

AISI 5140 Çeliğinin Farklı Soğutma Teknikleri Kullanılarak Frezelenmesinin Güç Tüketimi Üzerine Etkileri

Serhat ŞAP^{1*}

¹ Elektrik ve Enerji, Teknik Bilimler MYO, Bingöl Üniversitesi, Bingöl, Türkiye

*¹ ssap@bingol.edu.tr

(Geliş/Received: 30/12/2022;

Kabul/Accepted: 22/02/2023)

Öz: Yüksek mukavemete sahip olan AISI 5140 çeliği genellikle dişli ve mil yapımında kullanılmaktadır. Bu çelikler genellikle talaşlı imalat yöntemleri kullanılarak şekillendirilmektedir. Talaşlı imalat sırasında hızlı takım aşınması ve düşük yüzey kalitesi gibi olumsuz özelliklerin yanında güç tüketimi de fazla olabilmektedir. Bu olumsuz koşulların üstesinden gelebilmek için çevre ve insan sağlığına zararlı olmayan soğutma sıvıları kullanılmaktadır. Bu çalışmada AISI 5140 imalat çeliğinin çevre dostu minimum miktarda yağlama (MMY) koşulları ve farklı kesme parametreleri altında frezelenmesinin güç tüketimine olan etkileri araştırılmıştır. Deney sayısını ve maliyetleri azaltmak amacıyla Taguchi L₉ ortogonal dizisi kullanılmıştır. Kuru, hava ve MMY olmak üzere üç farklı soğutma ortamı seçilmiştir. Kesme parametreleri olarak üç farklı kesme hızı (80-120-160 m/dak) ve üç farklı ilerleme hızı (0.08-0.12-0.16 mm/dev) seçilmiştir. Kesme hızının artmasıyla güç tüketiminin arttığı, ilerleme hızının artmasıyla ise güç tüketiminin bir miktar azaldığı tespit edilmiştir. Kesme ortamı açısından değerlendirildiğinde, kuru ortamdaki MMY ortamına doğru gidildikçe güç tüketimi değerlerinin azaldığı belirlenmiştir. Güç tüketiminde optimum kontrol faktör seviyeleri kesme hızı için 80 m/dak, ilerleme hızı için 0.16 mm/dev ve kesme ortamı için MMY olduğu belirlenmiştir. Sonuç olarak MMY kesme ortamı ile frezelemede güç tüketiminin azaltılabileceği gözlemlenmiştir.

Anahtar kelimeler: AISI 5140 çeliği, CNC frezeleme, minimum miktarda yağlama, güç tüketimi, Taguchi analizi.

Effects of Milling AISI 5140 Steel Using Different Cooling Techniques on Power Consumption

Abstract: AISI 5140 steel, which has high strength, is generally used in gear and shaft construction. These steels are usually shaped using machining methods. In addition to negative features such as rapid tool wear and low surface quality during machining, power consumption can be high. Coolants that are not harmful to the environment and human health are used to overcome these adverse conditions. This study investigated the effects of milling AISI 5140 manufacturing steel under environmentally friendly minimum quantity lubrication (MQL) conditions and different cutting parameters on power consumption. Taguchi L₉ orthogonal array was used to reduce the number of experiments and costs. Three different cooling environments were selected dry, air, and MQL. Three cutting speeds (80-120-160 m/min) and three feed rates (0.08-0.12-0.16 mm/rev) were selected as cutting parameters. It was determined that the power consumption increases with the increase in cutting speed, and the power consumption decreases slightly with the rise in the feed rate. When evaluated in terms of cutting environment, it was determined that the power consumption values decreased from the dry environment to the MQL environment. The optimum control factor levels in power consumption were 80 m/min for cutting speed, 0.16 mm/rev for feed rate, and MQL for cutting environment. As a result, it was observed that power consumption can be reduced in milling with MQL cutting environment.

Key words: AISI 5140 steel, CNC milling, minimum quantity lubrication, power consumption, Taguchi analysis.

1. Giriş

İmalat sanayisinde sıklıkla kullanılan AISI 5140 çeliği, otomotiv ve inşaat sanayisinde özellikle tercih edilen bir malzemedir. AISI 5140 çeliği yüksek oranda krom içermesi sebebiyle işlenebilirliği oldukça zor olabilmektedir [1]. İşlenebilirliğinin zor olması aynı zamanda güç tüketimini de olumsuz yönde etkilemektedir. Birçok endüstride sürdürülebilir imalat için yeni araştırmalar yapılmaktadır [2, 3]. Sürdürülebilir imalat kavramı ile çevre ve insan sağlığı korunarak enerji verimliliği sağlanmaktadır [4]. Talaşlı imalat sektöründe geleneksel soğutma ve yağlama teknikleri ile hem israf hem de yüksek enerji tüketimi gibi sorunlar yaşanmaktadır [5]. Geleneksel soğutma sıvıları ile yapılan talaşlı imalat işlemlerinde çevre ve insan sağlığına zararlı olan bir takım yağlar kullanılmaktadır [6]. Bu geleneksel kesme sıvıları taşkın soğutma şeklinde kullanıldıkları için aynı zamanda maliyetleri de yüksektir [7]. Oysa daha etkili soğutma teknikleri kullanılarak sürdürülebilir imalat koşulları altında üretim yapılabilir.

* Sorumlu yazar: ssap@bingol.edu.tr. Yazarların ORCID Numarası: ¹ 0000-0001-5177-4952

Sürdürülebilir koşullar altında yapılan soğutma tekniklerinden biri de minimum miktarda yağlama (MMY) sistemidir. Bu sistemde minimum miktarda sıvı kesme bölgesine basınçlı ve buğu şeklinde gönderilerek mükemmel bir soğutma yapılabilir [8]. Kesme sıvısı çok az miktarda kullanıldığı için maliyetlerde azaltılabilmektedir. Kamata ve Obikawa [9] nikel tabanlı Inconel 718 süper alaşımını MMY koşulları altında işlenebilirlik özelliklerini araştırdılar. MMY ortamı kullanılan tornalamada optimum hava basıncı ömrü elde edilmiştir. Ayrıca MMY kullanımı ile daha kaliteli bir yüzey elde edildiği bildirilmiştir. Race vd. [10] SA516 karbon çeliğinin frezelenmesinde MMY tekniğini kullanarak takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü ve enerji tüketimini araştırmışlardır. Sonuç olarak MMY ortamında yapılan işleme ile daha fazla enerji tasarrufu sağlandığı bildirilmiştir. Ayrıca taşma soğutmaya kıyasla daha fazla çevresel avantaj elde edilmiştir. Sarıkaya ve Güllü [11] AISI 1050 çeliğini MMY koşullarında tornalamanın yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerini analiz etmişlerdir. Yüzey pürüzlülüğü üzerindeki en etkili parametrenin ilerleme hızı olduğunu bildirmişlerdir. Ayrıca MMY koşullarında en mükemmel yüzey kalitesinin elde edildiğini rapor etmişlerdir.

Yüksek kalitede sistemler tasarlamak için birçok analiz yöntemleri kullanılmaktadır. Bu yöntemlerden biri de Taguchi tekniğidir. Bu teknik ile sistematik bir yaklaşım kullanılarak tasarımlar, performans ve maliyet açısından optimize edilebilmektedir. Taguchi tasarımı ile tasarım parametreleri optimize edilebilir ve sistem performansı artırılabilir [12]. Son zamanlarda Taguchi tekniği ilgi görmekte ve birçok araştırmacı deneylerini bu yöntemi kullanarak tasarlamaktadır [13-16]. Bilga vd. [17] çok katmanlı kaplamalı EN 353 çeliğinin CNC tornalanmasını Taguchi yöntemini kullanarak araştırmışlardır. Sonuç olarak EN 353 çeliğinin geleneksel tornalama koşullarına kıyasla; enerji verimliliği (EE), makine tarafından tüketilen aktif enerji (AECM) ve güç faktörü (PF) parametrelerinde sırasıyla % 61,776, % 57,025 ve % 7,49'luk bir iyileşme sağlandığını kaydetmişlerdir. Mia vd. [18] AISI 1060 çeliğini MMY koşullarında tornalayarak Taguchi yöntemi ile analiz etmişlerdir. Sonuç olarak yapılan kantitatif analiz ile kesme hızının yüzey pürüzlülüğünü etkilediği bildirilmiştir. Ayrıca varyans analizi ile kesme hızının, ilerleme hızının ve talaş derinliğinin yanıt tepkileri üzerindeki etkileri belirlenmiştir.

Bu çalışmada imalat sektöründe kullanılan AISI 5140 çeliğinin MMY şartlarında CNC frezelenmesinin güç tüketimi üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bu amaçla üç farklı kesme hızı, üç farklı ilerleme hızı ve tek kesme derinliği seçilmiştir. Deney tasarımında Taguchi L₉ ortogonal dizisi kullanılmıştır. Elde edilen bulgular ile güç tüketimi üzerinde en etkili kontrol faktörleri belirlenmiştir. Ayrıca 3B yüzey grafikleri ile MMY ve kesme parametrelerinin etkileri tartışılmıştır.

2. Materyal ve Metot

Mevcut çalışmada AISI 5140 imalat çeliği deney malzemesi olarak kullanılmıştır. Bu imalat çeliği birçok endüstride kalıp, dişli, mil vb. malzemelerin yapımında yaygın olarak kullanılmaktadır. Tablo 1, AISI 5140 imalat çeliğinin kimyasal içeriğini temsil etmektedir.

Tablo 1. AISI 5140 imalat çeliğinin kimyasal bileşimi [19].

Elementler	C	Si	Mn	P	S	Cr
Ağırlıkça %	0.45	0.3	0.75	0.035	0.03	1

Frezeleme deneyleri için beş adet numune (80x20 mm) hazırlanmıştır. Numunelerin her bir yüzeyi üzerine birer adet frezeleme yapılmıştır. Kesme işlemlerinde AlTiN kaplanmış karbür kesici uçlar kullanılmıştır. İşlenebilirlik deneyleri Dahlih MCV-860 CNC dik işleme freze tezgahında yapılmıştır. Şekil 1, deneylerin yapıldığı takım tezgahını göstermektedir.



Şekil 1. Deneylerde kullanılan takım tezgahı ve deney düzeneği [19].

Yapılan ön deneyler ve üretici firma tavsiyeleri dikkate alınarak üç farklı kesme hızı (80-120-160 m/dak), üç farklı ilerleme hızı (0.080-0.120-0.160 mm/dev) ve tek kesme derinliği (0.5 mm) seçilmiştir. Soğutma/yağlama koşulları olarak kuru, hava ve MMY ortamları kullanılmıştır. Basınçlı hava, takım tezgahına monte edilen bir kompresör yardımıyla kesme bölgesine aktarılmıştır. MMY sistemi için ise Werte STN 15 model bir püskürtme cihazı kullanılmıştır. MMY sistemi kesme bölgesine yaklaşık 200 mm mesafede ve 40° açıyla konumlandırılmıştır. Tablo 2’de frezeleme parametreleri ve seviyeleri görülmektedir. Deney tasarımı Tablo 3’te gösterilmektedir. Frezeleme deneylerinde optimum değerlerin belirlenmesi için Taguchi L₉ deney tasarımı uygulanmıştır. Taguchi yönteminde deneylerden elde edilen sonuçlar ve arzu edilen değerler arasındaki korelasyon için bir fonksiyon kullanılmaktadır. Bu fonksiyon Minitab yazılımı ile bir sinyal/gürültü (S/N) oranı haline dönüştürülür. Deneylerde elde edilen sonuçlarda en küçük değerler daha iyi olduğu için “daha küçük olan en iyi” seçeneği uygulanmıştır. Denklem (1) ile S/N oranları elde edilmiştir.

$$S/N_{\text{daha küçük olan en iyi}} = -10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y^2) \right] \quad (1)$$

Tablo 2. Frezeleme parametreleri ve seviyeleri [19].

Frezeleme parametreleri	Birim	Seviyeler		
		1	2	3
A-Kesme ortamı	-	Kuru	Hava	MMY
B-Kesme hızı, (V _c)	m/dak	80	120	160
C-İlerleme hızı, (f _n)	mm/dev	0.08	0.12	0.16

Tablo 3. Taguchi L₉ (3³) deney tasarımı [19].

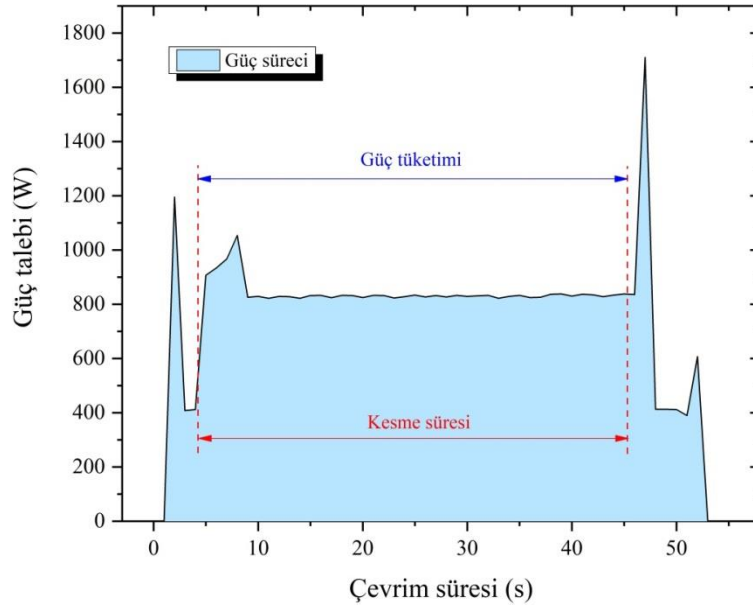
Deney numarası	Kesme hızı (m/dak)	İlerleme hızı (mm/dev)	Kesme ortamı
1	80	0.08	Kuru
2	80	0.12	Hava
3	80	0.16	MMY
4	120	0.08	Hava
5	120	0.12	MMY
6	120	0.16	Kuru
7	160	0.08	MMY
8	160	0.12	Kuru
9	160	0.16	Hava

HIOKI-PW3198 model bir güç analizörü deneyler sırasında harcanan gücün belirlenmesi amacıyla kullanılmıştır. Şekil 2, kullanılan güç analizörünü göstermektedir. Güç analizörünün maşaları takım tezgahının gerekli kablolarına bağlanmıştır. Güç analizöründen elde edilen ham verilerden özel bir yazılım aracılığı ile

harcanan toplam güç hesaplanmıştır. Şekil 3'te işlenen bir numune için gerekli güç miktarı ve süre gösterilmektedir.



Şekil 2. Güç tüketiminin belirlenmesi için kullanılan analizör.

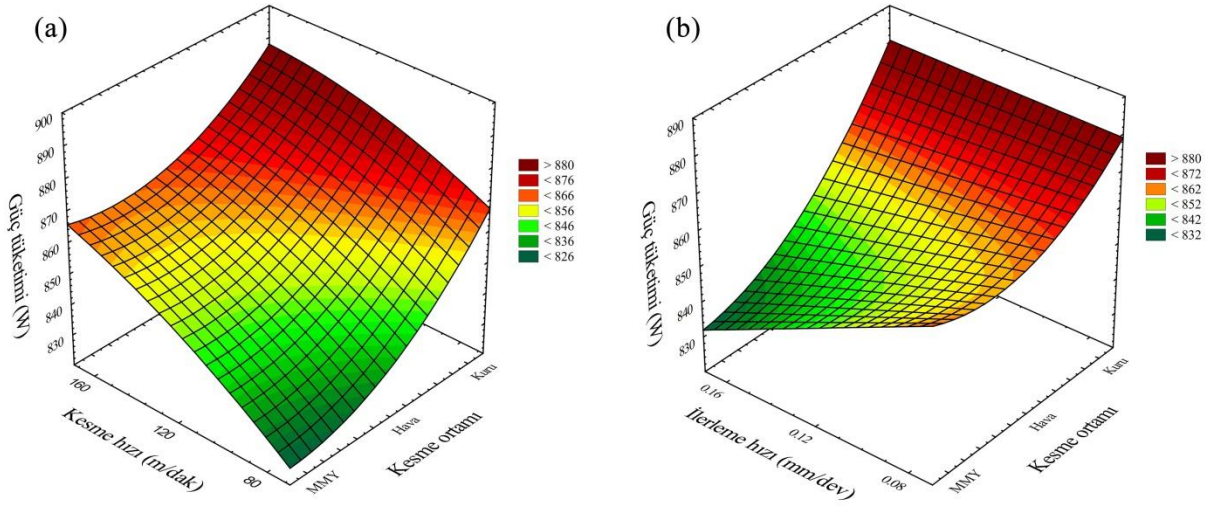


Şekil 3. 6 no'lu deneyde tüketilen enerji ve süresi

3. Bulgular ve Tartışma

3.1. Güç Tüketimi Analizi

Son yıllarda gittikçe artan sağlık sorunları ve verimli enerji üretimi küresel bir sorun haline gelmektedir [20]. Bu nedenle üretim endüstrilerinin enerji tüketimini azaltmak konusunda oldukça çaba göstermesi gerekmektedir. Enerji maliyetlerinin artması, küresel ısınma ve yüksek karbon emisyonları, enerji tüketimini kontrol altında tutmak için yeterli sebeplerdir [21]. Bir malzemenin farklı şekillerde üretilebilmesi için imalat sektöründe takım tezgahları yaygın olarak kullanılmaktadır. Takım tezgahları üzerinde bulunan aksesuarlar (soğutma sistemleri, işleme parametreleri ve işleme koşulları) oldukça fazla enerji tüketebilmektedir. İmalat sektörünün gelişmesiyle birlikte düşük maliyetli ve çevreye zarar vermeyen sürdürülebilir kesme sıvıları kullanılmaya başlamıştır [22]. Şekil 4, AISI 5140 çeliğinin frezlenmesi sonucu harcanan güç tüketiminin kesme parametreleri ile ilişkisini gösteren 3B yüzey grafiklerini temsil etmektedir. Grafikler incelendiğinde kesme hızının artmasıyla güç tüketiminin arttığı, ilerleme hızının artmasıyla ise güç tüketiminin bir miktar azaldığı görülmektedir. Uygun kesme parametrelerinin seçimi ile takım ömrü artırılabilir ve güç tüketiminin azaltılabileceği bildirilmiştir [23].

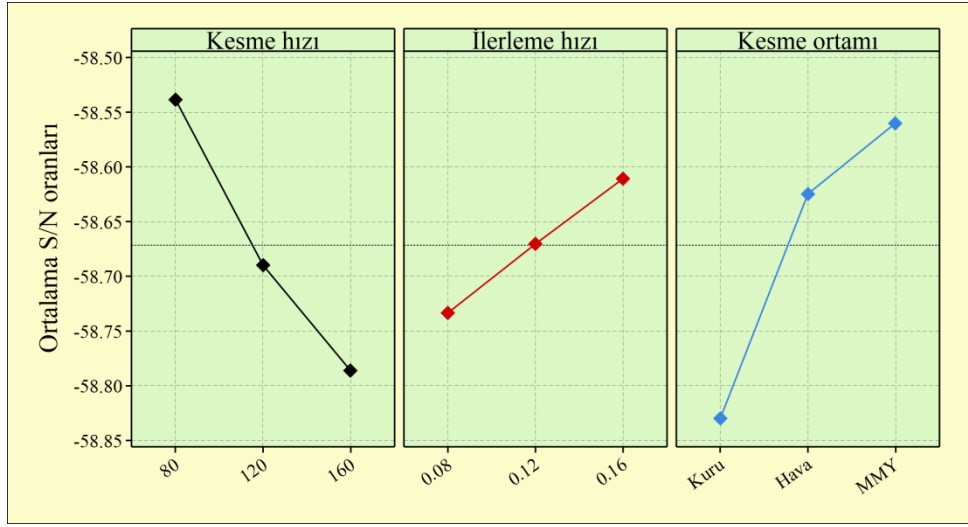


Şekil 4. AISI 5140 çeliğinin frezelenmesi sırasında harcanan güç tüketiminin farklı kesme parametreleri ile ilişkisini gösteren 3B yüzey grafikleri; a) Kesme hızı-Kesme ortamı, b) ilerleme hızı-Kesme ortamı.

Camposeco-Negrete [24] AISI 6061 T6 alüminyumun tornalanmasında tepki yüzey yöntemi (RSM) kullanarak kesme parametrelerini optimize etmiştir. Enerji tüketimi ve yüzey pürüzlülüğünün aynı anda optimize edildiği bildirilmiştir. Aynı zamanda tüketilen enerjinin azaltılmasında ilerleme hızı ve kesme derinliğinin en önemli faktörler olduğu rapor edilmiştir. Grafikler kesme ortamı açısından değerlendirildiğinde, kuru ortamdan MMY ortamına doğru gidildikçe güç tüketimi değerlerinin azaldığı görülmektedir. En iyi kesme ortamının MMY ortamı olduğu tespit edilmiştir. En düşük güç tüketimi 830 W (kesme hızı 80 m/dak, ilerleme hızı 0.16 mm/dev, kesme ortamı MMY) olarak kayıt altına alınmıştır. Benzer sonuçlar birçok araştırmacı tarafından bildirilmiştir. Ji vd. [25] Ti6Al4V alaşımının delinmesi sırasında farklı soğutma/yağlama teknikleri kullanarak enerji tüketimini araştırdılar. MMY soğutma/yağlama tekniği ile enerji tüketimi değerlerinin azaldığını rapor etmişlerdir. Kuru ortamda yapılan işlenebilirlik uygulamalarında sürtünmeden dolayı daha fazla takım aşınması meydana gelmektedir. Takım aşınmasının artmasıyla enerji tüketimi de artabilmektedir [26].

3.2. İstatistiksel analiz

Yanıt parametresi ve her bir kontrol faktörünün tüm seviyeleri için S/N oranları ve ortalamaları Şekil 5'te gösterilmektedir. Grafiğin ortasında bulunan referans çizgisinin altında kalan bölge artışı, üst kısmında kalan bölge ise azalmayı temsil etmektedir. Grafik incelendiğinde; kesme hızındaki artışla güç tüketiminin arttığı, ilerleme hızındaki artışla güç tüketiminin azaldığı görülmektedir. Kesme ortamı açısından değerlendirildiğinde MMY tekniği ile yapılan soğutma/yağlamanın güç tüketimini azalttığı tespit edilmiştir. Güç tüketimi için optimum kontrol faktör seviyeleri kesme hızı için 80 m/dak, ilerleme hızı için 0.16 mm/dev ve kesme ortamı için MMY olduğu belirlenmiştir. Tablo 4'te güç tüketiminin deney sonuçları, tahmin edilen sonuçlar ve S/N oranları gösterilmektedir.



Şekil 5. Güç tüketimi için S/N oranlarının ana etki grafiği.

Tablo 4. Güç tüketimi deneysel, tahmini sonuçlar ve S/N oranları.

Deneysel numarası	Güç tüketimi (W)	Tahmini güç tüketimi (W)	Güç tüketimi için S/N oranları (dB)
1	871	867	-58.8004
2	835	840	-58.4337
3	830	828	-58.3816
4	863	861	-58.7202
5	853	849	-58.6190
6	864	869	-58.7303
7	859	864	-58.6799
8	887	885	-58.9585
9	863	859	-58.7202

Güç tüketimi için varyans analizi (ANOVA) sonuçları Tablo 5’te gösterilmektedir. Tabloda güç tüketimi üzerinde etkili olan kontrol faktörleri görülmektedir. Güç tüketimini; kesme hızının % 37.308, ilerleme hızının % 9.027 ve kesme ortamının % 47. 432 oranında etkilediği belirlenmiştir. Hata oranı % 6.233 olarak kaydedilmiştir. Analizler % 95 güven seviyesinde gerçekleştirilmiştir. Böylece güç tüketimi üzerinde en fazla etkiye sahip kontrol faktörünün kesme ortamı, en az etkiye sahip kontrol faktörünün ise ilerleme hızı olduğu gözlenmiştir.

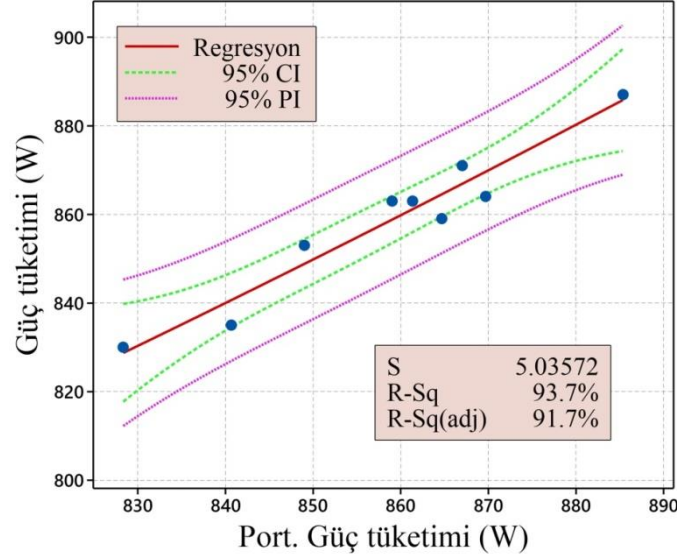
Tablo 5. Güç tüketimi için ANOVA sonuçları.

Kaynak	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P	Katkı oranı (%)
Güç tüketimi							
A-Kesme hızı (m/dak)	2	0.09349	0.09349	0.046745	5.99	0.143	37.308
B-İlerleme hızı (mm/dev)	2	0.02262	0.02262	0.011312	1.45	0.408	9.027
C-Kesme ortamı	2	0.11886	0.11886	0.059428	7.61	0.116	47.432
Hata oranı	2	0.01562	0.01562	0.007808	-	-	6.233
Toplam	8	0.25059	-	-	-	-	100.000

Regresyon analizi, en az bir yanıt parametresi ile bir ya da birden fazla bağımsız değişken arasında ilişkili olan farklı değişkenlerin modellenmesi amacıyla yapılmaktadır [27]. Bu çalışmada bağımlı değişken olan yanıt parametresi güç tüketimi, bağımsız değişkenler ise kesme hızı, ilerleme hızı ve kesme ortamıdır. Güç tüketiminin tahmin denklemini elde etmek amacıyla regresyon analizi yapılmıştır. Tahmin denklemini ikinci dereceden regresyon modeli için tasarlanmıştır. Güç tüketimi için ikinci dereceden regresyon modeli ile elde edilen denklem 2 aşağıda gösterilmiştir. Ayrıca Şekil 6’da deney sonuçları ve ikinci dereceden regresyon modeli ile elde edilen sonuçlar karşılaştırılmaktadır. Tahmin edilen sonuçlar ile deney sonuçları arasında çok iyi bir ilişki olduğu görülmektedir. Güç tüketimi için ikinci dereceden regresyon modeli ile elde edilen denklemin R² değeri % 93.7

olduğu belirlenmiştir. Sonuç olarak ikinci dereceden regresyon modelinin güç tüketimi tahmininde başarılı olduğu anlaşılmaktadır.

$$\text{Güç tüketimi} = 575 - 0.344 \times P_{\text{ort. Güç}} + 0.000785 \times P_{\text{ort. Güç}}^2 \quad (2)$$



Şekil 6. Güç tüketimi için regresyon analizi.

4. Sonuçlar

Bu çalışmada AISI 5140 imalat çeliğinin farklı soğutma/yağlama ortamlarında ve farklı kesme parametreleri altında frezelenmesinin güç tüketimi üzerindeki etkileri Taguchi analizi kullanılarak araştırılmıştır. Sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- Kesme hızının artmasıyla güç tüketiminin arttığı, ilerleme hızının artmasıyla ise güç tüketiminin bir miktar azaldığı tespit edilmiştir.
- Kesme ortamı açısından değerlendirildiğinde, kuru ortamdan MMY ortamına doğru gidildikçe güç tüketimi değerlerinin azaldığı belirlenmiştir. En iyi kesme ortamının MMY ortamı olduğu tespit edilmiştir. En düşük güç tüketiminin 830 W (kesme hızı 80 m/dak, ilerleme hızı 0.16 mm/dev, kesme ortamı MMY) olduğu gözlenmiştir.
- Güç tüketiminde optimum kontrol faktör seviyeleri kesme hızı için 80 m/dak, ilerleme hızı için 0.16 mm/dev ve kesme ortamı için MMY olduğu belirlenmiştir. Ayrıca ikinci dereceden regresyon modeli oluşturularak elde edilen tahmin denklemi ile % 93.7 oranında başarılı bir analiz gerçekleştirilmiştir.

Kaynaklar

- [1] Kuntoğlu M, Acar O, Gupta MK, Sağlam H, Sarıkaya M, Giasin K, et al. Parametric Optimization for Cutting Forces and Material Removal Rate in the Turning of AISI 5140. Machines. 2021;9(5).
- [2] Şap S, Ultra Yüksek Mukavemetli S1100 Çeliğinin MQL koşullarında Frezelenmesinin Takım Aşınması Üzerindeki Etkileri. 4 th International Conference on Applied Engineering and Natural Sciences; 2022 November 10-13, 2022; Konya/Turkey.
- [3] Usca ÜA, Şap S, Uzun M, Kuntoğlu M, Salur E, Karabiber A, et al. Estimation, Optimization and Analysis Based Investigation of the Energy Consumption in Machinability of Ceramic-Based Metal Matrix Composite Materials. J Mater Res Technol. 2022;17:2987-98.
- [4] Şap S, Usca ÜA, Uzun M, Kuntoğlu M, Salur E, Pimenov DY. Investigation of the Effects of Cooling and Lubricating Strategies on Tribological Characteristics in Machining of Hybrid Composites. Lubricants. 2022;10(4):63.
- [5] Salur E. Understandings the tribological mechanism of Inconel 718 alloy machined under different cooling/lubrication conditions. Tribol Int. 2022;174:107677.

- [6] Usca ÜA, Şap S, Uzun M. Evaluation of Machinability of Cu Matrix Composite Materials by Computer Numerical Control Milling under Cryogenic LN2 and Minimum Quantity Lubrication. *J Mater Eng Perform.* 2022;1-15.
- [7] Salur E, Kuntoğlu M, Aslan A, Pimenov DY. The Effects of MQL and Dry Environments on Tool Wear, Cutting Temperature, and Power Consumption during End Milling of AISI 1040 Steel. *Metals.* 2021;11(11):1674.
- [8] Şap E, Usca ÜA, Uzun M. Machining and optimization of reinforced copper composites using different cooling-lubrication conditions. *J Braz Soc Mech Sci & Eng.* 2022;44(9):399.
- [9] Kamata Y, Obikawa T. High speed MQL finish-turning of Inconel 718 with different coated tools. *J Mater Process Technol.* 2007;192-193:281-6.
- [10] Race A, Zwierzak I, Secker J, Walsh J, Carrell J, Slatter T, et al. Environmentally sustainable cooling strategies in milling of SA516: Effects on surface integrity of dry, flood and MQL machining. *J Clean Prod.* 2021;288:125580.
- [11] Sarıkaya M, Güllü A. Taguchi design and response surface methodology based analysis of machining parameters in CNC turning under MQL. *J Clean Prod.* 2014;65:604-16.
- [12] Yang WH, Tarn YS. Design optimization of cutting parameters for turning operations based on the Taguchi method. *J Mater Process Technol.* 1998;84(1):122-9.
- [13] Singh SP, Geethan KAV, Elilraja D, Prabhuram T, Durairaj JI. Optimization of dry sliding wear performance of functionally graded Al6061/20% SiC metal matrix composite using Taguchi method. *Materials Today: Proceedings.* 2020;22:2824-31.
- [14] Sekar K, Vasanthakumar P. Mechanical properties of Al-Cu alloy metal matrix composite reinforced with B4C, Graphite and Wear Rate Modeling by Taguchi Method. *Materials Today: Proceedings.* 2019;18:3150-9.
- [15] Saravanan S, Senthilkumar P, Ravichandran M, Shivasankaran N. Wire electrical discharge machining of AA6063-TiC particle reinforced metal matrix composites using Taguchi method. *Mater Res Express.* 2018;5(10).
- [16] Şap E. Investigation of mechanical properties of Cu/Mo-SiCp composites produced with P/M, and their wear behaviour with the Taguchi method. *Ceram Int.* 2021;47(18):25910-20.
- [17] Bilga PS, Singh S, Kumar R. Optimization of energy consumption response parameters for turning operation using Taguchi method. *J Clean Prod.* 2016;137:1406-17.
- [18] Mia M, Dey PR, Hossain MS, Arafat MT, Asaduzzaman M, Shoriat Ullah M, et al. Taguchi S/N based optimization of machining parameters for surface roughness, tool wear and material removal rate in hard turning under MQL cutting condition. *Measurement.* 2018;122:380-91.
- [19] Şap S. AISI 5140 İslah Çeliğinin Minimum Miktarla Yağlama Ortamı Altında Frezelenmesinin Takım Aşınması Üzerindeki Etkileri. 4 International Scientific Research and Innovation Congress (ISARCH); 24.12.2022; İstanbul2022. p. 915-24.
- [20] Sarıkaya M, Yılmaz V, Güllü A. Analysis of cutting parameters and cooling/lubrication methods for sustainable machining in turning of Haynes 25 superalloy. *J Clean Prod.* 2016;133:172-81.
- [21] Bagaber SA, Yusoff AR. Energy and cost integration for multi-objective optimisation in a sustainable turning process. *Measurement.* 2019;136:795-810.
- [22] Yıldırım ÇV, Kıvak T, Sarıkaya M, Şirin Ş. Evaluation of tool wear, surface roughness/topography and chip morphology when machining of Ni-based alloy 625 under MQL, cryogenic cooling and CryoMQL. *J Mater Res Technol.* 2020;9(2):2079-92.
- [23] Camposeco-Negrete C, de Dios Calderón Nájera J, Miranda-Valenzuela JC. Optimization of cutting parameters to minimize energy consumption during turning of AISI 1018 steel at constant material removal rate using robust design. *Int J Adv Manuf Technol.* 2016;83(5):1341-7.
- [24] Camposeco-Negrete C. Optimization of cutting parameters using Response Surface Method for minimizing energy consumption and maximizing cutting quality in turning of AISI 6061 T6 aluminum. *J Clean Prod.* 2015;91:109-17.
- [25] Ji M, Xu J, Chen M, Mansori ME. Effects of different cooling methods on the specific energy consumption when drilling CFRP/Ti6Al4V stacks. *Procedia Manuf.* 2020;43:95-102.
- [26] Usca ÜA, Uzun M, Şap S, Giasin K, Pimenov DY, Prakash C. Determination of machinability metrics of AISI 5140 steel for gear manufacturing using different cooling/lubrication conditions. *J Mater Res Technol.* 2022;21:893-904.
- [27] Cetin MH, Ozcelik B, Kuram E, Demirbas E. Evaluation of vegetable based cutting fluids with extreme pressure and cutting parameters in turning of AISI 304L by Taguchi method. *J Clean Prod.* 2011;19(17):2049-56.