

MİKRO FREZELEME İÇİN MEKANİSTİK KUVVET MODELİ

Ali MAMEDOV¹, İsmail LAZOĞLU²

¹ amamedov@ku.edu.tr Koç Üniversitesi, Üretim ve Otomasyon Araştırma Merkezi, Makine Mühendisliği Bölümü, Rumeli Feneri Yolu, Sarıyer, İstanbul 34450

² ilazoglu@ku.edu.tr Koç Üniversitesi, Üretim ve Otomasyon Araştırma Merkezi, Makine Mühendisliği Bölümü, Rumeli Feneri Yolu, Sarıyer, İstanbul 34450

ÖZET

Kesme kuvvetlerinin incelenmesi, kesme sürecinin mekanik ve dinamiğinin incelenmesi açısından önem teşkil etmektedir. Bu çalışmanın önemi; kesme kuvvetlerinin, takım aşınması ve nihai parça kalitesi üzerindeki belirgin etkisinin ortaya konulmasıdır. Sunulan kuvvet modeli, takımın dönerek ilerleme hareketi esnasında, takım ucunun yörüngesini dikkate alarak talaş kalınlığının hesaplamasının yanı sıra, kuvvetin kazıma bileşenini de elastik toparlanmaya ve iş parçası ile takımın etkileşim hacmine dayalı olarak hesaplamaktadır. Model, çok sayıda farklı kesme şartlarında mikro frezeleme deneyleri ile doğrulanmıştır.

Anahtar Sözcükler: Mikro Frezeleme, Kuvvet Modeli, Mekanistik model, Alüminyum 7050

ABSTRACT

The analysis of cutting forces plays an important role for investigation of mechanics and dynamics of cutting process. The importance of force analysis is due to its major role in tool wear and surface quality of machined parts. Presented force model calculates chip thickness by considering trajectory of the tool tip while tool rotates and moves ahead continuously, it also takes ploughing force component into consideration relating it to elastic recovery based on interference volume between tool and workpiece. The model is validated through micro end milling experiments for a wide range of cutting conditions.

Keywords: Micro End Milling, Force Model, Mechanistic Model, Aluminum 7050

1. GİRİŞ

Mikro işleme prosesi, çok geniş yelpazesi olan mühendislik malzemelerin işlenmesinde, karmaşık geometriye sahip birkaç mikron boyutlarındaki üç boyutlu minyatür parçaların dar toleranslarla ve yüksek hassasiyetle üretilmesi için kullanılan öncü bir yöntemdir. Chae J.[1] ve arkadaşlarının yaptığı araştırmaya göre, mikro boyutlarda işleme için diğer işleme yöntemleriyle karşılaştırıldığında mikro frezeleme, verimliliği ve proses esnekliği daha yüksek olan bir yöntemdir. Ancak makro işleme ile mikro işleme arasında kesici takımın küçük ölçekli olmasından kaynaklanan belirgin farklar mevcuttur. Makro işlemede etkisi dikkate alınmayacak kadar küçük olan kazıma/sürtünme(plowing/rubbing) mekanizması, mikro işlemede önem kazanmakta ve oluşan kuvvetler üzerinde dikkate değer artış oluşturmaktadır. Bu yüzden mikro işleme sırasında oluşan kuvvetlerin öngörülmesi, son ürün kalitesinin artırılması açısından büyük önem taşımakta ve dünya genelinde güncel ve önemli bir araştırma konusu haline

gelmektedir. Bu konuda ilk araştırmalardan biri, Vogler ve arkadaşları [2] tarafından yapılmıştır. Buna ek olarak Waldorf ve arkadaşları [3] tarafından mikro frezeleme kuvvetlerinin öngörülmesinde kullanılan kayma-düzlemi plastisite modeli geliştirilmiştir. Waldorf'un çalışmalarını temel alarak June [4], Fang ve arkadaşları [5] tarafından elastik toparlanmayı (elastic recovery) daha kapsamlı olarak ele alan plastisite modelleri geliştirilmiştir. Birçok araştırmacı sonlu elemanlar yöntemini kullanarak mikro işleme sırasında oluşan kuvvetleri öngörmeyi amaçlamışlardır. Kim [6] ve Özel [7], kesme işlemi esnasında oluşan gerilmeleri, Reck ve arkadaşları [8] kesme ağız yarıçapının takım aşınması üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Yalnız, sonlu elemanlar yönteminde hazırlanan çalışmalar çok sayıda varsayım yapılarak geliştirildiği için bu çalışmaların sonucunda doğru sonuçlar elde etmenin zor olduğu ve yapılan varsayımlara göre sonuçların değişkenlik gösterdiği görülmüştür.

Dünyada yapılan çalışmalar incelendiğinde kesme sırasında oluşan kuvvetlerin öngörülmesinde mekanistik modeller en etkili modellerdir. Geliştirilen sadece birkaç model olmakla birlikte bu modellerin bazı eksik yanları bulunmaktadır. Buna örnek olarak Zaman [9] ve Bao [10] tarafından geliştirilen modellerde minimum talaş kalınlığının ve kesme ağız yarıçapının etkisi dikkate alınmamaktadır.

Bahsi geçen etkenleri dikkate alarak sunduğumuz kuvvet modeli, mikro işleme esnasında etkin olan her iki kesme mekanizmasını, kesme ağız yarıçapının etkisini, kazıma sonrasında oluşan elastik toparlanmayı dikkate almaktadır.

2. SÜREÇ KİNEMATİĞİ VE ANLIK TALAŞ KALINLIĞI

Geliştirilen mekanistik kuvvet modeli mikro frezeleme esnasında etkin olan kesme ve kazıma mekanizmalarını dikkate alarak, istenilen kesme şartlarında oluşan kuvvetleri öngörebilmektedir.

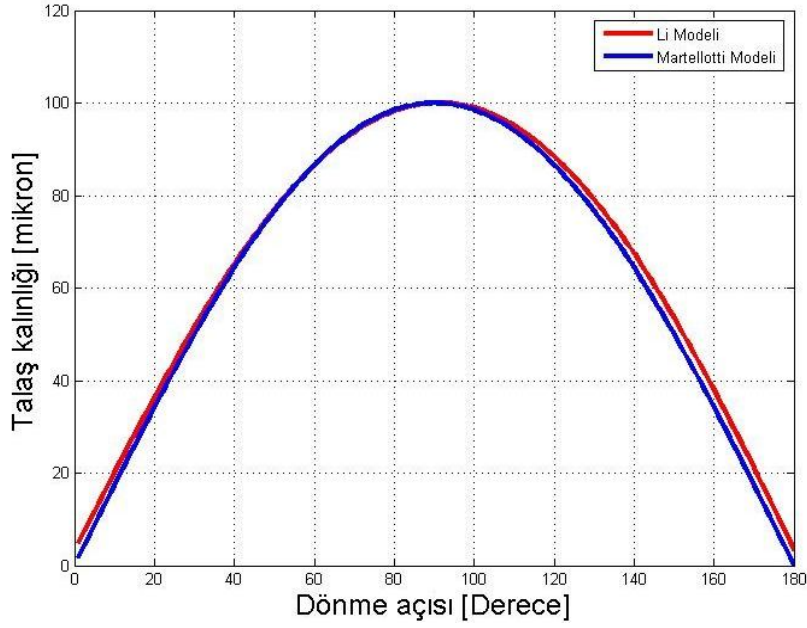
Modelde mikro frezeleme esnasında oluşan ve son derece önemli olan talaş kalınlığı etkisi dikkate alınmıştır. Li ve arkadaşlarının [11] sunduğu çalışmada da belirtildiği üzere kesme esnasında oluşan talaş kalınlığı, Martelloti denklemi ile temsil edilen, konvansiyonel kesme esnasında oluşan talaş kalınlığından farklılık göstermektedir. Li ve arkadaşlarının yayınladığı makalede önerilen talaş kalınlığı formülasyonu (1) ile konvansiyonel Martelloti formülasyonu (2) arasındaki fark karşılaştırmalı olarak şekil-1'de gösterilmiştir.

$$t_c = R * \left[1 - \sqrt{1 - \frac{2t_x \sin \theta}{R + \frac{Nt_x}{2\pi} \cos \theta} - \frac{t_x^2 \cos(2\theta)}{(R + \frac{Nt_x}{2\pi} \cos \theta)^2} - \frac{t_x^3 \sin \theta \cos^2 \theta}{(R + \frac{Nt_x}{2\pi} \cos \theta)^3}} \right] \quad (1)$$

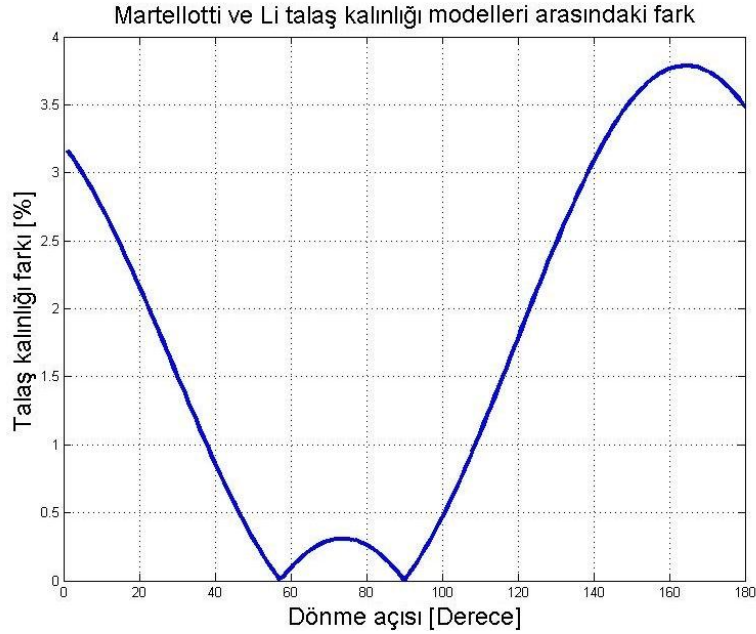
$$t_c = t_x \sin \theta \quad (2)$$

Burada;

- t_c : Talaş kalınlığı (mm)
- t_x : Diş başına ilerleme (mm/dev-diş)
- R : Takım yarıçapı (mm)
- N : Kesici ağız sayısı
- θ : Takımın anlık açıl pozisyonu



Şekil 1. Martellotti ile Li talaş kalınlıklarının karşılaştırılması (grafik iki ağızlı takım için $t_x=100\mu\text{m}/\text{dev}$ -diş ilerleme hızı için çizildi)



Şekil 2. Martellotti ile Li modelleri arasındaki fark

Mikro işlemede kesme derinliğinin küçük olmasından dolayı oluşan talaş kalınlığı, kesici ağız yarıçapıyla birbirine yakın boyutlardadır. Bundan dolayı talaş kalınlığı, minimum talaş kalınlığından düşük olduğu zaman kesme oluşmamakta ve takım iş parçasına sürtünerek onu plastik deformasyona uğratmaktadır. Oluşan deformasyonun elastik kısmı geri esnemekte, yalnız büyük bir kısmı da plastik olmakla birlikte kalıcı deformasyonu oluşturmaktadır. Oluşan elastik geri esnemenin de kuvvetler üzerinde etkisi olacağı düşünülmekte ve denklem (3) ile temsil edilen geri esneme modele eklenmiştir. Denklem 3'te gösterildiği gibi geri esneme miktarı, malzemenin özelliği olan elastik toparlanma oranı ile anlık talaş kalınlığının çarpımıdır.

$$h_{er} = p_e * h \quad [13] \quad (3)$$

Burada;

- h_e : Elastik geri esneme miktarı (mm)
 p_e : Elastik toparlanma oranı
 h : Anlık talaş kalınlığı (mm)

Geliştirilen modelin mekanistik olması sebebiyle kesme kuvvetlerin öngörülmesi için ihtiyaç duyulan ilk veri, malzemeye ve takıma özgü olan kesme katsayılarıdır. Bu katsayıların elde edilmesi mekanistik kalibrasyonla mümkündür [12]. Kesme hızı ve kesme derinliği sabit tutularak farklı ilerleme hızlarında kesme kuvvetleri ölçüldüğünde, kuvvetlerin artan ilerleme hızıyla doğrusal bir artış gösterdiği bilinmektedir. Belirli ölçü aralığında bütün ilerleme değerleri için ortalama kuvvetler ölçülerek, oluşan doğrunun denkleminden (4) kesme katsayıları hesaplanmaktadır. Bu katsayıların analitik hesaplanması aşağıdaki formüllerle mümkündür.

$$\bar{F}_q = \bar{F}_{qc} + \bar{F}_{qe} \quad (q=x,y) \quad (4)$$

$$K_{tc} = \frac{4\bar{F}_{yc}}{Na} \quad (5)$$

$$K_{te} = \frac{\pi\bar{F}_{ye}}{Na} \quad (6)$$

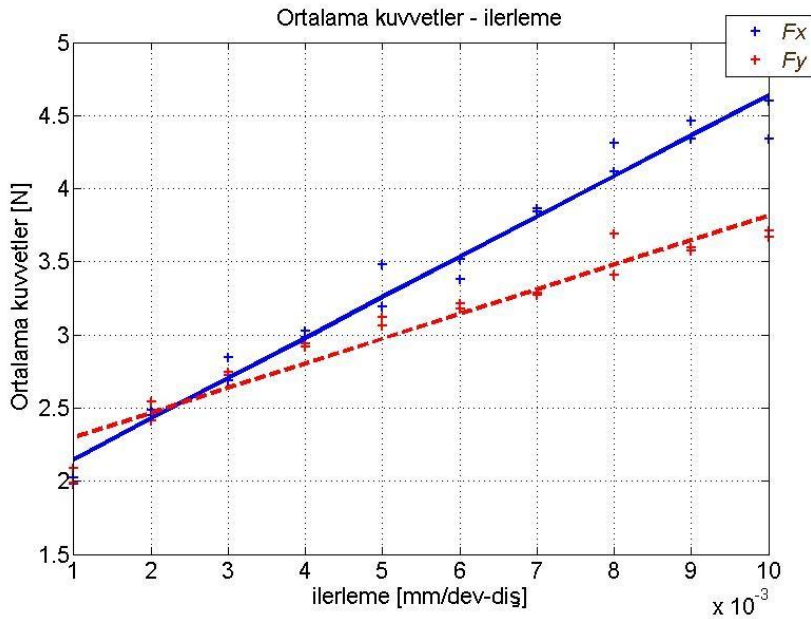
$$K_{rc} = \frac{-4\bar{F}_{xc}}{Na} \quad (7)$$

$$K_{re} = \frac{-\pi\bar{F}_{xe}}{Na} \quad (8)$$

Burada;

- a : Kesme derinliği (mm)
 N : Kesici ağız sayısı
 $\bar{F}_{xc}, \bar{F}_{yc}$: x, y ortalama kuvvetlerinin bileşenleri [12]
 $\bar{F}_{xe}, \bar{F}_{ye}$

Mekanistik kalibrasyon yapılarak hesaplanan kesme katsayıları tablo-1'de verilmiştir.



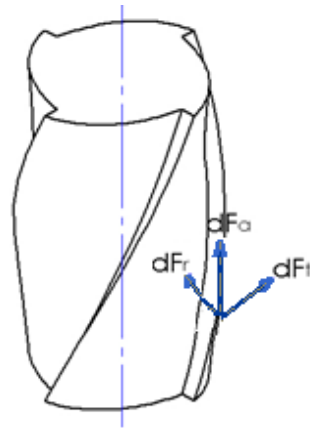
Şekil 3. Ortalama Fx ve Fy kuvvetleri – ilerleme grafiği

Tablo 1. Al7050 malzemesi ve $\phi=1,5$ mm Tungsten Karbür takım için kesme katsayıları

K_{rc} [N/mm ²]	K_{re} [N/mm]	K_{rc} [N/mm ²]	K_{re} [N/mm]
1687.20	16.72	2765.20	14.72

Yeterli sayıda kesme kuvvetleri ölçümlerinden elde edilen kesme katsayıları diğer kesme parametreleriyle birlikte geliştirilen modele giriş parametresi olarak girilir. Giriş parametreleri verildikten sonra model denklem (9)'da verilen formülasyonu kullanarak kesme kuvvetlerini şekil-4'te gösterildiği gibi diferansiyel şekilde hesaplar. Diferansiyel kuvvetlerin toplamı alınarak kesme sırasında oluşan F_x , F_y ve toplam bileşke kuvvetler hesaplanır.

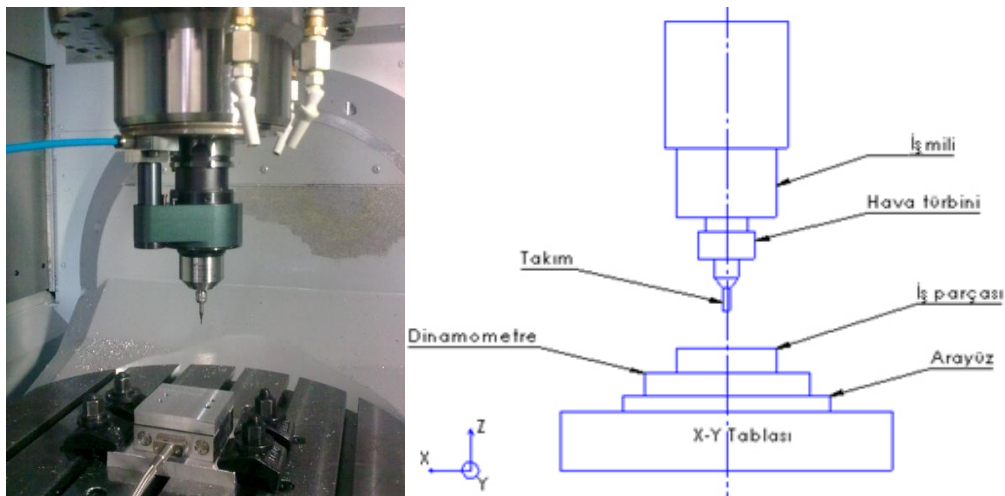
$$\begin{bmatrix} dF_x \\ dF_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\phi & \sin\phi \\ -\sin\phi & \cos\phi \end{bmatrix} * \left(\begin{bmatrix} K_{rc}h(\theta)a \\ K_{rc}h(\theta)a \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{re}a \\ K_{re}a \end{bmatrix} \right) \quad (9)$$



Şekil 4. Kesme esnasında oluşan diferansiyel kuvvetler[12]

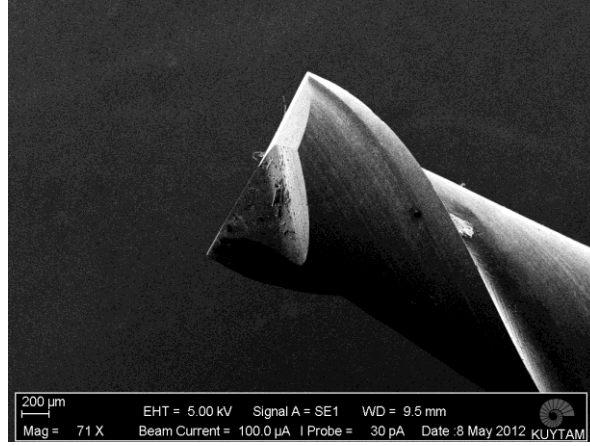
2.1 Deney Düzeneği ve Model Doğrulaması

Yapılan deneyler uçak ve uzay sanayisinde çok yaygın kullanılan bir mühendislik malzemesi olan Al7050 kullanılarak yapılmıştır. Kesme 1,5 mm'lik kaplamasız Tungsten karbür(WC) kesici takımını kullanarak, Nikken hava türbiniyle donatılmış Mori Seiki NMV5000DCG CNC tezgâhında yapılmıştır. Kuvvet ölçümleri masa tipi Kistler dinamometre kullanılarak yapılmıştır.

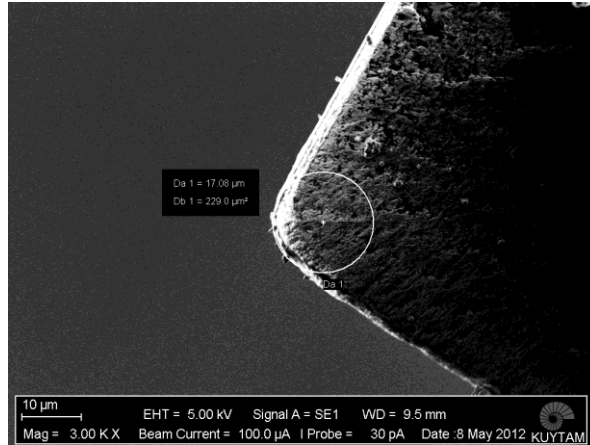


Şekil 5. a) Deney düzeneği, b) şematik gösterimi

Şekil-6'da gösterilen 1,5 mm çapında Tungsten Karbür takımının helis açısı 30^0 olup, kesme esnasında kesme dinamiğini etkilememesi için tutucu dışında kalan takım boyu 15mm olarak sabit tutulmuştur. Şekil-7'de görüldüğü gibi Tarama Elektron Mikroskobu kullanılarak takım kesici ucu yarıçapı $17 \mu\text{m}$ olarak ölçülmüştür. Tablo-2'de yapılan mikro kesme işlemiyle ilgili takım ve malzeme parametreleri verilmiştir.



Şekil 6. Freze takımının SEM görüntüsü



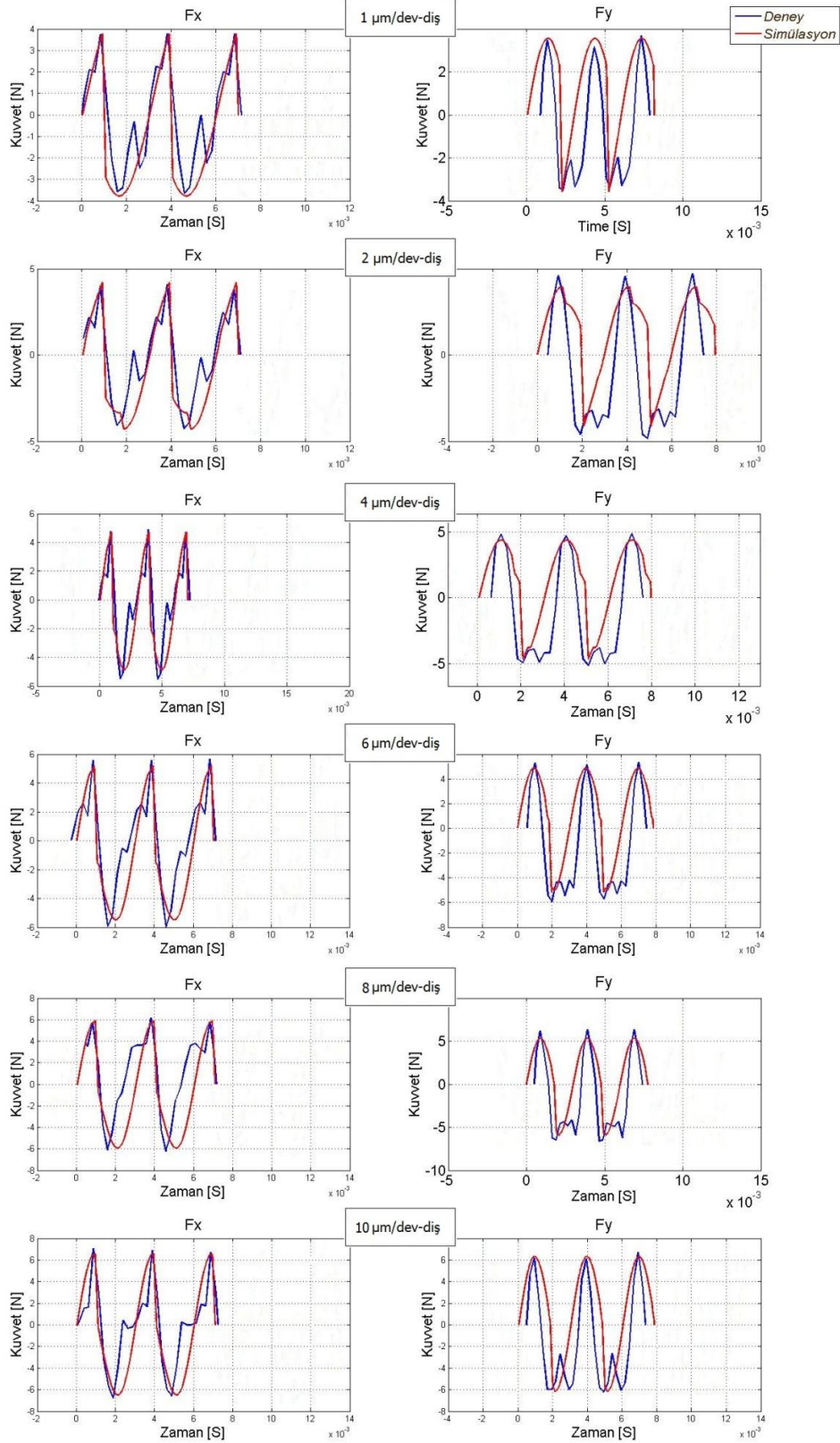
Şekil 7. Takımın kesici ucu yarıçapı

Tablo 2. Deneyde kullanılan takım ve kesme parametreleri [14]

Takım çapı	1,5 mm
Helis açısı	30^0
Kesici ağız köşe yarıçapı	$17 \mu\text{m}$
Kesme derinliği	$200 \mu\text{m}$
Al 7050 yoğunluğu (ρ)	$2,83 \text{ gr/cm}^3$
Al 7050 Elastisite modülü (E)	$71,7 \text{ GPa}$
Al 7050 akma gerilmesi	490 MPa
Elastik toparlanma oranı (p_e)	0,1

Deneyler 20.000 dev/dak. iş mili hızında, $200 \mu\text{m}$ kesme derinliğinde farklı ilerleme hızlarında tam dalma ('slot milling') olarak yapılmıştır. Kesme kuvvetlerin etkisinde masa tipi dinamometrede oluşan piezo-elektrik şarj, voltaj yükselticine aktarılarak, voltaj değerleri belirli

katsayı ile yükseltilir ve veri toplama kartıyla bilgisayara aktarılır. CutPro yazılımı kullanılarak kuvvet verileri toplanır ve modelde öngörülen kuvvetlerle karşılaştırılır. Kuvvetler üst-üste koyulup karşılaştırıldığı zaman şekil-8'de görüldüğü gibi simülasyon sonuçlarıyla deney sonuçlarının kabul edilebilir derecede örtüştüğü gözlenmiştir.



Şekil 8. Deney ve simülasyon kuvvet grafikleri

3. SONUÇ VE TARTIŞMA

Bu makalede mikro frezeleme için mekanistik kuvvet modeli sunulmuştur. Mikro frezeleme işleminde kesme kuvvetlerinin doğru tespit edilmesi, onlara bağlı olan takım aşınması, yüzey kalitesi ve nihai parça hassasiyeti gibi faktörlerin belirlenmesi açısından önemlidir. Sunulan kuvvet modelinin doğruluğu çeşitli kesme koşullarında ispatlanarak, mikro boyutlarda frezeleme işlemi için konvansiyonel kuvvet modelinden daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür.

TEŞEKKÜR

Yazarlar TÜBİTAK'a MAG 110M697 nolu projedeki finansal desteği, ve DPT destekli Koç Üniversitesi Yüzey Teknolojileri Uygulama ve Araştırma Merkezi'ne Taramalı Elektron Mikroskobu görüntüleri için teşekkürlerini sunarlar.

4. KAYNAKÇA

- [1] CHAE, J., PARK, S. S., and FREIHEIT, T., 2006, "Investigation of Micro-Cutting Operations," Int. J. Mach. Tools Manuf., 46(3-4), pp. 313–332.
- [2] VOGLER, M. P., KAPOOR, S. G., and DEVOR, R. E., 2004, "On the Modeling and Analysis of Machining Performance in Micro-Endmilling, Part II: Cutting Force Prediction," Trans. ASME J. Manuf. Sci. Eng., 126(4), pp. 695–705.
- [3] WALDORF, D. J., DEVOR, R. E., and KAPOOR, S. G., 1998, "Slip-Line Field for Ploughing During Orthogonal Cutting," Trans. ASME J. Manuf. Sci. Eng., 120(4), pp. 693–698.
- [4] JUN, M. B. G., LIU, X., DEVOR, R. E., and KAPOOR, S. G., 2006, "Investigation of the Dynamics of Micro-End Milling, Part 1: Model Development," Trans. ASME J. Manuf. Sci. Eng., 128(4), pp. 893–900.
- [5] FANG, N., 2003, "Slip-Line Modeling of Machining With a Rounded-Edge Tool—Part I: New Model and Theory," J. Mech. Phys. Solids, 51(4), pp. 715–742.
- [6] KIM, K. W., LEE, W. Y., and SIN, H.-C., 1999, "Finite Element Analysis for the Characteristics of Temperature and Stress in Micro-Machining Considering the Size Effect," Int. J. Mach. Tools Manuf., 39(9), pp. 1507–1524.
- [7] OZEL, T., and ZEREN, E., 2005, "Finite Element Modeling of Stresses Induced by High Speed Machining with Round Edge Cutting Tools," 2005 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, IMECE 2005, Orlando, FL, Nov. 5–11, American Society of Mechanical Engineers, New York, NY.
- [8] RECH, J., YEN, Y.-C., SCHAFF, M. J., HAMDI, H., ALTAN, T., and BOUZAKIS, K. D., 2005, "Influence of Cutting Edge Radius on the Wear Resistance of Pm-Hss Milling Inserts," Wear, 259(7-12), pp. 1168–1176.
- [9] ZAMAN, M. T., KUMAR, A. S., RAHMAN, M., and SREERAM, S., 2006, "A Three-Dimensional Analytical Cutting Force Model for Micro End Milling Operation," Int. J. Mach. Tools Manuf. 46(3-4), pp. 353–366.

- [10] BAO, W. Y., and TANSEL, I. N., 2000, "Modeling Micro-End-Milling Operations. Part I: Analytical Cutting Force Model," Int. J. Mach. Tools Manuf., 40(15), pp. 2155–2173.
- [11] CHENGFENG Li, XINMIN Lai, HONGTAO Li and JUN Ni, "Modeling of three-dimensional cutting forces in micro-end-milling" Publishing Journal Of Micromechanics And Microengineering J. Micromech. Microeng. 17 (2007) 671–678
- [12] ALTINTAŞ Y. Manufacturing Automation. Metal Cutting mechanics, Machine tool vibrations and CNC design. Cambrigde University pres, 2000
- [13] MARTIN B.G. Jun, CHANSEO G., MOHAMMAD M., SIMON P., "A new mechanistic approach for micro end milling force modelling" Journal of Manufacturing Science and Engineering FEBRUARY 2012, Vol. 134
- [14] www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=a8298bba8d02486c97c06990a3c215d9
(Erişim tarihi: 31.7.2012)