



Mechanistic modeling of micro milling including tool run-out

Yiğit Karpat^{1,2*}, Muammer Kanlı², Samad Nadimi Babil Oliaei³

¹Department of Industrial Engineering, Bilkent University, Ankara 06800, Turkey

²Department of Mechanical Engineering, Bilkent University, Ankara 06800, Turkey

³Department of Mechanical Engineering, Atılım University, Ankara 06830, Turkey

Highlights:

- Mechanistic modeling of micro milling forces
- Influence of tool run-out on forces at low feeds
- Prediction of micro milling forces

Keywords:

- Micro milling
- Run-out
- Titanium alloy machining

Article Info:

Received: 31.01.2017

Accepted: 29.03.2017

DOI:

10.17341/gazimmfd.416407

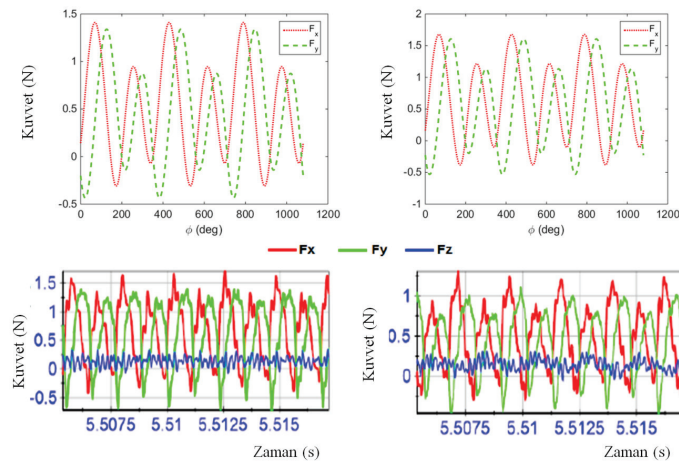
Acknowledgement:

The Scientific and Technological Research Council of Turkey (TUBITAK-110M660)

Correspondence:

Author: Yiğit Karpat
e-mail: ykarpat@bilkent.edu.tr
phone: +90-312-2902263

Graphical/Tabular Abstract



Purpose: Development of a mechanistic force model for micro milling process based on cubic polynomial average force characteristic together with run-out of the spindle system.

Theory and Methods:

Micro milling experiments have been conducted and micro milling forces were measured. The experimental milling forces were used to calculate the unknown parameters of the mechanistic force model.

Results:

A cubic polynomial force model was capable of capturing the variation of average forces during micro milling process. Including tool run-out improves force predictions.

Conclusion:

Tool run-out has a significant influence on the micro milling process and it must be included in the force modeling.



Mikro frezeleme işleminin takım eksen sapması göz önüne alınarak mekanistik modellemesi

Yiğit Karpat^{1,2*}, Muammer Kanlı², Samad Nadimi Babil Oliaei³

¹Bilkent Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Endüstri Mühendisliği Bölümü, 06800, Ankara, Türkiye

²Bilkent Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü, 06800, Ankara, Türkiye

³Atılım Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği. Bölümü, Ankara, Türkiye

Ö N E Ç I K A N L A R

- Seçilen deney şartları altında yapılan mikro frezeleme deneylerinde ortalama kuvvetin ilerleme ile doğrusal olmayan şekilde değiştiği görülmüştür
- Takım eksen sapması düşük ilerleme şartlarında kuvvetlerin değişimine etki etmektedir
- Mekanistik modelleme ile mikro frezelemede oluşan kuvvetler kabul edilebilir hassasiyette hesaplanabilir

Makale Bilgileri

Geliş: 31.01.2017

Kabul: 29.03.2017

DOI:

10.17341/gazimmfd.416407

Anahtar Kelimeler:

Mikro frezeleme,
eksenel sapma,
titanyum alaşımı işlenmesi

ÖZET

İşlenmesi zor malzemelerden yapılan mikro parçaların hassas üretiminde mikro frezeleme yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Malzeme işleme hızının yüksek olması ve işleme sonunda iyi yüzey kalitesi üretilmesi bu yöntemin en belirgin avantajlarıdır. Mikro frezeleme işleminin sonuçlarının tahmin edilebilmesi için ilk adım hassas bir mekanistik kuvvet modelinin geliştirilmesidir. Mikro frezelemede oluşan ortalama kesme kuvvetlerinin ilerlemeye göre değişimi makro ölçek frezelemede olduğu gibi doğrusal bir karakteristik göstermez. Bu çalışmada, kübik polinom karakteristiğine sahip ortalama kuvvet modeline dayalı bir mekanistik model geliştirilmiştir. Ek olarak mikro takımın ekstenel sapması geliştirilen mekanistik modele dahil edilmiştir. Geliştirilen model ile titanyum Ti6Al4V alaşımının işlenmesi sırasında tahmin edilen kuvvetlerin yapılan ölçümler ile uyumlu olduğu görülmüştür. Farklı işleme şartlarında takım ekstenel sapmasının değeri geliştirilen model vasıtası ile araştırılmıştır.

Mechanistic modeling of micro milling including tool run-out

H I G H L I G H T S

- Under the experimental conditions used in thi study, it was observed that there is a nonlinear relationship between feed and micro milling forces
- Tool run-out influences process forces at low feeds
- Micro machining force predictions agree well with experimental measurements

Article Info

Received: 31.01.2017

Accepted: 29.03.2017

DOI:

10.17341/gazimmfd.416407

Keywords:

Mikro milling,
run-out,
titanium alloy machining

ABSTRACT

Micro milling is widely used in precision manufacturing industry to produce micro components made from difficult-to-cut materials. High material removal rate and ability to create good surface quality are the major advantages. Modeling of micro milling process is essential to gain predictive ability in the process where the first step is an accurate model for machining forces where mechanistic force modeling is commonly used. In micro milling, average cutting force characteristics deviate from shifted linear force characteristics observed in macro scale machining. In this study, mechanistic force modeling based on cubic polynomial average force characteristic has been used. The influence of run-out of the spindle system has also been integrated into the mechanistic force modeling. The predicted forces are in agreements with experimental micro milling forces for machining of titanium alloy Ti6Al4V.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Telekomünikasyon, elektronik, savunma ve biyomedikal uygulamalarında kullanılan mikro ölçek parçaların üretiminde kullanılan mikro frezeleme esnek bir üretim işlemidir. Makro ölçek frezeleme işleminde ihmal edilen bazı konular mikro frezelemenin uygulanması ve modellenmesi sırasında önem kazanmaktadır. Bunlar: i) kazıma ve kesme arasındaki geçişi belirleyen en küçük talaş kalınlığı, ii) yüksek hız mili, takım tutucu, ve mikro takım sistemindeki aksel sapmalar, iii) işlenmesi zor malzemelerin kesilmesi sırasında kesici takım kenarının aşınması olarak verilebilir [1]. Kesme kuvveti hesaplama modelleri frezeleme işleminin modellenmesinde önemli yer tutmaktadır. Bunlar yardımıyla elde edilen kuvvetler ile frezeleme esnasında harcanan güç, stabil kesme şartlarının belirlenmesi, yüzey lokasyon hatalarının tahmini, ve makina takım tasarımı yapılabilmektedir [2, 3]. Bu makalenin amacı mikro frezeleme için mekanistik modelleme tekniğinin uygunluk şartlarının araştırılmasıdır. Mikro frezeleme için mikro takımlar, yüksek hız milleri ve yüksek hassasiyetli CNC makinelerine ihtiyaç vardır. Mikro kesici takım üretiminden kaynaklanan hatalar ve kesici takım hizalama hataları kesme sırasında oluşan talaş yüküne etki etmektedir. Makro ölçek frezeleme işleminde kullanılan takım çapları büyük olduğu için aksel sapma duruma göre ihmal edilebilir ancak mikro frezeleme işleminde aksel sapma kullanılan takım çapı ve ilerleme miktarı ile benzer ölçektir ve modellere dahil edilmesi gerekmektedir [4, 5]. Takım eğilmeleri, titreşimler ve işleme kuvvetleri takım ömrüne, parçaların işleme toleranslarına etki etmektedir.

Kesme kuvvetlerinin mekanistik modellenmesi sırasında elde edilen kesme ve kenar kuvvet katsayıları malzemenin kesmeye gösterdiği direnci göstermektedir. İşleme değişkenlerinin etkileri (ilerleme, kesme derinliği, kesme hızı) deneysel olarak ölçülen ortalama kesme kuvvetleri üzerinden eğriye uydurma teknikleri ile araştırılmaktadır. Bu yöntem ile yüksek hassasiyette sonuçlar elde edilebilse de, değişik şartlarda birçok deneyin tekrarlanması gerekmektedir. Germain vd. [6] literatürdeki kuvvet tahmin modellerini karşılaştırmışlar ve mekanistik modellemenin analitik modellere göre daha yüksek doğrulukta sonuç verdiğini belirtmişlerdir. Yeni bir çalışmada mekanistik kuvvet tahminine dayalı olarak ince parçaların işleme sırasındaki eğilmeleri incelenmiştir [7]. İyileştirilmiş kesme kuvveti ve kesilmemiş talaş kalınlığının hesaplanabilmesi için takım eğilmelerinin modellere dahil edilmesi gerekmektedir. Dow vd. [8] takım eğilmelerinin kesme ve pasif yönde oluşan kuvvetlere göre hesaplanması ve buna göre takım yolunun değiştirilmesi şeklinde bir yöntem geliştirmiştir. Takım eğilmesi ve aksel sapmanın modellere dahil edilmesi ile en küçük talaş kalınlığının ve dolayısıyla kazıma kuvvetlerinin daha iyi modellenmesi mümkün olmaktadır. Bu çalışmada sadece takım aksel sapması göz önünde bulundurulmuş ve takım eğilmesini etkisinin azaltmak için kanal açma deneyleri yapılmıştır. Bu makalede mekanistik modelleme tekniği ile titanyum alaşımı

Ti6AL4V malzemesinin mikro frezeleme konusu incelenmektedir. Mikro frezeleme kuvvetlerinin modellenmesi için doğrusal modelleme yerine kübik polinom kullanılması amaçlanmaktadır. Takım aksel sapması modele dahil edilmiştir. Bu model kullanılarak farklı kesme şartlarında aksel sapmanın değişimi incelenmiştir.

2. DENEYSEL METOT (EXPERIMENTAL METHOD)

Mikro frezeleme deneyleri lineer motorları sahip üç eksenli bir CNC cihazında gerçekleştirilmiştir (DMG HSC 55). Bir yüksek devirli motor tutucu (Nakanishi HES510 elektrikli hız kafası, 350 W güç, 5.000-30.000 dev/dak arası sabit tork, 50.000 dev/dak en yüksek devir) CNC cihazına HSKA 63 sistemi ile entegre edilmiş ve mikro frezeleme işlemleri bu şekilde gerçekleştirilmiştir. Mikro freze (NS, 0.4 mm çap, 2 kesici ağız) yüksek hız kafasına monte edilmiş ve bu halde takım sapması dijital indikatör (Mahr Milimar C1208) ile ölçülmüş ve sapma değerinin 1 µm'dan daha az olduğu görülmüştür. Deneysel düzenek Şekil 1a ile gösterilmiştir. Mikro işleme sırasında oluşan kuvvetler Kistler mini dinamometre (9256A, max 250 N) ve yükselticisi ile ölçülmüş ve bir veri toplama cihazı (National Instruments PXI Series) ile bilgisayara (10⁵ samples/sec) aktarılmıştır. Malzeme olarak lamelli iç yapıya sahip titanyum alaşımı Ti6AL4V malzemesi kullanılmıştır. Mikro frezenin kesici kenar yarıçapı yaklaşık 2 µm olarak ölçülmüştür (Şekil 1b). Kesme hızı olarak 35 m/min seçilmiştir. Bu 28000 dev/dak dönme hızına karşılık gelmektedir. Bu hızın seçiminde diş geçiş frekansı ve dinamometrenin frekans cevabı bant genişliğinin 1800 Hz olması göz önüne alınmıştır.

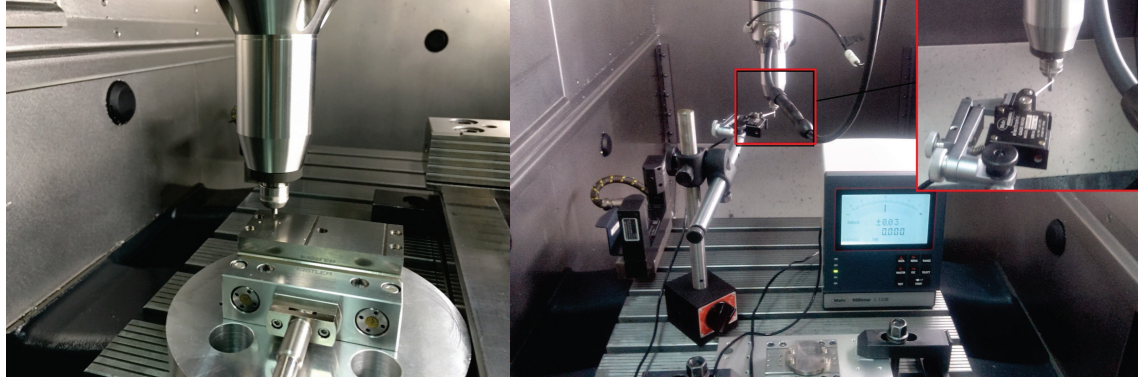
Tablo 1 deneylerde kullanılan diş başı ilerleme değerlerini (takım kesici kenar yarıçapı civarı ve ondan büyük) ve seçilen aksel kesme derinliği (kesici takım çapının %20'si) değerini göstermektedir. Kazıma bölgesi genellikle kesici yarıçapı değerinin %10-20'si civarında olup bu çalışmada kazıma bölgesi ele alınmamıştır. Deneyler sonucunda takım ucunda belirgin bir aşınma olmamıştır.

Tablo 1. Deneysel şartlar (Experimental conditions)

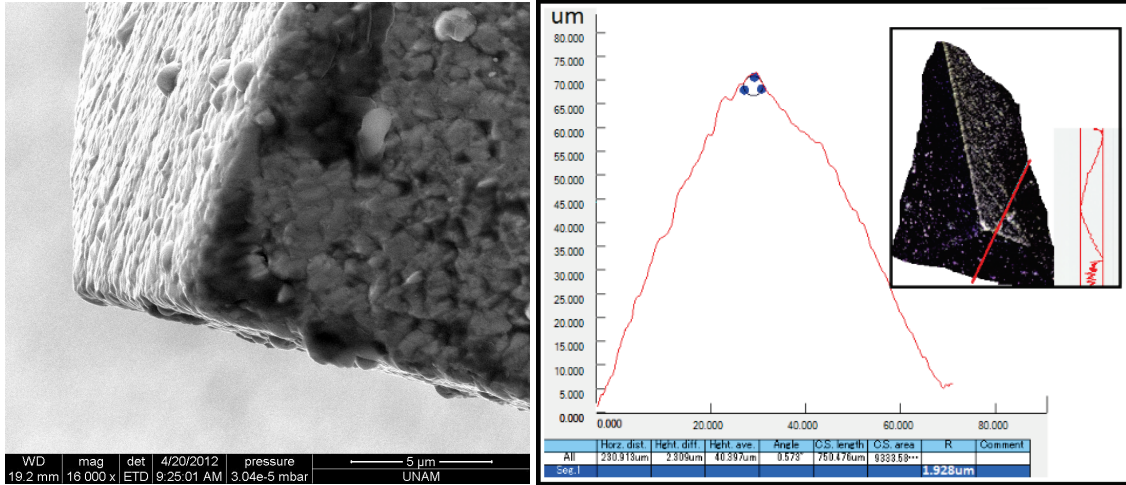
Dönme hızı (dev/dak)	Aksel kesme derinliği (µm)	Diş başı ilerleme (µm/diş)
28000	80	1,5 – 2 – 3 – 4 – 6 – 10

2.1. Mikro Frezeleme Kuvvetlerinin Ölçülmesi (Measurement of Micro Milling Forces)

Şekil 2a mikro frezeleme esnasında elde edilen kuvvetleri en düşük ilerlemeden en yüksek ilerlemeye doğru (a-f) göstermektedir. İlerleme miktarı arttıkça kesme esnasında oluşan tepe kuvvet değerlerinin arttığı görülmektedir. İlerleme değeri en düşükten en yükseğe altı kattan fazla artmasına rağmen ölçülen tepe kuvvetleri yaklaşık iki kat artmıştır. Tepe kuvvetler arasındaki değişimler takım



a)



b)

Şekil 1. a) Deneysel düzenek b) Kesici kenar elektron mikroskop görüntüsü ve üç boyutlu lazer tarama ile ölçülmüş kenar yarıçapı (a) Experimental setup, b) Measurement of static tool run-out, c) Scanning electron microscope image of the cutting edge, d) Cutting edge radius of the micro end mill measured with 3D laser scanning microscope)

sapmaları sebebiyle oluşmaktadır ve bunun etkisi düşük ilerleme değerlerinde daha fazla görülmektedir. Düşük bir ilerleme değerinde (1,5 μm/diş) tepe kuvvetlerinin değişimi yine Şekil 2a'da gösterilmiştir. Artan ilerleme ile takım sapma etkisi azalmaktadır. Şekil 2(b, c) dinamometrenin X (kesme yönüne paralel) ve Y (kesme yönüne dik) yönünde ölçülen ortalama tepeden-vadiye (peak-to-valley) ve ortalama kuvvetleri göstermektedir. Ölçümlere filtre uygulanmamıştır. Z yönünde oluşan kuvvetler diğerlerine göre oldukça düşüktür ve bu çalışmada ihmal edilmiştir.

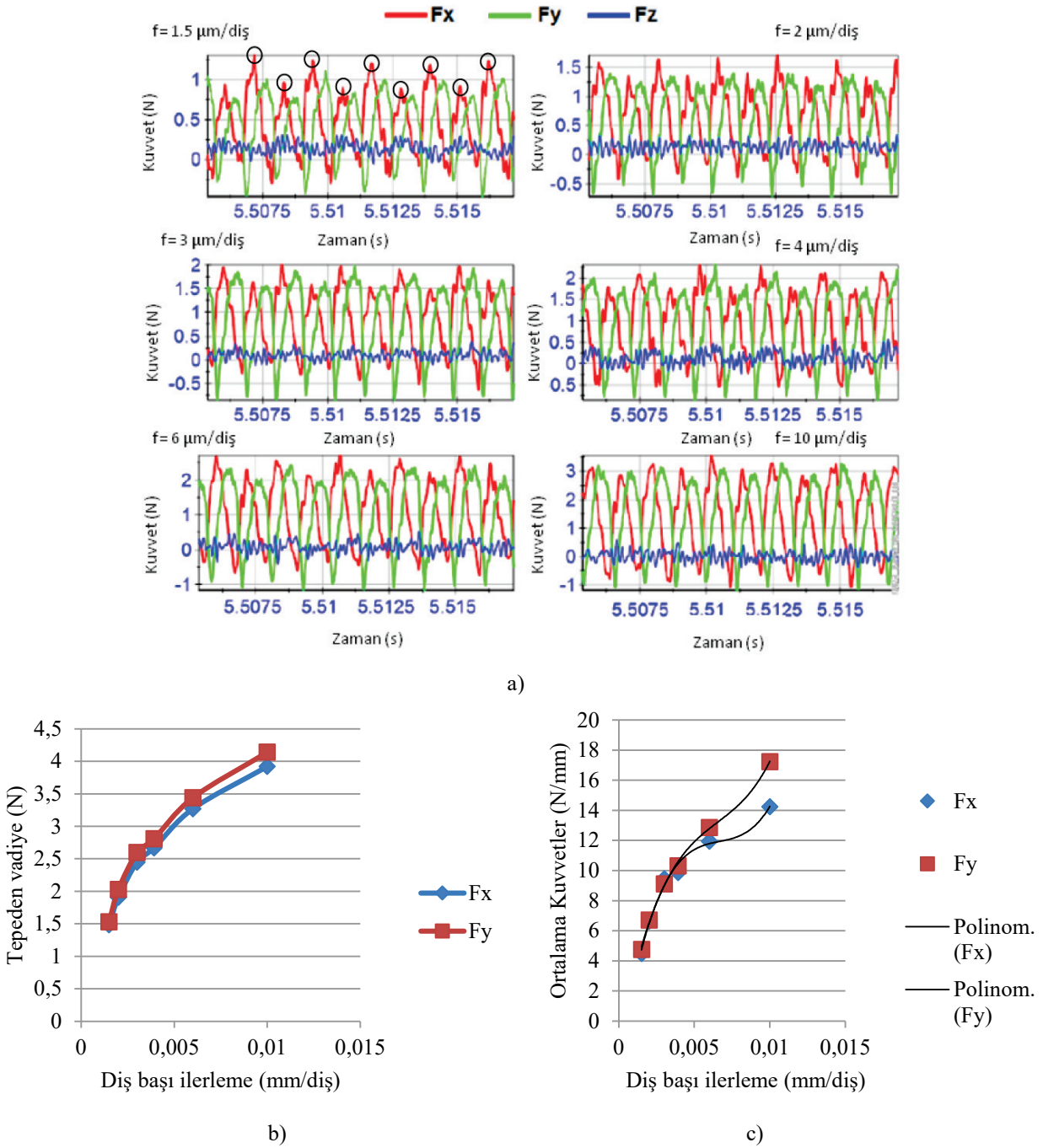
Genel olarak frezeleme esnasında ölçülen ortalama kuvvet değerlerinin doğrusal, kaydırılmış doğrusal, üstel ve polinom şeklinde değiştiği bilinmektedir [9, 10]. Şekil 2c ile mikro frezeleme sonucu elde edilen ortalama kuvvet değişimlerinin ilerlemeye göre doğrusal olarak değişmediği görülmektedir. Belli bir ilerleme aralığında (1,5 - 2-3 μm) görülen doğrusal trend yüksek ilerleme değerlerinde değişmektedir. Şekil 2c üçüncü derece bir polinom ile kuvvet değişimini tam olarak ifade edebildiğini göstermektedir. Verilen ortalama kuvvetlere uydurulan bir üçüncü derece polinom üzerinden

kesme kuvvetlerinin hesaplanması bir sonraki bölümde açıklanmaktadır.

3. MİKRO FREZELEME KUVVETLERİNİN MEKANİSTİK MODELLENMESİ (MECHANISTIC MODELING OF MICRO MILLING FORCES)

Şekil 3 işleme esnasında kesici takım ucuna gelen kuvvetleri göstermektedir. Teğetsel kuvvet (F_t) anlık kesme yönüne ters yönde ve radyal kuvvetler (F_r) teğetsel kuvvetlere dik ve takım merkezi yönündedir. Kesici takımın iki diş bulunmaktadır ($N=2$) ve takım dönüş açısı (ϕ) sembolü ile ifade gösterilmektedir. Eksenel ve radyal kesme derinlikleri (a_e ve a_p), diş başı ilerleme miktarı (f) ve takım çapı işleme parametreleri olarak önceden bilinmektedir. Eş. 1 takım ile birlikte hareket eden teğetsel ve radyal kuvvetlerin dinamometre X ve Y eksen takımına göre transformasyon işlemini göstermektedir.

$$\begin{aligned} dF_{x_j} &= dF_{t_j} \cos \phi + dF_{r_j} \sin \phi \\ dF_{y_j} &= dF_{t_j} \sin \phi - dF_{r_j} \cos \phi \end{aligned} \quad (1)$$

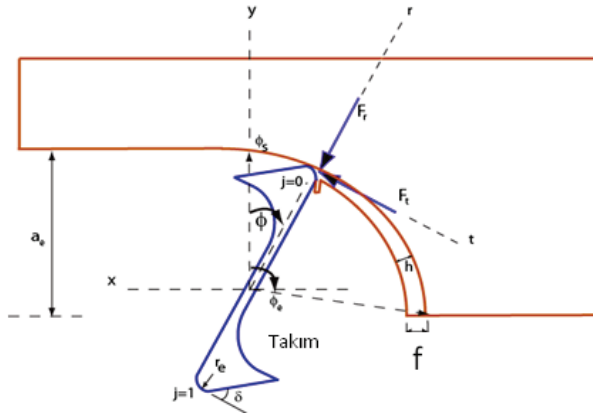


Şekil 2. a) Ölçülen mikro frezeleme kuvvetleri, b) Tepeden vadiye kuvvetlerin ilerlemeye göre değişimi, c) Ortalama kuvvetlerin X ve Y yönlerindeki değerleri.

((a) Measured micro milling forces, b) Variation of peak-to-valley forces, c) Variation of average forces in X and Y directions)

Kesilmemiş talaş kalınlığı (h_j), takım dönme açısı (ϕ) ve diş başı ilerleme (f) değerine bağlı olarak tanımlanabilir. Makro ölçekte dairesel olarak modellenen takım yolu, mikro işleme esnasında takım sapmaları göz önüne alındığında bu tanıma uymamaktadır. Ayrıca, kesici takımların helisel yapısı düşünüldüğünde bu eşitliğin kesme modelinin z eksenı boyunca helis açısına ve takım dönme açısına bağlı olarak ayrı ayrı hesaplanması ve daha sonra her bir eleman (dz)

üzerine gelen kuvvetlerin toplanması gerekmektedir. Bu çalışmada kesme kuvvetleri kesilmemiş talaş kalınlığının üçünü derece polinom bir fonksiyonu olarak ele alınmıştır. Bu durumda kesilmemiş talaş kalınlığı ile teğetsel ve radyal kesme kuvvetleri arasındaki ilişki Eş.2 ile verilebilir. Burada verilen k_{t0} , k_{t1} , ..., k_{n3} bilinmeyen parametreler olup ölçülmüş mikro frezeleme kuvvetleri yardımıyla hesaplanabilir.



Şekil 3. Frezelemede kesme kuvvetlerinin modellenmesi.
(Modeling of machining forces in micro milling)

$$\begin{aligned} dF_{t_j} &= (k_{t0} + k_{t1}h_j + k_{t2}h_j^2 + k_{t3}h_j^3) dz \\ dF_{n_j} &= (k_{n0} + k_{n1}h_j + k_{n2}h_j^2 + k_{n3}h_j^3) dz \end{aligned} \quad (2)$$

Eş. 2 ile verilen teğetsel ve radyal kuvvetler Eş. 1 yardımıyla X ve Y yönlerine transform edilebilir. Bu durum Eş. 3 ile verilmiştir.

$$\begin{aligned} dF_{x_j} &= \begin{bmatrix} k_{t0} \cos \varphi_j + k_{n0} \sin \varphi_j + \\ (k_{t1} \cos \varphi_j + k_{n1} \sin \varphi_j) h_j + \\ (k_{t2} \cos \varphi_j + k_{n2} \sin \varphi_j) h_j^2 + \\ (k_{t3} \cos \varphi_j + k_{n3} \sin \varphi_j) h_j^3 \end{bmatrix} dz \\ dF_{y_j} &= \begin{bmatrix} k_{t0} \sin \varphi_j - k_{n0} \cos \varphi_j + \\ (k_{t1} \sin \varphi_j - k_{n1} \cos \varphi_j) h_j + \\ (k_{t2} \sin \varphi_j - k_{n2} \cos \varphi_j) h_j^2 + \\ (k_{t3} \sin \varphi_j - k_{n3} \cos \varphi_j) h_j^3 \end{bmatrix} dz \end{aligned} \quad (3)$$

Kesme esnasında oluşan ortalama kuvvetler Eş. 3'ün integralinin alınması ile hesaplanabilir. Eş. 4 bu işlemi göstermektedir. Elde edilen sonuç Eş. 5 ile verilmiştir. Burada (ϕ_{st} ve ϕ_{ex} takımın kesmeye giriş ve çıkış açılarını göstermekte olup verilen radyal batma miktarına göre hesaplanabilir. Kanal açma için giriş ve çıkış açıları sırasıyla 0 ve 180 derecedir.

Eş. 5'in sadeleştirilmesi sonucunda Eş. 6 elde edilir. A, B, C, D, E, F, G ve H parametreleri diş sayısı, giriş-çıkış açıları ve kesme derinliğine göre hesaplanabilir. Bilinmeyen kesme katsayıları ile birleştirildiğinde ortalama kuvvetler hesaplanabilir.

DeneySEL olarak ölçülen ortalama kuvvetler ise kübik polinom formatında Eş. 7 ile verilebilir.

$$\begin{aligned} \int dF_x &= \frac{R}{\tan i} \left[\begin{array}{l} -k_{t0} \sin \varphi_j + k_{r0} \cos \varphi_j + \\ \frac{f}{4} [k_{t1} \cos 2\varphi_j + k_{n1} (-2\varphi_j + \sin 2\varphi_j)] + \\ \frac{f^2}{12} [-4k_{t2} \sin^3 \varphi_j - \\ k_{n2} (\cos 3\varphi_j - 9 \cos \varphi_j)] + \\ \frac{f^3}{32} [-8k_{t3} \sin^4 \varphi_j - \\ k_{n3} (12\varphi_j - 8 \sin 2\varphi_j + \sin 4\varphi_j)] \end{array} \right]_{\varphi_{st}(\varphi)}^{\varphi_{ex}(\varphi)} \\ \int dF_y &= \frac{R}{\tan i} \left[\begin{array}{l} k_{t0} \cos \varphi_j + k_{r0} \sin \varphi_j + \\ \frac{f}{4} [k_{t1} (-2\varphi_j + \sin 2\varphi_j) - k_{n1} \cos 2\varphi_j] + \\ \frac{f^2}{12} [-k_{t2} (\cos 3\varphi_j - 9 \cos \varphi_j) + \\ 4k_{n2} \sin^3 \varphi_j] + \\ \frac{f^3}{32} [-k_{t3} (12\varphi_j - 8 \sin 2\varphi_j + \sin 4\varphi_j) \\ + 8k_{n3} \sin^4 \varphi_j] \end{array} \right]_{\varphi_{st}(\varphi)}^{\varphi_{ex}(\varphi)} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \overline{F_x} &= \frac{aN}{2\pi} \left[\begin{array}{l} k_{t0} \sin \varphi_j - k_{n0} \cos \varphi_j \\ + \frac{f}{4} [-k_{t1} \cos 2\varphi_j + k_{n1} (2\varphi_j - \sin 2\varphi_j)] + \\ \frac{f^2}{12} [4k_{t2} \sin^3 \varphi_j + k_{n2} (\cos 3\varphi_j - 9 \cos \varphi_j)] + \\ \frac{f^3}{32} [8k_{t3} \sin^4 \varphi_j + k_{n3} \\ (12\varphi_j - 8 \sin 2\varphi_j + \sin 4\varphi_j)] \end{array} \right]_{\varphi_{st}}^{\varphi_{ex}} \\ \overline{F_y} &= \frac{aN}{2\pi} \left[\begin{array}{l} -k_{t0} \cos \varphi_j - k_{n0} \sin \varphi_j + \\ \frac{f}{4} [k_{t1} (2\varphi_j - \sin 2\varphi_j) + k_{n1} \cos 2\varphi_j] + \\ \frac{f^2}{12} [k_{t2} (\cos 3\varphi_j - 9 \cos \varphi_j) - 4k_{n2} \sin^3 \varphi_j] + \\ \frac{f^3}{32} [k_{t3} (12\varphi_j - 8 \sin 2\varphi_j + \sin 4\varphi_j) \\ - 8k_{n3} \sin^4 \varphi_j] \end{array} \right]_{\varphi_{st}}^{\varphi_{ex}} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \overline{F_x} &= k_{t0}B - k_{n0}A + \frac{f}{4}(-k_{t1}D + k_{n1}C) + \\ &\frac{f^2}{12}(4k_{t2}F + k_{n2}E) + \frac{f^3}{32}(8k_{t3}H + k_{n3}G) \\ \overline{F_y} &= -k_{t0}A - k_{n0}B + \frac{f}{4}(k_{t1}C + k_{n1}D) + \\ &\frac{f^2}{12}(k_{t2}E - 4k_{n2}F) + \frac{f^3}{32}(k_{t3}G - 8k_{n3}H) \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned}
 A &= \frac{aN}{2\pi} [\cos \phi]_{\phi_{st}}^{\phi_{ex}} & B &= \frac{aN}{2\pi} [\sin \phi]_{\phi_{st}}^{\phi_{ex}} & k_{n0} &= \frac{\overline{F_{y0}B} - \overline{F_{x0}A}}{B^2 + A^2} & k_{n1} &= 4 \frac{\overline{F_{y1}D} + \overline{F_{x1}C}}{C^2 + D^2} \\
 C &= \frac{aN}{2\pi} [2\phi - \sin 2\phi]_{\phi_{st}}^{\phi_{ex}} & D &= \frac{aN}{2\pi} [\cos 2\phi]_{\phi_{st}}^{\phi_{ex}} & k_{n2} &= 12 \frac{\overline{F_{x2}E} - 4\overline{F_{y2}F}}{E^2 + 16F^2} & k_{n3} &= 32 \frac{\overline{F_{x3}G} - 8\overline{F_{y3}H}}{G^2 + 64H^2} \\
 E &= \frac{aN}{2\pi} [\cos 3\phi - 9 \cos \phi]_{\phi_{st}}^{\phi_{ex}} & F &= \frac{aN}{2\pi} [\sin^3 \phi]_{\phi_{st}}^{\phi_{ex}} \\
 G &= \frac{aN}{2\pi} [12\phi - 8 \sin 2\phi + \sin 4\phi]_{\phi_{st}}^{\phi_{ex}} \\
 H &= \frac{aN}{2\pi} [\sin^4 \phi]_{\phi_{st}}^{\phi_{ex}}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \overline{F_x} &= \overline{F_{x0}} + \overline{F_{x1}f} + \overline{F_{x2}f^2} + \overline{F_{x3}f^3} \\
 \overline{F_y} &= \overline{F_{y0}} + \overline{F_{y1}f} + \overline{F_{y2}f^2} + \overline{F_{y3}f^3}
 \end{aligned} \quad (7)$$

Eş.6 ve 7'nin karşılıklı terimlerini eşitlenmesi suretiyle bilinmeyen k_{t0} , k_{t1} , k_{t2} , k_{t3} , k_{r0} , k_{r1} , k_{r2} ve k_{r3} kesme parametreleri hesaplanabilir. Ölçülmüş ortalama kuvvet değerlerine uydurulan kübik polinom katsayıları üzerinden kesme parametreleri hesaplanabilir. Tablo 2 bu hesaplanan değerler özetlenmektedir. Parametre sayısını azaltmak için kübik polinomun sıfır ilerleme değerine karşılık kuvvet eksenini merkezde keseceği kabul edilmiştir. Kullanılan ilerleme değerleri çok düşük olmadığı için bu kabul geçerli sayılabilir. Çok küçük ilerleme değerlerinde kazıma etkisi öne çıkacağından bu kabul geçerli olmayabilir. İşleme modeline yeni parametrelerin tanımlanması ile bu durum ortadan kaldırılabilir [7].

$$\begin{aligned}
 k_{r0} &= \frac{\overline{F_{x0}B} - \overline{F_{y0}A}}{A^2 + B^2} & k_{r1} &= 4 \frac{\overline{F_{y1}C} - \overline{F_{x1}D}}{C^2 + D^2} \\
 k_{r2} &= 12 \frac{\overline{F_{y2}E} + 4\overline{F_{x2}F}}{E^2 + 16F^2} & k_{r3} &= 32 \frac{\overline{F_{y3}G} + 8\overline{F_{x3}H}}{G^2 + 64H^2}
 \end{aligned}$$

Doğrusal mekanistik modellemede kullanılan katsayılardan biri elde edilen doğrunun eğimi (malzemenin kesmeye gösterdiği direnci) diğeri ise eğrinin kuvvet eksenini kestiği noktayı (takım köşe yarıçapı etkisi) ifade etmektedir. Tablo2 ile değerleri verilen katsayılar ise benzer fiziksel bir bilgi vermemektedir. Bu yöntemin dezavantajlarından biri olarak görülebilir.

3.1. Mikro Frezeleme Kuvvetlerin Takım Sapması Göz Önüne Alınarak Tahmin Edilmesi (Prediction of Micro Milling Forces Considering Tool Run-Out)

Mikro frezeleme işleminde takımın gerçek yörüngesi kuvvetlerin hesaplanması için dikkate alınmalıdır. Takım eksen sapması oluşan yüzey topografisine, işlemin kararlılığına ve takım aşınması üzerinde etkili olmaktadır. Takım eksen sapması takımın gerçek merkezinin geometrik merkezinden olan farkı olarak tanımlanabilir. Bu fark dönme esnasında takım merkezinin doğrusal olmayan bir yörüngede hareket etmesine sebep olmakta ve buna bağlı olarak her bir dişin kesme kalınlığını değiştirmektedir. Sonuç olarak her bir diş ayrı kesme şartlarına maruz kalmaktadır. Oluşan gerçek takım yörüngesi ilerleme, takım çapı ve sapma değerlerine göre değişmektedir. Kesme esnasında takımın eğilmesi bu çalışmada ele alınmamıştır. Takım sapması açısal ve radyal sapma olarak tanımlanabilir. Açısal sapma (γ_0) takım eksenini ile dönme eksenini arasındaki açısal fark olup, radyal sapma (R_0) ise sapma mesafesini göstermektedir. Şekil 4 takım saptasının her bir dişin yörüngelerine olan etkilerini göstermektedir. Sapmanın modellenmesi için Li and Li [5] tarafından teklif edilen model bu çalışmada kullanılmıştır. Şekil 4'te k ve (k-1) olarak adlandırılan dişler için takım merkezindeki saptasının talaş kalınlığına olan etkileri gösterilmektedir. Burada (x' , y') ve (x , y) her bir dişin uç noktasının koordinatlarını göstermekte olup bunlar Eş. 8 ile hesaplanabilir.

Tablo 2: Hesaplanan kübik polinom değerleri ve buna karşılık gelen kesme kuvveti katsayıları
(Calculated cubic polynom coefficients and corresponding force coefficients)

	(N/mm)	(N/mm ²)	(N/mm ³)	(N/mm ⁴)
Kübik polinom katsayıları	$\overline{F_{x0}}$	$\overline{F_{x1}}$	$\overline{F_{x2}}$	$\overline{F_{x3}}$
	0	6099,2	-877467	4×10^7
	$\overline{F_{y0}}$	$\overline{F_{y1}}$	$\overline{F_{y2}}$	$\overline{F_{y3}}$
	0	4953,3	-616773	3×10^7
Kesme kuvveti katsayıları	k_{t0}	k_{t1}	k_{t2}	k_{t3}
	0	9906,6	$-1,453237 \times 10^6$	8×10^7
	k_{n0}	k_{n1}	k_{n2}	k_{n3}
	0	$12,2 \times 10^4$	$-2,067483 \times 10^6$	$1,067 \times 10^8$

Eş. 8'de sapma (R_0 , γ_0) parametreleri ile gösterilmiştir. Bunlar statik olarak ölçülebilir ancak dinamik kesme şartlarında bu değerlerin değiştiği bilinmektedir. Bu denklemde w dönme hızını, t zamanı, f ilerlemeyi, and R ise takım yarıçapını göstermektedir. Mikro kesici takımların işleme esnasında kesici kenarlarının farklı miktarda aşınması da bir değer sapma durumunu oluşturmaktadır.

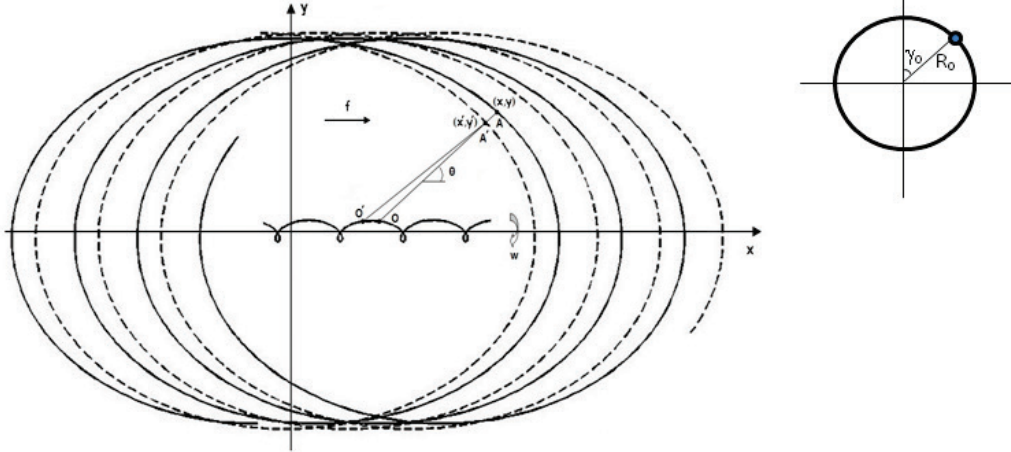
$$\begin{aligned} x_k &= ft + R \sin\left(wt - \frac{2\pi k}{K}\right) + R_0 \sin(wt + \gamma_0) \\ y_k &= R \cos\left(wt - \frac{2\pi k}{K}\right) + R_0 \cos(wt + \gamma_0) \end{aligned} \quad (8)$$

Kesilmemiş talaş kalınlığının anlık değeri Şekil 4 ile gösterilen A ve A' noktaları arasındaki uzunluktur. Hangi zaman anında takım merkezi (O) ve A-A' noktalarının doğrusal bir şekilde birleştiğinin bulunması gerekmektedir. Bu andaki kesilmemiş talaş kalınlığı Eş. 9 ile verilebilir [5].

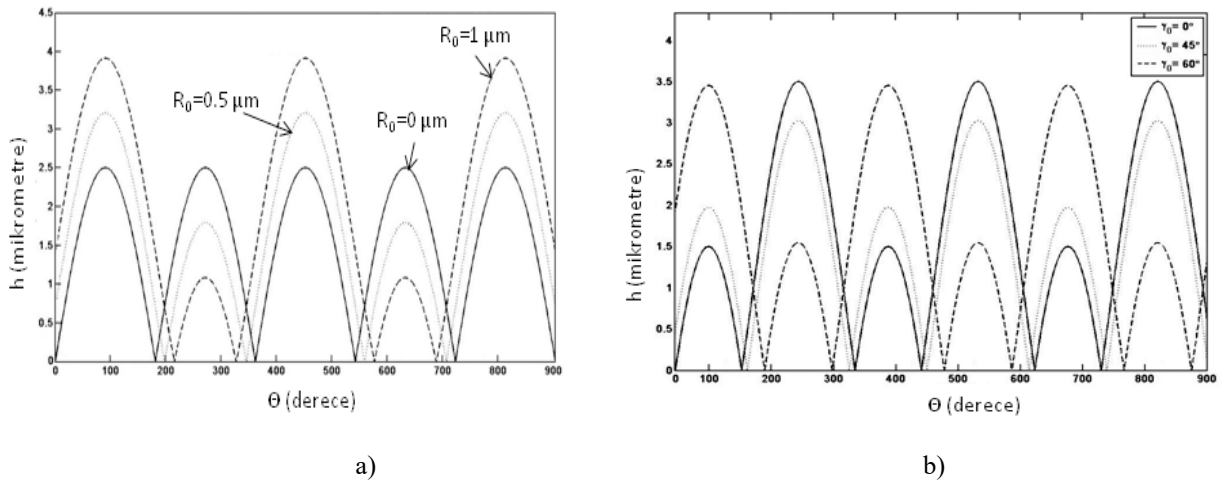
Şekil 5a ve 5b değişik sapma parametrelerine göre talaş kalınlığı değerlerini göstermektedir. Takım sapma mesafesi arttıkça dişler arası talaş yükleri artmaktadır.

$$h = R + L \sin\left(wt - \frac{2\pi k}{K} + \alpha_0\right) - \sqrt{R^2 - L^2 \cos^2\left(wt - \frac{2\pi k}{K} + \alpha_0\right)} \quad (9)$$

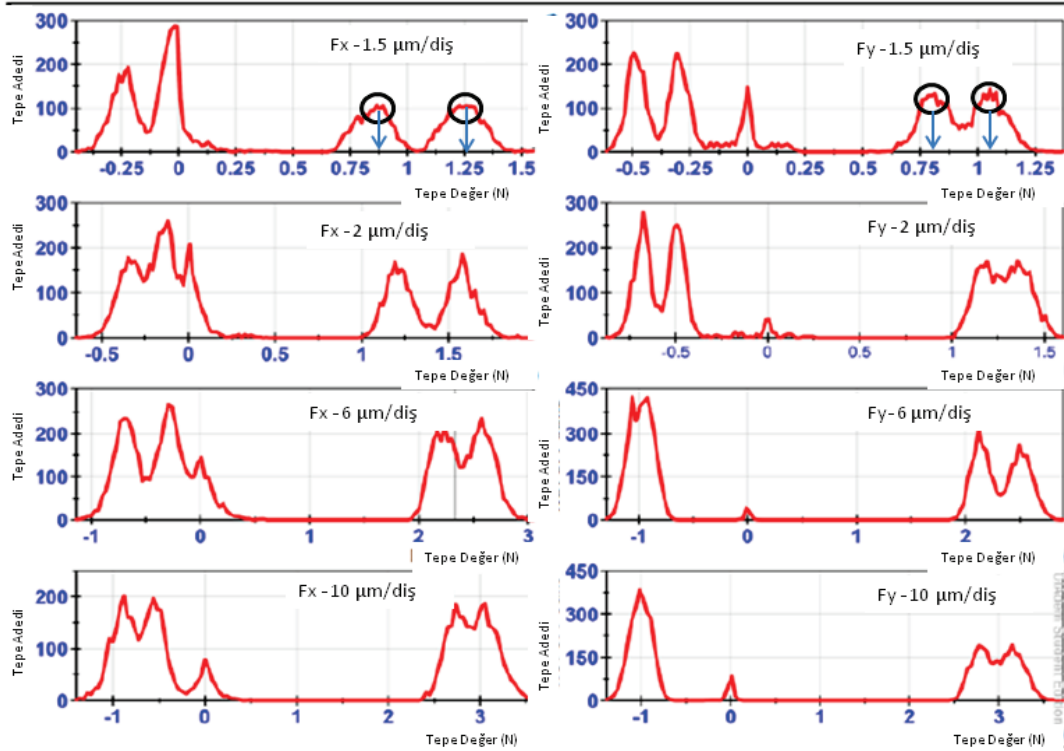
Değişen talaş yükünün kesme kuvvetleri üzerinde etkisini incelemek için kesme süresinde oluşan tepe ve vadi kuvvetlerinin değişimi incelenmiştir. Şekil 6a bunların dağılım histogramını göstermektedir. Bir bilgisayar kodu yardımıyla tepe ve vadi kuvvet değerleri bulunmuş ve bunların oluşma adetleri histogram formatında çizdirilmiştir. İlerleme miktarı sapma değerine göre göreceli olarak arttığında sapmanın etkisi azalmakta ve tepe-vadi değerleri etrafındaki sapmalar azalmaktadır. Şekil 6b dişten diş



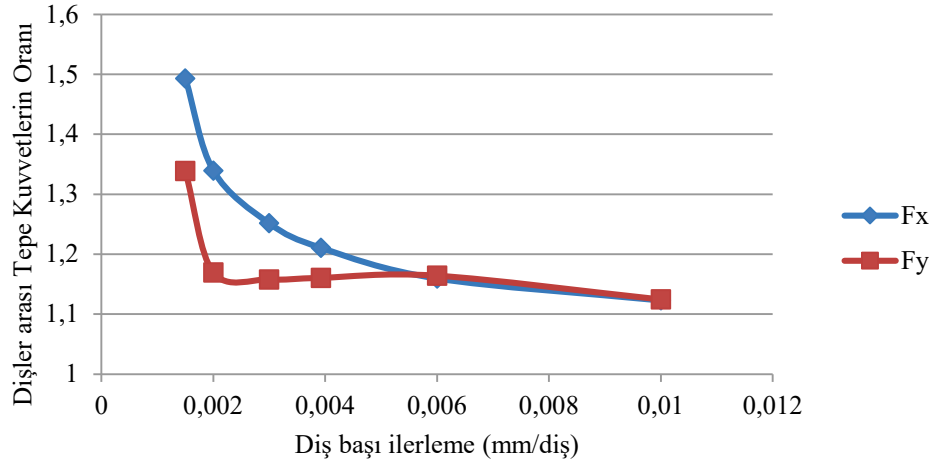
Şekil 4. Takım sapması durumunda gerçek takım yörüngesi. (Actual tool path with teh presence of runout)



Şekil 5. Talaş yükünün farklı sapma değerlerine göre değişimi: a) Sapma mesafesi etkisi, b) Sapma açısı etkisi. (Variation of chip load for different runout parameters. a) Influence of runout distance, b) Influence of Runout angle)



a)



b)

Şekil 6. Tepe ve vadi kuvvetlerin dağılım histogramı, b) Tepe kuvvetleri arasındaki oran.
((a) Histogram of peak-to-valley forces, b) Ratio of peak forces as a function of feed)

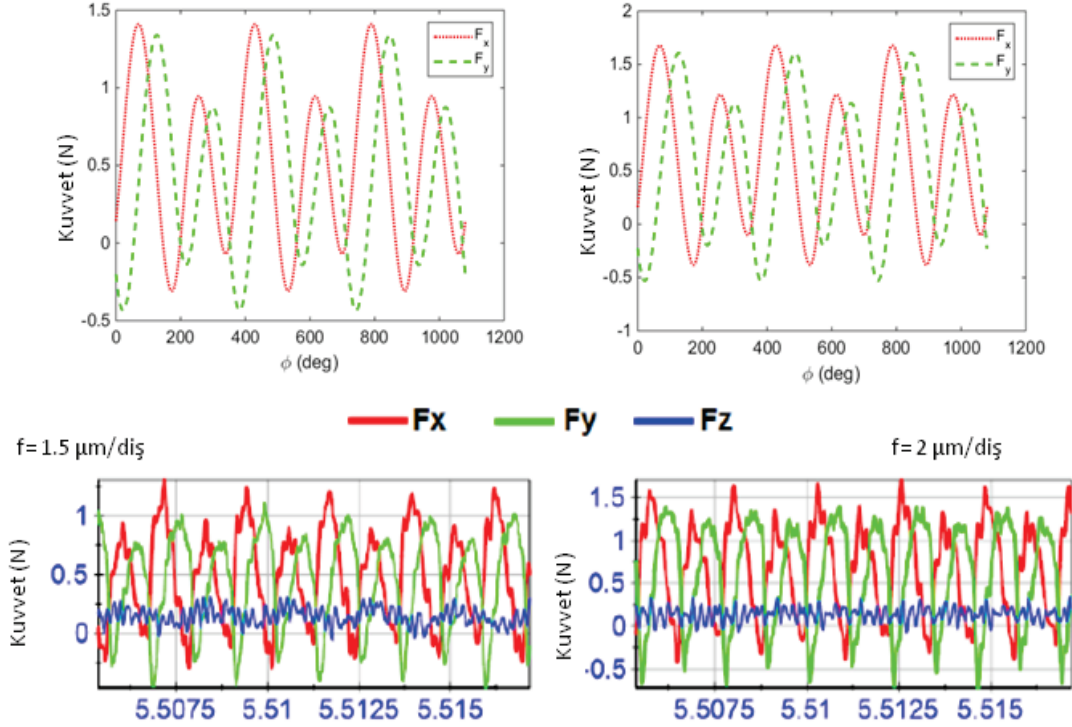
değişen tepe kuvvetleri arasındaki oranları göstermektedir. Bu değerlerin nasıl elde edildiği Şekil 6'da açıklanmıştır. İlerlemenin düşük olduğu yerlerde dişler arası talaş yüklerinin farkı kuvvetlere etki etmektedir.

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

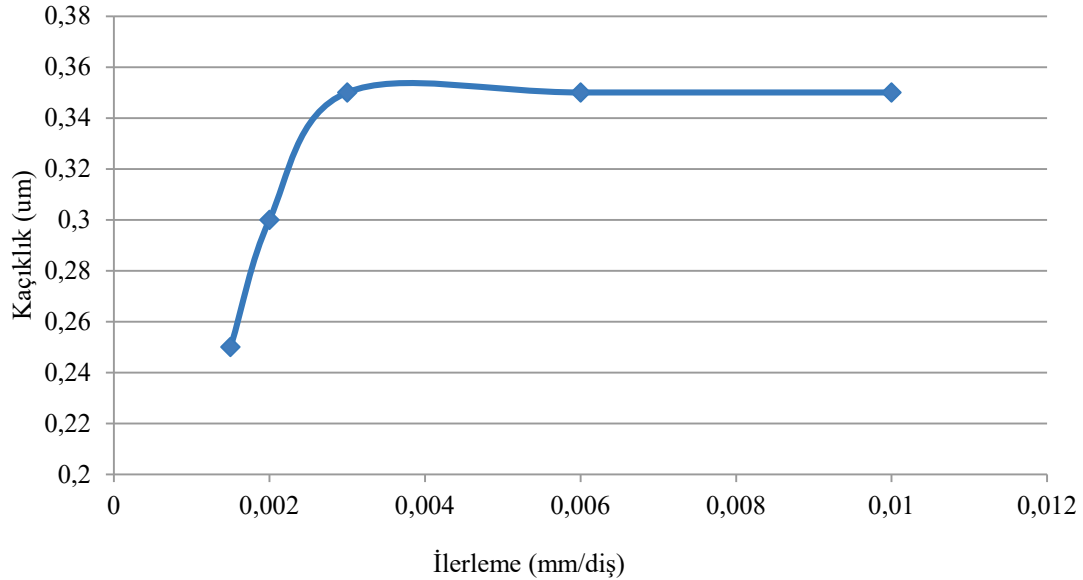
Şekil 6b ile verilen oranlar mekanistik mikro frezeleme modeli kullanılarak her bir ilerleme için sapma parametrelerinin hesaplanmasında kullanılabilir.

Hesaplanan ve ölçülen kuvvetler arasındaki farklar sapma parametresi (R_0) değiştirilmesi ile deneme-yanılma yöntemi ile bulunmuştur. Kolaylık için sapma açısı 45 derece olarak alınmıştır. Şekil 7, 1,5 µm ve 2 µm ilerleme için verilen kuvvet tahminlerini ve kuvvet ölçümlerini göstermektedir. Her iki durum için de tahmin ve ölçüm arasındaki uyum başarılıdır.

Şekil 8 ise hesaplanan sapma mesafesinin ilerlemeye göre değişimini göstermektedir. Artan ilerleme ile sapma değeri artmakta daha sonra ise sabit kalmaktadır.



Şekil 7. Kuvvet ölçüm ve tahminlerinin karşılaştırılması: 1,5 μm ve 2 μm diş başı ilerleme için.
(Comparison of predicted and measured forces: for a) 1.5 and b) 2 $\mu\text{m}/\text{rev}$ machining cases).



Şekil 8. Sapma miktarının ilerlemeye göre değişimi (Variation of runout as a function of feed per tooth)

5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada mikro frezleme esnasında oluşan kuvvetlerin modellenmesi için mekanistik bir model geliştirilmiştir.

Deneyel olarak ölçülen işleme kuvvetlerinin ilerlemeye göre değişimi kübik bir polinom ile modellenmiştir ve kesme parametreleri hesaplanmıştır. Bir takım sapma modeli ile

mekanistik modeldeki talaş yükleri gerçekçi olarak hesaplanmış ve yapılan tahminlerin ölçümler ile uyumlu olduğu görülmüştür. Kuvvet ölçümleri ve geliştirilen mekanistik model yardımıyla değişik ilerleme koşullarındaki takım sapma miktarları hesaplanmış ve artan ilerleme ile takım saptasının önce arttığı daha sonra sabit kaldığı görülmüştür. İşleme şartlarına göre takım eğilmesi ve işlemenin dinamiği modelde ele alınmamıştır.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Yazarlar bu çalışmanın yapılmasında destek olan TÜBİTAK Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'na (Proje No: 110M660) teşekkür eder.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Uslan İ., Sarıtaş S., Davies T.J., Effects of Variables on the size and characteristics of gas atomized aluminium powders, *Powder Metallurgy*, 42 (2), 157-163, 1999.
2. Chae J., Park S.S., Freiheit T., Investigation-of-micro-cutting-operations, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 46, 313–332, 2006.
3. Bao, W.Y., Tansel, I.N., Modeling micro-end-milling operations. Part I: Analytical cutting force model, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 40 (15), 2155-2173, 2000.
4. Kang I.S., Kim J.S., Kang M.C., Seo Y.W., A mechanistic model of cutting force in the micro end milling process, *Journal of Materials Processing Technology*, 87-188, 250-255, 2007.
5. Bao, W.Y., Tansel, I.N., Modeling micro-end-milling operations. Part II: Tool run-out, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 40 (15), 2175-2192, 2000.
6. Li H.Z. and Li X.P., A numerical study of the effects of cutter runout on milling process geometry based on true tooth trajectory, *Int J Adv Manuf Technology* 25, 435–443, 2005.
7. Germain D., Fromentin G., Poulachon G., Bissey-Breton S., From large-scale to micromachining: A review of force prediction models, *Journal of Manufacturing Processes* 15, 389–401, 2013.
8. Lazoglu I., Mamedov, A., Deformation of thin parts in micromilling, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 65, 117–120, 2016.
9. Dow A.T., Miller E.L., Garrard K., Tool force and deflection compensation for small milling tools, *Precision Engineering*, 28, 31–45, 2004.
10. Stepan, G., Dombovari, Z., Munoa, J., 2011, Identification of cutting force characteristics based on chatter experiments. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 60(1), 113–116, 2011.
11. Shi, H. M., Tobias, S. A., Theory of finite amplitude machine tool instability, *International Journal of Machine Tool Design and Research*, 24 (1), 45–69, 1984.

