

MİKRO TORNALAMA İŞLEMİNDE KESME KUVVETLERİNİN MEKANİSTİK MODELLENMESİ

Kubilay ASLANTAŞ¹ Ahmet HASÇELİK²,

¹ Makine Mühendisliği Bölümü, Teknoloji Fakültesi, Afyon Kocatepe Üniversitesi,
Afyonkarahisar, Türkiye

² Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, İncehisar Meslek Yüksekokulu, Afyon Kocatepe Üniversitesi,
Afyonkarahisar, Türkiye
aslantas@aku.edu.tr, ahascelik@aku.edu.tr

Özet

Mikro tornalama işlemi, mikro silindirik parçaların imalatında kullanılan bir mikro şekillendirme yöntemidir. Talaş derinliği ve ilerleme değeri çok küçük olması nedeniyle, iş parçasının tane boyutuna yakın değerlerinde kesme işlemleri yapılabilmektedir. Bu durumda, kesme kuvvetleri sadece iş parçasının türüne değil, aynı zamanda tane boyutuna, yüzeydeki artık gerilmelere ve tane yönlenmesine göre değişkenlik gösterir. Bu çalışmada mikro tornalama işleminde kesme kuvvetlerinin mekanistik modellenmesi gerçekleştirilmiştir. Kesme deneyleri ortogonal şartlarda gerçekleştirilmiş ve 0,4 mm et kalınlığına sahip 304 paslanmaz çelik malzeme kullanılmıştır. Çalışmada farklı ilerleme değerleri kullanılarak kesme kuvveti katsayıları elde edilmiştir. Ayrıca farklı kesme hızları için de deneyler yapılarak, mekanistik modele kesme hızının etkisi de dahil edilmiştir. Oluşturulan mekanistik modelin doğrulanması amacıyla farklı kesme hızı ve ilerleme değerlerinde kesme testleri gerçekleştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Mikro Tornalama, Ortogonal Kesme, Paslanmaz Çelik, Mekanistik modelleme

MECHANISTIC MODELING OF CUTTING FORCES IN MICRO TURNING PROCESS

Abstract

Micro turning is a micro machining method used in the manufacture of micro cylindrical parts. Because of the depth of cut and the feed rate is very small, cutting operations can be made at the values close to the grain size of the workpiece. In this case, the cutting forces vary not only according to the type of workpiece, but also according to grain size, residual stresses on the surface and grain orientation. In this study, mechanistic modelling of cutting forces in micro turning operation is performed. Cutting tests were carried out under orthogonal conditions and 304 stainless steel material with wall thickness of 0.4 mm was used. Cutting force coefficients were obtained by using different feed values. Experiments were also made for different cutting speeds and the effect of cutting speed was included in the mechanistic model. In order to verify the mechanistic model, cutting tests were performed at different cutting speeds and feed rates.

Keywords: Micro turning, Orthogonal cutting, Stainless steel, Mechanistic modelling

1 Giriş

Günümüz imalat teknolojilerinde, parçaların minyatürleşmesi, küçülen cihaz boyutları ve yüksek hassasiyette parça gereksinimi yeni arayışlara neden olmuş ve gelişen teknoloji ile beraber mikro işlemeyi ortaya çıkarmıştır. İçinde bulunduğumuz minyatürleşme çağında bütün bu gereksinimlerden dolayı mikro işleme, imalatın en popüler araştırma konularından biri haline gelmiştir Mikro mekanik işleme yöntemi, iş

parçalarını yüksek hızda ve yüksek hassasiyette üretmeyi mümkün kılmaktadır. Minyatür sistemler, kolay taşınabilme ve kullanılabilme, düşük malzeme ve güç tüketimi, küçük numune gereksinimleri, yüksek ısı transferi ve daha iyi süreç entegrasyonu ve otomasyonu sağlayabilmektedir. Mikro mekanik işleme, dünya genelinde hızla büyüyen bir endüstridir. Bu endüstri sayesinde kaynak ve zaman kullanımında yüksek verim elde edilebilmektedir. Verimi artırmada takım geometrisinin doğru seçilmesi çok önemli bir etkidir. Takım geometrisindeki kenar radyüsü farklılıklarının iş parçası üzerinde hangi etkilere yol açtığına bilinmesi, operatörü doğru takım seçimine yönlendireceği gibi, deneme-yanılma yöntemini minimize ederek iş parçası ve zamandan tasarruf sağlayıp verimi artıracaktır.

Mikro tornalama, geleneksel tornalama işleminin mikro seviyede ölçeklendirilmiş şeklidir. Bu ölçeklendirmeden kaynaklı fiziksel değişimler talaş kaldırma mekanizmasında bazı farklılıklara sebep olmaktadır. Genel olarak talaş kaldırma prensibi aynı olsa da boyut küçüldükçe kesme kuvvetlerinin birbirleri arasındaki oran değişmektedir. Özellikle mikro boyutlara inildiğinde F_f/F_c oranı artmaktadır [1]. Mikro tornalama işleminde kesme kuvvetlerinin tahmini için en çok kullanılan yöntem nümerik modellemedir. Sonlu elemanlar metodu kullanılarak yapılan çözümlerlerde, malzeme modeli oldukça önem arz etmektedir. Kesme kuvvetlerini tahmin etmek için kullanılan diğer bir yöntem ise mekanistik modellemedir. Mekanistik modellemenin temeli, kesme kuvvetlerinin talaşın kesit alanıyla doğru orantılı olduğu prensibine dayanır [2]. Bu orantıyı sayısal olarak ifade etmek için özgül kesme kuvveti katsayısı (k_s) kullanılır. Özgül kesme kuvveti, iş parçası takım çiftine, talaş kesitine, takım aşınmasına ve kesme koşullarına bağlı olarak değişkenlik gösterebilmektedir. Bu nedenle kesme kuvvetlerini doğru bir şekilde tahmin edebilmek için, doğrudan kesme deneyleri yaparak, kesme kuvveti katsayılarını elde etmek en güvenilir yöntemdir. Geleneksel tornalama işlemlerinde mekanistik modelleme tekniği çokça kullanılmış ve bir çok çalışmaya da konu olmuştur. Yakın zamanda mikro tornalama işleminde kesme kuvvetlerini tahmin etmeye yönelik yapılan bir çalışmada [3] Ti6Al4V alaşımı kullanılmış ve kesici takımın burun radyüsü dikkate alınmıştır. Benzer bir çalışmada CoCrMo alaşımı için gerçekleştirilmiştir [4]. Bu çalışmada kesme kuvveti katsayıları elde edilerek kesme kuvvetleri tahmin edilmeye çalışılmıştır.

Bu çalışmada, AISI 304 paslanmaz çeliğinin mikro şartlarda kesilmesi sırasında meydana gelen kesme kuvvetlerini tahmin etmeye yönelik mekanistik model yaklaşımı kullanılmıştır. AISI 304 paslanmaz çelik için ortogonal şartlarda mikro tornalama deneyleri gerçekleştirilmiştir. Oluşturulan mekanistik modelin doğrulamasını yapmak adına rastgele seçilmiş kesme hızı ve ilerleme değerlerinde kesme testleri yapılmıştır.

2 Materyal ve Metot

2.1 Mekanistik Modelleme

Ortogonal kesme işleminde ilerleme değeri (f), talaş kalınlığına (h) eşittir. Böylece belirli bir duvar kalınlığına sahip boru şeklindeki bir iş parçasının ortogonal şartlarda tornalandığı göz önüne alınacak olursa, talaş kesiti, Denklem 1 ile hesaplanır.

$$A = S \cdot h \quad (1)$$

$$h = f \cdot \sin\kappa \quad (2)$$

$$S = \frac{a_p}{\sin\kappa} \quad (3)$$

Denklem 1 ve 3 te verilen S ifadesi kesme genişliğine karşılık gelmektedir. Ortogonal kesme işleminde kesme genişliği, talaş genişliği olan a_p 'ye eşittir. Şekil 1a'da boru bir iş parçası kullanılarak yapılan ortogonal kesme işleminin şematik ifadesi ve Şekil 1b'de ise yanaşma açısının 90° 'den küçük olması durumunda ilerleme (F_f), radyal (F_r) ve teğetsel (F_t) kuvvet bileşenlerinin referans koordinat sistemi

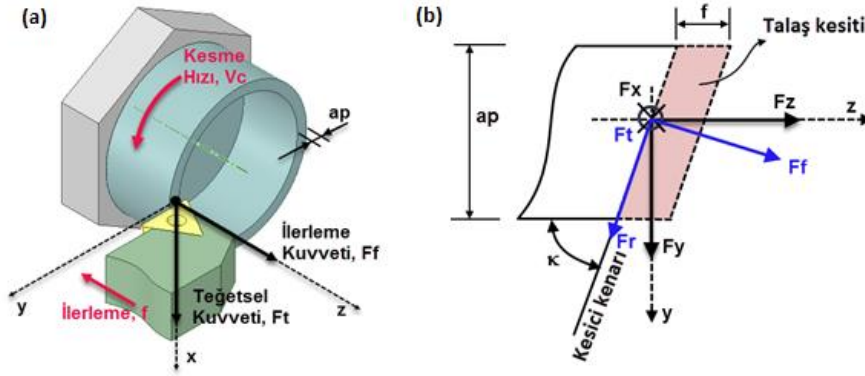
arasındaki ilişki verilmektedir. Eksenel, radyal ve teğetsel kesme kuvveti bileşenleri talaş kesiti ve kesme genişliğine bağlı olarak aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır [6].

$$F_t = K_{tc}A + K_{te}S = K_{tc}a_p f + K_{te} \frac{a_p}{\sin\kappa}$$

$$F_f = K_{fc}A + K_{fe}S = K_{fc}a_p f + K_{fe} \frac{a_p}{\sin\kappa} \quad (4)$$

$$F_r = K_{rc}A + K_{re}S = K_{rc}a_p f + K_{re} \frac{a_p}{\sin\kappa}$$

F_x , F_y ve F_z dinamometre tarafından kaydedilen kuvvet bileşenlerini ifade etmektedir. Her iki sistem arasındaki dönüşüm Denklem 5 ile sağlanır. Ayrıca Denklem 4'ü Denklem 5'de yerine yazılacak olursa Denklem 6 elde edilmiş olur.



Şekil 1: a) Ortogonal kesme işleminin şematik ifadesi, b)Yanaşma açısının 90° den farklı olması durumunda kuvvet bileşenleri arasındaki ilişki.

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \sin\kappa & \cos\kappa \\ 0 & -\cos\kappa & \sin\kappa \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_t \\ F_r \\ F_f \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$F_x = K_{te} \cdot \frac{a_p}{\sin\kappa} + K_{tc} \cdot a_p f$$

$$F_y = (K_{fe} \cos\kappa + K_{re} \sin\kappa) \cdot \frac{a_p}{\sin\kappa} + (K_{fc} \cos\kappa + K_{rc} \sin\kappa) \cdot a_p f \quad (6)$$

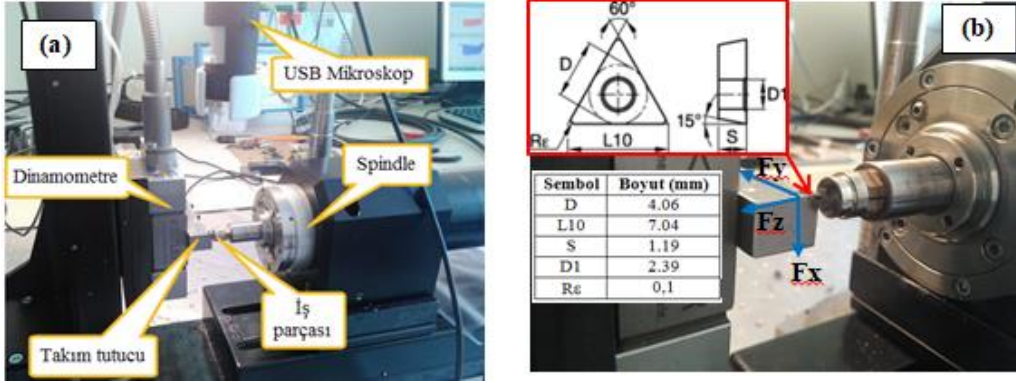
$$F_z = (K_{fe} \sin\kappa - K_{re} \cos\kappa) \cdot \frac{a_p}{\sin\kappa} + (K_{fc} \sin\kappa - K_{rc} \cos\kappa) \cdot a_p f$$

Denklem 6'da verilen K_{fe} , K_{re} ve K_{te} kenar kuvveti katsayılarını K_{fc} , K_{rc} , ve K_{tc} ise kesme kuvveti katsayılarını ifade etmektedir. Bu katsayılar farklı ilerleme değerleri için yapılan ortogonal kesme testlerinde elde edilmektedir. Fakat ortogonal kesme işleminde yanaşma açısı $\kappa=90^\circ$ olduğundan K_{re} ve K_{rc} değerleri çok küçüktür ve bazen de sıfır kabul edilir.

2.2 Deney Düzenegi ve Kesme Koşulları

Bu çalışmada, özellikle biyomedikal sektöründe sıklıkla kullanılan AISI 304 paslanmaz çeliği, iş parçası olarak seçilmiştir. Ortogonal kesme şartlarını sağlamak adına 6 mm çapında ve 0,4 mm duvar kalınlığına sahip dikişsiz boru malzeme olarak tedarik edilmiştir. Mikro işleme için tasarlanmış olan bir deney düzenegi (Şekil 2a) kullanılarak kesme testleri gerçekleştirilmiştir. Kesme deneylerinde Kennametal firmasından tedarik edilen, TDHB07T12S0 kodlu PVD yöntemi ile AlTiN kaplanmış kesici takım kullanılmıştır (Şekil 2b). Kesme kuvvetlerini ölçmek amacıyla Kistler marka mini dinamometre (Kistler-9119AA1) kullanılmış

ve takım tutucu dört farklı noktadan dinamometreye sabitlenmiştir. Kesme esnasında takımda meydana gelen aşınma ve talaş yapışmasının sonuçları etkilememesi adına kesme testleri her defasında kesici takımın farklı bir kenarından yapılmıştır. Kesici takımın kenar yarıçapı $7,25 \mu\text{m}$ olarak ölçülmüştür.



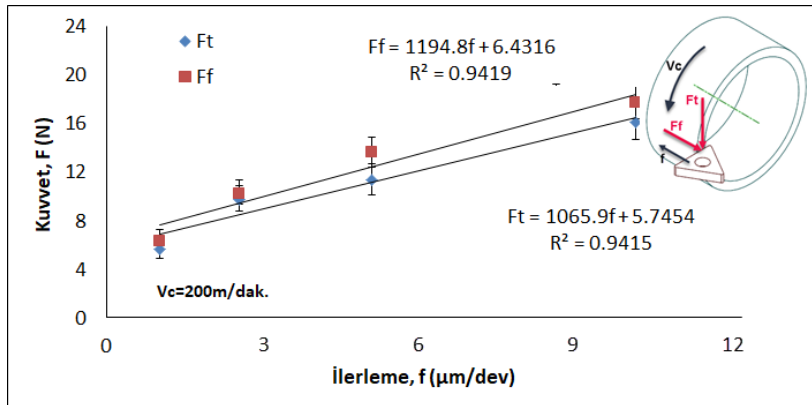
Şekil 2: Ortogonal kesme deneylerinde kullanılan deney düzeneği (a) ve kesici takım (b).

Kesme deneylerinde kesme kuvveti ve ilerleme kuvveti katsayılarını elde etmek adına dört farklı ilerleme değeri (1, 2,5, 5 ve 10 $\mu\text{m}/\text{dev}$) kullanılmıştır. Ayrıca kuvvet katsayılarının kesme hızı ile değişimini elde etmek için ise üç farklı kesme hızı (200, 300 ve 400 m/dak) değeri kullanılmıştır. Deneyler sırasında numuneye ait duvar kalınlığı küçük olduğundan, kesme sıcaklığı hızla artmaktadır. Bunu önlemek adına yaklaşık 2 bar basınca sahip CO_2 gazı kullanılarak numune yüzeyi soğutulmuştur. Bu işlem tüm kesme testlerinde uygulanmıştır.

3 Sonuçlar ve Tartışma

3.1 Kesme Kuvvetlerinin Değişimi

Ortogonal kesme işlemi sonrasında kesici takıma etki eden iki kuvvet bileşeni vardır. Bunlar; teğetsel kesme kuvveti (F_t) ve ilerleme kuvveti (F_f) tir. Radyal/pasif kesme kuvveti çok küçük olduğundan dikkate alınmaz. Çalışmada kullanılan takımın yanaşma açısı 90° olduğundan, Denklem 5'e göre, $F_z = F_f$ ve $F_x = F_t$ olacaktır. Her bir kesme deneyi sonrasında dinamometreden elde edilen bu iki kuvvetin ilerleme değeri ile değişimi elde edilmiştir (Şekil 3). Her iki kuvvet de artan ilerleme değeriyle lineer olarak arttığı görülmektedir. Oluşturulan doğrusal denklemin R^2 hatalarının da kabul edilebilir seviyede olduğu söylenebilir. İlerleme kuvvetinin teğetsel kuvvetten büyük olmasının nedeni; çalışmada kullanılan ilerleme değerlerinin yüksek seçilmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Tablo 1'de ise elde edilen kesme kuvveti ve kenar kuvveti katsayıları verilmektedir.



Şekil 3: Farklı ilerleme değerleri için teğetsel ve ilerleme kuvvetlerinin değişimi.

Ortogonal kesme işleminde kesme kuvveti katsayısı, K_c , iki farklı bileşene ayrılır. Bunlar K_{tc} :Teğetsel kesme kuvveti katsayısı, K_{fc} : İlerleme kuvveti katsayısı olmak üzere. K_c , talaş oluşumu sırasında kayma bölgesindeki plastik deformasyonu kapsamaktadır. K_e ise kenar kuvveti katsayısı olarak isimlendirilir ve takım ile talaş ve iş parçası yüzeyi arasındaki sürtünme, kazınma ve talaş deformasyonunu kapsamaktadır [5]. Tablo 1’de artan kesme hızına bağlı olarak hem kesme kuvveti, hem de kenar kuvveti katsayılarının azaldığı görülmektedir. Ayrıca Şekil 4’de kesme ve kenar kuvveti katsayılarının kesme hızıyla ilişki verilmektedir. Kesme hızı ile olan ilişki doğrusal bir denklemle ilişkilendirilmiş ve R^2 hatasının da kabul edilebilir bir seviyede olduğu tespit edilmiştir.

Tablo 1: $V_c=200$ m/dak için teğetsel ve ilerleme kuvveti katsayıları.

Kesme Hızı	Teğetsel Kesme Kuvveti Katsayıları		İlerleme Kuvveti Katsayıları	
	K_{tc} (N/mm ²)	K_{te} (N/mm)	K_{fc} (N/mm ²)	K_{fe} (N/mm)
200m/dak	2664,75	14,36	2987	16,08
300m/dak	2543.75	11,08	2406.55	15.30
400m/dak	2290.80	10.32	2163.72	14.40

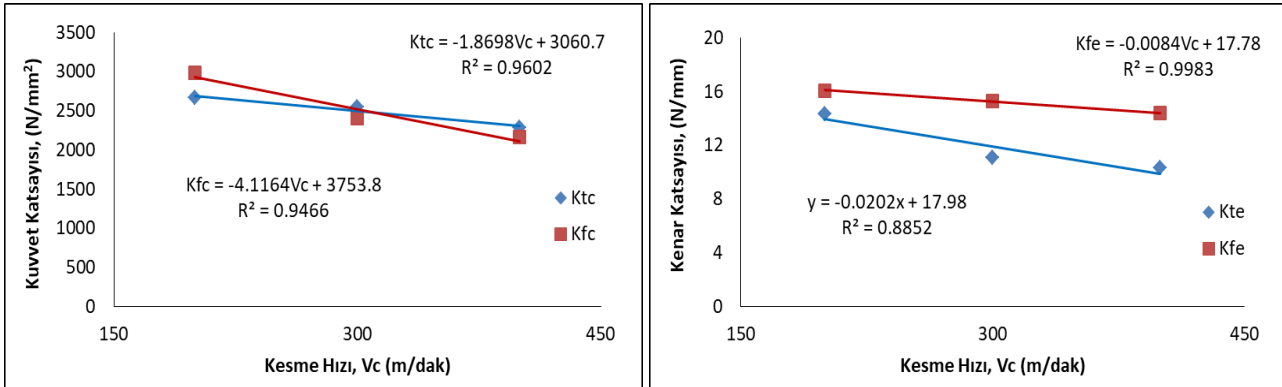
Şekil 4 de verilen K_{tc} , K_{fc} , K_{te} ve K_{fe} denklemleri kesme hızına bağlıdır. Bu katsayıların karşılığı olan ifade Denklem 6 da yerine yazılacak olursa mikro tornalama esnasında meydana gelen kesme kuvvetleri kesme hızına, talaş kesitine ve yanaşma açısına bağlı olarak elde edilmiş olacaktır (Denklem 7).

$$F_x = (-0,0202V_c + 17,98) \cdot \frac{a_p}{\sin\kappa} + (-1,8698 \cdot V_c + 3060,7) \cdot a_p f$$

$$F_y = ((-0,0084V_c + 17,78)\cos\kappa + K_{re}\sin\kappa) \cdot \frac{a_p}{\sin\kappa} + ((-4,1164 \cdot V_c + 3753,8)\cos\kappa + K_{rc}\sin\kappa) \cdot a_p f \quad (7)$$

$$F_z = ((-0,0084V_c + 17,78)\sin\kappa - K_{re}\cos\kappa) \cdot \frac{a_p}{\sin\kappa} + ((-4,1164 \cdot V_c + 3753,8)\sin\kappa - K_{rc}\cos\kappa) \cdot a_p f$$

Denklem 7 ile elde edilen kesme kuvvetleri dinamometreden elde edilen kesme kuvvetleri ile aynı koordinat sistemine sahip olup kıyaslanabilir durumdadır. Ortogonal kesme işleminde $\kappa=90^\circ$ olduğundan, Denklem 7’de yerine yazılır ve radyal kuvvet katsayıları da sıfır olduğundan F_y kuvveti sıfır olacaktır.



Şekil 4: Kesme ve kenar kuvveti katsayılarının kesme hızı ile değişimi.

3.2 Mekanistik Modelin Doğrulaması

Bölüm 2.1’de oluşturulan mekanistik modele, kesme hızının da etkisi de dahil edilmek suretiyle son şekli verilmiştir. Çalışmanın bu bölümünde modelin oluşturulmasında kullanılan kesme hızı ve ilerleme değerlerinin dışındaki değerler kullanılarak, modelin doğrulaması yapılmıştır. Doğrulama deneyi için kullanılan kesme parametreleri ve elde edilen kesme kuvveti sonuçları ile birlikte modelden elde edilen sonuçlar Tablo 2’de verilmektedir. Tablodan da görüldüğü üzere maksimum hata miktarı %15 ler civarındadır ve bu kabul edilebilir bir seviyedir. Bazı deney koşullarında, hata miktarının artması, hem Şekil

3 hem de Şekil 4’de oluşturulan modelde meydana gelen R^2 hata miktarlarının Denklem 7’de birleşmesi sonucunda ortaya çıkmaktadır.

Tablo 2: Mekanistik modelin doğrulaması adına yapılan kesme testleri ve hata miktarları.

Kesme Parametreleri	Fx (N)			Fz (N)		
	Deney	Model	Hata	Deney	Model	Hata
Vc=150m/dak, f=1,25µm/dev	6,73	7,5	%11,1	7,69	8,17	%6,2
Vc=250m/dak f=3µm/dev	8,55	8,41	%1,8	10,36	9,54	%8
Vc=450m/dak f=4µm/dev	7,07	7,24	%2,4	9,32	8,64	%7,3
Vc=550m/dak f=8µm/dev	10,95	9,38	%14,4	11,8	10,03	%15

4 Sonuç

Bu çalışmada, mikro ortogonal kesme şartlarında, meydana gelen kesme kuvvetlerinin mekanistik modellemesi gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla duvar kalınlığı 0,4 mm ve 6 mm çapında boru 304 paslanmaz çelik malzeme ve kaplanmış karbür takım kullanılmıştır. Çalışma sonunda elde edilen sonuçları aşağıdaki gibi sıralamak mümkündür.

- Artan ilerleme değeri ile kesme kuvvetlerinin artışı da lineer bir davranış sergilemiş ve hem F_t hem de F_f kuvvetleri oldukça düşük bir R^2 hatasıyla tahmin elde edilmiştir.
- Kesme kuvveti ve kenar kuvveti katsayıları, kesme hızının artmasıyla, düşük bir eğimle de olsa, azalmaktadır. Bu azalma bütün katsayılarda lineer olarak gerçekleşmiştir.
- Standart mekanistik modele kesme ve kenar kuvveti katsayılarının kesme hızı ile olan ilişkisi dahil edilmiş ve elde edilen model kabul edilebilir bir hata ile kesme kuvvetlerini tahmin edebilmektedir.
- Farklı yavaşma açılarına sahip kesici takımlar da kullanılmak suretiyle modelin doğrulaması ayrıca yapılmalıdır.

5 Kaynaklar

- [1] Furukawa, Y., Moronuki, N., 1988, “Effect of material properties on ultra precise cutting processes”, CIRP Annals - Manufacturing Technology, 37(1), pp. 113-116.
- [2] Altintas, Y., 2000, Manufacturing Automation, Cambridge University Press.
- [3] Jagadesh, T., Samuel, G.L., 2015, “Mechanistic and Finite Element Model for Prediction of Cutting Forces During Micro-Turning of Titanium Alloy”, Machining Science and Technology, 19:4, 593-629.
- [4] Ahearn, E., Baron, S., 2017, “Fundamental mechanisms in orthogonal cutting of medical grade cobalt chromium alloy (ASTM F75)”, CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 19, 1-6.
- [5] Gonzalo, O., Beristain, J., Jauregi, H., Sanz, C., 2010, “A method for the identification of the specific force coefficients for mechanistic milling simulation”, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 50(9): 765-774.
- [6] Fernández-Abia, A. I., Barreiro, J., López de Lacalle, L.N., Urbicain, G., “A Mechanistic Model for High Speed Turning of Austenitic Stainless Steels” Advanced Materials Research Vol. 498 (2012) pp 1-6.