

## Serbest Şekilli Yüzeylerin Frezelenmesinde İşleme Parametrelerinin Form Hatası Üzerine Etkilerinin Araştırılması

Burak ÖZDEMİR<sup>1</sup>, Mehmet Sami GÜLER<sup>2</sup>, Erkan BAHÇE<sup>3\*</sup>, Sefa AKTAŞ<sup>3</sup>

<sup>1</sup> İnönü Üniversitesi, Hekimhan MYO Malatya/TURKİYE

<sup>2</sup> Ordu Üniversitesi, Teknik Bilimler MYO ORDU/TÜRKiYE

<sup>3\*</sup> İnönü Üniversitesi, Makine Mühendisliği Malatya/TURKİYE

### Özet

Bu çalışmanın amacı serbest şekilli yüzeyin işlenmesinde farklı ilerleme ve devir sayılarının boyutsal form hataları üzerindeki etkilerini değerlendirmektir. Bunun için 3 eksenli CNC dik işleme merkezinde radyuslu çakı kullanarak, özellikle medikal ve kalıpcılık sektöründe kullanılan Al6082 alaşımından serbest şekilli yüzeylerin imalatı gerçekleştirildi. Deneysel sonuçlarda işleme parametrelerinin form hatası üzerinde açıkça etkisinin olduğu aynı zamanda işleme parametrelerinin doğru seçilmesi ile form hatalarının azalması açısından önemlidir. Ayrıca talaş kaldırma yönteminin de form hatası üzerinde etkisi olduğu tespit edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Serbest Şekilli Yüzeyler; Form hatası; CAD/CAM

## Investigation Of Machining Parameters Effects On Form Errors In The Milling Of Free Form Surfaces

### Abstract

The aim of this study is to evaluate dimensional machining errors depending on different spindle speed and feed during free-form surface machining using experimental works. For this purpose, the machining of Al6082 alloy, which is used in the production of free-form surfaces for the die-sinking and medical sector in particular, was machined using a ball-end mill in a 3-axis CNC machine. The results obtained from these experiments clearly indicate the influence of machining parameters on form errors, as well as the importance of the appropriate machining parameters for reducing the form errors. In addition, It was also noted that cutting mode is one of the important factors that govern the machining error at a point.

**Keywords:** Free form surfaces; Form error; CAD/CAM

---

\*[erkan.bahce@inonu.edu.tr](mailto:erkan.bahce@inonu.edu.tr)

## 1.GİRİŞ

Parametrik eğriler ile oluşturulan serbest şekil yüzeyli parçalar aerodinamik, akışkanlar gibi sebeplerden dolayı kalıpcılık, otomobil ve medikal gibi alanlarda kullanımı giderek artmaktadır (Feng & Li 2002). Bununla beraber serbest şekilli yüzeylerin şekli ve geometrisi, hem estetik hem de fonksiyonel tasarımdan dolayı giderek karmaşık hale gelmekte ve geometrinin karmaşıklığına bağlı olarak da üretim hassasiyetini de giderek artırmaktadır.

Serbest şekilli yüzeylerin imalatında klasik CNC tezgâhları sadece lineer ve dairesel enterpolasyon sağlamaktadır. CAM sistemler kullanılarak CNC tezgâhlarında serbest şekilli yüzeyler verilen toleranslar altında kontur geometriye yaklaşmak için birçok doğru ve daire yaratma zorunluluğu vardır. Fakat parça hassasiyeti artırıldıkça aşağıdaki sorunlarla karşılaşmaktadır.

- Çizgi ve daireden oluşan değerlerin kısılmasına neden olmakta, buda CNC tezgâhına dönüşümü sağlayan NC kodların sayısının artmasına neden olmaktadır.

- CNC tezgahlarda yüksek hızlı işlemede data iletiminde transfer edilen data miktarını yakalayamamakta.

- Birbirine bağlı iki çizginin birleşme noktasında süreksizlik ve ilerlemede hatalar oluşturmakta.

- Yüksek hızda işlemede meydana gelen ani hareketler ve ani hızlanmalar titreşime sebep olmakta ve işleme kalitesi düşmektedir (Lasemi et al 2010).

Genel olarak serbest şekilli yüzeylerin üretilmesinde yüzey son şeklini almadan önce kaba, yarı kaba ve hassas işleme olmak üzere üç aşamada işleme yöntemi uygulanmaktadır. Kaba işlemede düz uçlu freze çakısı kullanılırken, yarı kaba ve hassas işlemede ise radyuslu çakılar kullanılmaktadır (Desai & Rao 2008).

Talaşlı imalatta bilimsel bilgiye dayalı olarak işleme yöntemlerinin optimizasyonu ile yüksek verimlilik elde edilmeye çalışılması ve serbest şekilli yüzeylerin geometrilerinin karmaşık olmasından dolayı bu yüzeylerin üretimi gün geçtikçe önem kazanan bir kavram haline gelmektedir. Serbest şekilli yüzeyler üzerine yapılan çalışmalar incelendiğinde Haldar (Haldar 2008), Matlab programından yararlanarak kübik bezier yüzeyin üretim tekniğini ve

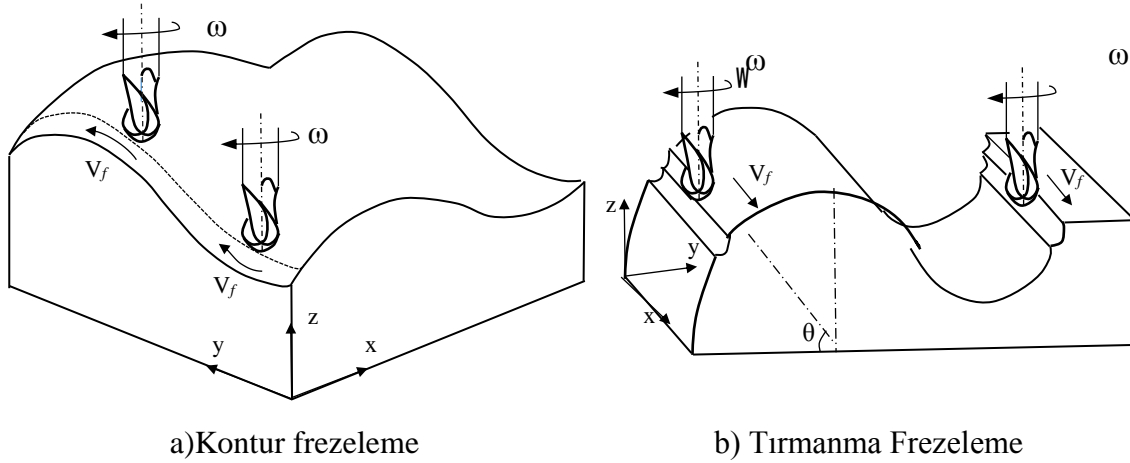
modellenmesini araştırmıştır. Yapmış olduğu çalışmada matlab programını kullanarak bir yüzey oluşturmuş ve bu yüzeyin işlenmesi için yine matlab programından yararlanarak takım yolu algoritması geliştirmiştir. Geliştirmiş oldukları yöntem ile işleme uzunluklarını hesaplamışlardır. Ersoyoğlu & Ünüvar (2008)'a göre serbest şekilli yüzeylerin hassas ve düşük maliyetle üretilmesini sağlamak amacıyla, belirli takım yolu şablonlarından uygun olanını ve gerekli takımları seçebilen bir takım yolu oluşturma sistemi geliştirmişlerdir. Chambers & Rockwood (1996), Bilgisayar Destekli Geometrik modelleme yöntemlerini, eğri ve yüzey oluşturmak için matematiksel ifadeleri ve bunların uygulanması için gerekli algoritmaları vermişlerdir. Yapmış oldukları bu çalışmada Bezier, B-spline eğrileri ve yüzeyleri CADG (Computer Aided Geometrik Dizayn) ile incelemişlerdir. Can & Ünüvar (2010), B-Spline eğriler ile oluşturdukları yüzeyleri 5 eksenli CNC freze tezgâhlarda işlemesini incelemişlerdir. Yüzey eğriliği ve kesici takımın radiusu arasına algoritma oluşturarak yüzeylerin eşit pasoda takım yolu ile işleme verimliliğini artırmayı amaçlamışlardır. Choi (2004), serbest şekilli yüzeylerin işlenmesinde istenilen toleransın elde edilmesini ve takım yolunu araştırmıştır. İstenilen toleransa göre serbest şekilli yüzeyin üretilmesi için gerekli olan takım yolunu üreten algoritma geliştirmişleridir. Kurt et al (2012), grey relational yönteminden yararlanarak serbest şekilli yüzeylerin frezelenmesinde işleme parametrelerinin ve takım yollarının form hatasına ve yüzey pürüzlülüğüne etkilerini araştırmışlardır. Erdim et al (2006), serbest şekilli yüzeylerin parmak frezeleme ile işlenmesinde hem talaş kaldırma hacmi hem de ilerlemeye göre işleme kalitesini deneysel ve teorik olarak incelemişlerdir.

İmalat sanayisinde ürün kalitesi ve verimi rekabetçi ortamda oldukça önemli olduğundan rekabette daha kısa sürede daha az maliyetle, belirtilen sınırlar içerisinde parçanın imal edilmesi gerekmektedir. Serbest şekilli yüzeylerin de kalitesi ve imalat süresi sanayide rekabetin gereklerindedir. Ürünün belirtilen tolerans içerisinde üretimini gerçekleştirmek, maliyet ve zamanı azaltmak serbest şekilli yüzeylerin imalat endüstrisinde karşılaşılan sorunlardandır. Bu da işleme sürecinin uygun optimizasyonu ile yüksek kalitede ve uygun maliyette üretimi sağlamaktadır. Klasik işleme yöntemler düşük maliyetlerle üretimi sağlamayı amaçlamaktadır. Ancak serbest şekilli yüzeylerin imalatında her zaman bunu sağlayamamaktadır. Bu nedenle bu yüzeylerin imalatında optimize edilmiş işleme yöntemleri

geliştirmek oldukça önemlidir. Yapılan bu çalışmada işleme parametrelerinden devir sayısı ve ilerlemenin yüzey form hatalarına etkileri araştırılmıştır.

## 2. SERBEST ŞEKLİ YÜZEYLERİN İŞLENMESİ

Serbest şekilli yüzeylerin finish frezelemesinde eğrilikler dikkate alındığında yüzeyler konveks ve konkav yüzeylerden meydana gelmektedir. Bu yüzeylerde Şekil 1-a'da görüldüğü gibi kontur ve Şekil 1-b'de görüldüğü gibi tırmanma frezeleme hareketleri ile talaş kaldırma işlemi gerçekleştirilmektedir.



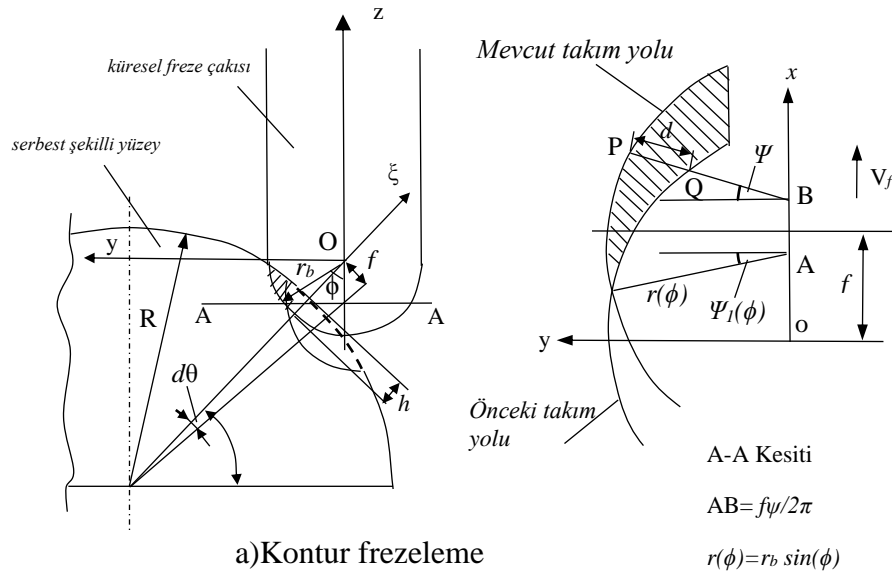
Şekil 1. Serbest Şekilli Yüzeylerin İşlenme Yöntemleri

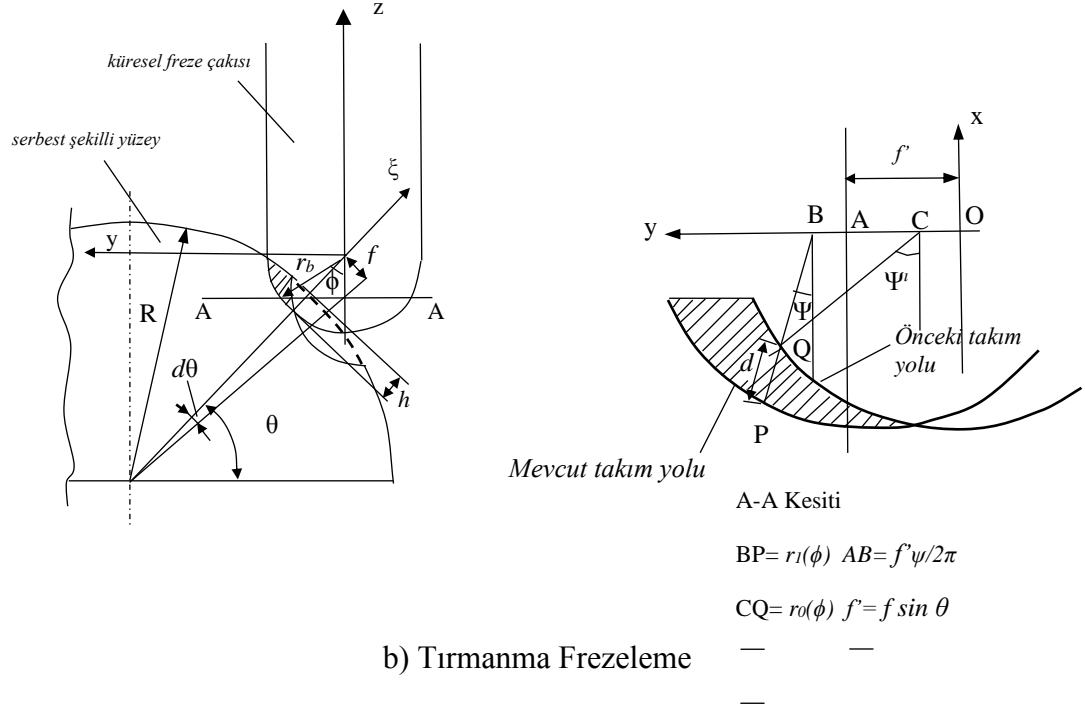
Kontur işlemede takım konveks-konkav eğriliği takip etmekte, tırmanma frezeleme de ise takım iş parçasının eğrilik eksenine paralel hareket etmektedir. Şekilde görülen  $\theta$ , frezeleme noktasının açısını,  $\omega$  açısal hızı,  $V_f$  ise ilerleme hızını ifade etmektedir. Kontur frezelemede küresel takımın eğriliği yüzeyin eğriliği uyumlu olup, belirtilen referansa göre eş yönlü veya zıt yönlü olarak hareket etmektedir. Tırmanma frezeleme de, takım pozitif x eksen yönünde ve zıt yönlü ilerleme var ise “sağa zıt ilerleme”, x eksenin negatif yönünde ise “sola zıt frezeleme” olarak adlandırılmaktadır. Takım ilerlemesi z eksen boyunca ve pozitif yönde ise “yukarı doğru kesim”, z eksenin negatif yönünde ise “aşağı doğru kesim” olarak adlandırılmaktadır (Ikua 2001). Buna göre Şekil 1. A da yukarı zıt yönlü-yukarı doğru işleme, Şekil B de ise sola zıt yönlü-yukarı doğru frezeleme yapılmaktadır.

Talaş geometrisi işleme hatasını ve anlık kesme kuvvetlerinin hesaplanmasında oldukça önemlidir. Takımın kontur frezeleme ve tırmanma frezelemede Şekil 2’de talaş kaldırma modelleri görülmektedir. Bu modellerde O, küresel çakının radyus merkezi; R iş parçasının eğrilik yarıçapını, h kesme derinliğini, f ilerleme hızını,  $r_b$  kesici takımın yarıçapını, ifade etmektedir. Kontur işleme de, kesme kenarı üzerinde bir P noktası trochoidal takım yolunu izler ve buda aşağıdaki tanımlanan parametrik denklemler ile tanımlanır;

$$\left. \begin{aligned} x_p &= \frac{(\psi + 2\pi n)n_t f}{2\pi} + r(\phi)\sin(\psi + 2\pi n) \\ y_p &= r(\phi)\cos(\psi + 2\pi n) \\ n &= 1,2,3, \dots \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$n$ , devir sayısını,  $r(\phi)$ , kesici ağız üzerinde bir noktanın izlediği yayın yarıçapı,  $\psi$  ve  $\phi$  sırasıyla bulunan noktadaki dönüş açısını ve konum açısını temsil etmektedir (Ikua at al 2001).





Şekil 2. Serbest Şekilli Yüzeylerin Talaş Kaldırma Yöntemleri

Şekil 2’de görüldüğü üzere bir takım üzerindeki ardışık iki kesme kenarın oluşturduğu talaş geometrisi denklemi;

$$\frac{f}{2\pi} \left\{ -(2\pi + \psi) + \cos^{-1} \left[ \frac{(r(\phi) - d) \cos \psi}{r(\phi)} \right] \right\} + (r(\phi) - d) \sin \psi - \sqrt{r(\phi) - ((r(\phi) - d)^2 \cos^2 \psi)} = 0 \quad (2)$$

Buradan, yatay yöndeki talaş kalınlığı  $d$  hesaplanabilir.

Tırmanma frezelemede kesme kenarı üzerinde bir noktanın izlediği yol aşağıdaki denklemlerden elde edilebilir;

$$\left. \begin{aligned} x_p &= -r(\phi)\cos(\psi + 2\pi n) \\ y_p &= r(\phi)\sin(\psi + 2\pi n) + \sum_n n_t f \sin(\theta + nd\theta) \\ z_p &= r_b \cos \phi + \sum_n n_t f \cos(\theta + nd\theta) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Tekrar, ardışık iki kesme ağzının oluşturduğu talaş geometrisini yukarıdakine benzer şekilde elde edebiliriz.

$$\begin{aligned} & \frac{f}{2\pi} \{ \psi \sin \theta + 2\pi \sin(\theta - d\theta) - \sin(\theta - d\theta) \\ & \times \cos^{-1} \left[ \frac{(r_1(\phi) - d) \cos \psi}{r_0(\phi)} \right] \} + (r_1(\phi) - d) \sin \psi - \sqrt{r_0(\phi) - (r_1(\phi))^2 \cos^2 \psi} = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

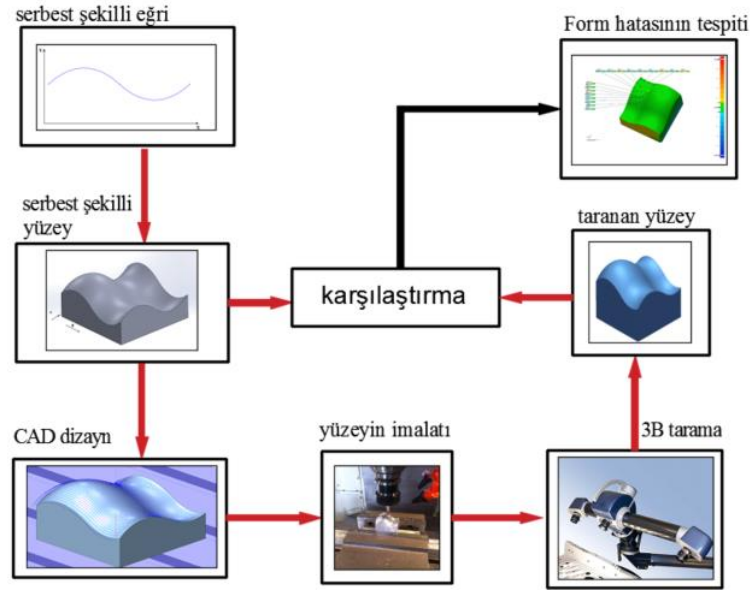
Buradan da yatay yöndeki talaş kalınlığı  $d$  hesaplanabilir. Bu denklemde  $r_1(\phi)$  takımın kesme anında kesici ağız üzerinde bir noktanın izlediği yayın yarıçapı,  $r_0(\phi)$  bir önceki kesme de kesme anında kesici ağız üzerinde bir noktanın izlediği yayın yarıçapı belirtmektedir ve aşağıda verilen denklem ile hesaplanır.

$$r_0(\phi) = \sqrt{r_b^2 - (r_b \cos(\phi) - f \cos \theta)^2} \quad (5)$$

### 3. MATERYAL VE METOD

#### 3.1 Deneysel Dizayn

Serbest şekilli yüzeylerin finish işlenmesinde meydana gelen form hatalarının değerlendirilmesi amacıyla Şekil 3’de görülen adımlar sırasıyla takip edildi.



Şekil 3. Deneysel çalışmanın genel özeti

### 3.2. Malzeme ve Deney Tasarımı

B-spline eğriden yararlanarak oluşturulan serbest şekilli yüzeyin imalatında uzay sanayisinden elektronik sanayisine kadar birçok alanda kullanılan Al 6082 alaşımı kullanıldı. Buna ait kimyasal ve fiziksel özellikler sırasıyla Çizelge 1-a ve Çizelge 1-b’de verildi.

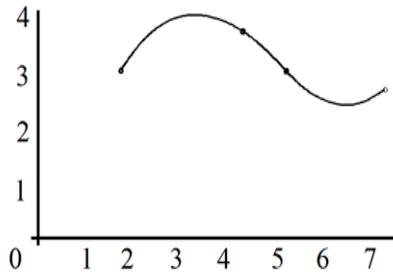
Çizelge 1. Al 6082 Alaşımının özellikleri

a) Kimyasal Özellikleri		b) Fiziksel Özellikleri	
Al 6082 Alaşımı	% miktarları	Özellik	Değer
Mn	0.40-1.00	Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )	2.70x10 <sup>3</sup>
Fe	0.0-0.50	Erime Sıcaklığı (° C)	555
Mg	0.60-1.20	Termal genleşme (/K-20 ° C’de)	24 x10 <sup>-6</sup>
Si	0.70-1.30	Elastisite Modülü (GPa)	70
Cu	0.0-0.10	Isı iletkenliği (W/(m.K))	180
Zn	0.0-0.20	Elektriksel öz direnç (Ohm.m)	0.038 x10 <sup>-6</sup>
Ti	0.0-0.10	Çekme Dayanımı (MPa)	340
Cr	0.0-0.25	Akma Dayanımı (MPa)	290
Diğer Ürünler	0.0-0.15	Sertlik (HV)	95
Al	Geriye Kalan	Uzama (%)	6

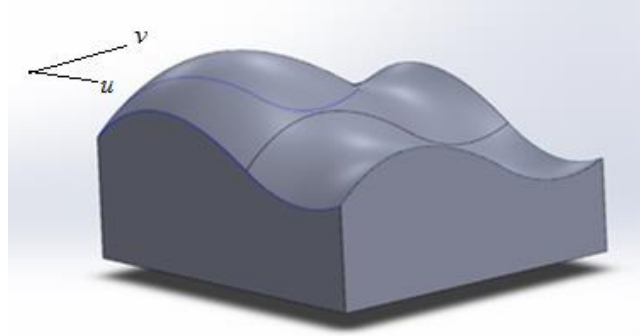
İşleme parametrelerinin yüzey formlarına etkilerini araştırmak için serbest şekil yüzey formunun sınırlarını belirten kontrol noktaları belirlendi. Bu noktalar yüzeyin serbest şekilde



oluşmasını sağlamak amacıyla  $B_0(10,20)$ ,  $B_1(30,50)$ ,  $B_2(60,20)$ ,  $B_3(90,40)$  olarak rastgele seçildi. Eğrinin birleşme noktalarında sürekliliğini sağlayan knot vektörleri ise non-uniform olarak sırasıyla  $t_0=2$ ,  $t_1=4$ ,  $t_2=5$ ,  $t_3=7$ ,  $t_4=8$ ,  $t_5=10$ ,  $t_6=11$  olarak belirlendi. B-spline eğrisinin çizilmesi için gerekli olan baz fonksiyonları MATLAB R2012a'da yazılan program ile hesaplandıktan sonra kontrol noktaları ile çarpılarak B-spline eğri elde edildi (Şekil4-a). Ardından eğriden yüzey oluşturmak amacıyla u ve v bileşeni aynı eğriden oluşturulup tensör çarpımıyla yüzey formu elde edildi (Şekil4-b). Yüzeyin oluşturulması için SOLIDWORKS 2013 programı kullanıldı.



a-Serbest Şekilli Eğri



b-Serbest Şekilli Yüzey

Şekil 4. Serbest şekil yüzeyin elde edilmesi

Deneyde kesme hızı ve ilerleme miktarı olmak üzere üçer seviyeli üç farklı kontrol faktörü ile bir faktöriyel deney tasarımı oluşturuldu. Deney girdisi olarak üç farklı devir sayısı ve üç farklı ilerleme değeri seçilmiştir. Kullanılan Minitab paket programı vasıtasıyla üç seviyeli Taguchi L9 deney tasarımı oluşturuldu. Çizelge 2'de deney tasarımının seviyeleri ve kontrol faktörleri verilmiştir.

Çizelge 2. Deney için kontrol faktörleri ve seviyeleri

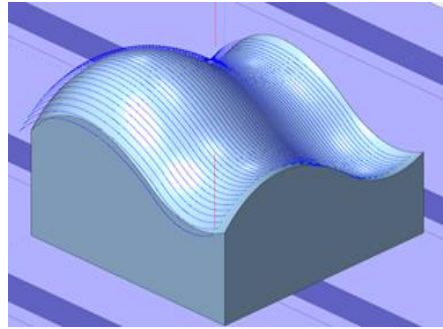
Faktörler	Birim	1.Seviye	2.Seviye	3.Seviye
Devir Sayısı	dev/dak	2500	3000	3500
İlerleme	mm/dak	1000	1200	1400

Çizelge 2'deki faktörler göz önünde bulundurularak, deneysel çalışma için en uygun tasarım olarak Taguchi L9 ortogonal dizin seçildi ve Minitab istatistik yazılımı Çizelge 3'de görüldüğü şekilde deney tasarımı elde edildi.

**Çizelge 3.** Taguchi L9 Deney tasarımı

Deney No	Devir Sayısı dev/dak	İlerleme mm/dak
1	1	1
2	2	2
3	3	1
4	1	3
5	3	2
6	1	2
7	3	3
8	2	1
9	2	3

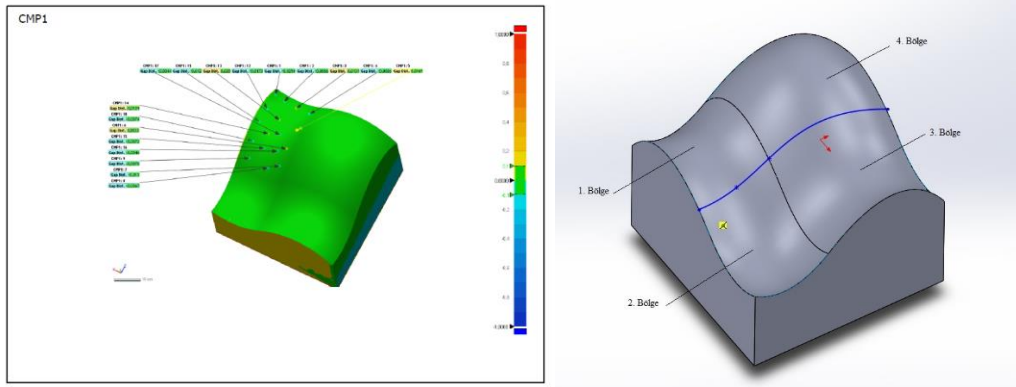
Serbest şekilli yüzeyin imalatında SOLIDCAM 2013 programı kullanılarak kaba, ara kaba ve finish işleme olmak üzere üç aşamada üretim gerçekleştirildi. Kaba ve ara kaba işlemede kontur kaba takım yolu ve finish işlemede yüzeye paralel takım yolu kullanılarak gerçekleştirildi (Şekil 5). Yüzeylerin işlenmesinde kaba işleme için  $\emptyset 10$  mm 4 ağızlı karbürü DIN 6528 düz parmak freze ara kaba ve finish işleme için ise  $\emptyset 10$  mm 4 ağızlı DIN 1889/B standardında radyuslu parmak freze kesici takım kullanıldı.



**Şekil 5.** Finish işleme için oluşturulan takım yolu

### 3.3. Yapılan Ölçümler

CNC Dik İşleme Merkezi'nde Al6082 alaşımından üretilen serbest şekilli yüzeylerin imalatı sonrası oluşan form hatalarının tespiti için "Breuckmann Smart Scan R5" markalı 3B tarama cihazı kullanıldı. Tarama sonrası yüzeylerden 3 boyutlu noktalar elde edilerek CAD model üzerindeki aynı nokta ile karşılaştırılarak hatanın büyüklüğü tespit edildi (Şekil 6-a). Deneyin kararlılığını sağlamak için deneyler 2 defa tekrarlandı. Yüzey form hatalarının değerlendirilmesini kolaylaştırmak amacıyla konveks ve konkav yüzeyler dikkate alınarak dört bölgeye ayrıldı (Şekil 6-b).



a -Hataların karşılaştırılması

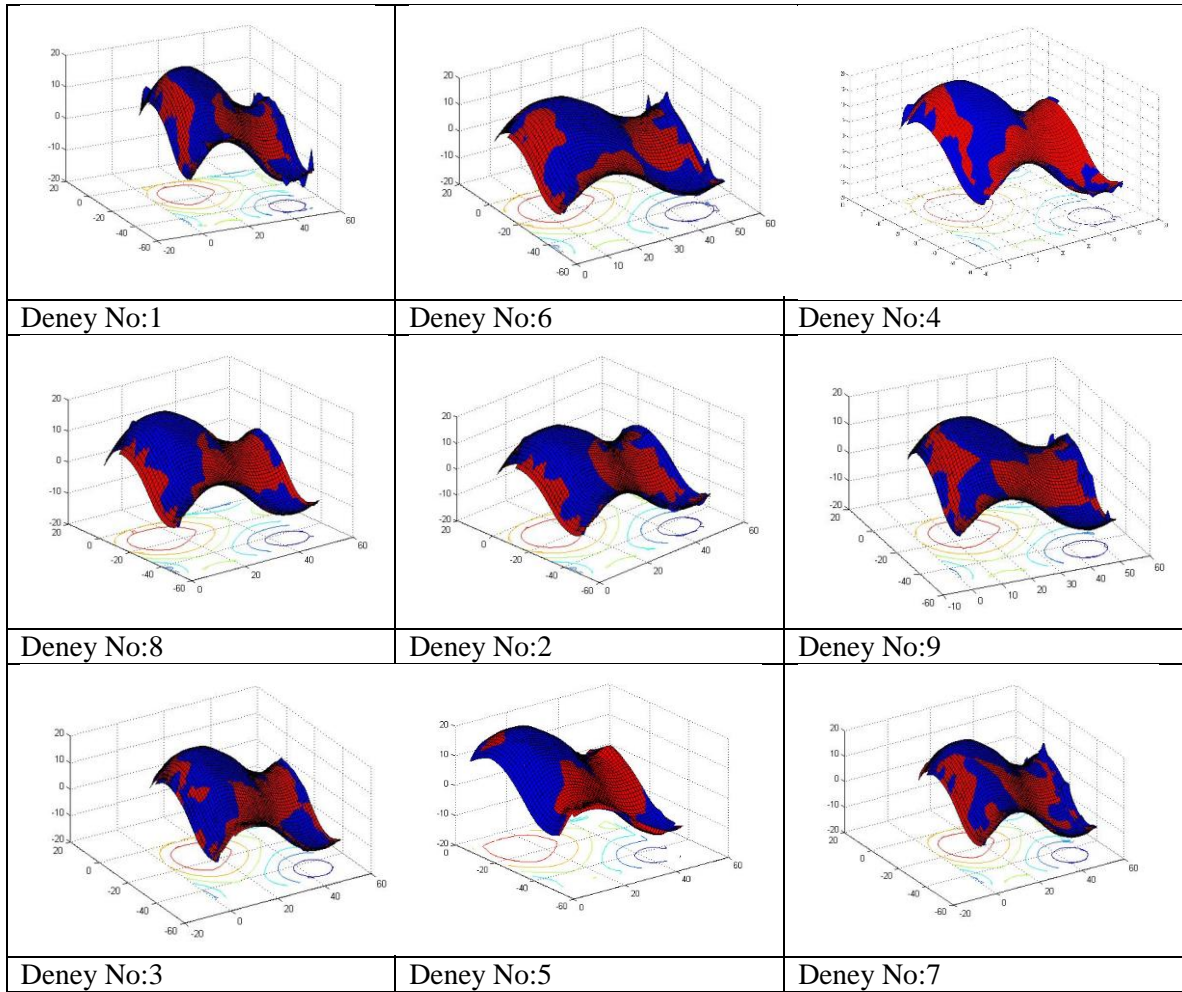
b-Yüzeyin bölgelere ayrılması

Şekil 6. Form hatalarının değerlendirilmesi

## 4. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA

3B taramadan elde edilen model ile CAD modeli karşılaştırılmış ve parça üzerindeki form hataları sayısal olarak ölçülerek işaretlenmiştir (Şekil 6). Parça üzerinde meydana gelen negatif veya pozitif form hataları ve oluştuğu bölgeler üç boyutlu optik tarama çıktıları ile hesaplanmıştır. Parça üzerinde form hata değerleri renklendirmeler yardımı ile belirginleştirilmiştir. Ayrıca form hatalarının oluşum sıklığını belirlemek amacıyla elde edilen yüzey form hataları her bir numune için ve bölgesel olarak değerlendirilmiştir. Değerlendirmede, sapma miktarlarının ortalaması, kümülatif toplamı ve görülme sıklığı

(tarama ölçüm değerinin referans yüzey ölçüsünden  $\pm 0,01$  mm sapması ve bu durumun tekrarlama sayısı) baz alınarak, işleme parametrelerinin etkileri araştırılmıştır. Bölgeler ve numunelere göre sıralama yapılarak en iyi ve en kötü sonucu veren durumlar değerlendirilmiş ve yüzeylerin değerlendirilme işleminde MATLAB programı kullanılmıştır (Şekil 7).



**Şekil 8.** Yüzey Form hataların karşılaştırılması

Şekil 8’da görülen grafiklere göre mavi alan CAD modeli kırmızı alan ise form hatalarının oluştuğu bölgeleri göstermektedir. Yapılan deneylerde meydana gelen en büyük ve en küçük

form hata değerlerinin büyüklüğü Çizelge 3’de verildi. Şekil 8’de de görüldüğü üzere form hataların genel olarak 2. ve 3. bölgelerde yoğunlaştığı dikkat çekmektedir. Bu bölgeler genel olarak takımın tırmanma ve inme yaptığı bölgelerdir ve bu kısımlarda maksimum form hatalarının oluştuğu göze çarpmaktadır (Şekil 8). Takım efektif çapının azaldığı 1. ve 4. bölgelerde ise form hata değerlerinin azaldığı görülmektedir. 2 ve 3. bölgelerde oluşmasının sebebi bu bölgelerde efektif temas çapının artması nedeniyle takımdaki sehim oranının artması ile açıklanabilir. Ayrıca Şekil 8 incelendiğinde ilerleme miktarı arttıkça form hatalarının arttığı en büyük form hatası değerlerinin 1400 mm/dak ilerleme ve 2500 dev/dak değerlerinde oluştuğu tespit edilmiştir. En düşük form hata değerlerinin ise 1000 mm/dak ilerleme ve 3500 dev/dak değerlerinde oluştuğu tespit edilmiştir. Yine Şekil 8’den görüleceği üzere ve Bölüm 2’de tanımlanan talaş geometrisi düşünüldüğünde kontur frezelemenin gerçekleştiği yüzeylerde form hatası büyüklüğünün az olduğu, tırmanma frezleme yani yanall kaymalarda ise form hatalarının büyüklüğünün daha fazla oluştuğu tespit edilmiştir. Bu sonuçlar da Bağcı (2011)’inki ile uyumaktadır.

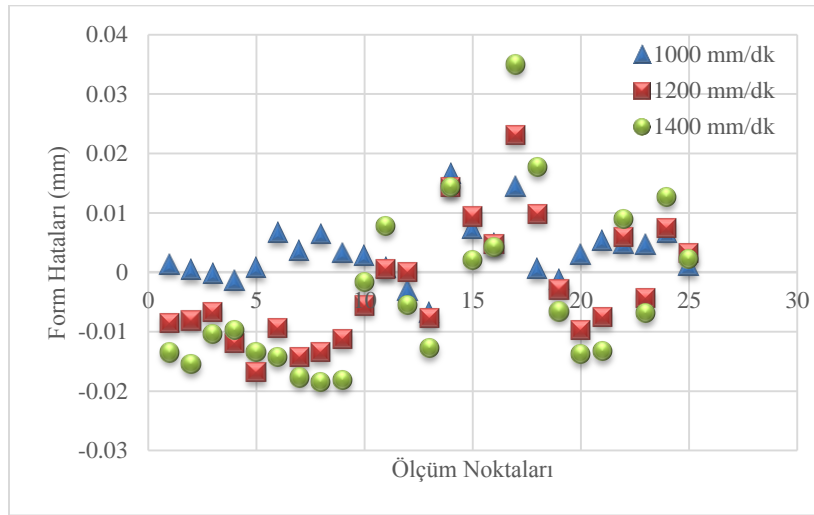
**Çizelge 3.** Form hatalarının 4. Bölge için hata değerleri

ÖLÇÜM NOKTASI	Deney No:1	Deney No:2	Deney No:3	Deney No:4	Deney No:5	Deney No:6	Deney No:7	Deney No:8	Deney No:9
1	-0,022	-0,0099	-0,0231	-0,0081	-0,0232	-0,016	-0,0255	-0,0052	-0,0171
2	0,0016	-0,0113	-0,007	-0,0039	-0,0051	-0,0085	-0,0079	0,0026	-0,0068
3	0,0185	0,0058	0,0207	0,0198	0,0215	0,0149	0,0185	0,0185	0,0185
4	0,0043	0,0125	0,0153	0,0262	0,0126	0,0101	0,0055	0,0101	0,0177
5	-0,0017	0,0127	0,0133	0,0275	0,0094	0,0049	-0,0032	0,0088	0,0134
6	-0,0037	0,0164	0,0156	0,034	0,0161	0,0157	0,007	0,0225	0,0212
7	-0,0047	0,0183	0,0169	0,0308	0,0211	0,0172	0,0175	0,0259	0,0183
8	-0,0357	-0,0048	-0,0102	-0,0028	-0,0082	-0,0117	-0,0184	-0,0067	-0,0225
9	-0,0201	-0,0055	-0,0016	-0,0078	-0,0133	-0,0065	-0,0147	-0,009	-0,0267
10	-0,0244	-0,0055	0,0011	-0,0087	-0,007	-0,01	-0,0006	-0,0046	-0,0153
11	-0,021	-0,011	-0,0095	-0,0162	-0,0134	-0,0202	-0,0122	-0,0156	-0,0243
12	-0,0123	-0,0087	-0,0141	-0,0148	-0,0168	-0,0154	-0,0148	-0,018	-0,0295
13	-0,0129	0,003	-0,0192	-0,0134	-0,0144	-0,0196	-0,0265	-0,0205	-0,0209
14	-0,0105	-0,0123	-0,0212	-0,0159	-0,0214	-0,0208	-0,025	-0,0179	-0,0196
15	-0,0175	-0,0107	-0,0194	-0,0101	-0,0193	-0,0157	-0,0218	-0,0093	-0,0156
16	-0,0026	-0,0079	-0,0214	-0,0121	-0,0187	-0,0201	-0,0254	-0,0199	-0,0199

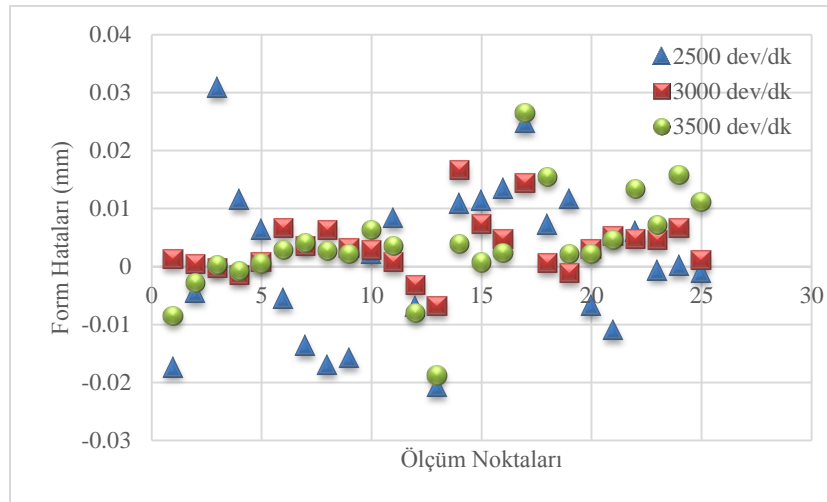
\*Çizelgedeki değerlerin birimi mm’dir.

Deneyisel çalışmalar neticesinde ilerleme değerlerinin artması ile form hataları artış gösterdiği görülmüştür (Şekil 9). Bunun sebebi artan ilerleme miktarına bağlı olarak devir

başına kesilen talaş kalınlığı artmasıdır. İlerleme miktarının artması; yüksek ilerleme kuvvetine, düşük kayma açısına ve kalın talaşların oluşmasına neden olmaktadır (Akkurt 2010). Bu durum ise işlenen yüzeylerin kesme esnasında meydana gelen kuvvetlerden daha çok etkilenmesi ve takımın sehim miktarında artması anlamına gelmektedir ve form hatalarının artmasına neden olmaktadır (Shaw 2005) (Şekil 8 ve 9). Devir sayısının artmasına bağlı olarak Şekil 8 ve 10'den da görüleceği üzere form hatası azalmaktadır. Bunun başlıca sebebi ise kesici takım temas alanının azalması, kesme hızına bağlı olarak artan takım-iş parçası sıcaklığının, kesme bölgesinde kayma dayanımını azaltması (Şahin 2000) ve bunlara bağlı olarak takım sehiminin azalması olarak açıklanır.



**Şekil 9.** 3000 dev/dk devir sayısında ilerlemeye göre form hatası



**Şekil 10.** 1400 mm/dk ilerlemede devir sayısına göre form hatası

## 5. SONUÇLAR

Deneysel çalışma neticesinde ilerleme ve devir sayısının artmasının form hatalarına etkileri araştırılmıştır. Elde edilen bulguların literatür sonuçları ile yakinen örtüştüğü görülmüştür. Gök et al (2014)'e göre, ilerleme hızının artması ile takım sehiminin arttığı belirlenmiş ve yapılan çalışma Ikua et al (2001)'nin çalışmaları ile paralel sonuçlar vermiştir. Yapılan bu çalışmada form hatalarının ilerlemenin artmasına bağlı olarak arttığı özellikle çukur bölgede (2. Bölge) bu hatanın büyüklüğünün daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Devir sayısının artması ile de form hatlarının azaldığı, çukur bölge için ise form hatası büyüklüğünün azalmasının düşük boyutlarda olduğu tespit edilmiştir. Hataların oluşmasındaki ana sebebin takım sehiminden kaynaklandığı belirlenmiştir. Takımın tırmanmasına bağlı olarak bu sehimin de artması nedeniyle form hatalarında artış gözlemlenmiştir. Bu nedenle kesme yönteminin önemli faktörlerden biri olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca en düşük form hata değerlerinin 1000 mm/dak ilerleme ve 3500 dev/dak işleme parametrelerinde gerçekleştiği tespit edilmiştir. Kontur frezelemenin olduğu bölgelerde form hatasının büyüklüğünün tırmanma frezleme yani yanal kaymada oluşan hataya göre daha az olduğu tespit edilmiştir.

## KAYNAKLAR

- Feng Y. ve Li H., “Constant Scallop-Height Tool Path Generation for three axis Sculptured Surface Machining”, *Computer Aided Design*, 654-657, 2002
- Lasemi A, Xue DY, Gu PH. Recent development in CNC machining of freeform surfaces: a state-of-the-art review. *Comput-Aided Des* 2010; 42 (7) : 641– 54
- Desai K. A., Rao P. V. M., Effect of direction of parameterization on cutting forces and surface error in machining curved geometries, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 48, 249–259, 2008
- Haldar B.K. (2008). CNC tool path generation for free-form surface machining. Yüksek lisans tezi, Jadavpur University, Kalyani.
- Ersoyoğlu A.S., Ünüvar A. (2008). Serbest şekilli yüzeylerin işlenmesi için takım yolu oluşturulması. Selçuk Üniversitesi, Konya.
- Chambers P., Rockwood A.P. (1996). Introduction to curves and surfaces. SIGGRAPH
- Can A., Ünüvar A.(2010). Five-axis tool path generation for 3D curves created by projection on B-spline surfaces. *Int J Adv Manuf Technol*. 49:1047–1057.
- Choi Y.K. (2004). Tool path generation an 3D tolerance analysis for free-form surfaces. Doktora tezi, A&M Universty, Texas.

- Kurt M., Hartomacıoğlu S, Mutlu B., Köklü U., Minimization of the surface roughness and form error on the milling of free-form surfaces using a grey relational analysis, MTAEC9, 46,205, 2012
- Erdim H., Lazoğlu I., Ozturk B. (2006). Feedrate scheduling strategies for free-form surfaces. International journal of machine tools & manufacture 46 (2006) 747-757.
- Ikua B., Tanaka B, Obata F. ve Sakamoto S.,” Prediction of cutting forces and machining error in ball end milling of curved surfaces -I theoretical analysis” Precision Engineering Journal of the International Societies for Precision Engineering and Nanotechnology, 25 (2001) 266–273
- Bagcı, E., “Monitoring and analysis of MRR based feedrate optimization approach and effects of cutting conditions using acoustic sound pressure level in free-form surface milling”, Scientific Research and Essays, Vol., 6(2), pp. 256-277, 18 January, 2011.
- Akkurt, M., 2010. Talaş Kaldırma Yöntemleri ve Takım Tezgâhları, Seçkin Yayıncılık.
- Shaw, M.C., “Metal cutting principles”, Oxford University Press, 2nd Edition, Oxford, 2005
- Şahin, Y., 2000. Talaş Kaldırma Prensipleri Cilt 1-2, Nobel Yayınevi
- Gök A., Göloğlu C. ve Demirci H.,” Dış Bükey ve İç Bükey Yüzeylerin Küresel Parmak Frezelenmesinde Takim Sehimine Bağlı Form hatalarının belirlenmesi” Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der., Cilt 29, No 2, 365-374, 2014
- Ikua, B.W., Tanaka, H., Obata, F., Sakamoto, S., “Prediction of cutting forces and machining error in ball end milling of curved surfaces –I theoretical analysis”, Precision Engineering, 25: 266–273, 2001