

## Sertleştirilmiş 1.2367 Takım Çeliğinin İşlenmesinde Enerji Tüketiminin Analizi ve Modellenmesi

Naime EREN<sup>1,\*</sup>, Fatih HAYAT<sup>2</sup>, Mustafa GÜNAY<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Karabük Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Karabük, Türkiye

<sup>2</sup>Karabük Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Karabük, Türkiye

### MAKALE BİLGİSİ

**Alınma:** 04.11.2020

**Kabul:** 19.12.2020

#### Anahtar Kelimeler:

Enerji tüketimi

Sert işleme

DIN 1.2367

Modelleme

### ÖZET

Talaş kaldırma işlemlerinde enerji tüketimini en aza indirmek amacıyla tezgah, işlenen malzeme, kesici takım, kesme ortamı gibi faktörlerin birbiriyle uyumlu olarak seçilmesinin yanısıra, işleme planı ve kesme parametrelerinin optimum seçimi ve işlenebilirlik kriterlerinin modellenmesi süreçlerinin eş zamanlı uygulanması son derece önemlidir. Bu çalışmada, DIN 1.2367 sıcak iş takım çeliğinin sert tormalanmasında kesme parametrelerinin enerji tüketimine etkileri araştırılmış ve toplam güç tüketiminin matematiksel modeli oluşturulmuştur. Bu bağlamda, üç farklı kesme derinliği, kesme hızı ve ilerleme miktarı seçilerek CBN takım ile sert tormalama işlemleri yapılmış ve makine akım değerleri ölçülmüştür. Bu değerler yardımıyla toplam güç tüketimi ( $P_T$ ) hesaplanmış ve kesme parametrelerinin  $P_T$  üzerindeki etki oranları varyans analizi ile belirlenmiştir. Deneysel sonuçlarda, kesme parametrelerindeki artışın anlık akım değerini arttırdığı, ancak özellikle ilerleme miktarı ve kesme derinliğinin artmasıyla azalan işleme süresine bağlı olarak toplam güç tüketiminin azaldığı tespit edilmiştir. Buna göre,  $P_T$  üzerinde en fazla öneme sahip parametre %64.92 PCR ile ilerleme miktarıdır. Yanıt yüzey metodoloji ile geliştirilen matematiksel modelin belirtme katsayısı ( $R^2= 0.9955$ ), toplam güç tüketiminin yüksek güvenilirlikle tahmin edileceğini göstermektedir.

## Analysis and Modeling of Energy Consumption in Machining of Hardened 1.2367 Tool Steel

### ARTICLE INFO

**Received:** 04.11.2020

**Accepted:** 19.12.2020

#### Keywords:

Energy consumption

Hard machining

DIN 1.2367

Modeling

### ABSTRACT

In order to minimize energy consumption in machining processes, it is extremely important to select factors such as machine, processed material, cutting tool and cutting environment in harmony with each other, as well as the optimum selection of machining plan and cutting parameters and the modeling of machinability criteria simultaneously. In this study, the effects of cutting parameters on energy consumption in hard turning of DIN 1.2367 hot work tool steel were investigated and a mathematical model of total power consumption was created. In this context, three different cutting depths, cutting speed and feed rate were selected and hard turning operations were performed with CBN tool and machine current values were measured. With the help of these values, the total power consumption ( $P_T$ ) was calculated and the effect rates of the cutting parameters on  $P_T$  were determined by analysis of variance. As a result of the experiments, it was determined that the increase in the cutting parameters increases the instantaneous current value, but the total power consumption decreases due to the decreasing machining time, especially with the increase in the amount of feed and the cutting depth. Accordingly, the most important parameter on  $P_T$  is the amount of progress with 64.92% PCR. The coefficient of determination ( $R^2 = 0.9955$ ) of the mathematical model developed with the response surface methodology shows that the total power consumption can be estimated with high reliability.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Sert işleme teknikleri dişli miller, yatak ve hidrolik bileşenler, yüksek boyut ve şekil doğruluğunu gerektiren kalıp bileşenleri gibi sertleştirilmiş çeliklerden yapılan makine parçalarının, yüzey kalitesi ve işlevsel performansla ilgili özel gereksinimlerin son şekillendirilmesin için kullanılır. Genel olarak, sert işleme süreci özel kesme mekaniği, talaş oluşumu, takım aşınması, yüzey bütünlüğü ve parça doğruluğu ve enerji tüketimi ile karakterize edilir [1,2]. Bu bağlamda, kesilmesi zor alaşımlar ve seramikler gibi sertleştirilmiş çelikler ve kırılğan malzemelerin işlenmesinde enerji verimliliğinin iyileştirilmesine ihtiyaç vardır. Sürdürülebilir bitirme işlemi olarak sert tornalama ve frezeleme gibi işleme teknikleri hassas makine bileşenlerinin imalatında üstün bir yüzey bütünlüğü ve ölçü tamlığı sağlayabilir [3, 4]. Aynı zamanda, zayıf işlenebilirlik yüzünden daha düşük talaş kaldırma oranlarına ve dolayısıyla daha düşük enerji verimliliği meydana gelir. Talaş kaldırma yöntemlerinde enerji tüketimini azaltarak enerji verimliliğini artırmak, yalnızca üreticilere ekonomik olarak fayda sağlamakla kalmayacak, aynı zamanda çevresel performansların da iyileşmesini sağlamaktadır [5].

Bilgisayar kontrollü takım tezgahları, iş mili sistemi, besleme sürücü sistemi, elektrik kontrol sistemi, yardımcı sistemler, kesici takımlar ve fikstür dahil olmak üzere birçok işlevsel parçaya sahiptir. Bunlar arasında, iş mili motoru takımı veya iş parçasının dönüşünü tahrik eder, besleme motorları doğrusal veya döner hareket sağlar, hidrolik sistem kenetleme kuvveti veya besleme tahriki sağlar, soğutma ve yağlama sistemi soğutma ve yağlama sağlar ve takım kolu motorları otomatik olarak kesici takımları değiştirir [6-8]. Bu noktada, takım tezgahlarının tüm ekipmanlarının tahriki için gerekli gücü sağlamak amacıyla makineyle işleme sırasında, işleme sonrasında ve boşta kalma (rölanti) durumunda bir enerji tüketimi söz konusudur. Bununla birlikte, bir takım tezgahının tasarımı malzemenin işlenmesi sırasında ortaya çıkacak en yüksek güç gereksinimine dayanmaktadır. Minimum güç gereksinimi için işleme parametrelerinin optimizasyonu veya kesme kuvveti, güç tüketimi, yüzey pürüzlülüğü gibi işleme çıktılarını tahmin edici matematiksel modeller, daha düşük kapasiteli motorların, sürücülerin ve yardımcı ekipmanların uygulanmasına yol açar ve dolayısıyla yalnızca makineyle işleme sırasında değil, aynı zamanda makineyle işleme sonrası ve rölanti koşullarında enerji tüketiminden tasarruf edilebilir. Bu bağlamda, enerji tüketimi açısından sürdürülebilir işleme katkı sağladığı düşünülen çalışmalardan bazıları aşağıda verilmiştir.

Zhou vd., takım tezgahlarının enerji verimliliği ve enerji tüketim modelleri üzerine bir derleme çalışması yapmışlardır. Ürün tasarımı, üretim uygulaması ve süreç planlamasını entegre etmeye yönelik yaklaşımların hem değişken hem de sabit enerji tüketimini azaltarak sistem açısından enerji verimliliğini artırabileceği belirtilmiştir. Enerji tüketim modellerinin üç sınıfa ayıran araştırmacılar, birincisini, makine kesme enerji tüketimini tahmin etmek için spesifik enerji tüketimi (SEC) ve MRR arasında katsayıların elde edilmesi, ikincisini, enerji tüketimi ile malzeme özellikleri, kesici takım açısı, kesme parametreleri vb. işleme parametreleri arasındaki ilişkinin çözülmesi, üçüncüsünde, parça işleme sürecinin enerji tüketimini hesaplamak için evrensel tipte bir enerji tüketimi modeli oluşturulması şeklinde açıklamışlardır [9].

Zerti vd., 59 HRC sertliğinde AISI 420 paslanmaz çeliğinin kaplamalı seramik takımla işlenmesinde yüzey pürüzlülüğü, kesme kuvveti, güç tüketimi ve talaş hacmi için kesme parametrelerini optimize etmişlerdir. kaplamalı seramik kullanılmıştır. İlerleme miktarının yüzey pürüzlülüğü için en önemli faktör olduğu, kesme derinliğinin ise kesme kuvveti, güç ve talaş hacmi için önemli olduğu vurgulanmıştır. Ayrıca, YSA ve RSM metodolojileri ile geliştirilen modellerin iyi bir tahmin edici olarak kullanılabileceğini belirtmişlerdir [10]. Korkmaz ve Günay, kaplamalı karbür takımla AISI 420 martensitik paslanmaz çeliğin sonlu elemanlar yöntemi (FEM) esaslı tornalama simülasyonları ile kesme parametrelerinin kesme kuvveti bileşenleri ve güç tüketimi üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Elektrik tüketimi açısından kesme derinliğinin %49.55, ilerleme miktarının %19.79 ve kesme hızının %26.03 oranında etkili olduğu bulunmuştur. Kesme kuvvetleri açısından deney ve simülasyon sonuçları arasında % 7'lik bir elde edilmiş olup, sürdürülebilir işleme katkı açısından FEM'in kullanılabileceğini vurgulamışlardır [11].

Karabulut ve Şahinoğlu, R260 ray çeliğinin karbür kesici takım ile kuru şartlar altında işlenmesinde ilerleme hızının ve kesme derinliğinin yüzey pürüzlülüğü, güç tüketimi ve tezgâh gürültüsü üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. İlerleme hızı ve kesme derinliğindeki artışla birlikte

tezgâh gürültüsü ve güç tüketiminde artış meydana geldiğini belirtmişlerdir. ANOVA sonuçlarına göre, yüzey pürüzlülüğü üzerinde ilerleme hızının ve kesme derinliğinin sırasıyla %72 ve %20, tezgâh gürültüsü üzerinde %68 ve %25 oranında etkili olduğu bulunmuştur. Enerji tüketimi açısından ise kesme derinliği ve ilerleme hızı sırasıyla %78 ve %18 etki oranına sahiptir [12]. Kant ve Sangwan, kaplamasız tungsten karbür takımlar kullanarak AISI 1045 çeliğin işlenmesinde işleme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü ve güç tüketimi üzerindeki etkisini araştırmıştır. Optimum kesme parametresini elde etmek için RSM ve gri ilişkisel analiz yöntemlerini kullanmışlardır. Yüzey pürüzlülüğü ve güç tüketimini azaltmak için parametrelerin ilerleme hızı, kesme derinliği ve kesme hızı şeklinde bir önem seviyesine sahip olduğunu belirtmişlerdir [13].

Moradnazhad ve Ünver, belirli takım tezgahları veya işleme süreçleri için enerji tüketimi modellemesinin enerji verimliliğini önemli ölçüde artırmak için kullanılabileceğini vurgulamıştır. Takım tezgahlarının yardımcı bileşenlerinin özellikle kesme sırasında kullanılan enerjiden çok daha fazla enerji tükettiğini göstermiştir. Bu gerçek, operasyon zincirlerini bütünsel olarak analiz ederek takım tezgahlarının boşa kalma sürelerini azaltmak için daha fazla çalışma yapılmasını gerektirir. Yapılan araştırmalar, işleme sistemlerinin davranışını ve performansının tahmini, mekanik sistemlerin optimize edilmesi ve optimum kesme parametrelerinin seçilmesi ile enerji tüketimini azaltmak amacıyla enerji tasarruflu teknikler geliştirileceğini göstermektedir. Bu bağlamda, takım tezgahları, kesici takımlar, malzemeler ve enerji kaynakları hakkında eksiksiz bir bilgi veri tabanı oluşturmak, daha doğru enerji optimizasyonunu sağlayacaktır [14].

Literatürdeki araştırmalar, talaş kaldırma işlemlerinde enerji (güç) tüketimini en aza indirmek için çeşitli deney, istatistik ve modelleme tekniklerinin kullanıldığı anlaşılmaktadır. Bununla birlikte, takım tezgâhlarında kullanılan elektrik enerjisi genellikle fosil yakıtlardan elde edilmekte olup, bu enerji kaynaklarının yanması sonucu açığa çıkan gazlar ekolojik dengenin bozulmasına neden olmaktadır. Bu durum, sürdürülebilirlik anlamında enerji tüketimi konusunda daha dikkatli olunması gerektiğini göstermektedir. Bu çalışmada, son zamanlarda sıklıkla kullanılan sert tornalama teknolojisinde kesme parametrelerinin enerji tüketimine etkileri ve toplam güç tüketiminin modellenmesi üzerine bir araştırma sunulmuştur.

## 2. MATERYAL VE YÖNTEM (MATERIAL AND METHOD)

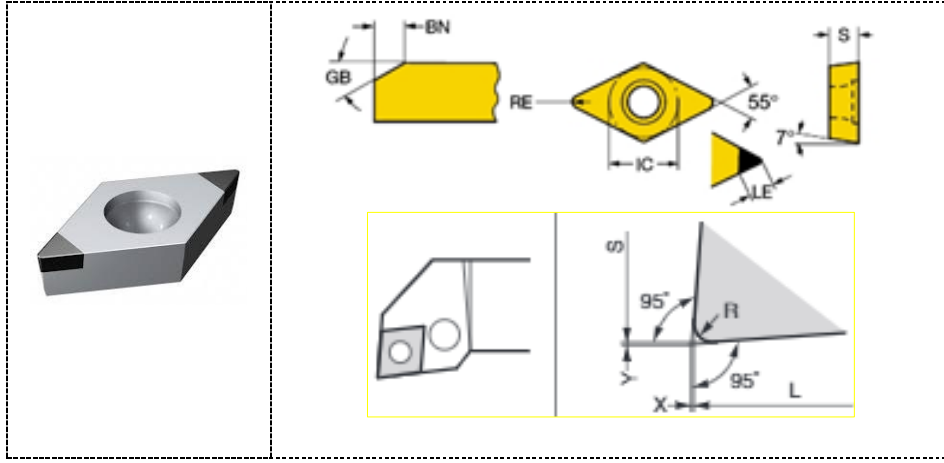
### 2.1. Malzeme ve Ekipman (Material and Equipment)

Bu çalışmada, sertleştirilmiş DIN 1.2367 sıcak iş takım çeliğinin işlenmesinde oluşan güç tüketiminin kesme parametrelerine göre değişimi detaylı olarak analiz edilmiştir. Deney malzemesi olarak kullanılan sıcak iş takım çeliğinin krom-molibden içeriği yüksek olup, H11 ve H13 sıcak iş çeliklerinden daha yüksek sıcaklık dayanımı ve iyi sertleşebilirlik sergilemektedir. Bu bağlamda, ekstrüzyon kalıpları, sıcak dövme kalıpları, sıcak kesme bıçakları, sıcak zimbalar ve mandreller ile bakır ve pirinç için kalıp döküm takımlarının imalatında tercih edilmektedir. DIN 1.2367 sıcak iş takım çeliğinden hazırlanan Ø200x50 mm boyutlarında deney numunelerine sertleştirme ısıl işlemi uygulanmıştır. Isıl işlem prosedürü olarak öncelikle numuneler 1050 °C'ye ısıtıldıktan sonra yağda soğutma uygulanmıştır. Daha sonra, 500 °C'de temperleme ısıl işlemi uygulanmış ve numunelerin sertlik değeri 55±1 HRC olarak ölçülmüştür. Sert tornalama işlemlerinde kullanılan deney malzemenin kimyasal kompozisyonu Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Deney malzemesinin kimyasal bileşimi (Ağırlıkça %)

C	Si	Mn	S	P	Cr	Mo	V
0.40	0.50	0.40	0.02	0.01	5.10	3.10	0.50

Tornalama deneyleri, Tezmaksan firması tarafında üretilen 20 HP gücünde ve maksimum 4000 rpm'de çalışabilen CNC torna tezgâhında yapılmıştır. Kesici takım olarak, Sandvik Coromant firmasına ait 7125 kalite CBN kesici uç (DCGW11T304S01020F kodlu), bu takıma uygun 95° yanaşma açısına sahip SDLCR2525M11 kodlu takım tutucu kullanılmıştır. Şekil 1'de kesici takım ve takım tutucu geometrisi verilmiştir.



Şekil 1. Kesici takım geometrisi

Sert tornalama işleminde kesme parametrelerine göre toplam güç tüketiminin belirlenmesi amacıyla belirli bir kesme uzunluğu için makinenin tek fazlı akım değeri ölçülmüştür. Bunun için UNI-T UT 201 model Pens ampermetre kullanılmıştır. Akım ölçen kablo aydınlatma, hidrolik, konveyör ve diğer ekipmanlara bağlı değildir. Böylece, makine yardımcı ekipmanlarının çalışmasından kaynaklı oluşacak elektrik akımının ölçüm sonuçlarını etkilemesi engellenmiştir. Makinenin bağlı olduğu regülatör ile gerilim değerlerinde dalgalanmalar ve enerji kayıplarından kaynaklanan değişimler minimize edilmiştir. Ölçülen akım değeri üç ile çarpılarak toplam akım ( $I$ ) değeri elde edilmiş olup, toplam akım değerinin voltaj ( $V$ ) değeriyle çarpılması ile anlık güç tüketimi ( $P$ ) bulunmuştur (Eş.1). Toplam güç tüketimi ( $P_T$ ) ise anlık güç tüketiminin toplam işleme süresi ( $t_i$ ) ile çarpılmasıyla hesaplanmıştır (Eş.2). Tablo 2’de verilen her bir deney dizini için talaş hacmi sabit tutulmuş olup, kesme derinliğine ( $a$ ) göre paso sayısı ( $i$ ) değiştirilerek deneyler yapılmıştır.

$$P = (I * 3) * V \quad (1)$$

Burada,  $P$ , watt (W);  $I$ , amper (A);  $V$  ise voltu (V) göstermektedir.

$$t_i = \frac{d * \pi * L * i}{V_c * 1000 * f} \quad (2)$$

Burada,  $d$ , işparçası çapı (mm),  $L$ , işleme uzunluğu (mm);  $i$ , paso sayısı,  $V_c$ , kesme hızı (m/dak);  $f$ , ilerleme miktarı (mm/dev)’dir.

$$P_T = t_i * P \quad (3)$$

## 2.2. Deney Tasarımı ve Analizi (Experiment Design and Analysis)

Deney tasarımı öncesi ilk olarak güç tasarrufu üzerinde doğrudan etkisi olan kesme parametreleri belirlenmiştir. Bu amaçla, kesme derinliği ( $a$ ), kesme hızı ( $V_c$ ) ve ilerleme miktarı ( $f$ ) olmak üzere üç parametre seçilmiştir. Bu parametrelerin seviyeleri ise sert malzemelerin finiş tornalanması için kesici takım firması önerileri ve literatürdeki çalışmalar dikkate alınarak tespit edilmiştir. Deneysel çalışmalarda kullanılan parametreler ve bunların seviyeleri Tablo 2’de verilmiştir. Bu bağlamda, Taguchi  $L_{27}$  dikey dizini seçilerek deney tasarımı yapılmıştır. Deneyler sırasında ölçülen akım değerleri ve buna bağlı hesaplanan toplam güç tüketimi ( $P_T$ ) üzerinde kesme parametrelerinin etki oranlarını belirlemek amacıyla varyans analizi (ANOVA) kullanılmıştır.

Tablo 2. Kesme parametreleri

Parametre	Seviye		
	1	2	3
Kesme derinliği, ( $a$ ) (mm)	0.10	0.15	0.20
Kesme hızı, ( $V_c$ ) (m/dak)	175	200	225
İlerleme miktarı, ( $f$ ) (mm/dev)	0.06	0.12	0.18

Ayrıca, yanıt yüzey metodolojisi kullanılarak  $P_T$ 'nin tahmini için bir matematiksel modelleme yapılmıştır. Matematiksel modelleme, çeşitli girdi parametrelerine bağlı olarak herhangi bir alanda bir çıktı parametresi elde etmek için farklı teknikler kullanılarak yapılabilir. Bu prosedürlerden biri olan yanıt yüzeyi yöntemi (RSM), işleme parametreleri ile çıktılar arasındaki etkileşimi anlamak ve iyileştirmek için yaygın olarak kullanılan bir metodolojidir. Ek olarak, deneysel sonuçlara bağlı olarak yanıt yüzey yöntemi ile çıktı parametrelerinin istatistiksel analizi mümkündür. Bu bağlamda, deneysel veriler ışığında toplam güç tüketimi için RSM kullanılarak matematiksel model geliştirilmiştir. İşleme çıktısı olan toplam güç tüketimi için matematiksel model karesel (kuadratik) regresyon denklemi kullanılarak elde edilmiştir (Eş.4):

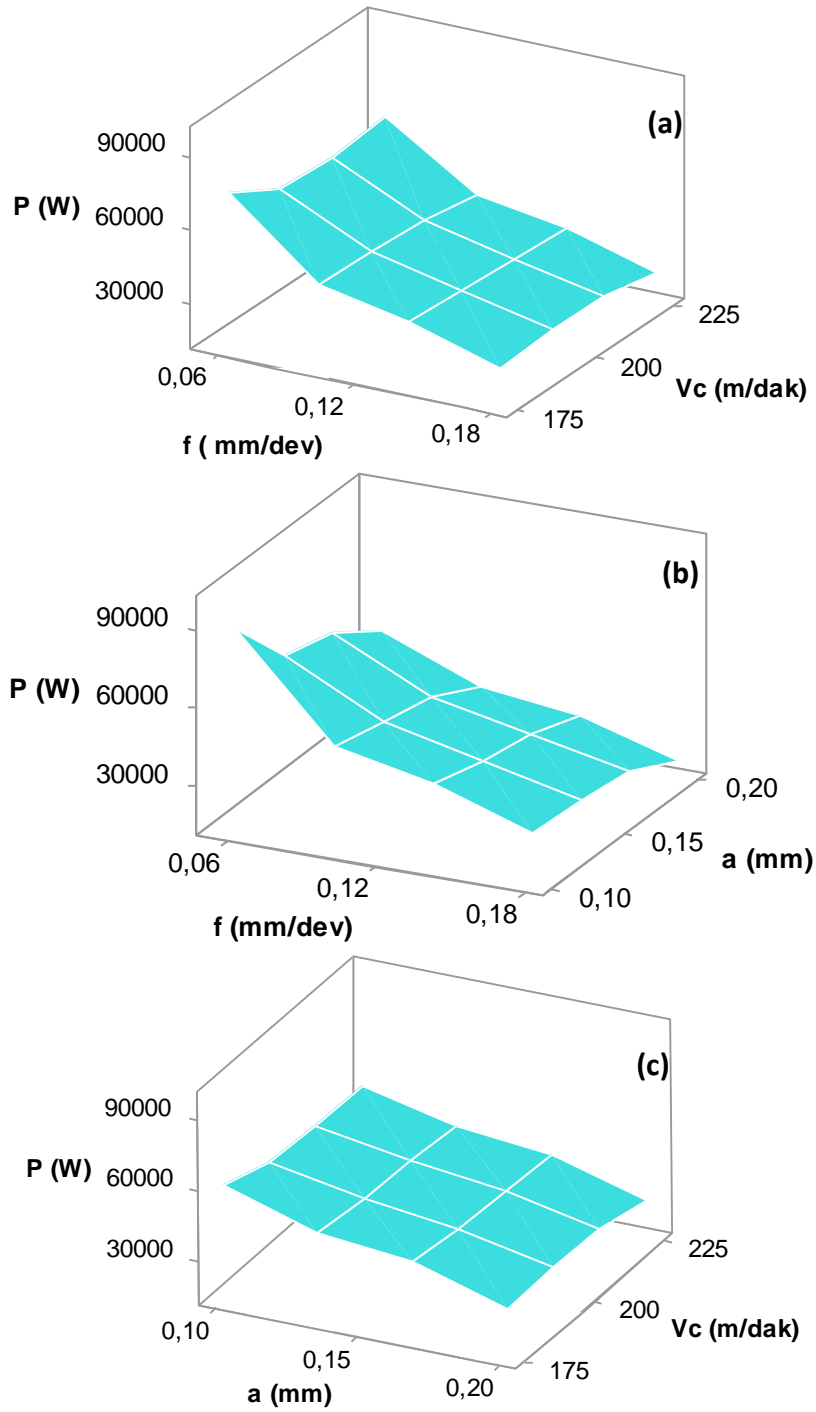
$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} X_i^2 \quad (4)$$

Bu eşitlikte,  $Y$  bağımlı değişken,  $\beta_0$  sabit regresyon katsayısı,  $\beta_i$  ve  $\beta_{ii}$  değişkenlerin katsayısı,  $X_i$  bağımsız değişkenlerin kodlanmamış (gerçek) değerleridir ve  $k$  parametre sayısıdır.

### 3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

#### 3.1. Güç Tüketiminin Analizi (Analysis of Power Consumption)

DIN 1.2367 sıcak iş takım çeliğinin işlenmesinde oluşan toplam güç tüketiminin ilerleme miktarı, kesme hızı ve kesme derinliğine göre değişimi etkileşim grafiklerinde üç boyutlu olarak gösterilmiştir (Şekil 3). Özgül kesme kuvveti, başka bir deyişle özgül kesme enerjisi önemli bir işleme çıktısıdır. Takım tezgahının toplam enerji tüketimini ve iş parçasından çıkarılan talaş kaldırma oranını (MRR) içerir. Bu çıktının minimum değeri, tornalamada minimum enerji tüketimi ve maksimum MRR ile ilişkilidir [15]. Diğer yandan, talaş kaldırma sırasında akım değerinin ölçülmesi kolay ve pratik bir uygulamadır. Bu değer, takım aşınması, malzeme sertliği ve malzemenin akma dayanımı ile ilgili bilgiler sağlar. Bununla birlikte, takım tezgahlarında yük miktarının, örneğin talaş kesiti, artması nedeniyle akım değerlerinin arttığı bilinmektedir [16]. Şekil 2a) ve 2b) incelendiğinde, ilerleme miktarının artmasıyla güç tüketiminin arttığı görülmektedir. Bunun sebebi, ilerlemenin artmasıyla artan talaş kesitine bağlı talaş olumu için gerekli güç gereksiniminin artmasıdır. Diğer yandan, kesme derinliğindeki artışla birlikte toplam güç tüketiminin azaldığı görülmektedir. Normalde, kesme derinliğindeki artış talaş kesitini artması ve dolayısıyla akım değerinin artmasına neden olur. Bu çalışmada, belirli bir malzeme hacmi için sert tornalama deneyleri yapılmıştır. Bu nedenle, Karaaslan ve Şahinoğlu [17] tarafından açıklandığı gibi kesme derinliğinin artmasıyla kesilen malzeme uzunluğu azalmakta ve işleme süresi kısalmaktadır. Bu bağlamda, Eş.(3)'ten anlaşılacağı gibi işleme süresindeki azalma doğrudan toplam kesme gücünün azalmasını sağlamıştır. Ek olarak, kesme hızındaki artışla birlikte kesme gücünün kayda değer bir şekilde azalmadığı söylenebilir (Şekil 2c). Bu sonuç, Eş.(2)'den açıkça anlaşılabilir olup, kesme hızındaki artışın işleme zamanını azaltmasına atfedilmektedir. Buradan, kesme parametrelerindeki artış anlık akım değerini arttırsa da işleme süresini kısalttığı için güç tüketiminin azaldığı sonucuna varılmıştır. Ancak, talaş kaldırma işlemlerinde ilerleme miktarındaki artışın yüzey pürüzlülüğünü arttıracak unutulmamalıdır. Bundan dolayı, yüzey kalitesini bozmadan enerji sarfiyatını azaltmak ve işleme süresini kısaltmak için kesme hızı ve kesme derinliği artırılırken, ilerleme miktarı azaltılmalıdır. Ancak, özellikle sert tornalamada kesme hızının artmasıyla takım ömrü azalacağından, işlenen malzemeye göre seçilen kesme parametrelerinin optimizasyonu en verimli çözüm yöntemlerinden birisi olmaktadır.



Şekil 3. Toplam güç tüketiminin kesme parametrelerine göre değişimi

Tablo 3, doğrusal ( $a$ ,  $V_c$ ,  $f$ ), ikinci dereceden ( $a^2$ ,  $V_c^2$ ,  $f^2$ ) ve etkileşimli ( $a*V_c$ ), ( $a*f$ ), ( $V_c*f$ ) parametreler için ANOVA sonuçlarını gösterir. Bu çalışmada  $\alpha = 0.05$  anlamlılık seviyesi kullanılmıştır, yani sonuçlar %95'lik bir güven düzeyi için doğrulanmıştır.  $P$  değeri 0.05'ten küçükse, karşılık gelen parametre performans karakteristiğine istatistiksel olarak önemli bir katkı sağlar ve  $P$  değeri 0.05'ten büyükse, ilgili parametrenin istatistiksel olarak %95 güven düzeyinde anlamlı olmadığı anlamına gelir. Sonuçlara göre, tüm doğrusal parametreler ile  $f^2$ , ( $a*f$ ) ve ( $V_c*f$ ) terimleri istatistiksel olarak önemlidir. Ayrıca, toplam güç tüketimi ( $P_T$ ) üzerinde kesme parametrelerinin etki derecelerini gösteren yüzde katkı oranları (PCR) gösterilmiştir (Tablo 3). Buna göre,  $P_T$  üzerinde en fazla öneme sahip parametre %64.92 PCR ile ilerleme miktarıdır.  $P_T$  üzerinde ikinci derecede öneme sahip değişken ise %22.44 PCR değeri ile kesme derinliğidir.

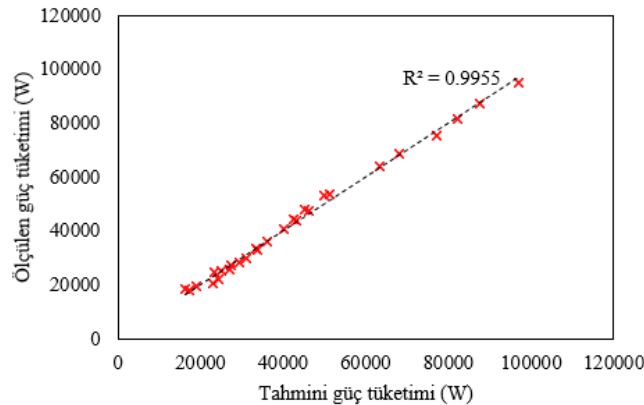
Tablo 3. Güç tüketimi için varyans analizi

Parametre	DF	SS	MS	F	P	PCR (%)
$a$	1	2970750774	2970750774	852.6	0.000	22.44
$Vc$	1	243758954	243758954	69.96	0.000	1.84
$f$	1	8595019287	8595019287	2467	0.000	64.92
$a*a$	1	8255830	8255830	2.37	0.142	0.06
$Vc*Vc$	1	6275129	6275129	1.8	0.197	0.05
$f*f$	1	700351284	700351284	201	0.000	5.29
$a*Vc$	1	11013787	11013787	3.16	0.093	0.08
$a*f$	1	590073173	590073173	169.4	0.000	4.46
$Vc*f$	1	54631823	54631823	15.68	0.001	0.41
Hata	17	59235101	3484418			0.45
Toplam	26	13239365141				100

### 3.2. Güç Tüketimi Matematiksel Modeli (Power Consumption Mathematical Model)

Yanıt yüzey metodolojisi, herhangi bir deney veya süreçte girdi ve çıktı parametreleri arasındaki ilişkinin belirlenmesi ihtiyacıyla uygulanan deneysel bir modelleme yaklaşımıdır. Özellikle malzeme işleme alanında yaygın olarak kullanılan bu tekniğin esas amacı, girdi parametrelerinin yanıtlar üzerindeki etkisini keşfetmek, ölçmek ve buna bağlı olarak yanıtları optimize etmektir. Aynı zamanda, işleme süreçleri hakkında mevcut veriler minimum olduğunda kolay uygulanması ve doğrusal olmayan problemlerde bile kolay bir şekilde modellerin geliştirilmesine imkan vermesi bu yöntemin avantajıdır [18]. Sert tornalama deneylerinden elde edilen toplam güç tüketimi ( $P_T$ ) için yanıt yüzey metodolojisi ile %95 güven düzeyinde geliştirilen matematiksel model Eş. 5'te gösterilmiştir. Yanıt yüzey metodolojisi kullanılarak oluşturulan matematiksel modelin uygunluğunu göstermek amacıyla belirtme katsayısı ( $R^2$ ) değeri bulunmuştur. Diğer bir deyişle,  $R^2$ 'nin kesme parametreleri ile yanıt arasındaki ilişkiyi tanımladığı söylenebilir. Buradan, kesme parametreleri ve toplam güç tüketimi arasında güçlü bir ilişki olduğu görülmekte olup,  $R^2$  değeri 0.9955 olarak hesaplanmıştır.  $P_T$  denklemi incelendiğinde, model katsayılarından anlaşılacağı gibi kesme parametrelerinin ( $a$ ,  $Vc$  ve  $f$ ) negatif etkisi göze çarpmaktadır. ANOVA tablosunda bahsedildiği gibi, toplam güç tüketiminin artmasına neden olan parametrelerin etki sıralaması ilerleme miktarı, kesme derinliği ve kesme hızı şeklinde olduğu Eş.5'ten açıkça görülmektedir. Ayrıca, toplam güç tüketimi için deneysel ve tahmin edilen sonuçların karşılaştırılması Şekil 3'te grafikte gösterilmektedir.

$$P_T = 344868 - 549952 \times a - 1087 \times Vc - 1719569 \times f - 469207 \times a^2 + 1.64 \times Vc^2 + 3001096 \times f^2 + 766 \times a \times Vc + 2337443 \times a \times f + 1422 \times Vc \times f \quad (5)$$



Şekil 3. Toplam güç tüketiminin karşılaştırılması

Şekil 3 incelendiğinde, grafikteki noktaların eğilim çizgisine yakın dağılım göstermesi geliştirilen modelin istatistiksel olarak önemli olduğuna işaret etmektedir. Hem model belirtme katsayısı ( $R^2$ ) hem de grafik dikkate alındığında, geliştirilen matematiksel modelin sıcak iş takım çeliğinin CBN kesici takım ile finiş tormalama işleminde toplam güç tüketimini ( $P_T$ ) güçlü bir şekilde tahmin edebileceği söylenebilir.

#### 4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, sertleştirilmiş sıcak iş takım çeliği üzerinde Taguchi  $L_{27}$  dikey dizinine göre yapılan sert tormalama sırasında enerji tüketimi ve kesme parametreleri arasındaki etkileşimler deneysel ve istatistiksel analizler kullanılarak araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- Kesme parametrelerinin ( $a$ ,  $V_c$ ,  $f$ ) artışıyla birlikte anlık akım değerinin arttığı, ancak  $a$  ve  $f$  değerlerinin artmasıyla azalan işleme süresinin toplam güç tüketimini olumlu etkilediği belirlenmiştir.
- Toplam güç tüketimi üzerinde kesme parametrelerinin önem sıralaması varyans analizi kullanılarak belirlenmiş olup, ilerleme miktarı (%64.92), kesme derinliği (%22.44) ve kesme hızı (%1.84) şeklinde bulunmuştur.
- Yanıt yüzey metodoloji ile toplam güç tüketiminin matematiksel modeli, DIN 1.2367 sıcak iş takım çeliğinin sert tormalama işleminde enerji tüketiminin %95 güven düzeyinde tahmin edilebileceğini göstermiştir. Bu çalışmanın devamında, sürdürülebilir imalata katkı açısından enerji tüketimi ve yüzey kalitesini içerecek şekilde optimum kesme parametrelerinin belirlenmesi ilgili alana önemli fayda sağlayacaktır.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. J.P. Davim, Machining of hard materials. Springer, London, 2011.
2. W. Grzesik, Advanced machining processes of metallic materials. Elsevier, Amsterdam, 2017.
3. F. Klocke, E. Brinksmeier, K. Weinert, Capability profile of hard cutting and grinding processes, CIRP Annals, 54(2):22-45, 2005.
4. H. Yurtkuran, M.E. Korkmaz, M. Günay, Modelling and optimization of the surface roughness in high speed hard turning with coated and uncoated CBN insert, Gazi University Journal of Science, 29(4): 987-995, 2016.
5. M.P. Sealy, Z.Y. Liu, D. Zhang, Y.B. Guo, Z.Q. Liu, Energy consumption and modeling in precision hard milling”, Journal of Cleaner Production, 135: 1591-1601, 2016.
6. W. Lee, C.Y. Lee, B.K. Min, Feed drive model for machine tool energy consumption simulation. Trans N Amer Manufac, 42:409-416, 2014.
7. V. Singh, P.V. Rao, S. Ghosh, Development of specific grinding energy model. Int J Mach Tool Manu; 60:1-13, 2012.
8. T. Li, L.L. Kong, H.C. Zhang, Recent research and development of typical cutting machine tool's energy consumption model. J Mech Eng; 50: 102-111, 2014.
9. L. Zhou, J. Li, F. Li, Q. Meng, J. Li, X. Xu, Energy consumption model and energy efficiency of machine tools: a comprehensive literature review, Journal of Cleaner Production 112:3721-3734. 2016.
10. A. Zerti, M.A. Yallese, I. Meddour, S. Belhadi, A. Haddad, T. Mabrouki, Modeling and multi-objective optimization for minimizing surface roughness, cutting force, and power, and maximizing productivity for tempered stainless steel AISI 420 in turning operations. Int. J. Adv. Manuf. Technol. 102, 1-23, 2019.
11. M.E. Korkmaz, M. Günay, Finite element modelling of cutting forces and power consumption in turning of AISI 420 martensitic stainless steel. Arab J Sci Eng:1-8, 2018.
12. R260 çeliklerinin işlenmesinde kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü, güç tüketimi ve makine gürültüsü üzerine etkileri, Politeknik Dergisi, 21(1):237-244, 2018.



13. G. Kant, K.S. Sangwan, Prediction and optimization of Machining parameters for minimizing power consumption and Surface roughness in machining. *J. Clean. Prod.* 83: 151–164, 2014.
14. M. Moradnazard, H.O. Ünver Energy efficiency of machining operations: A review, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 231:(11) 1871-1889, 2017.
15. C. Camposeco-Negrete, Optimization of cutting parameters using response surface method for minimizing energy consumption and maximizing cutting quality in turning of AISI 6061 T6 aluminum, *Journal of Cleaner Production* 91:109-117, 2015.
16. A. Şahinoğlu, M. Rafighi, Investigation of vibration, sound intensity, machine current and surface roughness values of AISI 4140 during machining on the lathe, *Arabian Journal for Science and Engineering*, 45:765–778, 2020.
17. F. Karaaslan, A. Sahinoglu, Determination of ideal cutting conditions for maximum surface quality and minimum power consumption during hard turning of AISI 4140 steel using TOPSIS method based on fuzzy distance, *Arabian Journal for Science and Engineering*,
18. A. Chabbi, M.A. Yallese, M. Nouioua, I. Meddour, T. Mabrouki, F. Girardin, Modeling and optimization of turning process parameters during the cutting of polymer (POM C) based on RSM, ANN, and DF methods. *Int J Adv Manuf Technol* 91:2267–2290, 2017.