

# Analysis and Modeling of Thrust Force by using Response Surface Methodology in Drilling Nanocomposite

 Gökhan BAŞAR<sup>1</sup>  Hediye KIRLI AKIN<sup>1,\*</sup>  Funda KAHRAMAN<sup>2</sup> 
<sup>1</sup>Osmaniye Korkut Ata University, Faculty of Engineering, Department of Industrial Engineering, Merkez/OSMANIYE

<sup>2</sup>Tarsus University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, Tarsus/MERSİN

## Graphical/Tabular Abstract

In this research, the effect rates of independent variables (multi-walled carbon nanotube wt. % content, cutting speed and feed rate) on the dependent variable (thrust force) used during drilling of glass fiber reinforced polymer (GFRP) composite were examined and optimum drilling condition was established. Drilling experiments were performed considering the Box-Behnken Design of the Response Surface Methodology (RSM). As a result of variance analysis, the effects of drilling parameters and the effects of interactions on thrust force were determined. A mathematical model was developed for the thrust force by using independent variables. Optimum drilling parameters were determined by using Desirability Function Analysis (DFA). Finally, verification experiments were carried out.

### Article Info:

Research article

Received: 18/11/2019

Revision: 11/02/2020

Accepted: 26/03/2020

### Highlights

- The effect of multi-walled carbon nanotube on thrust force
- Modeling of the relationship between thrust force and drilling parameters
- Drilling parameter optimization for minimum thrust force

### Keywords

Drilling  
 Thrust Force  
 Multi-Wall Carbon Nanotube  
 Box-Behnken Design  
 Response Surface Methodology  
 Desirability Function Analysis

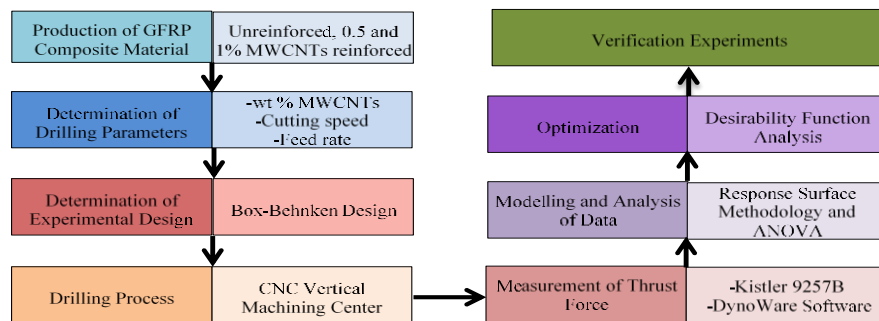


Figure A. Experiment flow chart

**Purpose:** The main objective of the study is to correlate drilling parameters with thrust force during the drilling of the GFRP composite materials using RSM. The development of a mathematical model is adopted to predict the thrust force. The final aim of this study is to optimize drilling conditions using DFA.

**Theory and Methods:** The optimization is based on RSM and DFA. Moreover, the analysis of variance (ANOVA) is used to establish the statistical significance of the drilling parameters on thrust force.

**Results:** The results indicated that the thrust force is powerfully affected by feed rate with a large contribution, followed by cutting speed and weight percentage of multi-wall carbon nanotube. The RSM allowed the optimization of the drilling conditions for minimal thrust force.

**Conclusion:** Adjusted  $R^2$  value calculated for the response surface model was found to be 0.9950, which means that the variance in thrust force could be explained by the significant factors determined. The average absolute error between experimental and predicted values was calculated as about 0.90% sufficiently low to verify the high predictive strength of model. After developing the mathematical model, a numerical optimization technique using DFA was employed to optimize the drilling process. Minimum thrust force parameters were obtained as 0.99 wt % MWCNTs, 71.47 m/min cutting speed and 0.10 mm/rev feed rate by using RSM and DFA.



## Tepki Yüzeyi Metodolojisi kullanılarak Nanokompozitin Delinmesinde oluşan İtme Kuvvetinin Modellenmesi ve Analizi

Gökhan BAŞAR<sup>1</sup> Hediye KIRLI AKIN<sup>1,\*</sup> Funda KAHRAMAN<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 80000, Merkez/OSMANİYE

<sup>2</sup>Tarsus Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 33400, Tarsus/MERSİN

### Öz

Bu çalışmada, cam elyaf takviyeli polimer kompozitlerin delme işleminde, delme parametrelerinin itme kuvvetine etkisi deneysel ve istatistiksel olarak araştırılmıştır. Bağımsız değişkenler olarak ağırlıkça % çok duvarlı karbon nanotüp miktarı, kesme hızı ve ilerleme, bağımlı değişken olarak ise itme kuvveti seçilmiştir. Deneyler, Box–Behnken tasarımına göre yapılmıştır. Tepki yüzeyi metodolojisi kullanılarak itme kuvvetini tahmin etmek için matematiksel bir model geliştirilmiştir. Optimum delme parametreleri belirlemek için İstenirlik Fonksiyon Analizi kullanılmıştır. Proses parametrelerinin itme kuvveti üzerindeki etkisi varyans analizi kullanılarak değerlendirilmiştir. Sonuçlar, ilerlemenin itme kuvvetini etkileyen en önemli tasarım faktörü olduğunu göstermiştir. Modelden tahmin edilen değerler ve deneysel değerlerin birbirine çok yakın olduğu tespit edilmiştir.

### Analysis and Modeling of Thrust Force by using Response Surface Methodology in Drilling Nanocomposite

#### Abstract

In this study, the effects of drilling parameters on the thrust force in the drilling process of glass fiber reinforced polymer composites were investigated experimentally and statistically. Multi-walled carbon nanotube wt. % content, cutting speed and feed rate were considered as independent variables, the thrust force was considered as dependent variable. Experiments are conducted based on Box–Behnken design. A mathematical model was developed to predict thrust force using response surface methodology. Desirability Function Analysis was used to determine optimum drilling parameters. The influence of process parameters on the thrust force has been evaluated using analysis of variance. The results indicate that the feed rate is the most significant design factor influencing the thrust force. The values predicted from the model and experimental values were found to be very close to each other.

#### Makale Bilgisi

Araştırma makalesi  
Başvuru: 18/11/2019  
Düzeltilme: 11/02/2020  
Kabul: 26/03/2020

#### Anahtar Kelimeler

Delme  
İtme Kuvveti  
Çok Duvarlı Karbon  
Nanotüp  
Box–Behnken Tasarımı  
Tepki Yüzeyi Metodolojisi  
İstenirlik Fonksiyon  
Analizi

#### Keywords

Drilling  
Thrust Force  
Multi-Wall Carbon  
Nanotube  
Box–Behnken Design  
Response Surface  
Methodology  
Desirability Function  
Analysis

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Cam Elyafı Takviyeli Polimer (CETP) kompozit malzemeler yüksek özgül mukavemet, hafiflik, yüksek sönümleme, iyi korozyon direnci ve düşük termal genleşme gibi mükemmel özelliklerinden dolayı uzay, havacılık, otomobil, gemi ve kimya endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır [1, 2]. Nano partiküller, polimer malzemelerin mekanik özelliklerinin gelişmesinde oldukça öneme sahip katkı maddeleri olarak kabul edilir. Son zamanlarda, nano partiküllerin gelişimine bağlı olarak nano partikül katkılı polimerik kompozitlerin üretiminde büyük bir artış olmuştur. Ayrıca, nano partikül katkı türü kompozit malzemelerin mekanik, elektriksel ve termal özelliklerini etkileyebilir. Örnek olarak, yüksek mukavemete ve düşük yoğunluğa sahip karbon nanotüp kompozit malzemeler, özellikle otomobil endüstrisinde ticari başarı elde etmişlerdir [3, 4].

Kompozit malzemeler nihai şekline yakın olarak üretilseler de montajları sırasında gerekli toleranslara getirilmesi için delme işlemi yaygın olarak kullanılmaktadır [5]. Delme işlemi sırasında; matris çatlaması, elyaf çekmesi ve kopması, tabakalar arası çatlak ve ayrışma gibi hasar mekanizmaları meydana gelmektedir [6]. CETP kompozitlerin delinmesinde, yüksek delik kalitesine, düşük deformasyon ve minimum itme kuvveti için en uygun delme parametrelerinin belirlenmesi oldukça önemlidir. Yüksek kaliteli bir delme işlemi için delme parametrelerinin uygun değerlerinin tespit edilmesi önemli bir kriterdir [7, 8]. Khashaba [9], havacılık endüstrisinde kullanılan tabakalı polimer kompozitlerin delinmesinde yaklaşık %60'ının kalitesiz olduğu için hurdaya atıldığını ifade etmiştir. Tabakalı kompozitleri delme işleminde oluşan en önemli kusurun tabaka ayrılması hasarı olduğu ve bunun esas nedenin de itme kuvveti olduğu belirlenmiştir [10-12]. Literatürde CETP kompozit malzemelerin delinmesi ile ilgili yapılan çalışmalar şu şekilde özetlenmiştir. Karimi ve arkadaşları [4], nanokompozitlerin HSS matkaplarla delinmesinde delaminasyon katsayısının minimize edilmesinde Taguchi metodunu kullanmışlardır. Delme parametreleri olarak; ağırlıkça % çok duvarlı karbon nanotüp miktarı (ÇDKNT), ilerleme, kesme hızı ve matkap çapını seçmişlerdir. Delaminasyon katsayısı üzerinde en fazla etki gösteren faktörün ilerleme olduğunu tespit etmişlerdir. Khashaba [9] çalışmasında, CETP kompozit malzemelerinin delinebilirliğini araştırmış ve kesme hızının artması ile itme kuvvetini azaldığını ifade etmiştir. Davim ve arkadaşları [12], CETP kompozitlerin delinmesinde delme parametrelerinin (kesme hızı ve ilerleme) özgül kesme basıncı, itme kuvveti, delaminasyon ve yüzey pürüzlülüğü üzerine etkilerini araştırmışlardır. İtme kuvvetini etkileyen en önemli parametrenin ilerleme olduğunu tespit etmişlerdir. König ve Grass [13] çalışmalarında, delaminasyon seviyesinin itme kuvveti ile ilişkili olduğunu ve itme kuvvetinin kritik değer altında olmasında delaminasyonun ihmal edilebileceğini gözlemlemişlerdir. Palanikumar ve arkadaşları [14], CETP delinmesinde devir sayısı, ilerleme hızı ve matkap çapının itme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerini araştırmak için Taguchi tabanlı Gri İlişki Analizi yöntemini kullanmışlardır. Latha ve Senthilkumar [15] çalışmalarında, CETP kompozit malzemelerin delinmesi esnasında oluşan itme kuvvetini tahmin etmek için bulanık mantık yöntemini kullanmışlardır. Bulanık mantık modelinden elde edilen sonuçlar tepki yüzeyi modeliyle karşılaştırmışlardır. Sonuçlar, bulanık kuralla dayalı modelin tahmin yeteneğinin daha yüksek olduğunu göstermiştir. Koyunbakan ve arkadaşları [16], CETP kompozit malzemelerin delinmesinde; kesme hızı, ilerleme, matkap çapı ve matkap uç açısını delme parametreleri olarak belirlemişlerdir. Delme işlemi esnasında oluşan itme kuvvetini tahmin etmek için ANFIS ile bir model geliştirmişlerdir. Singh ve Kumar [17] çalışmasında, CETP nanokompozit malzemelerin delinmesinde devir sayısı, ilerleme, matkap çapı ve ağırlıkça % ÇDKNT miktarının delaminasyon faktörü ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri Tepki Yüzeyi Metodolojisi (TYM) yardımıyla incelemişlerdir. Delaminasyon faktörü ve yüzey pürüzlülüğü için ikinci dereceden matematiksel model geliştirmişlerdir.

Bu çalışmada, CETP nanokompozit malzemelerin delinmesinde ağırlıkça % ÇDKNT miktarı, kesme hızı ve ilerlemenin itme kuvveti üzerindeki etkileri TYM ile tespit edilmiştir. İtme kuvveti için kuadratik model oluşturulmuştur. En düşük itme kuvveti için optimum delme parametreleri belirlenmiştir. Son olarak, doğrulama deneyleri yapılarak geliştirilen modelin başarısı test edilmiştir.

## 2. MATERYAL ve METOT (MATERIAL AND METHOD)

### 2.1. Kompozit Üretimi (Composite Manufacturing)

Çalışmada, CETP kompozit malzemelerin delinmesi işleminde delme parametrelerinin itme kuvveti üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bunun için öncelikle İnovatif Malzeme Teknolojileri San. ve Tic. Ltd. Şti. firmasına, katkısız, %0,5 ve 1 ÇDKNT katkısına sahip CETP kompozit malzemeler ürettirilmiştir (Şekil 1). Kompozit malzemelerin üretilmesinde, plakalar arasında boşlukların oluşmasını engellemek amacı ile vakum infüzyon yöntemi tercih edilmiştir. Takviye edilecek ÇDKNT partikülleri, arzu edilen oranı karşılayacak şekilde hassas terazide tartılmıştır. Tartılan ÇDKNT partiküller asetonda çözündürülmüş ve topaklanmayı engellemek için de 30 dk mekanik karıştırıcı ile karıştırılmıştır. Ardından çözündürülmüş nano partiküller epoksiye eklenmiştir. Asetonlu nano partiküller epoksi ile birlikte 60 dk ultrasonik karıştırıcı ile karıştırılmıştır. Karışımda bulunan asetona buharlaşması için vakum fırınında, 80°C sabit sıcaklıkta ve 24 saat süre boyunca vakum altında kalmıştır. Ardından, oda sıcaklığına gelinceye kadar soğumaya bırakılmıştır. Epoksi sertleştirici ve nano partikülden oluşan karışım 30 dk mekanik karıştırıcı ile karıştırılmıştır. Reçine olarak ağırlıkça 1:4 oranında sertleştirici eklenen epoksi tercih edilmiştir. Sonrasında tek yönlü cam elyaf dokumalardan kesimler yapılmıştır. Kesilen dokumalara hazırlanan epoksi

reçineler emdirilerek, dokumalar 0 ve 90° yönlerinde tabakalandırılmıştır. Ardından, üst üste dizilen dokumalara 1600 N/m<sup>2</sup> yük uygulanmış ve 24 saat boyunca oda sıcaklığında kürlenmeye bırakılmıştır. Üretilen katkısız ve ÇDKNT katkılı malzemeler, hacimce %55 cam elyaftan ve 8 katmandan oluşmuştur. Kompozit malzemelerin kalınlıkları 7 mm ± 0,2 mm'dir. Üretilen kompozit plakaları, 80 x 100 mm boyutlarına getirmek için su jeti ile kesim yapılmıştır.



(a) CETP



(b) %0,5 ÇDKNT + CETP

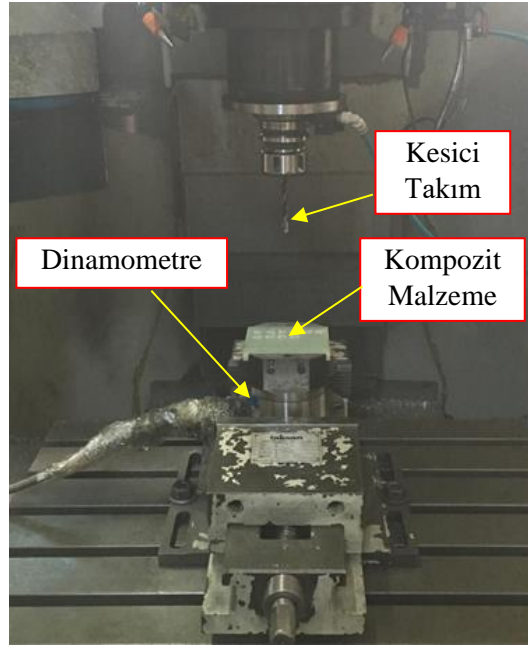


(c) %1 ÇDKNT + CETP

**Şekil 1.** Katkısız, %0,5 ve 1 ÇDKNT katkılı CETP kompozit malzemeler

## 2.2. Deneysel Tasarım (Design of Experiments)

Delme deneyleri maksimum 6000 dev/dk ve 7,5 kW güce sahip Johnford VMC 850 marka CNC dik işleme merkezinde gerçekleştirilmiştir. Kesici takım olarak, kaplamasız Ø8 mm HSS kesici takımları kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan ekipmanlar Şekil 2'de gösterilmiştir. Her deney için takım aşınmasından kaynaklı hataları önlemek amacıyla yeni bir kesici takım kullanılmıştır.



**Şekil 2.** Delme deneylerinde kullanılan ekipmanlar

Çalışmada, ağırlıkça % ÇDKNT miktarı, kesme hızı ve ilerleme delme parametresi olarak belirlenmiştir. Deneylerde kullanılan kontrol faktörleri ve seviyeleri Tablo 1'de görülmektedir. Deneyler Box-Behnken deney tasarımına göre tasarlanmış ve istatistiksel olarak anlamlı sonuçlar elde etmek amacıyla ikişer kez tekrarlanmıştır (Tablo 2).

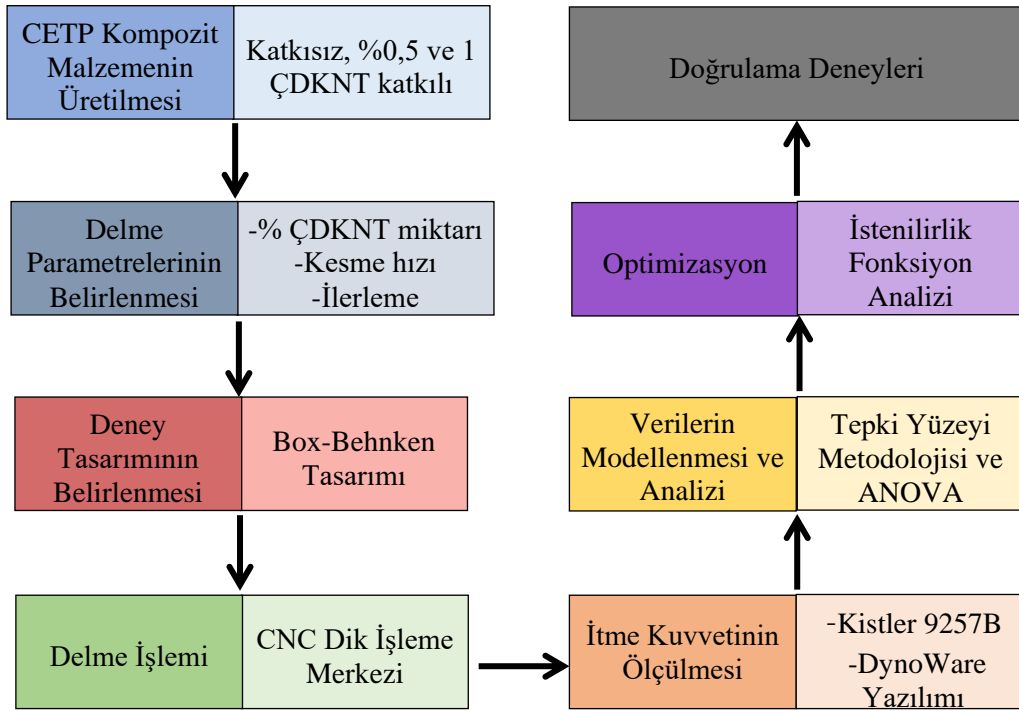
**Tablo 1.** Kontrol faktörleri ve seviyeleri

| Kontrol faktörler | Sembol | Seviye |      |      |
|-------------------|--------|--------|------|------|
|                   |        | -1     | 0    | +1   |
| ÇDKNT miktarı (%) | A      | 0      | 0,5  | 1    |
| Kesme hızı (m/dk) | B      | 25     | 50   | 75   |
| İlerleme (mm/dev) | C      | 0,10   | 0,15 | 0,20 |

**Tablo 2.** Box-Behnken tasarımına göre kontrol faktörlerin kodlanmış ve gerçek değerleri

| Kontrol faktörlerin değerleri |           |    |    |                   |                   |                   |
|-------------------------------|-----------|----|----|-------------------|-------------------|-------------------|
| Deney sırası                  | Kodlanmış |    |    | Gerçek            |                   |                   |
|                               | A         | B  | C  | ÇDKNT miktarı (%) | Kesme hızı (m/dk) | İlerleme (mm/dev) |
| 1                             | -1        | -1 | 0  | 0                 | 25                | 0,15              |
| 2                             | 1         | -1 | 0  | 1                 | 25                | 0,15              |
| 3                             | -1        | +1 | 0  | 0                 | 75                | 0,15              |
| 4                             | 1         | +1 | 0  | 1                 | 75                | 0,15              |
| 5                             | -1        | 0  | -1 | 0                 | 50                | 0,1               |
| 6                             | 1         | 0  | -1 | 1                 | 50                | 0,1               |
| 7                             | -1        | 0  | +1 | 0                 | 50                | 0,2               |
| 8                             | 1         | 0  | +1 | 1                 | 50                | 0,2               |
| 9                             | 0         | -1 | -1 | 0,5               | 25                | 0,1               |
| 10                            | 0         | +1 | -1 | 0,5               | 75                | 0,1               |
| 11                            | 0         | -1 | +1 | 0,5               | 25                | 0,2               |
| 12                            | 0         | +1 | +1 | 0,5               | 75                | 0,2               |
| 13                            | 0         | 0  | 0  | 0,5               | 50                | 0,15              |
| 14                            | 0         | 0  | 0  | 0,5               | 50                | 0,15              |
| 15                            | 0         | 0  | 0  | 0,5               | 50                | 0,15              |

Deney akış şeması Şekil 3'te verilmiştir. İtme kuvvetleri ( $F_z$ ) dik işleme merkezinin tezgâh tablasına bağlanmış olan Kistler 9257B tipi dinamometre ile ölçülmüştür. İtme kuvveti verileri Kistler DynoWare yazılımıyla bilgisayar ortamına kaydedilmiştir.



Şekil 3. Deney akış şeması

### 2.3. Tepki Yüzeyi Metodolojisi (Response Surface Methodology)

Tepki Yüzeyi Metodolojisi, bir ürün veya sürecin kalite karakteristiklerinin geliştirilmesinde ve iyileştirilmesinde kullanılan istatistiksel bir yöntemdir [18]. Bu yöntem, bir sürecin parametreleri ve kalite karakteristikleri arasındaki ilişkiyi analiz etme, modelleme ve optimum parametre seviyelerin tespit edilmesinde başarılı bir şekilde kullanılmaktadır [19, 20]. TYM, en az sayıda gözlemlenebilir değerler ile tepki değişkeninin yeterli ve güvenilir şekilde ölçülmesini sağlayan deney tasarımı kullanılarak elde edilen verilere en iyi uyum sağlayacak matematiksel modelin oluşturulmasını ve en iyi tepki değerini veren faktör seviyelerinin belirlenmesini kapsamaktadır [21]. TYM ile doğrusal, kuadratik ve kübik gibi modeller kullanılmaktadır. Kuadratik modelin denklemi Eşitlik 1'deki gibi ifade edilebilir.

$$y = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j x_j + \sum_{j=1}^k \beta_{jj} x_j^2 + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=i+1}^k \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad 1$$

Bu eşitlikte  $x_1, x_2, \dots, x_n$  bağımsız değişkenleri,  $y$  bağımlı (tepki) değişkeni,  $\beta_0, \beta_i, \beta_{ii}$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ),  $\beta_{ij}$  ( $i = 1, 2, \dots, n ; j = 1, 2, \dots, n$ ) bilinmeyen model parametrelerini ve  $\varepsilon$  rastgele hata terimini göstermektedir [22].

TYM ile birçok deney tasarımı yapılabilmektedir. Fakat, TYM için özel olarak geliştirilmiş ve deney sayısını önemli ölçüde azaltan Box-Behnken ve Merkezi Kompozit deney tasarımları gibi tasarımlar yaygın olarak kullanılmaktadırlar [23].

### 2.4. İstenilirlik Fonksiyon Analizi (Desirability Function Analysis)

İstenilirlik Fonksiyon Analizi (İFA), bağımlı değişkenlerin, boyutsuz "istenilirlik indeksi" olarak tanımlanan tek bir fonksiyon altında toplanmasını ve bu fonksiyonun hedeflenen sonuçları verecek şekilde maksimize edilmesini kapsamaktadır. İstenilirlik indeksi 0 ile 1 arasında değişmektedir. Bu değer 1'e yaklaşması araştırmacının belirlediği kriterleri sağladığını göstermektedir [24].

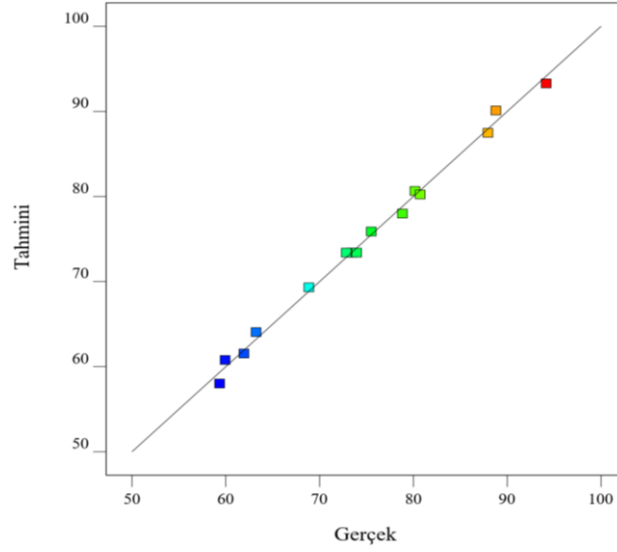
### 3. SONUÇ VE TARTIŞMA (RESULT AND DISCUSSION)

#### 3.1. Deneysel Verilerin Analizi (Experimental Data Analysis)

CETP nanokompozit malzemeleri delme işleminde, itme kuvveti oldukça önemlidir. Delme parametrelerine bağlı olarak değişmektedir. Bağımsız değişkenler ile bağımlı değişken arasındaki ilişki TYM'nin Box-Behnken deney tasarımı kullanılarak belirlenmiştir. Deney sonuçlarının istatistiksel olarak değerlendirilmesinde Design Expert paket programı kullanılmıştır. Deney tasarımına göre gerçekleştirilen deneylerin sonuçları Tablo 3'te verilmiştir. Verilerin istatistik analizinden elde edilen tahmin modellerine ait bulgular Tablo 4'de yer almaktadır. Tablo 3'te yer alan deneysel ve tahmini itme kuvvet değerleri arasındaki ilişki Şekil 4'de görülmektedir.

**Tablo 3.** İtme kuvvetinin deneysel ve tahmini değerleri

| <i>Deney Numarası</i>                | <i>A (%)</i> | <i>B (m/dk)</i> | <i>C (mm/dev)</i> | <i>Deneysel Fz (N)</i> | <i>Tahmini Fz (N)</i> | <i>Hata (%)</i> |
|--------------------------------------|--------------|-----------------|-------------------|------------------------|-----------------------|-----------------|
| 1                                    | 0            | 25              | 0,15              | 87,94                  | 87,48                 | 0,52            |
| 2                                    | 1            | 25              | 0,15              | 80,16                  | 80,64                 | 0,60            |
| 3                                    | 0            | 75              | 0,15              | 80,72                  | 80,24                 | 0,59            |
| 4                                    | 1            | 75              | 0,15              | 68,86                  | 69,32                 | 0,67            |
| 5                                    | 0            | 50              | 0,1               | 61,93                  | 61,55                 | 0,61            |
| 6                                    | 1            | 50              | 0,1               | 59,34                  | 58,02                 | 2,22            |
| 7                                    | 0            | 50              | 0,2               | 88,79                  | 90,11                 | 1,49            |
| 8                                    | 1            | 50              | 0,2               | 75,51                  | 75,89                 | 0,50            |
| 9                                    | 0,5          | 25              | 0,1               | 63,23                  | 64,07                 | 1,33            |
| 10                                   | 0,5          | 75              | 0,1               | 59,93                  | 60,79                 | 1,44            |
| 11                                   | 0,5          | 25              | 0,2               | 94,15                  | 93,29                 | 0,91            |
| 12                                   | 0,5          | 75              | 0,2               | 78,83                  | 77,99                 | 1,07            |
| 13                                   | 0,5          | 50              | 0,15              | 73,41                  | 73,40                 | 0,01            |
| 14                                   | 0,5          | 50              | 0,15              | 73,95                  | 73,40                 | 0,74            |
| 15                                   | 0,5          | 50              | 0,15              | 72,84                  | 73,40                 | 0,77            |
| <i>Ortalama mutlak yüzde hatası:</i> |              |                 |                   |                        |                       | 0,90            |



Şekil 4. İtme kuvvetinin tahmini ve gerçek değerleri

Tablo 4. Model istatistikleri

| Kaynak    | Std. Sapma | R <sup>2</sup> | Düzeltilmiş R <sup>2</sup> | Tahmin R <sup>2</sup> | PRESS  |          |
|-----------|------------|----------------|----------------------------|-----------------------|--------|----------|
| Doğrusal  | 4,44       | 0,8666         | 0,8302                     | 0,7175                | 458,81 |          |
| 2FI       | 4,30       | 0,9090         | 0,8408                     | 0,5288                | 765,34 |          |
| Kuadratik | 1,28       | 0,9950         | 0,9859                     | 0,9249                | 122,04 | önerilen |
| Kübik     | 0,56       | 0,9996         | 0,9973                     |                       |        |          |

Tablo 4’de yer alan tahmin modelleri incelendiğinde, düzeltilmiş R<sup>2</sup> ve tahmin edilen R<sup>2</sup> değerlerinin maksimum ve tahmin hata kareler toplamı (PRESS) değerinin ise minimum olduğu model önerilmiştir. Kuadratik modele ait ANOVA sonuçları Tablo 5’te verilmiştir.

Tablo 5. Kuadratik modele ait ANOVA sonucu

| Kaynak         | KT      | SD | KO      | F- değeri | p- değeri |
|----------------|---------|----|---------|-----------|-----------|
| Model          | 1616,19 | 9  | 179,58  | 110,07    | < 0,0001  |
| A              | 157,62  | 1  | 157,62  | 96,62     | 0,0002    |
| B              | 172,42  | 1  | 172,42  | 105,69    | 0,0001    |
| C              | 1077,64 | 1  | 1077,64 | 660,56    | < 0,0001  |
| A <sup>2</sup> | 10,53   | 1  | 10,53   | 6,45      | 0,0519    |
| B <sup>2</sup> | 69,27   | 1  | 69,27   | 42,46     | 0,0013    |
| C <sup>2</sup> | 50,45   | 1  | 50,45   | 30,92     | 0,0026    |
| AB             | 4,16    | 1  | 4,16    | 2,55      | 0,1711    |
| AC             | 28,57   | 1  | 28,57   | 17,51     | 0,0086    |
| BC             | 36,12   | 1  | 36,12   | 22,14     | 0,0053    |
| Hata           | 8,16    | 5  | 1,63    |           |           |
| Uyum eksikliği | 7,54    | 3  | 2,51    | 8,16      | 0,1111    |



|   |         |    |      |  |  |
|---|---------|----|------|--|--|
| <i>Saf hata</i>   | 0,62    | 2  | 0,31 |  |  |
| <i>Toplam</i>   | 1624,35 | 14 |      |  |  |
| <i>SD: Serbestlik derecesi, KT: Kareler toplamı, KO: Kareler ortalaması</i> |         |    |      |  |  |

Kuadratik model için hesaplanan p değerinin ( $< 0,0001$ )  $0,05$ 'ten düşük olması, modelin genel olarak anlamlı olduğunu göstermektedir. ANOVA tablosundaki faktör veya etkileşimin tepki üzerindeki etkisi p değerine bakılarak anlaşılmaktadır. %95 güven aralığında ( $p < 0,05$ ) iken faktör veya etkileşimin tepki üzerinde anlamlı olduğu sonucuna ulaşılır. Buna göre, *A*, *B*, *C*,  $B^2$ ,  $C^2$ , *AC* ve *BC* faktörlerin itme kuvveti üzerinde anlamlı olduğu,  $A^2$  ve  $AB$ 'nin ise anlamsız olduğu anlaşılmıştır. Kuadratik model için hesaplanan istatistikler Tablo 6'da verilmiştir.

**Tablo 6.** Kuadratik modeli için katsayı değerleri

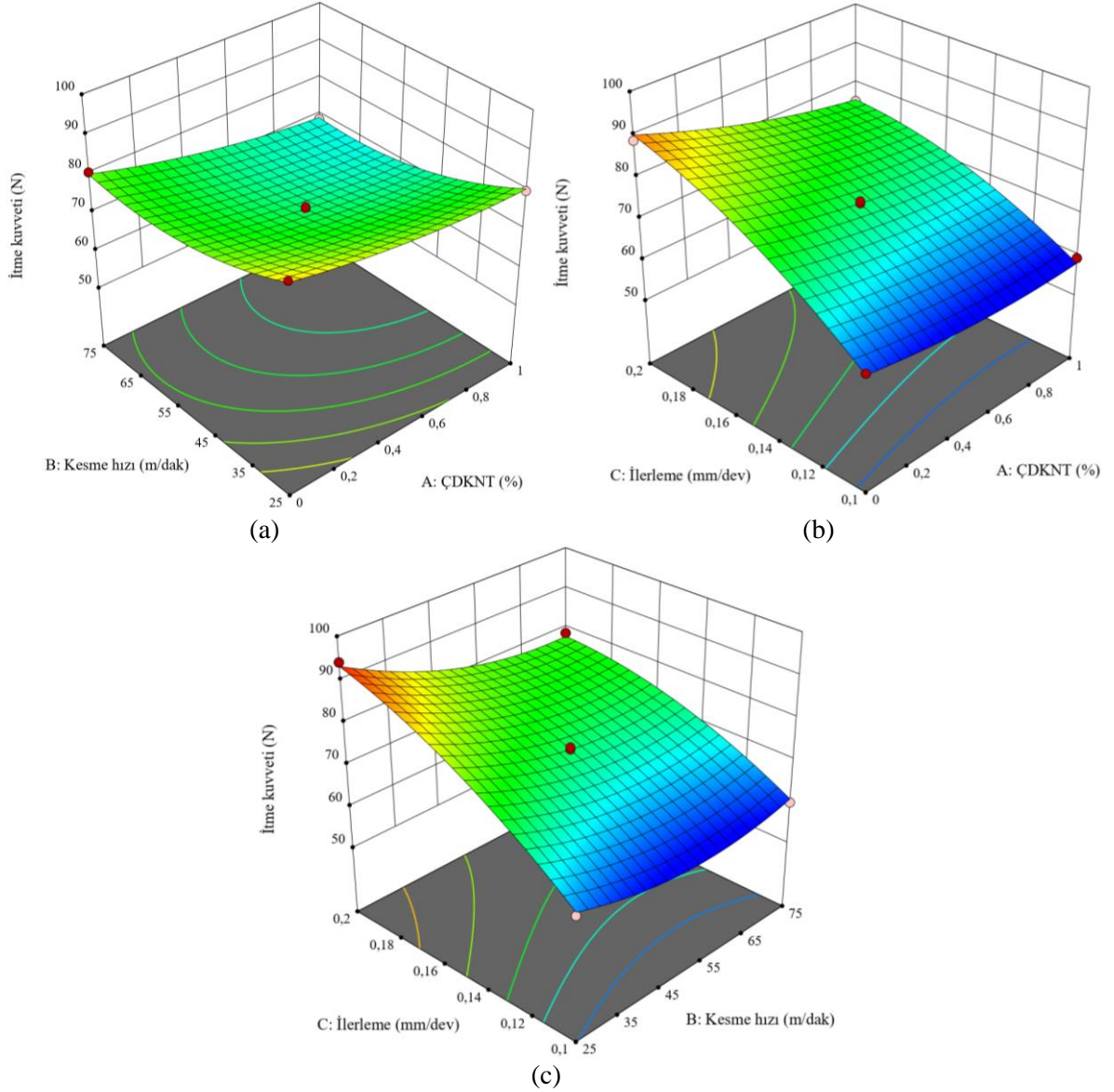
|  |        |                                     |        |
|--|--------|-------------------------------------|--------|
| <i>Standart sapma</i>                            | 1,28   | <i>Düzeltilmiş <math>R^2</math></i> | 0,9950 |
| <i>Ortalama</i>                                  | 74,64  | <i>Tahmin <math>R^2</math></i>      | 0,9859 |
| <i>Varyasyon katsayısı %</i>                     | 1,71   | <i>Tahmin hata kareler toplamı</i>  | 0,9249 |
| <i>Tahminlenmiş kalıntı hata kareler toplamı</i> | 122,04 | <i>Yeterli kesinlik</i>             | 33,818 |

Tablo 6'ya göre 0,9950 olarak hesaplanan düzeltilmiş  $R^2$  değeri, itme kuvveti değişkenindeki varyansın yaklaşık %99,50'sinin delme parametreleri ve etkileşimleri (*A*, *B*, *C*,  $A^2$ ,  $B^2$ ,  $C^2$ , *AB*, *AC* ve *AB*) tarafından açıklanabildiği, %0,50'lik kısmın ise açıklanamadığını ifade etmektedir. Düzeltilmiş  $R^2$  ve tahmin  $R^2$  değerlerin birbirine ve 1'e oldukça yakın olmaları modelin uygunluğunu ifade etmektedir. Yeterli kesinlik değeri, sinyal gürültü oranını ölçer ve bu oranın 4'ün üstünde olması istenir. Model için hesaplanan yeterli kesinlik değeri (33,818), sinyalin yeterli olduğu ve modelin tasarım uzayında gezinmek için kullanılabileceği anlamına gelmektedir.

TYM ile Box-Behnken tasarımı yaklaşımı kullanılarak itme kuvveti için elde edilen ikinci dereceden model, kodlanmış faktörlerle aşağıda Eşitlik 2'de ifade edilmiştir.

$$Fz = 73,40 - 4,44A - 4,64B + 11,61C - 2,67AC - 3,01BC + 4,33B^2 - 3,70C^2 \quad 2$$

İtme kuvveti ve delme parametreleri arasındaki değişime ilişkin yüzey grafikleri Şekil 5 (a-c)'te verilmiştir. Şekil 5 (a) incelendiğinde, kesme hızı ve ÇDKNT miktarının artması ile itme kuvveti azalmıştır. İlerleme, kesme alanı yüksekliği ve itme kuvveti arasında bir ilişki vardır. İlerlemenin artması ile genellikle kesme alanının yüksekliği artmaktadır. Kesme alanı yüksekliğinin artması da itme kuvvetinin artmasına sebep olmaktadır [25]. Çalışma ile literatüre uyumlu sonuçlar elde edilmiştir. ÇDKNT miktarının artması ve ilerlemenin azalması ile itme kuvvetinin azaldığı Şekil 5 (b)'de görülmektedir. Kumar ve Singh çalışmasında, en düşük itme kuvvetini ağırlıkça %1,5 ÇDKNT takviyeli karbon elyaf polimer nanokompozit malzemede elde etmişlerdir. ÇDKNT takviyesinin, takım-talaş arayüzünde yağlama özelliği gösterdiğini ve böylece delme işlemini kolaylaştırdığını ifade etmişlerdir [26]. Şekil 5 (c)'de ise, ilerlemenin azalması ve kesme hızının artması ile itme kuvvetinin azaldığı görülmüştür. Kesme hızı arttıkça takım ve iş parçası arasındaki sürtünmeden dolayı kesme bölgesindeki sıcaklık artar. Sıcaklığın artması ile kompozit malzemede yumuşama meydana gelir. Böylece, kesme hızının artması ile itme kuvveti azalmaktadır [27, 28].



**Şekil 5.** Delme parametrelerinin itme kuvvetine etki grafikleri a) Kesme hızı ve ÇDKNT b) İlerleme ve ÇDKNT c) Kesme hızı ve ilerleme

### 3.2. Doğrulama Deneyleri (Verification Tests)

Geliştirilen modelin başarısını tespit etmek amacıyla yapılan deneylerdir. Doğrulama deneyleri, TYM'nin Box–Behnken tasarımı içerisinde yer almayan üç farklı kombinasyonda gerçekleştirilmiştir. Bu kombinasyonlardan elde edilen gerçek ve tahmini itme kuvvetinin sonuçları Tablo 7'de verilmiştir. Tablo 7'de bulunan gerçek ve tahmini itme kuvveti arasındaki ilişkiyi gösteren belirtme katsayısı ( $R^2$ ) 0,998 olarak hesaplanmıştır. Belirtme katsayısı 1'e ne kadar yakın olursa matematiksel model o kadar güçlüdür. Burada elde edilen  $R^2$  değeri oldukça yüksektir. Yani, geliştirilen matematiksel modelin tahmin yeteneğinin güçlü olduğu anlaşılmaktadır. Ayrıca, ortalama mutlak yüzde hata değeri 4,66 olarak hesaplanmıştır.

**Tablo 7.** Doğrulama deneyleri ve sonuçları

| Deney No | A (%) | B (m/dk) | C (mm/dev) | Gerçek $F_z$ | Tahmini $F_z$ | Hata (%) |
|----------|-------|----------|------------|--------------|---------------|----------|
| 1        | 0     | 50       | 0,15       | 79,14        | 79,53         | 0,49     |
| 2        | 0,5   | 75       | 0,15       | 70,29        | 73,09         | 3,98     |
| 3        | 1     | 75       | 0,10       | 54,11        | 59,26         | 9,52     |

|                               |       |
|-------------------------------|-------|
| Belirtme katsayısı ( $R^2$ ): | 0,998 |
| Ortalama mutlak yüzde hatası: | 4,66  |

### 3.3. Optimum Delme Parametrelerin Belirlenmesi (Determination of Optimum Drilling Parameters)

Bu çalışmanın son adımında, İstenilirlik Fonksiyon Analizi (İFA) kullanılarak optimum delme parametreleri belirlenmiştir. Bağımsız değişkenler aralığında ve bağımlı değişkeni minimum yapan en iyi parametre değerleri, istenilirlik indeksinin en yüksek olduğu değerde elde edilmiştir. İFA ile en düşük itme kuvvetini veren en iyi parametre değerleri Tablo 8’de verilmiştir.

**Tablo 8. En düşük itme kuvveti için en iyi parametre değerleri**

| ÇDKNT (%) | Kesme hızı (m/dk) | İlerleme (mm/dev) | İtme kuvveti (N) | İstenilirlik indeksi |
|-----------|-------------------|-------------------|------------------|----------------------|
| 0,99      | 71,47             | 0,10              | 59,26            | 1                    |

Tablo 8 incelendiğinde, en düşük itme kuvvet değerinin elde edilmesi için gerekli parametre kombinasyonu %0,99 ÇDKNT miktarı, 71,47 m/dk kesme hızı ve 0,10 mm/dev ilerleme olarak tespit edilmiştir. Kontrol deneyleri arasından optimum parametre kombinasyonuna en yakın olanı üç numaralı kombinasyon olarak belirlenmiştir. İFA ile elde edilen optimum kombinasyonun tahmin edilen itme kuvveti 59,26 N iken dokuz numaralı kontrol deneyinin sonucu ise 54,11 N olarak elde edilmiştir.

## 4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

ÇDKNT takviyeli ve takviyesiz CETP’lerin delinmesinde, delme parametreleri ve itme kuvveti arasındaki ilişkinin tahmini ve analizi için matematiksel bir model geliştirilmiştir. Bu çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır.

- ANOVA sonuçlarından, % ÇDKNT miktarı, kesme hızı, ilerleme ve bu faktörlerin birbirleriyle etkileşimi itme kuvveti üzerinde oldukça önemli olduğu görülmüştür. İtme kuvvetini etkileyen en önemli faktörün ise ilerleme olduğu tespit edilmiştir.
- Tepki yüzeyi metodolojisi, delme parametrelerine göre itme kuvvetini modellemek için kullanılmıştır. Böylece, ikinci dereceden bir model geliştirilmiştir. Modelden tahmin edilen değerler ve deneysel değerler arasındaki yüzde hata değerleri hesaplanmıştır. Ortalama mutlak hata değeri %0,90 ve belirtme katsayısı  $R^2=0,9950$  olarak hesaplanmıştır.
- Doğrulama deneyleri sonucunda, modelden tahmin edilen değerler ve deneysel değerler arasındaki ortalama hata değeri %4,66 ve belirtme katsayısı  $R^2=0,998$  olarak hesaplanmıştır.
- İtme kuvveti ve delme parametreleri arasındaki değişime ilişkin yüzey grafikleri incelendiğinde, ilerleme azaldıkça itme kuvvetinin azaldığı görülmüştür. Ayrıca, kesme hızı ve ÇDKNT miktarındaki artış itme kuvvetini azaltmıştır.
- İstenilirlik Fonksiyon Analizi ile en düşük itme kuvveti değerinin (59,26 N) elde edilmesi için en optimum parametre kombinasyonu; %0,99 ÇDKNT miktarı, 71,47 m/dk kesme hızı ve 0,10 mm/dev olarak belirlenmiştir.
- Deney tasarımına ve doğrulama deneyleri sonucunda elde edilen gerçek ve tahmini değerler birbirine oldukça yakındır. Bu sebeple geliştirilen model delme parametrelerinin seviyesini belirlemek için kullanılabilir. Böylece, delme işleminde zaman kaybı ve maliyet azaltılabilir.

## TEŞEKKÜRLER (ACKNOWLEDGMENTS)

Yazarlar, çalışmanın yürütülmesinde laboratuvar olanaklarını sunan Prof. Dr. İhsan Korkut'a ve delme işlemi esnasındaki yardımlarından dolayı Arş. Gör. Bahattin Yılmaz'a teşekkür eder.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Ekici, E., & Işık, B. (2009). Cam elyaf takviyeli polimer kompozit malzemenin delinmesi esnasında oluşan yüzey hasarının deneysel olarak incelenmesi. 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS), 1-6.
- [2] Takmaz, A., Erkan, Ö., & Yücel, E. (2016). Cam elyaf takviyeli plastik kompozit malzemenin kenar frezelenmesinde kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkilerinin istatistiksel olarak incelenmesi. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 4(2), 567-573.
- [3] Advani, S. G. (2007). *Processing and properties of nanocomposites*, World Scientific Publishing, Singapore.
- [4] Karimi, Z. N., Heidary, H., Yousefi, J., Sadeghi, S., & Minak, G. (2018). Experimental investigation on delamination in nanocomposite drilling. *FME Transactions*, 46(1), 62-69.
- [5] Ravishankar S. R., & Murthy C. R. L. (1996). Ultrasonic imaging for evaluation of drill-induced delaminations in composite laminates. In *Proceedings of the 14th World Conference Nondestructive Test*, 8-13.
- [6] Velayudham, A., & Krishnamurthy, R. (2007). Effect of point geometry and their influence on thrust and delamination in drilling of polymeric composites. *Journal of Materials Processing Technology*, 185(1-3), 204-209.
- [7] Bilge, T., Motorcu, A. R., & Ivanov, A. (2017). Kompakt laminatın delinmesinde boyutsal tamlik için delme parametrelerinin Gri İlişkisel Analiz ile optimizasyonu. *Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi*, 9(2), 1-22.
- [8] Motorcu, A. R., Ekici, E., & Kuş, A. (2016). Investigation of the WEDM of Al/B4C/Gr reinforced hybrid composites using the Taguchi Method and Response Surface Methodology. *Science and Engineering of Composite Materials*, 23(4), 435-445.
- [9] Khashaba, U. A. (2004). Delamination in drilling GFR-thermoset composites. *Composite Structures*, 63(3-4), 313-327.
- [10] Hocheng, H., & Tsao, C. C. (2003). Comprehensive analysis of delamination in drilling of composite materials with various drill bits. *Journal of Materials Processing Technology*, 140(1-3), 335-339.
- [11] Davim, J. P., Reis, P., & António, C. C. (2004). Drilling fiber reinforced plastics (FRPs) manufactured by hand lay-up: influence of matrix (Viapal VUP 9731 and ATLAC 382-05). *Journal of Materials Processing Technology*, 155, 1828-1833.
- [12] Davim, J. P., Reis, P., & António, C. C. (2004). Experimental study of drilling glass fiber reinforced plastics (GFRP) manufactured by hand lay-up. *Composites Science and Technology*, 64(2), 289-297.
- [13] König, W., & Grass, P. (1989). Quality definition and assessment in drilling of fibre reinforced thermosets. *CIRP Annals*, 38(1), 119-124.
- [14] Palanikumar, K., Latha, B., Senthilkumar, V. S., & Davim, J. P. (2012). Analysis on drilling of glass fiber-reinforced polymer (GFRP) composites using Grey Relational Analysis. *Materials and Manufacturing Processes*, 27(3), 297-305.

- [15] Latha, B., & Senthilkumar, V. S. (2009). Analysis of thrust force in drilling glass fiber-reinforced plastic composites using Fuzzy Logic. *Materials and Manufacturing Processes*, 24(4), 509-516.
- [16] Koyunbakan, M., Ünüvar, A., & Demir, O. (2015). CETP kompozitlerin delinmelerindeki itme kuvvetinin ANFIS ile modellenmesi. 6. Ulusal Talaşlı İmalat Sempozyumu (UTİS 2015), 145-156.
- [17] Singh, K. K., & Kumar, D. (2018). 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*, 232(11), 1943-1959.
- [18] Aslan, N., & Cebeci, Y. (2007). Application of Box-Behnken design and Response Surface Methodology for modeling of some Turkish coals. *Fuel*, 86(1-2), 90-97.
- [19] Yavari, S., Malakahmad, A., Sapari, N. B., & Yavari, S. (2017). Sorption properties optimization of agricultural wastes-derived biochars using Response Surface Methodology. *Process Safety and Environmental Protection*, 109, 509-519.
- [20] Özdemir, M. (2019). Yüzey pürüzlülüğü üzerinde kesme parametrelerinin etki oranlarının Yüzey Yanıt Yöntemi kullanarak analizi. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 7(3), 639-648.
- [21] Chehreghani, S., Noaparast, M., Rezai, B., & Shafaei, S. Z. (2017). Bonded-particle model calibration using Response Surface Methodology. *Particuology*, 32, 141-152.
- [22] Yang, A., Han, Y., Pan, Y., Xing, H., & Li, J. (2017). Optimum surface roughness prediction for titanium alloy by adopting Response Surface Methodology. *Results Physics*, 7, 1046-1050.
- [23] Bezerra, M. A., Santelli, R. E., Oliveira, E. P., Villar, L. S., & Escalera, L. A. (2008). Response Surface Methodology (RSM) as a tool for optimization in analytical chemistry. *Talanta*, 76, 965-977.
- [24] Türkşen, Ö., & Ertunç, S. (2015). Optimization of saponification process in Multi-Response Framework by using Desirability Function Approach. *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 19(2), 141-149.
- [25] Tsao, C. C., & Huang, C. C. (2015). Analysis of thrust-induced drilling in composite materials using a hemispherical drill, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 80(1-4), 607-13.
- [26] Kumar, D., & Singh, K. K. (2019). Investigation of delamination and surface quality of machined holes in drilling of multiwalled carbon nanotube doped epoxy/carbon fiber reinforced polymer nanocomposite, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, 233(4), 647-663.
- [27] Premnath, A. A. (2019). Drilling studies on carbon fiber-reinforced nano-SiC particles composites using response surface methodology. *Particulate Science and Technology*, 37(4), 478-486.
- [28] Palanikumar, K. (2011). Experimental investigation and optimisation in drilling of GFRP composites. *Measurement*, 44(10), 2138-2148.