



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



Parmak frezeleme sırasında takım salgısının etkisi dahil edilerek kesme kuvvetlerinin tahmini ve analizi

Prediction and analysis of cutting forces including the effect of tool runout during end milling

Yazar(lar) (Author(s)): Mehmet AYDIN

ORCID: 0000-0003-1126-0601

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Aydın M., “Parmak frezeleme sırasında takım salgısının etkisi dahil edilerek kesme kuvvetlerinin tahmini ve analizi”, *Politeknik Dergisi*, 25(1): 157-167, (2022).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.693544

Parmak Frezeleme Sırasında Takım Salgısının Etkisi Dahil Edilerek Kesme Kuvvetlerinin Tahmini ve Analizi

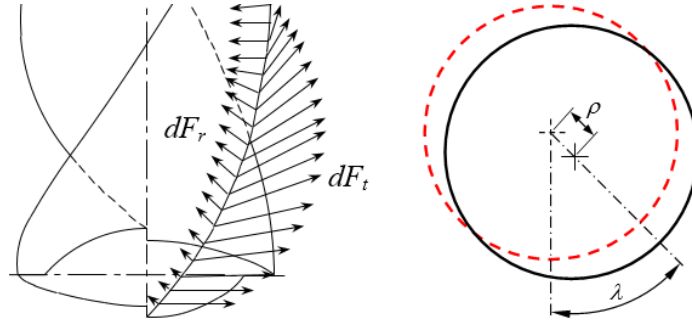
Prediction and Analysis of Cutting Forces Including the Effect of Tool Runout During End Milling

Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ Takım salgısının etkilerini içeren kesme kuvveti modeli / Cutting force model including the effects of tool runout
- ❖ Her bir zaman aralığında kesme kuvvetlerini tahmin etmek için mekanistik model kullanımı / Using the mechanistic model to predict cutting forces at each time interval
- ❖ Ortalama talaş kalınlığının üstel fonksiyonları olarak tanımlanan kuvvet katsayıları / Force coefficients defined as the exponential functions of the average chip thickness

Grafik Özet (Graphical Abstract)

Bu makale, düz uçlu parmak frezeleme işlemi için takım salgısının varlığında mekanistik kesme kuvveti yaklaşımını incelemektedir. / This paper studies a mechanistic cutting force approach in the presence of tool runout for flat end milling process.



Şekil. Kesme kuvvetleri ve salgı parametreleri / Figure. Cutting forces and runout parameters

Amaç (Aim)

Bu çalışmada, takım salgısının etkileri dikkate alınarak frezeleme kuvvet bileşenlerini tahmin etmek için bir kesme kuvveti modeli sunulması amaçlanmıştır. / In this study, it is aimed to present a cutting force model for predicting the milling force components considering the effects of tool runout.

Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Kesme kuvvetleri, mekanistik model ile her bir zaman aralığında tahmin edilmiştir. / The cutting forces are predicted at each time interval with the mechanistic model.

Özgünlük (Originality)

Kesme kuvveti modelleme yaklaşımı, parmak frezeleme için takım salgısının etkilerini içermektedir. Takım salgısının talaş yükü üzerindeki etkisi kesici kenarların gerçek yolu esas alınarak incelenmiştir. / The cutting force modelling approach includes the effects of tool runout for end milling. The effect of tool runout on chip load is considered based on the true path of the flutes.

Bulgular (Findings)

Ayrıntılı bir analiz, takım salgısının kesme kuvveti desenini diş geçiş frekansından iş mili dönme frekansına değiştirdiğini göstermektedir. / An in-depth analysis indicates that tool runout shifts the cutting force pattern from the tooth passing frequency to the spindle rotational one.

Sonuç (Conclusion)

Bu model, Al7075-T6 alüminyum alaşımı için kesme kuvvetlerinin tatmin edici bir tahmini sağlamaktadır. / This model provides a satisfactory prediction of cutting forces for aluminum alloy Al7075-T6.

Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

Parmak Frezeleme Sırasında Takım Salgısının Etkisi Dahil Edilerek Kesme Kuvvetlerinin Tahmini ve Analizi

Araştırma Makalesi / Research Article

Mehmet AYDIN*

Güzel Sanatlar ve Tasarım Fakültesi, Endüstriyel Tasarım Bölümü, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 24.02.2020 ; Kabul/Accepted : 18.11.2020 ; Erken Görünüm/Early View : 25.11.2020)

ÖZ

Bu çalışmada, parmak frezelemede kesme kuvvetlerini tahmin etmek için takım salgısının etkilerini içeren bir kesme kuvveti modeli sunulmuştur. Modelde, parmak freze helis açısının etkisini yansıtmak için ekseni boyunca bir dizi disk elemana ayrılmıştır. Kesme kuvvetleri, kuvvet katsayılarının ortalama talaş kalınlığının üstel fonksiyonları olarak tanımlandığı mekanistik model ile her bir zaman aralığında tahmin edilmiştir. Takım salgısının talaş yükü üzerindeki etkisi kesici kenarların gerçek yolu esas alınarak incelenmiştir. Ayrıntılı bir analiz, takım salgısının kesme kuvveti desenini dış geçiş frekansından iş mili dönme frekansına değiştirdiğini göstermektedir. Bu model, Al7075-T6 alüminyum alaşımı için literatürde bulunan deneysel kesme kuvvetlerinin benzetimden elde edilenlerle karşılaştırılmasıyla da doğrulanmış ve kesme kuvvetlerinin tahmin edici bir tahmini sağlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Kesme kuvveti, mekanistik model, parmak frezeleme, takım salgısı.

Prediction and Analysis of Cutting Forces Including the Effect of Tool Runout During End Milling

ABSTRACT

In this study, a cutting force model is presented, which includes the effects of tool runout to predict cutting forces in end milling. In the model, the end mill is separated into a series of disc elements along its axis to reflect the effect of the helix angle. The cutting forces are predicted at each time interval with a mechanistic model in which the force coefficients are defined as the exponential functions of the average chip thickness. The effect of tool runout on chip load is considered based on the true path of the flutes. An in-depth analysis indicates that tool runout shifts the cutting force pattern from the tooth passing frequency to the spindle rotational one. This model is also validated with the comparison of experimental cutting forces available in the literature with those from simulation for aluminum alloy Al7075-T6, and provides a satisfactory prediction of cutting forces.

Keywords: Cutting force, mechanistic model, end milling, tool runout.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Kesici takım salgısı, çok ağızlı takımlarla gerçekleştirilen frezeleme işlemleri gibi talaş kaldırma işlemlerinin performansını etkilemektedir. Parmak frezelemede, salgı genellikle ayarlı vida tipi takım tutucular kullanıldığında iş mili dönme merkezine göre kesici takımın ofsetlenmesi nedeniyle oluşur. Salgı, talaş yükünün çok ağızlı kesici takımın dönüşü boyunca değişmesine neden olur. Bu değişken talaş yükü, ortalama ve tepe kuvvetlerini ve anlık kuvvet profilini kesme koşullarına, kesme geometrisine, salgının doğasına ve derecesine bağlı olarak değiştirir [1].

Genellikle, kesme kuvveti model formülasyonlarında veya analizinde salgı bulunmadığı varsayılmaktadır [2-5]. Bununla birlikte, kesici takım salgısının etkilerinin dahil edildiği kesme kuvveti modelleri de önerilmiştir. Frezelemede kesici takım salgısı ile ilgili çalışmalar üç ana başlık altında ele alınabilir. Birinci grup çalışmalar, frezelemede kesme kuvveti tahminine yönelik

modellerde takım salgısının etkisini içermektedir [6, 7]. En yaygın salgı biçimi, iş milinin dönme ekseninden kesici takım merkezinin paralel aksel ofsetlenmesidir. Aksel ofset salgısının kuvvet ve geometri üzerindeki etkileri Kline ve DeVor [1] tarafından detaylı olarak incelenmiştir. Bu salgı tipinde, takım tutucunun ofset tarafındaki kesici kenarlar daha büyük efektif yarıçapa sahip olmasından dolayı karşı taraftakilere göre daha yüksek talaş yüküne maruz kalır ve bu da daha yüksek tepe kuvvetlerine ve eşit olmayan takım aşınmasına yol açar. Li ve arkadaşları [8] helisel parmak frezelemede oluşan kesme kuvvetlerinin tahmini için Oxley'in kestirimci işleme teorisine [9] dayalı teorik bir model sunmuşlardır. Daha sonra, modellerini helisel parmak frezelemede kesme kuvvetlerinin tahmininde kesici takım salgısının etkilerini içerecek şekilde geliştirmişlerdir [10]. Diez ve arkadaşları [11] takım salgısını içeren kesme kuvveti modellerini değerlendirmek için aynı takım ve aynı kesme koşullarında kesici takım salgısının değişimini incelemişlerdir. Araştırılan bir diğer husus, takım salgısı ile takım deformasyonları arasındaki ilişkidir. Sutherland

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : mehmet.aydin@bilecik.edu.tr

ve DeVor [12] bilgisayar destekli nümerik bir model sunmuşlar ve kesme sistemi sapmalarının salgının kesme kuvvetleri üzerindeki etkilerini azalttığını göstermişlerdir.

İkinci grup araştırmalar, takım salgısının belirlenmesi ile ilgili çalışmaları içermektedir. Heckman ve Liang [13] kesici takım salgısının süreç içinde izlenmesi için bir yöntem geliştirmişlerdir. Takım salgısı, kesme kuvveti verilerinden de analiz edilebilir. Yun ve Cho [14] ölçülen kesme kuvvetlerini kullanarak salgıyla ilgili parametreleri belirlemişlerdir. Ayrıca, kesici takım salgısını kesici ofseti ve konum açısı parametreleri açısından incelemişlerdir. Rivière-Lorphèvre ve Filippi [15] frezeleme işleminde kesme kuvvetlerini tahmin etmek için ihtiyaç duyulan salgi parametrelerini belirlemek için radyal salgıyı kullanmışlardır. Son zamanlarda, silindirik [16] ve küresel uçlu parmak frezeler [17] için benzer yaklaşımlar kullanılarak çeşitli çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

Üçüncü grup çalışmalar, takım salgısının kesme kuvvetleri üzerindeki etkilerini azaltmak için takım salgısının yol açtığı talaş kalınlığı değişiminin düzeltilmesi üzerine gerçekleştirilmiştir [18]. Bu işlem, piezoelektrik ilerleme sürücüsü ile her bir iş mili devrinde diş başına ilerlemenin hızlı bir şekilde değiştirilmesini gerektirmektedir [11].

Bu çalışmada, helisel parmak frezelemede kesme kuvvetlerini tahmin etmek için kesici takım ofsetlenmesi salgi tipinin etkisinin dahil edildiği kapsamlı bir benzetim modeli sunulmuştur. Model, anlık talaş yükünü hesaplamak için iş mili dönme merkezine göre her bir dişin değişen yarıçapının etkisini içermektedir. Frezeleme kuvvetleri iş parçası malzemesi, kesici takım geometrisi ve kesme koşullarına bağlı olarak tahmin edilmiştir. Kesme kuvveti benzetim modeli, Al7075-T6 alüminyum alaşımı üzerinde gerçekleştirilen bir dizi parmak frezeleme deneyi ile doğrulanmıştır.

2. MEKANİSTİK KESME KUVVETİ MODELİ (MECHANISTIC CUTTING FORCE MODEL)

Talaş yükünü, parmak frezelemedeki diferansiyel teğetsel ve radyal kuvvet bileşenleriyle ilişkilendiren ve ampirik ilişkileri kullanan mekanistik kuvvet tahmin modelleri geliştirilmiştir [1, 2, 16, 19]. Bu çalışmada, Kline ve DeVor [1] tarafından tanımlanan mekanistik kuvvet tahmin modeline dayalı zaman-bölgesi benzetimi uygulanmıştır. Zaman-bölgesi benzetiminde, kuvvetler dt zaman adımlarında sayısal integrasyonla ve her bir zaman adımında kesici takım $d\theta$ açıyla döndürerek belirlenmiştir.

Aynı yönlü frezeleme genellikle havacılık ve uzay uygulamalarında kullanılmaktadır ve bu çalışmada ele alınmıştır. Şekil 1 aynı yönlü frezeleme için düz uçlu parmak frezeleme işleminin geometrisini, koordinat sistemini ve kesici kenarlar üzerindeki talaş yükü elemanlarını göstermektedir. Kesme kuvvetlerini tanımlamak için orijini kesici takım ekseninin alın düzlemi ile kesişen bir koordinat sistemi kullanılmıştır. X

yönü, iş parçasına göre kesici takım ilerleme yönünü belirtmektedir, Z yönü kesici takım eksenini boyunca yukarı doğrudur ve Y yönü ilerlemeye normaldir.

Helis açısını (α_{helis}) hesaba katmak için parmak freze Z yönünde eksenini boyunca N_z sayıda disk elemana bölünür. Bir diskteki her bir kesici kenarın konumu belirlenir ve kesmeye başlayan her bir kesici kenar için talaş kalınlığı kesici takım üzerine etki eden anlık talaş yükünü verir. Kesici takımın açısal pozisyonu değiştikçe talaş yükü yeniden hesaplanır.

Kesici kenar konum açısı ($\beta(i, j, k)$) kesici takımın j 'ninci açısal pozisyonu ($\theta(j)$), k 'ninci kesici kenarı ve i 'ninci aksinel disk elemanı üzerindeki bir kesme noktası için Denklem (1) ile ifade edilebilir:

$$\beta(i, j, k) = \theta(j) + (k-1)\gamma + i dz(\tan(\alpha_{helis})/R) \quad (1)$$

burada dz aksinel disk kalınlığı ve R kesici takım yarıçapıdır.

$\theta(j)$ kesici takımın referans açısal konumudur ve açısal artış miktarını ($d\theta$) indeksleyerek başlangıç referans açısına (α) göre hesaplanır:

$$\theta(j) = \alpha + j d\theta \quad (2)$$

Komşu kesici kenarlar arasındaki açısal boşluk (γ) şu şekilde tanımlanır:

$$\gamma = 2\pi/N_f \quad (3)$$

burada N_f kesici kenar sayısıdır.

Şekil 2 kesici kenar boyunca etki eden diferansiyel kuvvet bileşenleri ile birlikte parmak frezenin üç boyutlu geometrisini göstermektedir. Önceki çalışmalarda olduğu gibi [1, 2], dz yüksekliğine sahip diferansiyel kesici kenar elemanına etki eden teğetsel (dF_t) ve radyal (dF_r) kesme kuvveti bileşenlerinin talaş kalınlığıyla orantılı olduğu varsayılır ve Denklem (4) ve (5)'e göre hesaplanabilir:

$$dF_t(i, j, k) = K_t t_c(i, j, k) dz \quad (4)$$

$$dF_r(i, j, k) = K_r dF_{t,j}(i, j, k) \quad (5)$$

burada K_t ve K_r sırasıyla teğetsel ve radyal kesme kuvveti katsayılarını göstermektedir. t_c deforme olmamış talaş kalınlığıdır.

Diferansiyel teğetsel ve radyal kuvvetler basit bir koordinat dönüşümü yoluyla kartezyen koordinatlarda dik kuvvet bileşenlerine ayrılır ve Denklem (6) ve (7) ile kesici kenarlar üzerinde toplanır:

$$dF_x(i, j) = \sum_{k=1}^{N_f} [-dF_t(i, j, k) \cos(\beta(i, j, k)) - dF_r(i, j, k) \sin(\beta(i, j, k))] \quad (6)$$

$$dF_y(i, j) = \sum_{k=1}^{N_f} [dF_t(i, j, k) \sin(\beta(i, j, k)) - dF_r(i, j, k) \cos(\beta(i, j, k))] \quad (7)$$

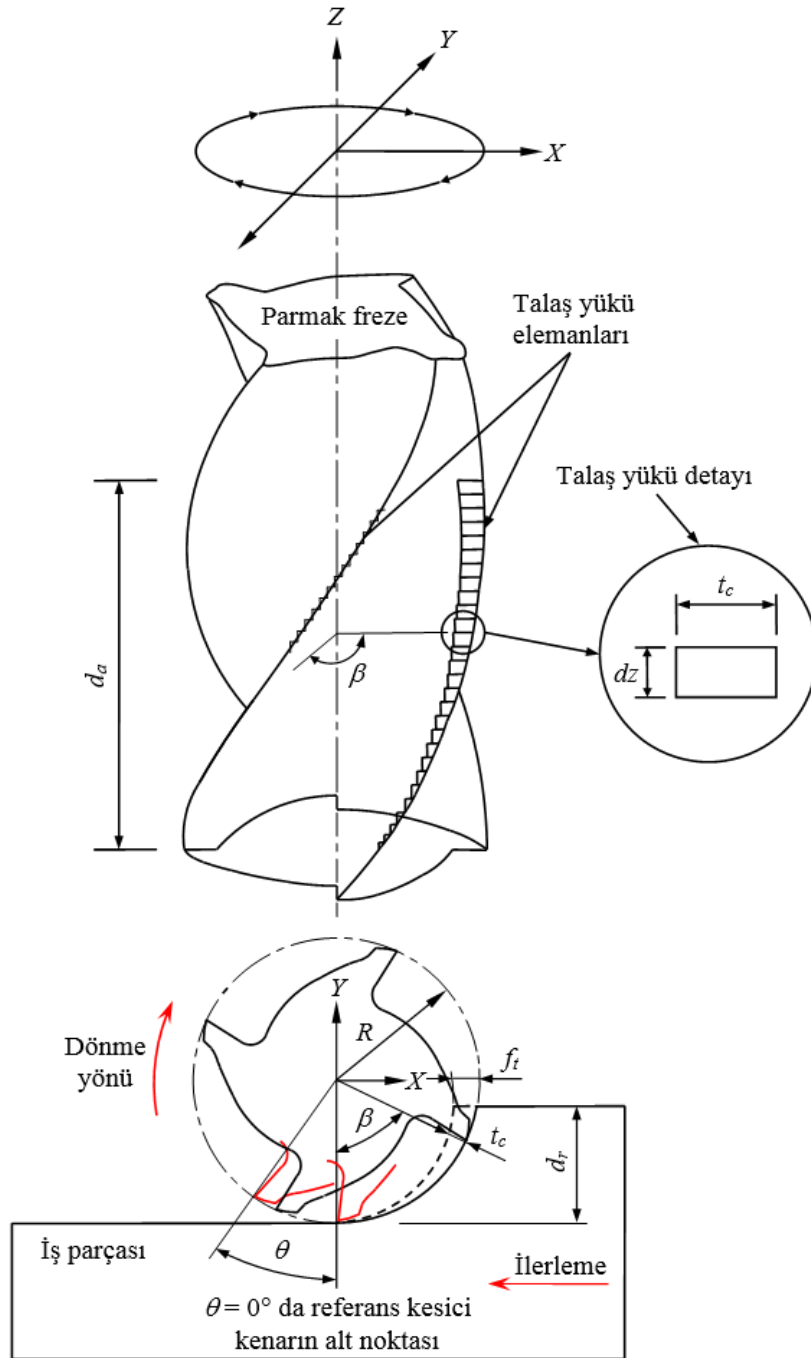
burada $dF_x(i, j)$ i 'nci disk eleman ve j 'nci açılal konumda kesici takım üzerindeki ilerleme kuvvetidir ve $dF_y(i, j)$ kesici takım üzerindeki normal kuvvettir.

j 'nci açılal konumda kesici takım üzerine etki eden toplam anlık ilerleme ve normal kuvvetleri Denklem (8) ve (9) ile tüm disk elemanlar üzerindeki kuvvetler toplanarak elde edilir.

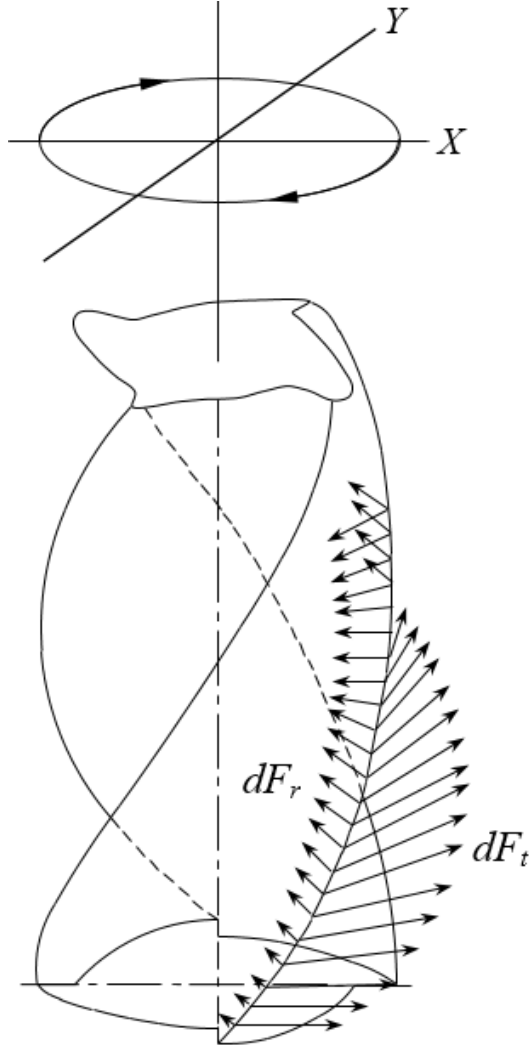
$$F_x(j) = \sum_{i=1}^{N_z} dF_x(i, j) \quad (8)$$

$$F_y(j) = \sum_{i=1}^{N_z} dF_y(i, j) \quad (9)$$

burada $F_x(j)$ j 'nci açılal konumda kesici takım üzerindeki toplam anlık ilerleme kuvveti ve $F_y(j)$ kesici takım üzerindeki toplam anlık normal kesme kuvveti ve N_z aksenal disk elemanların sayısıdır.



Şekil 1. Aynı yönlü frezeleme işlemi (Down-milling operation) [1, 20]



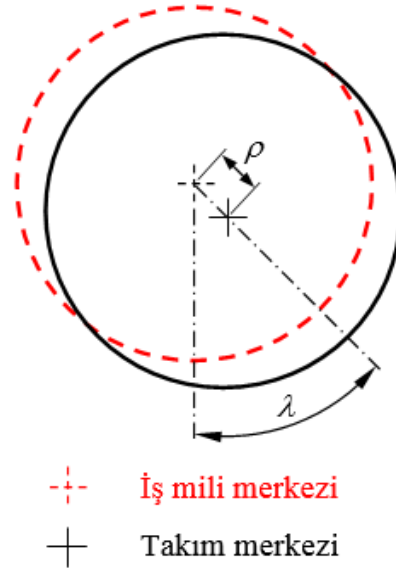
Şekil 2. Kesme kuvveti bileşenleri ile birlikte üç boyutlu parmak freze geometrisi (Three-dimensional end mill geometry with cutting force components) [1, 20]

3. TAKIM SALGISINI İÇEREN DEFORME OLMAMIŞ TALAŞ KALINLIĞI MODELİ (UNDEFORMED CHIP THICKNESS MODEL INCLUDING TOOL RUNOUT)

3.1. Takım Merkezi Konumu (Tool Centre Position)

Takım merkezinin konumu kesici takım sehimi, salgı, ısıl hata ve aşınma gibi faktörlerden dolayı nominal konumundan sapar. Bu faktörlerden kesici takım salgısı sapmaların önemli bir miktarını oluşturur. Kesici takım eksenini ofsetlenmesi, kesici takım eksenini eğimi, kesici takımın taşlanmasıdaki hatalar, dinamik balans eksikliği, uç boyutu veya uçların ayarı gibi bir takım sebeplerden kaynaklanabilecek iki çeşit kesici takım salgısı (radyal ve aksenal salgı) vardır. Aksenal salgı genellikle kesme derinliğine kıyasla çok küçüktür; bu nedenle kesme kuvvetleri üzerindeki etkisi ihmal edilebilir. Bununla birlikte, radyal salgı, diş başına ilerleme ile aynı etkiyi göstermektedir [10]. Radyal salgı, her dişin farklı talaş yüküne maruz kalmasına neden olabilir.

Kesici takım, takım tutucuya bağlandığında meydana gelen radyal salgı, Şekil 3'deki gibi tanımlanabilir. Salgı ofset miktarı (ρ), komparatör veya lazer interferometre kullanılarak ölçülebilir, ancak konum açısının (λ) bulunması kolay değildir. Bu açı, öngörülen kesme kuvvetlerinin başlangıç durumunu belirler.



Şekil 3. Radyal salgı parametreleri (The parameters of radial runout) [15]

Kesici takım salgısının etkisini içeren takım merkezinin X-Y koordinat sistemindeki anlık konumu (x_{am} , y_{am}) frezeleme işleminin analizinden aşağıdaki gibi elde edilebilir:

$$x_{am} = \rho \sin(\theta + \lambda) + (t - t_0) f \quad (10)$$

$$y_{am} = \rho \cos(\theta + \lambda)$$

burada f ilerleme hızı, t zaman ve t_0 başlangıç zamanıdır.

3.1.1. Kesici kenarın anlık konumu (Instantaneous position of flute)

Takım merkezinin konumu (x_{am} , y_{am}) ve dönme açısı (β) biliniyorsa, iş mili veya koordinat merkezine göre i 'nci kesme elemanı (disk) ve k 'nci kesici kenar üzerindeki bir kesme noktasının X ve Y yönlerindeki anlık konumu şu şekilde hesaplanabilir:

$$x_{im}(i, k) = R \sin \beta(i, j, k) + x_{am} \quad (11)$$

$$y_{im}(i, k) = R \cos \beta(i, j, k) + y_{am}$$

3.2. Deforme Olmamış Talaş Kalınlığı Hesaplaması (Undeformed Chip Thickness Calculation)

3.2.1. Geometrik deforme olmamış anlık talaş kalınlığı modeli (Geometric undeformed instantaneous chip thickness model)

Kesici takım salgısının olmadığı ideal frezelemede, her diş için talaş yükü, dişin aynı açısız konumu için aynıdır. dz kalınlığında i 'nci aksenal diferansiyel disk, kesici

takımın j 'nci açısal konumu $\theta(j)$ ve k 'nci kesici kenar göz önüne alındığında salgisız frezeleme için anlık talaş kalınlığı denklemi şöyle ifade edilebilir:

$$t_c(i, j, k) = f_t \sin \beta(i, j, k) \quad (12)$$

burada f_t diş başına ilerlemeyi göstermektedir.

Bu modelde, deforme olmamış talaş kalınlığı, iki ardışık kesme yüzeyi arasındaki mesafedir ve kesici takımın dönmesi ile değişir. Yalnızca kesici geometrisi ve diş başına ilerlemeyi yansıttığı için doğruluktan bir miktar ödün vermektedir.

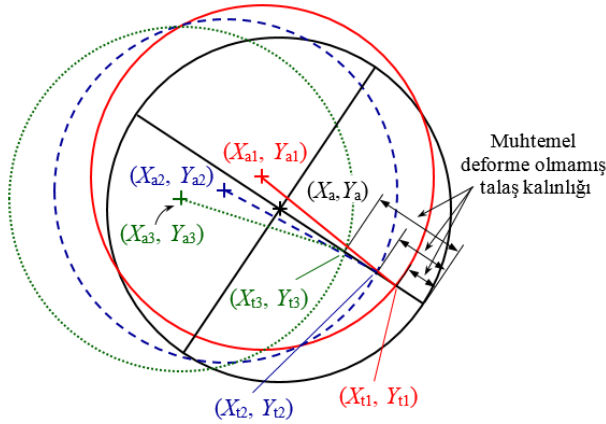
3.2.2. Fiziksel deforme olmamış talaş kalınlığı modeli (Physical undeformed chip thickness model)

Fiziksel bir modelde deforme olmamış talaş kalınlığı, kesici takımın hareketini izleyerek (frezeleme işleminde gerçek diş yörüngelerine dayanarak) hesaplanır. Deforme olmamış talaş kalınlığı, mevcut dişin oluşturduğu yol ile önceki dişin oluşturduğu iş parçası yüzeyi arasındaki mesafedir [14].

Şekil 4'deki gibi, benzetimin her bir zaman adımında anlık deforme olmamış talaş kalınlığını belirlemek için önceki kesici merkez konumu (x_{am}, y_{am}) bilinmelidir. Ayrıca, önceki dişin aynı açısal yöndeki kesici kenarının konumu (x_{tm}, y_{tm}) kesme geometrisinden bulunabilir ($m=1, \dots, N_f$):

$$y_{tm}(m) = \frac{-1}{\tan(\beta)} x_{tm}(m) \quad (13)$$

$$(x_{tm}(m) - x_{am}(m))^2 + (y_{tm}(m) - y_{am}(m))^2 = R^2 \quad (14)$$



Şekil 4. Deforme olmamış talaş kalınlığı hesaplama geometrisi (Undeformed chip thickness calculation geometry) [14]

Yukarıdaki denklemlerden, kesici takım salgisının etkisini içeren deforme olmamış talaş kalınlığı (t_c) aşağıdaki gibi elde edilebilir:

$$t_{c,m}(i, j, k, m) = R - \sqrt{(x_{tm} - x_{am})^2 + (y_{tm} - y_{am})^2} \quad (15)$$

$$t_c(\beta) = \text{Max}[0, \text{Min}(t_{c,m}(i, j, k, m))] \quad (16)$$

burada kesici takımın önceki zaman adımında belirlenen takım merkezi koordinatları $(x_{am}(m))$ ve $y_{am}(m)$

Denklem (10) ve m noktasının koordinat değeri $(x_{tm}(m))$ ve $y_{tm}(m)$ Denklem (11) kullanılarak hesaplanabilir.

Mekanistik kesme kuvveti modeli, Denklem (16)'da verilen fiziksel deforme olmamış talaş kalınlığı kullanıldığında fiziksel kesme kuvveti modeli olarak adlandırılabilir.

4. KESME KUVVETİ KATSAYILARININ VE SALGI PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ (IDENTIFICATION OF CUTTING FORCE COEFFICIENTS AND RUNOUT PARAMETERS)

4.1. Kesme Kuvveti Katsayılarının Belirlenmesi (Identification of Cutting Force Coefficients)

Kesme kuvveti katsayılarını hesaplamak için \bar{F}_x ve \bar{F}_y ortalama kuvvetlerinin farklı ilerleme hızlarında gerçekleştirilen frezeleme testlerinden deneysel olarak elde edilmesi gerekir. Ölçülen kuvvetlerden K_t ve K_r 'nin hesaplanması üzerinde salgi çok az etkiye sahiptir ve salginın seviyesi arttıkça devir başına kaldırılan toplam malzeme miktarı sabittir. Bu nedenle, K_t ve K_r için tahminler salginın varlığına bakılmaksızın yapılabilir [1]. K_t ve K_r kesme kuvveti katsayıları şu şekilde belirlenebilir [21]:

1. İş parçası malzemesi, kesici takım ve işleme koşullarının bir aralığı için ölçülen kuvvet verileri elde edilir ve ortalama kuvvet değerleri hesaplanır,
2. Her bir test için elde edilen ortalama kuvvet değerlerinden aşağıdaki ifadeler kullanılarak K_t ve K_r belirlenir,

$$\left. \begin{aligned} K_t &= \frac{P \bar{F}_y - Q \bar{F}_x}{P \bar{F}_x + Q \bar{F}_y} \\ K_r &= \frac{P \bar{F}_y - Q \bar{F}_x}{P \bar{F}_x + Q \bar{F}_y} \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

burada

$$\left. \begin{aligned} P &= \frac{d_a N_f}{2\pi} [\cos 2\beta]_{\beta_s}^{\beta_e} \\ Q &= \frac{d_a N_f}{2\pi} [2\beta - \sin 2\beta]_{\beta_s}^{\beta_e} \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

3. Ortalama kuvvetlerden elde edilen K_t ve K_r değerleri daha sonra ortalama talaş kalınlığıyla ilişkilendirilerek ampirik modeller geliştirilir. Frezelemede talaş kalınlığı sürekli değiştiğinden, kaldırılan talaş hacminin talaş alanına oranı olarak tanımlanan ortalama talaş kalınlığı (\bar{t}_c) kullanılır:

$$\bar{t}_c = \frac{d_a \int_{\beta_s}^{\beta_e} f_t \sin \beta d\beta}{d_a (\beta_e - \beta_s)} \quad (19)$$

burada d_a aksel kesme derinliğidir. β_s ve β_e sırasıyla giriş ve çıkış açılarıdır. K_t ve K_r kesici kenar periyodundaki ortalama talaş kalınlığının (\bar{t}_c) fonksiyonu olarak modellendiğinde aşağıdaki ampirik fonksiyonlar elde edilir:

$$K_t = K_T \bar{t}_c^{-p} \quad (20)$$

$$K_r = K_R \bar{t}_c^{-q} \quad (21)$$

burada K_T , K_R , p ve q sabitleri belirli bir takım-iş parçası çifti için \bar{t}_c ile K_t ve K_r 'nin logaritmik değişimleri üzerinde gerçekleştirilen lineer regresyonlardan belirlenir.

4.2. Salgı Parametrelerinin Belirlenmesi (Identification of Runout Parameters)

Kesici takım salgısı olması durumunda, kesme kuvvetleri bir devir boyunca farklı tepe değerlerine sahip olabilir. Salgıyı ortadan kaldırmak için ayarlı vida tipi takım tutucu kullanılır ve takım tutucu iş miline bağlanır. Kesici takımın taşlanması hataları 0.0001 inç'ten daha küçüktür. Bu hassasiyetle bile, testlerde kullanılan parmak freze için salgı ofseti (ρ) 0.001 inç ve konum açısı (λ) 15° olarak ölçülmüştür [1].

5. BENZETİMLER VE DENEYLER (SIMULATIONS AND EXPERIMENTS)

Kesme kuvveti modelleme yaklaşımının etkinliği, Kline ve DeVor [1] tarafından gerçekleştirilen bir dizi işleme deneyi ile doğrulanmıştır. Deneyler, Al7075-T6 alüminyum alaşımı için kesme geometrisini (radyal derinlik, aksel derinlik ve ilerleme) değiştirerek Kearney & Trecker yatay freze tezgahında gerçekleştirilmiştir. Kesici takımlar dört kesici kenarlı, 30° helis açılı ve 0.75 inç çapında yüksek hız çeliği parmak frezelerdir. Anlık F_x ve F_y kuvvet sinyalleri gerinim halkası platformu dinamometresi ve mikroişlemci kontrollü veri toplama sistemi kullanılarak ölçülmüş ve kaydedilmiştir. Her bir test için örnekleme oranı 680 numune/saniye olarak ayarlanmıştır. Çizelge 1 kesme kuvveti katsayılarının belirlenmesi için her bir testte kullanılan kesme koşullarını göstermektedir.

Şekil 5 ve 6 ortalama talaş kalınlığının fonksiyonu olarak K_t ve K_r kesme kuvveti katsayılarının değişimini göstermektedir. Her bir veri setine üstel (yarı-logaritmik fonksiyon) bir model uydurulmuş ve Denklem (22) ve (23)'de verilen ampirik ilişkiler elde edilmiştir.

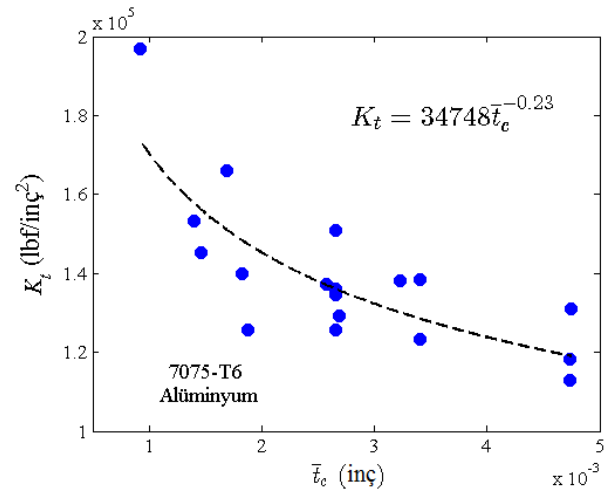
$$K_t = 34748 \bar{t}_c^{-0.23} \quad (22)$$

$$K_r = 0.0861 \bar{t}_c^{-0.29} \quad (23)$$

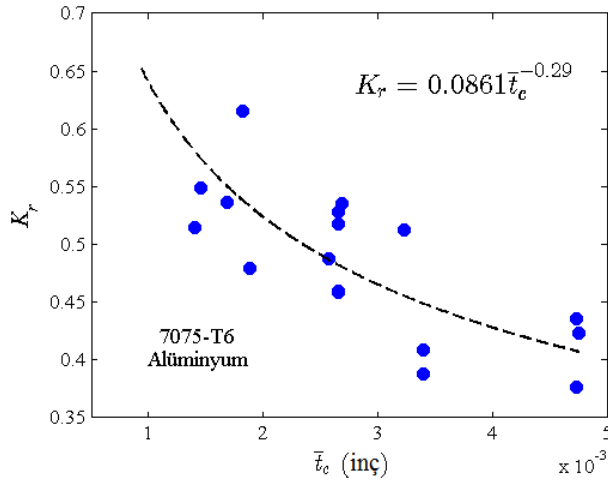
Denklem (22) ve (23) veri tabanı aralığında ortalama talaş kalınlığına sahip her bir kesme koşulu için F_x ve F_y kuvvetlerini tahmin etmek için kesme kuvveti eşitliklerine yerleştirilir.

Çizelge 1. Kesme kuvveti katsayılarının belirlenmesi için kesme koşulları (The cutting conditions for identification of cutting force coefficients) [1]

Test	Kesme hızı, V (ayak/dakika)	Radyal kesme derinliği, d_r (inç)	Eksenel kesme derinliği, d_a (inç)	Diş başına ilerleme, f_t (inç/diş)
1	100	0.21	1.3	0.003
2	100	0.21	1.3	0.0087
3	100	0.09	1.3	0.003
4	100	0.09	1.3	0.0087
5	100	0.15	1.0	0.0052
6	100	0.09	0.7	0.003
7	100	0.09	0.7	0.0087
8	100	0.21	0.7	0.003
9	100	0.21	0.7	0.0087
10	100	0.15	1.5	0.0052
11	100	0.15	1.0	0.0052
12	100	0.15	1.0	0.0052
13	100	0.15	1.0	0.0052
14	100	0.15	1.0	0.010
15	100	0.15	1.0	0.00089
16	100	0.25	1.0	0.0052
17	100	0.05	1.0	0.0052
18	100	0.15	0.5	0.0052



Şekil 5. Ortalama talaş kalınlığıyla K_t 'nin değişimi (Variation of K_t with the average chip thickness)



Şekil 6. Ortalama talaş kalınlığıyla K_r 'nin değişimi (Variation of K_r with the average chip thickness)

Kesme kuvveti modeli, ölçülen ve tahmin edilen ortalama kuvvetlerin karşılaştırılmasıyla doğrulanmıştır. Ortalama kesme kuvvetleri, kesici takımın iki tam devri boyunca anlık F_x ve F_y kuvvet sinyallerinin tepe ve vadi bölgelerindeki kuvvet büyüklükleri incelenerek elde edilmiştir. Her bir test için kuvvet denklemlerinden tahmin edilen ortalama F_x ve F_y kuvvetleri Çizelge 2'de

listelenmiştir. Ölçülen ve tahmin edilen ortalama F_x kuvvetleri arasındaki sapma miktarları % 0 ila 15 arasında değişmektedir. Ortalama F_y kuvvetleri arasındaki sapma miktarları % 2.3 ila 20 arasındadır. Kesici takım salgisının dahil edildiği kesme kuvveti modelleme yaklaşımının ortalama kuvvetlerin tahmini için makul derecede doğru sonuçlar sağladığı çıkarılabilir.

Ölçülen ve tahmin edilen anlık kuvvet sinyallerinin karşılaştırılması ile kesme kuvvetlerinin daha ilginç ve anlamlı bir şekilde doğrulanması sağlanmaktadır. Çizelge 2'deki test 1 için ölçülen ve tahmin edilen anlık F_y kuvvet sinyalleri Şekil 7'de sunulmuştur. Bu kuvvet sinyalleri, kesici takımın iki tam devrine karşılık gelen zaman bölgesini göstermektedir. Şekil 7a ve 7b'de görüldüğü gibi, $\rho = 0.001$ inç ve $\lambda = 15^\circ$ salgi parametreleri altında tahmin edilen ve ölçülen F_y kesme kuvvetleri hem büyüklük hem de kuvvet profili açısından oldukça benzerdir. Kuvvet profillerinin sadece tepe ve vadi bölgelerinde küçük farklılıklar meydana gelmiştir. Bu farklılıklar deforme olmamış talaş kalınlıklarında meydana gelen boyut etkilerine bağlanabilir. Kuvvet modelinde takım aşınması dikkate alınmadığı için tepe bölgelerinde tahmin edilen kuvvetler ölçülenlerden biraz daha büyüktür.

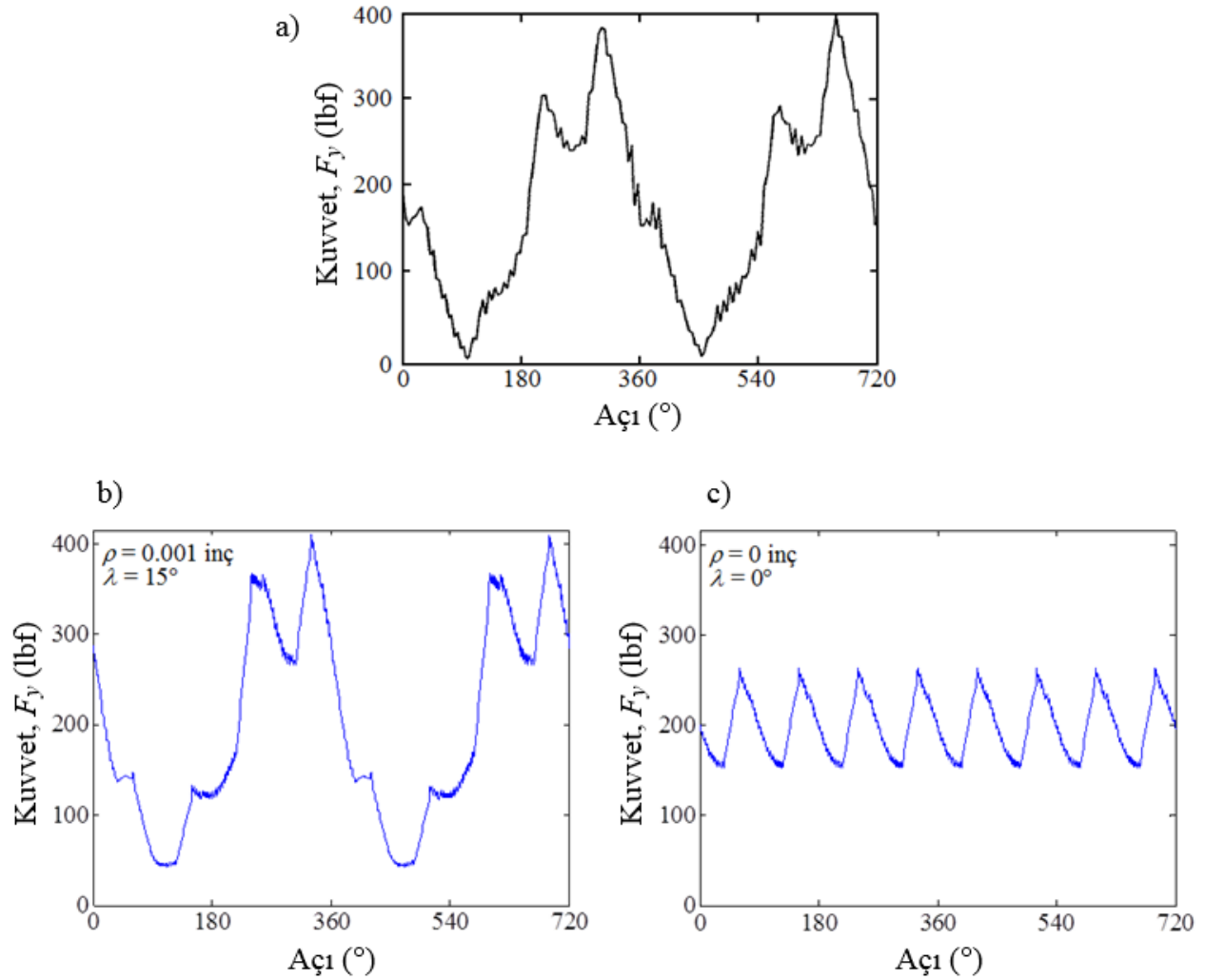
Çizelge 2. Ölçülen ve tahmin edilen ortalama kesme kuvvetleri (The average cutting forces measured and predicted)

Test	Radyal kesme derinliği, d_r (inç)	Eksenel kesme derinliği, d_a (inç)	Diş başına ilerleme, f_i (inç/diş)	Frezeleme tipi	Kuvvet bileşeni	Ölçülen kuvvet (lbf)	Tahmin edilen kuvvet (lbf)	Sapma miktarı (%)
1	0.21	1.3	0.003	Aynı yönlü	F_x	72	76	-5.6
					F_y	173	201	-16.2
2	0.21	1.3	0.0087	Aynı yönlü	F_x	218	201	7.8
					F_y	417	442	-6.0
3	0.09	1.3	0.003	Aynı yönlü	F_x	55	55	0.0
					F_y	80	96	-20.0
4	0.09	1.3	0.0087	Aynı yönlü	F_x	169	152	10.1
					F_y	187	207	-10.7
5	0.15	1.0	0.0052	Aynı yönlü	F_x	85	93	-9.4
					F_y	162	171	-5.6
6	0.09	0.7	0.003	Aynı yönlü	F_x	32	29	9.4
					F_y	44	45	-2.3
7	0.09	0.7	0.0087	Aynı yönlü	F_x	80	68	15.0
					F_y	92	83	9.8
8	0.21	0.7	0.003	Aynı yönlü	F_x	34	38	-11.8
					F_y	114	106	7.0
9	0.21	0.7	0.0087	Aynı yönlü	F_x	113	109	3.5
					F_y	246	216	12.2

Şekil 7a ve 7b’de salgının ilerlemeye oranı büyüktür ve bireysel diş geçiş frekansı iş mili dönme frekansı tarafından neredeyse tamamen engellenmiştir. Başka bir deyişle, salgı iş mili dönme frekansının kuvvet profiline hakim olmasına neden olmuştur. Dolayısıyla, aynı yönlü parmak frezelemede salgı anlık kuvvet sinyali üzerinde oldukça önemli bir etkiye sahiptir.

Şekil 7c salgı olmadığı varsayılarak modelden öngörülen kuvvet profilini göstermektedir. Takım devrinin her bir

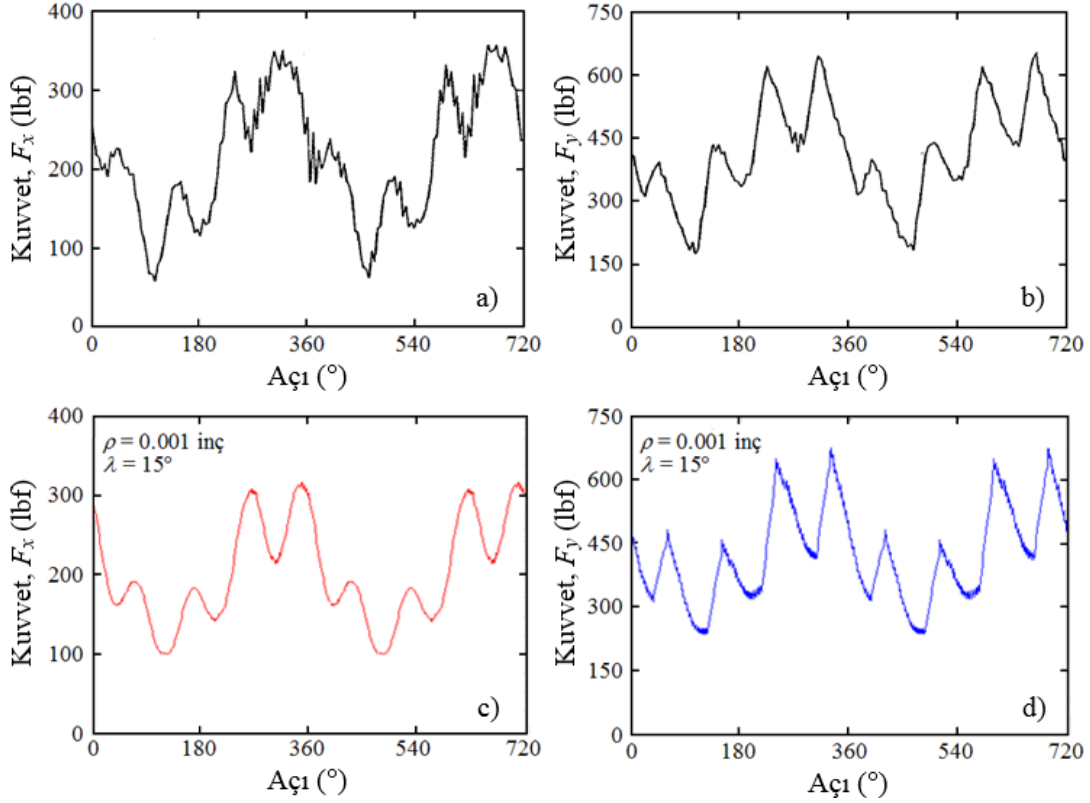
döngüsünde, dört kesici kenarın giriş ve çıkışına karşılık gelen dört kuvvet titreşimi vardır. Her bir titreşimin profil şekli ve büyüklüğü salgı olmadığı için benzer titreşim karakteristiklerine sahiptir. Salgı incelenerek elde edilen Şekil 7a ve 7b’deki kuvvet sinyalleri ve salgı olmadığı varsayılarak tahmin edilen Şekil 7c’deki kuvvet profili karşılaştırıldığında, salgının tepe kuvvetlerinin artmasına, fakat vadi bölgelerindeki kuvvet büyüklüklerinin azalmasına sebep olduğu görülmüştür.



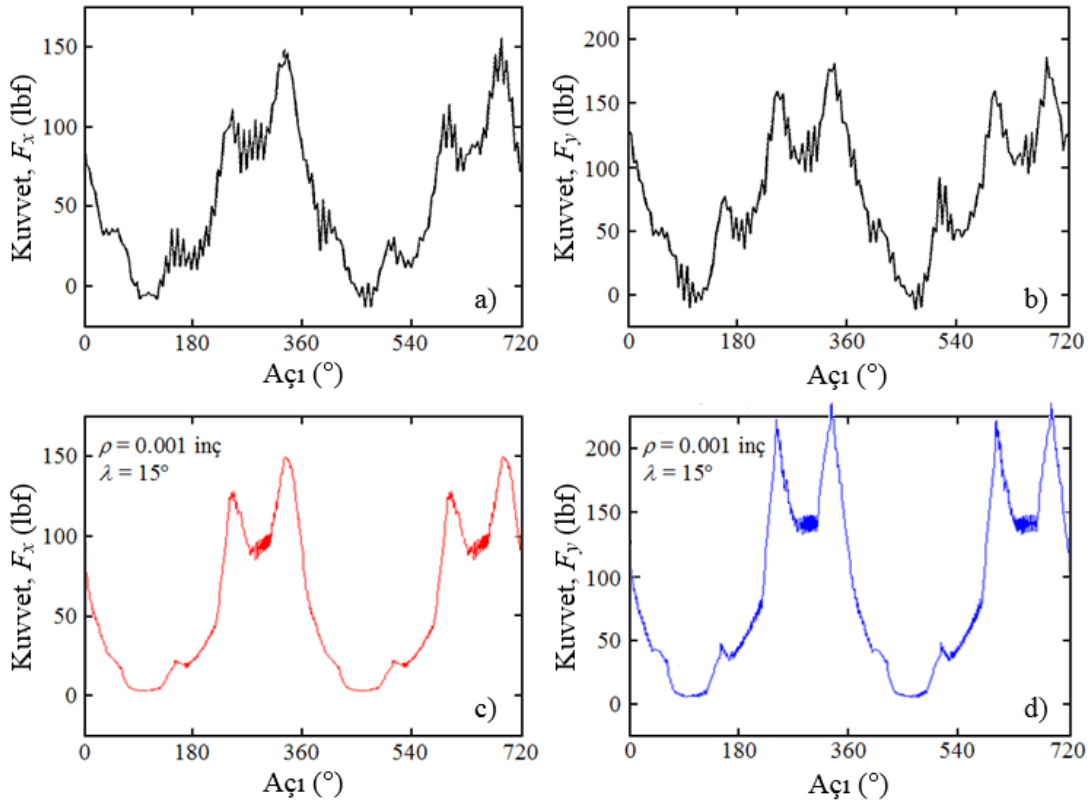
Şekil 7. Test 1 için anlık F_y kesme kuvvetleri: (a) Salgılı ölçülen kuvvetler; (b) Salgılı tahmin edilen kuvvetler; (c) Salgısız tahmin edilen kuvvetler (The instantaneous cutting forces F_y for test 1: (a) Measured forces with runout; (b) Predicted forces with runout; (c) Predicted forces without runout)

Çizelge 2’deki test 2, 3 ve 8 için de ölçülen ve tahmin edilen anlık kesme kuvvetleri Şekil 8, 9 ve 10’da sunulmuştur. Kuvvet tahminleri, test 1’de kullanılan kesme kuvveti katsayıları ve salgı parametreleri ile yapılmıştır. Test 1’deki diş başına ilerleme hızından daha yüksek ilerleme hızı için sonuçlar Şekil 8’de

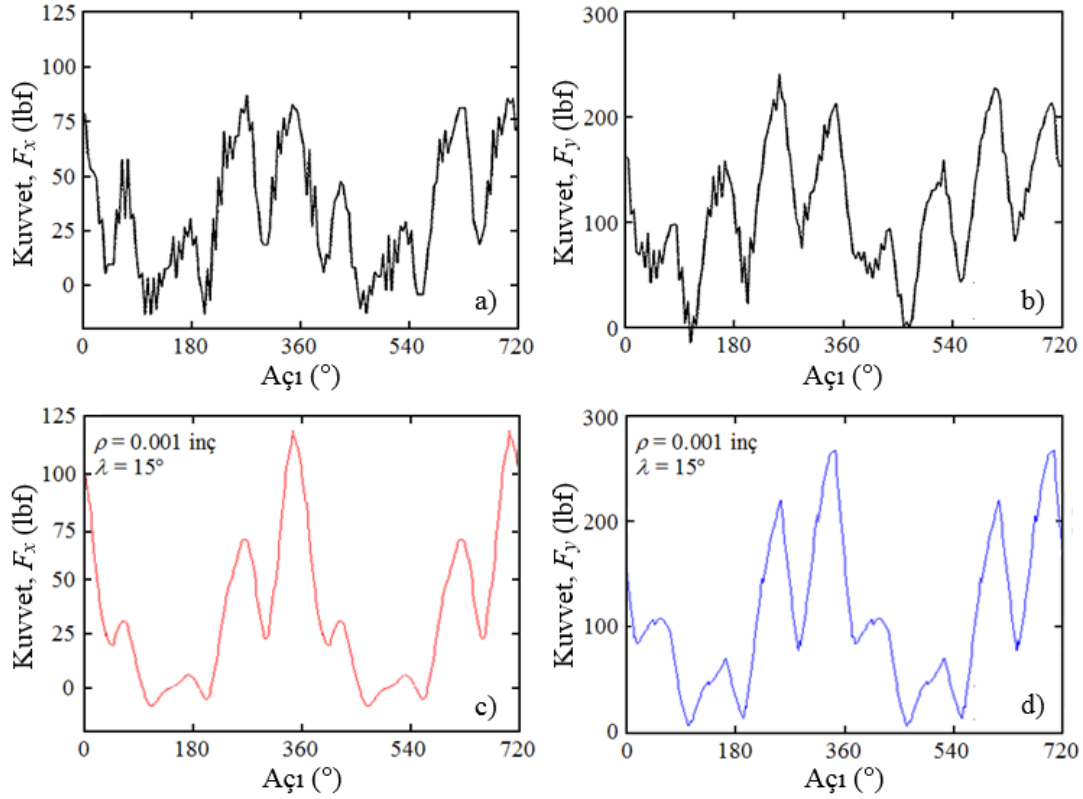
gösterilmiştir (test 2). Şekil 9 ve 10 sırasıyla test 1’den farklı radyal kesme derinliği (test 3) ve farklı eksenel kesme derinliği (test 8) için ölçülen sonuçları tahmin edilen sonuçlarla karşılaştırmaktadır. Bu şekillerde a ve b ölçülen F_x ve F_y kuvvetleridir. Karşılık gelen tahmin edilen kuvvetler c ve d şekillerinde verilmiştir.



Şekil 8. Test 2 için anlık F_x ve F_y kesme kuvvetleri: (a) Ölçülen F_x ; (b) Ölçülen F_y ; (c) Tahmin edilen F_x ; (d) Tahmin edilen F_y
 (The instantaneous cutting forces F_x and F_y for test 2: (a) Measured F_x ; (b) Measured F_y ; (c) Predicted F_x ; (d) Predicted F_y)



Şekil 9. Test 3 için anlık F_x ve F_y kesme kuvvetleri: (a) Ölçülen F_x ; (b) Ölçülen F_y ; (c) Tahmin edilen F_x ; (d) Tahmin edilen F_y
 (The instantaneous cutting forces F_x and F_y for test 3: (a) Measured F_x ; (b) Measured F_y ; (c) Predicted F_x ; (d) Predicted F_y)



Şekil 10. Test 8 için anlık F_x ve F_y kesme kuvvetleri: (a) Ölçülen F_x ; (b) Ölçülen F_y ; (c) Tahmin edilen F_x ; (d) Tahmin edilen F_y
(The instantaneous cutting forces F_x and F_y for test 8: (a) Measured F_x ; (b) Measured F_y ; (c) Predicted F_x ; (d) Predicted F_y)

Yukarıdaki şekillerde görüldüğü gibi, hem X hem de Y yönlerinde tahmin edilen kesme kuvveti bileşenleri dalga şekilleri, genlik ve periyot açısından ölçülen sonuçlarla iyi bir uyum göstermiştir. Ancak, Y yönünde ölçülen kuvvetlerin tepe bölgelerinde küçük bir fark görülmüştür. Takım aşınmasının etkisi nedeniyle Y yönünde ölçülen kuvvet büyüklüklerinin tepe değerleri küçüktür. Genel olarak, test sonuçları sunulan yöntemin etkili olduğunu göstermiştir. Fiziksel talaş kalınlığı modeline dayalı mekanistik kesme kuvveti yaklaşımının gerçek kesme durumlarını iyi derecede yansıttığı çıkarılabilir.

6. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada, kesici takımın salgılı döndüğü parmak frezeleme işlemi sırasında oluşan kesme kuvvetlerini tahmin etmek için fiziksel talaş kalınlığı modeli ve mekanistik kuvvet modeli birleştirilmiştir. Mekanistik model, diferansiyel kesici kenar elemanına etki eden teğetsel ve radyal kesme kuvveti bileşenlerini talaş kalınlığıyla ilişkilendirmektedir. Kesici takım salgı modeli paralel eksen ofsetine dayalıdır ve salgıyı karakterize etmek için kesici takım ofseti ve konum açısı kullanılmıştır. Yapılan çalışmadan aşağıdaki sonuçlar çıkarılabilir:

1. Önerilen yöntemin etkinliği, farklı kesme koşullarında belirli bir kesici takım ve iş parçası için tahmin edilen ortalama kuvvetlerin ve anlık kesme kuvveti profillerinin deneysel değerlerle karşılaştırılmasıyla doğrulanmıştır. Ölçülen ve

tahmin edilen kuvvetler ortalama kesme kuvveti değerleri, genlik, periyot ve yerel kuvvet detayları açısından oldukça iyi bir eşleşme göstermektedir. Ancak, bu sonuç salgı ofseti ve konum açısının doğru bir şekilde ölçülmesini gerektirmektedir.

2. Salgının kesme kuvvetleri üzerindeki etkisi salgı parametreleri ihmal edilerek gösterilmiştir. Salgı, diş geçiş frekansından iş mili dönme frekansına kuvvet sinyalinin frekansını değiştirmektedir. Salgı var olduğunda tepe bölgesinde oluşan kuvvetlerde artış, vadi bölgesindeki kuvvetlerde azalma meydana gelmiştir.
3. Simülasyon sonuçları, frezeleme işlemlerinde kesme kuvvetlerinin tahmini için kesici takım salgısının önemli bir faktör olduğunu göstermiştir. Kesme kuvvetlerini daha doğru bir şekilde modellemek için kesici takım salgısının etkileri dikkate alınmalıdır.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Mehmet AYDIN: Hesaplamaları yapmış, sonuçlarını analiz etmiş ve makalenin yazım işlemini

gerçekleştirmiştir. / Performed the computations, analyzed the results and wrote the manuscript.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur. / There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Kline W.A. and DeVor R.E., “The effect of runout on cutting geometry and forces in end milling”, *International Journal of Machine Tool Design and Research*, 23(2-3): 123-140, (1983).
- [2] Budak E., Altintas Y. and Armarego E.J.A., “Prediction of milling force coefficients from orthogonal cutting data”, *ASME Transactions, Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 118: 216-224, (1996).
- [3] Aydın M., Uçar M., Cengiz A. and Kurt M., “Identification of static surface form errors from cutting force distribution in flat-end milling processes”, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 37: 1001-1013, (2015).
- [4] Aydın M. and Köklü U., “Identification and modeling of cutting forces in ball-end milling based on two different finite element models with Arbitrary Lagrangian Eulerian technique”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 92: 1465-1480, (2017).
- [5] Aydın M. and Köklü U., “A study of ball-end milling forces by finite element model with Lagrangian boundary of orthogonal cutting operation”, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 33(2): 517-527, (2018).
- [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”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 25: 435-443, (2005).
- [7] Kumanchik L.M. and Schmitz T.L., “Improved analytical chip thickness model for milling”, *Precision Engineering*, 31: 317-324, (2007).
- [8] Li H.Z., Zhang W.B. and Li X.P., “Modelling of cutting forces in helical end milling using a predictive machining theory”, *International Journal of Mechanical Sciences*, 43: 1711-1730, (2001).
- [9] Oxley P.L.B., “*Mechanics of machining*”, Ellis Horwood Limited, Chichester, (1989).
- [10] Li X.P. and Li H.Z., “Theoretical modelling of cutting forces in helical end milling with cutter runout”, *International Journal of Mechanical Sciences*, 46: 1399-1414, (2004).
- [11] Diez E., Perez H., Guzman M. and Vizan A., “An improved methodology for the experimental evaluation of tool runout in peripheral milling”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 65: 283-293, (2013).
- [12] Sutherland J.W. and DeVor R.E., “An improved method for cutting force and surface error prediction in flexible end milling systems”, *Transactions of the ASME Journal of Engineering for Industry*, 108(4): 269-279, (1986).
- [13] Hekman K. A. and Liang S.Y. “In-process monitoring of end milling cutter runout”, *Mechatronics*, 7: 1-10, (1997).
- [14] Yun W.-S. and Cho D.-W., “An Improved Method for the Determination of 3D Cutting Force Coefficients and Runout Parameters in End Milling”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 16: 851-858, (2000). [7]
- [15] Rivière-Lorphèvre E. and Filippi E., “Mechanistic cutting force model parameters evaluation in milling taking cutter radial runout into account”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 45: 8-15, (2009).
- [16] Wan M., Zhang W.-H., Dang J.-W. and Yang Y., “A novel cutting force modelling method for cylindrical end mill”, *Applied Mathematical Modelling*, 34: 823-836, (2010).
- [17] Fu Z., Yang W., Wang X., Leopold J., “An analytical force model for ball-end milling based on a predictive machining theory considering cutter runout”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 84, 2449-2460, (2016).
- [18] Diez Cifuentes E., Pérez García H., Guzmán Villaseñor M., Vizán Idoipe A. “Dynamic analysis of runout correction in milling”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 50: 709-717 (2010).
- [19] Aydın M. and Köklü U., “Analysis of flat-end milling forces considering chip formation process in high-speed cutting of Ti6Al4V Titanium Alloy”, *Simulation Modelling Practice and Theory*, 100: 102039, (2020).
- [20] Altintas Y., “*Manufacturing automation, metal cutting, machine tool vibration and CNC design*”, Cambridge University Press, Cambridge, (2000).
- [21] Budak E., “Analytical models for high performance milling. Part I: Cutting forces, structural deformations and tolerance integrity”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 46: 1478-1488, (2006).