

# Al/B<sub>4</sub>C kompozitlerin karbür matkaplarla delinmesinin değerlendirilmesi

## Evaluation of drilling Al/B<sub>4</sub>C composites with carbide drills

Ali Rıza MOTORCU<sup>1</sup>, Ergün EKİCİ<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Endüstri Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Çanakkale, Türkiye.  
armotorcu@comu.edu.tr, ergunekici@comu.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 31.08.2015, Kabul Tarihi/Accepted: 08.12.2015

\* Yazışılan yazar/Corresponding author

doi: 10.5505/pajes.2015.02693

Araştırma Makalesi/Research Article

### Öz

Bu çalışmada, toz metalurjisi-sıcak presleme yöntemiyle üretilen yüksek yoğunluklu B<sub>4</sub>C parçacık takviyeli kompozitlerin kaplamalı ve kaplamasız karbür matkaplarla delinmesinde kesme kuvvetleri ve tork değerleri Taguchi metodu (TM) yardımıyla optimize edilmiştir. Kontrol faktörleri olarak kesme hızı (18, 25 ve 35 m/dk), ilerleme miktarı (0.08, 0.112 ve 0.16 mm/dev), kaplama özellikleri (kaplamalı ve kaplamasız) ve parçacık takviye miktarı (%5, %10 ve %15 B<sub>4</sub>C) kullanılmıştır. Artan ilerleme miktarı ve parçacık takviyesinin aksel kuvvet ve torku arttırdığı, kesme hızını ise düşürdüğü görülmüştür. Kaplamasız matkaplar, kaplamalı matkaplara kıyasla daha iyi performans sergilemiştir. B<sub>4</sub>C takviye miktarının sırasıyla %96.6 ve %49.1 katkı oranları ile aksel kuvvet ve tork üzerinde en etkili parametre olduğu görülmüştür. Ayrıca, aksel kuvvet ve tork için geliştirilen birinci dereceden tahmini denklemlerin korelasyon katsayıları (R<sup>2</sup>) sırasıyla 0.895 ve 0.854 olarak hesaplanmıştır.

**Anahtar kelimeler:** Al/B<sub>4</sub>C kompozit, Aksel kuvvet, Tork, Taguchi metodu

### Abstract

In this study, cutting forces and torque was evaluated through Taguchi Method (TM) in the drilling of the high density B<sub>4</sub>C particle reinforced composites, which were produced through powder metallurgy-hot pressing method, with coated and uncoated carbide drills. Cutting speed (18, 25 and 35 m/min), feed rate (0.08, 0.112 and 0.16 mm/rev), coating properties (coated and uncoated) and the amounts of particle reinforcement (5%, 10% and 15% B<sub>4</sub>C) were used as the control factors. It was observed that the increased feed rate and particle reinforcement increased the axial force and torque, and decreased the cutting speed. The uncoated drills had a better performance than the coated drills. The amount of B<sub>4</sub>C reinforcement was observed to be the most effective parameter on the axial force and torque with the contribution ratios of 96.6% and 49.1%, respectively. Moreover, the correlation coefficients (R<sup>2</sup>) of the first order predictive equations developed for the axial force and torque were calculated as 0.895 and 0.854, respectively.

**Keywords:** Al/B<sub>4</sub>C composite, Axial force, Torque, Taguchi method

## 1 Giriş

Metal matris ve seramik takviyelerden oluşan metal matrisli kompozit (MMK) malzemelerin yüksek dayanım, hafiflik, yüksek aşınma direnci, iyi ısıl genleşme katsayısı gibi özelliklerinden dolayı otomotiv, havacılık ve savunma endüstrisinde kullanım alanları gittikçe artmaktadır [1]-[4]. MMK malzemelerde parçacık takviyesi olarak; metal karbürler (SiC, TaC, WC, B<sub>4</sub>C), metal nitürler (TaN, ZrN, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, TiN), metal borürler (TaB<sub>2</sub>, ZrB<sub>2</sub>, TiB<sub>2</sub>, WB) ve metal oksitler (ZrO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ThO<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub>) kullanılmaktadır [5]. Takviye elemanının tipi, parçacık dağılımı ve % miktarına da bağlı olmak üzere sert abrasif seramik parçacıkların neden olduğu yüksek takım aşınması MMK'lerin işlenebilirliklerini kısıtlamaktadır [6],[7]. Taguchi metodu (TM) kalite ve maliyetleri optimize etmek için sunduğu sağlam, basit tasarım ve sistematik bir yaklaşım performansı ile önemli bir optimizasyon yöntemidir [8]. Literatürde MMK'lerin delinmesinde işleme parametreleri ve matkap tipinin etkileri üzerine birçok araştırmanın yapıldığı görülmektedir. Tosun, Al/SiC MMK'lerin delinmesinde kesme parametreleri, matkap tipi ve uç açısının yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerini Taguchi metodu yardımıyla araştırmıştır. Daha düşük yüzey pürüzlülüğü değerlerine düşük kesme hızı, yüksek ilerleme miktarı ve 130° uç açılı karbür matkapların kullanıldığı optimum işleme şartlarında ulaşıldığını belirtmiştir [9]. Rajmohan ve Palanikumar, Al356/SiC-Mica kompozitlerin kaplamalı karbür matkaplarla delinmesinde kesme kuvvetlerini yanıt yüzey metodu (YYM) yardımıyla incelemiştir. Delme işleminde bazı SiC ve Mica parçacıkların yüzeyden ayrıldığını ve kırıldığını, ayrıca matris malzemesinin plastik deformasyonundan dolayı parçacıkların

çevresinde çatlak ve boşlukların oluştuğunu belirtmişlerdir [10]. Ahamed ve diğ. Al-5%SiC-5%B<sub>4</sub>C hibrit kompozitlerin yüksek hız çeliği (HSS) matkaplarla delinmesinde yüzey pürüzlülüğünü incelemiştir. Kesme hızının artması ile takım aşınmasının arttığını ve kesme hızının yüzey kalitesi üzerinde ana faktör olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca, B<sub>4</sub>C takviyeli kompozitlerin delinmesinde düşük kesme hızı ve ilerleme miktarı kombinasyonlarının kullanılmasını önermişlerdir [11]. Noorul Haq ve diğ. Al/SiC MMK'lerin delinmesinde yüzey pürüzlülüğü, kesme kuvveti ve torkun değerlendirildiği çalışmalarında işleme parametrelerinin (kesme hızı, ilerleme miktarı ve uç açısı) optimizasyonunda Taguchi metodunu kullanmışlardır [12]. Taşkesen ve diğ. B<sub>4</sub>C takviyeli MMK'lerin delinmesinde kesme hızı, ilerleme miktarı ve takım tiplerinin (HSS, kaplamasız ve kaplamalı karbür) kesme kuvvetleri üzerindeki etkilerini genetik öğrenme algoritmaları yardımıyla incelemiştir. Kesme hızı aksel kuvveti azaltırken ilerleme miktarının arttırdığı, matkap tipinin ise ciddi bir etkisinin bulunmadığını belirtmişlerdir [13]. Dhavamani ve Alwarsamy, karıştırılmalı döküm yöntemiyle ürettikleri %10, %15 ve %25 SiC parçacık takviyeli Al/SiC MMK'nin farklı çaplardaki karbür matkaplarla delinmesinde yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınmasını TM yardımıyla değerlendirmişlerdir [14]. Palanikumar ve Muniraj, Al-%15SiC-%4 grafit katkılı hibrit kompozitlerin TiN kaplı farklı çaplardaki karbür matkaplarla delinmesinde aksel kuvveti YYM yardımıyla araştırmışlardır. İlerleme miktarının aksel kuvvet üzerinde en etkili parametre olduğunu ve aksel kuvveti arttırdığı, kesme hızının ise aksel kuvveti azalttığını belirtmişlerdir. Ayrıca, SiC parçacıkların kaplamayı

kaldırıldığını ve ilerleme miktarının artması ile çapak oluşumunu arttırdığını bildirmişlerdir [15].

Literatürde MMK'nin işlenebilirliği üzerine yapılan çalışmalar değerlendirildiğinde; genel olarak SiC ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> parçacık takviyeli kompozitler üzerinde yoğunlaştığı, B<sub>4</sub>C parçacık takviyeli kompozitler üzerinde az sayıda çalışmanın yapıldığı görülmektedir. Yine, MMK'nin üretiminde geleneksel toz metalürjisi ve karıştırılmalı döküm yönteminin kullanıldığı fakat sıcak presleme (SP) ile üretilen yüksek yoğunluklu MMK'lerin işlenebilirliği üzerine yapılan çalışmaların az sayıda olduğu görülmektedir. Bu çalışmada, SP yöntemi ile üretilen farklı oranlarda B<sub>4</sub>C takviyeli kompozitlerin kaplamalı ve kaplamasız karbür matkaplarla delinmesi incelenerek literatürdeki bu eksiklik giderilmeye çalışılmıştır.

## 2 Malzeme ve metot

### 2.1 Malzeme

Alüminyum matrisli B<sub>4</sub>C parçacık takviyeli kompozit malzemelerin üretiminde matris malzemesi olarak 45-150 µm arası boyutlarda Alumix 123 alaşımı, takviye elemanı olarak ise ortalama 27 µm boyutlarında B<sub>4</sub>C kullanılmıştır. Al-Cu alaşımı olan Alumix 123 alaşımı Si(0.6), Cu(4.5), Mg(0.5) ve Al(kalan) içermektedir. MMK'ler yüzde ağırlık oranına göre B<sub>4</sub>C takviye oranları %5, %10 ve %15 olmak üzere toz metalürjisi SP yöntemi ile üretilmiştir. Karışım tozları 100 MPa basınç altında ön şekillendirilmiş, devamında 590 °C'de 25 MPa basınç altında 15 dakika preslenmiştir. 60x60x12 mm boyutlarında üretilen MMK'lere daha sonra çözelti ısı işlemleri T6 uygulanmıştır. Yoğunluk ölçümlerinde Sarterious tipi yoğunluk ölçüm kiti, Brinell sertlik ölçümlerinde Instron Wolpert GmbH Diatestor 7551 sertlik ölçüm cihazı kullanılmıştır. Mikroyapı incelemelerinde ise JEOL JSM-7100F marka tarama elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır.

### 2.2 Metot

Delme deneyleri, maksimum 6000 dev/dk ve 7.5 kW güce sahip Johnford VMC 850 marka CNC dik işleme merkezinde gerçekleştirilmiştir.

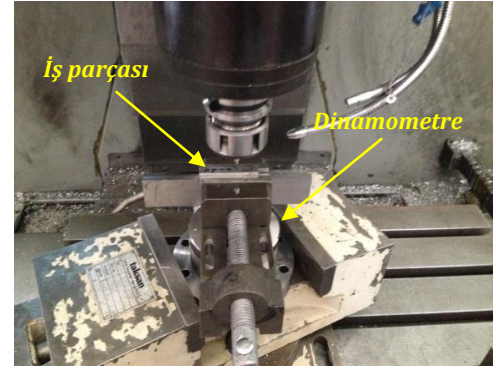
Kesici takım olarak, Guhring kesici takım firması tarafından imal edilmiş, 5 mm çapında, 118° uç açılı, K10 kalite (DIN 1897 RN) kaplamasız ve TiN kaplı K10 kalite (DIN 6639 RN) matkaplar kullanılmıştır. Her bir deney yeni bir takım kullanılarak üç kez tekrar edilmiştir. Tüm deneyler kuru kesme şartlarında ve delikler boydan boya delinerek gerçekleştirilmiştir. Kesme kuvvetleri ve torkun ölçümünde Kistler 9272 tipi dinamometre kullanılmıştır (Şekil 1).

Al/B<sub>4</sub>C kompozitlerin kaplamasız ve kaplamalı karbür takımlarla delinmesinde delme parametrelerinin etkilerini ve en düşük aksel kuvvet ve tork değerlerini verecek optimum kontrol faktörlerini belirlemek amacıyla TM kullanılmıştır. Genichi Taguchi tarafından geliştirilen bu istatistiksel metodun amacı ürünün kalitesini geliştirmektir [16]-[18]. Bu

metot ile deney sayısı anlamlı bir şekilde azaltılmaktadır.

TM'nin ilgili adımları takip edilerek çalışma sistematik bir şekilde gerçekleştirilmiştir [16]. Kesici takım malzemesi ( $C_t$ ) kesme hızı ( $V_c$ ), ilerleme miktarı ( $f$ ) ve % B<sub>4</sub>C katkısı ( $R$ ) etkileri araştırılacak delme parametreleri (kontrol faktörleri) olarak seçilmiştir. İş parçası malzemesi ve makine parametreleri de göz önünde bulundurularak kontrol faktörlerinin Tablo 1'de verilen uygun seviyeleri seçilmiştir.

Optimum delme parametreleri ve etkilerini belirlemek amacıyla kontrol faktör grubunun toplam serbestlik derecesi de göz önünde bulundurularak en uygun ortogonal dizi olarak L<sub>18</sub> (2<sup>1</sup>x3<sup>3</sup>) seçilmiştir [16]-[18]. Al/B<sub>4</sub>C kompozitlerin delinmesinde aksel kuvvet ( $F_t$ ) ve tork ( $T$ ) değerlerinin en düşük olması istendiğinden bağımlı değişkenin kalite karakteristiği sinyal/gürültü ( $S/N$ ) oranları dB cinsinden "Daha küçük daha iyi" yaklaşımına göre Eşitlik (1) ile hesaplanmıştır [16].



Şekil 1: Kesme kuvvetlerinin ölçümü.

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

Bu denklemde,  $n$  deney sayısı,  $y_i$  ise elde edilen  $i$ . veriyi ifade etmektedir [16]. Her bir kontrol faktör seviyelerinin aksel kuvvet ve tork üzerindeki etkileri  $S/N$  oranları kullanılarak analiz edilmiştir. Ayrıca, kontrol faktörlerinin ana etkileri %95 güven seviyesinde gerçekleştirilen Varyans Analizi (ANOVA) ile belirlenmiştir. Son olarak, lineer regresyon analizi yardımıyla kontrol faktörlerinin ana etkilerini içeren tahmini denklemler geliştirilmiştir.

## 3 Deneysel bulgular, çözümler ve tartışma

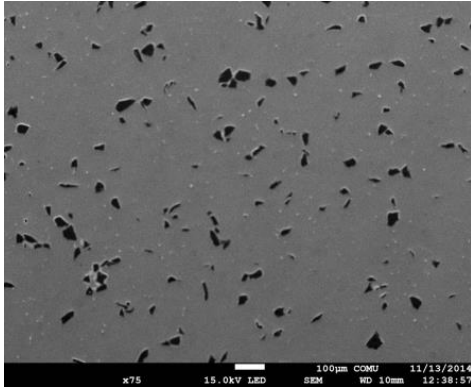
### 3.1 MMK numunelerin sertlik, yoğunluk ve mikroyapı incelemeleri

SP yöntemiyle üretilen MMK'lerin Brinell Sertlik Değerleri (BSD) %5, %10 ve %15 B<sub>4</sub>C takviyeli numuneler için sırasıyla 152, 170 ve 173 BSD olarak belirlenmiştir.

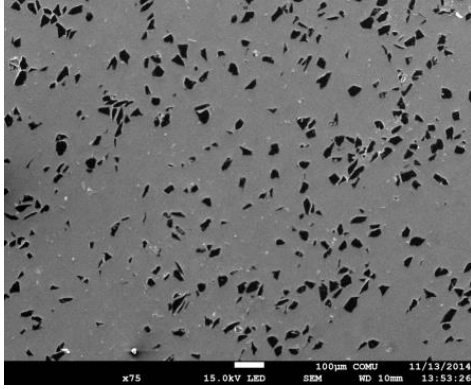
Tablo 1: Delme parametreleri ve seviyeleri.

Delme parametreleri	Sembol	Birim	Seviyeler			Serbestlik Derecesi (DoF)
			1. Seviye	2. Seviye	3. Seviye	
Takım malzemesi	$C_t$	-	Kaplamasız Karbür	Kaplamalı Karbür	-	1
Kesme hızı	$V_c$	m/dk	18	25	35	2
İlerleme miktarı	$f$	mm/dev	0.08	0.112	0.160	2
% B <sub>4</sub> C Katkısı	$R$	%	5	10	15	2

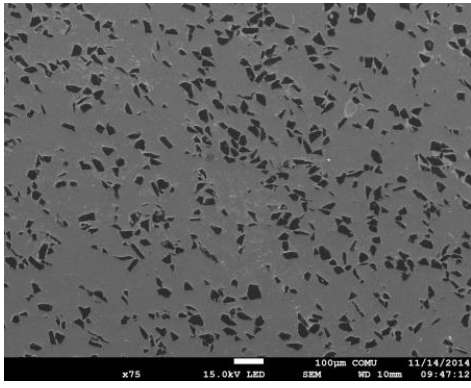
Artan B<sub>4</sub>C miktarı ile %10 takviyeli numunenin sertlik değerinde belirgin bir artış görülürken artan B<sub>4</sub>C miktarının %15 takviyeli numunelerin sertliği üzerinde ciddi bir etkisi olmamıştır. Benzer şekilde, %5, %10 ve %15 B<sub>4</sub>C takviyeli numuneler için yoğunluklar sırasıyla %99.14, %98.74 ve %98.41 olarak ölçülmüştür. Numunelerin yoğunluk değerlerinin %98'in üzerinde olduğu görülmüştür. Yüksek yoğunluklu numunelerin üretilmiş olması SP yöntemine ve sinterleme işleminin tek adımda gerçekleştirilmesine atfedilebilir. MMK numunelere ait mikroyapı SEM görüntüleri Şekil 2'de sunulmuştur. Mikroyapı görüntüleri incelendiğinde genel olarak tüm takviye oranları için parçacıkların homojen bir şekilde dağıldığı görülmektedir. Bu durum toz metalürjisi yönteminde karışım tozlarının homojen dağılımına bağlanmaktadır.



(a)



(b)

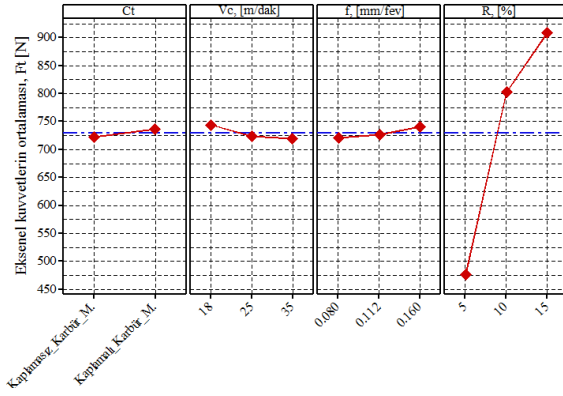


(c)

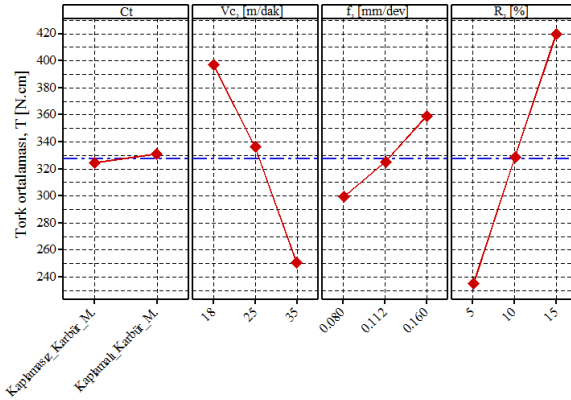
Şekil 2: MMK numunelerin mikroyapı SEM görüntüleri.  
a): %5B<sub>4</sub>C, b): %10B<sub>4</sub>C ve c): %15B<sub>4</sub>C.

### 3.2 Taguchi çözümlenmeleri

Al/B<sub>4</sub>C kompozitlerin kaplamasız ve kaplamalı karbür matkaplarla delinmesinde eksenel kuvvet ve tork ölçüm sonuçları aritmetik ortalamaları Minitab16.0 paket programında çözümlenmiş ve analiz edilmiştir. Grafiklerin çiziminde ve kontrol faktörleri etkilerinin değerlendirilmesinde kullanılacak olan çözümlenme ve analiz çalışmalarıyla elde edilmiş sayısal sonuçlar ( $F_t$ ,  $T$  ve  $S/N$  oranı) Tablo 2'de verilmiştir. Al/B<sub>4</sub>C kompozitlerin kaplamasız karbür matkaplarla delinmesinde eksenel kuvvetler 422-920 N aralığında, kaplamalı karbür matkaplarla delinmesinde ise 465-981 N aralığında ölçülmüştür. Kaplamalı matkaplarla delmede kesme kuvvetlerinde 43-61 N'lik bir artış görülmüştür. Bu durum B<sub>4</sub>C parçacıkların abrasif etkisinden dolayı kaplama tabakasının kalkması ve takımın daha hızlı bir aşınma sürecine girmesine bağlanmıştır. Tespit edilen bu sonuç Palanikumar ve Muniaraj'ın [15] çalışmaları ile paralellik arz etmektedir. Yine, Al/B<sub>4</sub>C kompozitlerin kaplamasız karbür takımlarla delinmesinde tork 174-502 Ncm aralığında, kaplamalı karbür takımlarla delinmesinde ise 153-508 Ncm aralığında ölçülmüştür. Her iki takım ile delmede eksenel kuvvetlerin ortalaması 729 N, tork ortalaması ise 328 Ncm olarak hesaplanmıştır.  $F_t$  ve  $T$  üzerinde kontrol faktörlerinin ana etkileri "Faktör Etkilerinin Grafiksiz Gösterimi" metodu kullanılarak gösterilmiş ve değerlendirilmiştir (Şekil 3 ve Şekil 4) [17]. Şekil 3a ve b'de yer alan kontrol faktörlerinin farklı seviyelerinde elde edilen  $F_t$  ve  $T$  değerlerinin değişimi incelendiğinde Tablo 5'te tespit edilen kontrol faktörü etkileri sıralamasını destekler nitelikte olduğu görülmektedir. Şekil 3a'dan  $F_t$  üzerinde en etkili parametrenin % B<sub>4</sub>C katkısı ( $R$ ) olduğu ve % B<sub>4</sub>C katkısının daha fazla olduğu kompozitlerin delinmesinde daha yüksek eksenel kuvvetlerin meydana geldiği anlaşılmaktadır. Artan % B<sub>4</sub>C katkısı ile birlikte delme işlemi süresince matkap kesme kenarlarının daha fazla sert parçacığı kesme, yerinden çıkararak sökme veya kırmak zorunda kalması takım aşınmasını arttırarak/hızlandırarak kesme kuvvetlerini arttırmaktadır [19]. Bu durum ayrıca artan parçacık miktarının MMK'lerin sertliğini arttırması ve matris malzemesinin deformasyonunun zorlaşmasıyla da açıklanabilir. İlerleme miktarının arttırılmasıyla anlamlı bir etki olmamakla birlikte eksenel kuvvetler artmış iken kesme hızı değerlerinin arttırılmasıyla azalmıştır. İlerleme miktarının artmasında kaldırılan talaş hacmi artışına paralel bir şekilde kesici takımın üzerine gelen yüklerin artmasına bağlanmaktadır [20]. Rajmohan ve Palanikumar, MMK'nin delinmesinde düşük kesme kuvvetlerinin elde edilmesi için düşük ilerleme miktarlarının tercih edilmesi gerektiğini bildirmişlerdir [21]. Kesme hızının artması ile kesme kuvvetlerinin azalması ise kesme bölgesinde oluşan yüksek sıcaklıklar nedeni ile malzemenin plastik deformasyonunun kolaylaşması ile açıklanabilir [22]. Şekil 3b'de kontrol faktörleri ana etkilerinin seviyelerine bağlı olarak delme sırasında ölçülen torkun değişimi verilmiştir. Şekil 3b'den tork üzerinde en etkili parametrenin % B<sub>4</sub>C katkısı olduğu ve bunu sırasıyla kesme hızı, ilerleme miktarı ve kesici takım malzemesinin takip ettiği görülmektedir. Benzer şekilde % B<sub>4</sub>C katkısı ve ilerleme miktarının arttırılması ile tork artmakta iken kesme hızının arttırılması ile tork değerleri azalmıştır. Şekil 4a ve b'de eksenel kuvvet ve tork için verilen  $S/N$  oranları grafikleri de Şekil 3a ve b'yi desteklemektedir.

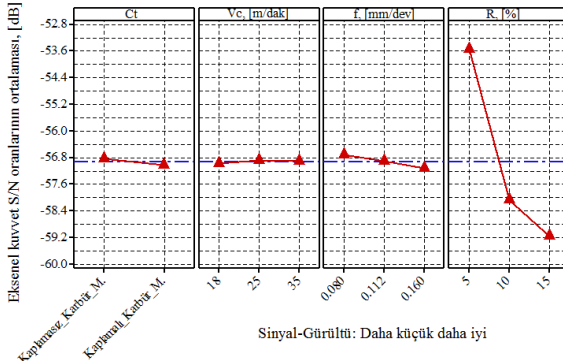


(a): Eksenel kuvvet.

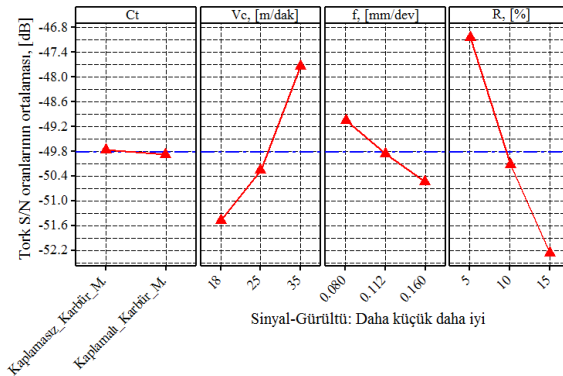


(b): Tork.

Şekil 3: Eksenel kuvvet ve tork için ana etki grafikleri.



(a): Eksenel kuvvet.



(b): Tork.

Şekil 4: Eksenel kuvvet ve tork için S/N oranları.

Seçilen kesme şartları altında en düşük ortalama  $F_t$  ve  $T$  değerini verecek kontrol faktörlerinin optimum seviyeleri  $S/N$  hesabından, Tablo 3, Tablo 4, Şekil 3 ve Şekil 4'ten sırasıyla  $C_{t1}V_{c3}f_1R_1$  olarak belirlenmiştir. Tablo 4 ve Şekil 3'te görüleceği üzere, seçilen kontrol faktörlerinden; kesici takımın birinci seviyesi ( $C_t$ =Kaplamaless karbür), kesme hızının üçüncü seviyesi ( $V_c = 35$  m/dk), ilerleme miktarının birinci seviyesi ( $f = 0.08$  mm/dev) ve % B4C katkısının birinci seviyesinde ( $R = \%5$ ) en düşük  $F_t$  ve  $T$  değerleri elde edilmiştir.  $F_t$  ve  $T$  için "Daha küçük daha iyi" kalite karakteristiği seçeneğine göre  $S/N$  denkleminden  $C_{t1}V_{c3}f_1R_1$  olarak tespit edilen optimal kontrol faktörü seviyeleri için tahmini Taguchi Metodu sonuçları ise sırasıyla;  $F_{tTah} = 451.83$  N,  $S/N = -53.22$  dB ve  $T_{Tah} = 125.11$  Ncm,  $S/N = -44.14$  dB olarak hesaplanmıştır. Eksenel kuvvet ve tork için kontrol faktörlerinin  $C_{t1}V_{c3}f_1R_1$  olarak belirlenen optimum seviyelerinin Tablo 2'deki deneylerin parametre seviyeleri ile aynı olmadığı görülmektedir. Bu nedenle, belirlenen optimum parametre seviyelerinde tekrar deney yapılmış ve eksenel kuvvetlerin ortalaması  $F_t = 447.53$  N, tork ortalaması ise  $T = 123.87$  Ncm olarak ölçülmüştür. Kontrol faktörlerinin optimum seviyelerinde gerçekleştirilen tekrar deneyinde elde edilen ortalama eksenel kuvvet değeri ( $F_t = 447.53$  N) ve Taguchi metoduyla elde edilmiş tahmini eksenel kuvvet değeri ( $F_{tTah} = 442.985$  N) arasındaki fark 4.55 N olarak bulunmuştur. Yine, kontrol faktörlerinin optimum seviyelerinde gerçekleştirilen tekrar deneyinde elde edilen ortalama tork değeri ( $T = 123.87$  Ncm) ve Taguchi metoduyla elde edilmiş tahmini tork değeri ( $T_{Tah} = 110.163$  Ncm) arasındaki fark 13.707 N olarak bulunmuştur. Al/B4C kompozitlerin, kontrol faktörlerin farklı seviyelerinde ölçülmüş tüm  $F_t$  ve  $T$  değerlerinin aritmetik ortalaması sırasıyla 729 N ve 328 Ncm'dir. Yani, Al/B4C kompozitler seçilen kesme şartları aralığında kaplamasız ve kaplamalı karbür takımlarla delinirse genel olarak; 729 N ortalama değerinde eksenel kuvvet ve 328 Ncm tork oluşmaktadır. Ancak, bu çalışmada Al/B4C kompozitlerin kontrol faktörlerinin optimum seviyelerinin belirlenmesiyle eksenel kuvvet  $\%62.89$   $\left(\frac{(729 \times 100)}{447.53} - 100\right)$ , tork ise  $\%164$  oranında azaltılarak delme işlemi iyileştirilmiştir. Delme işlemi sonrasında elde edilen eksenel kuvvetler takım aşınmasının bir ölçüsü olarak değerlendirilmektedir. Bu nedenle kesme parametrelerinin optimizasyonu ile eksenel kuvvetlerin düşüşü takım ömrünü arttıracaktır. Al/B4C kompozitlerin delinmesinde eksenel kuvvet ve torku etkileyen faktörlerin  $\%$  etki derecelerini belirlemek amacıyla Varyans Analizi (Tablo 5) uygulanmıştır. Tablo 5'a'da sunulan Varyans tablosunda,  $\%95$  güvenilirlik seviyesinde ortalama eksenel kuvvet üzerinde en etkili olan parametre, Tablo 3, Tablo 4, Şekil 3a ve Şekil 4a'daki sonuçları destekler şekilde  $\%96.603$  katkı oranı ile  $\%$  B4C katkısı ( $R$ ) olmuştur. Diğer kontrol faktörlerinin eksenel kuvvet üzerindeki etkileri  $\%5$ 'in altında kalmıştır. Tork için Varyans Analizi sonuçları incelendiğinde (Tablo 5b), yine Tablo 3, Tablo 4, Şekil 3b ve Şekil 4b'de sunulan sonuçları destekler şekilde, tork üzerinde en etkili parametreler sırasıyla  $R$  ( $\%49.102$ ),  $V_c$  ( $\%31.039$ ) ve  $f$  ( $\%5.201$ ) olmuştur. Kesici takımın ( $C_t$ ) etkisi  $\%5$ 'in altında kalmıştır. Al/B4C kompozitlerin delinmesinde kontrol faktörlerinin eksenel kuvvet ve tork üzerinde göstermiş olduğu bu etkiler farklı kompozit malzemelerin kesilmesinde elde edilen etkilerle karşılaştırıldığında, Noorul Haq ve diğerlerinin Al/SiC kompozitlerin delinmesi üzerine yaptıkları çalışma ile paralellik göstermektedir [12].

Tablo 2: Taguchi L<sub>18</sub> ortogonal dizisine göre deney tasarımı, deneysel sonuçlarının tahmini sonuçlarla kıyaslanması.

Deney No	Kontrol Faktörleri	Eksenel Kuvvet									
		C <sub>t</sub>	V <sub>c</sub> , [m/dk]	f, [mm/dev]	R, [%]	F <sub>t</sub> , [N]	F <sub>t</sub> /S/N, [dB]	Taguchi Çözümlenmeleri Tahmini Sonuçları		Lineer Regresyon Denklemi Tahmini Sonuçları	
								F <sub>t</sub> _Tag, [N]	Hata, [%]	F <sub>t</sub> _Reg, [N]	Hata, [%]
1	Kaplamasız	18	0.080	5	420	-52.46	476	13.3	508	20.9	
2	Kaplamasız	18	0.112	10	840	-58.49	808	-3.8	732	12.9	
3	Kaplamasız	18	0.160	15	922	-59.29	928	0.7	960	4.1	
4	Kaplamasız	25	0.080	5	462	-53.29	455	-1.5	498	7.8	
5	Kaplamasız	25	0.112	10	808	-58.15	787	-2.6	722	10.6	
6	Kaplamasız	25	0.160	15	890	-58.99	907	1.9	950	6.8	
7	Kaplamasız	35	0.080	10	801	-58.07	778	-2.9	701	12.5	
8	Kaplamasız	35	0.112	15	845	-58.54	891	5.4	925	9.5	
9	Kaplamasız	35	0.160	5	513	-54.20	471	-8.2	504	1.7	
10	Kaplamalı	18	0.080	15	981	-59.83	922	-6.0	954	2.8	
11	Kaplamalı	18	0.112	5	465	-53.35	495	6.5	529	13.7	
12	Kaplamalı	18	0.160	10	836	-58.44	835	-0.1	757	9.5	
13	Kaplamalı	25	0.080	10	758	-57.59	795	4.9	728	4.0	
14	Kaplamalı	25	0.112	15	913	-59.21	907	-0.7	952	4.3	
15	Kaplamalı	25	0.160	5	508	-54.12	488	-3.9	531	4.5	
16	Kaplamalı	35	0.080	15	902	-59.10	898	-0.4	931	3.2	
17	Kaplamalı	35	0.112	5	488	-53.77	471	-3.5	506	3.7	
18	Kaplamalı	35	0.160	10	770	-57.73	811	5.3	734	4.7	
Ortalama					<b>729</b>	<b>-56.92</b>		<b>4.0</b>		<b>7.6</b>	

Tablo 2: Taguchi L<sub>18</sub> ortogonal dizisine göre deney tasarımı, deneysel sonuçlarının tahmini sonuçlarla kıyaslanması (devamı).

Deney No	Kontrol Faktörleri	Tork									
		C <sub>t</sub>	V <sub>c</sub> , [m/dk]	f, [mm/dev]	R, [%]	T, [Ncm]	T/S/N, [dB]	Taguchi Çözümlenmeleri Tahmini Sonuçları		Lineer Regresyon Denklemi Tahmini Sonuçları	
								T_Tag, [Ncm]	Hata, [%]	T_Reg, [Ncm]	Hata, [%]
1	Kaplamasız	18	0.080	5	174	-44.81	272	56.2	273	56.8	
2	Kaplamasız	18	0.112	10	355	-51.00	392	10.4	389	9.7	
3	Kaplamasız	18	0.160	15	502	-54.01	517	3.0	518	3.2	
4	Kaplamasız	25	0.080	5	248	-47.89	211	-15.0	212	14.3	
5	Kaplamasız	25	0.112	10	334	-50.47	331	-0.9	329	1.5	
6	Kaplamasız	25	0.160	15	486	-53.73	456	-6.1	458	5.8	
7	Kaplamasız	35	0.080	10	265	-48.46	219	-17.3	219	17.4	
8	Kaplamasız	35	0.112	15	333	-50.45	337	1.1	336	0.8	
9	Kaplamasız	35	0.160	5	223	-46.97	185	-16.9	186	16.5	
10	Kaplamalı	18	0.080	15	508	-54.12	464	-8.7	465	8.5	
11	Kaplamalı	18	0.112	5	374	-51.46	305	-18.6	303	18.9	
12	Kaplamalı	18	0.160	10	469	-53.42	433	-7.8	432	7.9	
13	Kaplamalı	25	0.080	10	310	-49.83	311	0.5	312	0.6	
14	Kaplamalı	25	0.112	15	402	-52.08	429	6.7	428	6.6	
15	Kaplamalı	25	0.160	5	236	-47.46	278	17.6	279	18.2	
16	Kaplamalı	35	0.080	15	289	-49.22	317	9.7	318	10.1	
17	Kaplamalı	35	0.112	5	153	-43.69	158	3.2	157	2.5	
18	Kaplamalı	35	0.160	10	239	-47.57	286	19.6	285	19.4	
Ortalama					<b>328</b>	<b>-49.81</b>		<b>12.2</b>		<b>12.1</b>	

F<sub>t</sub>\_Tag: Taguchi çözümlenmeleri ile elde edilen tahmini eksenel kuvvet, F<sub>t</sub>\_Reg: Geliştirilen lineer regresyon denklemi ile elde edilen tahmini eksenel kuvvet, T\_Tag: Taguchi çözümlenmeleri ile elde edilen tork, T\_Reg: Geliştirilen lineer regresyon denklemi ile elde edilen tork

Tablo 3: Eksenel kuvvet ve torka ait sinyal-gürültü oranları [dB] için yanıt tablosu.

Seviye	F <sub>t</sub> , [N]				T, [Ncm]			
	C <sub>t</sub>	V <sub>c</sub>	f	R	C <sub>t</sub>	V <sub>c</sub>	f	R
1	-56.83*	-56.98	-56.73*	-53.53*	-49.76*	-51.47	-49.05*	-47.05*
2	-57.02	-56.90	-56.92	-58.08	-49.87	-50.24	-49.86	-50.13
3	-	-56.89*	-57.13	-59.16	-	-47.73*	-50.53	-52.27
Fark	0.18	0.09	0.40	5.63	0.12	3.74	1.47	5.22
Sıralama	3	4	2	1	4	2	3	1

\*: Optimum Seviye.

Tablo 4: Eksenel kuvvet ve torka ait ortalamalar için yanıt tablosu.

Seviye	$F_t$ , [N]				$T$ , [Ncm]			
	$C_t$	$V_c$	$f$	$R$	$C_t$	$V_c$	$f$	$R$
1	722.3*	744.0	720.7*	476.0*	324.4*	397.0	299.0*	234.7*
2	735.7	723.2	726.5	802.2	331.1	336.0	325.2	328.7
3	-	719.8*	739.8	908.8	-	250.3*	359.2	420.0
Fark	13.3	24.2	19.2	432.8	6.7	146.7	60.2	185.3
Sıralama	4	2	3	1	4	2	3	1

\*: Optimum Seviye.

Tablo 5: Eksenel kuvvet ve torka ait ortalamalar için varyans analizi.

a) Eksenel kuvvet						
Kaynak	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	$F$	$P$	% Katkı
$C_t$	1	800	800	0.46	0.514	0.127
$V_c$	2	2058	1029	0.59	0.573	0.325
$f$	2	1158	579	0.33	0.725	0.184
$R$	2	610214	305107	174.90	0.000	96.603*
Artık Hata	10	17445	1744			2.761
Toplam	17	631676				100.000

$R^2 = \%97.2$ , Ayarlı  $R^2 = \%95.3$ , \*Anlamlı katkı sağlayan faktör.

b) Tork						
Kaynak	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	$F$	$P$	% Katkı
$C_t$	1	200	200	0.07	0.803	0.0952
$V_c$	2	65142	32570.9	10.66	0.003	31.039*
$f$	2	10921	5460.7	1.79	0.217	5.203
$R$	2	103052	51526.2	16.87	0.001	49.103*
Artık Hata	10	30551	3055.1			14.557
Toplam	17	209867				100.000

$R^2 = \%85.4$ , Ayarlı  $R^2 = \%75.3$ , \*Anlamlı katkı sağlayan faktör.

Diğer taraftan, Rajmohan ve Palanikumar'ın [10],[21] çalışmalarıyla ise aykırılık göstermektedir. Yazarlar eksenel kuvvet üzerinde en etkili parametrenin ilerleme miktarı olduğunu belirtmiştir. Bu durum SiC parçacıkların aşındırıcı etkisinin B<sub>4</sub>C'e kıyasla daha düşük olmasından dolayı daha düşük takım aşınmasına neden olması ile açıklanabilir. Taşkesen ve diğ. artan B<sub>4</sub>C miktarının eksenel kuvveti belirgin bir şekilde arttırdığını ve artan kesme hızının ise düşürdüğünü belirtmişlerdir [13].

### 3.3 Tahmini denklemler

Al/B<sub>4</sub>C kompozitlerin delinmesinde oluşan eksenel kuvvet ve torku tahmin etmek için Lineer Regresyon Analizi ile kontrol faktörlerinin ana etkilerini içeren birinci dereceden tahmini denklemler geliştirilmiştir (Denklem (2) ve Denklem (3)).

$$F_t = 283 + 13.3C_t - 1.35V_c + 243f + 18.5R \quad (2)$$

$$T = 269 + 6.7C_t - 8.62V_c + 749f + 18.5R \quad (3)$$

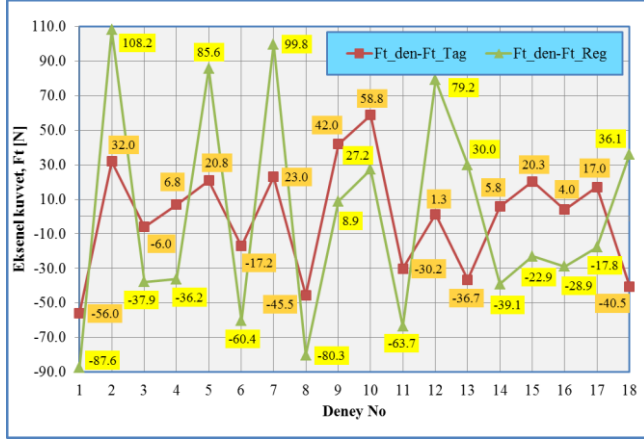
Denklem (2)'de görüleceği üzere; kesme hızı ( $V_c$ ) eksenel kuvvet üzerinde negatif etkiye (eksenel kuvveti artırıcı etki) sahip iken kesici takım malzemesi ( $C_t$ ), ilerleme miktarı ( $f$ ) ve % B<sub>4</sub>C Katkısı ( $R$ ) pozitif (eksenel kuvveti azaltıcı) etkiye sahiptir. Eksenel kuvvet için geliştirilen tahmini denklemin korelasyon katsayısı ( $R^2$ ) ve ayarlı korelasyon katsayısı (Ayarlı  $R^2$ ) sırasıyla 0.895 ve 0.863 olarak hesaplanmıştır. Denklem 3'de de görüleceği üzere kontrol faktörlerinin tork üzerindeki etkileri eksenel kuvvet ile benzer olmuştur. Tork için geliştirilen birinci dereceden tahmini denklemin  $R^2$  ve ayarlı  $R^2$  değerleri ise sırasıyla 0.854 ve 0.809 olarak

hesaplanmıştır. Eksenel kuvvet ve tork için geliştirilen denklemlerin  $R^2$  ve Ayarlı  $R^2$  değerlerinin yüksek çıkması bu denklemlerin tahmin yeteneğinin yüksek olduğunu göstermekte olup deneysel sonuçlarla tahmini sonuçlar arasındaki artıklar düşük çıkmıştır.

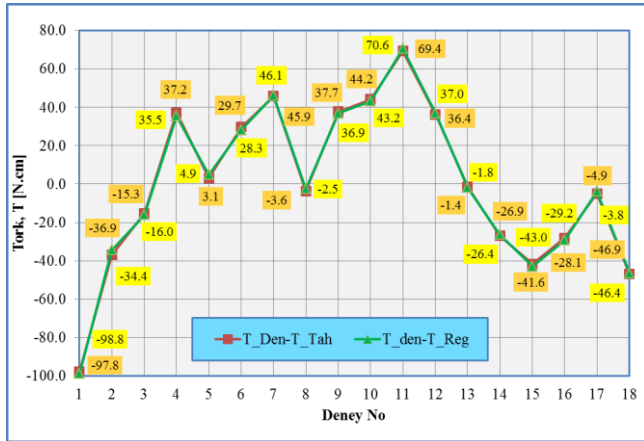
### 3.4 Tahmini denklemlerin karşılaştırılması

Tablo 3'te, L<sub>18</sub> ortogonal dizideki deney düzenine göre gerçekleştirilmiş deneysel eksenel kuvvet ( $F_t$ ) tork ( $T$ ) sonuçları ile Taguchi çözümlenmeleri tahmini eksenel kuvvet ( $F_t$ -Tag), tork ( $T$ -Tag) ve birinci dereceden tahmini denklemlerle elde edilmiş eksenel kuvvet ( $F_t$ -Reg), tork ( $T$ -Reg) değerlerinin karşılaştırılması verilmiştir. Deneysel sonuçlarla tahmini sonuçlar arasındaki farklar % hata olarak ifade edilmiştir. % hatanın düşük olması o yöntemin tahmin kabiliyetini göstermektedir. Eksenel kuvvet için % hataların ortalaması dikkate alındığında; Taguchi metodu elde edilen tahmini sonuçların % hatası (%4.0) birinci dereceden tahmini denklem ile elde edilen sonuçların hatasından (%7.6) daha düşük çıktığından Taguchi metodu ile elde edilen tahmini sonuçların daha güvenilir olduğunu söylemek mümkündür. Diğer taraftan; tork için % hataların ortalaması dikkate alındığında Taguchi metoduyla elde edilen tahmini sonuçların % hatası (%12.2) birinci dereceden tahmini denklem ile elde edilen sonuçların hatası ise (%12.1) ile yaklaşık olarak aynı % hata değerinde elde edilmiştir. Hesaplanan bu % hata sonuçlarından eksenel kuvvet değerlerinin daha yüksek doğrulukla tahmin edildiği görülmektedir. Ayrıca, her iki yöntem ile elde edilen tahmini sonuçların hatası %12.5'ten düşük olduğundan TM ve tahmini denklemlerle tahmini sonuçların başarılı bir şekilde tahmin edilebildiği anlaşılmaktadır. Şekil 5'te, toplam 18 deneyde  $F_t$  ve  $T$  için TM tahmini sonuçları ve ikinci dereceden tahmini denklemler

sonuçları arasındaki farkların/artıkların kıyaslaması görülmektedir. Her bir deney için deneysel sonuçlar referans (0) kabul edildiğinde, Tablo 3'teki verilen hata sonuçlarını destekler şekilde, ikinci dereceden regresyon denklemi ile elde edilen eksenel kuvvet ( $F_t$ ) tahmini değerlerin artıklarının ( $F_t - F_{t\_Reg}$ ) Taguchi tahmini değerlerin artıklarından ( $F_t - F_{t\_Tag}$ ) daha büyük değerlerde olduğu görülmektedir.



(a): Eksenel kuvvet.



(b): Tork.

Şekil 5: Eksenel kuvvet ve tork için deneysel sonuçlarla tahmini sonuçlar arasında oluşan farklar.

Lineer regresyon denklemi ile elde edilen tahmini değerlerin artıkları ( $F_t - F_{t\_Reg}$ ) 108.2 N ile -87.6 N arasında değişmekte iken Taguchi metodu ile elde edilen tahmini değerlerin artıkları ( $F_t - F_{t\_Tag}$ ) 58.8 N ile -56.0 N arasında değişmiştir (Şekil 5a). Şekil 5b'de görüleceği üzere, tork için lineer regresyon denklemi ile elde edilen tahmini değerlerin artıkları ( $T - T_{Reg}$ ) 70.6 Ncm ile -98.8 Ncm arasında değişmekte iken Taguchi metodu ile elde edilen tahmini değerlerin artıkları ( $T - T_{Tag}$ ) 69.4 Ncm ile -97.8 Ncm arasında değişmiştir. Deneysel çalışma sırasında kontrol edilemeyen faktörlerin artıklara sebep olduğu ve artırdığı düşünülmektedir.

## 4 Sonuçlar

Al/B<sub>4</sub>C kompozitlerin kaplamasız ve kaplamalı karbür matkaplarla delinmesinde oluşan eksenel kuvvet ve tork üzerinde delme parametreleri olarak seçilen kesici takım ( $C_t$ ), kesme hızı ( $V_c$ ), ilerleme miktarı ( $f$ ) ve % B<sub>4</sub>C katkısının ( $R$ )

etkilerinin araştırıldığı bu deneysel çalışmada elde edilen sonuçlar şunlardır:

1. Sıcak presleme yöntemi ile üretilen MMK numunelerin mikroyapıları incelendiğinde tüm B<sub>4</sub>C katkılarında parçacık dağılımının homojen bir şekilde gerçekleştiği görülmüştür.
2. Sıcak presleme yöntemi ile %98'in üzerinde yoğunluk değerleri elde edilmiş ve artan parçacık miktarı ile yoğunluk azalmıştır.
3. Al/B<sub>4</sub>C kompozitlerin kaplamasız karbür matkaplarla delinmesinde eksenel kuvvet 422-920 N, tork 174-502 Ncm aralığında, kaplamalı karbür matkaplarla delinmesinde ise eksenel kuvvet 465-981 N, tork ise 153-508 Ncm aralığında ölçülmüştür. Kaplamasız karbür matkaplarla daha yüksek eksenel kuvvet değerleri elde edilmiştir.
4. En düşük eksenel kuvvet ve tork değerleri; kaplamasız karbür matkaplarla,  $V_c = 18$  m/dk kesme hızı,  $f = 0.160$  mm/dev ilerleme miktarında, %5 B<sub>4</sub>C katkılı Al/B<sub>4</sub>C kompozitlerin delinmesinde elde edilmiştir.
5. Al/B<sub>4</sub>C kompozitlerin kontrol faktörlerinin optimum seviyelerinin belirlenmesiyle eksenel kuvvet değerleri %62.89, tork değerleri ise %164 oranında düşürülerek delme işlemi iyileştirilmiştir.
6. Delme kuvveti üzerinde en etkili parametre %96.603 etki oranı ile % B<sub>4</sub>C katkısıdır. % B<sub>4</sub>C katkısının daha fazla olduğu kompozitlerin delinmesinde daha yüksek eksenel kuvvet meydana gelmiştir. Diğer delme parametrelerinin eksenel kuvvet üzerinde anlamlı bir etkisi gözlenmemiştir.
7. Tork üzerinde en etkili parametreler sırasıyla % B<sub>4</sub>C katkısı (%49.102), kesme hızı (%31.039) ve ilerleme miktarı (%5.201) olmuştur. Kesici takım türünün anlamlı bir etkisi gözlenmemiştir.
8. İlerleme miktarının artırılmasıyla eksenel kuvvet ve tork artarken kesme hızının artırılmasıyla azalmıştır.
9. Tork üzerinde parametre etkilerinin sıralaması % B<sub>4</sub>C katkısı, kesme hızı, ilerleme miktarı ve kesici takım malzemesi şeklindedir.
10. Eksenel kuvvet ve tork için birinci dereceden tahmini denklem geliştirmiş ve bu denklemlerin korelasyon katsayısı ( $R^2$ ) sırasıyla 0.895 ve 0.854 olarak hesaplanmıştır.
11. Taguchi metodu ve geliştirilen tahmini denklemlerle elde edilen değerler ile deneysel değerler arasındaki farkların düşük çıkması kullanılan yöntemlerin güvenilirliğini yansıtmıştır.

## 5 Teşekkür

FBA-2014-227 kodlu proje ile bu çalışmanın finansal desteğini sağlayan Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimine teşekkür ederiz.

## 6 Kaynaklar

- [1] Sharma SC, Girish BM, Kulkarni RS, Kamath R. "Drillability of Zinc/Graphitic Metal Matrix Composites". *NML Technical Journal*, 38(3), 107-111, 1996.

- [2] Davim JP, Baptista AM. "Cutting Force, Tool Wear and Surface Finishing Drilling Metal Matrix Composites". *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E*, 215(2), 177-183, 2001.
- [3] Shorowordi KM, Laoui T, Haseeb ASMA, Celis JP, Froyen L. "Microstructure and Interface Characteristics of B<sub>4</sub>C. SiC and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Reinforced Al Matrix Composites: A Comparative Study". *Journal of Materials Processing Technology*, 142(3), 738-743, 2003.
- [4] Peng J, Li DHW, Xie JDY, Liu G. "Study on the Yield Behavior of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>(sf)/Al-Si Metal Matrix Composites". *Materials Science and Engineering A*, 486(1-2), 427-432, 2008.
- [5] Şahin İ. "Alüminyum Matrisli Kompozit Malzemelerin Matkap ile Delinmesi Konusunda Yapılan Çalışmaların İncelenmesi". *Mühendis ve Makina*, 55(649), 9-16, 2014.
- [6] Basavarajappa S, Chandramohan G, Prabu M, Mukund K, Ashwin M. "Drilling of Hybrid Metal Matrix Composites Workpiece Surface Integrity". *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 47(1), 92-96, 2007.
- [7] Manna A, Bhattacharya B. "A Study of Machinability of Al-SiC-MMC". *Journal of Materials Processing Technology*, 140(1-3), 711-716, 2003.
- [8] Park SH. *Robust Design and Analysis for Quality Engineering*. London, Chapman & Hall, 1996.
- [9] Tosun G. "Statistical Analysis of Process Parameters in Drilling of AL/SiC Metal Matrix Composite". *Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 55(5-8), 477-485 2011.
- [10] Rajmohan T, Palanikumar K. "Experimental Investigation and Analysis of Thrust Force in Drilling Hybrid Metal Matrix Composites by Coated Carbide Drills". *Materials and Manufacturing Processes*, 26(8), 961-968, 2011.
- [11] Ahamed AR, Asokan P, Aravindan S, Prakash MK. "Drilling of Hybrid Al-5%SiCp-5%B<sub>4</sub>Cp Metal Matrix Composites". *Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 49(9-12), 871-877, 2010.
- [12] Noorul Haq A, Marimuthu P, Jeyapaul R. "Multi Response Optimization of Machining Parameters of Drilling Al/SiC Metal Matrix Composite Using Grey Relational Analysis in the Taguchi Method". *Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 37(3-4), 250-255, 2008.
- [13] Taşkesen A, Aldas K, Özkul İ, Kütükde K, Zümrüt Y. "Analysis of Thrust Force in Drilling B<sub>4</sub>C-Reinforced Aluminium Alloy Using Genetic Learning Algorithm". *Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 75(1-4), 237-245, 2014.
- [14] Dhavamani C, Alwarsamy T. "Optimization of Machining Parameters for Aluminium and Silicon Carbide Composite Using Genetic Algorithm". *Procedia Engineering*, 38, 1194-2004, 2012.
- [15] Palanikumar K, Muniaraj A. "Experimental Investigation and Analysis of Thrust Force in Drilling Cast Hybrid Metal Matrix (Al-15%SiC-4%graphite) Composites". *Measurement*, 53, 240-250, 2014.
- [16] Montgomery DC. *Taguchi's Contributions to Experimental Design and Quality Engineering, Design and Analysis of Experiment*. 3<sup>rd</sup> ed. Canada, USA, 1991.
- [17] Canıyılmaz E, Kutay F. "Taguchi Metodunda Varyans Analizine Alternatif Bir Yaklaşım". *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 18(3), 51-63, 2003.
- [18] Roy RK. *A Primer on the Taguchi Method*. Competitive Manufacturing Series, Van Nostrand Reinhold, New York, USA, 1990.
- [19] Barnes S, Pashby IR, Mok DK. The Effect of Workpiece Temperature on the Machinability of an Aluminum/SiC MMC". *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 118(3), 422-427, 1996.
- [20] Çakır C. *Modern Talaşlı İmalatın Esasları*. 2. Baskı. Bursa, Türkiye, Uludağ Üniversitesi Güçlendirme Vakfı Yayını, 1999.
- [21] Rajmohan T, Palanikumar K. "Application of the Central Composite Design in Optimization of Machining Parameters in Drilling Hybrid Metal Matrix Composites". *Measurement*, 46(4), 1470-1481, 2013.
- [22] Alakesh M, Bhattacharayya B. "Influence of Machining Parameters on the Machinability of Particulate Reinforced Al/SiC-MMC". *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 25(9-10), 850-856, 2005.