

**TİMAK-Tasarım İmalat Analiz Kongresi**  
**26-28 Nisan 2006 - BALIKESİR**

## **5 Eksen Frezeleme Süreçlerinin Modelleme Yoluyla Benzetimi ve Eniyelenmesi**

L.Taner TUNÇ<sup>1</sup>, Erhan BUDAK<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Sabancı Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi-İSTANBUL  
E-Posta:[tanertunc@su.sabanciuniv.edu](mailto:tanertunc@su.sabanciuniv.edu)

<sup>2</sup> Sabancı Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi -İSTANBUL  
E-posta:[ebudak@sabanciuniv.edu](mailto:ebudak@sabanciuniv.edu)

### **Özet**

5 eksenli frezeleme, havacılık ve kalıpcılık sanayilerinde karşılaşılan karmaşık yüzeylerin imalatında yaygın olarak kullanılmaktadır. Çok değişkenli ve karmaşık bir mekaniğe sahip bu süreçlerin uygulanmasında uygun ve en iyi kesme koşullarının belirlenmesi verimlilik ve kalite açısından çok önemlidir. Genelde, 3 eksen frezeleme modellerini kullanarak hassas sonuçlar elde edilmesi çok mümkün değildir. Bu çalışmada, 5 eksen frezeleme süreçlerinin benzetimi ve en iyilemesi yapılmıştır. Geometrik modelleme için gerekli olan parametreler, verilen bir takım yolu dosyasından elde edilmiştir. Elde edilen parametreleri kullanarak takım ve parça kesişim sınırları, eğilme-yatma açıları gibi kesme koşullarının hesaplanması anlatılmıştır. Bu değerler mevcut bir kuvvet modeline uygulanıp frezeleme kuvveti benzetimi yapılmıştır. Benzetimde elde edilen sonuçlara göre kesme kuvveti açısından kesme parametrelerinin en uygun değerleri bulunmuştur. Hesaplanan eniyi değerler deneysel sonuçlarla doğrulanmıştır.

Anahtar terimler: CAD / CAM , 5 eksen frezeleme, Eniyileme.

### **Abstract**

5 axis machining is widely used in die-mold and aerospace industries where complex surfaces are required to be manufactured. Identification of the optimum and appropriate cutting parameters of processes, which has complex mechanics, is very important from the productivity and quality perspectives. It is not possible to apply 3 axis machining models in these cases for accurate results. In this paper, simulation and optimization of 5 axis machining processes are performed. The required parameters for geometrical modeling are obtained from a CL-file. Calculation of cutting conditions such as engagement boundaries, lead-tilt angles from the obtained parameters is shown. Those parameters are applied to an existing 5 axis force model, and then force simulations are performed. According to the simulation results, the best values of cutting parameters are identified from the milling forces point of view. The optimal values are verified with experimental results.

Key words: CAD / CAM, 5 axis machining, Optimization.

## **1. GİRİŞ**

Gelişen makina teknolojisiyle karmaşık yüzeylere sahip ürünlere ihtiyaç duyulmaktadır. Havacılık, otomotiv ve kalıp endüstrilerinde bu parçaların üretimine sıkça rastlanır. Böylece, karmaşık yüzey modelleme ihtiyacı doğmuştur. Bu ihtiyacı karşılayacak bilgisayar destekli tasarım araçları geliştirilmiştir [1] ve yüzey ve katı modelleme gibi uygulamalar çok daha

kolaylaşmıştır. Bu ürünlerin tasarımı kadar üretimi de önemlidir. Son yıllarda geliştirilen bilgisayar destekli üretim paketleri bu ihtiyacı karşılamaya çalışmaktadır. Karmaşık yüzeylerin üretiminde genellikle küresel uçlu 3 ve 5 eksen süreçler kullanılır. Geometrik kısıtlamalar olduğunda 3 eksen frezelemede parçanın birçok kere bağlanması gerekir. Bir parçayı tek bağlamada üretebilmek için 5 eksen kesme yöntemleri [2] geliştirilmiştir.

5 eksen kesme süreç geometrisi 3 eksene göre daha karmaşıktır. Bu yüzden, takım yolu çıkarılmasında güçlü geometrik modeller gerekir. Küresel uçlu 3 [3-6] ve 5 [7-11] eksen süreçlerin geometrik modelleme ve benzetiminde NURBS eğrileri, BEZIER yüzeyleri gibi analitik yöntemlerin yanı sıra Z-map, Octree gibi kesikli yöntemler de kullanılmıştır. Çok karmaşık yüzeylerin modellenmesinde kesikli yöntemler tercih edilir. 5 eksen süreçlerde takımın işparçasıyla kesişim sınırlarının doğru hesaplanması, kuvvet benzetimi için önemlidir. Bunun yanında takımın işparçasına göre durumu, yüzey kalitesi, boyutsal doğruluk, kesme kuvvetleri gibi sonuçları etkiler. Bu konuda, takımın yüzeyde oyuk bırakmadan kesmesini [12-14] ve takımın işparçasına çarpmasını sağlayacak ya da çarpmaları belirleyecek [15,16] geometrik modeller geliştirilmiştir.

Süreç zamanı ve parça kalitesi zıt yönlü değişir. Bir parçayı daha kaliteli üretebilmek için işlem süresi uzatılabilir ya da daha kısa zamanda kalitesi düşük ürünler üretilebilir. Üretkenliği ve kaliteyi arttırabilmek amacıyla, süreç eniyileme yöntemleri geliştirilmelidir. En iyileme, temel olarak 2 şekilde yapılmıştır. İlk olarak, kurulan modeller analitik ya da sayısal yöntemlerle eniyilenir ve bulunan eniyi değerler doğrulanır[17,18]. Modelleme yapılmaksızın, farklı parametrelerle deneyler yapıp bu deneylerin sonuçları yorumlanarak da eniyileme yapılabilir [19-21]. İkinci yolun eksikliği, genelleme yapılamaması ve sadece deney yapılan malzeme, takım ve koşullar için geçerli olmasıdır. Modelleme yoluyla yapılan en iyileme daha geniş bir alan için geçerlidir. En iyilenebilecek parametrelerin başında ilerleme hızı, takımın parçaya göre konumu, dalma derinlikleri, kesme stratejisi gelmektedir.

## **2. 5 EKSEN SÜREÇ GEOMETRİSİ**

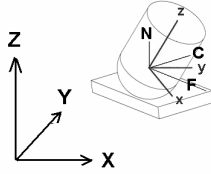
5 Eksen süreçlerde geometrik modelleme ve benzetim yapılabilmesi için öncelikle, geometrik tanımlamalar yapılmalıdır. Benzetimde kullanılan geometrik değişkenler, eğilme, yatma açıları, aksenel ve radyal derinliktir. Benzetim yapılmada da bir kesme işlemi için yukarıda sayılan geometrik koşulların bilinmesi, bir öngörü sağlar. Örneğin, karmaşık bir yüzeyin işlenmesinde, takım açılarının hangi yönlere göre belirlendiğini bilinmelidir. Bu geometrik değerler bilindiğinde, benzetim yapmadan da tecrübeye dayalı, makul kesme yöntemleri seçilebilir.

### **2.1 Koordinat Sistemlerinin Tanımlanması**

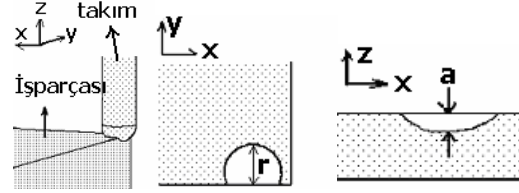
Bu bölümde, koordinat sistemleri ve geometrik parametreler açıklanmıştır. 5 eksen süreçlerin geometrilerini incelerken parça koordinat sistemi (WCS), takım koordinat sistemi (TCS) ve süreç koordinat sistemi (FCN) olmak üzere 3 sistem kullanılır. (WCS) X, Y, Z, ve (FCN), ilerleme (F), karşı ilerleme (C) ve yüzey normali (N) eksenlerinden oluşur. F, takımın ilerlediği yöndür. (TCS) ise (FCN)'nin döndürülmüş halidir. Takım eksenleri ve ona dik x ve y eksenlerinden oluşur. Benzetimde kullanılan kuvvet modelinde [9] hesaplamalar öncelikle (TCS)'de yapılır daha sonra sırasıyla (FCN) ve (WCS)'ye dönüştürülür. Karmaşık yüzeylerin işlenmesinde, F,C,N vektörleri süreç boyunca değişir fakat X,Y,Z sabittir. Takımın parçaya göre konumu (FCN)'de tanımlanır. Bu yüzden, (FCN) ve (WCS) arasındaki ilişki doğru kurulmalıdır. C eksenleri, F eksenine dik bir düzlemedir. Bunlar, yüzeye teğet bir düzlem oluşturur. N eksenleri, yüzeyin normal vektörüdür ve C-F düzlemine diktir. Koordinat sistemleri Şekil 1'de gösterilmiştir.

## 2.2 Dalma Derinlikleri

Bu çalışmada, kesme koşullarını, takım pozisyonu ve eksen bilgileri, bilgisayar destekli yazılım paketlerinden alınan CL adlı dosyadan alınmıştır. Takım-parça kesişim sınırlarını radyal ve aksenal olmak üzere 2 değer belirler. Bu yüzden, dalma derinliklerinin doğru hesaplanması geometrik ve mekanik benzetim sonuçlarının doğruluğu için önemlidir. Derinlik değerleri, CL dosyasında verilmez. Bu değerleri hesaplanması için işparçası geometrisi bilinmeli ve CL dosyasındaki değerlerle karşılaştırılmalıdır. Şekil 2'de dalma derinlikleri gösterilmiştir.



Şekil 1. (WCS), (FCN) ve (TCS)



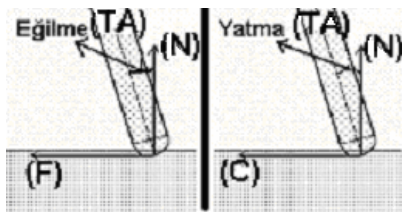
Şekil 2. Dalma derinlikleri, radyal (r), aksenal (a)

## 2.3 Dönme Açılarının Tanımlanması

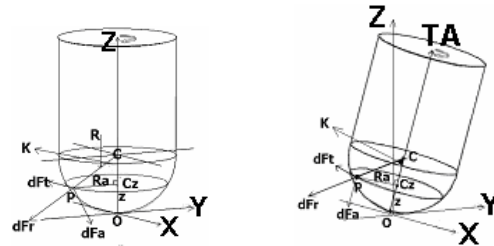
Önceki bölümde bahsedildiği gibi 5 eksen süreçlerde 2 eksen etrafında dönme kabiliyeti vardır. Bu eksenler F ve C dir. F etrafında dönüş, yatma açısı (tilt angle), C etrafında dönüş, eğilme açısı (lead angle) olarak adlandırılır. Eğilme ve yatma açıları Şekil 3'te görülmektedir.

## 3. 5 EKSEN SÜREÇ MEKANİĞİ

Bu bölümde, [9]'da verilen kuvvet modelinin kesme kuvvetlerini hesaplama yöntemi ve önceki bölümde tanımlanan geometrik değerlerin kuvvet modelinde kullanılması şekli özetlenmiştir. Modelde küresel uç, takım eksenini boyunca küçük disklerle ve bir dönüşlük hareket küçük açısız parçalara bölünmüştür. Takımın parçaya dalma derinlikleri ve takım açıları kullanılarak her kesici diş için kesişim sınırları hesaplanır. Her diş üzerindeki küçük parçalara gelen kuvvetler toplanarak kesme kuvvetleri hesaplanır. Bu hesaplamalar (1),(2),(3)'te verilen denklemler ile yapılmaktadır. Şekil 6'da 3 eksen ve 5 eksen küresel uçlu takım geometrisi gösterilmiştir. Geometrik değerlerin hesaplanması, benzetim ve eniyileme sonraki bölümlerde anlatılmıştır. Kuvvet modeli için detaylı bilgi [9]'da bulunabilir.



Şekil 3. Eğilme ve yatma açıları



Şekil 4. 3 ve 5 eksen küresel uçlu takım geometrisi

$$dF_{ij}(\phi_j, K) = K_{re}dS + K_{rc} * t(\phi_j, K) * db = K_{re}dS + K_{rc} * t(K) \sin \phi_j * RdK \quad (1)$$

$$dF_{ij}(\phi_j, K) = K_{te}dS + K_{tc} * t(\phi_j, K) * db = K_{te}dS + K_{tc} * t(K) \sin \phi_j * RdK \quad (2)$$

$$dF_{aj}(\phi_j, K) = K_{ae}dS + K_{ac} * t(\phi_j, K) * db = K_{ae}dS + K_{ac} * t(K) \sin \phi_j * RdK \quad (3)$$

Burada;

$\phi_j$  : Dalma açısı (rad)  
dS : Diş eğrisi üzerindeki diferansiyel yay uzunluğu (mm)  
K : Diş üzerindeki kesici eleman vektörü ve takım eksenini arasındaki açı (rad)  
t : Talaş kalınlığı (mm)  
R : Takım yarıçapı (mm)  
 $K_{ij}$  : Kuvvet sabitleri (MPa)

## 4. GEOMETRİK DEĞERLERİN HESAPLANMASI

Geometrik değerlerin hesaplanmasının gerekliliğine önceki bölümlerde değinilmişti. Bu değerlerin elde edilmesinde izlenen temel yöntem parçanın geometrik modeliyle, takım yolunun karşılaştırılmasıdır. Bu bölümde bilgisayar destekli üretim programlarından alınan CL dosyasındaki verilerden yararlanma şekli, dalma derinlikleri, takım açıları değerlerinin, ilerleme, yüzey normali ve karşı ilerleme vektörlerinin hesaplanma yöntemi anlatılmıştır.

### 4.1 Cl Dosyasındaki Verilerin Kullanılışı

Daha önce anlatıldığı gibi pozisyon ve eksen bilgileri CL dosyasından elde edilmesine rağmen dalma derinlikleri, eğilme ve yatma açıları gibi değerler CL dosyasında verilmez. Bu yüzden benzetimde doğrudan kullanılamaz. Fakat, parça modeli kullanılarak, geometrik değerlerin hesaplanmasında kullanılır. Bu dosyadaki değerler (WCS)'de ve kesme koşulları (TCS)'de tanımlandığından hesaplamalarda koordinat dönüşümü yapılmalıdır.

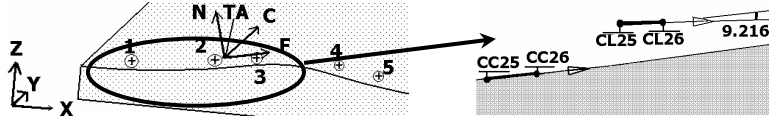
#### 4.1.1 İlerleme ve Karşı İlerleme Vektörlerinin Hesaplanması

CL dosyasındaki verilerden, geometrik koşulların hesaplanabilmesi için (FCN) oluşturulmalıdır. Eğilme, yatma açıları ve dalma derinlikleri F ve C vektörlerine doğrudan bağlıdır. Bu yüzden, bu vektörlerin doğru hesaplanması benzetimin doğruluğu için çok önemlidir. Küresel uçlu frezeleme süreçlerinde CL dosyasında takımın uç noktasının (CL) pozisyonu verilir ve dönme noktası takımın uç noktasıdır. Bunun sonucu olarak, sıfırdan farklı eğilme ve yatma açı değerleri için takımın uç noktası ile işlem sonunda oluşacak yüzeye temas noktası (CC) farklı olmaktadır. Bu yüzden, ilerleme vektörü ardışık 2 CL noktası kullanılarak hesaplanırsa gerçek değerlerden sapma gözlenir. Ayrıca, yüzeyin analitik denklemi bilinse de yüzey normalini hesaplamak için CC noktası koordinatları bilinmelidir. F ve N vektörleri birbirlerine bağlıdır ve ikisinin de bilinmediği bu durumda dene yanıl algoritmaları geliştirilmelidir. Şekil 7' deki örnek yüzey için CL ve CC noktaları kullanılarak hesaplanmış ilerleme vektörleri karşılaştırılmıştır. Görüldüğü gibi iki ayrı şekilde hesaplanan ilerleme vektörü arasında yaklaşık 9 derecelik bir açı vardır. Bu sorunu çözebilmek amacıyla, hazırlanan bilgisayar destekli üretim programından aynı kesme parametreleriyle "eğilme=0" ve "yatma=0" açı değerleri için bir referans CL dosyası elde edilir. Böylece, CC noktası ve CL noktası aynı nokta olur. Ayrıca, bu referans dosyada verilen takım eksenini yüzey normaline eşittir. Sonuç olarak her CC noktasındaki yüzey normali de elde edilir. İlerleme ve karşı ilerleme vektörlerinin hesaplanması gibi işlemler bu referans dosya üzerinden gerçekleştirilir.

Referans dosyadan okunan takım pozisyon noktaları, CC noktalarıdır. Her iki CC noktası arasında gerçek ilerleme vektörü hesaplanır. n'inci CC noktası  $P_n=(x_n, y_n, z_n)$  ve (n+1)inci CC noktası  $P_{n+1}=(x_{n+1}, y_{n+1}, z_{n+1})$  olsun.  $P_n$  noktasından  $P_{n+1}$  noktasına hesaplanan birim vektör n'inci noktadaki ilerleme vektörüdür (4). Karşı ilerleme vektörü, ilerleme ve yüzey normal vektörlerinin çarpım  $\vec{v}$  şeklinde hesaplanır (5).

$$\vec{f} = \frac{P_n P_{n+1}}{|P_n P_{n+1}|} = \frac{[(x_{n+1}-x_n), (y_{n+1}-y_n), (z_{n+1}-z_n)]}{\text{norm} |P_n P_{n+1}|} \quad (4)$$

$$\vec{c} = \text{çapraz}(\vec{n}, \vec{f}) \quad (5)$$



Şekil 5. CL ve CC ile hesaplanan ilerleme vektörlerinin karşılaştırması.

#### 4.4.2 Dalma Derinliklerinin Hesaplanması

Önceden bahsedildiği gibi takım-parça kesişim sınırlarını radyal ve aksenal derinlik belirler. Dalma derinliklerinin hesaplanmasında, takım pozisyonu ve parça geometrisinin bilinmelidir. Kuvvet modeli[9], takım yolu üzerinde herhangi bir noktadaki takım açılarını ve bu açılar sıfır iken hesaplanan dalma derinliklerini kullanarak kesişim sınırlarını çıkarır. Bu yüzden, dalma derinlikleri referans dosya kullanılarak hesaplanır. Kuvvet modeli [9], küresel ucun parçayla kesişimi için geçerli olduğundan yalnızca küresel ucun kesişim sınırları ele alınacaktır. Dalma derinliklerini hesaplarırken, kullanılan temel mantık, kaba malzemeyi kübik hücelere bölmek ve takımın uç kısmını simgeleyen yarı kürenin o anki değerleri hesaplamaktır. Ayrıca, kaba, yarı kaba ve ince kesme işlemleri sırasındaki paso miktarı farklı olabilmektedir. Yüzeyi sinüs profiline sahip bir parçanın üretimi için bırakılan talaş miktarları Şekil 8’de gösterilmiştir.

#### 4.4.3 Aksenal Derinliğin Hesaplanması

Aksenal derinlik, CL dosyasında verilmediğinden mekanik benzetim yapılabilmesi için aksenal derinlik hesaplanmalıdır. Bu yüzden aksenal derinliğin elde edilebilmesi için bir hesaplama yöntemi geliştirilmelidir. Bu yöntemde, işparçasının o anki kaba yüzeyi, bir düzlem gibi düşünülür. Aksenal derinlik parçanın üst yüzeyiyle dizayn yüzeyi normalinin kesiştiği nokta ve takım-yüzey temas noktası arasındaki uzaklıktır.  $P_1=(x_1, y_1, z_1)$ ,  $P_2=(x_2, y_2, z_2)$ ,  $P_3=(x_3, y_3, z_3)$  kaba yüzeyi,  $P_4=(x_4, y_4, z_4)$ ,  $P_5=(x_5, y_5, z_5)$  dizayn yüzey normalini tanımlayan noktalar ve takım eksen-düzlem kesişim noktası  $P_6=(x, y, z)$  olsun.  $P_6=(x, y, z)$  Kesişim noktası [22]’deki denklemler kullanılarak hesaplanır ve (6) kullanılarak aksenal derinlik bulunur. Bu durum Şekil 6’da gösterilmektedir. Yarı kaba ve ince kesmede aksenal derinlik, önceki işlemde bırakılan ve işlem sonunda bırakılacak pasoların farkıdır.

$$a = \text{norm} |P_4 P_6| \quad (6)$$

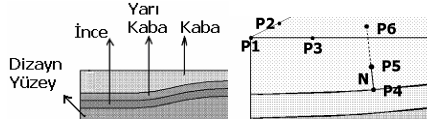
#### 4.4.4 Radyal Derinliğin Hesaplanması

Radyal derinlik CL dosyasında doğrudan verilmediğinden radyal derinliğin hesaplanması gerekir. Ayrıca, radyal derinlik hesaplamasında da farklı durumlar ortaya çıkabilmektedir. Bu durumların ele alınması açısından bir hesaplama yöntemi oluşturulmalıdır. İlk adımdaki radyal derinlik ve diğer adımlardaki radyal derinlik farklıdır. Bunun sebebi, takımın ilk adımda sıfır ve diğer adımlarda önceki adımın kestiği yüzeyi kesmesidir. Şekil 7’deki kalın çizgiler bu farklılığı göstermektedir. İlk adımda radyal derinlik RP1 ve RP2 noktaları arasındaki uzaklıktır (8). RP1 (7) ve RP2 (6) kullanılarak hesaplanır. İkinci ve daha sonraki adımlarda radyal derinlik takımın karşı ilerleme yönündeki adım boyudur (18). Anlatılan hesaplama yöntemleri Şekil 7’de gösterilmiştir.

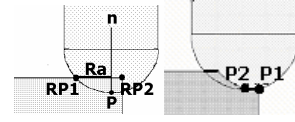
$$RP_1 = P + a \cdot \vec{n} + R_a \cdot \vec{c} \quad (7)$$

$$r = \text{norm} | RP_1 RP_2 | \quad (8)$$

$$r = \text{norm} | P_1 P_2 | \quad (9)$$



Şekil 6 Aksel derinliğin hesaplanması.



Şekil 7 Radyal derinlik hesaplanması.

## 4.5 Takım Açılarının Hesaplanması

Bu bölümde, takım açılarının hesaplanma yöntemi anlatılmıştır. (FCN) oluşturulduktan sonra (WCS) ile arasındaki dönüşüm ilişkisi oluşturulur ve CL dosyasındaki veriler (FCN)'ye dönüştürülerek eğilme ve yatma açıları hesaplanır.

### 4.5.1 Eğilme ve Yatma Açılıyla Takım Eksenini Hesaplanması

Eğilme ve Yatma açılarının hesaplanabilmesi için bu açıların nasıl kullanıldığı ve bu açılarla takım ekseninin nasıl hesaplandığı incelenmelidir. Eğilme ve yatma açıları sıfır  $\vec{t}_a = \vec{n}$  olur. Bu yüzden, takım eksenini hesaplamak için  $\vec{n}$ ,  $\vec{c}$  ve  $\vec{f}$  vektörleri etrafında

döndürülmüş gibi düşünülür.  $\vec{n} = \begin{bmatrix} n_i \\ n_j \\ n_k \end{bmatrix}$ ,  $\vec{f} = \begin{bmatrix} f_i \\ f_j \\ f_k \end{bmatrix}$ ,  $\vec{c} = \begin{bmatrix} c_i \\ c_j \\ c_k \end{bmatrix}$ ,  $\vec{t}_a = \begin{bmatrix} t_{a_i} \\ t_{a_j} \\ t_{a_k} \end{bmatrix}$  olsun. (FCN) dik koordinat

sistemidir, bu yüzden  $\vec{C}$  ve  $\vec{F}$  etrafında döndürme yapıldığında [1]'deki döndürme matrisleri geçerlidir. Böylece, takım eksenini (FCN) koordinatında hesaplanır. Dönüşüm, sıralı 2 döndürme olarak düşünüldüğünden çarpım (10)'daki gibi yapılır.

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & C_y & -S_y \\ 0 & S_y & C_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_e & 0 & S_e \\ 0 & 1 & 0 \\ -S_e & 0 & C_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}_{(TCS)} = [t_a]_{(TCS)} = \begin{bmatrix} t_{a_f} \\ t_{a_c} \\ t_{a_n} \end{bmatrix} \quad (10)$$

Burada:

$$C_\theta = \cos(\theta), S_\theta = \sin(\theta), V_\theta = \text{vers}\theta = (1 - \cos\theta)$$

### 4.5.2 Takım Ekseninden Eğilme ve Yatma Açılarının Hesaplanması

Bilinen bir takım ekseninden eğilme ve yatma açılarını hesaplamak geri kinematik problemine benzemektedir. Takım eksen vektörü, döndürme eksenleri ve yüzey normali bilinmektedir. Fakat takım eksen vektörü (WCS) koordinatında ve döndürme eksenleri (FCN) koordinatındadır. Hesaplama yapabilmek için takım eksenini (WCS) koordinatından (FCN) koordinatına dönüştürmek gerekir. (15) yeniden düzenlenir ve dönüşüm denklemi elde edilir.

(16) kullanılarak, eğilme ve yatma açıları (20) deki gibi hesaplanabilir. Böylece verilen bir takım ekseninin yüzeye göre konumu eğilme ve yatma açıları cinsinden hesaplanmış olur.

$$\begin{bmatrix} C_e & 0 & S_e \\ S_y \cdot S_e & C_y & -S_y \cdot C_e \\ -C_y \cdot S_e & S_y & C_y \cdot C_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}_{(TCS)} = \begin{bmatrix} ta_f \\ ta_c \\ ta_n \end{bmatrix}_{(TCS)} = \begin{bmatrix} ta_i \cdot f_i + ta_j \cdot f_j + ta_k \cdot f_k \\ ta_i \cdot c_i + ta_j \cdot c_j + ta_k \cdot c_k \\ ta_i \cdot n_i + ta_j \cdot n_j + ta_k \cdot n_k \end{bmatrix}_{(WCS)} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \text{eğilme} &= \arctan 2(a, \sqrt{b^2 + c^2}) \\ \text{yatma} &= \arctan 2(-b, c) \end{aligned}$$

Burada:

$$a = (ta_i \cdot f_i + ta_j \cdot f_j + ta_k \cdot f_k)$$

$$b = (ta_i \cdot c_i + ta_j \cdot c_j + ta_k \cdot c_k)$$

$$c = (ta_i \cdot n_i + ta_j \cdot n_j + ta_k \cdot n_k)$$

#### 4.6 Hesaplama Yöntemlerinin Doğrulanması

Eğilme ve yatma açılarının hesaplama yöntemi Şekil 7'deki yüzeyde doğrulanmıştır. Çıkarılan takım yolunda seçilen 5 noktada bilinen eğilme ve yatma açıları verilmiştir. İlk deneme her noktada farklı, ikinciyse sabit açılar verilerek yapılmıştır. Bu noktaların koordinatları ve gerçek açı değerleri Çizelge 1'de verilmiştir. Hesaplanan ve gerçek değerlerin karşılaştırılması Grafik 1 ve Grafik 2'de yapılmıştır. Grafikler incelendiğinde, takım açılarını bulmak için geliştirilen yöntemin ani açı değişikliklerinde 2-3 derecelik sapmalar olduğu görülür. Fakat, kompleks yüzeylerin üretiminde ani açı değişiklikleri olmamasına dikkat edilir.

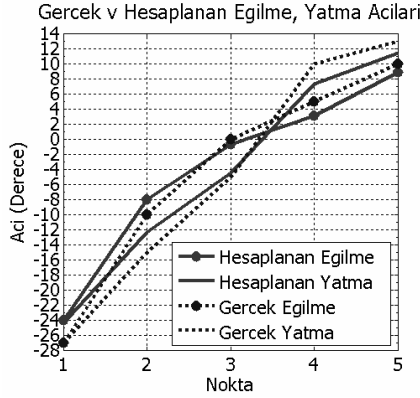
Çizelge 1. Deneme noktaları koordinatları ve bu noktalardaki açılar.

Nokta	Koordinat (mm)	Eğilme/Yatma (der)	
	x, y, z	Deneme 1	Deneme 2
1	5.008, 7.500, 24.251	-27/-27	15/-20
2	9.965, 7.500, 25.003	-10/-15	15/-20
3	12.449, 7.500, 25.300	0/-5	15/-20
4	17.404, 7.500, 24.565	5/10	15/-20
5	19.892, 7.500, 24.251	10/13	15/-20

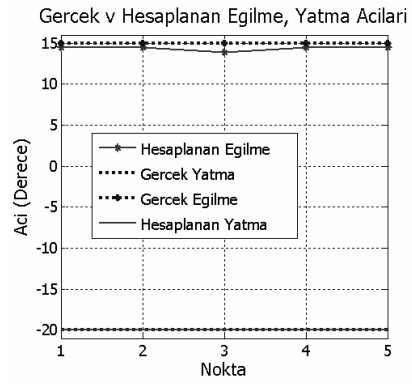
Dalma derinliklerinin hesaplama yöntemlerinin doğrulanması aynı yüzeyde yapılmıştır. En fazla ve en az aksenal derinlik sırasıyla 1.5 mm ve 0.2 mm verilmiştir. Ayrıca, takım radyal olarak tamamen parçanın içindedir. Şekil 8'de, hesaplanan değerler karşılaştırılmaktadır. Görüldüğü gibi dalma derinlikleri de doğru ve hassas hesaplanmıştır.



Şekil 8. Aksenal derinlik karşılaştırması



Grafik 1. Deneme 1 için karşılaştırma



Grafik 2. Deneme 2 için karşılaştırma

## 5 SÜREÇ BENZETİMİ

5 eksen geometrisi analiz edildikten sonra, hesaplanan geometrik değerler sürecin benzetiminde ve eniyilenmesinde kullanılmıştır. Bu bölümde süreç benzetimi, sonraki bölümde ise süreç eniyileme yöntemi anlatılmıştır. Bir kesme işlemi hakkında detaylı bir görüş elde edebilmek ve süreç mekaniği gözlemleyebilmek için süreç benzetimi yapmak gereklidir. Süreç benzetimi 2 yolla yapılmıştır. İlkinde tek bir nokta ele alınırken, diğerindeyse bir süreç için çıkartılan CL dosyasındaki bütün noktalar ele alınmıştır. İlk yöntemde, dalma derinlikleri, kesme ve ilerleme hızları değiştirilmeden sadece eğilme ve yatma açıları değiştirilerek süreç benzetimi yapılmıştır. Buradaki amaç, bu açıların süreç mekaniğine olan etkisini görebilmektir. Diğer yöntemde ise amaç bir kesme işlemi süresince kuvvetlerin nasıl değiştiğini görüp, bu işlem hakkında detaylı bilgi sahibi olabilmektir. Bunu yapabilmek için, önceki bölümlerde anlatılan kuvvet modeli[9] ve geometrik değerler kullanılmıştır. CL dosyası ve parça geometrisi bilinerek hesaplanan geometrik değerler her takım konumu için kuvvet modelinde kullanılmış ve her noktada süreç mekaniği benzetimi yapılmıştır.

## 6 SÜREÇ ENİYİLEME

Talaşlı imalatın maliyeti yüksektir. Ayrıca, parça ve takım üzerine büyük kuvvetler bindiğinden boyutsal hatalar kaçınılmazdır. Bu yüzden talaşlı imalat süreçlerinin istenen parametrelere göre eniyilenmesi büyük önem taşır. Bu bölümde benzetim sonuçlarından faydalanılarak gerçekleştirilen eniyileme yöntemi anlatılmıştır.

Kesme koşullarını iyileştirebilmek için herşeyden önce mevcut kuvvet modeli [9] farklı kesme koşullarında çalıştırılarak benzetim yapılır ve kesme koşullarının, süreç mekaniğine (örn. Kuvvet) etkisi incelenir. Bulunan değerler, deneysel sonuçlarla doğrulanır. Böylece, makul kesme koşulları seçilip süreç iyileştirmesi yapılır.

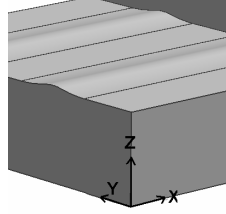
### 6.1 Eğilme ve Yatma açılarının eniyilenmesi

Bu bölümde, takımın parça göre durumunu belirleyen eğilme ve yatma açılarının eniyilenmesi anlatılmıştır. Çoğu zaman, kesme koşulları bilinsede eğilme ve yatma açlarına karar vermek zor bir noktadır. Bu yüzden, uygun açı değerlerine karar verilebilmesi için bunların süreç mekaniğine olan etkisi hakkında fikir edinilmelidir. Sonuç olarak, eğilme ve yatma açıları bir süreç için eniyilenebilecek en önemli değişkenlerden ikisidir.



Yukarıda anlatıldığı gibi bir eniyileme yapılmasında ilk benzetim yöntemi kullanılmıştır. Süreç mekaniğinin eğilme yatma açılarından nasıl etkilendiğini görebilmek için Grafik 5'teki eniyileme yüzeyi oluşturulmuştur. Bu yüzeyin oluşturulduğu kesme koşulları Çizelge 2.'de verilmiştir. Eniyileme sonuçlarına göre, makul açı değerleriyle ilerleme hızı arttırılabilir ve süreç zamanı kısaltılır.

Çizelge 2. Benzetim Koşulları



Şekil 9 Deney Yüzey

Benzetim Koşulları	
Eksenel derinlik	1.5 mm
Radyal derinlik	Slot
Yatma açıları	[-30,,30] deg
Eğilme açıları	[0,5,..,30] deg
İş mili hızı	280 dev/dk.
Diş başına ilerleme	0.1 mm/devir

## 7 DENEYSEL SONUÇLAR

Bu bölümde deneysel sonuçlar ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması yapılmıştır. Benzetim ve eniyileme yöntemlerini doğrulamak için 2 deney yapılmıştır. İlk deneyde, Şekil 9'da verilen yüzey için çıkarılan takım yolu boyunca kesme kuvvetleri ölçülmüş ve ölçülen değerler benzetim ile karşılaştırılmıştır. İkinci deneydeki amaç, Çizelge 2.'de verilen kesme koşulları için tahmin edilen en iyi açı değerlerinin doğrulanmasıdır.

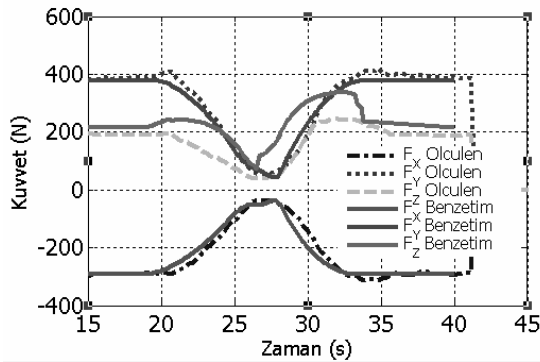
### 7.1 Deney 1

Bu deneyde amaç, bir takım yolu boyunca kesme kuvvetlerinin değişimini görebilmek ve bu değerleri anlatılan benzetim modeliyle tahmin edebilmektir. Takım yolu Şekil 9'daki yüzey için çıkartılmıştır. Bu takım yolunda sadece ilk ve ikinci kesme adımı için benzetim yapılmıştır. Bunun sebebi, ilk adımın kanal açma ve sonraki adımların radyal derinliğinin 1 mm olmasıdır. Deney koşulları Çizelge 3'te verilmiştir.

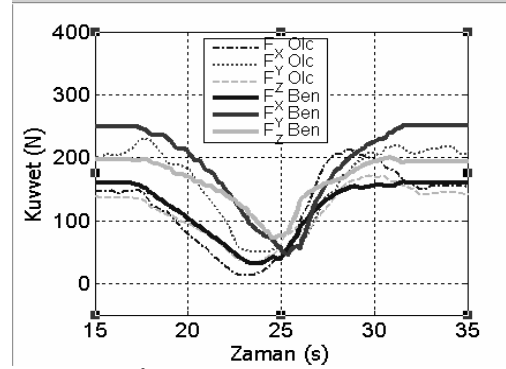
Çizelge 3. Deney Koşulları.

Max eksenel	1.5 mm
Min eksenel	1.5
Yana kayma	1 mm
Takım ekseni	Z
İş mili hızı	500 devir/dak
Diş başına ilerleme	0.1 mm/devir

Ölçümler ve benzetim sonuçları Grafik 3 ve Grafik 4' te karşılaştırılmıştır. Deneyin gerçekleştirildiği tezgah, istenen ilerleme hızını eğri yüzey üzerinde tam olarak yakalayamadığı için benzetim ve ölçüm sonuçları arasında bir zaman farkı oluşmuştur. Benzetim modeli X ve Y yönündeki kuvvetleri az Z yönündeki kuvvetleriye az tahmin etmektedir. Tezgahtaki gerçek ilerleme hızının daha düşük olması sebebiyle kuvvetler düşmüştür. Bu yüzden, Z yönünde benzetim ve ölçüm kuvvetleri farkı artarken X ve Y yönünde benzetim ve ölçüm kuvvetleri yaklaşmıştır.



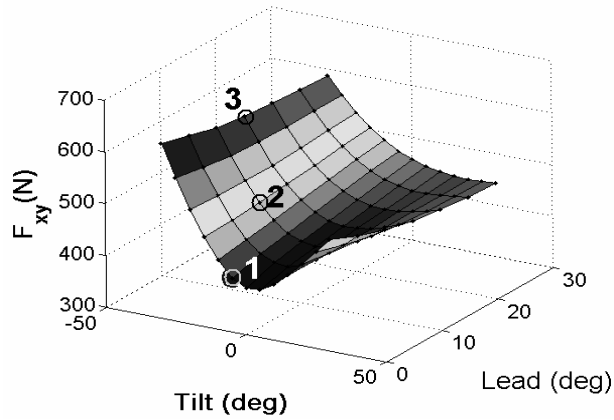
Grafik 3 İlk adım için karşılaştırma



Grafik 4 İkinci adım için karşılaştırma

## 7.2 Deney 2

İkinci deneyde, takım üzerindeki en büyük kesme kuvvetlerinin en aza indirilmesi amaçlanmıştır. Bu yüzden, hedef değişken takım üzerine binen kuvvetlerin dik bileşkesi olan  $F_{xy}$  kuvvetidir. Bu deneydeki kesme işlemleri düz bir yüzey üzerinde yapılmıştır. Kuvvet modeli eğilme açılarının eksiye düştüğü durumlarda güvenilir sonuçlar vermediğinden, eğilme açısı değerleri sıfır ve sıfırdan büyük değerler olarak alınmıştır. Bunun yanında, eksi eğilme açısı değerleri takımın parça üzerinde delme davranışı göstermesine neden olacağından yüzey kalitesi ve kesme kuvvetleri açılarından kötü bir etki yaratmaktadır. Eğilme açısının eksi olması, takım esnemeleri sonucu kesilmek istenenden fazla malzeme kesilmesine sebep olabilmektedir. Sayılan bu sebeplerden dolayı eğilme açısının eksi değerlere düşmesinin süreci kötüleştirdiği kabullenilmiştir.



Grafik 5 Deney 2 için çıkarılan eniyileme yüzeyi

Eniyileme yüzeyinden 3 eğilme ve yatma çifti (yüzey üzerinde 1., 2., 3. noktalar) seçilip bu değerlerle kesme deneyleri yapılmıştır. Seçilen noktadaki değerler Çizelge 4'te verilmiştir. Bu noktalarda  $F_{xy}$  kuvveti artış göstermektedir.

Çizelge 4. Deney 2 için seçilen eğilme ve yatma açıları

Eğilme (derece)		0	10	15
Yatma (derece)		-5	-15	-30
Fxy_max (N)	Benzetim	404	479	600
	Ölçüm	450	497	573

Çizelge 4'te görüldüğü gibi ölçülen ve tahmin edilen sonuçların büyük ölçüde örtüşmüştür. Böylece, bir kesme işlemi için makul eğilme ve yatma açılarının değerleri tahmin edilmiştir.

## 8 SONUÇ

Bu çalışmada, talaşlı imalatta sıkça kullanılan 5 eksen küresel kesme süreçlerinin geometrisi incelenmiştir. Bir frezeleme sürecindeki geometrik koşulların hesaplanma yöntemi detaylarıyla anlatılmıştır. Bu süreçler için geliştirilmiş olan kuvvet modeli ve geometrik analiz sonuçları kullanılarak üretim verimliliği ve parça kalitesini arttırabilmek amacıyla yapılan süreç benzetim ve eniyileme yöntemi gösterilmiştir. Geometrik koşulların hesaplanmasında CL dosyası doğrudan kullanılmadığından, bu amaç için referans dosya oluşturulmuştur. Kuvvet modeli ve geometrik hesaplamalar kullanılarak süreç benzetimi ve eniyilemesi yapılmış, bulunan değerler deneysel sonuçlarla doğrulanmıştır. Bu çalışma yardımıyla, bir kesme işlemi için uygun eğilme ve yatma açıları tahmin edilebilir, böylece daha uygun açılarda yüksek ilerleme hızlarına çıkılabilir. Bunun yanında, karmaşık bir yüzeyin frezelenmesinde kuvvetlerin değişimi tahmin edilmiştir, böylece verilen ilerleme hızlarının, eğilme ve yatma açılarının makul olup olmadığı hakkında fikir sahibi olunabilir. Fakat, eğilme açılarının eksi olduğu durumlarda model tahminleri, gerçek değerlerden sapma gösterdiğinden bu durumlar için güvenilir sonuç alınamamaktadır.

## 9 KAYNAKÇA

- [1] CHOI, B.K., "Surface Modelling for CAD/CAM", Elsevier, New York 1991.
- [2] CHOI, B.K., JERARD, R.B. "Sculptured Surface Machining, Theory and applications ", 04127820208, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1998.
- [3] LEE, T. S., LIN Y. J. "A 3D Predictive Cutting-Force Model for End Milling of Parts Having Sculptured Surfaces", *Int J Adv Manufacturing Technology*, 16, 773-783, 2000.
- [4] IMANIA, B.M. SADEGHIB, M.H., ELBESTAWIA, M.A., "An improved process simulation system for ball-end milling of sculptured surfaces", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 38, 1089-1107, 1998
- [5] OZTURK, B., LAZOGLU, I., "Machining of free-form surfaces. Part I: Analytical chip load", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, In Press, 1-8, 2005
- [6] MENG, EE.L., FENG, H.Y., MENQ, C.H., LIN, Z.H., "The prediction of dimensional errors for sculptured surface productions using the ball-end milling process part 1: chip geometry analysis and cutting force prediction", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 35-8, 1149-1169, 1995
- [7] FUSSEL, B.K., JERARD, R.B., HEMMETT, J.G., "Modeling of cutting geometry and forces for 5-axis sculptured surface machining", *Computers Aided Design*, Vol. 35, 333-346, 2003

- [8] FONTAINE,M., DEVILLEZ,A., MOUFKI,A.,DUDZINSKI,D. "Predictive force model for ball-end milling and experimental validation with a wavelike form machining test", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, In Press, 1-14, 2005
- [9] OZTURK,E., BUDAK,E., "Modelling of 5-Axis Milling Forces", *8th CIRP International Workshop on Modeling in Machining Operations*, 319-326, 2005, Chemnitz, Germany
- [10] BAILEY, T. ELBESTAWI, M.A., EL-WARDANY, T.I., FITZPATRICK, P. "Generic Simulation Approach for ulti-Axis Machining, Part 1: Modeling Methodology", *Tranasctions of ASME*, 124, 624, 2002
- [11] DU, S, SURMANN,T., WEBBER, O., WEINERT, K. "Formulating swept profiles for five-axis tool motions", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 45, 849-861, 2005
- [12] MING, C.H., HWANG, Y.R., HU, C.H. "Five-axis tool orientation smoothing using quaternion interpolation algorithm", *International Journal of Machine Tools & Manufacture* , 43,1259-1267, 2003
- [13] LIM, T.S., LEE,C.M., KIM,S.W., LEE,D.W. "Optimizing tool orientations for 5-axis machining by configuration-space search method", *Computer Aided Design*, 35, 549-566, 2003
- [14] LIM, T.S., LEE,C.M., KIM,S.W., LEE,D.W. "Locally optimal cutting positions for 5-axis sculptured surface machining", *Computer Aided Design*, 35, 69-81, 2003
- [15] DING, S., MANNAN, M.A., POO, A.N. "Oriented bounding box and octree based global interference detection in 5-axis machining of free-form surfaces", *Computer Aided Design*, 36, 1281-1294, 2004
- [16] ILUSHIN,O., ELBER,G., HALPERIN, D., WEIN, R., KIM, M.S., "Precise global collision detection in multi-axis NC-machining", *Computer Aided Design*, 37, 909-920, 2005
- [17] LIM, EE.M., MENQ,C.H."Integrated planning for precision machining of complex surfaces. Part 1: cutting-path and feedrate optimization", *Int. J. Mach Tools Manufact.*, 37-1, 61-75, 1997
- [18] BAILEY, T. ELBESTAWI, M.A., EL-WARDANY, T.I., FITZPATRICK, P. "Generic simulation approach for multi-axis machining, part 2: Model calibration and feed rate Scheduling", *Journal of Materials Processing Technology*, 103, 398-403, 2000
- [19] LOPEZ DE LECALLE, L.N., LAMIKIZ, A., SANCHEZ,J.A., ARANA, J.L. "Improving the surface finish in high speed milling of stamping dies", *Journal of Materials Processing Technology*, 123,292-302, 2002
- [20] RAMOS, A.M., RELVAS,C., SIMOES, J.A. "The Influence of finishing milling strategies on texture, roughness and dimensional deviatons on the machining of complex surfaces", *Journal of Materials Processing Technology*, 136, 209-216, 2003
- [21] BAPTISTA, R., SIMOES, J.F.A. "Three and five axes milling of sculptured surfaces", *Journal of Materials Processing Technology*, 103,398-403, 2000
- [22] <http://mathworld.wolfram.com/Line-PlaneIntersection.html>