

KÜRESEL UÇLU PARMAK FREZELERDE KESME KUVVETLERİNİN CAD SİSTEMİ İLE ELDE EDİLMESİ

İbrahim KALELİ*, Sinan Serdar ÖZKAN**, Erol ÖZCAN***

Frezelemede, talaş kaldırma esnasında meydana gelen kuvvetlerin hesaplanabilmesi için kesici takım ile iş parçası girişim geometrileri kullanılabilir. Takım iş parçası teması ile meydana gelen arakesitten elde edilen geometrik bilgi ile kesme kuvvetlerinin kartezyen koordinatlardaki üç dik bileşeni ve bileşke kesme kuvvetleri mekanik verilerle birleştirilerek yeni ve geliştirilmiş bir çözüm metodu ortaya konulmuştur. Modelde kullanılan en önemli parametreler; Kesici takım ve iş parçası temas yüzeyini sınırlayan arakesit eğrileri üzerindeki takım orijinine göre koordinatları, takımın iş parçasına eksenel ve radyal dalma miktarları, işlenen parçaların yüzey şekilleri, kesici takım üzerinde bulunan kesme kenarlarının helis açları ve kesici takım geometrileridir. Bu bilgilerin helisel kesme kenarlı freze kesicileri için geliştirilmiş mekanik modeller içerisinde kullanılması neticesinde değişik formlu parmak frezeler ile serbest yüzeylerin işlenmesinde kesme kuvvetlerinin üç dik bileşeni elde edilebilmiştir.

Anahtar sözcükler : Kesme kuvvetleri, frezeleme, parmak freze

In milling operations, the cutting tool-workpiece geometrical interactions are used to calculate the cutting forces during machining. A new and generalized Solution technique is established by combining the cutting force components in Cartesian co-ordinates and resultant forces, and the in formation about and workpiece geometrical in ter face. The important parameters used the model are the coordinates mounted on the crosisection curvatures bounding the cutting tool and workpiece in ter face, the axial and the radial depth of tool penetration to workpiece, surface profiles of the machined parts, helix angle of the tool cutting edges and cutting tool geometries. Three componats of the cutting forces are obtained for different shapes of and milling cutters in machining workpart surfaces by into ducing the above mentioned in formation to the models developed for the cutting tools with helix cutting edges.

Keywords: Cutting forces, milling, ball-end milling

* Dr.Öğr.Gör., Marmara Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi

** Yrd.Doç.Dr.,Sakarya Üniversitesi Meslek Yüksekokulu

*** Dr. Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

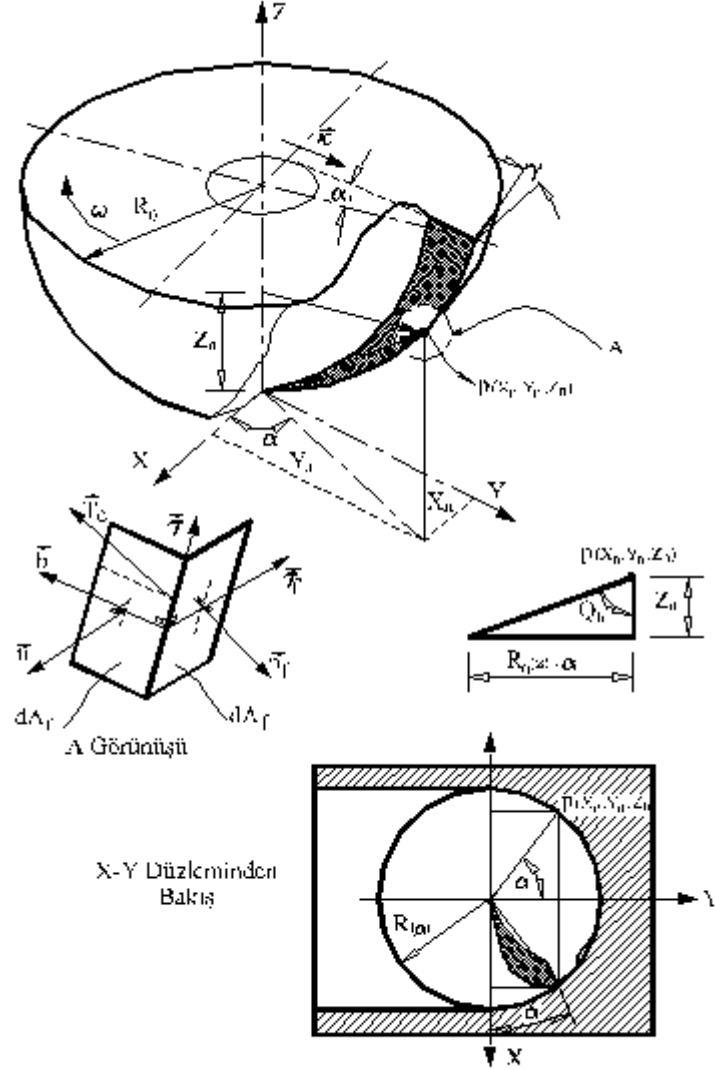
GİRİŞ

Talaşlı üretimde parça yüzeylerinin freze tezgahlarında işlenmesi, önemli bir yere sahiptir. Frezeleme işlemlerinde kullanılan kesici takımlardan helisel kesme kenarlı parmak freze çakıları genellikle kanalların açılmasında ve cep işleme gibi operasyonların yanı sıra yüzeylerin son paso işlemlerinde de çokça kullanılan kesici takımlardır. Özellikle hassas ve karmaşık kalıp boşluklarının imalatında ve aerodinamik özellikteki yüzeylerin işlenmelerinde küresel uçlu parmak frezeler kullanılmaktadır. Bu tip kesici takımların kaba talaş işleme durumları karşısında; takımın kırılması, kesme kenarlarının aşırı yüklenme neticesinde aşınması işlenen yüzey kalitesini ve kesici takım ömrünü olumsuz yönde etkiler. Bu tip etkilerin en aza indirgenmesi, optimum işleme şartlarının sağlanabilmesi ve işlenebilirlik diye tarif edilen istenen ölçü ve yüzey kalitesini elde etmek suretiyle, en az süre, minimum maliyet ve en fazla hacimle talaş kaldırma kabiliyetlerinin iyileştirilmesi kesme kuvvetlerinin işleme öncesinde iyi tahmin edilmesine bağlıdır.

Bu çalışmada, frezeleme operasyonları için helisel kesme kenarlı parmak freze çakıları ile talaş kaldırma esnasında meydana gelen kesme kuvvetlerinin, kesici takım ve iş parçası girişim geometrilerine bağlı olarak nasıl hesap edilebileceği gösterilmiştir. Frezeleme işlemleriyle ilgili şu ana kadar önemli araştırmalar yapılmıştır. Fakat parmak frezeler yüzeylerin işlenmesi neticesinde meydana gelen kuvvetlerin kartezyen koordinatlarda üç bileşenin elde edilmesine yönelik çok fazla çalışma yoktur. Özellikle küresel uçlu parmak frezeler üzerinde çok az çalışma yapılmıştır. Smith ve Tlusty [1], kendilerinden önceki silindirik helisel parmak frezeler ile ilgili mekanik modelleri ele alarak bu konu üzerinde yoğunlaşmaya çalıştılar. Tlusty [2], parmak frezelerde kesme kuvvetlerinin meydana getirdiği dinamikler üzerinde çalışmalar yaparak tekrarlı kesme işlemlerinde, kararlılık şartları ve kesme sönümü ile alın frezelerde takım tırlamasının zamana bağımlı simülasyonunu yaptı. Armarego [3], parmak frezelerde meydana gelen kesme kuvvetlerini kaçıklık ve kesiciden parça kopmalarını göz önünde bulundurarak bir kesme kuvveti modeli geliştirdi. Yang ve Park [4], küresel uçlu parmak frezelerle ilgili bir model geliştirerek kesme kuvvetlerini işleme öncesinde tahmin etmeye çalıştılar. Yellowley [5], küresel uçlu parmak frezelemede özgül güç ve tork ile esas kesme kuvvetlerinin değerlerini gözleyebilmek için çalışmalar yaptı. Sutherland ve DeVor [6], küçük çaplı parmak frezeleri için işlenen yüzey hatalarını ve kesme kuvvetlerini içeren bir metot geliştirdiler. Kim, Cho ve Chu, [7] frezeleme işleminde kesme kuvvetinin tahmini üzerine yapmış oldukları çalışmada, talaş geometrisi ve ilerleme arasındaki bağıntıyı analiz ettiler. Kesme kenarı üzerine etki eden kesme kuvvetlerinin nümerik integrasyonu ile bileşke kesme kuvvetini bir seri deney yaparak kesme kuvvetlerinin bulunmasında kullanmış oldukları modeli doğrulamışlardır. Shatla ve Atlan, yuvarlak [8] uçlu frezeleme ve delme işlemlerinin analitik modellenmesi üzerine yapmış oldukları çalışmada, kesme şartları, takım geometrisi, iş parçası malzemesinin ısı özellikleri ve gerilme değerlerini esas alan analizler yapmışlardır. Yapılan çalışma sonucunda, kesme kenarında oluşan sıcaklık ve kesme kuvveti değerlerini hesaplayan bir model elde etmişlerdir. Ayrıca daha önce yapılmış benzer deney sonuçlarıyla model karşılaştırılmıştır. Feng ve Su, küresel uçlu frezeleme ile üç boyutlu düzlem yüzeylerin hassas işlenmesi için takım yolu ve ilerlemenin eş zamanlı optimizasyonu üzerine çalıştılar[9]. Engin ve Altıntaş [10] yapmış oldukları çalışmada endüstride kullanılan değişik parmak frezelerin tamamını içerecek tarzda helisel parmak frezelerin genelleştirilmiş bir matematiksel modelini hazırlamışlardır. Hem kesici takım hem de işparçasının yapısal titreşimini içine alan frezeleme kinematikini kullanarak her bir kesme noktasındaki talaş kalınlığını tanımladılar. İşparçasıyla temas halinde olan kesme kenarı boyunca prosesler bütünleştirilerek kesme kuvvetleri, titreşimler ve tırlama oluşumunu tahmin etmişlerdir. Wang ve Zheng, yuvarlak uçlu parmak frezelerde ortalama kesme kuvvetlerini ölçerek, teğetsel ve radyal kesme kuvveti katsayılarını doğrudan tanımlayabilmek için analitik bir model geliştirmişlerdir[11]. Yücesan, Boyoumi ve Kendall, frezelemede kesme kuvvetleri üzerinde analitik bir model geliştirdiler [12, 13]. Daha sonra yaptıkları çalışmaları geliştirerek kesici takımların iş parçalarına radyal ve eksenel girişim miktarları ve işlem parametrelerine bağlı kesme hızlarını araştırarak farklı malzemeler üzerinde deneysel kesme kuvvet değerlerini elde etmek suretiyle ilerlemenin artmasıyla takım ile iş parçası temas yüzeyindeki sürtünme ve basıncın düştüğünü tespit etmişlerdir [14]. Yücesan ve Altıntaş, küresel uçlu parmak freze kesicilerine ait analitik bir model geliştirdiler. Yaptıkları teorik çalışmaları deneylerle gözlemleyerek tutarlı sonuçlar elde ettiler [15, 16, 17]. Geliştirdikleri metot ile sadece düz yüzeylerin işlenmesine ait kesme kuvvetlerinin çözümlerini bulabildiler. Yüzeylerin eğimli veya en genel halde serbest yüzeylerin işlenmesi gibi her çeşit yüzeyin işlenmesine ait genel çözüme ulaşamadılar. Hatta düz yüzeylerde, birden fazla paso ile kanal açma operasyonları gibi işlenen yüzeyin geometrisini ilk pasodan sonra değiştiren işleme şekilleri karşısında yetersiz kaldı. Bu makalede sunacağımız metot önceki mekanik modellerin eksik kalan kısmını tamamlayarak, kesici takım ve iş parçası geometrisi bilgisinin CAD/CAM sisteminden elde edilerek daha gelişmiş bir genel çözüm sağlamış olmasına karşın önceki metotlarda geliştirilen kesme kuvvet denklemlerinin ve kullanılan katsayılarla bağlı olarak işlem yaparak sonuca ulaşır.

KÜRESEL UÇLU PARMAK FREZE İÇİN KESME KUVVET FORMULASYONLARI

Küresel uçlu parmak freze çakıları için kesme kuvvetlerine ait teorik modeller geliştirilmiştir [15]. Bu analitik modelde, kesme kuvvetleri takımın kesme kenarı ile iş parçası teması neticesinde kesme kenarının talaş ve sırt yüzeyi üzerinde meydana gelen kuvvetler basınç ve sürtünme kuvvetleri olarak iki dik bileşene ayrılarak tanımlanmış ve toplam kesme kuvveti bu iki yüzeydeki sürtünme ve basınç kuvvetlerinin toplamına eşit olacak şekilde kesici takım dönme açısının fonksiyonu olarak aşağıdaki gibi ifade edilmiştir. Şekil 1'de formülasyonlara ait gerekli notasyonlar gösterilmiştir.



Şekil 1. Helisel kesme kenarlı küresel uçlu Kesici takım geometrisi

Şekil 1. Helisel Kesme Kenarlı Küresel Uçlu Kesici Takım Geometrisi

$$\vec{F}(\vartheta) = \vec{F}_n(\vartheta) + \vec{F}_f(\vartheta) + \vec{F}_{\eta_f}(\vartheta) + \vec{F}_{\eta_f}(\vartheta) \quad (1)$$

$$F(\varrho) = \int_{\alpha_1(\varrho)}^{\alpha_2(\varrho)} A(\varrho) \cdot K_{ff} \left[-\vec{n}(\alpha + \varrho) + K_{ff}(\alpha, \varrho) \cdot \vec{i}_f(\alpha + \varrho) \right] dA_f + \int_{\alpha_1(\varrho)}^{\alpha_2(\varrho)} A(\varrho) \cdot K_{ff} \left[-\vec{n}_f(\alpha + \varrho) + K_{ff} \cdot \vec{i}_f(\alpha + \varrho) \right] dA_f \quad (2)$$

Burada dA_f deforme olmamış talaş kalınlığı ile talaş yüzeyi üzerindeki sonsuz küçük temas alanını gösterir ve aşağıdaki gibi tariflidir.

$$dA_f = f_d \cdot \sin(\alpha + \varrho) \cdot R_o \cdot \cot(\varrho_h) \cdot d\alpha \quad (3)$$

dA_f keskin kenarlı takımın sırt yüzeyi ile talaş temas alanının sonsuz küçük ifadesidir ve temastaki kesme kenarı yayı uzunluğuna eşit olarak aşağıdaki formülle hesap edilir.

$$dS = \sqrt{(R_o(\alpha))^2 + R^2(\alpha) + R_o^2 \cot^2(\varrho_h)} \cdot d\alpha \quad (4)$$

R_o , kesici takım yarı çapı, ϱ_h helis açısı, $R(\alpha)$ kesme kenarı üzerindeki bir noktanın α pozisyon açısına göre kesici takım yarıçapıdır. $R'(\alpha)$, $R(\alpha)$ 'nın türevi olacak şekilde aşağıdaki gibi verilir.

$$R(\alpha) = R_o \cdot \sqrt{1 - (\alpha \cdot \cot(\varrho_h) - 1)^2} \quad (5)$$

$$R'(\alpha) = \frac{-R_o (\alpha \cdot \cot(\varrho_h) - \cot(\varrho_h))}{\sqrt{1 - (\cot(\varrho_h) - 1)^2}} \quad (6)$$

\vec{n} , \vec{b} , \vec{r} , \vec{k} kesme kenarı talaş yüzeyi üzerinde eğrisel koordinatlarda tanımlanmış birim vektörler olarak şöyle verilir.

$$\vec{n} = \vec{r} \times \vec{b} \quad (7)$$

$$\vec{b} = \frac{R}{\sin(\varrho_{fk})} - \vec{r} \cdot \cot(\varrho_{fk}) \quad (8)$$

$$\vec{r} = \frac{dr}{\|dr\|} = \tau_x \vec{i} + \tau_y \vec{j} + \tau_z \vec{k} \quad (9)$$

$$\tau_x = \frac{1}{\|dr\|} [-R(\alpha) \cdot \sin(\alpha + \varrho) + R'(\alpha) \cdot \cos(\alpha + \varrho)] \quad (10)$$

$$\tau_y = \frac{1}{\|dr\|} [-R(\alpha) \cdot \cos(\alpha + \varrho) + R'(\alpha) \cdot \sin(\alpha + \varrho)] \quad (11)$$

$$\tau_z = \frac{R_o \cdot \cot(\varrho_h)}{\|dr\|} \quad (12)$$

$$\vec{k} = -\cos(\alpha + \varrho + \omega) \vec{i} - \sin(\alpha + \varrho + \omega) \vec{j} \quad (13)$$

$$\vec{r}(\alpha) = R(\alpha) \cdot (\cos(\alpha) \cdot \vec{i} + \sin(\alpha) \cdot \vec{j} + R_0 \cdot \alpha \cdot \cot(Q_k)) \cdot \vec{k} \quad (14)$$

$$Q_k = \cos^{-1}(r_k) \quad (15)$$

Burada \vec{r} kesme kenarı üzerindeki bir noktanın takım orijinine göre konum vektörü. Q_k , \vec{r} ve \vec{k} arasındaki açı ve α_r kesme kenarının talaş açısıdır. \vec{n}_f ve \vec{e}_f birim kuvvet vektörleri γ sırt açısına bağlı olarak talaş yüzeyindeki benzer şekilde düşünülüp hesap edilir. Buna göre;

$$\vec{e}_f = -\sin(\alpha + Q + \gamma) \cdot \vec{i} + \cos(\alpha + Q + \gamma) \cdot \vec{j} \quad (16)$$

$$\vec{n}_f = \frac{\vec{e}_f \times \vec{r}}{\|\vec{e}_f \times \vec{r}\|} \quad (17)$$

şeklinde tariflenirler. \vec{t}_c , sürtünme kuvvetinin doğrultusu boyunca bir birim vektördür ve \vec{e} ve \vec{b} 'nin lineer bir birleşimi olarak ifade edilir.

$$\vec{t}_c = \cos(Q_c) \cdot \vec{e} + \sin(Q_c) \cdot \vec{r} \quad (18)$$

Q_c talaş akış açıları Shaw ve Cook'un yapmış oldukları çalışmalardan faydalanılarak kıyaslamalarla genelleştirilmiştir [18]. K_z ve K_f kesici takım talaş yüzeyi ve K_{zf} , K_{zf} sırt yüzeyin üzerindeki basınç ve sürtünme katsayılarını ifade eder ve deneylerle elde edilir [17].

$$\ln(K_z) = 7.939 - 0.0259 \cdot f_d - 3.983 \cdot f_d \quad (19)$$

$$K_f = 0.743 \quad (20)$$

$$\ln(Q_c) = -2.489 + 0.162 \cdot R_z \quad (21)$$

$$K_{zf} = 26.88 + 77.96 \cdot f_d \quad (22)$$

$$K_{zf} = -0.825 + 4.175 \cdot f_d \quad (23)$$

Burada f_d takım ilerlemesi ve R_z eksenel dalma mesafesidir.

İntegrasyon Sınırlarının Belirlenmesi

Frezeleme işlemlerinde, kesme kuvvetlerinin matematik modelleri için geliştirilen bağıntıların ve elde edilen kuvvet formülasyonlarının varlığı her çeşit işleme durumunda çözüm üretmemektedir. Çünkü integral ifadelerinin alt ve üst sınırları takım dönme açısının bir fonksiyonu olmakla beraber kesici takım ile işlenen yüzey geometrisinin de bir fonksiyonudur. En genel hal için geliştirdiğimiz integrasyon sınırlarının tespiti yöntemi esas itibariyle; takım geometrisi ve işlenen yüzeyin durumuna göre takımların iş parçaları üzerinde dalma yaptıkları anlardaki iş parçası yüzeyi ile takım geometrisi arakesit fonksiyonlarının izahı ile helisel kesme kenarlarının bu ara kesit eğrileriyle kesişen noktalarının bulunarak her takım dönme açısına karşılık değişen α_1 ve α_2 değerlerinin hesaplanması yapılarak sonuca varılması esasına dayanır. Takım ve iş parçası arakesit geometrisine ait bilgilerin elde edilmesinde katı CAD de bir modelleme olan katı modelleme tekniği kullanılacaktır. CAD/CAM yazılımlarıyla tasarlanabilen takım ve iş parçası arakesit geometrilerinin veri tabanı bilgileri DXF (Drawing

Exchange Files) formatlı çizim arabirim değişim dosyalarından elde edilecektir. Katı modelleme tekniğinin kullanılmasının nedeni; bu modelleme ile takım ve iş parçasına ait arakesit geometrisinin istenilen arakesit koordinatlarını veri tabanında barındırmasıdır. DXF dosyalarının içeriğinde çizimde bulunana tüm elemanların çizi, nokta veya eğrilerin tüm koordinatlarıyla çember veya yayların yarıçap değerleri bulunmaktadır [19]. Bu bilgiler bizim amacımıza ulaşmada kullanılacak yeterli bilgilerdir. Bizler sadece takım ile iş parçası arakesit çizgilerinin koordinatlarına sahip olduğumuzda α_1 ve α_2 integrasyon sınırları bir ara bilgisayar programı kullanılarak elde edilir [20]. İntegrasyon sınırlarının tespiti ile kuvvet hesaplamaları için aşağıdaki prosedür takip edilir.

- 1- DXF arabirim değişim dosyasında veritabanı bilgilerini muhafaza edebilen bir CAD/CAD paket programıyla takım ve iş parçası arakesit geometrisinin katı model tekniği ile teşekkülü.
- 2- Arakesit geometrisine ait bilginin DXF dosyasına yazdırılması.
- 3- DXF dosyası içindeki geometrik bilgiyi yorumlayarak integrasyon sınırları ve takım dönme açısının istenene değişkenlere göre hesaplanması ve bu değişkenlerin bir dosyaya yazdırılması.
- 4- İntegre edilecek kesme kuvvet denklemlerinin çözümünde kullanılacak takım dönme açısı Q, alt integrasyon sınırı ve üst integrasyon sınırı dosyadan okutularak kuvvet hesaplamaları sonuçlandırılır.

Arakesit Geometrisi ve İntegrasyon Sınırları Hesaplamaları İçin Gerekli Formülasyonlar

Şekil 1. de küresel kesici kenar üzerindeki bir noktayı P ile gösterelim. Bu noktanın bileşenlerini kartezyen koordinatlara göre $P(X_n, Y_n, Z_n)$ olarak ifade edelim. Kesme kenarı üzerindeki bu noktalar iş parçasına her takım dönmesine karşılık değişen P noktalarıyla temas eder. Her temas noktası için XY düzlemine paralel kesici yarıçapı $R_p(z)$ aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$R_p(z) = \sqrt{X_n^2 + Y_n^2} \quad (25)$$

Q takım dönmesine karşılı kesici kenar üzerindeki bir noktanın Z_n yüksekliği o andaki kesici takımın eksenel dalma mesafesi olan $R_a(\alpha)$ 'ya eşittir. O halde takım ile iş parçası arakesit eğrisi üzerindeki her P noktasına karşılık gelen eksenel girişim açıları aşağıdaki gibi formülize edilebilir.

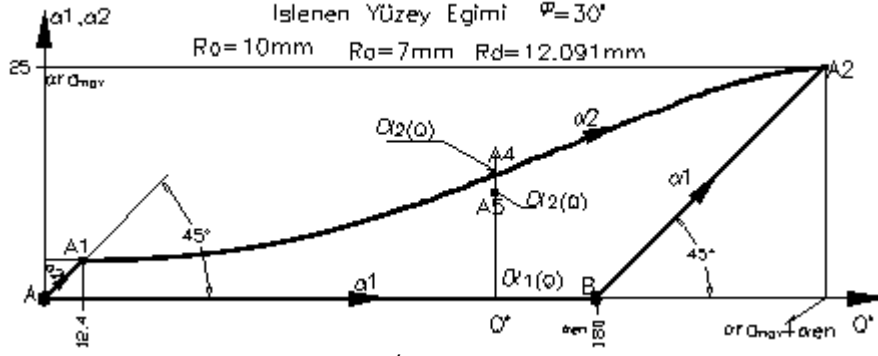
$$\alpha_{r2}(Q) = \frac{R_a(\alpha)}{R_p(z) \cot(Q)} \quad (26)$$

Takım dönme açısının (Q) yönü, α helis üzerindeki P noktasının pozisyon açısının yönü ile ters işaretlidir. Her Z_n değeriyle hesaplanan eksenel girişim açısı değerine karşılık takım kadar daha dönmüş olur. Bu durumda; α ve Q,

$$\alpha = \text{Arc tan} \left(\frac{Y_n}{X_n} \right) \quad (27)$$

$$Q = a + \alpha_{r2}(Q) \quad (28)$$

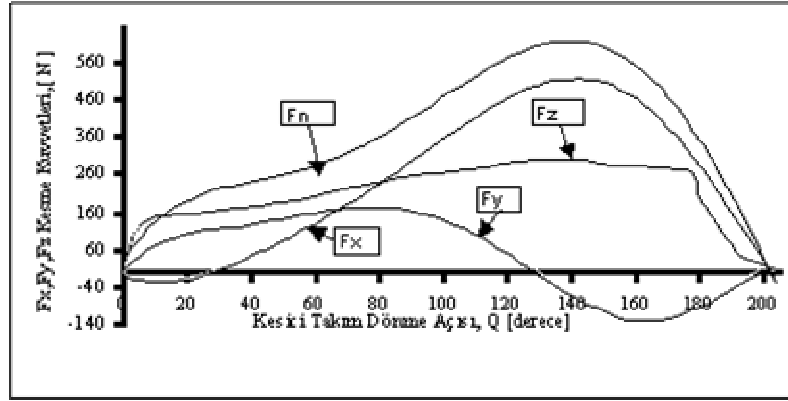
formüllerle hesaplanabilir. İntegrasyon sınırları α ve takım dönme açısı Q daima kesici takımın iş parçası ilk temas noktalarından itibaren ölçülür. P arakesit noktasının konumu X negatif olduğunda α ve Q ;



Şekil 3. İntegrasyon Sınırlarının Değişimi

İntegrasyon sınırları , eğer işlenen yüzey düz olsaydı bir paralel kenar olacaktı. Fakat eğimli yüzey sebebiyle ,A1 ve A2 arasında eğimli yüzeyin kesme kenarı ile temasının fonksiyonu olarak takım dönme açısına göre lineerlik arz etmez. Bu nedenle geliştirdiğimiz metot öncesinde bu işlem için çözüm sağlanamazdı . Burada A noktasında kesme kenarı iş parçasıyla temasa başlar ve α_2 , A1 noktasına kadar takım dönme açısıyla lineer artar. Daha sonra eğimli yüzey sebebiyle α_2 A1 ve A2 ile gösterilen eğriyi takip ederek A2 noktasından temastan kurtulur. α_1 , ise kesici takım radyal girişim açısı kadar dönünceye kadar daima sıfır değerindedir. B noktasından itibaren kesme kenarının en alt noktası temastan kurtulmaya başlar ve takım dönme açısıyla lineer değişerek A2 noktasından α_2 'ye eşit olarak temastan kesme kenarı tamamen kurtulur. $R_0=10\text{mm}$, $R_0=7\text{mm}$, $R_d=12.091\text{mm}$, $f_d=0.0254\text{ mm/dev}$, $Q_k=30^\circ$ ve $\varphi=30^\circ$ işleme şartları için yukarıdaki integrasyon sınır değerleri kesme kuvvet denklemlerinin integral işlemlerinde kullanıldığında şekil 4 de grafik olarak gösterilmiştir. Tablo 1'de ise bazı kesme kuvvetlerinin değerleri verilmiştir. Bileşke kesme kuvveti üç dik yöndeki kuvvetlerinden aşağıdaki formül ile hesaplanır.

$$F_s = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2} \quad (33)$$



Şekil 4. Fx, Fy, Fz, Fn kesme kuvvetlerinin takım dönme açısına bağlı değişimleri

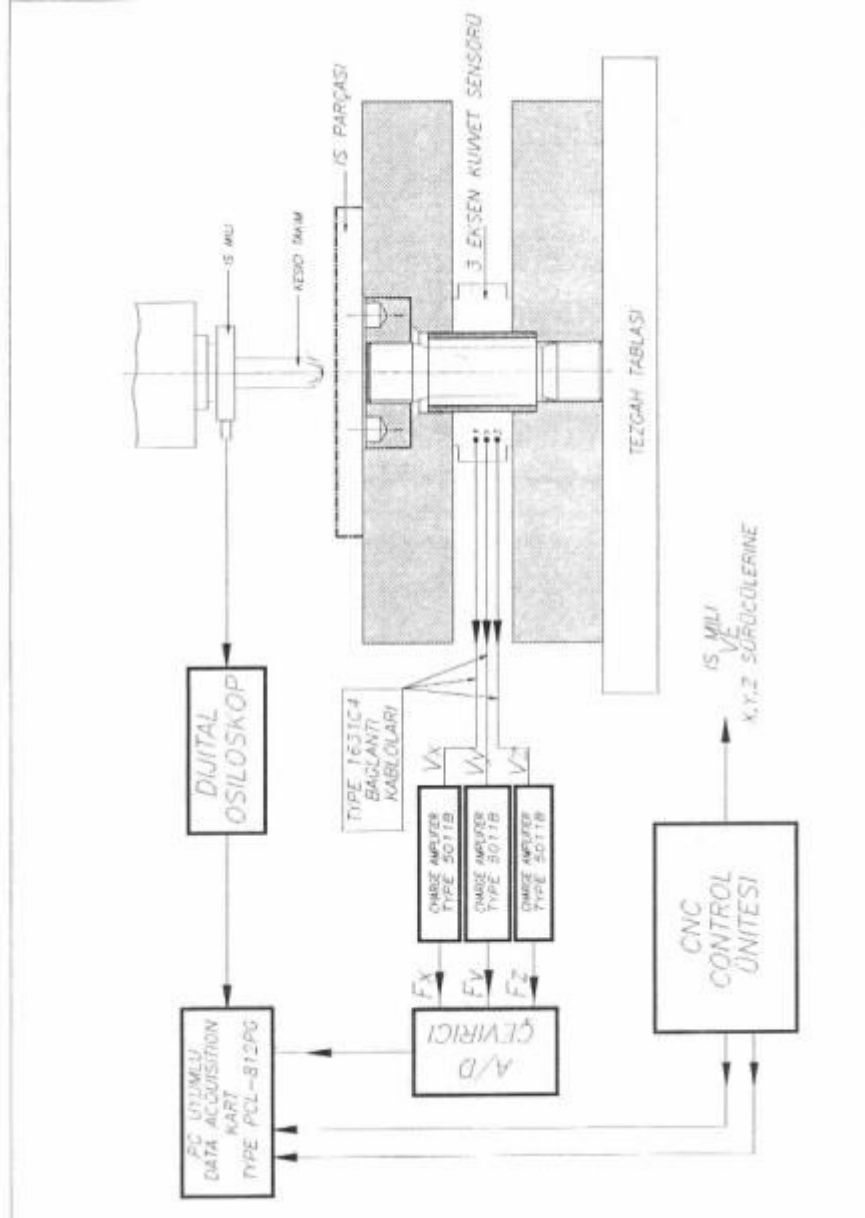
Tablo 1. Fx, Fy, Fz, Fn Kesme kuvvet değerleri

Q [derece]	Fx [N]	Fy [N]	Fz [N]	Fn [N]
0	0	0	0	0
4,8	-36,54	50,65	127,93	142,361
16,8	-18,27	91,17	151,19	177,494

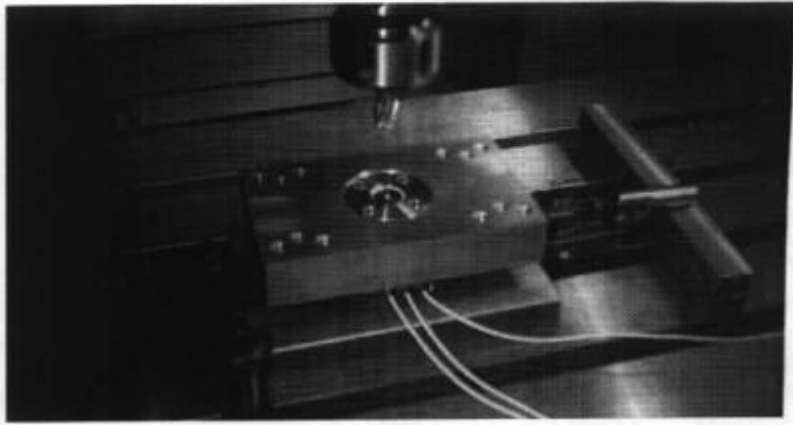
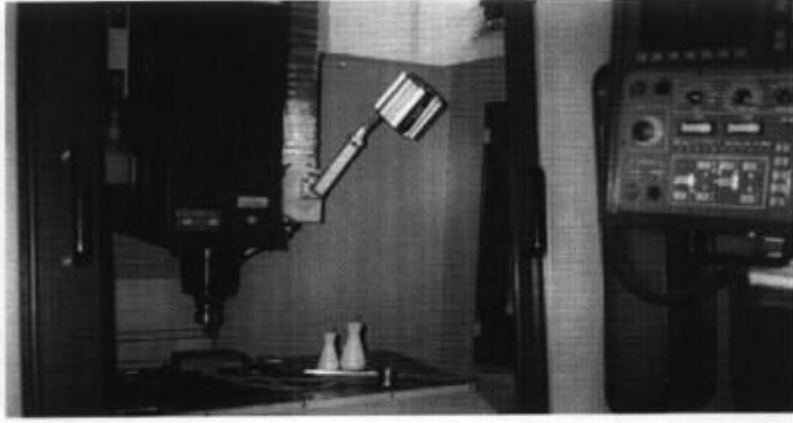
26,4	0	101,3	162,82	191,76
48	73,08	162,08	186,08	257,364
75,6	200,97	151,95	232,6	342,9
98,4	365,4	151,95	267,49	477,658
136,8	511,56	-40,52	302,38	595,625
148,8	493,29	-111,43	290,75	583,341
165,6	420,21	-121,56	279,12	518,904
177,6	328,86	-111,43	267,49	438,311
180	310,59	-101,3	197,71	381,86
187,2	200,97	-60,78	104,67	234,604
192	91,35	-30,39	46,52	106,923

DENEYSSEL ÇALIŞMA

Küresel uçlu parmak frezeleme işlemi esnasında ortaya çıkan kesme kuvvetlerinin (x), (y) ve (z) yönlerindeki bileşenlerinin belirlenmesinde kullanılan deney düzeneği şekil 5'de, deney setinin fotoğrafı ise şekil 6'da görülmektedir. Deney setinde kullanılan elemanlar tablo 2'de verildi. Tablo 2'de görüldüğü gibi deney setini oluşturan elemanlar sırasıyla; CNC Freze tezgahı, (x), (y) ve (z) yönlerinde . Fx, Fy ve Fz kuvvetlerini ölçen kuvvet sensörü, kuvvet sensöründen (x), (y) ve (z) yönlerinde gelen voltaj sinyallerini ayrı ayrı değerlendiren Charge Amplifier, PC bilgisayara adapte edilmiş analog bilgileri dijitale çeviren (A/D) veri toplama kartı ve analog voltaj değerlerinin kontrolünde kullanılan osiloskoptan meydana gelmektedir.



Şekil 5. Kesme kuvvetlerinin deneysel olarak ölçülebilmesi için hazırlanmış deney setinin şematik görünüşü.[20].



Şekil 6. Deney düzeneğinin fotoğrafı[20].

Tablo 2. Deneyde Kullanılan Elemanlar

Deneyde Kullanılan Elemanlar	Elemanların Özellikleri
Frezes Tezgahı	CNC Freze tezgahı, FANUC serisi O-M serisi 3 eksenli kesme tezgahı
Dinamik aletler	ESTLETES 9067
Frezes aletleri	ESTLETES 20116
Doğrulama aletleri	ESTLETES 1630e
Yeni programlama kartı	PLC - 912 PG
Sayısal Kontrol	SP 9400
Deney ortamı	PC 486 D2A 66

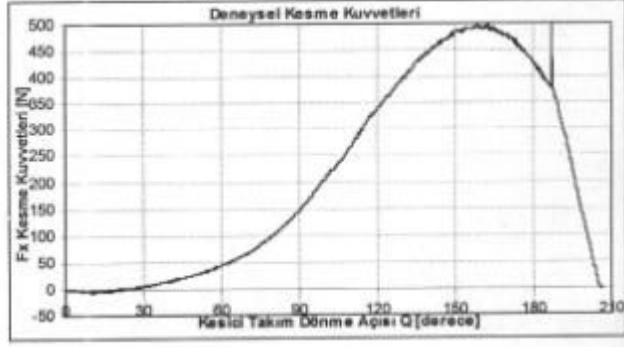
Bir önceki bölümde gerçekleştirilen teorik kuvvetlerin hesaplanmasını doğrulamak için deney şartları aynı seçilmiş ve tablo 3’de gösterilmiştir. Hazırlanan deney setinde tablo 3’de gösterilen kesme şartları kullanılarak gerçekleştirilen deney sonucunda elde edilen (x), (y) ve (z) yönlerindeki kesme kuvvetleri ve teorik kesme kuvvetleri şekil 7, 8 ve 9’da gösterildi.

Tablo 3. Deneyde Kullanılan Kesme Şartları

Kesme Parametresi	Değer
Yanma	60°
Yanma Açısı	60°
Kesme Hızı	10 mm/dk
Kesme Derinliği	7 mm
Kesme Geniliği	1200 mm
Kesme Açısı	0.02 mm

SONUÇ

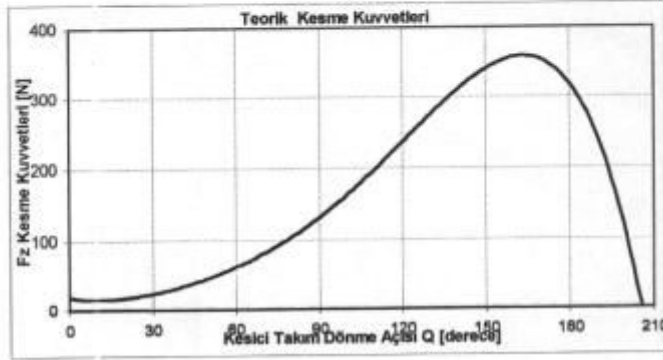
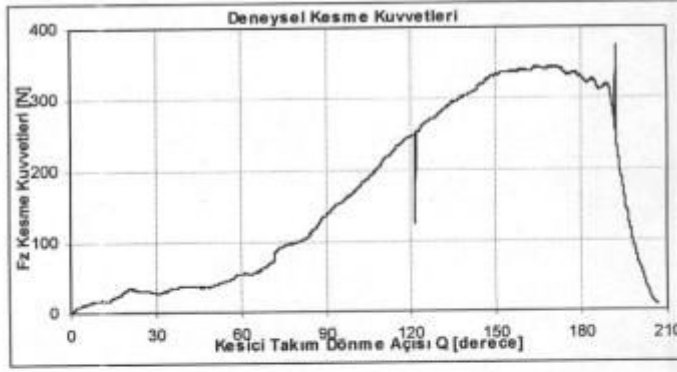
Frezelemede talaş kaldırma işlemleri neticesinde meydana gelen kuvvetlerin kartezyen koordinatlardaki üç bileşeninin kesici takım ile iş parçasının teması ile oluşan arakesit geometrilerinin barındırdığı koordinat bilgisinin katı modelleme tekniği ile elde edilerek hesaplanabileceğine ait bir metot gösterilmiştir. Kesme kuvvetlerine ait mekanik model daha önceki çalışmalarla düz yüzeylerin frezelenmesi için yapılmış deneyler kullanılarak doğrulanmıştır [17]. Ayrıca 4. bölümde yapılan deneysel çalışmada 30° eğimli yüzeyin yanal işlenmesi sonucu (x), (y) ve (z) yönlerinde elde edilen F_x , F_y ve F_z kesme kuvveti bileşenleri de sunulan teorik kesme kuvveti hesaplama modelinin doğruluğunu ortaya koymuştur. Sonuçta deneylerle desteklenen bu çalışma ile önceki metotlarla ulaşılamayan genel çözüme burada yeni bir yöntemle ulaşılmasını sağlamıştır. İntegrasyon sınırlarının CAD/CAM sistemi içerisinde tasarlanabilen kesici takım ile iş parçası geometrilerinin arakesitine ait veri tabanı bilgileri DXF formatlı çizim arabirim değişim dosyalarından elde edilmiştir. Kesme kuvvet denklemlerinin integrasyonu bu şekilde sağlanarak kesici takım dönme açısının fonksiyonu olarak üç eksen kesme kuvvetleri ve bileşke kesme kuvveti hesaplanabilmektedir.



Şekil 7. Küresel uçlu parmak freze kesicisi ile 30° eğimli yanal işlenmesi için deneysel ve teorik F_x kuvvet değerleri.



Şekil 8. Küresel uçlu parmak freze kesicisi ile 30° eğimli yanal işlenmesi için deneysel ve teorik F_y kuvvet değerleri.



Şekil 9. Küresel Uçlu Parmak Freze Kesicisi ile 30° Eğimli Yanal İşlenmesi İçin Deneysel ve Teorik F_z Kuvvet Değerleri.

SEMBOLLER

$\bar{F}_z(Q)$	Kesicinin talaş yüzeyindeki basma kuvveti
$\bar{F}(Q)$	Kesici takımın Q dönmesine karşılık gelen toplam kesme kuvveti
$\bar{F}_f(Q)$	Talaş yüzeyindeki sürtünme kuvveti
$\alpha_1(Q)$	Q takım dönmesine karşılık gelen alt integrasyon sınır açısı
$\alpha_2(Q)$	Q takım dönmesine karşılık gelen üst integrasyon sınır açısı
$A(Q)$	Dönüşüm Matrisi
K_n	Kesici takımın talaş yüzeyi için basınç değişkeni
Q	Kesici takımın dönme açısı
n	Devir sayısı
K_f	Kesici takımın talaş yüzeyi için sürtünme değişkeni
\vec{T}_r	Talaş akış doğrultusundaki birim vektör
K_{nf}	Kesici takımın sırt yüzeyi için basınç değişkeni
K_{ff}	Kesici takımın talaş sırt için sürtünme değişkeni
\vec{e}_f	Kesici takım kesme kenarı sırt yüzeyindeki teğet birim vektör
f_d	İlerleme
R_0	Kesici takımın yarıçapı
\vec{n}_f	Kesici takımın kesme kenarı sırt yüzeyindeki normal birim vektör.
ω	Kesici takımın dönme yönü
α_r	Kesici takımın kesme kenarı talaş açısı.
z_a	Takım işparçası ara kesitini sınırlayan eğrilerin üzerindeki bir noktanın kartezyen koordinatındaki z değeri
x_a	Takım işparçası ara kesitini sınırlayan eğrilerin üzerindeki bir noktanın kartezyen koordinatındaki x değeri

KAYNAKÇA

1. **Smith, S., and Tlusty, J.**, "An Overview of Modelling and Simulation of the Milling Process," ASME. Journal of Engineering for Industry, vol.113, no.2, pp.169-175, 1991.
2. **Tlusty, J.**, "Dynamics of the Cutting Forces in End Milling," CIRP Annals. vol.24/1, pp.248, 1975.
3. **Armarego, E.J.A., and Deshpand, N.P.**, "Computerised End Milling Force Predictions With Cutting Models Allowing Eccentricity and Cutting Deflections," CIRP Annals. vol.40, no.1, pp.25-29, 1991.
4. **Yang, M., and Park, H.**, "The Prediction of Cutting Forces in Ball End Milling," Int. J. Machine Tools Manufacturing. Vol.31, no.1, pp.45-54, 1991.
5. **Yellowley, I.**, "Observation of the Mean Values of Forces, Torque and Specific Power in the Peripheral Milling Process," Int. J. Mach. Tools Manufacturing, vol.25, no.4, pp.337-346, 1985.
6. **Sutherland, J.W., DeVor, R.E.**, "An Improved Method for Cutting Force and Surface Error Prediction in Flexible End Milling Systems," JEI of ESME, vol.108, pp.269, Nov.1986.
7. **Kim, G.M., Cho, P.J., Chu, C.N.**, "Cutting Force Prediction of Sculptured Surface Ball-end Milling Using Z-map", International Journal of Machine Tools & Manufacture 40, 277–291, 2000.
8. **Shatla, M., Atlan, T.**, "Analytical Modeling of Drilling and Ball end Milling", Journal of Materials Processing Technology 98, 2000.
9. **Feng, H.Y., Su, N.**, "Integrated Tool Path and Feed Rate Optimization for the Finishing Machining of 3D Plane Surfaces", International Journal of Machine Tools & Manufacture 40, 1557–1572, 2000.
10. **Engin, S., Altıntaş, Y.**, "Mechanics and Dynamics of General Milling Cutters. Part I: Helical end Mills", International Journal of Machine Tools & Manufacture 41, 2195–2212, 2001.
11. **Wang, J.-J.J., Zheng, C.M.**, "Identification of Shearing and Ploughing Cutting Constants from Average Forces in Ball-end Milling", International Journal of Machine Tools & Manufacture 42, 695–705, 2002.
12. **Yücesan, G., Bayoumi, A.E., Kendal, L.A.**, "An Analytic Closed-Form Mechanistic Cutting Force Model for Milling Operations: A theory and Methodology", Department of Mechanical and Materials Engineering, Washington State University, Pullman, Washington 99164-2920., 1990.

- 13. Yücesan, G., Boyoumi, A.E., Kendal L.A.,** "An Analytic Closet form Mechanistic Cutting Force Model: Theory and Methodology", Submitted J. Engineering for Industry 1991.
- 14. Yücesan, G., Xie, Q., and Abdel, E. Boyoumi,** "Determination of Process Parameters Through A Mechanistic Force Model Of Milling Operations," Department of Mechanical and Materials Engineering, Washington State University, Pullman, Washington 99164-2920., 1993.
- 15. Yücesan, G., and Altıntaş, Y.,** "Mechanics of Ball End Milling Process," ASME 1993 Winter Annual Meeting, Manufacturing Science and Engineering , K. Ehman, ed., ASME PED-vol.64, pp.543-551, 1993.
- 16. Yücesan, G., and Altıntaş, Y.,** "Improved Modelling of Cutting Force Coefficients in Peripheral Milling," Int. J. Machine Tool and Manufacturing, Vol. 34, No.4, pp.474-487, 1994.
- 17. Yücesan, G., and Altıntaş, Y.,** "Prediction of Ball Milling Forces," Journal of Eng. for Ind., Vol.118/95, Canada, February 1996.
- 18. Shaw, M. C., Cook N. H., Smith P. A.,** "The Mechanics of Three Dimensional Cutting Operations", Transactions of ASME., Vol. 74, No.3, pp.1055-1064,1952.
- 19. Autodesk, Inc.,** "AutoCAD Customisation Manual", 1992.
- 20. Kaleli, İ.** "CNC Frezelerde Kesme Kuvvetlerinin CAM Sistemiyle Simülasyonu," Doktora Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Ens. Makine Eğitimi Böl. 1998, İstanbul.