quad j = 0,1, \dots, n \quad (3)$$

Bu Eşitlikte;  $x_{0j}$   $j$ . kriterin optimal değeri,  $x_{ij}$  ise  $i$ . alternatifin  $j$ . kriterde gösterdiği performans değeridir. Karar probleminde kriterlere ait optimal değer, kriterin fayda (daha yüksek daha iyi) özelliği göstermesi durumunda Eşitlik 4; maliyet (daha düşük daha iyi) özelliği göstermesi durumunda ise Eşitlik 5 yardımıyla hesaplanır [23-26].

$$x_{0j} = \max_i x_{ij} \quad (4)$$

$$x_{0j} = \min_i x_{ij} \quad (5)$$

**b) 2. Adım-Normalizasyon İşlemi ve Normalize Edilmiş Karar Matrisinin (R) Oluşturulması:** “Normalizasyon” işlemi; kriter değerlerin oldukça geniş aralıklarda bulunuyorsa verilerin daha küçük aralıklara çekilmesi için yapılan bir dönüştürme işlemidir [24]. ARAS tekniğinde  $x_{ij}$  değerleriyle normalize karar matrisi oluşmaktadır.  $x_{ij}$  değerleri ise kriterin maliyet ya da fayda özelliği durumuna göre hesaplanır. Kriter değerlerinin maksimum olması (fayda durumu) isteniyorsa normalize değerler Eşitlik 6 ile hesaplanır.

$$\bar{x}_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=0}^n x_{ij}} \quad (6)$$

Kriter değerlerinin daha düşük olması (maliyet durumu) isteniyorsa iki adımda normalizasyon işlemi gerçekleştirilir. İlk adımda Eşitlik 7 yardımıyla performans değerleri fayda durumuna dönüştürülür, ikinci adımda ise normalize değerler Eşitlik 8 ile hesaplanır [24].

$$x_{ij}^* = \frac{1}{x_{ij}} \quad (7)$$

$$\bar{x}_{ij} = \frac{x_{ij}^*}{\sum_{i=0}^m x_{ij}^*} \quad (8)$$

Normalize değerlerin hesaplanmasıyla Eşitlik 9’da gösterilen  $\bar{X}$  normalize karar matrisi elde edilmiş olur.

$$\bar{X} = \begin{bmatrix} \bar{x}_{01} & \dots & \bar{x}_{0j} & \dots & \bar{x}_{0n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \bar{x}_{i1} & \dots & \bar{x}_{ij} & \dots & \bar{x}_{in} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \bar{x}_{m1} & \dots & \bar{x}_{mj} & \dots & \bar{x}_{mn} \end{bmatrix}; \quad i = 0,1, \dots, m \quad j = 0,1, \dots, n \quad (9)$$

**c) 3. Adım-Ağırlıklandırılmış ve Normalize Edilmiş Karar Matrisinin Elde Edilmesi:** Bu adımda, saptanan  $w_j$  kriter ağırlıkları (önem dereceleri) kullanılarak ağırlıklandırılmış normalize karar matrisi  $\hat{X}$  oluşturulur. Her bir kriterin önem derecesi ( $w_j$ ) 0 ile 1 aralığında olmalı ve ağırlıkların toplamı ise en fazla 1 olmalıdır. Eşitlik 10’da görüldüğü üzere normalize değerlerin ağırlık değerleriyle çarpılmasıyla  $\hat{x}_{ij}$  ağırlıklandırılmış normalize değerler elde edilir [23-26].

$$\hat{x}_{ij} = \bar{x}_{ij} \cdot w_{ij} \quad (10)$$

Hesaplanmış olan  $\hat{x}_{ij}$  ağırlıklandırılmış normalize değerler ile Eşitlik 11 ile ifade edilen matris formundaki  $\hat{X}$  ağırlıklandırılmış normalize karar matrisi elde edilir.

$$\hat{X} = \begin{bmatrix} \hat{x}_{01} & \dots & \hat{x}_{0j} & \dots & \hat{x}_{0n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \hat{x}_{i1} & \dots & \hat{x}_{ij} & \dots & \hat{x}_{in} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \hat{x}_{m1} & \dots & \hat{x}_{mj} & \dots & \hat{x}_{mn} \end{bmatrix}; \quad i = 0,1, \dots, m \quad j = 0,1, \dots, n \quad (11)$$

**d) 4. Adım-Optimallik Fonksiyon Değerlerinin Belirlenmesi:** Son adımında her bir alternatif için optimallik fonksiyon değeri skorları Eşitlik 12 kullanılarak hesaplanır ve alternatifler gözden geçirilerek değerlendirilir. Bu eşitlikte,  $S_i$ ;  $i$ . alternatifin optimallik fonksiyon değeridir [23-26].

$$S_i = \sum_{j=1}^n \hat{x}_{ij} \quad i = 0,1, \dots, m \quad (12)$$

Hesaplanan daha büyük  $s_i$  değerleri daha optimal alternatifleri işaret etmektedir. Fayda dereceleri  $K_i$  alternatiflere ait  $s_i$  değerlerinin  $s_0$  optimal fonksiyon değerine bölünmesiyle elde edilir (Eşitlik 13) [23-26].

$$K_i = \frac{s_i}{s_0} \quad i = 0,1, \dots, m \quad (13)$$

(0,1) aralığında değer alan  $K_i$  oranları kullanılarak alternatiflerin fayda fonksiyonu değerlerinin göreceli etkinliği hesaplanabilmektedir. Bunun için değerler büyükten küçüğe sıralanarak alternatiflerin değerlendirilmesi yapılır [23-26].

### 2.3.3. Entropi Metodu İle Ağırlıklandırma

Entropi metodu, kriterlerin önem derecelerinin yani ağırlık vektörlerinin nesnel olarak belirlenmesini sağlamaktadır. Entropi metodu, verilere göre hesaplanan daha güvenilir, nesnel ve objektif bir

ağırlıklandırma metodudur. Bu metot öznel yargılara göre kriterlerin ağırlıkların yanlış belirlenmesi ihtimalini ortadan kaldırır. Entropi Ağırlıklandırma metodunda veri setlerindeki tezatlıklardan en ideal ağırlık değerleri oluşmaktadır. Kriterlerin ağırlık değerleri alternatiflerin kriterlere göre sonuçlarının ne oranda farklı olacağı ile yani zıtlığının yoğunluğu ile hesaplanır. Zıtlık durumu ne kadar fazla ise ilgili kriterce ilişkilendirilen ve aktarılan bilgi de o derece fazladır. Tam tersi olarak; eğer bir kriter için alternatiflerin benzerliği ne kadar olursa o kriterin karar verme aşamasında etkisi daha fazla olacaktır [27].

Bir önceki alt başlıkta da bahsedildiği üzere, ağırlıklandırma işleminde normalleştirilmiş karar matrisindeki her bir değer bulunduğu kriterinin ağırlık katsayısı ile çarpılır. Kriterlerin önem derecesine göre ağırlık katsayılarının belirlenmiş olması ARAS metodunun nesnel yönünü açığa çıkaracaktır. Bu şekilde daha güvenilir bir ağırlıklandırma işlemi gerçekleştirilmiş olunur. Bu metotta da önem derecesi katsayıları toplamı 1'e eşit olmalıdır. Entropi metodunu uygulamakla sonuçların sıralamasının güvenilirliği artırılmış olur. Entropi metodunda ağırlıklandırılmış karar matrisi Eşitlik 14 yardımıyla hesaplanır [27]. Bu denklemde  $r_{ij}$  ; normalleştirilmiş karar matrisi  $R_{ij}$ 'dir.

$$e_j = -\frac{1}{\ln(m)} \sum_{i=1}^n r_{ij} \ln r_{ij} \quad j = \overline{1, n} \quad (14)$$

Eşitlik 14'te her bir kriterin entropi değeri  $e_j$  olup  $j$ . kriterin ağırlık değerini temsil etmektedir. Ağırlık vektörü  $W = w_j$  Eşitlik 15 ile hesaplanır ve  $\sum_{i=1}^n w_j = 1$ 'dir [27].

$$w_j = \frac{1-e_j}{\sum_{p=1}^n (1-e_p)} \quad j = \overline{1, n} \quad (15)$$

Ağırlıklar da belirlendikten sonra son işlem olarak  $w_j$  değerleri ile normalize edilmiş matris çarpılarak ağırlıklandırılmış karar matrisi  $N = V_{ij}$  elde edilir [27].

### 3. Sonuçlar ve Tartışma

Bu bölümde, bu çalışma için benimsenen süreç akış şemasında (Figür 5) gösterilen ikinci ve üçüncü faz çalışmalarının sonuçları sırasıyla sunulacak ve tartışılacaktır. İlk alt başlıkta işleme parametrelerinin yanıtlar/performans karakteristikleri üzerindeki ana etkileri ile ilgili sonuçlar sunulacak ve tartışılacaktır. İkinci alt başlıkta ise çok kriterli karar alma tekniğinin kullanılması sonucu elde edilen optimizasyon sonuçları değerlendirilecektir.

#### 3.1. İşleme Parametrelerinin Yanıtlar Üzerindeki Etkileri

CARALL kompozitin işleme parametrelerinin farklı seviyelerine bağlı olarak delinmesi sonrasında ortalama itme kuvveti ve delaminasyon faktörü üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla ana etki grafikleri çizilmiştir. Buna ek olarak, işleme parametrelerinin (kontrol faktörlerinin) kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki % etki derecelerini araştırmak amacıyla Varyans Analizi (ANOVA) uygulanmıştır. L18 ortogonal dizisine uygun olarak gerçekleştirilen delme deneyi sonuçları ve "en düşük en iyi" seçeneğine göre hesaplanan S/N oranları Tablo 2'de verilmiştir. CARALL'ın farklı geometri kesici takımlarla delinmesinde ortalama 94.063 N ortalama itme kuvveti ve ortalama 1.292 delaminasyon faktörü değerleri elde edilmiştir.



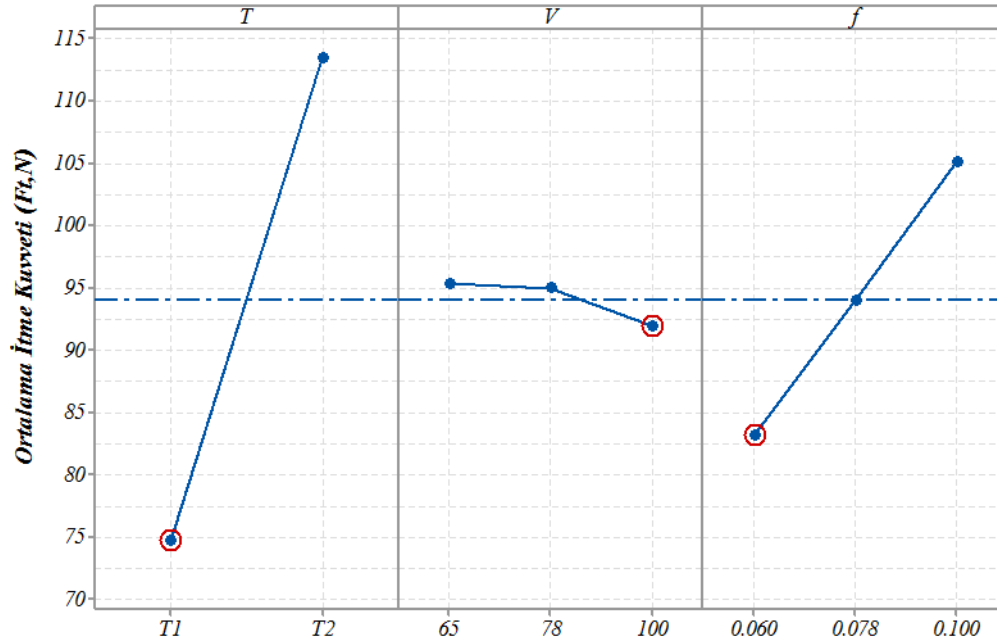
**Tablo 2. L18 ortogonal dizi deney desenine göre deneysel sonuçlar ve S/N oranları.**

Deney No	T	V (mm/dak)	f (mm/dev)	Deneysel sonuçlar		S/N Oranları	
				Ft (N)	Df	Ft (dBA)	Df (dBA)
1	T1	65	0.060	69.115	1.059	-36.79	-0.50
2	T1	65	0.078	78.550	1.085	-37.90	-0.71
3	T1	65	0.100	86.400	1.043	-38.73	-0.36
4	T1	78	0.060	68.820	1.058	-36.75	-0.49
5	T1	78	0.078	73.890	1.103	-37.37	-0.85
6	T1	78	0.100	83.810	1.112	-38.47	-0.92
7	T1	100	0.060	64.900	1.091	-36.24	-0.76
8	T1	100	0.078	67.038	1.074	-36.53	-0.62
9	T1	100	0.100	79.950	1.038	-38.06	-0.33
10	T2	65	0.060	97.070	1.231	-39.74	-1.80
11	T2	65	0.078	114.107	1.228	-41.15	-1.79
12	T2	65	0.100	126.670	1.548	-42.05	-3.80
13	T2	78	0.060	98.880	1.604	-39.90	-4.10
14	T2	78	0.078	111.900	1.668	-40.98	-4.44
15	T2	78	0.100	132.380	1.335	-42.44	-2.51
16	T2	100	0.060	100.040	1.556	-40.00	-3.84
17	T2	100	0.078	118.260	1.557	-41.46	-3.84
18	T2	100	0.100	121.360	1.867	-41.68	-5.42
Maksimum				132.380	1.867		
Minimum				64.900	1.038		
Ortalama				94.063	1.292		

### 3.1.1. Ortalama İtme Kuvveti

CARALL kompozitin farklı geometrili kesici takımlarla delinmesi sonrasında ortalama itme kuvveti için ana etki grafikleri Figür 6'da sunulmuştur. Figür 6'dan ilk olarak görüleceği üzere; ortalama itme kuvveti üzerinde işleme parametrelerinin etki sırası kesici takım ucu geometrisi ( $T$ ), ilerleme miktarı ( $f$ ) ve kesme hızı ( $V$ ) şeklindedir. CARALL tabakalı kompozitin delinmesi farklı işlenebilirlik özelliklerine sahip alüminyum ve karbon tabakalı yapılar nedeniyle oldukça karmaşıktır. Alüminyum sünek katmanların işlenmesinde sıklıkla kesici takım sıvanması iş parçasında ise çapak oluşumu gözlenmektedir. Karbon elyafın kırılğan yapısı ve aşındırıcı doğası elyaf takviyeli tabakalı yapılarda elyaf kırılması, yırtılma ve delaminasyon oluşumu şeklinde kendini göstermektedir. Takım geometrisi tabakalı yapıların işlenmesinde farklı etki ortaya koymaktadır. Alüminyumun sünek işlenebilirliği nedeniyle literatürde sıklıkla uç açısı üzerine odaklanılmıştır. Elyaf takviyeli kompozit yapılarda ise uç geometrisinin yanı sıra özel geometrili takımlar ile ciddi araştırmalar yapılmıştır. Çalışmada kullanılan standart T1 kodlu takımın kesme kuvveti üzerinde pozitif etki ortaya koyduğu belirgin bir şekilde görülmüştür. T2 kodlu takım ise itme kuvvetini ciddi bir şekilde arttırmıştır. Bu durum T2 kodlu takımın taç şeklindeki çıkıntılı kesme kenar geometrisinin sünek alüminyum katmanların delinmesinde ilave bir kuvvet artışına sebep olmasıdır [17]. Düşük kesme hızının belirgin bir etkisinin olmadığı görülmektedir. Kesme hızının 78 m/dak değerinden 100 m/dak değerine arttırılmasıyla azda olsa itme kuvvetlerinde bir düşüş görülmüştür. Artan kesme hızının özellikle sünek malzemelerde takım sıvanmalarını azalttığı kesme bölgesinde artan sıcaklıkların malzemenin plastik deformasyonunu kolaylaştırdığı yaygın olarak bilinmektedir [28]. Ayrıca literatürde elyaf takviyeli polimer kompozitlerin delinmesinde artan kesme hızının itme kuvvetini azalttığı rapor edilmiştir [29]. Bu durum yüksek kesme hızının alüminyum malzemenin plastik deformasyonunu kolaylaştırması

olarak yorumlanır. Artan ilerleme miktarına paralel bir şekilde itme kuvvetinde ciddi bir artış görülmüştür. Artan ilerleme miktarı birim zamanda kaldırılan talaş kesitinin artışı İtme kuvveti artışının ana nedeni olarak görülmektedir [28].



Figür 6. Ortalama itme kuvveti için ana etki grafiği.

İşleme parametrelerinin ana etkilerinin ve etkileşimlerinin ortalama itme kuvveti üzerindeki etkisini yansıtan ANOVA sonuçları Tablo 3'te verilmiştir. Gerçekleştirilen ANOVA'nın (%95 güven seviyesinde) korelasyon katsayısı ( $R^2$ ) 99.33 olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan korelasyon katsayısının yüksek çıkması işleme parametrelerinin ortalama itme kuvveti üzerindeki ana etkileri ile etkileşimlerinin etkilerinin yüksek bir doğrulukla açıklanmış olduğunu göstermektedir. Ortalama itme kuvveti üzerinde istatistiki olarak anlamlı etkisi olan parametreler sırasıyla kesici takım geometrisi (%79.23) ve ilerleme miktarı (%17.02) olmuştur. Kesme hızı ortalama itme kuvveti üzerinde istatistiki olarak anlamlı ( $P>0.05$ ) bir etki oluşturmamıştır.

Tablo 3. Ortalama itme kuvveti için ANOVA sonuçları.

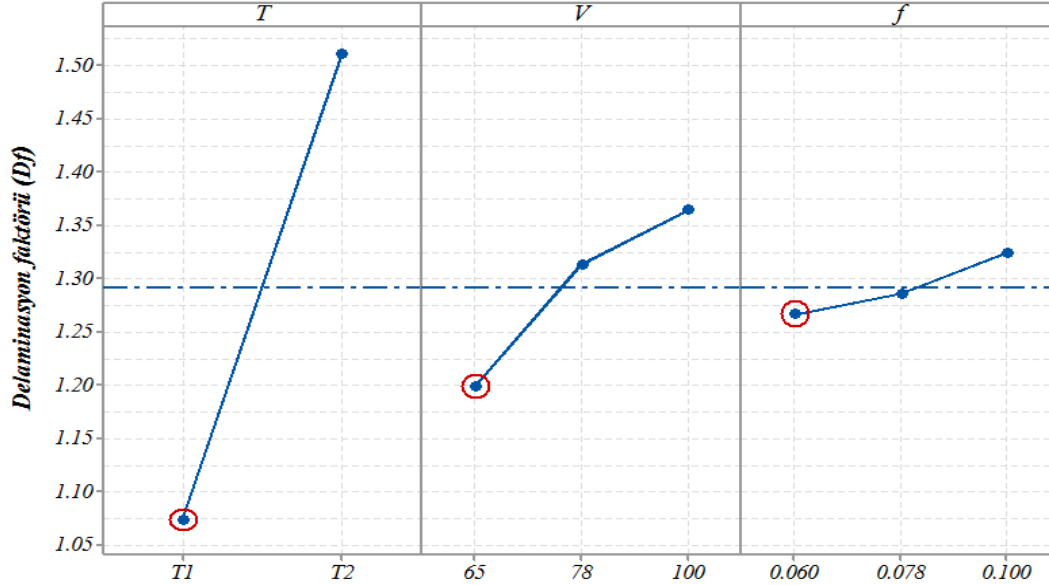
Kaynak	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F Değeri	P Değeri	% Katkı
T	1	6735.5	6735.5	474.02	0.000	79.23
V	2	41.58	20.79	1.46	0.334	0.49
f	2	1446.5	723.25	50.9	0.001	17.02
T*V	2	48.04	24.02	1.69	0.294	0.57
T*f	2	133.7	66.85	4.7	0.089	1.57
V*f	4	38.83	9.71	0.68	0.640	0.46
Artık Hata	4	56.84	14.21			0.67
Toplam	17	8500.99				100

$R^2 = \%99.33$  Ayarlı  $R^2 = 97.16$

### 3.1.2. Delaminasyon Faktörü

CARALL kompozitin farklı geometri kesici takımlarla delinmesi sonrasında Delaminasyon faktörü için ana etki grafikleri Figür 7'de sunulmuştur. Figür 7'de verilen ana etki grafiği incelendiğinde, delaminasyon faktörü üzerinde işleme parametrelerinin etki sırasının kesici takım geometrisi (T), kesme hızı (V) ve ilerleme miktarı (f) şeklinde olduğu görülmektedir. V ve f'nin artırılmasıyla delik çıkışında oluşan delaminasyon oluşumu artmakta iken T1 kodlu standart geometri takımının kullanılması delaminasyon oluşumunu azaltmıştır. Delik çıkışında oluşan delaminasyonun ana nedeni son katmanlar üzerinde oluşan yüksek gerilmelerdir. Delme sürecinde takım tarafından oluşturulan

itme kuvvetleri son katmanlara gelindiğinde elyaf tabakalar arasındaki bağ mukavemetini aştığı noktada kendini gösterir. Metal ve elyaf katmanlar adheziv etkiyle birbirine bağlıdır. En alt alüminyum ve elyaf katmanlar üzerinde takımın oluşturduğu itme kuvveti metal ve elyaf tabakanın ayrışmasına neden olmakta devamında oluşan itme kuvvetini son elyaf tabakaya bırakmaktadır. Bu nedenle elyaf tabakadan ziyade metal katmanın delinme süreci daha ön plana çıkmaktadır. Özel geometrilikli takım literatürde elyaf takviyeli kompozit yapıların delinmesinde daha düşük Df elde edilmesini sağlarken [30], çalışmamızda aksine delaminasyon faktörü dolayısıyla delaminasyon oluşumu arttırmıştır. Bu durum kesici takım geometrisinin alüminyum katmanların işlenmesinde etkin rol oynayamaması ve çıkış bölgesinde oluşan yüksek itme kuvvetleri ile açıklanabilir. Delaminasyon oluşumu kesme parametrelerinden etkilenmektedir. Artan kesme hızı ve ilerleme miktarı değerleri ile delaminasyon faktörü değerleri arttığından bu işleme parametreleri kritik öneme sahiptir.



Figür 7. Delaminasyon faktörü için ana etki grafiği.

İşleme parametrelerinin ana etkilerinin ve etkileşimlerinin etkilerinin delaminasyon faktörü üzerindeki etkisini yansıtan ANOVA sonuçları Tablo 4’de sunulmuştur. Delaminasyon faktörü üzerinde istatistik olarak anlamlı etkisi olan parametre %70.47 katkı ile kesici takım geometrisi olmuştur. Kesme ilerleme miktarı yüzey pürüzlülüğü üzerinde istatistik olarak anlamlı ( $P>0.05$ ) bir etki oluşturmamıştır. ANOVA sonuçlarının korelasyon katsayısı ( $R^2$ ) 91.47 olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan bu korelasyon katsayısı %95 güven seviyesinde, delaminasyon faktörü üzerinde işleme parametrelerinin ana etkilerinin yüksek düzeyde açıklanabildiğini göstermektedir.

Tablo 4. Delaminasyon faktörü için ANOVA sonuçları.

Kaynak	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F Değeri	P Değeri	% Katkı
T	1	0.8595	0.8595	33.04	0.005	70.47
V	2	0.08567	0.042834	1.65	0.301	7.02
f	2	0.01029	0.005146	0.2	0.828	0.84
T*V	2	0.07636	0.038182	1.47	0.333	6.26
T*f	2	0.01529	0.007643	0.29	0.76	1.25
V*f	4	0.06853	0.017132	0.66	0.652	5.62
Artık Hata	4	0.10407	0.026016			8.53
Toplam	17	1.2197				100

$R^2 = \%91.47$  Ayarlı  $R^2 = \%63.74$

### 3.2. Katkı Oranı Değerlendirmesi (ARAS) Tekniği İle Çok Kriterli Optimizasyon Sonuçları

Bu çalışmanın iki adet yanıt/çıkış değişkeni vardır: ortalama itme kuvveti ve delaminasyon faktörü. Bu çalışmada deneysel tasarım metodu olarak kullanılan Taguchi metodu ile tek kriterli optimizasyon işlemleri sistematik bir şekilde gerçekleştirilebilmekte iken çok kriterli optimizasyon işlemleri için yeterli olmamaktadır. Bu nedenle bu çalışmada Taguchi Metodu temelli Entropi Metoduyla Ağırlıklandırılmış ARAS metodu Çok Kriterli Optimizasyon problemini çözmek için kullanılmıştır. Bunun için Alt başlık 2.3.2’de verilen ARAS tekniği ile Entropi metodunun ilgili adımları takip edilmiş ve Eşitlik 3-15 kullanılarak gerekli hesaplamalar yapılmış ve optimum sonuca ulaşılmıştır.

Birinci adımda kriterlerin maliyet ya da fayda özelliği belirlenerek Eşitlik 5 yardımıyla optimal değerler belirlenmiştir [23-26]. Her bir alternatifin  $F_t$  ve  $D_f$  değerlerinin küçük olması (maliyet durumu) CARALL kompozitin en uygun şartlarda işlenmesini sağlayacaktır. Belirlenen kriter özelliklerine göre hesaplanan optimal değerleri de içinde barındıran Karar Matrisi Tablo 5’te sunulmuştur. İkinci adımda, birinci adımdaki  $F_t$  ve  $D_f$  için belirlenen optimal değerlerin veri setine eklenmesi ile oluşturulan maliyet yönlü karar matrisi üzerinden Normalizasyon işlemi yapılmıştır. Performans skorlarının normalize edilmesi işleminde de kriterlerin özellikleri dikkate alınmış ve kriterlerin maliyet (minimizasyon) özelliği göstermesi istendiğinden Eşitlik 7 ve Eşitlik 8 kullanılarak normalizasyon işlemi tamamlanmış ve Eşitlik 9’la ifade edilebilen bir Normalize Karar Matrisi elde edilmiştir (Tablo 5). Üçüncü adımda, Eşitlik 10 kullanılarak Eşitlik 11 ile ifade edilen ağırlıklandırılmış karar matrisi hesaplanmış ve Tablo 5’te sunulmuştur. Entropi metoduyla  $F_t$  ve  $D_f$  için sırasıyla 0.576 ve 0.424 değerleri ağırlık değerleri olarak hesaplanmıştır. Ağırlıklandırılmış normalize karar matrisinin oluşturulmasından sonra her bir alternatif için optimallik fonksiyon değerleri hesaplanmıştır. Bu aşamada alternatiflerin kriterlerden aldığı hesaplanmış skorlar Eşitlik 12 kullanılarak  $S_i$  değerlerine, Eşitlik 13 kullanılarak ise  $K_i$  değerlerine dönüştürülmüştür. Hesaplanan  $S_i$  ve  $K_i$  değerleri ve alternatif sıralamaları Tablo 5’te gösterilmiştir. ARAS tekniği kullanılarak işleme parametreleri alternatiflerinin optimallik fonksiyon değerleri büyükten küçüğe değerlendirilerek işleme parametreleri alternatifleri sıralanmıştır. Analiz sonuçlarına göre ilk sırada Deney No 7’deki işleme parametreleri seviyeleri yer almakta iken optimalden en uzak olan Deney No 18’deki işleme parametreleri seviyeleri son sırada yer almıştır. % olarak ifade edilen  $K_i$  değerleri her bir alternatifin optima ne oranda benzediğini yansıtmaktadır. Bu doğrultuda en ideal işleme parametreleri seviyelerini sahip 7 nolu deney %98.1 oranla optima yakındır. Optima oranla sıralamada sonuncu olan 18 nolu deneyin optimallik fonksiyon değeri 0.543 olup, optima benzerliği %54.3 olarak belirlenmiştir (Tablo 5). Sonuç olarak, ARAS tekniğiyle de 7 nolu deneydeki işleme parametrelerinin seviyeleri ( $T=T_1$  kodlu kaplamasız standart geometri karbür kesici takım,  $V=100$  m/dak,  $f=0.06$  mm/dev) CARALL kompozitin farklı geometri kesici takımlarla delinmesinde minimum ortalama itme kuvveti ve delaminasyon faktörü değerleri elde etmede optimal seviyeler olarak belirlenmiştir (Tablo 2 ve Tablo 5).

ARAS yönteminin son adımında hesaplanmış ve Tablo 5’te sunulan her bir deney için hesaplanmış  $K_i$  fayda dereceleri kullanılarak Taguchi metodunun “larger-is-better” yaklaşımıyla tekrar Varyans Analizi yapılmıştır. Çok kriterli optimizasyon çalışmasının son aşamasında  $K_i$  üzerinde her bir kontrol faktörünün % etkileri ANOVA ile belirlenmiştir (Tablo 6).  $K_i$  üzerinde istatistiki olarak anlamlı etkisi olan parametreler sırasıyla kesici takım geometrisi (%87.60) ve ilerleme miktarı (%8.39) olmuştur. Kesme hızının  $K_i$  üzerindeki etkisi istatistiki olarak anlamlı olmamıştır ( $p>0.05$ ). Buna göre; CARALL kompozitin farklı geometri karbür kesici takımlarla delinmesinde ANOVA’nın korelasyon katsayısı ( $R^2$ ) % 96.27 olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan korelasyon katsayısının (% 96.27) %100’e yakın bir değerde elde edilmiş olması işleme parametrelerinin  $K_i$  üzerindeki etkisinin yüksek doğruluk seviyesinde belirlendiğini göstermektedir.

**Tablo 5. ARAS tekniği sonuçları.**

D. No	1.Adım				2.Adım				3.Adım		4.Adım			
	Karar Matrisi				Maliyet Yönlü Karar Matrisi		Normalize Karar Matrisi		Ağırlıklandırılmış Normalize Karar Matrisi		Optimallik Fonksiyonu Değerleri ve Sıralama			
	Deneysel Sonuçlar		Kriter		Kriter		Kriter		Ağırlıklar (w)		S <sub>i</sub>	K <sub>i</sub>	K <sub>i</sub> %	Sıralama
F <sub>t</sub> (N)	Df	F <sub>t</sub> (N)	Df	Min.	Min.	Min.	Min.	w=0.576	w=0.424					
1	69.115	1.059	69.115	1.059	0.014	0.944	0.072	0.065	0.041	0.028	0.069	0.955	57.94	4
2	78.550	1.085	78.550	1.085	0.013	0.922	0.063	0.064	0.036	0.027	0.063	0.877	66.13	7
3	86.400	1.043	86.400	1.043	0.012	0.959	0.057	0.066	0.033	0.028	0.061	0.847	83.20	8
4	68.820	1.058	68.820	1.058	0.015	0.945	0.072	0.065	0.041	0.028	0.069	0.958	61.60	3
5	73.890	1.103	73.890	1.103	0.014	0.907	0.067	0.063	0.039	0.027	0.065	0.903	67.25	5
6	83.810	1.112	83.810	1.112	0.012	0.899	0.059	0.062	0.034	0.026	0.060	0.837	87.70	9
7	64.900	1.091	64.900	1.091	0.015	0.917	0.076	0.063	0.044	0.027	0.071	0.981	67.44	1*
8	67.038	1.074	67.038	1.074	0.015	0.931	0.074	0.064	0.043	0.027	0.070	0.967	92.93	2
9	79.950	1.038	79.950	1.038	0.013	0.963	0.062	0.067	0.036	0.028	0.064	0.885	81.69	6
10	97.070	1.231	97.070	1.231	0.010	0.812	0.051	0.056	0.029	0.024	0.053	0.737	43.49	10
11	114.107	1.228	114.107	1.228	0.009	0.814	0.043	0.056	0.025	0.024	0.049	0.677	56.65	11
12	126.670	1.548	126.670	1.548	0.008	0.646	0.039	0.045	0.023	0.019	0.041	0.574	63.91	17
13	98.880	1.604	98.880	1.604	0.010	0.623	0.050	0.043	0.029	0.018	0.047	0.653	55.43	13
14	111.900	1.668	111.900	1.668	0.009	0.600	0.044	0.041	0.025	0.018	0.043	0.597	62.54	15
15	132.380	1.335	132.380	1.335	0.008	0.749	0.037	0.052	0.022	0.022	0.044	0.603	68.09	14
16	100.040	1.556	100.040	1.556	0.010	0.643	0.050	0.044	0.029	0.019	0.047	0.656	59.85	12
17	118.260	1.557	118.260	1.557	0.008	0.642	0.042	0.044	0.024	0.019	0.043	0.595	74.20	16
18	121.360	1.867	121.360	1.867	0.008	0.536	0.041	0.037	0.024	0.016	0.039	0.543	85.84	18

\*Optimum

**Tablo 6. K<sub>i</sub> için ANOVA sonuçları.**

Kaynak	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F Değeri	P Değeri	% Katkı
T	1	0.368756	0.368756	282.06	0.000	87.60
V	2	0.001199	0.000599	0.46	0.643	0.28
f	2	0.03531	0.017655	13.5	0.001	8.39
Artık Hata	12	0.015689	0.001307			3.73
Toplam	17	0.420953				100.00

R<sup>2</sup> = %96.27 Ayarlı R<sup>2</sup> = 94.72

#### 4. Sonuçlar

Bu çalışmada üretimi gerçekleştirilmiş olan bir Elyaf Metal Laminat (FML) türü olan Karbon Elyaf Takviyeli Alüminyum Laminat (CARALL) kompozitin farklı geometri takımlarla delinmesinde işlenebilirlik özelliklerini ortalama itme kuvveti ve delaminasyon faktörü açısından değerlendirmektedir. Bu deneysel araştırma ve istatistiksel analiz temelli çalışmanın iki temel motivasyonu olmuştur: Birincisi, kontrol faktörü olarak seçilen kesici takım geometrisi ile işleme parametreleri kesme hızı ve ilerleme miktarının kalite karakteristikleri (yanıt değişkenleri) olarak belirlenen ortalama itme kuvveti ve delaminasyon faktörü üzerindeki etkilerini belirlemek ve kontrol faktörlerinin optimal seviyelerini tek kriterli optimizasyon ile tanımlamaktır. Tek kriterli optimizasyon işlemleri Taguchi metodu ile gerçekleştirilmiştir. İkincisi ise minimum ortalama itme kuvveti ve delaminasyon faktörü değerlerinin aynı anda elde etmesinde kontrol faktörlerinin etkilerini ve optimal seviyelerini çok kriterli olarak optimizasyon teknikleri ile belirlemektir. Bu amaca ulaşmak için Taguchi metodu temelli Entropi Metoduyla Ağırlıklandırılmış ARAS tekniği kullanılmıştır.

Deneysel araştırma ve istatistiksel analiz temelli bu çalışma sonucunda Ortalama itme kuvveti üzerinde en etkili parametreler sırasıyla kesici takım geometrisi (%79.23) ve ilerleme miktarı (%17.02) olmuştur. Kesme hızının ve kontrol faktörlerinin etkileşimlerinin ortalama itme kuvveti üzerinde istatistiki olarak anlam etkileri olmamıştır. En yüksek kesme hızında ( $V=100$  m/dak) ve en düşük ilerleme miktarında ( $f=0.060$  mm/dev) daha düşük ortalama itme kuvveti değerleri elde edilmiştir. Daha düşük ortalama itme kuvveti değerlerinin elde edilmesinde standart geometri karbür kesici takımlar özel geometri takımlara göre daha iyi performans sergilemişlerdir.

CARALL kompozitin farklı geometri kesici takımlarla delinmesinde delik çıkışında minimum delaminasyon oluşumu üzerinde en etkili kontrol faktörü kesici takım geometrisi (% 70.47) olmuş iken bunu sırasıyla %7.02 katkı oranı ile kesme hızı, %6.26 katkı oranı ile kesici takım geometrisi\*kesme hızı etkileşimi ve %5.62 katkı oranı ile kesme hızı\*ilerleme miktarı etkileşimi izlemiştir. Diğer kontrol faktörleri ve kontrol faktör etkileşimlerinin delaminasyon faktörü üzerinde anlamlı etkileri olmamıştır. Standart geometri karbür kesicili takımlarla en düşük kesme hızı ve ilerleme miktarı değerlerinde delik delmede delik çıkışında daha düşük delaminasyon oluşumları elde edilmiştir.

CARALL kompozitlerin işlenmesinde özel geometri karbür takımın ortalama itme kuvveti ve delaminasyon oluşumu üzerinde istenilen performansı sergileyememesi bu takımın taç şeklindeki çıkıntılı kesme kenar geometrisinin sünek alüminyum katmanların delinmesinde ilave bir itme kuvvet artışına sebep olmasına ve CARALL kompozitin alüminyum katmanlarının kesilmesinde etkin rol oynayamamasına bu nedenle de çıkış bölgesinde oluşan yüksek itme kuvvetleri sonucu artan delaminasyon oluşumlarına bağlanmıştır.

Ortalama itme kuvveti ve ortalama kuvveti üzerinde kontrol faktörlerinin ana ve etkileşimlerinin etkileri sırasıyla % 99.33 ve %91.47 oranlarında tahmin edilebilmiştir.

Çok kriterli optimizasyon işleminde ortalama kesme kuvveti ve delaminasyon faktörü için kullanılan faktör ağırlıkları sezgisel olarak değil Entropi metodu ile hesaplanmıştır. Böylelikle Entropi metodunun bir çok kriterli karar verme yöntemi olan ARAS tekniğiyle de hibrit olarak kullanılabileceği belirlenmiştir. Geleneksel yöntemlerin geçerli olmadığı ve kullanılamayacağı, işleme parametrelerinin farklı seviyelerinde gerçekleştirilen alternatif sonuçlar içerisinde tek bir optimal yanıt sistematik bir yaklaşımla etkin ve verimli bir şekilde belirlenmiştir.

Çok kriterli Karar Verme diğer bir ifade ile Çok Kriterli Optimizasyon yöntemi olan seçilen ARAS tekniğiyle, CARAL kompozitin farklı geometri karbür matkap kesici takımlarla işlenmesinde minimum ortalama itme kuvveti ve delaminasyon faktörü değerlerini aynı anda sağlamak için delik delme parametrelerinin optimum seviyeleri standart geometri takım, 110 m/dak kesme hızı ve 0.06 mm/dev ilerleme miktarı olarak tespit edilmiştir.

İşlenmesi güç malzemeler grubunda yer alan FML kompozitlerin özellikle uzay, savunma ve havacılık araçlarının bileşenlerinde ticari olarak kullanım oranı giderek artmaktadır. Bu yüzden bu malzemelerin geleneksel ve geleneksel olmayan tekniklerle işlenebilirliklerinin araştırılması ve değerlendirilmesi üzerine araştırmaların sürdürülmesi elzemdir. Geleneksel talaşlı imalat yöntemlerinden biri olan delik delme ise bu kompozit malzemelerin montajı için en çok tercih edilen işleme operasyonlarından biridir.

Dolayısıyla bu çalışmanın devamı ve tamamlayıcısı olarak kesici takım kaplama etkisini değerlendirmek üzere gerçekleştirilen deneysel çalışmaların sonuçları sunulacak ve tartışılacaktır. Buna ek olarak delik ortalama boyutsal tamlığı, dairesellik hatası ve yüzey pürüzlüğü kalite karakteristiklerinin değerlendirilmesi üzerine yapılan deneysel çalışmaların sonuçları da değerlendirilecektir.

**Yazar Katkıları:** Yazarlar makaleye eşit katkıda bulunmuştur.

**Finansman:** Bu çalışma, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından FBA-2019-3170 numaralı proje ile desteklenmiştir.

**Çıkar çatışmaları:** Yazarlar çıkar çatışması beyan etmemektedir.

## Kaynakça

- [1] P. Tyczyński, J. Lemańczyk, R. Ostrowski and R. Ewa S'liwa, "Drilling of CFRP, GFRP, glare type composites", *Aircr. Eng. Aerosp. Technol.*, vol. 86, pp. 312-322, July 2014. <https://doi.org/10.1108/AEAT-10-2012-0196>
- [2] T. Sinmazcelik, E. Avcu, M.O. Bora and O. Coban, "A review: fiber metal laminates, background, bonding types and applied test methods", *Mater. Des.*, vol.32, pp. 3671–3685, August 2011. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.03.011>
- [3] K. Giasin and S. Ayvar-Soberanis, "An investigation of burrs, chip formation, hole size, circularity and delamination during drilling operation of GLARE using ANOVA", *Compos. Struct.*, vol. 159, pp. 745-760, January 2017. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.10.015>
- [4] L. Gemi, S. Morkavuk, U. Köklü and D. S. Gemi, "An experimental study on the effects of various drill types on drilling performance of GFRP composite pipes and damage formation", *Compos. B: Eng.*, vol. 172, pp. 186-194, September 2019. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.05.023>
- [5] N. Sugita, L. Shu, K. Kimura, G. Arai and K. Arai, "Dedicated drill design for reduction in burr and delamination during the drilling of composite materials", *CIRP Ann.*, vol. 68, pp. 89-92, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2019.04.094>
- [6] Z. Jia, R. Fu, B. Niu, B. Qian, Y. Bai and F. Wang, "Novel drill structure for damage reduction in drilling CFRP composites", *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 110, pp. 55-65, November 2016. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2016.08.006>
- [7] F. Su, Z. Deng, F. Sun, S. Li, Q. Wu and X. Jiang, "Comparative analyses of damages formation mechanisms for novel drills based on a new drill-induced damages analytical model", *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 271, pp. 111-125, September 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.03.033>
- [8] B. Işık and E. Ekici, "Experimental investigations of damage analysis in drilling of woven glass fiber-reinforced plastic composites," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 49, pp. 861-869, December 2009. <https://doi.org/10.1007/s00170-009-2440-x>
- [9] N. Feito, A. Muñoz-Sánchez, A. Díaz-Álvarez and M. H. Miguelez, "Multi-objective optimization analysis of cutting parameters when drilling composite materials with special geometry drills", *Compos. Struct.*, vol. 225, pp. 1-11, October 2019. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111187>
- [10] Z. Yu, C. Li, R. Kurniawan, K. M. Park and T. J. Ko, "Drill bit with a helical groove edge for clean drilling of carbon fiber-reinforced plastic", *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 274, pp. 1-12, December 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.116291>
- [11] U. Bhushi, J. Suthar and S. N. Teli, "Performance analysis of metaheuristics optimization techniques for drilling process on CFRP composites", *Mater. Today: Proc.*, vol. 28, pp. 1106-1114, June 2020. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.01.091>
- [12] L. Sorrentino, S. Turchetta and C. Bellini, "A new method to reduce delaminations during drilling of FRP laminates by feed rate control", *Compos. Struct.*, vol. 186, pp. 154-164, February 2018. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.12.005>
- [13] T. Barik, S.K. Jena, S. Gahir, K. Pal and S.K. Pattnaik, "Process parametric optimization in drilling of CFRP composites using GRA method" *Mater. Today: Proc.*, vol.39, pp.1281-1286, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.04.220>
- [14] E. Ekici, A. R. Motorcu and E. Yıldırım, "An experimental study on hole quality and different delamination approaches in the drilling of CARALL, a new FML composite", *FME Trans.*, vol. 49, pp. 950-961, December 2021. <https://doi.org/10.5937/FME2104950E>
- [15] E. Ekici, A. R. Motorcu and G. Uzun, "Multi-objective optimization of process parameters for drilling fibermetal laminate using a hybrid GRA-PCA approach", *FME Trans.*, vol. 49, pp. 356-366, April 2021. <https://doi.org/10.5937/fme2102356E>
- [16] K. Giasin, S. Ayvar-Soberanis and A. Hodzic, "An experimental study on drilling of unidirectional GLARE fibre metal laminates", *Compos. Struct.*, vol. 133, pp. 794-808, December 2015. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.08.007>
- [17] S. Y. Park, W. J. Choi, C. H. Choi, and H. S. Choi, "Effect of drilling parameters on hole quality and delamination of hybrid GLARE laminate," *Compos. Struct.*, vol.185, pp.684-698, February 2018.
- [18] E. Ekici, A. R. Motorcu and A. Polat, "Optimization and alternative image processing approach for the comprehensive assessment of delamination and uncut fiber in drilling fiber metal laminate", *J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.*, vol. 44, pp. 1-23, October 2022. <https://doi.org/10.1007/s40430-022-03806-2>
- [19] J. Babu, T. Sunny, N. A. Paul, K. P. Mohan, J. Philip and J. P. Davim, "Assessment of delamination in composite materials: A review", *Proc. Inst. Mech. Eng. Pt. B-J. Eng. Manuf.*, vol. 230, pp. 1990–2003, August 2016. <https://doi.org/10.1177/095440541561934>
- [20] L. Romoli and A.H.A. Lutey, "Quality monitoring and control for drilling of CFRP laminates", *J. Manuf. Process.*, vol. 40, pp. 16–26, April 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.02.028>

- 
- [21] J. P. Davim, J. C. Rubio and A. M. Abrão, "A novel approach based on digital image analysis to evaluate the delamination factor after drilling composite laminates", *Compos. Sci. Technol.*, vol. 67, pp. 1939–1945, July 2007. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2006.10.009>
- [22] D. N. R. Da Silva, "Image processing methodology for assessment of drilling induced damage in CFRP", Dissertation, Universidade Nova de Lisboa, 2013.
- [23] A. Faraz, D. Biermann and K. Weinert, "Cutting edge rounding: an innovative tool wear criterion in drilling CFRP composite laminates", *Int J Mach Tools Manuf.*, vol. 49, pp. 1185–1196, December 2009. <https://doi.org/10.1016/j.ijmactools.2009.08.002>
- [24] P. V. Kumar, J. Vivek, N. Senniangiri, S. Nagarajan and K. Chandrasekaran, "A study of added SiC powder in kerosene for the blind square hole machining of CFRP using electrical discharge machining", *Silicon*, vol. 14, pp. 1831-1849. February 2022. <https://doi.org/10.1007/s12633-021-01243-9>
- [25] B. F. Yildirim, "Çok kriterli karar verme problemlerinde ARAS yöntemi", *Kafkas Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, vol. 6, pp. 285-296. 2015.
- [26] S. S. S. Paramasivam, D. Kumaran and H. Natarajan, "Taguchi Additive Ratio Assessment (ARAS) method in multi-criteria decision making: A case study for treated drill tools performance", *Int. J. Mod. Manuf. Technol.*, vol. 12, pp. 114-124, 2020.
- [27] C. Gheorghită and V. Gheorghită, "Application of multiobjective methods for optimization of machining process parameters", *Int. J. Mod. Manuf. Technol.*, vol. 7, pp. 17-22, 2015.
- [28] G. Sur, A. R. Motorcu and S. Nohutçu, "Single and multi-objective optimization for cutting force and surface roughness in peripheral milling of Ti6Al4V using fixed and variable helix angle tools", *J. Manuf. Process.*, vol. 80, pp. 529-545, August 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.06.016>
- [29] A. Cicek, E. Ekici, T. Kivak, F. Kara and N. Ucak, "Performance of multilayer coated and cryo-treated uncoated tools in machining of AISI H13 tool steel-Part 2: HSS end mills", *J. Mater. Eng. Perform.*, vol. 30, pp. 3446-3457, March 2021. <https://doi.org/10.1007/s11665-021-05657-9>
- [30] J. Xu, X. Huang, J. P. Davim, M. Ji and M. Chen, "On the machining behavior of carbon fiber reinforced polyimide and PEEK thermoplastic composites", *Polym. Compos.*, vol. 41, pp. 3649–3663, June 2020. <https://doi.org/10.1002/pc.25663>
- [31] S. Liu, T. Yang, C. Liu and Y. Du, "Comprehensive investigation of cutting mechanisms and hole quality in dry drilling woven aramid fibre-reinforced plastic with typical tools", *Proc. Inst. Mech. Eng. B. J. Eng. Manuf.*, vol. 233, pp. 2471–2491, April 2019. <https://doi.org/10.1177/0954405419844855>