

5-Eksen Frezelemede Kuvvet ve Şekil Hatalarının Modellenmesi

Erdem Öztürk¹, Erhan Budak²

¹ Sabancı Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi-İSTANBUL
erdemoz@su.sabanciuniv.edu

² Sabancı Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi -İSTANBUL
ebudak@sabanciuniv.edu

Özet

5 eksen freze operasyonları havacılık, otomotiv ve kalıpcılık sektörlerinde karmaşık yüzeylerin talaşlı imalatında sıklıkla kullanılır. Bütün bu operasyonlarda boyut toleransları ve yüzey kalitesi çok önemlidir. Parçada veya kesici takımında kesme kuvvetleri nedeniyle oluşan esnemeler kabul edilemeyecek parça kalitesine sebep olabilirler. İstenilen kalitenin daha yüksek bir verimlilik ile sağlanması için gerekli olan en iyi frezeleme koşulları süreç modelleri kullanılarak bulunabilir. Küresel uçlu freze takımı için geliştirilenler de dahil olmak üzere, freze modellerinin çoğu 3 eksen operasyonlar için geliştirilmiştir. Bu makalede, küresel uçlu takım kullanılan 5 eksen freze operasyonları için geliştirilen bir kuvvet modeli sunulmaktadır. 5 eksen frezeleme için, kesme kuvvetlerinden dolayı oluşan kesici takım esnemeleri de formüle edilmektedir. Kesme kuvvetleri için modelin tahminleri deneysel sonuçlarla karşılaştırıldı ve doğrulandı.

Anahtar Terimler:5-eksen frezeleme, kesme kuvvetleri, şekil hataları

Abstract

5-axis milling operations are common in several industries such as aerospace, automotive and die/mold for machining of sculptured surfaces. In almost all of these operations, the dimensional tolerance integrity and surface quality are of utmost importance. Part and tool deflections under cutting forces may result in unacceptable part quality. Process models can be used to determine the proper or optimal milling conditions for required quality with higher productivity. Majority of the milling models have been developed for 3-axis operations, even the ones for ball-end mills. In this paper, a complete kinematics and force model is presented for 5-axis milling operations using ball-end mills. Tool deflections due to the cutting forces are also formulated for 5-axis milling. Model predictions for cutting forces are compared and verified by experimental results.

Key Words: 5-axis milling, cutting forces, form errors

1. GİRİŞ

5-eksen küresel uçlu frezeleme kalıp,türbin motoru ve uçakların yapısal elemalarının karmaşık yüzeyli parçalarının üretiminde yoğunlukla kullanılır. Sıklıkla, istenen kalite ve yüzey özellikleri nedeniyle üretim toleransları oldukça düşüktür. Takım ve sürecinin modellenmesi parça esnemeleri şekil hatalarının en önemli sebepleridir. 5 eksen freze ile bu hatalar tahmin edilebilir ve kontrol altında tutulabilir. Bu makalede 5 eksen freze kuvvetlerini ve takım esnemelerini tahmin eden bir model sunulmaktadır.

Metal kesme mekaniği dik ve eğik modeller ile analiz edilebilir. Bununla birlikte, pratikte neredeyse bütün kesme süreçleri eğiktir. Eğik kesme mekaniği bazı çalışmalar ile incelendi. Bunlardan önemli iki tanesi Armarego [1] ve Merchant'ın [2] çalışmalarıdır. Çalışmalarda kesme süreci mekaniğinin formülasyonu benzer olmasına rağmen, pratikte kesme kuvvetlerinin tahmininde kullanılan yaklaşımda önemli farklılıklar vardır. Talaşlı imalat operasyonlarını modellerken karşılaşılan en önemli zorluklardan bir tanesi malzeme kesme katsayılarının tanımlanmasıdır. Bu noktada yaklaşımlar tamamen analitikten, tamamen deneysel kadar farklılık gösterir. Bir yaklaşımda, analiz için kesilen malzemenin akma gerilmesi ve termal özellikleri kullanılır [3]. Mekanistik yaklaşımda, kenar ve kesme kuvveti katsayıları farklı malzeme ve kesici takım çiftleri için kesme testleri yapılarak kalibre edilebilir. Bu yaklaşım küresel uçlu frezelemenin modellenmesinde de kullanılmıştır **Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı..** Bunun yanında frezeleme mekaniği yaklaşımında, kenar ve kesme kuvveti katsayıları malzeme için tanımlanmış olan dik kesme veri tabanı ve eğik model kullanılarak bulunur [4].

3-eksen küresel uçlu frezelemenin modellenmesi konusunda bazı çalışmalar olmasına rağmen, 5-eksen operasyonlar için yapılan çalışmalar oldukça sınırlıdır. Küresel uçlu frezeleme konusundaki önemli çalışmalardan birinde, Lee ve Altıntaş 3-eksen küresel uçlu frezeleme sürecini, frezeleme mekaniğini kullanarak modellemişlerdir [5]. Bu makaledeki 3-eksen küresel uçlu frezeleme geometrik modeli onların çalışmalarını temel almıştır. Şu ana kadar 5-eksen kesme kuvvetleri mekanistik yöntem kullanılarak modellendi [6],[7]. Bu makalede ise, 5 eksen kesme kuvvetleri frezeleme mekaniği kullanılarak modellenmiştir. Bu yöntem kesilen malzemenin dik kesme veritabanını kullanır. Frezeleme mekaniği yöntemi dik kesme veritabanı bir kere çıkarıldıktan sonra, mekanistik yöntemin aksine, her kesme geometrisi için kullanılabilir. Mekanistik yöntemde kesme kuvveti katsayıları her malzeme ve kesme takımı için kalibre edilmek zorundadır.

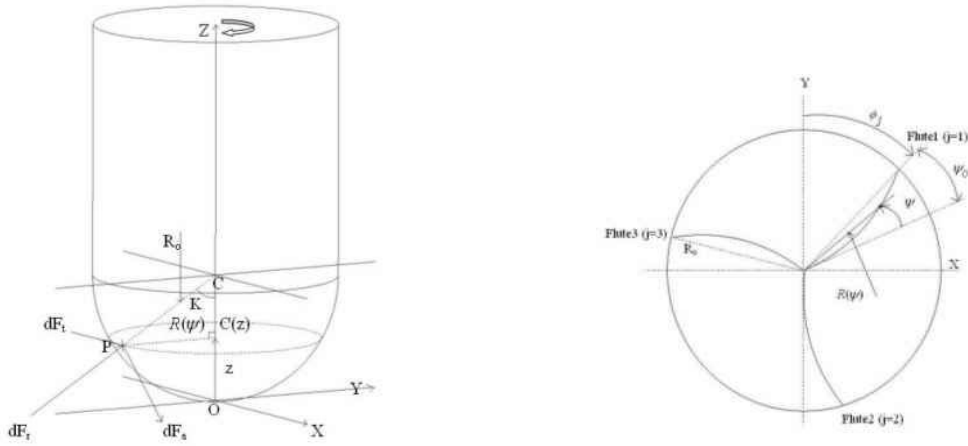
Takım ve parça esnemeleri boyutsal hatalara yol açtığı için kalite yönünden önem taşımaktadır. 3 eksen küresel uçlu frezelemede oluşan şekil hatalarını modellemek için bazı çalışmalar yapılmıştır. Budak [10] düz frezeleme için şekil hatalarını, hem FEM hem kiriş modellerini kullanarak modelledi. Ayrıca, şekil hatalarını en düşük seviyede tutacak en iyi ilerleme ve radyal derinlik parametrelerini veren bir yöntem sundu. Benzer biçimde, Ryu ve diğerleri [11] düz frezelemede kiriş teorisini kullanarak şekil hatalarını tahmin etmişlerdir. Şu ana kadar, literatürde 5 eksen küresel uçlu frezelemede şekil hatalarını modelleyen bir çalışma yoktur. Bu bakımdan, bu çalışma literatüre özgün bir katkı niteliğini de taşımaktadır. Burda sunulan yöntemler ve modeller 5 eksenli frezeleme süreçlerinin analizinde ve en iyi parametre seçiminde kullanılarak verim ve kalitenin artırılmasında önemli faydalar sağlayabilir.

2. KİNEMATİK MODEL

2.1 3-eksen Küresel Uçlu Frezeleme Geometrisi

Küresel uçlu frezenin ayrıntılı geometrisi Şekil 1'de gösterilmiştir. xyz kartezyen koordinat sistemi kürenin ucunda tanımlanır. Bu koordinat sisteminde, z eksen kesici takımın eksen yönünde, x eksen ilerleme doğrultusunda; y eksen ise hem ilerleme hem de aksel yöne dik durumdadır.

Kesici kenar üzerindeki bir noktanın aksel pozisyonu 3 değişik parametre ile tanımlanabilir: gerilik açısı ψ , aksel pozisyon z ve K açısı (Şekil 1). Bu 3 parametre arasındaki ilişki aşağıdaki denklemde gösterilmiştir.



Şekil 1. Küresel uçlu freze geometrisi

$$z = \frac{R(\psi)\psi}{\tan i(\psi)} = R_o(1 - \cos K) \quad (1)$$

Burada:

R_o : kesici takımın yarıçapı

$R(\psi)$: yerel yarıçap

$i(\psi)$: yerel helis açısı'dır.

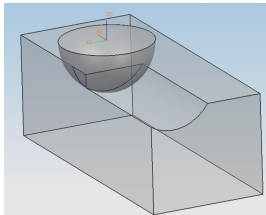
Kesici takımının yarıçapı kürenin ucuna olan aksenal mesafe ile değişir. Bu yüzden kesme hızı, helis açısı gibi parametreler küresel uçlu freze üzerinde değişkendir. Yerel yarıçap $R(z)$ z cinsinden aşağıdaki ilişki ile bulunur.

$$R(z) = \sqrt{R_o^2 - (R_o - z)^2} \quad (2)$$

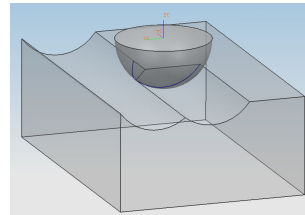
2.2 3 Eksen Frezelemede Kesme Sınırları

Düz frezelemede kesme sınırları, diğer bir ifade ile başlama (ϕ_{st}) ve bitiş (ϕ_{ex}) açıları takım eksenine boyunca sabittir. Küresel uçlu frezelemede ise yerel yarıçap takım eksenine boyunca değiştiğinden başlama ve bitiş açıları aksenal pozisyonun bir fonksiyonudur. Küresel uçlu freze eksenine boyunca dz yüksekliğinde diferansiyel elemanlara bölünür, kesme sınırları her bir eleman için hesaplanır.

Kesme sınırları 2 farklı kesme türü için hesaplanır. Birinci durum önceden kesilmemiş bir parçanın kesilmesi; ikinci durum ise önceden kesilmiş bir parçanın kesilmesidir. Kanal kesme, bu iki durumun ortak noktasıdır.



Şekil 2 Önceden Kesilmemiş bir Parça



Şekil 3. Önceden Kesilmiş bir Parça

2.2.1 Önceden Kesilmemiş bir Parçanın Kesimi

Bu durumda, kesme sınırlarının eksen boyunca değişmesine ek olarak, (3)' de tanımlanan hc yüksekliğinin altında kalan kesici bölgede kesme gerçekleşmez. hc yüksekliği radyal derinlik s , eksenel derinlik a ve kesici takımın yarıçapı R_o 'ya bağlıdır.

$$hc = R_o - \sqrt{R_o^2 - (s - R(a))^2} \quad (3)$$

$R(a)$, takımın $z=a$ yüksekliğindeki yerel yarıçapıdır ve aşağıdaki denklem ile bulunur.

$$R(a) = \sqrt{R_o^2 - (R_o - a)^2} \quad (4)$$

Çizelge 1' de her eksenel pozisyon için kesme sınırlarının nasıl bulunacağı tablo şeklinde gösterilmiştir.

Çizelge 1. Önceden kesilmemiş durum için kesme sınırları

Aşağı Kesme		ϕ_{st}	ϕ_{ex}
$z \geq hc$		$\pi - \cos^{-1}\left(\frac{R(a) - s}{R(z)}\right)$	π
$z < hc$	$s \geq R(a)$	0	π
	$s < R(a)$	π	π
Yukarı Kesme		ϕ_{st}	ϕ_{ex}
$z \geq hc$		0	$\cos^{-1}\left(\frac{R(a) - s}{R(z)}\right)$
$z < hc$	$s \geq R(a)$	0	π
	$s < R(a)$	0	0

2.2.2 Önceden Kesilmiş bir Parçanın Kesimi

Oluk yüksekliği h , yüzey kalitesinin bir ölçütüdür. h , radyal derinlik s ve küresel uçlu frezenin yarıçapı R_o 'ya bağlıdır ve h aşağıdaki denklem ile hesaplanır. Çizelge 2' de her eksenel pozisyon için kesme sınırlarının nasıl bulunacağı tablo şeklinde gösterilmiştir.

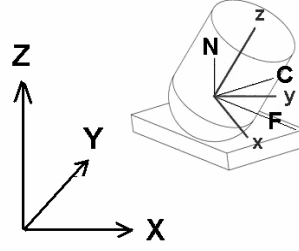
$$h = R_o - \sqrt{R_o^2 - \frac{s^2}{4}} \quad (5)$$

Çizelge 2. Önceden kesilmiş durum için kesme sınırları

Aşağı Kesme		ϕ_{st}	ϕ_{ex}
$z \geq h$		$\pi - \cos^{-1}\left(1 - \frac{s}{R(z)}\right)$	π
$z < h$		0	π
Yukarı Kesme		ϕ_{st}	ϕ_{ex}
$z \geq h$		0	$\cos^{-1}\left(1 - \frac{s}{R(z)}\right)$
$z < h$		0	π

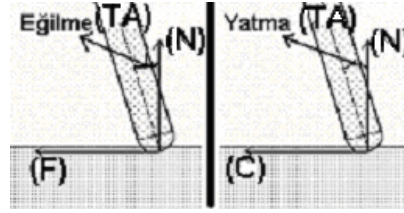
2.3 5-eksen Freze Geometrisi

5-eksen modelde, üç koordinat sistemi kullanılır: parçanın koordinat sistemi (WCS) XYZ ,süreç koordinat sistemi (FCN) ve kesici takımın koordinat sistemi (TCS) xyz; FCN ve TCS koordinat sistemlerinde (0,0,0) noktası kürenin merkezindedir. F eksen i ilerleme yönünde , N eksen i parçanın yüzey normal i yönünde ve C eksen i ilerlemeye ve yüzey normaline dik yöndedir. (Şekil 4). 5 eksen frezelemede, ek olarak 2 kesme parametresi vardır,eğilme ve yatma açıları. Eğilme açısı, kesici takımın yüzey normaline (N) göre C eksen i etrafındaki açısal dönüşüdür. Yatma açısı ise kesici takımın yüzey normaline (N) göre F eksen i etrafındaki açısal dönüşüdür (Şekil 5).



Şekil 4.XYZ (WCS) and xyz (TCS) koordinatları

T transformasyon matrisi kullanılarak kesici takım üzerindeki herhangi bir (x,y,z) noktası TCS 'den WCS' de (X,Y,Z) koordinatlarına transform edilebilir. T matrisi eğilme ve yatma açılarına bağlıdır ve (6) 'da tanımlanmıştır:



Şekil 5. Eğilme ve yatma açıları

$$T = \begin{bmatrix} \cos(lead) & 0 & \sin(lead) \\ \sin(lead) \sin(tilt) & \cos(tilt) & -\sin(tilt) \cos(lead) \\ -\cos(tilt) \sin(lead) & \sin(tilt) & \cos(tilt) \cos(lead) \end{bmatrix} \quad (6)$$

2.3.1 5-eksen Frezelemede Kesme Sınırları

Küresel uçlu freze dz yüksekliğine sahip diferansiyel disk elemanlara bölünür. z yüksekliğindeki bir disk eleman üzerinde her bir dalma açısı ϕ için ,kesici uç üzerindeki noktaların x ve y koordinatları bulunur. Bu koordinatlar WCS'e göre yazılır ve WCS' deki dalma açısı ϕ_{WCS} aşağıdaki şekilde bulunur.

$$\phi_{WCS}(z, \phi) = a \tan 2(F, C) \quad (7)$$

Bir nokta kesme sınırları içinde ise, o noktadaki ϕ_{WCS} açısı, o noktanın Z koordinatı için bulunmuş başlama ϕ_{st} ve bitiş açıları ϕ_{ex} arasında olmalıdır.

2.3.2 Kesilmemiş Talaş Kalınlığı

5-eksen frezelemede, kesici kenar üzerindeki bir noktadaki kesilmemiş talaş kalınlığı t aşağıdaki şekilde bulunur.

$$t(\phi, K) = f_t \sin \phi_{WCS} \sin K_{WCS} \quad (8)$$

Burada

f_t : dış başına düşen ilerlemedir. K_{WCS} aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır.

$$K_{WCS} = \sin^{-1} \left(\frac{R(Z)}{R_o} \right) \quad (9)$$

Talaş kalınlığı db kesici uca teğettir ve (10)'da gösterildiği gibi bulunur.

$$db = \frac{dz}{\sin K_{WCS}} \quad (10)$$

3. KUVVET MODELİ

Kuvvet modelinde, kuvvet katsayıları Budak tarafından kullanılan yöntem ile bulunmuştur. Kenar kuvvet katsayıları K_{re} , K_{te} , K_{ae} doğrudan dik kesme veritabanından alınmış ve kesme kuvveti katsayıları K_{rc} , K_{tc} , K_{ac} ise bu veritabanı kullanılarak hesaplanmıştır [8]. Radyal, teğet ve eksenel yönlerdeki diferansiyel kuvvetler, sırasıyla dF_r , dF_t ve dF_a :

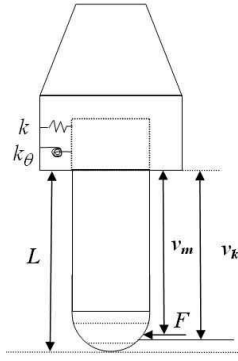
$$\begin{aligned} dF_r(\phi, K) &= K_{re} dS + K_{rc} * t(\phi, K) * db \\ dF_t(\phi, K) &= K_{te} dS + K_{tc} * t(\phi, K) * db \\ dF_a(\phi, K) &= K_{ae} dS + K_{ac} * t(\phi, K) * db \end{aligned} \quad (11)$$

Burada dS diferansiyel elemanın kesici boyudur [5].

dF_r , dF_t ve dF_a kuvvetleri önce TCS koordinat sistemine daha sonrada WCS koordinat sistemine dönüştürülmektedir[9]. Sonra bu diferansiyel kuvvetler kesme sınırları arasında toplanır ve her dalma açısı ϕ için toplam kesme kuvvetleri bulunur.

4. ŞEKİL HATALARI MODELİ

Şekil hatalarını tahmin edebilmek için kesici takım ve kesilecek parça yapısal olarak modellenmekte ve kesme kuvvetleri bu modeller üzerine uygulanmaktadır. Şekil hatası kesici takım ile kesilen parça arasındaki göreceli esnemedir. Bu makalede, genel bir model sunulduğundan ve kesilen parçanın yapısı uygulamaya göre değişken olduğundan, sadece kesici takımın esnemesi hesaba katılmıştır. İhtiyaç duyulduğu takdirde, parçanın esnemesi sonlu elemanlar analizi ile tahmin edilebilir.



Şekil 6. Küresel uçlu frezenin yapısal modeli

Küresel uçlu freze takımı Şekil 6 ' da görüldüğü gibi silindirik bir kiris olarak modellenebilir. x ve y yönündeki kesme kuvvetleri enlemesine, z yönündeki kesme kuvveti ise aksenal bir kuvvettir. Takım tutucu şekil değiştirmiyor kabul edilmiştir ve kesici takım takım tutucuya doğrusal yay k ve açısal yay k_θ ile bağlanmıştır. Kesme testlerinde kullanılan takım için, k ve k_θ değerleri 1000 N'un altındaki kuvvet değerleri için sırası ile 6306 N/mm ve $1.656 \cdot 10^7$ N.mm/rad olarak kalibre edilmiştir.

Takım esnemeleri kiris modeli kullanılarak hesaplanabilir [10] Şekil 6 'da 2 geometrik değişken görülmektedir, v_k ve v_m . v_k takımın tutucuya bağlantı noktası ile yüzey yaratılan noktanın arasındaki aksenal mesafedir; v_m ise takımın bağlanma noktası ile kuvvetin uygulandığı nokta arasındaki aksenal mesafedir. x, y ve z yönlerindeki esnemeler, sırası ile δ_x , δ_y ve δ_z , Çizelge 3 kullanılarak bulunur [10]

δ_x , δ_y , δ_z esnemeleri T matrisi ile FCN koordinat sistemine dönüştürülür ve yaratılan yüzey normalindeki esneme δ_N hesaplanır

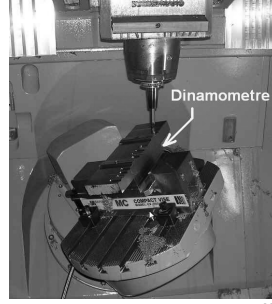
Çizelge 3. x, y ve z yönündeki esnemeler

$\delta_p, p= x, y$	
$v_m \geq v_k$	$\frac{F_p v_k^2}{6EI} (3v_m - v_k) + \frac{F_p}{k} + \frac{F_p v_m v_k}{k_\theta}$
$v_m < v_k$	$\frac{F_p v_m^2}{6EI} (3v_k - v_m) + \frac{F_p}{k} + \frac{F_p v_m v_k}{k_\theta}$
δ_z	$\frac{F_z L}{EA}$

Gerekli görüldüğü durumlar için kiris esnemelerine takım tutucu ve tezgah esnemeleri de eklenebilir. Ancak daha karmaşık geometriye sahip oldukları için sonlu elemanlar yada deneysel yöntemler ile elde edilebilirler. Benzer şekilde, iş parçası esnemeleri de hesaplamalara katılabilir.

5. DENEYLER

Modelin tahminlerini doğrulamak için bir çok kesme testi yapıldı. Bunlardan bir kaç tanesi bu bölümde sunulmaktadır. 5-eksen freze testleri Deckel Maho DMU 50 Evolution işleme merkezinde yapıldı. Kesme kuvvetlerini ölçmek için, bir Kistler masa tipi dinamometre kullanıldı. Çapı 12 mm ve helis açısı 30 derece olan küresel uçlu frezeler ile Ti6Al4V malzemesi kesildi. Değişik eğilme ve yatma açıları kombinasyonları ile Çizelge 4'deki kesme parametreleri kullanıldı.

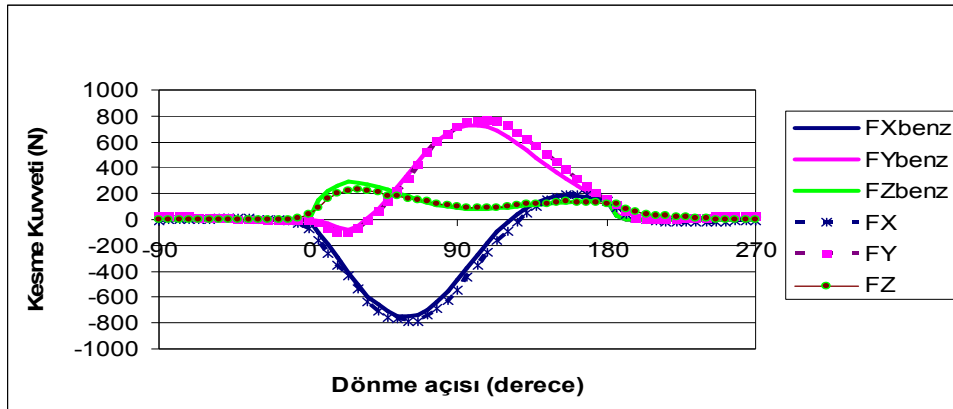


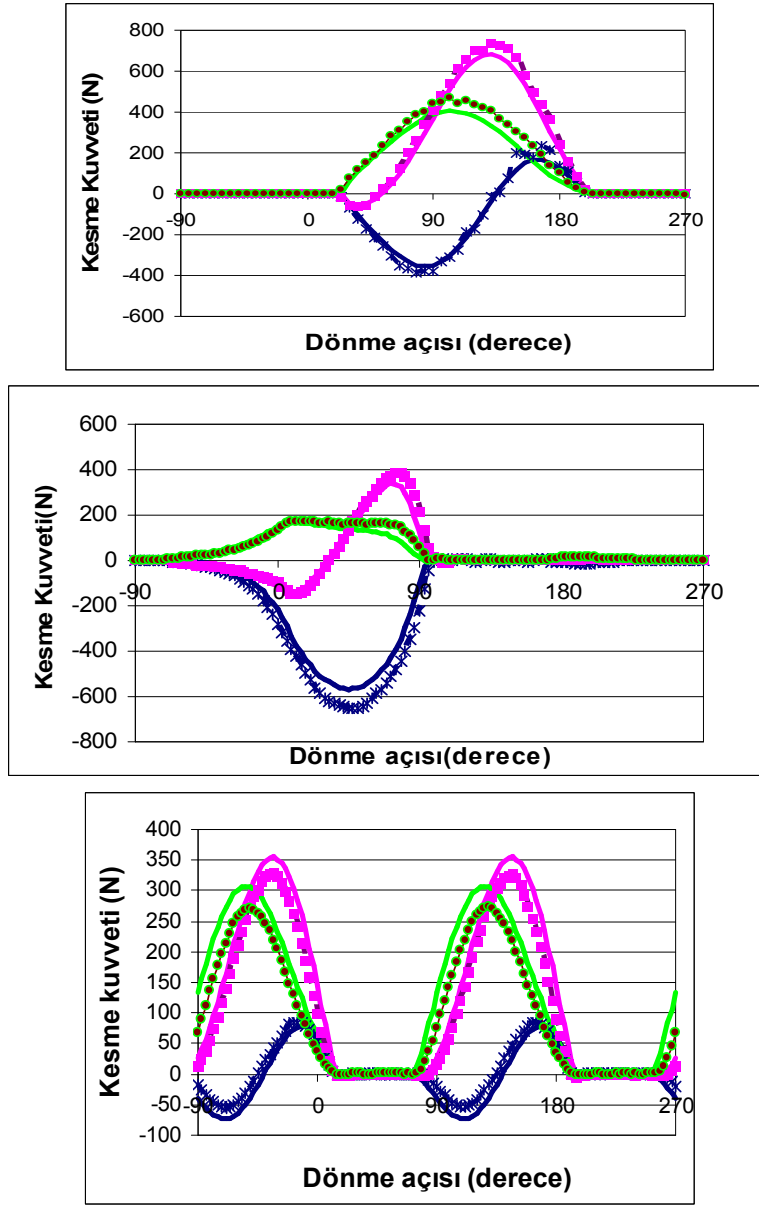
Şekil 7. Deney Düzenegi

Çizelge 4. Kesme parametreleri

	Kesici Takım	Eğilme, Yatma (derece)	Radyal derinlik(mm)	Eksenel Derinlik(mm)	İlerleme (mm/rev)	n (rpm)
1.Durum	Tek dişli	0,-15	Kanal kesme	3	0.1	269
2.Durum	Tek dişli	15,15	Kanal kesme	3	0.1	269
3.Durum	Tek dişli	-10,-0	4.5962	3	0.1	269
4.Durum	Çift dişli	30,30	Kanal kesme	1.5	0.1	500

Çizelge 4'de verilen farklı kesme parametreleri için, Kuvvet modeli 5-eksen freze kuvvetlerini makul bir hassasiyette tahmin etmektedir. Bununla birlikte, eğilme açısı negatif olduğu zaman, modelin tahminleri ölçülen kuvvet değerlerinden uzaklaşma eğilimi göstermektedir. Negatif eğilme açısı durumunda, ilerleme vektörünün takım eksenine doğrultusunda bir bileşeni vardır. Bu yüzden, freze süreci delme operasyonuna benzemektedir. Bu delme etkisi de kesme kuvvetlerinde artmaya sebep olmaktadır. 'de Çizelge 4'deki sıra ile benzetimi yapılan ve ölçülen kesme kuvvetleri karşılaştırılmıştır:





Şekil 8 . Benzetimi Yapılan ve Ölçülen Kesme Kuvvetleri Karşılaştırması

Kuvvet modeli 5-eksen freze kuvvetlerini makul bir hassasiyette tahmin etmektedir. Bununla birlikte, eğilme açısı negatif olduğu zaman, modelin tahminleri ölçülen kuvvet değerlerinden uzaklaşma eğilimi göstermektedir. Negatif eğilme açısı durumunda, ilerleme vektörünün takım eksenini doğrultusunda bir bileşeni vardır. Bu yüzden, freze süreci delme operasyonuna benzemektedir. Bu delme etkisi de kesme kuvvetlerinde artmaya sebep olmaktadır. Bu durum araştırma aşamasındadır.

6. SONUÇ

Bu makalede, 5-eksen frezelemede oluşan kesme kuvvetleri ve şekil hatalarını modelleyen bir çalışma sunuldu. 5 eksen frezeleme geometrisi ve formülasyonlar gösterildi. Benzetim yapılan kesme kuvvetleri ve ölçülen kesme kuvvetleri karşılaştırıldı ve modelin 5-eksen frezelemede oluşan kesme kuvvetlerini makul bir doğrulukta tahmin ettiği görüldü. Son olarak da, şekil hatalarını tahmin eden bir model sunuldu. Sunulan, bu çalışma 5-eksenli frezeleme süreçlerinin analizinde ve en iyilenmesinde kullanılabilir.

6. KAYNAKÇA

- [1] Armarego, E.J.A. and Brown, R.H., 1969, "The Machining of Metals", Prentice-Hall.
- [2] Merchant M. Eugene, 'Basic Mechanics of the Metal Cutting Process'.
- [3] Shatla, M., and Altan, T., 2000, 'Analytical Modeling of Drilling and Ball-End Milling', Journal of Materials Processing Technology, 98, 125-133.
- [4] Yucesan, G., and Altintas, Y.,1996, 'Prediction of Ball End Milling Forces', Journal of Engineering for Industry, Vol.118, pp 95-103.
- [5] Lee, P. and Altintas, Y., 1996, ' Prediction of Ball-End Milling Forces From Orthogonal Cutting Data,' Int. J. Mach. Tools Manufact., 36, pp 1059-1072.
- [6] Fussell, B.K., Jerard, R. B., and Hemmet, J. G., 2003, ' Modeling of Cutting Geometry and Forces for 5-axis Sculptured Surface Machining', Computer Aided Design, 35, 333-346.
- [7] Clayton, P. A., El-Wardany, T., Elbestawi, M. A., and Viens D., 2000, 'A Mechanistic Force Model of the 5-Axis Milling Process', Proceedings of the ASME Manufacturing Engineering Division, Vol.11.
- [8] Budak, E., Altintas, Y., and Armarego, E. J. A., 1996, 'Prediction of Milling Force Coefficients from Orthogonal Cutting Data' ASME Journal of Engineering for Industry.
- [9] Ozturk, E. , Budak, E. , ' Modeling of 5-Axis Milling Forces', 8th International Workshop on Modeling of Machining Operations, Chemnitz, Almanya, Mayıs 10-11, 2005, 319-326
- [10] Budak, E. and Altintaş, Y. , ' Peripheral Milling Conditions for Improved Dimensional Accuracy' , International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 34, No:7, 1994, 907-918
- [11] Ryu, S. H. , Lee, H. S. , Chu, C. N. , ' The form error prediction in side wall machining considering tool deflection' , International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 43, 2003, 1405-1411