

**T.C.  
BOZOK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**Yüksek Lisans Tezi**

**SERBEST ŞEKİLLİ YÜZEYLERİN İŞLENMESİNDE  
KULLANILAN KÜRESEL UÇLU PARMAK FREZE  
TAKIMLARININ PERFORMANSLARININ  
KARŞILAŞTIRILMASI**

**Mustafa Ercan GÜNDÜZ**

**Tez Danışmanı  
Doç. Dr. Hamza Kemal AKYILDIZ**

**YOZGAT 2015**



**T.C.  
BOZOK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**Yüksek Lisans Tezi**

**SERBEST ŞEKİLLİ YÜZEYLERİN İŞLENMESİNDE  
KULLANILAN KÜRESEL UÇLU PARMAK FREZE  
TAKIMLARININ PERFORMANSLARININ  
KARŞILAŞTIRILMASI**

**Mustafa Ercan GÜNDÜZ**

**Tez Danışmanı  
Doç. Dr. Hamza Kemal AKYILDIZ  
II. Tez Danışmanı  
Yrd. Doç. Dr. Erkan BAHÇE**

**YOZGAT 2015**

T.C.  
BOZOK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TEZ ONAYI

Enstitümüzün Makine Mühendisliği Anabilim Dalı 70110913001 numaralı öğrencisi Mustafa Ercan GÜNDÜZ'ün hazırladığı "Serbest Şekilli Yüzeylerin İşlenmesinde Kullanılan Küresel Uçlu Parmak Freze Takımlarının Performanslarının Karşılaştırılması" başlıklı YÜKSEK LİSANS tezi ile ilgili TEZ SAVUNMA SINAVI, Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği uyarınca 15/07/2015 Çarşamba günü saat 14:00'te yapılmış, tezin onayına OY BİRLİĞİYLE karar verilmiştir.

Başkan : Prof.Dr. Hasan YUMAK



Üye : Doç.Dr. Hamza K. AKYILDIZ (Danışman)



Üye : Yrd.Doç.Dr. Süleyman NEŞELİ



ONAY:

Bu tezin kabulü, Enstitü Yönetim Kurulu'nun 03.08/2015 tarih ve 20. sayılı kararı ile onaylanmıştır.

03.08/2015



# İÇİNDEKİLER

## Sayfa

ÖZET .....	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜRLER.....	vi
TABLolar LİSTESİ.....	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR .....	xii
1. GİRİŞ .....	1
2. GENEL BİLGİLER.....	7
2.1. Bezier Eğriler.....	7
2.2. B-Spline Eğrileri.....	10
2.2.1. B-Spline Temel Fonksiyonları.....	14
2.2.2. B-Spline Düğüm Vektörünün Tanımı .....	16
2.2.3. B-Spline Eğrilerinin Matematiksel Tanımı .....	24
2.3. B-Spline Yüzey .....	33
2.4. Talaşlı İmalat .....	33
2.4.1. Talaş Kaldırma Yöntemlerinin Sınıflandırılması .....	34
2.4.2. Talaş İmalat Teknolojisi .....	35
2.4.3. Kesici Takım.....	36
2.4.4. Kesme Koşulları .....	37
2.5. Alüminyum ve Alaşımları .....	38
2.5.1. Alüminyum .....	38
2.5.2. Alüminyum ve Alaşımlarının Kullanım Alanları .....	40

2.5.3. Alüminyum Alaşımlarında Isıl İşlem Uygulamaları .....	41
2.6. Kesici Takımlar ve Alaşımları.....	42
2.6.1. Karbon Çelikleri ve Takım Çelikleri .....	43
2.6.2. Yüksek Hız Takım Çelikleri (HSS).....	43
2.6.3. Sert Maden Uçlu Kesiciler (Sinterlenmiş Karbürler) .....	44
2.6.3.1. Sinterlenmiş Karbür .....	45
2.6.4. Seramik Kesiciler.....	46
2.6.5. Sermet Kesici Takımlar .....	48
2.6.6. Siyalonlar .....	49
2.6.7. Coronite .....	49
2.6.8. Elmas Takımlar.....	50
2.6.9. Kübik Bor Nitrür (CBN).....	51
2.6.10. Çok Kristalli Kübik Bor Nitrür (PCBN).....	51
<b>3. MATERYAL ve METOD .....</b>	<b>53</b>
3.1. Deney Malzemesi .....	53
3.2. Serbest Şekilli Yüzeyin Oluşturulması ve İmalatı .....	55
3.3. CNC Freze Tezgâhı ve Teknik Özellikleri.....	64
3.4. Kesici Takımlar ve Teknik Özellikleri .....	65
3.5. İş Parçasının Bağlanması.....	67
3.6. Dinamometre ve Kuvvetlerin Ölçümü .....	67
3.7. Termal Kamera ve Ölçümleri.....	70
3.8. 3B Tarayıcı ve Ölçümleri .....	71
3.9. Taramalı Elektron Mikroskop Ölçümleri .....	72
<b>4. BULGULAR.....</b>	<b>74</b>

4.1. 3B Yüzey Taramasına Ait Bulgular .....	74
4.2. Dinamometre ile Kuvvet Ölçümüne Ait Bulgular.....	80
4.3. Termal Kameradan Alınana Sıcaklık Değişimlerin İncelenmesi .....	81
4.4. Parmak Freze Çakılarındaki Aşınmaların İncelenmesi .....	82
<b>5. TARTIŞMA, SONUÇ ve ÖNERİLER.....</b>	<b>84</b>
5.1. Yüzeyin 3B Taranması ve Referans Yüzey İle Karşılaştırılması .....	84
5.2. Kuvvet Değişimlerinin İncelenmesi .....	95
5.3. Termal Görüntülerin İncelenmesi.....	98
5.4. Çakıların Kesici Ağzlarındaki Aşınmaların Karşılaştırılması.....	100
5.5. Genel Sonuçlar .....	105
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>107</b>
<b>EKLER .....</b>	<b>110</b>
Ek-1 B-Spline Eğriyi Oluşturmak İçin Kullanılan Matlab Programı .....	110
Ek-2 Numunelere Ait 3B Tarama Görselleri.....	111
Ek-3 Finish İşleme Esnasında Dinamometreden Alınana Kuvvet Eğrileri .....	115
Ek-4 Termal Kameradan Alınan Görseller.....	118
Ek-5 TEM Cihazından Alınan Görseller .....	121
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>123</b>

# SERBEST ŞEKİLLİ YÜZEYLERİN İŞLENMESİNDE KULLANILAN KÜRESEL UÇLU PARMAK FREZE TAKIMLARININ PERFORMANSLARININ KARŞILAŞTIRILMASI

**Mustafa Ercan GÜNDÜZ**

**Bozok Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı  
Yüksek Lisans Tezi**

**2015; Sayfa: 123**

**Tez Danışmanı: Doç. Dr. Hamza Kemal AKYILDIZ**

## **ÖZET**

Serbest şekilli yüzeyler biyomedikal, otomobil, uçak sanayisinde ve kalıpların üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Serbest şekilli yüzeylerde form hataları ve yüzey kalitesi işleme hatalarının en önemlilerindedir. Serbest şekilli yüzeylerin imalatında seçilen ve kontrol edilen parametreler, kullanılan kesici takım ve işleme yöntemleri minimum işleme hataları için oldukça önemlidir. Bu çalışmada, serbest şekilli yüzeylerin 3 eksenli CNC tezgâhı kullanılarak yapılan imalatında, yerli ve yabancı takım üretici firmaların ürettiği küresel parmak freze çakılarının finish işlemede form hataları üzerindeki etkileri (takım aşınması, form hataları ve yüzey kalitesi) incelenmiştir. Yapılan deneyler esnasında termal kamera ve dinamometre kullanılarak kuvvet analizleri yapılmış, TEM cihazından alınan parmak freze çakılarının resimleri ile parmak freze çakılarının kesici ağızlarındaki aşınmalar belirlenmiş ve 3B tarayıcıdan alınan verilerle serbest şekilli yüzeylerdeki form hataları incelenmiştir. Serbest şekilli yüzeyin oluşturulmasında B-Spline eğrisinden yararlanılmıştır. Bu B-Spline eğrisinin oluşturulmasında kullanılan temel B-Spline denklemleri MATLAB ortamında oluşturulan program ile hesaplanmıştır. Yapılan çalışmanın sonucunda serbest şekilli yüzeylerin imalatında kullanılan kaplamalı parmak freze çakılarının kesici ağızlarındaki aşınmaların diğer parmak freze çakılarına göre daha az olduğu ve kaplamalı parmak freze çakıları ile imal edilen serbest şekilli yüzeylerdeki form hatalarının diğer parmak freze çakıları ile imal edilen serbest şekilli yüzeylerdeki form hatalarına göre daha az olduğu tespit edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Serbest şekilli yüzey, B-Spline, Form hatası, TEM, 3B Tarayıcı



# PERFORMANCE COMPARASION OF BALL END MILLING TOOLS USED IN FREE FORM SURFACE PROCESSING

**Mustafa Ercan GÜNDÜZ**

**Bozok University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Mechanical Engineering  
Master of Science Thesis**

**2015; Page: 123**

**Thesis Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Hamza Kemal AKYILDIZ**

## ABSTRACT

Free form surfaces are widely used in biomedical, automative, aircraft industries and die production. Form errors and surface quality in free form surfaces are most significant amongst processing errors. Choosen and controlled parameters, cutter tools and processing methodologies has vital importance for minimizing processing errors in production of free form surfaces. This study inventigates effects (tool erosion, form errors and surface quality) of ball end mill produced by both domestic and foreign producers on from errors during finish process while producing free form surfaces at 3-axis CNC. During production experiments, force analysis has been performed by using thermal cameras and dynamometers. Wears on cutters of end milling has been examined by using images of end mill cutters taken SEM device. From errors in free form surfaces have been examined with theaid of data taken from 3D scanner. B-spline curves have been used while designing free form surfaces. B-spline equations used in construction of these B-spline curves have been calculated with the help of a computer program implemented in MATLAB environment. As a result there were lesser wear an lined end milling cutters in contrast to other end millling cutters. At the same time it has been observed that form errors an free form surfaces produced by lined end milling cutters are less than form errors on free form surfaces produced by other end milling cutters.

**Keywords:** Free form surface, B-Spline, Form errors, SEM, 3D Scanner

## TEŐEKKÜR

Bu tez alıőmasında, bana büyük destek veren danışman hocam Sayın Do. Dr. Hamza Kemal AKYILDIZ' a, ve II. Danışman hocam İnönü Üniversitesi öğretim üyesi Sayın Yrd. Doç. Dr. Erkan BAHÇE' ye teőekkür ve saygılarımı sunarım. Tez çalıőmam esnasında desteğini esirgemeyen ailem' e de ayrıca teőekkür ederim.

## TABLolar LİSTESİ

### Sayfa

<b>Tablo 3.1:</b>	Al 7075 Kalite Alüminyumun Kimyasal Bileşimi (% Ağırlık).....	54
<b>Tablo 3.2:</b>	Al 7075 Alaşımının Mekanik Özellikleri .....	55
<b>Tablo 3.3:</b>	B-Spline Eğriye Ait Knot, Kontrol Noktaları ve Derece Değerleri.....	55
<b>Tablo 3.4:</b>	TMC 700V CNC Tipi Dik İşleme Merkezi Tezgahın Teknik Özellikleri...	64
<b>Tablo 3.5:</b>	Deneylerde Kullanılan Takımların Marka Kodlamaları.....	66
<b>Tablo 3.6:</b>	Deneylerde Kullanılan Takımların Fiziksel Özellikleri.....	66
<b>Tablo 3.7:</b>	Termal Kameranın Kayıt ve Kamera Özellikleri.....	70
<b>Tablo 4.1:</b>	1 Numunesi 1. Bölgeye Ait 3B Tarama Çizim Karşılaştırma Sonuçları.....	76
<b>Tablo 4.2:</b>	1 Numunesi 2. Bölgeye Ait 3B Tarama Çizim Karşılaştırma Sonuçları.....	76
<b>Tablo 4.3:</b>	1 Numunesi 3. Bölgeye Ait 3B Tarama Çizim Karşılaştırma Sonuçları.....	77
<b>Tablo 4.4:</b>	1 Numunesi 4. Bölgeye Ait 3B Tarama Çizim Karşılaştırma Sonuçları.....	77
<b>Tablo 4.5:</b>	1 Numunesi 5. Bölgeye Ait 3B Tarama Çizim Karşılaştırma Sonuçları.....	78
<b>Tablo 4.6:</b>	1 Numunesi 6. Bölgeye Ait 3B Tarama Çizim Karşılaştırma Sonuçları.....	78
<b>Tablo 4.7:</b>	1 Numunesi 7. Bölgeye Ait 3B Tarama Çizim Karşılaştırma Sonuçları.....	79
<b>Tablo 4.8:</b>	1 Numunesi 8. Bölgeye Ait 3B Tarama Çizim Karşılaştırma Sonuçları.....	79
<b>Tablo 4.9:</b>	1 Numunesi 9. Bölgeye Ait 3B Tarama Çizim Karşılaştırma Sonuçları.....	80
<b>Tablo 5.1:</b>	Numunelerin 1. Bölgesine Ait Sapma Değerleri.....	85
<b>Tablo 5.2:</b>	Numunelerin 2. Bölgesine Ait Sapma Değerleri.....	86
<b>Tablo 5.3:</b>	Numunelerin 3. Bölgesine Ait Sapma Değerleri.....	87
<b>Tablo 5.4:</b>	Numunelerin 4. Bölgesine Ait Sapma Değerleri.....	88
<b>Tablo 5.5:</b>	Numunelerin 5. Bölgesine Ait Sapma Değerleri.....	89
<b>Tablo 5.6:</b>	Numunelerin 6. Bölgesine Ait Sapma Değerleri.....	90
<b>Tablo 5.7:</b>	Numunelerin 7. Bölgesine Ait Sapma Değerleri.....	91
<b>Tablo 5.8:</b>	Numunelerin 8. Bölgesine Ait Sapma Değerleri.....	92

<b>Tablo 5.9:</b>	Numunelerin 9. Bölgesine Ait Sapma Değerleri.....	93
<b>Tablo 5.10:</b>	Numunelerdeki Toplam Sapma Miktarları.....	94

## ŞEKİLLER LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 2.1: Dört Kontrol Noktasına Sahip (n=3) Bezier Eğrisine Ait Bernstein Polinomlarının Grafikleri .....	8
Şekil 2.2: Bir Kübik Bezier Eğrisi ve Onu Tanımlamak İçin Kullanılan 4 Kontrol Noktası ...	9
Şekil 2.3: 16 Kontrol Noktası Tanımlanmış Bir Bezier Yüzeyi .....	10
Şekil 2.4: Bir B-Spline Eğrisi ve Kontrol Poligonu .....	11
Şekil 2.5: Bezier Eğrisine Eşdeğer Bir B-Spline Eğrisi .....	11
Şekil 2.6: B-Spline Eğrisinin 1. ve 2. Segmentinin Etkileyen Kontrol Noktaları .....	12
Şekil 2.7: Kontrol Noktası ile Eğri Mertebesi Arasındaki İlişki .....	12
Şekil 2.8: Eğrinin Kontrol Noktası ve Mertebesinin Segment Sayısına Etkisi .....	13
Şekil 2.9: Her bir Polinom Segmentini Etkileyen Kontrol Noktaları .....	14
Şekil 2.10: $N_{i,k}$ Temel Fonksiyonunun Hesabı İçin Gereken Diğer Temel Fonksiyonlar....	15
Şekil 2.11: B-Spline Eğrilerinin Sınıflandırılması .....	17
Şekil 2.12: Açık Uniform B-Spline Eğrisine Ait Temel Fonksiyonlar (k=3, n+1=4) .....	18
Şekil 2.13: Açık Uniform B-Spline Eğrisine Ait Temel Fonksiyonlar (k=3, n+1=5) .....	19
Şekil 2.14: Periyodik Uniform B-Spline Eğrisinin Temel Fonksiyonları (k=3, n+1=4) .....	20
Şekil 2.15: Periyodik (Kapalı) Bir B-Spline Eğrisi ve Parametre Değişimi.....	20
Şekil 2.16: Quadratik Eğriler Olan : $N_{1,3}$ , $N_{2,3}$ , $N_{3,3}$ Temel Fonksiyonları .....	24
Şekil 2.17: Bir Kübik B-Spline Eğrisi (k=4) Tanımlayıcı Kontrol Poligonu .....	25
Şekil 2.18: Kübik B-Spline Eğrisi Temel Fonksiyonları.....	26
Şekil 2.19: Örneğe Göre B-Spline Eğrisi .....	28
Şekil 2.20: Quadratik Açık Uniform ve Non-Uniform B-Spline Eğrilerinin Karşılaştırılması .....	29
Şekil 2.21: B-Spline Eğrisinin Mertebesine Göre Değişimi.....	29
Şekil 2.22: Tekrar Edilen 4. Kontrol Noktasının $B_4$ , Kübik B-Spline Eğrisine Etkisi (k=4) .....	30
Şekil 2.23: Kontrol Poligonunun Konumunun Değiştirilmesinin B-Spline Eğrisine Etkisi...31	
Şekil 2.24: Farklı Mertebeden B-Spline Segmentleri İçin Çizilen Konveks Alanlar .....	32

<b>Şekil 2.25:</b> B-Spline Eğrisi İle Doğru Parçasının Temsili .....	32
<b>Şekil 2.26:</b> Talaş Kaldırma Yöntemleri .....	34
<b>Şekil 2.27:</b> Üç Temel Talaşlı İmalat Yöntemi: (a) Tornalama, (b) Matkap İle Delik Delme ve İki Farklı Frezeleme Yöntemi .....	36
<b>Şekil 2.28:</b> (a) Tek Kesici Kenarlı Takım, (b) Çoklu Kesici Kenarlı Takım.....	37
<b>Şekil 2.29:</b> Tornalama Operasyonu İçin Kesme Hızı, İlerleme ve Paso.....	38
<b>Şekil 3.1:</b> Al 7075 Serisi Alüminyumların Kullanım Alanları .....	54
<b>Şekil 3.2:</b> Baz Fonksiyonlarına Göre Elde Edilen B-Spline Eğri .....	57
<b>Şekil 3.3:</b> CAD Ortamında Elde Edilen Serbest Şekilli Yüzey .....	57
<b>Şekil 3.4:</b> Kaba İşleme Takım Yolu .....	58
<b>Şekil 3.5:</b> Ara Kaba İşleme Takım Yolu .....	59
<b>Şekil 3.6:</b> Finish İşleme Takım Yolu .....	59
<b>Şekil 3.7:</b> Kaba İşleme Parametreleri .....	60
<b>Şekil 3.8:</b> Ara Kaba İşleme Parametreleri .....	61
<b>Şekil 3.9:</b> Finish İşleme Parametreleri .....	61
<b>Şekil 3.10:</b> CAM Ortamında Geliştirilen Kaba İşleme .....	62
<b>Şekil 3.11:</b> CAM Ortamında Geliştirilen Ara Kaba İşleme .....	63
<b>Şekil 3.12:</b> CAM Ortamında Geliştirilen Finish İşleme .....	63
<b>Şekil 3.13:</b> Ø 12mm Parmak Freze Çakısı.....	65
<b>Şekil 3.14:</b> Ø 10mm ve Ø 8mm Küresel Parmak Freze Çakısı .....	65
<b>Şekil 3.15:</b> Parçanın Tezgâha Bağlanması .....	67
<b>Şekil 3.16:</b> Dinamometrenin Ölçüm Tablası .....	68
<b>Şekil 3.17:</b> Dinamometrenin Kontrol Amplifire'ı .....	68
<b>Şekil 3.18:</b> Dinamometrenin Tezgâha Bağlanması .....	69
<b>Şekil 3.19:</b> Dinamometre İle Kuvvet Analizi .....	69
<b>Şekil 3.20:</b> TESTO Termal Kamera .....	71
<b>Şekil 3.21:</b> Termal Kamera Kaydı .....	71
<b>Şekil 3.22:</b> Breuckmann Smart Scan R5 3B Tarayıcı .....	72

<b>Şekil 3.23:</b> TEM Cihazı .....	73
<b>Şekil 4.1:</b> Numunelerin Yüzeyindeki Ölçüm Bölgeleri .....	74
<b>Şekil 4.2:</b> CAD Görüntüsü .....	75
<b>Şekil 4.3:</b> Numunelere Ait 3B Taraması (Renk Diyagramı Uygulanmamış) .....	75
<b>Şekil 4.4:</b> 2. Numunenin Finish İşlemede Kuvvet Değişimleri .....	81
<b>Şekil 4.5:</b> 1. Numunenin Finish İşlenmesi Esnasında Alınan Termal Görüntü .....	82
<b>Şekil 4.6:</b> 1. Numune Ø8mm Parmak Freze Çakısı .....	83
<b>Şekil 5.1:</b> Numunelerin Toplam Sapma Miktarına Göre Grafiği .....	95
<b>Şekil 5.2:</b> 2. Numunenin Finish İşlenmesinde Fz Kuvvetindeki Değişimler .....	96
<b>Şekil 5.3:</b> 2. Numunenin Finish İşlenmesinde Fz Kuvvetinin 360-362. Saniyeler arasındaki Değişimi .....	96
<b>Şekil 5.4:</b> 2. Numunenin Finish İşlenmesinde Fz ve Fy İlerleme Kuvvetlerinin 360-362. Saniyeler arasındaki Değişimi .....	97
<b>Şekil 5.5:</b> Takım Tırmanışta İken Alınan Termal Görüntü .....	98
<b>Şekil 5.6:</b> Takım İnişte İken Alınan Termal Görüntü .....	99
<b>Şekil 5.7:</b> Takım Tırmanışta İken Sıcaklık Değişim Grafiği .....	99
<b>Şekil 5.8:</b> Takım İnişte İken Sıcaklık Değişim Grafiği .....	100
<b>Şekil 5.9:</b> 1. Numune Ø8mm Radyuslu Parmak Freze Çakısı .....	101
<b>Şekil 5.10:</b> 2. Numune Ø8mm Radyuslu Parmak Freze Çakısı .....	101
<b>Şekil 5.11:</b> 3. Numune Ø8mm Radyuslu Parmak Freze Çakısı .....	102
<b>Şekil 5.12:</b> 4. Numune Ø8mm Radyuslu Parmak Freze Çakısı .....	102
<b>Şekil 5.13:</b> 5. Numune Ø8mm Radyuslu Parmak Freze Çakısı .....	103
<b>Şekil 5.14:</b> 6. Numune Ø8mm Radyuslu Parmak Freze Çakısı .....	103
<b>Şekil 5.15:</b> 7. Numune Ø8mm Radyuslu Parmak Freze Çakısı .....	104

## SİMGELER VE KISALTMALAR

<b>Al</b>	: Alüminyum
<b>Al 7075</b>	: Alüminyum 7075 Alaşımı
<b><math>B_i(\mathbf{u})</math></b>	: B-Spline Eğride Kontrol Noktası
<b>B</b>	: Bor
<b>Be</b>	: Berilyum
<b>Bi</b>	: Bizmut
<b><math>C^k</math></b>	: B-Spline Eğri Temel Fonksiyonunun Türevi
<b>Ca</b>	: Kalsiyum
<b>CAD</b>	: Bilgisayar Destekli Tasarım
<b>CAM</b>	: Bilgisayar Destekli İmalat
<b>CNC</b>	: Bilgisayarlı Sayısal Kontrol
<b>Cu</b>	: Bakır
<b>Co</b>	: Kobalt
<b>d</b>	: B-Spline Eğrinin Derecesi
<b>Fe</b>	: Demir
<b>GPa</b>	: Giga Pascal
<b>Hg</b>	: Civa
<b>HSS</b>	: Yüksek Hız Çeliği
<b>I</b>	: İyot
<b>k</b>	: B-Spline Eğrinin Mertebesi
<b>Mg</b>	: Magnezyum
<b>Mn</b>	: Mangan
<b>MPa</b>	: Mega Pascal
<b>n</b>	: B-Spline Eğrinin Kontrol Noktası Sayısının Bir Eksiği
<b><math>N_{i,k}</math></b>	: B-Spline Eğrinin Temel Fonksiyonu



<b>Na</b>	: Sodyum
<b>Ni</b>	: Nikel
<b>NURBS</b>	: Non-Uniform Rational B-Spline
<b>Pi</b>	: Beernstein Polinomu Kontrol Noktası
<b>Pb</b>	: Kurşun
<b>Rm</b>	: Çekme Mukavemeti
<b>Rp</b>	: Elastiklik Değeri
<b>Si</b>	: Silisyum
<b>Sn</b>	: Kalay
<b>t</b>	: Knot (Düğüm Noktası)
<b>Ti</b>	: Titanyum
<b>u</b>	: B-Spline Eğri Yön Vektörü
<b>v</b>	: B-Spline Eğri Yön Vektörü
<b>3B</b>	: 3 Boyut

## 1.GİRİŞ

Genel olarak yeni bir ürün geliştirmede veya var olan bir ürünü geliştirmede ileri mühendislik veya tersine mühendislik kullanılmaktadır. Bilindiđi üzere ileri mühendislikte bir ürünün 3D modeli, CAD ortamında oluşturulur ve CAD bilgileri elde edilir. Daha sonra uygun işleme yöntemlerine göre takım yolu oluşturularak CNC tezgâhlarından yararlanılarak üretilir. Tersine mühendislikte ise geometrik bilgi doğrudan fiziksel şekilden elde edilir ve bu bilgi ileri mühendislikte gibi alt süreçlerden geçerek imalat gerçekleştirilir. Tersine mühendislikte çoğu zaman koordinat ölçüm cihazları kullanılarak dağınık noktalardan datalar elde edilip nokta bulutları oluşturulur. Sayısallaştırma cihazlarının özelliklerinden dolayı nokta bulutları düzenli ve düzensiz nokta bulutları olmak üzere ikiye ayrılır. Nokta bulutlarının hangisi olursa olsun yüzey uydurma teknikleri uygulanır ve yüzey modeli oluşturulur. Bu tür uygulamalar özellikle serbest şekilli yüzeyler için yoğun olarak uygulanmaktadır.

CAD/CAM ortamında parametrik eğriler ile oluşturulan serbest şekil yüzeyli parçalar aerodinamik, akışkanlar gibi sebeplerden dolayı kalıpcılık, otomobil ve medikal gibi alanlarda yoğun bir şekilde kullanılmaktadır. Serbest şekilli yüzeylerin imalatında klasik CNC tezgâhları sadece lineer ve dairesel enterpolasyon sağlamaktadır. CAM sistemler kullanılarak CNC tezgâhlarında serbest şekilli yüzeyler verilen toleranslar altında kontür geometriye yaklaşmak için birçok doğru ve daire yaratma zorunluluğu vardır. Fakat parça hassasiyeti artırıldıkça aşağıdaki sorunlarla karşılaşmaktadır.

Toleransların artırılması durumunda karşılaşılan sorunlar;

- Çizgi ve daireden oluşan değerlerin kısılmasına neden olmakta, buda CNC tezgâhına dönüşümü sağlayan CNC kodların sayısının artmasına neden olmaktadır,
- CNC tezgahlarda yüksek hızlı işlemede data iletiminde transfer edilen data miktarını yakalayamamakta ve imalat hatasına neden olmaktadır,
- Birbirine bağlı iki çizginin birleşme noktasında süreksizlik ve ilerlemede hatalar oluşturmaktadır,

- Yüksek hızda işlemede meydana gelen ani hareketler ve ani hızlanmalar titreşime sebep olmakta ve işleme kalitesi düşmektedir, şeklinde sıralanabilir.

Bu sakıncalar klasik CNC tezgâhlarda yüksek hızlarda yüksek hassasiyetle işlenmesinde geleneksel yaklaşımın zorluğunu göstermektedir. Serbest şekilli yüzeylerin 3, 4 veya 5 eksenli freze tezgâhlarda üretilmesinde yüzey son şeklini almadan önce kaba, yarı kaba ve hassas işleme olmak üzere üç aşamada işleme yöntemi uygulanmaktadır. Ürün üzerinden gereksiz malzemenin büyük bir bölümünün çıkartılmasına kaba talaş adı verilir. Daha sonra ara kaba işleminde talaşın düzgün olarak alınması için yarı kaba olarak adlandırılan bir işlem uygulanır. Dizayn edilmiş yüzeyi elde etmek için ise finish işlemi uygulanır. Genel olarak kaba işlemede düz uçlu freze çakısı kullanılırken, yarı kaba ve hassas işlemede ise radyuslu çakılar kullanılmaktadır. Bunlara rağmen halen talaş kalmışsa (özellikle eğrisel alanlarda ve kesici takımın ulaşamadığı yerlerde) temizleme işlemi uygulanır. Serbest şekil yüzeyli bir ürünün kalitesi ve imalat süresi sanayide rekabetin gereklerindedir. Ürünün belirtilen tolerans içerisinde üretimini gerçekleştirmek, maliyet ve zamanı azaltmak 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 bu her zaman sağlanamamaktadır. Bu nedenle bu yüzeylerin imalatında optimize edilmiş işleme yöntemleri geliştirmek oldukça önemlidir [1].

Talaşlı imalatta bilimsel bilgiye dayalı olarak işleme yöntemlerinin optimizasyonu ile yüksek verimlilik elde edilmeye çalışılmaktadır ve gün geçtikçe önem kazanan bir kavram haline gelmektedir. Bu konuda yapılan çalışmalar incelendiğinde,

Haldar [2], 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 Iso-Scallop ve Iso-Parametric takım yolu algoritması geliştirmiştir. Bu algoritmaya göre elde edilen NC (Nümerik Kontrol) kodları CNC Fanuc simülasyon programında test etmiş ve işleme uzunluğunu hesaplamıştır.

Abbas [3], serbest şekilli yüzeylerin işlenmesi için NC takım yolu algoritması geliştirmiştir. Bunun için belirlemiş olduğu kontrol noktalarına göre bir Bezier yüzey oluşturmuş ve bu yüzeyin imalatında Bezier eğrilerden yararlanmıştır. Yapmış olduğu algoritmada verilen tolerans içerisinde kesici takımın temas noktaları arasındaki (Cunter Contac- CC) maksimum mesafeyi belirleyen ileri adım fonksiyonunu tanımlamıştır. Ayrıca istenilen pürüzlülük yüksekliğinin elde edilmesi için kesici takımın yana kayma miktarını da fonksiyonel olarak tanımlamıştır. Bu algoritmaya göre oluşturduğu parametrik yüzeyi 14 mm çapında radyuslu parmak freze çakı kullanarak 0,5 mm tolerans ile üretimini gerçekleştirip test etmiştir.

Ülker [4], üç boyutlu uzay veya iki boyutlu düzlem üzerinde düzensiz yerleşmiş geniş bir noktalar kümesi verildiğinde noktalara parametrik eğri ve yüzeyler uydurmak için çok amaçlı optimizasyon algoritmaları önermiştir. Yapmış olduğu bu çalışmada taranan noktalar kümesi ve uydurulan eğri arasındaki uydurma hatasının global optimizasyonu için algoritmalar geliştirmiştir. Geliştirmiş olduğu algoritma sayesinde;

- (i) Düğüm yerleşimleri ve sayılarını ayarlamış,
- (ii) Uygun kontrol noktaları belirlemiş,
- (iii) Kontrol noktalarına atanan ağırlıkları tanımlamış,
- (iv) Düğüm ara değerlerini bulan bir parametrizasyon gerçekleştirmek veya dört amacının hepsini bir arada göz önüne alarak parametrik (Bezier, B-spline veya NURBS) yüzey/eğri modelini yeniden oluşturmuştur.

Rockwood ve Chambers [5], 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 CAGD (Computer Aided Geometrik Dizayn) ile incelemişlerdir.

Farouki ve ark. [6], serbest şekilli yüzeylerin 5 eksenli CNC freze tezgâhlarda işlenmesini araştırmışlardır. Yüzeylerin işlenmesinde takım yolu üretimi, takım

oryantasyonu ve takım geometrisi seçimi üzerine odaklanmışlardır. Yapmış oldukları çalışmada takım yolu seçimlerinin işleme zamanında önemli oranda etkili olduğunu, takım oryantasyonun kontrolü ile yüzey pürüzlülük kalitesini iyileştirildiği ve eğri şekline göre takım seçiminin işlemedeki hata oranını önemli ölçüde azalttığını tespit etmişlerdir.

Young- KeunChoi ve ark. [7], serbest şekilli yüzeylerin işlenmesinde istenilen toleransın elde edilmesini ve takım yolunu araştırmışlardır. İstenilen toleransa göre serbest şekilli yüzeyin üretilmesi için gerekli olan takım yolunu üreten algoritma geliştirmişlerdir. Geliştirdikleri algoritmayı matematiksel eğriler ve yüzeyler ile temsil edilen parçaya uygulayıp işleme zamanını azaltmayı başarmışlardır.

Kurt ve ark. [8], serbest şekilli yüzeylerin işleme 3 eksenli CNC tezgâhta işlenmesinde takım yollarının form hatalarına ve yüzey pürüzlülüğüne etkilerini incelemişlerdir. Yapmış oldukları çalışmada gri ilişkili analiz (Grey Relational Analysis) yöntemini kullanarak yüzeyleri zig-zag, spiral ve sweep (süpürerek işleme) takım yolları ile üretmişlerdir. Çalışmanın sonucunda zig-zag işlemede form hatalarının yüksek olduğunu, kesme gücü ile form hataları arasında bir ilişki olduğunu ve takım çapı arttıkça yüzey pürüzlülüğünün azaldığını tespit etmişlerdir.

Chanthasopeephan ve ark. [9], eğri yüzeylerin CNC freze tezgâhında üretiminde form hatalarına, kesme gücünün etkisini, işleme yönünün etkisini ve kullanılan takımın çapının etkilerini araştırmışlardır.

Kim [10], serbest şekilli yüzeylerin radyuslu takım ile imalatında kesme gücünün etkilerini araştırmışlardır. Yapmış oldukları çalışmada kesici takımın temas alanını, yüzey geometrisinin iz düşümünden ve kesici takımın konumundan belirlemişlerdir. Çalışmalarında herhangi bir geometri için kesme gücünü tahmin etmeyi sağlayan bir yöntem sunmuşlardır.

Kaymakçı ve Lazoğlu [11], serbest şekilli yüzeylerde uygun takım yolunun seçimini sağlayan, yüzeyin 3D topografyasını tahmin eden CAM yazılımı ile ilişkili yeni bir model geliştirmişlerdir.

Dhokia [12], polipropilen malzemenin radyuslu takım kullanılarak işlenmesinde istenilen yüzey pürüzlülüğü için işleme parametrelerini optimize edecek bir model geliştirmişlerdir. Bu model deneysel değerlere göre geliştirilerek serbest şekilli yüzeylerde yüzey kalitesini önceden tahmin etmek için oluşturulmuştur.

Vakondios ve ark. [13], kalıp ve benzeri parçaların radyuslu takım ile üretiminde istenilen yüzey pürüzlülüğünü ve yüzey topografyasını tahmin etmek için bir sistem geliştirmiştir.

Can ve Ünüvar [14], serbest şekilli yüzey üzerine iz düşürülmüş 2B resimden oluşturulan 3B eğrilerin 5 eksenli CNC tezgâhında üretilmesi için yeni takım yolu yöntemi geliştirmişlerdir. B-spline yüzey algoritmasından yararlanarak elde edilen 2B iz düşürülmüş eğriler takım yolu üretilmesinde kullanmışlardır. Hesap edilen yüzey ile fiziksel yüzeyin normali arasında  $0,00025^\circ$ 'den daha az sapmaların oluştuğunu tespit etmişlerdir. Yapılan çalışmanın simülasyon sonuçlarında bu yöntemin 5 eksenli tezgahlarda 2B resimlerin işlenmesi için faydalı olabileceğini önermişlerdir.

Galvez ve ark. [15], otomotiv sanayinde araçların görüntü estetiğini geliştirmek amacıyla Bezier ve B-spline eğrilerden oluşturulan serbest şekilli yüzeyin matlab programı yardımı ile uygulamasını gerçekleştirmişlerdir.

Omirou ve ark. [16], serbest şekilli yüzeylerin işlenmesi için kesit dizaynı yöntemini tanımlamışlardır. Özellikle serbest şekilli yüzeylerin CNC tezgâhında işlenmesinde, elektrik motorunun hızlanması ve yavaşlaması sonucunda ilerlemede meydana gelen değişikliklerin, işleme hassasiyetinin azalmasına ve işleme zamanının artmasına neden olduğunu tespit etmişlerdir. Bu nedenle yörünge eğrisi ve bu eğrinin profil eğrisi boyunca kaydırılmasıyla yüzeyi tanımlamışlardır. Bu eğrileri Bezier eğrilerden yararlanarak ifade etmişlerdir. Bu yöntem ile basit, esnek ve hassasiyet yönünden avantajlı eğriler elde etmişlerdir. Eğrilerin Bezier olarak ifade edilmesi ile profil şeklinin rahatlıkla değiştirilebileceğini uygulayarak göstermişlerdir.

Zhang ve ark. [17], CAD ortamında elde edilmiş serbest şekilli yüzeyin işlenmesi için NC takım yolu önermişlerdir. Serbest şekilli yüzeyin kaba, yarı kaba ve finish

işlenmesinin her aşamasında uygulanacak bir yöntem geliştirmişlerdir. Kaba frezelemede düz uçlu freze çakısı kullanılırken yarı kaba ve finish işlemede radyuslu çakı kullanılmasını önermişlerdir. Özellikle yarı kaba işlemede takım yarıçapının konkav yüzeyin eğrilik yarıçapında daha büyük kullanılması durumunda kesici takımın iş parçasına dalma tehlikesi oluşabileceğinden, bununda işleme verimliliğini düşüreceğinden bahsetmişlerdir. Literatür çalışmaları incelendiğinde serbest şekilli yüzeylerin oluşturulmasında B-Spline eğrilerle oluşturulan yüzeylerin işlenmesinde üç aşamalı üretim yöntemi kullanıldığı gözlemlenmiştir. Yine literatür çalışmaları incelendiğinde serbest şekli yüzeylerin imalatında takım performansları ile ilgili yeterli çalışma olmadığı dikkat çekmektedir. Bu nedenle, bu çalışmada literatürdeki diğer çalışmalar baz alınarak kesici takımların performansları incelenmiş ve elde edilen veriler ilgili sanayi dallarına kolaylık sağlayacak şekilde değerlendirilmiştir.

## 2. GENEL BİLGİLER

Bu çalışmada konunun daha iyi anlaşılması amacı ile serbest şekilli yüzeylerin oluşturulmasında kullanılan eğriler, talaşlı imalat, alüminyum ve alaşımları, kesici takımlar aşağıda ayrı başlıklar halinde detaylandırılmıştır.

### 2.1. Bezier Eğriler

Bezier eğriler ilk olarak 1959 da Paul de Casteljaou tarafından ileri sürülmüştür. Ama 1970'lerde Renault'da çalışan Fransız mühendis Pierre Bezier (1974) tarafından otomobillerin tasarımında kullanılmasıyla tanınmış bir hal almıştır. Bezier eğrilerinin sahip olduğu özellikler, onların eğri ve yüzey tasarımında kullanışlı olmasını sağlamıştır. Ayrıca, Bezier eğrilerin programlanmasının kolay olmasından dolayı Bezier eğrileri öncelikle bilgisayar grafikleri olmak üzere günümüzde endüstriyel ve bilgisayar destekli tasarım, vektör temelli çizim, font tasarımı (özellikle PostScript fontda) ve 3B modelleme gibi birçok alanda sıkça kullanılmaktadır. Pierre Bezier,  $n+1$  adet  $p_i$  kontrol noktası tarafından kontrol edilen  $p(u)$  eğrisini aşağıdaki gibi tanımlamıştır [18].

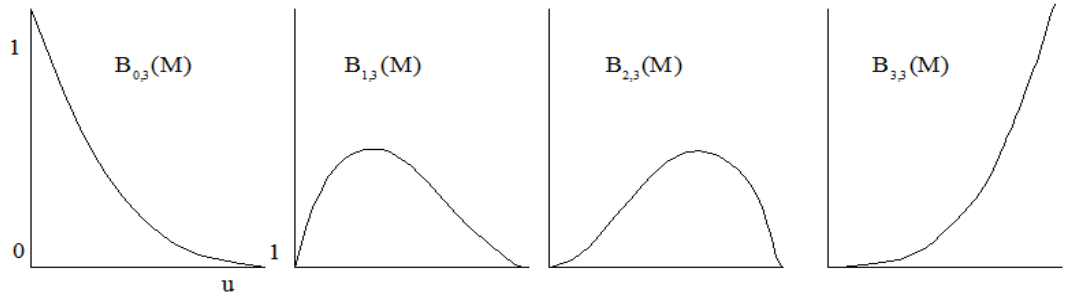
$$p(u) = \sum_{i=0}^n P_i B_{i,n}(u) \quad (2.1.1)$$

Denklemden bulunan  $B_{i,n}(u)$  fonksiyonu Bernstein polinomları olarak adlandırılır.

$$B_{i,n}(u) = \frac{n!}{i!(n-i)!} u^i (1-u)^{n-i} \quad (2.1.2)$$

Bernstein polinomları Bezier eğrilerinin temelini oluşturur. Şekil 2.1 'de dört kontrol noktasına sahip Bezier eğrisinin dört Bernstein polinomu gösterilmektedir. Bernstein polinomları,  $u$  parametresinin değişik değerleri için, kontrol noktalarının Bezier eğrisi üzerindeki etkilerini belirtir. İlk kontrol noktasının ( $P_0$ ) Bezier eğrisine olan etkisi  $u=0$  olduğu zaman en üst düzeydedir. Bunun yanında, diğer kontrol noktalarının ( $P_1, P_2, P_3$ )  $u=0$  olduğu zaman eğri üzerinde bir etkisi yoktur çünkü o kontrol noktalarına ait Bernstein polinomlarının ( $B_{1,3}, B_{2,3}, B_{3,3}$ ) değeri sıfırdır.

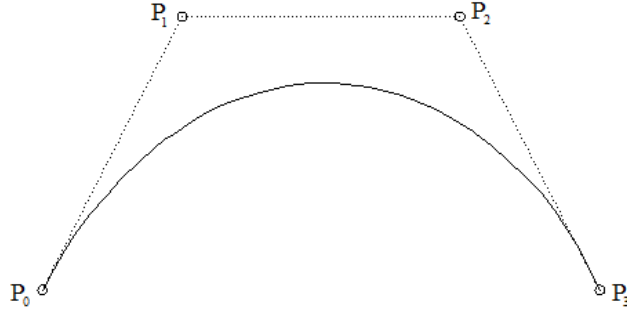




**Şekil 2.1.** Dört Kontrol Noktasına Sahip ( $n=3$ ) Bezier Eğrisine Ait Bernstein Polinomlarının Grafikleri

Bezier eğrileri, Paul de Casteljaou ve Pierre Bezier tarafından birbirlerinden bağımsız olarak geliştirilmiştir. Paul de Casteljaou, geliştirdiği yöntemle ilgili teknik raporunu Pierre Bezier' den önce yazmış olmasına rağmen, Pierre Bezier konuyla ilgili çalışmalarını daha önce halka açık hale getirdiği için bu yöntem Bezier eğrileri olarak adlandırılmıştır.

Tüm kontrol noktalarının az veya çok eğri üzerinde bir etkisi vardır. Çünkü Bernstein polinomlarının değeri sadece  $u=0$  ve  $u=1$  dışında sıfırdan farklıdır. Kontrol noktalarının sayısı ne olursa olsun bu durum değişmez. Kontrolün geniş çaplı olup, kontrol noktalarının tüm eğri üzerinde etkili olması Bezier eğrilerinin dezavantajlarından birisi olarak kabul edilebilir. Ayrıntılı Bezier eğrilerini tanımlamak için birçok kontrol noktası kullanmak mümkündür. Fakat Bezier eğrilerinde kontrolün geniş çaplı olması ve polinomun derecesi arttıkça matematiksel hesaplamalarının karmaşıklaşması yüzünden kontrol noktalarının sayısının fazla olması tercih edilmez. Bunun yerine dört kontrol noktasına sahip Bezier eğrilerinin arka arkaya birleştirilmesiyle daha ayrıntılı eğriler oluşturulur. Bu nedenden dolayı, kübik Bezier eğrileri (4 kontrol noktasına sahip Bezier eğrileri) diğer dereceden Bezier eğrilerine göre daha yaygın olarak kullanılır.



**Şekil 2.2.** Bir Kübik Bezier Eğrisi ve Onu Tanımlamak İçin Kullanılan Dört Kontrol Noktası

Aşağıda kübik Bezier eğrilerine ait Bernstein polinomlarının denklemi gösterilmektedir.

$$B_{0,3} = (1-u)^3$$

$$B_{1,3} = 3u(1-u)^2$$

$$B_{2,3} = 3u^2(1-u)$$

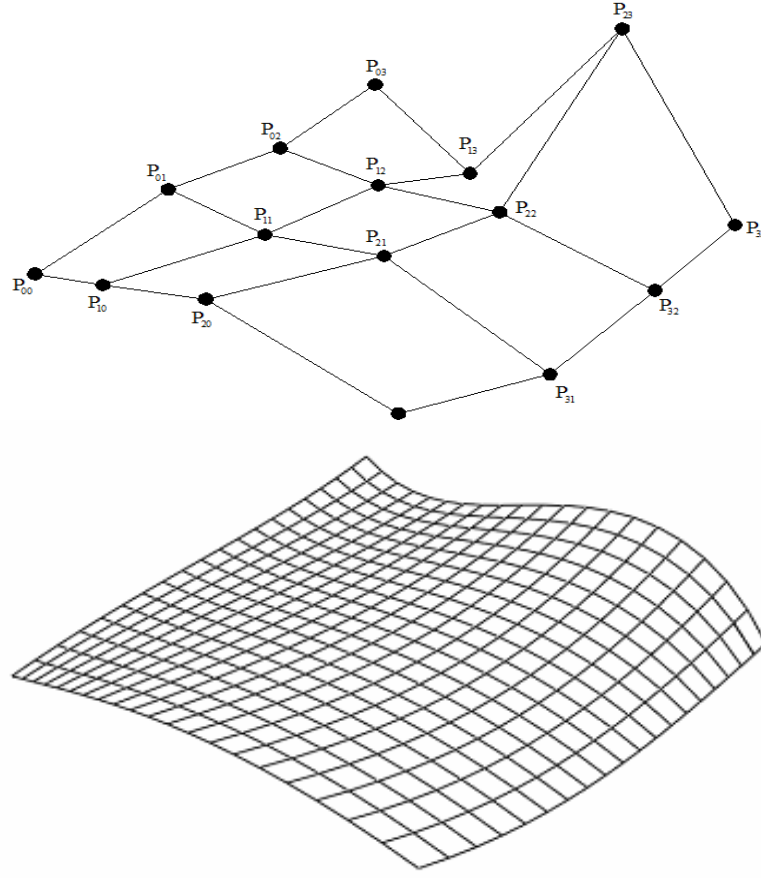
$$B_{3,3} = u^3 \quad (2.1.3)$$

Buna göre, kübik Bezier eğrisinin denklemi aşağıdaki gibi olacaktır.

$$P(u) = P_0(1-u)^3 + P_1 3u(1-u)^2 + P_2 3u^2(1-u) + P_3 u^3 \quad (2.1.4)$$

Dört kontrol noktasına sahip Bezier eğrilerinin gösterimi üçüncü dereceden (kübik) bir polinom olmaktadır. Polinomun derecesi her zaman kontrol noktalarının sayısından bir eksiktir. Üç boyutlu Bezier yüzeylerinin (diğer adıyla Bezier yamalarının) tanımlanması için Bezier eğrilerinin gösteriminin genelleştirilmesi mümkündür. Matematiksel olarak, üç boyutlu yüzeyler iki eğrinin Kartezyen çarpımından elde edilebilir. Dolayısıyla,  $(m+1)(n+1)$  kontrol noktası tarafından belirtilen Bezier yüzeyinin gösterimi şöyle olacaktır:

$$P(u, v) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m P_{i,j} B_{i,n}(u) B_{j,m}(v) \quad (2.1.5)$$



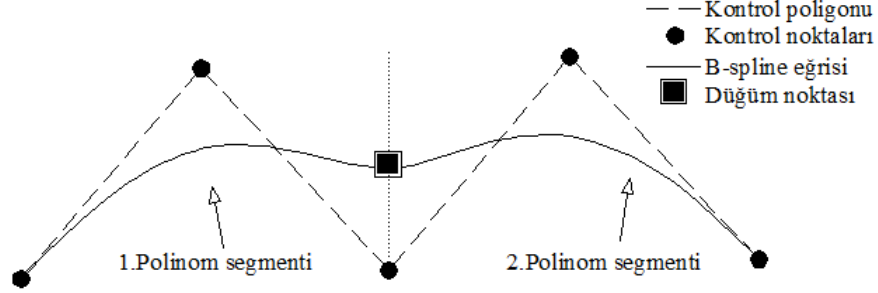
**Şekil 2.3.** 16 Kontrol Noktası Tanımlanmış Bir Bezier Yüzeyi Gösterilmektedir

Bezier eğrileri dışında yaygın olarak kullanılan diğer yöntemler arasında Hermite, B-Spline, Cardinal, Kochanek-Bartels ve Catmull-Rom eğrileri sayılabilir. Ayrıca Loop, Doo-Sabin ve  $\sqrt{3}$  gibi yaygın olarak kullanılan yüzey bölümlendirme yöntemleri de vardır[19].

## 2.2. B-Spline Eğrileri

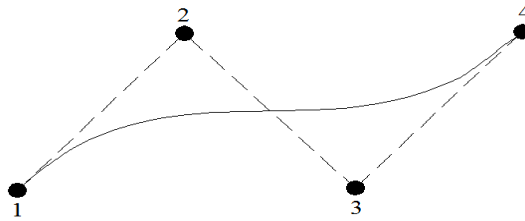
B-spline eğrilerinin teorisi ilk olarak Schoenberg (1946) tarafından önerilmiş olmasına rağmen, Bilgisayar Destekli Geometrik Dizayn alanında ilk uygulamalar Gordon ve Riesenfeld (1974) tarafından yapılmıştır. B-spline eğri ve yüzeyleri kontrol noktaları adı verilen köşe noktaları ile tanımlanırlar. Bu noktalar kullanılarak elde edilen eğri ve yüzeyler, kontrol noktalarından geçmemekle birlikte, eğri ve yüzeyin formu tamamen bu noktaların konumlarına göre şekillenmektedir. Bu kontrol noktalarının oluşturduğu poligona kontrol poligonu denilmektedir. Bu

noktalar bir mıknatıs gibi davranarak eğrinin kontrol poligonunun şeklini takip etmesini sağlar ve sonuçta kontrol poligonunun sınırları içerisinde kalan karakteristik ve düzgün bir eğri elde edilir [20].



**Şekil 2.4.** Bir B-Spline Eğrisi ve Kontrol Poligonu

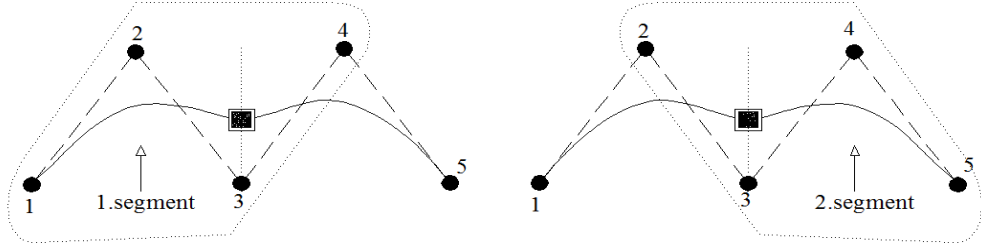
B-spline eğrilerinin genel olarak Bezier eğrilerinin geliştirilmesi sonucu ortaya çıkmış eğriler olduğunu söyleyebiliriz. Yalnız B-spline eğrileri genelde Bezier eğrisi gibi tek parça bir eğri değildir. B-spline en az bir ya da daha çok polinom segmentinin birleşmesinden oluşmaktadır. B-spline eğrisinin tek bir segmentten oluşması durumunda bu eğri aynı zamanda Bezier eğrisidir. Bu durumun gerçekleşebilmesi için, eğrinin kontrol noktası sayısı ile mertebesinin birbirine eşit olması gerekmektedir. Şekil 2.5’de görülen eğrinin dört kontrol noktası vardır ve eğrinin mertebesi de dört olarak belirlenmiştir. Dolayısıyla bu eğri, hem B-spline eğrisi hem de Bezier eğrisidir ve tek parça bir eğridir.



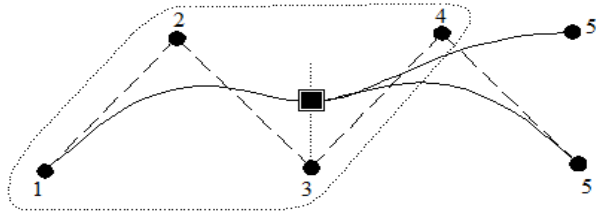
**Şekil 2.5.** Bezier Eğrisine Eşdeğer Bir B-Spline Eğrisi

B-spline eğrisinin derecesi Bezier eğrilerinde olduğu gibi kontrol noktasına bağlı olmayıp, kontrolü mümkündür. B-spline eğrisinin derecesi mertebesinin bir eksiğidir ( $k-1$ ). B-spline eğrisinin mertebesi, polinom segmentlerini etkileyen kontrol noktası sayısını göstermektedir. Şekil 2.6 ‘da B-spline eğrisinin 1. segmentini etkileyen kontrol noktaları ve 2. Segmenti etkileyen kontrol noktaları noktalı alanlar içerisinde

görülmektedir. Çizilen mertebeden bir eğri olduğundan, her polinom segmentini sadece dört kontrol noktası etkilemektedir. Yani, 1.segment üzerinde 5. Kontrol noktasına hiçbir etkisi yoktur. 5. nokta konumu kasti olarak değiştirilip 5' konumuna getirilirse, bu değişimin 1. segment üzerinde herhangi bir etkisi olmadığı Şekil 2.7' den açıkça görülmektedir.

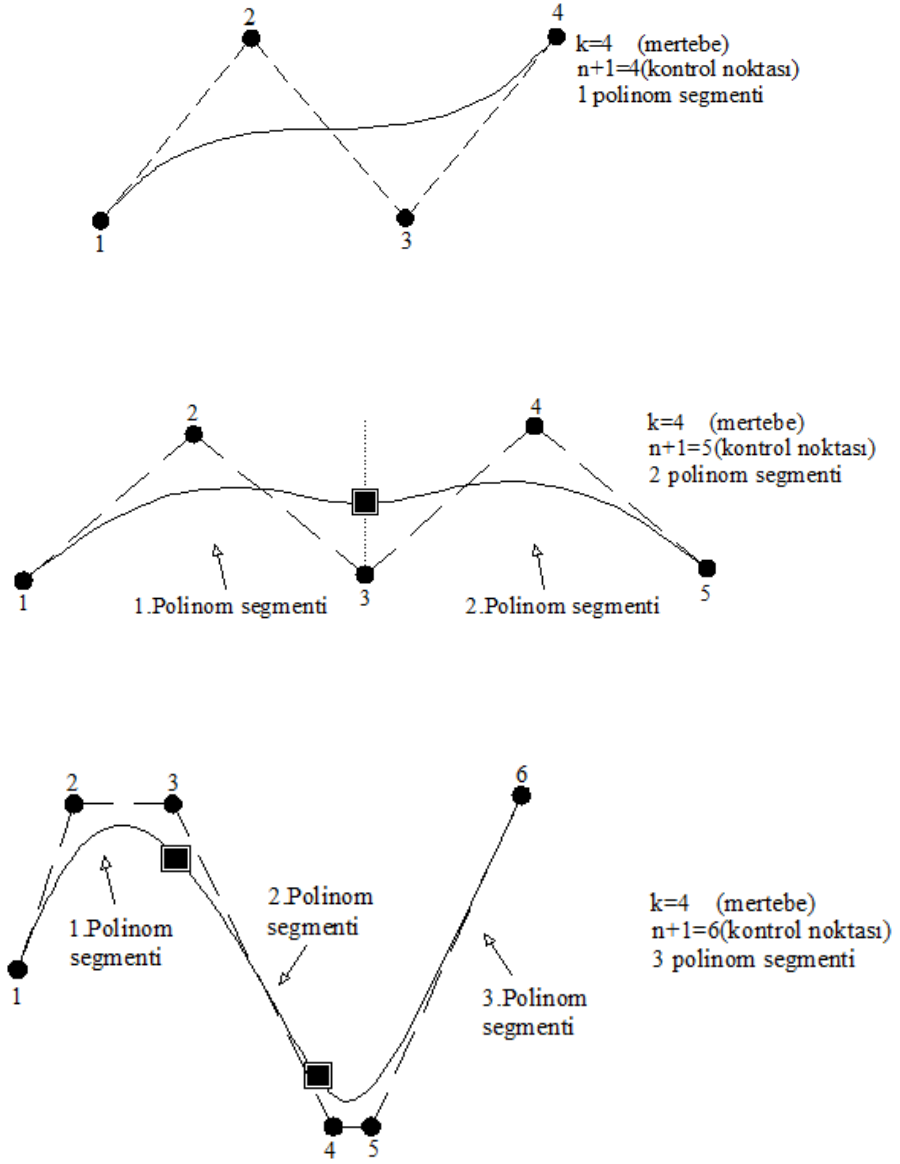


**Şekil 2.6.** B-Spline Eğrisinin 1.ve 2. Segmentini Etkileyen Kontrol Noktaları



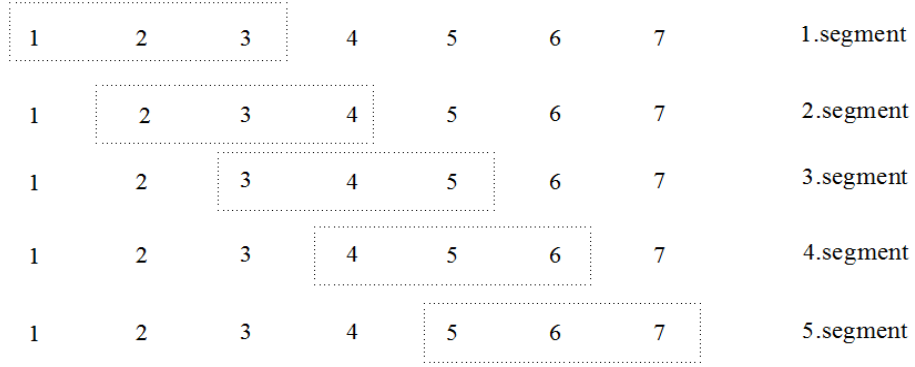
**Şekil 2.7.** Kontrol Noktası ile Eğri Mertebesi Arasındaki İlişki

Kontrol noktası sayısı ile eğrinin mertebesi arasındaki ilişki eğrinin kaç polinom segmentinden oluşacağını belirler. B-spline eğrisinin mertebesinden fazla kontrol noktası ile tanımlanması eğride segment sayısının artmasına yol açmaktadır. Her yeni kontrol noktası eğriye fazladan bir segment kazandıracaktır. B-spline eğrilerinin bu özelliği Şekil 2.8' den görülmektedir.



**Şekil 2.8.** Eğrinin Kontrol Noktası ve Mertebesinin Segment Sayısına Etkisi

Konuya açıklık kazandırmak için yedi tane kontrol noktası ile tanımlanmış 3. mertebeden (2. derece) bir B-spline eğrisini örnek alalım. Şekil 2.9' da her bir polinom segmentini etkileyen kontrol noktaları çerçeve içine alınmıştır. Eğrinin mertebesi 3 olduğundan üçüncü kontrol noktasından sonraki her kontrol noktası için eğriye bir segment daha eklenecektir. Dolayısıyla bu örnekteki B-spline eğrisi beş polinom segmentinden oluşacaktır.



**Şekil 2.9.** Her Bir Polinom Segmentini Etkileyen Kontrol Noktaları

B-spline eğrilerinin formunu etkileyen önemli bir faktör de düğüm vektörleridir. B-spline eğrisinin parametre değişimini gösteren düğüm vektörü B-spline eğrisinin kaç polinom segmentinden oluşacağını belirler. Düğüm vektörünün elemanları olan parametre değerlerine düğüm noktaları denir ve her polinom segmentinin uç noktalarında bulunur. Düğüm vektörlerine diğer bölümlerde ayrıntılı olarak değinilecektir. B-spline eğrilerinde her kontrol noktasının  $(B_i)$  bir temel fonksiyonu  $(N_{i,k})$  vardır. Böylece, bir kontrol noktası  $(B_i)$  eğriyi ancak temel fonksiyonunun sıfır olduğu yere kadar etkileyebilmektedir. B-spline eğrisinin denklemi bu temel fonksiyonlarının ve kontrol noktalarının lineer kombinasyonu ile elde edilmektedir:

$$P(t) = \sum_{i=1}^{n+1} B_i N_{i,k}(t) \quad t_{\min} \leq u \leq t_{\max} \quad 2 \leq k \leq n+1 \quad (2.1.6)$$

### 2.2.1. B-Spline Temel Fonksiyonları

B-spline temel fonksiyonlarının nümerik hesaplama açısından en uygun matematiksel ifadesini Cox (1971) ve de Boor (1972) vermiştir. Her kontrol noktası için tanımlanan k. mertebeden i. Normalleştirilmiş B-spline temel fonksiyonunun ifadesi aşağıdaki gibi verilmiştir:

$$N_{i,1}(u) = \begin{cases} 1 & , x_i \leq t \leq x_{i+1} \\ 0 & \end{cases} \quad (2.2.1)$$

aksi takdirde;

$$N_{i,k}(t) = \frac{(t-x_i)}{x_{i+k-1}-x_i} N_{i,k-1}(t) + \frac{(x_{i+k}-t)}{x_{i+k}-x_{i+1}} N_{i+1,k-1}(t), \quad 1 \leq i \leq n+1 \quad (2.2.2)$$

Nümerik hesaplama açısından, bu matematiksel ifade için  $0/0 \equiv 0$  kabulü yapılmaktadır.

Bu ifadede;

$N_{i,k}$  : mertebesi (k) olan (i) temel fonksiyonu,

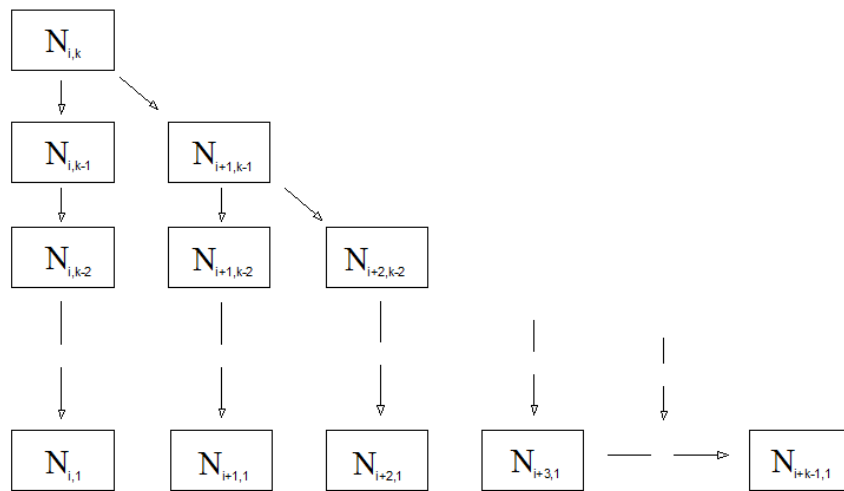
t : eğrinin parametresini,

k : eğrinin mertebesini,

$x_i$  : düğüm vektörünün elemanlarını

n+1: kontrol noktalarının sayısını göstermektedir.

Cox-de Boor formülasyonundan da görüleceği gibi k. mertebeden bir temel fonksiyonun hesabı için 1. mertebe dahil olmak üzere k' dan düşük mertebede tüm temel fonksiyonların hesaplanması gerekmektedir. B-Spline temel fonksiyonlarının birbirleriyle olan ilişkisi Şekil 2.10'da görülmektedir [21].



**Şekil 2.10.**  $N_{i,k}$  Temel Fonksiyonunun Hesabı İçin Gereken Diğer Temel Fonksiyonlar



Normalleştirilmiş B-spline temel fonksiyonlarının bazı özellikleri aşağıda verilmektedir:

$$N_{i,k}(t) > 0 \quad ; \quad x_i \leq t \leq x_{i+k} \quad (\text{her parametre değeri için pozitif bir sayıdır})$$

$$N_{i,k}(t) = 0 \quad ; \quad x_1 \leq t \leq x_i, \quad x_{i+k} \leq t \leq x_{n+k+1}$$

$$\sum_{i=0}^{n+1} N_{i,k}(t) = 1 \quad (\text{herhangi bir } t \text{ parametresi için temel fonksiyonların toplamı birdir})$$

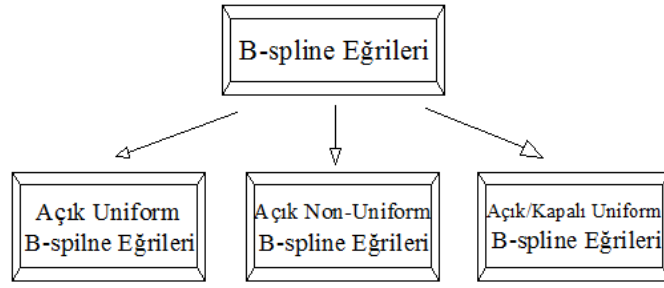
$$N_{i,k}(t) \text{ D\u00f6\u0131m noktalarında } (k-2). \text{ Mertebeden s\u00fcrekli\u0131\u011fe sahiptir } (C)^{k-2}$$

### 2.2.2. B-Spline D\u00f6\u0131m Vekt\u00f6r\u00fcn\u00fcn Tanımı

Her B-spline e\u011frisi i\u00e7in bir d\u00f6\u0131m vekt\u00f6r\u00fc tanımlanmıştır. Bu vekt\u00f6r, B-spline e\u011frisinin parametre aralı\u011fını g\u00f6stermektedir. B-spline temel fonksiyonlarının (2.2.2) denkleminde g\u00f6r\u00fclen  $x_i$  de\u011ferleri, e\u011fri boyunca de\u011fi\u015fen  $t$  parametresini g\u00f6steren d\u00f6\u0131m vekt\u00f6r\u00fcn\u00fcn elemanlarıdır. Monoton olarak artan reel sayılardan  $x_i \leq x_{i+1}$  olu\u015fan d\u00f6\u0131m vekt\u00f6r\u00fcn\u00fcn B-spline fonksiyonlarının \u015ekillenmesinde b\u00fcy\u00fck \u00f6nemi vardır. B-spline e\u011frisi bu d\u00f6\u0131m vekt\u00f6r\u00fcn\u00fcn elemanlarının belirledi\u011fi sayıda ve \u015ekilde par\u00e7alara ayrılır. Yani bir B-spline e\u011frisinin ka\u00e7 polinom segmentinden olu\u015facak\u0131 d\u00f6\u0131m vekt\u00f6r\u00fc tarafından belirlenir. D\u00f6\u0131m vekt\u00f6r\u00fcn\u00fcn elemanları,  $t_{\min}$  'den  $t_{\max}$  'a do\u011fru monoton olarak  $t$  parametre de\u011ferleridir.

$$[X] = [t_{\min} = t_1 \quad (t_2) \dots (t_{n+k}) \quad t_{\max} = t_{n+1+k}] \quad (2.2.3)$$

B-spline e\u011frisinin \u00fcniform, non-\u00fcniform veya a\u00e7ık, kapalı bir e\u011fri olup olmadı\u011fı d\u00f6\u0131m vekt\u00f6r\u00fc ile belirlenir. Bir ba\u015ka deyi\u015fle B-spline e\u011frileri kullanılan d\u00f6\u0131m vekt\u00f6r\u00fcn\u00fcn tipine g\u00f6re sınıflandırılır.



**Şekil 2.11.** B-Spline Eğrilerinin Sınıflandırılması

- a) Bir B-spline eğrisinin üniform veya non-üniform bir eğri olup olmadığı düğüm vektörünü oluşturan parametre değerlerinin eşit aralıklı olup olmamasına bağlıdır.
- b) Periyodik düğüm vektörleri kullanılarak, kapalı B-spline eğrileri oluşturulabilir.

Üniform bir düğüm vektörü eşit aralıkla artan parametre değerlerine sahiptir. Bu vektörün elemanları sıfırdan başlayıp maksimum parametre değerine kadar eşit aralıklı olarak artmaktadır. Eğer, normalleştirilmiş parametre aralığı söz konusu ise parametre değerleri 0 ve 1 arasında değişecektir. Bu tip düğüm vektörlerinin kullanılmasıyla genellikle açık üniform B-spline eğrileri oluşturulmaktadır. Açık üniform düğüm vektörlerinin başında ve sonundaki parametre değerleri eğrinin mertebesi ( $k$ ) kadar tekrar edilmesi gerekmektedir. Bu oluşturulacak eğrinin ilk son kontrol noktalarından geçmesini sağlayacaktır. Örneğin,

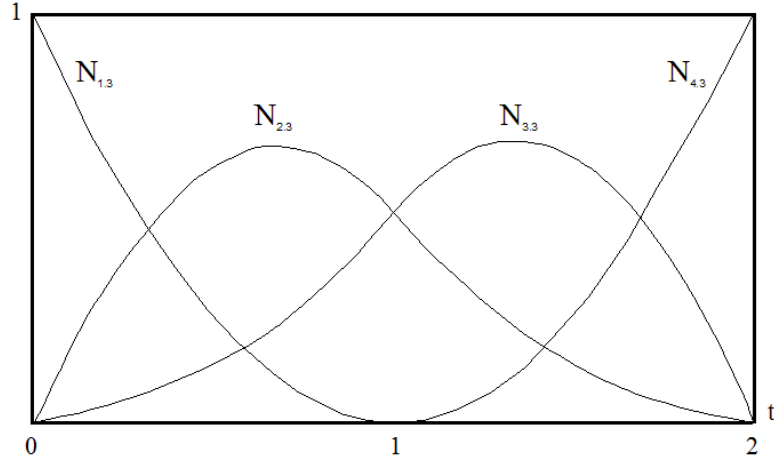
$$k=3 \text{ için } X=[0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 2 \ 3 \ 3 \ 3] \quad (2.2.4)$$

Açık üniform düğüm vektörleri aşağıdaki denklem takımı kullanılarak elde edilmektedir:

$$\begin{aligned}
 x_i &= 0 & 1 \leq i \leq k \\
 x_i &= i - k & k + 1 \leq i \leq n + 1 \\
 x_i &= n - k + 2 & n + 2 \leq i \leq n + k + 1
 \end{aligned} \quad (2.2.5)$$

Şekil 9.' da dört kontrol noktası ( $n+1=4$ ) ile tanımlanmış 3. Mertebeden ( $k=3$ ) bir B-spline eğrisine ait temel fonksiyonlar görülmektedir. Eğriye ait açık üniform düğüm vektörü (2.2.5) denkleminde aşağıdaki gibi elde edilmiştir:

$$X=[0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 2 \ 2 \ 2] \quad (2.2.6)$$



**Şekil 2.12.** Açık Üniform B-Spline Eğrisine Ait Temel Fonksiyonlar ( $k=3$ ,  $n+1=4$ )

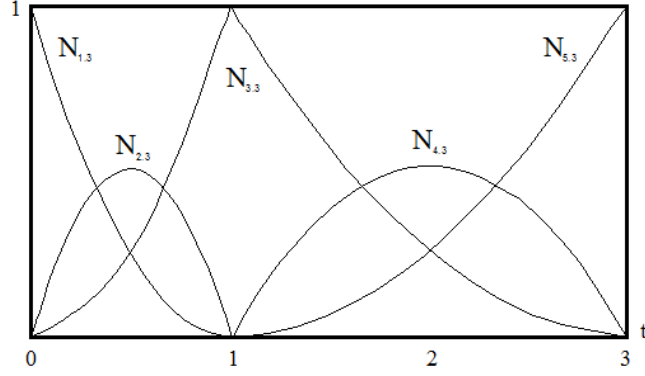
Eğer kontrol poligonuna ait nokta sayısı ( $n+1$ ) ve eğrinin mertebesi ( $k$ ) eşitse, açık üniform B-spline temel fonksiyonları Bernstein temel fonksiyonlarına indirgenir. (Bezier eğrileri) Örneğin, dört poligon noktası ile dördüncü mertebeden ( $k=4$ ) bir eğrinin çizilmesiyle bir kübik Bezier/B-spline eğrisi oluşturulmuş olacaktır. Bu eğriye ait düğüm vektörü;

$$X=[0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1] \quad (2.2.7)$$

Diğer bir düğüm vektörü de tipi de non-üniform düğüm vektörüdür. (non-üniform knot vektör) Bu vektör eşit aralıklı olarak artmayan ve tekrar edilebilen parametre değerlerine sahiptir. Örneğin,

$$X=[0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 2 \ 2 \ 2] \quad (2.2.8)$$

Eğri beş poligon noktası ( $n+1=5$ ) ile tanımlanmış üçüncü mertebeden ( $k=3$ ) bir eğridir. Bir ara parametre değeri tekrarlanan non üniform düğüm vektörü aşağıdaki gibi verilmektedir.



**Şekil 2.13.** Açık Üniform B-Spline Eğrisine Ait Temel Fonksiyonlar ( $k=3$ ,  $n+1=5$ )

$$X=[0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 3 \ 3 \ 3] \quad (2.2.9)$$

Açık non-üniform düğüm vektörünün elemanları, poligon noktaları arasındaki yay uzunluğu ile orantılı olacak şekilde aşağıdaki gibi hesaplanabilmektedir:

$$x_i = 0 \quad 1 \leq i \leq k \quad (2.2.10)$$

$$x_{i+k} = \frac{\left[ \frac{i}{n-k+2} \right] c_{i+1} + \sum_{j=1}^i c_j}{\sum_{i=1}^n c_i} (n-k+2) \quad 1 \leq i \leq n-k+1 \quad (2.2.11)$$

$$x_i = n-k+2 \quad n+2 \leq i \leq n+k+1 \quad (2.2.12)$$

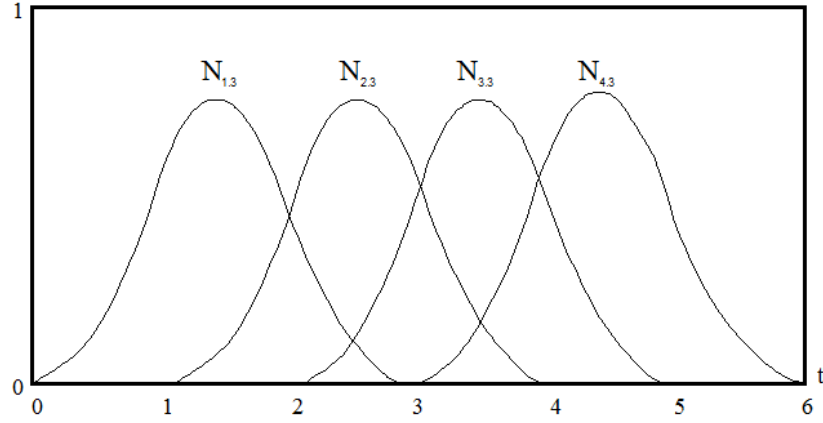
(2.2.11) denkleminde  $c_i = |B_{i+1} - B_i|$  ' dir. Eşit aralıklı olarak verilmiş kontrol poligonu noktaları için non-üniform düğüm vektörü, üniform düğüm vektörüne dönüşmektedir. Periyodik düğüm vektörlerinin elemanları, 0 ile maksimum parametre değeri olan  $t_{\max} = n+k$  arasında değişecektir ve eleman sayısı da  $n+k+1$  olacaktır. Örneğin, ikinci derece ( $k=3$ ) ve dört poligon noktası ( $n+1=4$ ) olan bir eğri için, periyodik üniform düğüm vektörü;

$$X=[0 \ 1 \ 2 \ 3 \ 4 \ 5 \ 6] \quad (2.2.13)$$

Eğrinin mertebesi (k) ne olursa olsun periyodik üniform düğüm vektörleri kullanılarak oluşturulan eğrinin temel fonksiyonları aşağıdaki koşulu her zaman sağlamaktadır:

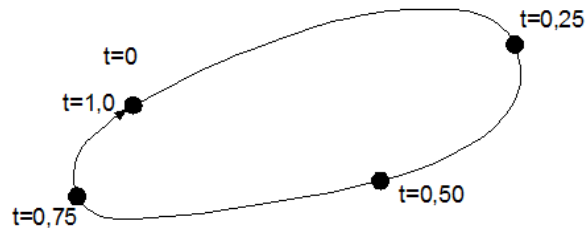
$$N_{i,k}(t) = N_{i-1,k}(t-1) = N_{i+1,k}(t+1) \quad (2.2.14)$$

Periyodik temel fonksiyonların bu özelliği Şekil 2.14’de görülmektedir.



**Şekil 2.14.** Periyodik Üniform B-Spline Eğrisinin Temel Fonksiyonları(k=3, n+1=4)

Periyodik düğüm vektörleri kapalı eğriler oluşturmak için de kullanılabilir. Şekil 2.15’de kapalı periyodik B-spline eğrilerine ait bir örnek görülmektedir:



**Şekil 2.15.** Periyodik (Kapalı) Bir B-Spline Eğrisi ve Parametre Değişimi

Bu durumu bir örnekle açıklayacak olursak;

Üç kontrol noktası ile tanımlanmış (n+1=3), quadratik bir B-spline eğrisinin (k=3) periyodik temel fonksiyonlarının  $N_{i,3}(t), i = 1, 2, 3$  olması durumunda B-spline eğrinin hesaplanması ve çizimi aşağıdaki şekilde olur.

Bir B-spline eğrisinin parametre aralığı düğüm vektörü ile belirlenir. Bu nedenle

Düğüm vektörünün eleman sayısı:  $n+k+1=6$  bağıntısıyla hesaplanır.

Periyodik eğriler için max. Parametre değeri ( $t_{\max}$ ) ise:  $n+k=5$ 'dir.

Düğüm vektörü:  $[X]=[x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4 \ x_5 \ x_6]=[0 \ 1 \ 2 \ 3 \ 4 \ 5]$

Bu eğrinin parametre aralığı  $0 \leq t \leq 5$  arasında değişmektedir.

3.mertebeden bir temel fonksiyonun hesabı için tüm 1 ve 2. Mertebeden temel fonksiyonların hesabı gereklidir. Son parametre aralığı  $x_5$  ve  $x_6$  arasında değiştiği için en fazla  $N_{5,1}$ 'in hesabı mümkündür.

$$N_{1,1} \ N_{2,1} \ N_{3,1} \ N_{4,1} \ N_{5,1}$$

$$N_{1,2} \ N_{2,2} \ N_{3,2} \ N_{4,2}$$

$$N_{1,3} \ N_{2,3} \ N_{3,3}$$

Dolayısıyla  $N_{1,3}$ ,  $N_{2,3}$ ,  $N_{3,3}$ 'ün hesabı için gerekli temel fonksiyonlar yukarıdaki şemadan görülmektedir. B-spline temel fonksiyonları her parametre aralığında hesaplanırsa;

$$x_1 \leq t \leq x_2 ; 0 \leq t \leq 1$$

1.mertebe fonksiyonlar:

$$N_{1,1}(t) = 1 \quad ; N_{i,1} = 0 , i \neq 1 \quad (2.2.15)$$

2.mertebe fonksiyonlar:

$$N_{1,2}(t) = \frac{(t-0)}{(1-0)} N_{1,1} + \frac{(2-t)}{(2-1)} N_{2,1} = t + 0 = t \quad ; N_{i,2} = 0 , i \neq 1 \quad (2.2.16)$$

3.mertebe fonksiyonlar:

$$N_{1,3}(t) = \frac{(t-0)}{(2-0)} N_{1,2} + \frac{(3-t)}{(3-1)} N_{2,2} = \frac{t}{2}t + 0 = \frac{t^2}{2} \quad ; N_{i,3} = 0 , i \neq 1 \quad (2.2.17)$$

$$x_2 \leq t < x_3 ; 1 \leq t < 2$$

1.mertebe fonksiyonlar:

$$N_{2,1}(t) = 1 \quad ; N_{i,1} = 0 , i \neq 2 \quad (2.2.18)$$

2.mertebe fonksiyonlar:

$$N_{1,2}(t) = \frac{(t-0)}{(1-0)} N_{1,1} + \frac{(2-t)}{(2-1)} N_{2,1} = 0 + (2-t) = (2-t) \quad (2.2.19)$$

$$N_{2,2}(t) = \frac{(t-1)}{(2-1)} N_{2,1} + \frac{(3-t)}{(3-2)} N_{3,1} = (t-1) + 0 = (t-1) \quad ; N_{i,2} = 0 , i \neq 1, 2 \quad (2.2.20)$$

3.mertebe fonksiyonlar:

$$N_{1,3}(t) = \frac{(t-0)}{(2-0)} N_{1,2} + \frac{(3-t)}{(3-1)} N_{2,2} = \frac{t}{2}(2-t) + \frac{(3-t)}{2}(t-1) \quad (2.2.21)$$

$$N_{2,3}(t) = \frac{(t-1)}{(3-1)} N_{2,2} + \frac{(4-t)}{(4-2)} N_{3,2} = \frac{(t-1)}{2}(t-1) + 0 = \frac{(t-1)^2}{2} ;$$

$$N_{i,3} = 0 , i \neq 1, 2 \quad (2.2.22)$$

$$x_3 \leq t < x_4 ; 2 \leq t < 3$$

1.mertebe fonksiyonlar:

$$N_{3,1}(t) = 1 \quad ; N_{i,1} = 0 , i \neq 3 \quad (2.2.23)$$

2.mertebe fonksiyonlar:

$$N_{2,2}(t) = (3-t) \quad (2.2.24)$$

$$N_{3,2}(t) = (t-2) \quad ; N_{i,2} = 0 , i \neq 2,3 \quad (2.2.25)$$

3.mertebe fonksiyonlar:

$$N_{1,3}(t) = \frac{(3-t)}{2}(3-t) \quad (2.2.26)$$

$$N_{2,3}(t) = \frac{(t-1)}{2}(3-t) + \frac{(4-t)}{2}(t-2) \quad (2.2.27)$$

$$N_{3,3}(t) = \frac{(t-2)}{2}(t-2) \quad ; N_{i,3} = 0 , i \neq 1,2,3 \quad (2.2.28)$$

$$x_4 \leq t < x_5 ; 3 \leq t < 4$$

1.mertebe fonksiyonlar:

$$N_{4,1}(t) = 1 \quad ; N_{i,1} = 0 , i \neq 4 \quad (2.2.29)$$

2.mertebe fonksiyonlar:

$$N_{3,2}(t) = (4-t) \quad (2.2.30)$$

$$N_{4,2}(t) = (t-3) \quad ; N_{i,2} = 0 , i \neq 3,4 \quad (2.2.31)$$

3.mertebe fonksiyonlar:

$$N_{2,3}(t) = \frac{(4-t)^2}{2} \quad (2.2.32)$$

$$N_{3,3}(t) = \frac{(t-2)}{2}(4-t) + \frac{(5-t)}{2}(t-3) \quad ; N_{i,3} = 0 , i \neq 2,3 \quad (2.2.33)$$



$$x_5 \leq t < x_6 ; 4 \leq t < 5$$

1.mertebe fonksiyonlar:

$$N_{5,1}(t) = 1 \quad ; N_{i,1} = 0 , i \neq 5 \quad (2.2.34)$$

2.mertebe fonksiyonlar:

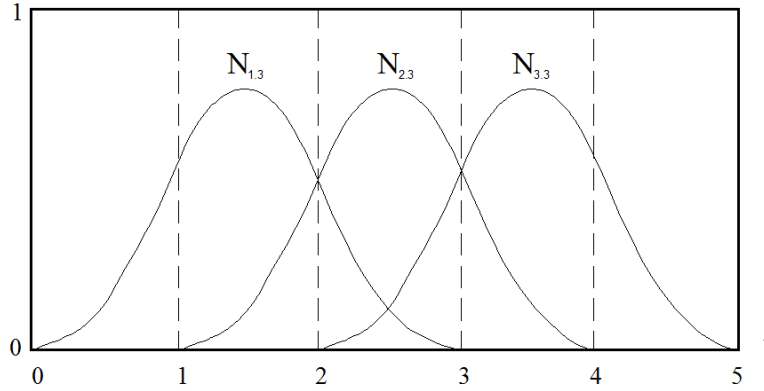
$$N_{4,2}(t) = (5-t) \quad ; N_{i,2} = 0 , i \neq 4 \quad (2.2.35)$$

3.mertebe fonksiyonlar:

$$N_{3,3}(t) = \frac{(5-t)^2}{2} \quad ; N_{i,3} = 0 , i \neq 3 \quad (2.2.36)$$

Olarak hesaplanır.

Bu bağıntıya göre quadratik eğriler olan  $N_{1,3}, N_{2,3}, N_{3,3}$  temel fonksiyonlarını çizecek olursak Şekil 2.16'daki gibi oluşur.



Şekil 2.16. Quadratik Eğriler Olan  $N_{1,3}, N_{2,3}, N_{3,3}$  Temel Fonksiyonları

### 2.2.3. B-Spline Eğrilerinin Matematiksel Tanımı

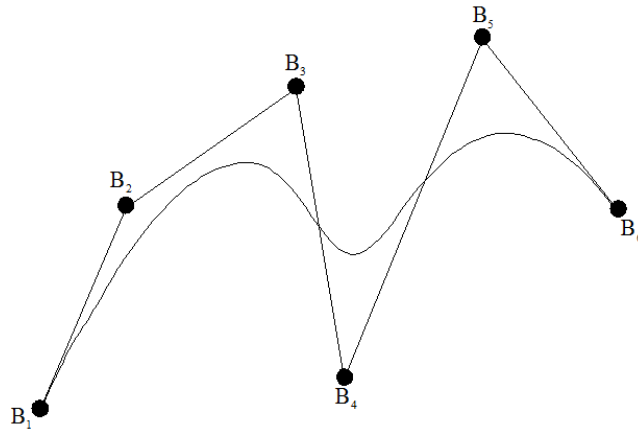
B-spline eğrilerinin matematiksel ifadesi aşağıdaki gibi verilmektedir.

$$P(u, v) = \sum_{i=1}^{n+1} B_i N_{i,k}(t) \quad t_{\min} \leq t < t_{\max} , \quad 2 \leq k < n+1 \quad (2.2.37)$$

Bu ifade ( $B_i$ ) kontrol noktalarını, ( $t$ ) eğri boyunca değişen eğri parametresini, ( $k$ ) eğrinin mertebesini ( $n+1$ ) de kontrol noktası sayısını göstermektedir.  $N_{i,k}(t)$  fonksiyonları ise (2,2,2) denklemi ile verilmiş olan  $k$ . mertebeden B-spline temel fonksiyonlarıdır. (2,2,37) denkleminde de görüldüğü gibi B-spline eğrisi tüm kontrol noktalarının ve temel fonksiyonlarının lineer kombinasyonu sonucu oluşan bir eğridir. Genel olarak Bilgisayar Destekli Geometrik Dizayn alanında en sık kullanılan eğri tipi üniform B-spline eğrileri olduğundan, burada daha çok bu eğrilere ağırlık verilecektir. Bir açık üniform B-spline eğrisi ve tanımlayıcı kontrol poligonu Şekil 2.17’de görülmektedir. B-spline eğrilerinin diğer matematiksel fonksiyonlardan üstünlüğü, eğrinin formunu kontrol etmeye yarayan bazı özelliklerinin olmasıdır. Bu kontrol özellikleri şöyle sıralanabilir:

- Düğüm vektörleri ve B-spline temel fonksiyonlarının tipi,
- Temel fonksiyonunun mertebesi,
- Kontrol noktalarının sayısı ve konumu,
- Tekrarlayan kontrol noktaları,
- Tekrarlayan parametre değerleri

Şekil 2.17’de bir kübik B-spline eğrisi ( $k=4$ ) ve tanımlayıcı kontrol poligonu.



**Şekil 2.17.** Bir Kübik B-Spline Eğrisi ( $k=4$ ) Tanımlayıcı Kontrol Poligonu

Bu durumu da bir örnek ile açıklayacak olursak;

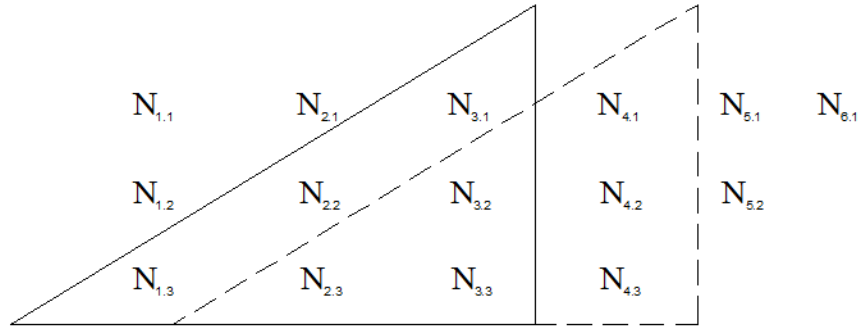
Dört kontrol noktası ile tanımlanmış ( $n+1=4$ ), açık üniform quadratik B-spline eğrisinin  $B_1[1,1]$ ,  $B_2[3,2]$ ,  $B_3[5,1]$ ,  $B_4[7,2]$  kontrol noktalarına göre 3. Dereceden denklemleri aşağıdaki şekilde hesaplanır.

Açık üniform düğüm vektörünün eleman sayısı:  $n+1+k=7$

Düğüm vektörü:  $[X]=[x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4 \ x_5 \ x_6]=[0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 2 \ 2 \ 2]$

Bu eğrinin parametre aralığı  $0 \leq t < 2$  arasında değişmektedir.

Bu düğüm vektörüne göre B-spline eğrisi iki parametre aralığında ( $0 \leq t < 1$  ve  $1 \leq t < 2$ ) tanımlıdır.



**Şekil 2.18** Kübik B-Spline Eğrisi Temel Fonksiyonları

$0 \leq t < 1$  Aralığında ( $x_3 \leq t < x_4$ ) tanımlı temel fonksiyonlar düz çizgili üçgen alan içinde,  $1 \leq t < 2$  ( $x_4 \leq t < x_5$ ) aralığında tanımlı temel fonksiyonlar ise kesikli alan içinde görülmektedir (Şekil 2.18).

Öncelikle her parametre aralığında temel fonksiyonlar hesaplanırsa;

$$x_3 \leq t < x_4 \quad ; \quad 0 \leq t < 1$$

1.mertebe fonksiyonlar:

$$N_{3,1}(t) = 1 \quad ; \quad N_{i,1} = 0, \quad i \neq 3 \quad (2.2.38)$$

2.mertebe fonksiyonlar:

$$N_{2,2}(t) = 1 - t \quad (2.2.39)$$

$$N_{3,2}(t) = t \quad ; N_{i,2} = 0, i \neq 2, 3 \quad (2.2.40)$$

3.mertebe fonksiyonlar:

$$N_{1,3}(t) = (1 - t)^2 \quad (2.2.41)$$

$$N_{2,3}(t) = t(1 - t) + \frac{(2 - t)}{2}t = \frac{4t - 3t^2}{2} \quad (2.2.42)$$

$$N_{3,3}(t) = \frac{t^2}{2} \quad ; N_{i,3} = 0, i \neq 1, 2, 3 \quad (2.2.43)$$

$$x_4 \leq t < x_5 \quad ; 1 \leq t < 2 \quad (2.2.44)$$

1.mertebe fonksiyonlar:

$$N_{4,1}(t) = 1 \quad ; N_{i,1} = 0, i \neq 4 \quad (2.2.45)$$

2.mertebe fonksiyonlar:

$$N_{3,2}(t) = 2 - t \quad (2.2.46)$$

$$N_{4,2}(t) = t - 1 \quad ; N_{i,2} = 0, i \neq 3, 4 \quad (2.2.47)$$

3.mertebe fonksiyonlar:

$$N_{2,3}(t) = \frac{(2 - t)^2}{2} \quad (2.2.48)$$

$$N_{3,3}(t) = \frac{t}{2}(2 - t) + (2 - t)(t - 1) = \frac{(2 - t)(3t - 2)}{2} \quad (2.2.49)$$

$$N_{4,3}(t) = (t - 1)^2 \quad ; N_{i,3} = 0, i \neq 2, 3, 4 \quad (2.2.50)$$

(2.2.37) denkleminde yararlanılarak B-spline eğrisinin denklemi;

$$P(t) = B_1 N_{1,3}(t) + B_2 N_{2,3}(t) + B_3 N_{3,3}(t) + B_4 N_{4,3}(t) \quad (2.2.51)$$

Bu B-spline eğrisi iki polinom segmentinin birleşmesinden oluşmaktadır.

1. Polinom segmentinin denklemi  $0 \leq t < 1$  aralığında;

$$P(t) = B_1 N_{1,3}(t) + B_2 N_{2,3}(t) + B_3 N_{3,3}(t) = B_1 (1-t)^2 + B_2 \frac{4t-3t^2}{2} + B_3 \frac{t^2}{2} \quad (2.2.52)$$

2. Polinom segmentinin denklemi  $1 \leq t < 2$  aralığında;

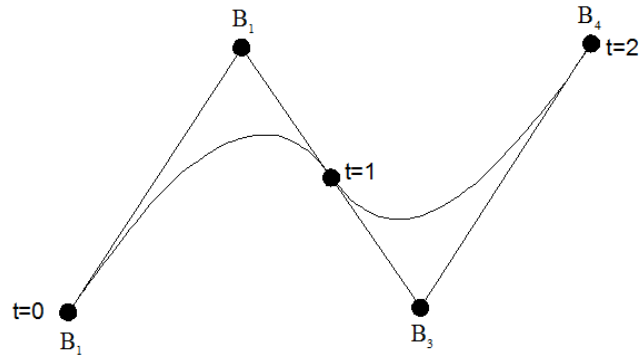
$$3. \quad P(t) = B_2 N_{2,3}(t) + B_3 N_{3,3}(t) + B_4 N_{4,3}(t) = B_2 \frac{(2-t)^2}{2} + B_3 \frac{(2-t) - (3t-2)}{2} + B_4 (t-1)^2 \quad (2.2.53)$$

$t=0$  için 1. polinom denkleminde;  $P(0) = B_1$  olduğu,

$t=2$  için 1. polinom denkleminde;  $P(2) = B_4$  olduğu, yani B-spline eğrisinin kontrol poligonunun uç noktalarından geçtiği görülmektedir (Şekil 2.19)

$t=1$  değeri için ise her iki polinom denkleminin vereceği değer aynıdır.

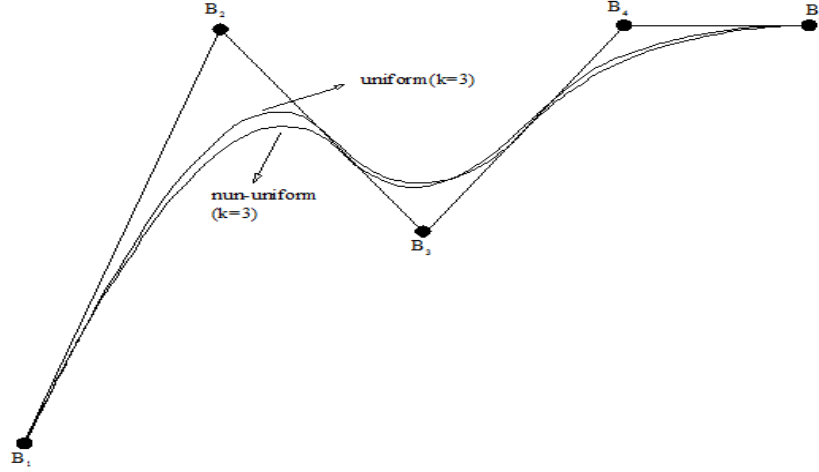
$$P(1) = B_2 \frac{1}{2} + B_3 \frac{1}{2} \quad (2.2.54)$$



**Şekil 2.19.** Örneğe Göre B-Spline Eğrisi

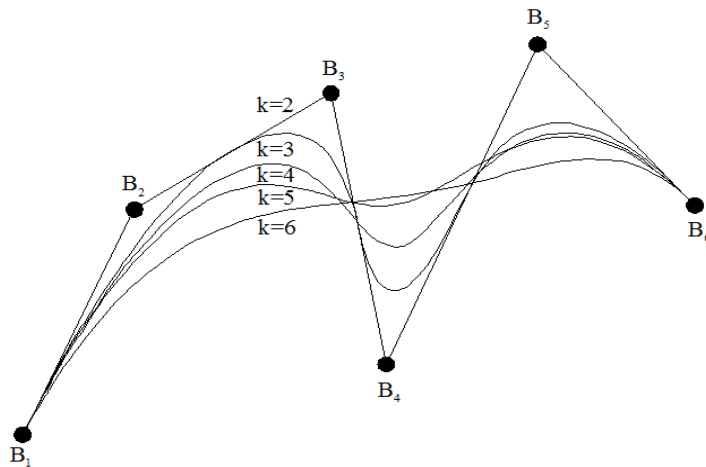
Değişik tipte düğüm vektörlerinin kullanılması sonucu elde edilen B-spline eğrileri Şekil 2.20'de karşılaştırılmaktadır. Şekilde açık üniform B-spline eğrisinin düğüm vektörü (2.2.5) denklemi, non-üniform B-spline eğrisinin düğüm vektörü ise (2.2.11) denklemi kullanılarak elde edilmiştir. Kontrol noktaları arasında mesafe olarak

radikal farklar yoksa elde edilen üniform ve non-üniform B-spline eğrileri birbirlerine yakın eğriler olacaktır.



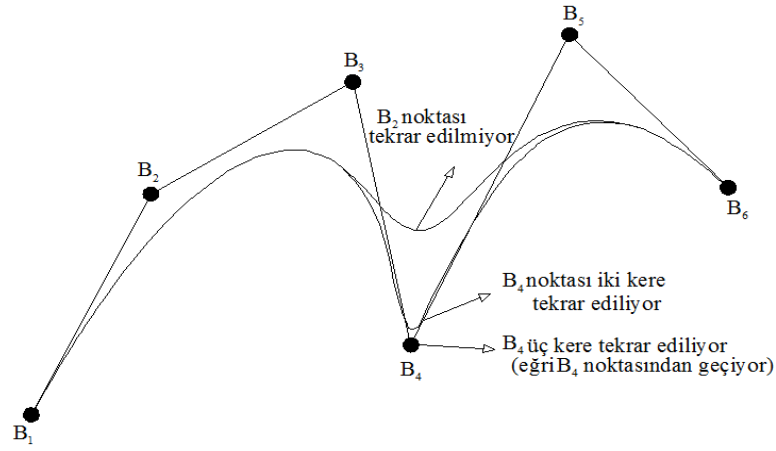
**Şekil 2.20.** Quadratik Açık Üniform ve Non-Üniform B-Spline Eğrilerinin Karşılaştırılması

B-spline eğrilerinde mertebe değişiminin etkileri Şekil 2.21’de görülmektedir. Temelde, eğrinin mertebesi, eğrinin kontrol poligonunu ne kadar yakından takip edeceğini belirler. Eğrinin mertebesi düştükçe, oluşturulan eğri poligonuna daha yakın geçmekte, arttığı durumda ise giderek uzaklaşmaktadır. İkinci mertebeden bir eğri ( $k=2$ ), kontrol poligonuna eşdeğer birinci dereceden bir eğridir. Eğrinin alacağı mertebe değeri minimum ise kontrol noktası sayısı ( $k=n+1$ ) kadar olabilmektedir.



**Şekil 2.21.** B-Spline Eğrisinin Mertebesine Göre Değişimi

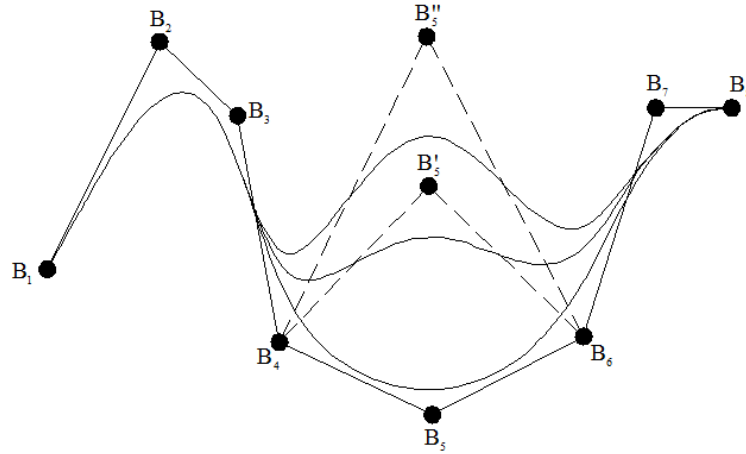
Şekil 2.22’de kontrol noktalarının tekrarlanması sonucu, eğrinin istenilen kontrol noktasına yaklaştırılabileceği hatta noktadan geçirilebileceği görülmektedir. Bu B-spline eğrilerinin en önemli özelliklerinden biridir. Bir poligon noktasının  $(k-1)$  kere tekrar edilmesi B-spline eğrisinin o poligon noktasından geçmesini sağlayacaktır. Şekil 2.23’de  $B_4$  kontrol noktasının çeşitli kereler tekrar edilmesiyle oluşan eğriler çizilmiştir. Bu noktanın iki kere tekrar edilmesiyle eğri  $B_4$  noktasına yaklaşmakta, üç kere tekrar edilmesiyle ise  $B_4$  noktasından geçmektedir.



**Şekil 2.22.** Tekrar Edilen 4. Kontrol Noktasının  $B_4$ , Kübik B-Spline Eğrisine Etkisi ( $k=4$ )

B-spline eğrilerinin en temel özellikleri aşağıda verilmektedir:

- Her kontrol noktası için farklı bir temel fonksiyon tanımlandığından, eğride yapılması istenen değişiklikler eğriyi lokal olarak etkilemektedir. Eğrinin polinom segmentleri, mertebe sayısı kadar ardışık kontrol noktasından etkilenmektedir ve o segment üzerinde diğer kontrol noktalarının hiçbir etkisi bulunmamaktadır. B-spline eğrilerinin bu lokal özelliği şekil 2.23’deki kübik B-spline eğrisi ( $k=4$ ) üzerinde görülmektedir. Beşinci kontrol poligonu noktası  $B_5$ ’in sırayla  $B_5'$  ve  $B_5''$  konumlarına getirilmesinin eğrinin formunu sadece lokal olarak etkilediği görülmektedir.

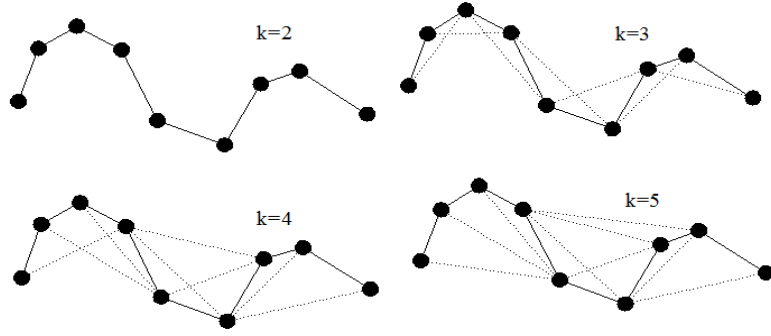


**Şekil 2.23.** Kontrol Poligonunun Konumunun Değiştirilmesinin B-Spline Eğrisine Etkisi

- B-spline eğrisi  $P(t)$  her bir  $x_i \leq t < x_{i+k}$  aralığında  $(k-1)$ . Dereceden sürekli bir eğridir ve  $1, 2, \dots, (k-2)$ . Türevleri de eğri boyunca sürekli dir. Süreklilik şartı  $(C^{k-2})$  ile gösterilir.
- B-spline eğrisinin düğüm vektörü, o eğrinin parametre aralığını ve polinom segmentlerinin sürekliliğini göstermektedir. Eğride bulunabilecek köşe ve dönüm noktalarının temsil edilebilmesi için düğüm vektörü elemanlarının tekrar edilmesi gerekmektedir. (ör. Tekrar sayısı  $(r)$  ise  $x_i = x_{i+k} = \dots = x_{i+r-1}, (r \leq k-1)$ ) Bu durumda temel fonksiyonunun sürekliliği o parametre değerinde azalacaktır  $(C^{k-r-1})$ . B-spline eğrilerinin bu özelliği kontrol poligonunun uç noktalarının interpolasyonu için kullanılmaktadır. Düğüm vektörünün ilk ve son elemanları eğrinin mertebesi  $(k)$  kadar tekrar edilmesiyle B-spline eğrinin kontrol poligonunun ilk ve son noktalarından geçmesi sağlanır. (ör.  $X = [0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 2 \ 2 \ 2], k=3$ )
- B-spline eğrilerinde eğrinin mertebesi, kontrol noktası sayısından bağımsızdır. Fakat eğrinin maksimum alabileceği derece değeri ile ilgili bir sınırlama vardır, o da kontrol noktası sayısı kadardır.
- Kontrol poligonu kullanılarak elde edilen B-spline eğrisi, esas olarak poligonun şeklini andırmasına rağmen, poligonun tüm keskin hatlarından arındırılmış, düzgün bir eğri olacaktır.

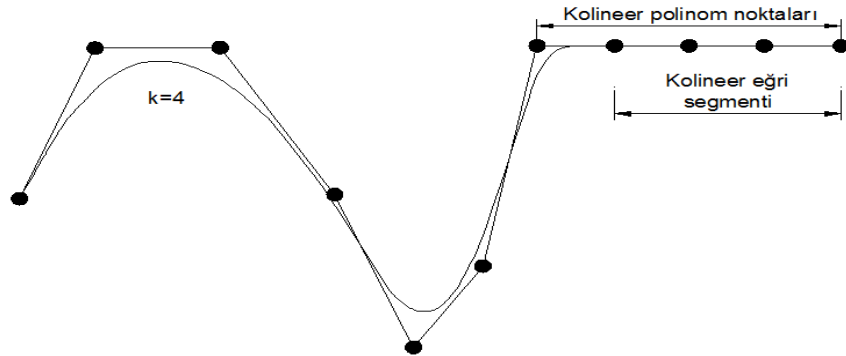


- (k-1). Dereceden bir B-spline eğrisi üzerindeki herhangi bir nokta, birbirine komşu k sayıda kontrol noktasının oluşturduğu konveks alanın içerisinde kalacaktır. Bir başka deyişle, her B-spline segmenti ardışık k kontrol noktasının oluşturduğu konveks alan içerisinde yer alacaktır. B-spline eğrisi de tüm bu segmentlerin birleşmesiyle oluşan bir eğri olduğu için, bu konveks alanların içinde kalacaktır. Şekil 2.24’de kontrol poligonu verilmiş ve farklı mertebeden eğriler için konveks alanlar çizilmiştir.



**Şekil 2.24.** Farklı Mertebeden B-Spline Segmentleri İçin Çizilen Konveks Alanlar

- B-spline eğrilerinin tüm diğer yöntemlere göre üstünlüğü, bir eğrinin alabileceği olası tüm şekillerin tek bir matematiksel ifade ile temsil edebilmesidir. Örneğin, eğride süreksizliğe sahip kısımlar (düz kısımlar veya dönüm noktaları) bulunabilir. Şekil 2.25’de bir bölümü doğru parçası şeklinde olan bir B-spline eğrisi görülmektedir.



**Şekil 2.25.** B-Spline Eğrisi ile Doğru Parçasının Temsili

B-spline eğrisinin esnekliği ve düzgünlüğü B-spline temel fonksiyonlarının mertebesi artırılarak sağlanabilir. Fakat B-spline eğrisinin derecesinin artırılması eğrinin kontrol poligonundan giderek uzaklaşmasına yol açar.

### 2.3. B-Spline Yüzey

B-spline eğriler birçok sektörde yüzey tasarımında da sıkça kullanılır. Özellikle aerodinamik ürün tasarımlarında, tasarımın eğri formunu bozmadan etkinliğin artırılabilmesi B-spline yüzeyleri avantajlı hale getirmektedir. Temsil kabiliyeti açısından en başarılı yöntemlerden biri olan B-spline eğrilerinin tek dezavantajı daire, çember gibi konik şekillerin temsilindeki yetersizlikleridir. Versprille (1975) bu yetersizlikleri gidermek üzere non-üniform rasyonel B-spline eğrilerini (NURBS) önermiştir ve Bilgisayar Destekli Geometrik Dizayn uygulamalarında kullanmaya başlamıştır. NURBS eğrilerinin diğer B-spline eğrilerine göre avantajı, bilgisayar destekli dizayn ortamında karşılaşılabilecek tüm analitik şekilleri (çember, elips, yay) temsil edebilme kabiliyetidir. Dolayısıyla yakın zamanda tekne form dizaynında en çok tercih edilen ve en fazla uygulama alanı bulan matematiksel eğriler olmuşlardır[22].

B-Spline yüzeyler, yüzeyi oluşturan eğrilere benzer özellik göstermektedir. Eğrinin u ve v gibi iki farklı ekseninde tensör birleştirilmesi ile oluşur. B-Spline yüzeyler aşağıda verilen (2.2.55) eşitliği ile temsil edilir.

$$S(u, v) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^p T(P_{i,j}) N_{i,d}(u) N_{j,e}(v) \quad (2.3.1)$$

### 2.4. Talaşlı İmalat

Talaş kaldırma yöntemleri, nihai parça geometrisini elde etmek için bir iş parçası üzerinden fazla malzemenin kaldırılması operasyonlarını içeren şekillendirme grubudur. Bu grubun en önemli dalı, istenen geometriyi elde etmek için malzemenin mekanik olarak kesilmesinde kesici takımların kullanıldığı geleneksel talaşlı imalattır. Üç temel geleneksel talaşlı imalat yöntemi vardır. Bunlar; tornalama, matkap ile delik delme ve frezelemedir. Diğer talaşlı imalat operasyonları testere ile kesme, planyalama, broşlamadır. Aşındırıcı yöntemlerde, sert ve aşındırıcı

parçacıkların mekanik olarak iş parçasına etki etmesiyle malzeme kaldırılır. Aşındırıcı talaş kaldırma yöntemleri; taşlama, honlama, lebleme ve parlatma yöntemlerinden oluşur. Geleneksel olmayan yöntemlerde ise malzeme kaldırmak için, kesici takım ve aşındırıcı parçacıklar yerine enerjinin çeşitli formları kullanılır. Bu formlar; mekanik, elektrokimyasal, termal ve kimyasal olabilir. Talaşlı imalat ile ilgili bilgiler groover' in "Fundamentals of Modern Manufacturing, Theory of Metal Machining" [23] isimli eserinden yararlanılarak iletilmiştir.

#### 2.4.1. Talaş Kaldırma Yöntemlerinin Sınıflandırılması

Talaş kaldırma yöntemleri Şekil 2.26'da verilmiştir.



**Şekil 2.26.** Talaş Kaldırma Yöntemleri

Talaşlı imalatı önemli kılan birkaç neden aşağıdaki gibi sıralanabilir;

\* İş parçası malzemesinin çeşitliliği: Talaşlı imalat yönteminde birçok farklı iş parçası malzemesi kullanılabilir. Genel olarak tüm katı metaller işlenebilir. Bunun yanında plastikler ve plastik esaslı kompozitler işlenebilir. Seramikler, yüksek sertliklerinden ve gevrekliklerinden dolayı problem oluşturabilirler. Ancak aşındırıcı talaş kaldırma yöntemleri ile başarılı bir şekilde işlenebilirler.

\* Parça şeklinin çeşitliliği: Talaşlı imalat ile düzlemler, dairesel delikler ve silindirik kesitler gibi düzgün şekilli parçalar rahatlıkla elde edilebilir. Bunun yanında kesici takım şeklindeki ve takım yolundaki çeşitliliklerle, vida dişi ve T-kanal gibi düzgün şekilli olmayan parça geometrileri oluşturulabilir. Ayrıca birden fazla işleme operasyonunun art arda uygulanmasıyla birçok çeşit ve zorluktaki şekiller elde edilebilir.

\* Boyutsal hassasiyet: Talaşlı imalat ile çok dar toleranslı ölçüler elde edilebilir. Bazı talaşlı imalat yöntemleri ile diğer imalat yöntemlerinden daha hassas olan  $\pm 0,001$  mm toleransındaki ölçüler elde edilebilir.

\* İyi yüzey kalitesi: Talaşlı imalat ile çok iyi yüzey kalitesi elde edilebilir. Talaşlı imalat yöntemleri ile yüzey pürüzlülüğünü 0,4 mikronun altına indirmek mümkündür. Bazı aşındırıcı talaş kaldırma yöntemleri ile daha iyi değerler elde etmek mümkündür.

Diğer yandan, talaşlı imalatı ve diğer talaş kaldırma yöntemlerinin olumsuz yönleri de vardır.

\* İş parçası malzemesinin israf edilmesi: Talaşlı imalat ile doğal olarak iş parçası malzemesi, oluşturulan talaşlar nedeniyle israf edilir. Bu talaşlar geri dönüştürülebilir olmasına rağmen her bir operasyon için israfa neden olurlar.

\* İşleme süresi: Talaşlı imalat operasyonları genellikle verilen parça şekli için, dövme ve döküm gibi alternatif yöntemlere göre daha fazla üretim süresi gerektirirler.

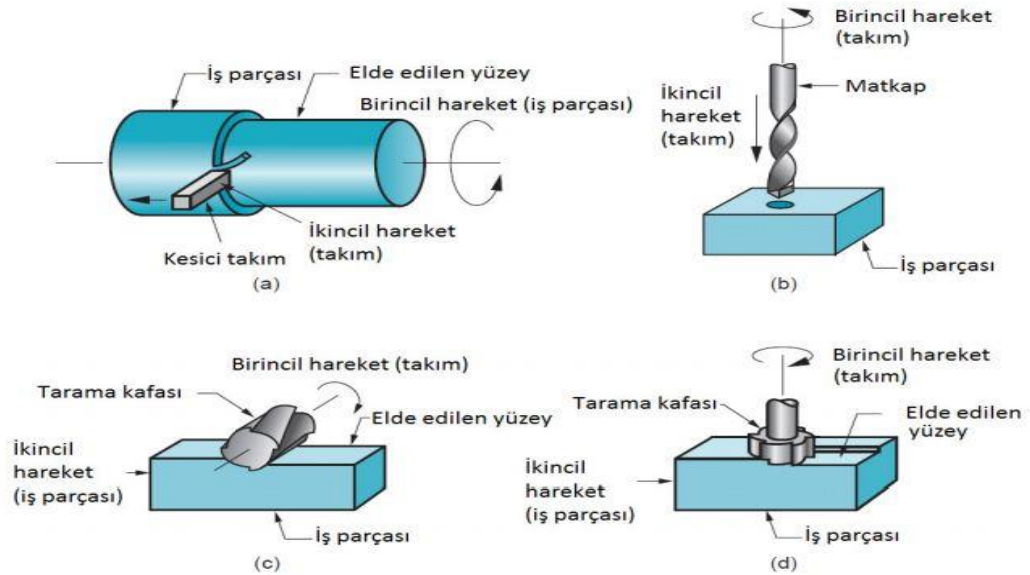
#### **2.4.2. Talaşlı İmalat Teknolojisi**

Talaşlı imalat birçok farklı operasyonlardan meydana gelir. Temel özelliği, kesici takım kullanarak iş parçası üzerinden talaş kaldırılmasıdır. Bu operasyonu gerçekleştirmek için takım ile iş parçası arasında izafi bir hareket oluşturmak gerekir. Bu izafi hareket birçok talaşlı imalat yönteminde kesme hızı olarak adlandırılan birincil hareket ve ilerleme olarak adlandırılan ikincil hareketle sağlanır. Bu iki hareketle ve kesici takımın şekliyle istenilen parça geometrisi oluşturulur. Tornalama, delik delme ve frezeleme üç genel talaşlı imalat yöntemidir (Şekil 2.27).

Tornalama yönteminde, silindirik şekil oluşturmak için ilerleyen kesici takımla dönmekte olan iş parçası üzerinden talaş kaldırılır. Tornalamada birincil hareket dönmekte olan iş parçası tarafından, ikincil hareket ise iş parçasının dönme eksenine paralel doğrultuda yavaşça hareket eden kesici takım tarafından sağlanır.

Matkap ile delik delme yöntemi yuvarlak kesitli bir delik oluşturmak için kullanılır. Bu operasyon genellikle iki kesme kenarlı dönmekte olan kesici takım ile sağlanır. Kesici takım, dönme eksenini doğrultusunda, iş parçasına doğru hareket ettirilerek dairesel kesitli bir delik oluşturulur.

Frezeleme yönteminde, birden çok kesici kenarı bulunan dönmekte olan takım, iş parçası üzerinde doğrusal hareket ettirilerek, düzlem oluşturur. İlerleme hareketinin doğrultusu kesici takımın dönme eksenine diktir. Birincil hareket olan kesme hızı dönmekte olan tarama kafası ile sağlanır.



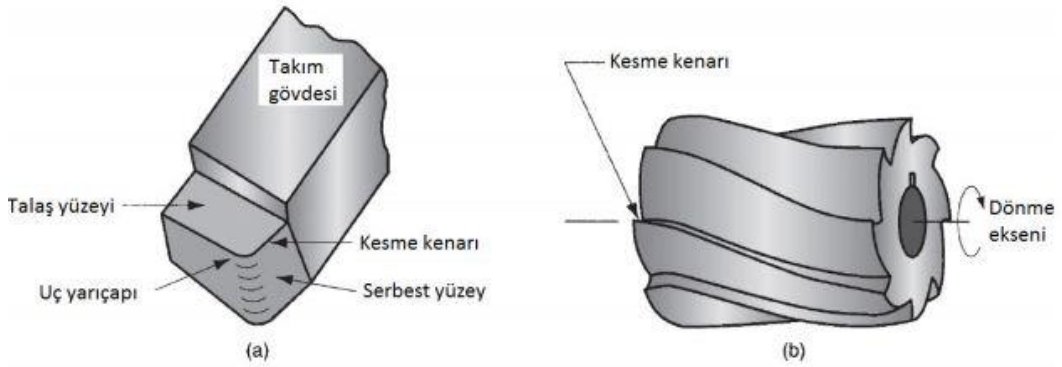
**Şekil 2.27.** Üç Temel Talaşlı İmalat Yöntemi: (a) Tornalama, (b) Matkap ile Delik Delme ve İki Farklı Frezeleme Yöntemi [23]

### 2.4.3. Kesici Takım

Kesici takım, iş parçası malzemesine göre daha sert olan bir malzemeden yapılır ve bir veya daha fazla kesici kenara sahip olabilir. Kesme kenarı, iş parçası üzerinden talaşın ayrılmasını sağlayan kısımdır. Kesme kenarı ile bağlantılı olan iki yüzey bulunur. Bunlar; talaş yüzeyi ve serbest yüzeydir. Kesme sonucu oluşan talaşın akışını sağlayan talaş yüzeyi, talaş açısı ( $\alpha$ ) adı verilen belirli bir açıyla konumlandırılır. Talaş açısı iş parçası yüzeyine dik olan düzlem referans alınarak

ölçülür. Talaş açısı negatif veya pozitif olabilir. Takımın serbest yüzeyi yeni oluşturulan iş parçası yüzeyi ile takım arasında bir boşluk sağlar. Böylece, yeni parça yüzeyi, yüzey kalitesini bozan abrazif aşınmaya karşı korunmuş olur. Serbest yüzey, serbest yüzey açısı adı verilen bir açıyla konumlandırılır.

Pratikte birçok kesici takım daha karmaşık geometrilere sahiptir. Temelde iki çeşit kesici tipi vardır. Bunlar; tek kesici kenarlı takımlar ve çok kesici kenarlı takımlardır (Şekil 2.28). Tek kesici kenarlı takım, bir kesme kenarına sahiptir ve tornalama gibi operasyonlarda kullanılır. Takım ucu genellikle, takım uç yarıçapı adı verilen bir yarıçapla yuvarlatılır. Çok kesici kenarlı takımlar delik delme ve frezeleme operasyonlarında kullanılır.



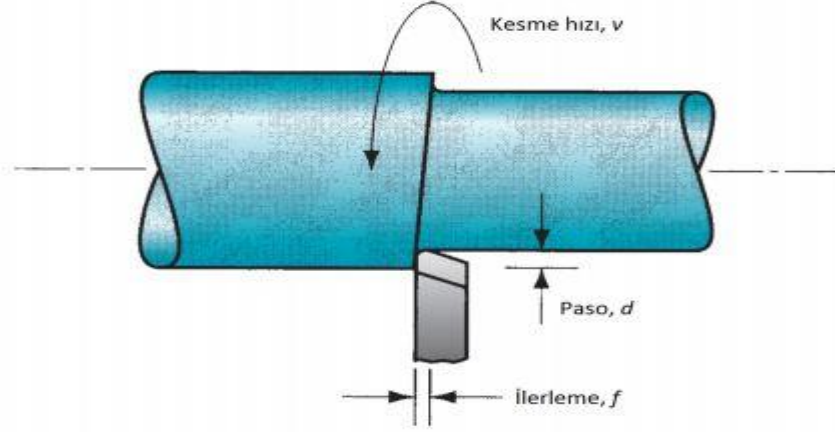
**Şekil 2.28.** (a) Tek Kesici Kenarlı Takım, (b) Çoklu Kesici Kenarlı Takım [23].

#### 2.4.4. Kesme Koşulları

Talaşlı imalat operasyonu gerçekleştirebilmek için, takım ile iş parçası arasında izafi bir hareket gereklidir. Birincil hareket belirli bir kesme hızı ( $v$ ) ile gerçekleştirilir. Bunun yanında takım iş parçası üzerinde hareket ettirilmelidir. Daha yavaş olan bu ikincil hareket ilerleme ( $f$ ) olarak adlandırılır. İş parçasının ilk yüzeyi ile kesme işlemi sonrası elde edilen yüzey arasında kalan mesafe paso ( $d$ ) olarak adlandırılır. Kesme hızı, ilerleme ve paso kesme koşulları olarak adlandırılır (Şekil 2.29). Bu değerler kullanılarak, birçok operasyon için (örneğin tornalama) talaş kaldırma oranı ( $Q$ ) hesaplanabilir.

$$Q = v.f.d \quad (2.4.1)$$

Talaş kaldırma oranının birimi  $mm^3/s$ , kesme hızının birimi m/s, ilerlemenin birimi mm ve paso'nun birimi mm 'dir. Tornalamada ilerleme mm/dev olarak ifade edilir.



**Şekil 2.29.** Tornalama Operasyonu İçin Kesme Hızı, İlerleme ve Paso [23]

Talaşlı imalat operasyonları genellikle iki kategoriye ayrılır. Bunlar; kaba işleme ve ince işlemedir.

Kaba pasolar ile elde edilmek istenen forma yakın şekli elde etmek için iş parçası üzerinden mümkün olduğunca fazla malzeme kaldırılır. Ancak bir miktar malzeme ince işleme için bırakılır. İstenilen ölçü toleranslarını ve yüzey kalitesini elde etmek için ince pasolar kullanılır. Kaba işleme operasyonları yüksek paso ve ilerlemelerle gerçekleştirilir. İnce işleme operasyonları ise düşük paso ve ilerlemeler kullanılarak gerçekleştirilir. Kesme hızları ise kaba işlemede ince işlemeye göre daha düşüktür. Talaşlı imalat operasyonlarında, kesici takımı soğutmak ve yağlama sağlamak için kesme sıvısı kullanılır. Kesme akışkanının kullanılıp kullanılmayacağı, eğer kullanılacaksa uygun kesme sıvısının seçilmesi kesme koşullarının durumuna bağlıdır.

## 2.5. Alüminyum ve Alaşımları

### 2.5.1. Alüminyum

Alüminyum tabiatta en çok bulunan elementlerden biridir ve mühendislik yapılarında çelikten sonra en çok kullanılan metaldir. Alüminyumun yoğunluğu ( $2,71 g/cm^3$ ) ,çeliğin yoğunluğunun ( $7,83 g/cm^3$ ) üçte biri kadardır. Bazı alüminyum

alaşımlarının akma sınırı değerleri 500 *MPa* değerini geçmektedir ki bu değer pek çok çelik türünün akma sınırı değerlerinin üzerindedir. Alüminyum alaşımları bu özelliklerinden dolayı, özellikle hafiflik istenen uygulamalarda sıklıkla kullanılmaktadırlar.

- Alüminyumun elektrik ve ısı iletkenliği, bakıra göre daha azdır. Fakat spesifik elektrik iletkenliği (elektrik iletkenliği/yoğunluk) ve spesifik ısı iletkenliği (ısı iletkenliği/yoğunluk) değerleri karşılaştırıldığında bakırdan daha iyi olduğu görülür. Bundan dolayı, hava elektrik hatlarında alüminyum alaşımları kullanılır.

- Ayrıca alüminyumun fiyatı da bakıra göre daha düşüktür.

- Korozyif ortamlarda alüminyumun yüzeyi bir oksit tabakası ile kaplanarak, alüminyumun korozyona dayanıklılığını sağlar. Bu özelliğinden dolayı alüminyum pek çok korozyif ortamda kullanılabilir. Alüminyum alaşımlarının içindeki diğer elementler alüminyum ile galvanik pil oluşturmaya uygun olduklarından dolayı, korozyon açısından alüminyumun mümkün olduğu kadar saf olarak kullanılması tavsiye edilir. Fakat mekanik özelliklerindeki dayanım düşüklüğü (zayıflık) nedeniyle uygulamalarda saf Al kullanımı yaygın değildir.

- Alüminyumun, sıcak ve soğuk şekillendirilebilme kabiliyeti iyidir. Ekstrüzyon yöntemiyle çok karışık geometrik yapıya sahip alüminyum profiller üretilebilir. Kalınlığı bir kaç mikrona ulaşılabilen folyolar üretilerek paketlemede işlemlerinde kullanılabilir. Gıda endüstrisinde kullanılan paketleme folyoları saf alüminyumdan yapılır.

- Alüminyum, elektrolitik olarak oksitlendirilerek değişik renklerde üretilebilir. Eloksal denilen bu işlem ile hem korozyona dayanıklı, hem de değişik renklerde mimaride kullanılan profiller üretilerek pencere, kapı vb. yapımında kullanılabilir. Bazı durumlarda sertliği ve dayanımı yüksek alüminyum alaşımlarının üstü saf alüminyum ile kaplanarak korozyon özellikleri iyileştirilebilmektedir [24].



## 2.5.2. Alüminyum ve Alaşımlarının Kullanım Alanları

Alüminyum alaşımlarının mekanik, fiziksel ve kimyasal özellikleri alaşım elementlerine ve mikro yapısına bağlı olarak değişir. Alüminyuma katılan en önemli alaşım elementleri bakır, mangan, silisyum, magnezyum ve çinkodur. Alüminyum alaşımları dövme ve döküm alaşımları olarak iki gruba ayrılır. Dövme alaşımlarının, plastik deformasyon kabiliyeti iyi olup kolayca şekillendirilebilirler. Alüminyum dövme ve döküm alaşımlarının büyük bir kısmına ısıtma işlemi uygulanabilmektedir. Amerikan alüminyum birliğine göre, alüminyum dövme alaşımları dört harfle sınıflandırılmaktadır. Bu sınıflandırma şu şekildedir:

- 1XXX: Saf alüminyumdur, genellikle elektrik ve kimya endüstrisinde kullanılmaktadır.
- 2XXX: Al-Cu alaşımlarıdır, esas alaşım elementi bakırdır. Başta magnezyum olmak üzere diğer alaşım elementleri de bulunabilir, yüksek mukavemet istenen havacılık sektöründe yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.
- 3XXX: Al-Mn alaşımlarıdır, esas alaşım elementi mangandır. Boru, sıvı tankları ve mimari uygulamalarda kullanılmaktadır.
- 4XXX: Al-Si alaşımlarıdır, esas alaşım elementi silisyumdur. Termal genişleme katsayısı düşük, aşınma direnci ve korozyon dayanımı yüksek alaşımlardır. Kaynaklı yapılarda, levha üretiminde, otomobil parçaları üretiminde kullanılmaktadır.
- 5XXX: Al-Mg alaşımlarıdır, esas alaşım elementi magnezyumdur. Magnezyum oranı arttıkça sertlik ve mukavemet artar fakat süneklik azalır. Denizel korozyona karşı direnci yüksek olduğundan, bu ortamda çalışacak yapıların imalatında kullanılmaktadır.
- 6XXX: Al-Mg-Si alaşımlarıdır, esas alaşım elementleri magnezyum ve silisyumdur. Şekillendirilme kabiliyeti yüksek olan bu alaşımlar özellikle ekstrüzyon ile üretilen parçaların imalatında sıklıkla kullanılır.
- 7XXX: Al-Zn alaşımlardır, bakır esas alaşım elementi olup, magnezyum, krom ve zirkonyum ilave alaşım elementleridir. 7XXX serisi, alüminyum alaşımlarının en

yüksek mukavemete sahip olanıdır. Uçak parçaları yapımı ve diğer yüksek dayanım istenen yerlerde kullanılır.

•8XXX: Al-Li alaşımlarıdır, esas alaşım elementi lityum olup, kalay eklentisi de yapılabilmektedir. Özellikle uçak ve uzay yapılarında kullanılmaya başlanan bu malzeme, iyi yorulma direnci ve iyi tokluk özelliklerine sahiptir. Fakat diğer Al alaşımları ile karşılaştırıldığında üretim maliyetleri yüksektir.

### **2.5.3. Alüminyum Alaşımlarında Isıl İşlem Uygulamaları**

Alüminyum alaşımlarına yapılan ısıl işlemler değişik şekillerde uygulanabilir ve uygulanan işlem TX sembolleri ile alaşım numarasının yanına yazılır. Bu işlemler şu şekilde ifade edilmektedir:

O: Tavlanmış, F: Üretildiği gibi, H: Sertleştirilmiş, T: Isıl işleme tabi tutulmuş

•T1: Sıcak şekillendirme işleminden sonra soğutulmuş ve tabii yaşlanmaya bırakılmış.

•T2: Sıcak şekillendirme işleminden sonra soğutulmuş, soğuk şekillendirilmiş ve tabii yaşlanmaya bırakılmış.

•T3: Çözeltiye alma işlemi yapılmış, soğuk şekillendirilmiş ve tabii yaşlanmaya bırakılmış.

•T4: Çözeltiye alma işlemi yapılmış ve tabii yaşlanmaya bırakılmış.

•T5: Sıcak şekillendirme işleminden sonra soğutulmuş ve suni yaşlandırma yapılmış.

•T6: Çözeltiye alma işlemi yapılmış ve suni yaşlandırma yapılmış.

•T7: Çözeltiye alma işlemi yapılmış ve aşırı yaşlandırma yapılmış.

•T8: Çözeltiye alma işlemi yapılmış, soğuk şekillendirilmiş ve suni yaşlandırma yapılmış.

•T9: Çözeltiye alma işlemi yapılmış, suni yaşlandırma yapılmış ve soğuk şekillendirilmiş.

•T10: Sıcak şekillendirme işleminden sonra soğutulmuş, soğuk şekillendirilmiş ve suni yaşlandırma yapılmış.

Bu çalışmada serbest şekilli yüzeylerin üretimi için yapılan literatür araştırmasında da tespit edildiği üzere Al 7075 serisi kullanılmıştır.

## **2.6. Kesici Takımlar ve Alaşımları**

Kesici takımlar, bir takım tezgâhına tespit edilerek endüstriyel bir ürüne şekil veren aletlerdir. Bu şekil verme işlemi genellikle malzemedeki talaş kaldırılarak meydana gelmektedir. Değişik makine ve makine parçalarının imalatını sağlamak için kullanılan kesici takımın, talaş kaldırma esnasında oluşan yüksek zorlamaları karşılaması zorunludur. Günümüz sanayisindeki rekabet ortamı, gelişen teknoloji nedeniyle meydana gelen talaş kaldırma yöntemlerinin çeşitliliği ve farklılıkları sonucunda metalik ve metalik olmayan çok sayıda kesici takım malzemesinin geliştirilmesini sağlamıştır. Halen dünyanın çeşitli yerlerinde farklı çevre şartlarında talaş kaldırma işlemleriyle değişik makinelerin üretimi sağlanmaktadır. Birçok uygulama için birden fazla takım malzemesi uygun olabilir. Sonuç olarak takım seçimi malzemenin kolay temin edilebilirliği ve ekonomikliğine bağlıdır.

Ticari olarak bugün mevcut takım malzemelerinin değişik uygulamalarındaki performansları; takım ömrüne, talaş kaldırma miktarına, yüzey hassasiyetine ve takım maliyetine bağlı olarak değişmektedir.

Yaygın olarak kullanılan kesici takım malzemeleri aşağıdakilerdir;

Karbon çelikleri ve takım çelikleri, yüksek hız çelikleri, sert maden uçlu kesiciler, seramikler, sermetler, siyalonlar, coroniteler, elmaslar, CBN ve PCBN'dir.

Talaş kaldırma işlemlerinde, ya tornalama ve delme işleminde olduğu gibi tek noktalı takımlarla sürekli kesme işlemi, ya da frezeleme işleminde olduğu gibi çok uçlu takımlarla sürekli olmayan kesme işlemi yapılır. Sürekli kesme işleminde kesici uçta yüksek sıcaklıklar oluşurken süreksiz kesme işleminde ise kesici uçlar darbeli yüklere maruz kaldığından daha büyük kuvvet ve sıcaklık değişimleri meydana gelir.

Bu olumsuzlukları en aza indirmek için istenilen yüzey kalitesine ve malzemenin içyapısına göre uygun devir ve kesme hızları verilmelidir [25].

Takımın, sürekli dönme çevriminden de oluşan ısıtma ve soğutma etkisini yenmesi için yeterli darbe direncine sahip olması gerekir. Kesici takımın bu darbe direnci düşükse takım ucu hızlı bir şekilde aşınır. Tüm bu olaylar ekonomikle beraber dikkate alınırsa kesici takımda aranan özellikler şöyle sıralanabilir:

- Aşınmaya ve şekil değiştirmeye dayanıklı olması için yüksek sertlik,
- Kırılmaya ve özellikle darbelere karşı yüksek tokluk,
- Oksidasyona dayanıklı olması için yüksek kimyasal kararlılık,
- Yüksek kızıl sertlik ve termik darbelere karşı yüksek mukavemet.

### **2.6.1. Karbon Çelikleri ve Takım Çelikleri**

Endüstri devriminin başlangıcından beri talaş kaldırma işlemlerinde sadece karbonlu çelikler kullanılmaktaydı. Bu yaklaşık % 0,8-2 karbon içeren demir alaşımından oluşmakta ve çelik yapmayı kolaylaştırmak için manganez, silis, sülfür ve fosfor gibi diğer alaşım elementleri katılmaktaydı. Karbonlu takım çeliği 835 C° ile 850 C° arasında kızıl sıcaklıkta sertleştirilir ve bunu oda sıcaklığına kadar çok hızlı suda soğutma takip etmekteydi. Bu ani soğuma neticesinde sertleştirme esnasında malzemenin iç ve dış kısımlarında çatlama eğilimi meydana gelebilmektedir. Diğer alaşımli çeliklere göre aşınmaya karşı dayanımları daha düşüktür. Alaşımli takım çeliklerinde; karbonlu takım çeliklerinin kesme özelliklerini iyileştirmek amacıyla alaşım elementleri ilave edilerek mukavemet özellikleri ve kritik soğuma hızları değiştirilebilir. Alaşım elementleri olarak; az miktarda tungsten (W), krom (Cr), vanadyum(V), kobalt (Co), nikel (Ni), molibden (Mo) ve manganez (Mn) katılır.

### **2.6.2. Yüksek Hız Takım Çelikleri (HSS)**

20. yüzyılın başından beri bilinen ve sürekli geliştirilen kesici takım grubu olup diğer takım malzemelerine nazaran düşük maliyeti ve işlenebilme özelliği nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır. Yüksek hız çelikleri, yerini birçok uygulamada toz

metalürjisi tekniği ile üretilen, daha yüksek hızlarda kesme işlemi yapabilen ve aşınma dirençleri daha yüksek olan sert metallere bırakmıştır. Fakat yüksek hız çelikleri tokluk değerlerinin yüksek olması sebebiyle bazı talaşlı imalat yöntemlerinde önemini yitirmemiştir. Yüksek hız çelikleri, genelde helisel matkap, azdırma çakıları, kılavuzlar, parmak freze gibi kesici takım malzemelerinde kullanılırlar. Hız çelikleri, yüksek alaşımlı asal çeliklerdir. 600C° sıcaklığa kadar sertliklerini muhafaza ederler. Yüksek kesme hızlarında (30/50 m/dak) talaşlı imalatta kullanılan kesici takımlardır. Yüksek hız takım çelikleri T ve M olmak üzere iki gruptan oluşmaktadır. Bunlar ilk alaşım olan Tungsten ve Molibden yüzdesine göre belirlenir. T serisi %12-20 tungsten ve diğer alaşım elementi olarak Vanadyum ve Kromla birlikte kobaltdan oluşurken M serisi yaklaşık %3,5-10Molibden ile diğer alaşım elementleri olarak Kobalt, Krom ve vanadyum içerir. Genel olarak, M serisi, T serisinden daha yüksek abrasyon aşınma direncine sahip olmakla birlikte daha ucuz ve ısıl işlemde daha az bozulma göstermektedir.

Yüksek hız çeliklerinin genel özellikleri;

M ve T türüne bakılmaksızın yüksek hız takım çelikleri kendi aralarında fiziksel olarak birçok benzerliklere sahiptirler. Bunlar şöyle sıralanabilirler.

- Hepsi yüksek alaşım içeriğine sahiptirler.
- Genellikle 64 HRC sertliğine müsaade etmesi için yeterli oranda C içermektedir.
- Merkezden yüzeye üniform sertliğe sahiptir.
- Hepsi yüksek sıcaklıklarda sertleştirilebilir

### **2.6.3. Sert Maden Uçlu Kesiciler (Sinterlenmiş Karbürler)**

Sert maden uçlar, sıcaklığa dayanıklı takım malzemesi olup sert karbür parçacıkları ve sünek metallere birleşmesiyle üretilir. Bu malzemeler, ilk olarak 1920'li yıllarda Almanya'da elmas kullanımının pahalı olmasından dolayı ve yeterli aşınma dirençli kalıp malzemesi üretmek amacıyla geliştirilmiştir. Önce tungsten karbür (WC) ile kobalt bağlayıcı kullanılarak üretilmiştir. Fakat birçok hatalara sahip kaba bir yapı gözlenerek kesici takım ve kalıp malzemesi olarak tatmin edici bulunmamıştır. 1923

yılında Fransa’da toz metalürjisi tekniği ile ince tungsten karbür tozlarla az miktarda demir, nikel veya kobalt tozları karıştırılarak preslenmiştir. Sonra yaklaşık 1300C° de sinterlenmiştir. O zamandan beri esaslı WC+Co esaslı karbürü malzemeler, farklı malzemeler ve kesme operasyonları için değişik tipleri olan karbürler geliştirilmiştir. Karbür, üretiminin yaklaşık %50 talaş kaldırma işlemlerinde kullanılmaktadır. Bu malzemeler “ sinterlenmiş karbür “ olarak da adlandırılır. Bunlar iyi aşınma direnci gösterdiklerinden 40 m/dak’ dan 350 m/dak kesme hızına kadar sertliğini ve kesiciliğini kaybetmeden etkili şekilde kullanılabilir.

### **2.6.3.1. Sinterlenmiş Karbür**

Tungsten karbür veya sert metal olarak da adlandırılan sinterlenmiş karbürler 1930’lardageliştirilmiştir. Bu malzeme, bir bağlayıcı metal içerisinde %90 sert karbür parçacıklı bir toz metalürjisi ürünüdür. Günümüzde sinterlenmiş karbürlerin iki çeşidi yaygın olarak kullanılmaktadır. Bunlar:

Tungsten karbür + kobalt alaşımılı düz karbür uçlar (WC+Co), Tungsten karbür + kobalt + titanyum karbür + tantalum karbürü uçlardır(WC+Co+TiC+TaC).

Sinterlenmiş karbürlerin sınıflandırılması;

Sinterlenmiş karbürler için dünyaca kabul edilen bir sistem yoktur. Bileşimlerine, mikro yapılarına, fiziksel özelliklerine göre değil, kullanıcı ve üretici tarafından yapılan uygulama kod sistemine göre sınıflandırılır. Avrupa ve Japonya’da kabul edilmiş ISO sınıflandırma sistemine göre malzemeler üç gruba ayrılır. Bunlar, P, M, K harfleri ve bu harflerin sonuna gelen rakamlardır.

- P serisi (mavi) : Yüksek alaşımılı, tungsten karbürü takım olup uzun talaş çıkaran malzemelerin işlenmesinde kullanılır.

- M serisi (sarı) : Alaşımılı tungsten karbürü takım olup titanyum oranı P serisinden azdır. Çelikler ve dökme demirlerin işlenmesinde kullanılır.

- K serisi (kırmızı): Düz tungsten karbür kobalt alaşımılı takım olup, dökme demir, demir olmayan metallere ve metal olmayan malzemelerin işlenmesinde kullanılır

Kaplamalı sinterlenmiş karbürlerde kaplama; kesme kuvvetini, oluşan ısıyı ve aşınmayı büyük oranda azaltarak geçici bir yağlayıcı görevi yapmaktadır. Bu, özellikle daha kaliteli yüzey elde edilmek istenildiğinde daha yüksek hızların kullanılmasına imkân sağlar.

Kesici takım malzemelerindeki en önemli gelişme, takımların yüzeylerinin birkaç mikron kalınlığındaki tabaka ile kaplanmasıdır. Kesici takımların yüzey kaplamalarında yaygın olarak dört farklı kaplama malzemesi kullanılmaktadır. En belli başlı kaplama malzemeleri titanyum karbür (TiC), titanyum nitrür (TiN), titanyum karbonitrür (TiCN), alüminyumoksit ( $Al_2O_3$ )'tir. Titanyum nitrür kaplamalar aşınma etkisini azaltmaktadır. Oksidasyona karşı direncin gerekli olduğu uygulamalarda titanyum alüminyum nitrür (TiAlN), sert malzemelerin işlenmesinde titanyum karbür nitrür (TiCN) kaplamalar en iyi özelliklere sahiptirler. Korozyona karşı direncin gerekli olduğu uygulamalarda ise daha kalın seramik kaplamalar kullanılmaktadır. Kaplamalı takımlarla yapılan işlemlerde, yüksek hızda aşınma direncinin yükselttiği ve takım ömrünün 2-3 kat arttırdığı görülmektedir. Birçok kullanıcının takım ömrünü azaltmadan kesme hızını %25-50 arttırarak ekonomik açıdan büyük avantaj sağladığı görülmektedir.

#### **2.6.4. Seramik Kesiciler**

Seramik malzemeler yüksek sıcaklıklara karşı dayanıklı olan inorganik, metal olmayan malzemelerdir. Seramik kesicilerin dar olan kullanım alanları katkılı seramiklerin, seramik matrisli kompozitlerin ortaya çıkarılmasıyla artmaya başlamıştır. Karbür esaslı kesici uçlar  $800C^o$  sıcaklıklara kadar yüksek performans göstermektedir. Fakat daha fazla sıcaklık yükselmelerinde sertlik düşmektedir. Yüksek sıcaklıklara karşı dayanma direnci dikkate alındığında seramikler, çok daha iyi performans göstermektedirler. Çünkü bu kesiciler sertliklerini yaklaşık  $1200C^o$ 'ye kadar koruyabilmektedirler. Fakat bununla birlikte seramik kesiciler, diğer kesicilere oranla daha sert ve dolayısıyla da daha kırılğan bir yapıya sahip olduğundan bu kesiciler, sürekli talaş kaldırma işlemlerinin olduğu yerlerde, sert metallerin son bitirme pasolarında tercih edilmektedir.

Seramik takımlar sert, yüksek kızıl sertliğine sahip, iş parçası malzemesi ile reaksiyona girmeyen takımlardır. Uzun bir takım ömrüne sahiptirler ve yüksek kesme hızlarında talaş kaldırabilirler. Metalik olmayan seramiklerin özelliklerinde çeliklere göre bazı temel farklılıklar mevcuttur:

- Yoğunlukları çeliğin üçte biridir,
- Çok yüksek basma mukavemetine sahiptirler,
- Çeliklerde söz konusu olan plastik uzama seramiklerde söz konusu değildir,
- Çok daha kırılğındırlar,
- Saf seramiğin elastikiyet modülü çeliğin yaklaşık iki katıdır,
- Çeliğin ısıl iletim katsayısının yüksek olmasına karşın seramikler çok düşük ısıl iletim katsayısına sahiptirler.

Seramikler, yüksek sıcaklıklarda iyi oksidasyon direnci, takım aşınma miktarını azalttığı ve iyi sıcak sertlik performansları nedeniyle istenilen takım malzemeleridir. Bu özellikler işlenmesi zor olan malzemelerin 300 m/dak. Kesme hızından daha büyük hızlarda kullanılmasını mümkün kılmaktadır. Örneğin, araba frenleri ve kavramalar 600 m/dak kesme hızıyla başarılı bir şekilde işlenmektedir. Bunun dışında bu takımlarla alüminyum alaşımları 910 m/dak magnezyum alaşımları 3000 m/dak da kullanılmaktadır. Seramik kesicilerin esasını alüminyum oksit ( $Al_2O_3$ ) oluşturmaktadır. Bunun yanında magnezyum oksit (MgO), Yitrum oksit ( $Y_2O_3$ ), zirkonyum oksit (ZrO), Krom oksit (CrO), vb. malzemeler farklı özellikteki seramiklerin elde edilmesinde kullanılmaktadır. Bugün gelinen nokta itibariyle çeşitli seramik kesici türleri geliştirilmiştir. Seramik kesicileri temel olarak üç sınıfta incelemek mümkündür.

-  $Al_2O_3$  içeren seramikler,

a) Saf oksit esaslı,

b) Katkılı alüminyum oksit esaslı,



c) Alüminyum oksit esaslı takviyeli,

- Silisyum nitrür ( $Si_3 N_4$ ) içeren seramikler,

- Kaplamalı seramikler.

Seramik kesici takımlar, öncelikle tornalama ve delik delme işlemlerinde tercih edilmekte olup bu seramiklerin farklı uygulama alanları aşağıda gösterilmektedir. Yüksek sıcak sertliği ve kimyasal kararlılığı nedeniyle seramikler işlenmesi güç olan malzemelerin 300 m/dak ve daha büyük kesme hızlarında bitirme işlemlerinde kullanılmaktadır. Yüksek talaş kaldırma miktarı da rijit tezgâhlarla ve sürekli kesmeyle mümkündür. Seramik kesici takımların ilk akla gelen uygulama alanları şunlardır:

- Çelikler ve dökme demirler,

- 66 HRC' ye kadar çelikler,

- Nikel esaslı süper alaşımlar.

### **2.6.5. Sermet Kesici Takımlar**

Sermet, sert partikül olarak tungsten karbür yerine titanyum karbür (TiC), titanyum karbonitrür (TiCN) ve/veya titanyum nitrür (TiN) gibi titanyum esaslı karbürlerin kullanıldığı sinterlenmiş karbürlerin genel adıdır. Sermet ismi seramik ve metal den gelmektedir. Bunun nedeni metal bağlayıcı içerisindeki seramik parçacıklardır. Bir toz metalürjisi ürünü olan Sermetlerin sinterlenmiş karbür ve tüm sert metallerin Sermet olduğu tartışılabilir ancak pratikte Sermet tungsten değil titanyum karbürü dayalı sinterlenmiş karbürleri içeren bir malzeme grubudur. Sermet kesici takımların en genel özellikleri:

- Yüksek (ve belirli bir dereceye kadar düşük) kesme hızı yeteneği,

- Uzun takım ömrü boyunca sağladığı yüksek hassasiyet,

- Yüksek kaliteli bir yüzey oluşturmalarıdır.

Sermetler, kesme hızı bakımından kaplamalı karbürü takımlardan daha iyi performans göstermekte ve kesme hızında yaklaşık üst sınır olarak %100 artış sağlayarak 340 m/dak' ya kadar ulaşabilirken karbürü takımlar ise yaklaşık 160 m/dak civarında kalmaktadır. Kaplamalı takımlarda ise bu değer yaklaşık 240 m/dak'a yaklaşmaktadır. Seramiklerle karşılaştırıldığında ise karbürü takımlarda ilerleme miktarı aralığının 0.08 mm/dev ile 0.30 mm/dev iken bu değer seramiklerde daha dar aralıklarda olup 0.12 mm/dev ile 0.24 mm/dev arasında değiştirdiği görülebilir. Bu nedenle, bu takımlar, kaplamalı takımlar ve seramikler arasında dengeyi sağlamaktadır. Sermet kesici takımların değişken sıcaklıklar sonucu ortaya çıkan ısıl çatlaklara karşı duyarlı kılan sınırlı ısıl iletkenlikleri vardır. Soğutma sıvısının kullanılmadığı işlemlerde başarıyla kullanılırlar. Soğutma sıvısı kullanılacaksa sıcaklık değişimlerinin önüne geçilmesi için, soğutma sıvısının doğru ve yeterli miktarlarda kullanıldığı işlemlerde kullanılmalıdır.

#### **2.6.6. Siyalonlar**

Siyalonlar, silisyum alüminyum oksinitrür (Si-Al-O-N) bileşiminden oluşan silisyum nitrür esaslı kesici takım malzemeleridir. Bunların üretiminde yaklaşık %88 alüminyum nitrür (AlN)ve %13 alümina ( $Al_2O_3$ ) ile birlikte %10 Yitrum oksit ( $Y_2O_3$ ) tozları karıştırılarak kurutulmaktadır. İstenilen şekil ve boyutta yaklaşık  $1800C^o$  de 1 saat süreyle sinterlenerek preslenir. Seramik kesici takımlar yüksek sıcaklıklara dayanma yeteneği nedeniyle sinterlenmiş karbürlerden çok daha yüksek hızlarda kullanılabilir. İyi bir bitirme yüzeyi gerektiğinde alüminyum oksit esaslı seramikler sıkça kullanılmaktadırlar. Ancak, kaba talaş kaldırma işlemlerinde özellikle aralıklı kesme işlemlerinde veya yarı bitirme işlemleri için siyalon kesicilerin seçilmesi gereklidir. Yüksek aşınma miktarlarına rağmen siyalon takımlar kopmaya karşı güvenilir ve ani uç kırılması oluşturmaz. Bu nedenle takım ömrü oldukça uzun sürmektedir.

#### **2.6.7. Coronite**

Coronite yüksek hız çeliğinin tokluğu ile sinterlenmiş karbürün aşınma direncini bir araya getiren yeni bir kesici takım malzemesidir. Coronite parmak frezelerin bu alandaki benzerlerinden daha hızlı talaş kaldırmalarını, daha uzun ve güvenilir bir

takım ömrüne sahip olmalarını, daha iyi bir yüzey kalitesi elde etmelerini sağlar. Bu takım malzemesi daha çok çelik işleme için geliştirilmiş bir malzeme olmasına karşın titanyum ve çeşitli hafif alaşımların işlenmesinde de iyi sonuçlar verir.

#### **2.6.8. Elmas Takımlar**

Elmas uçlu takımlar, çok yakın toleranslı ve yüksek hassasiyet gereken metal olmayan ve demirsiz malzemeleri işlemek için kullanılırlar. Bunlar gevrek olduğundan şoka ve kesme basıncına karşı karbürlü kesiciler kadar dirençli olmadığından esas olarak bu malzemeler son bitirme yüzeylerinin işlenmesinde kullanılan takımlardır. Elmas kesici takımlar genellikle demir içermeyen metalik malzemeler ve metal olmayan malzemelerin işlenmesinde kullanılmaktadırlar.

Elmas kesici takımlarla daha verimli işlem yapabilmek ve takım ömrünün uzun olması için aşağıdaki kurallar dikkate alınmalıdır.

- Elmas kesicilerde uç açısı maksimum olacak şekilde yaklaşık  $90^{\circ}$  tasarlanmalıdır,
- Bu kesicilerle ayar yapılırken her zaman dikkatli olmalı,
- Takım, iş parçası ekseninde ayarlanarak kullanılmalı,
- İş parçası karbürlü takımla kaba işlenmeli ve ince işleme için elmaslar kullanılmalı,
- Takım iş parçasına dalma işlemi her zaman iş parçası dönerken başlamalı ve kesme işlemi yapılırken asla tezgâh durdurulmamalı, tezgâh titreşimden uzak olmalı ve kesici uçlar her zaman ayrı kutularda kauçuk koruyucular arasında muhafaza edilmelidir.

Elmas uçlu takımlarla genellikle çok az ilerleme ve yüksek kesme hızlarında çok az talaş derinliğinde çok verimli şekilde kesme işlemi yapılır. Bunlar takım/talaş ara yüzeyinde oluşan sıcaklık  $860C^{\circ}$ 'yi aşan malzemelerde tavsiye edilir. Her çeşit malzeme ve tezgâh için ideal kesme hızları mevcut bulunmaktadır. Elmas takımlar için minimum kesme hızı 86-90 m/dak olmalıdır. Her iş için tezgâh şartları maksimum kesme hızını belirler. Bazı uygulamalarda 3000m/dak' ya kadar kesme hızlarına ulaşabilmektedir. Elmas kesici takımların, uygun şartlar ve takım

tezgâhının rijitliği gibi takım performansına etki eden faktörlerin iyi derecede olması göz önünde bulundurulduğundaki avantajları şöyle sıralanabilir:

- Yüksek kesme hızlarında kesme yapabilmesi ve diğer takımlara göre üretimin 10-15 kat arttırılabilmesi,
- 0,128 µm ve daha az yüzey hassasiyeti kolaylıkla elde edilebilmesi, çoğu zaman iş parçası üzerinde gerekli diğer yüzey bitirme işlemlerini gerektirmemesi,
- Çok sert ve abrasyona dirençli olduğundan, abrasive malzemelerin işlenmesinde daha uzun takım ömrü elde edilmesi,
- 0.012 mm'ye kadar düşük talaş derinliğinde hem iç hem de dış yüzey tornalama işlemi yapabilmesi,
- Daha yakın toleranslı parçalar üretebilmesi ve kesici uç üzerinde metalik parçaların kaynak olması veya yapışmasının önlenmesidir.

#### **2.6.9. Kübik Bor Nitrür (CBN)**

Kübik bor nitrür, elmadan sonra gelen ikinci en sert kesici takım malzemesidir. Çok yüksek sertlik, çok yüksek kızıl sertlik ( $2000C^{\circ}$ ), mükemmel aşınma direnci ve işleme esnasında genellikle iyi kimyasal kararlılık gibi özellikleri sayesinde mükemmel bir kesici takım malzemesidir. CBN kesici takımlar çok yüksek basınç ve sıcaklıklar altında özel seramik bağlayıcı malzemelerin karışımının sinterlenerek yapıldığı kesici takım malzemeleridir. Dövme çelik, sertleştirilmiş çelik, dökme demir, yüzeyi sertleştirilmiş iş parçaları ve ısı dirençli alaşımlar CBN takımların yaygın olarak kullanıldığı malzemelerdir.

#### **2.6.10. Çok Kristalli Kübik Bor Nitrür (PCBN)**

Çok kristalli kübik bor nitrür uçlar ile daha yüksek kesme hızlarında, daha fazla talaş derinliğinde kesme yapılabilen ve sertliği 35 HRC den daha yüksek sertlik derecesindeki malzemeler işlenebilmektedir. Çok kristalli kübik bor nitrürlerin temel özellikleri aşağıdaki gibi özetlenebilmektedir:

- Yüksek sertlik,
- Yüksek abrasyon direnci,
- Yüksek basma dayanımı,
- Yüksek termal iletkenlik

Bu takımlar düz tornalama, alın tornalama, delik büyütme, profil tornalama ve frezeleme işlemlerinde de başarılı olarak kullanılmaktadır. Bu takımlar aşağıdaki malzeme gruplarının işlenmesinde kullanılmaktadır.

- Sertliği 45 – 65 HRC olan malzemeler, AISI 4340, 8620, M2 ve T15 gibi sertleştirilmiş çelikler ve nikel esaslı sert malzemeler
- Brinell sertliği 180 – 240 olan dökme demirler, abrasiv demirli metaller ve nikel dirençli malzemeler,
- Sertleştirilmiş parçaların bitirme işlemlerinde, tipik olarak takım çelikleri veya talaş derinliği 0,5 mm' den az ve 0,2 mm' lik yüzeyi sertleştirilmiş parçalar,
- Jet motoru parçaları gibi uzay endüstrisinde kullanılan yüksek nikel alaşımlı süper alaşımlar.

Kaba dereceli PCBN takımla yapılan kesme işleminde başlıca uygulanan malzemeler ve işleme parametrelerini şöyle özetlenebilir.

- Sert nikel alaşımları,
- HSS takımları,
- Soğuk iş takım çelikleri,
- Cr-Ni'li çeliklerdir.

### **3. MATERYAL VE METOD**

Bu çalışmada, dik işleme merkezli CNC freze tezgâhı kullanılarak, Al 7075 malzemesinde serbest şekilli yüzeyin imalatında farklı kesici takımların yüzey form hatalarına etkileri araştırılmıştır. Serbest şekilli yüzeyin imalatı kaba, ara kaba ve finish işleme olmak üzere üç aşamada gerçekleştirilmiştir.

Form hataları, CAD ortamında tasarlanmış yüzeyin, imalatı gerçekleştirilen numunelerin 3B tarayıcı kullanılarak elde edilen mesh model ile karşılaştırılması ile belirlenmiştir. Bunun yanında işleme anında meydana gelen kesme ve ilerleme kuvvetlerindeki değişimler dinamometre, meydana gelen sıcaklık değişimleri ise termal kamera ile ölçülmüştür.

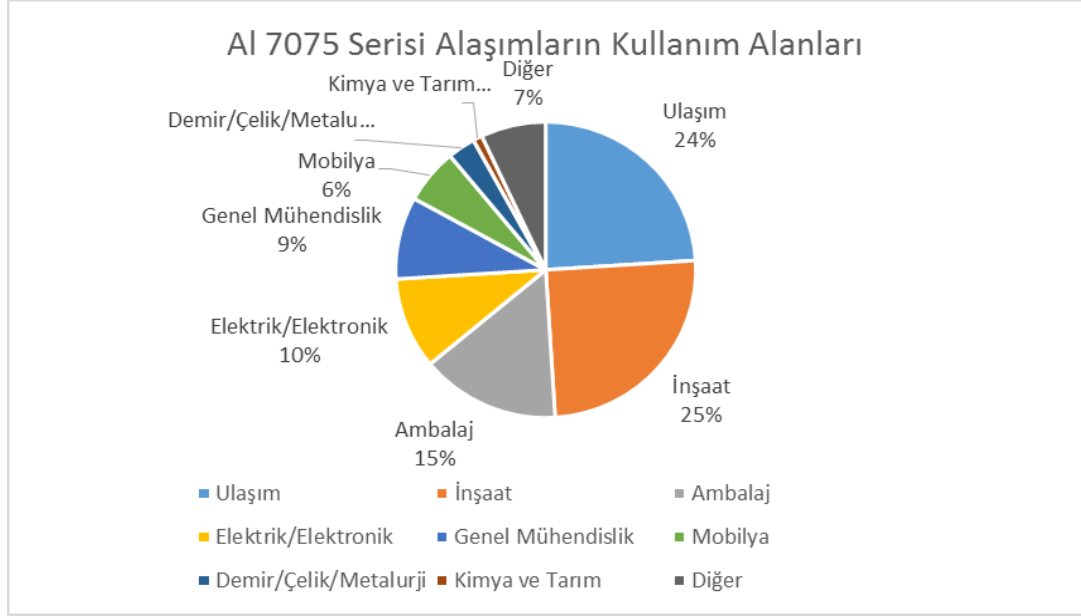
Deneylerde kullanılan Al 7075 plaka Konya sanayi bölgesinden, kullanılan parmak freze çakıları ise sanayide en çok talep gören markalardan seçilerek Malatya sanayinden temin edilmiştir. Toplamda 7 deney yapıldı ve bu deneyler kararlılığın sağlanması için 2 defa tekrarlanmıştır.

#### **3.1. Deney Malzemesi**

Demir dışı alaşımlar otomotiv, uçak, uzay, silah, elektrik-elektronik, ısıtma-soğutma vb. sanayinin birçok alanında kullanılmaktadırlar. Alüminyum ve alaşımları günümüzde birçok endüstri alanında kullanım olanağı fazla bir elementtir. Hafif metal alaşımları olmaları nedeniyle ısı işlemler sonucu mekanik özellikleri iyileştirilebilir. Fakat alüminyumun talaşlı olarak işlenebilmesi güçlüğü geçmişte alüminyumun kullanım alanını daraltmıştır. Son zamanlarda bu konu üzerinde yapılan araştırmalarda değişik teknikler geliştirilerek alüminyumun talaşlı olarak işlenebilmesine olumlu yönde büyük katkılar sağlanmıştır [26].

Bu nedenle deney malzemesi olarak ulaşım, medikal ve elektronik sanayisine kadar birçok endüstriyel alanda yaygın olarak kullanılan Al 7075 alaşımı seçilmiştir. Al 7075 malzemesinin yaygın kullanım alanları (Şekil 3.1)'de verilmiştir. Bu malzeme kolay işlenebilir olmasının yanı sıra, düşük yoğunluğa, yüksek korozyon direncine, mukavemete, elektrik ve ısı iletkenliğine sahiptir. Serbest şekil yüzey imalatında Al

7075 malzemenin seçilmesinin nedeni, literatür de yeterince çalışma yapılmaması ve medikal alanından yoğun olarak kullanılmasıdır.



**Şekil 3.1.** Al 7075 Serisi Alüminyumların Kullanım Alanları

Al 7075 malzemenin kimyasal bileşimi Tablo 3.1 'de verilmiştir. Al 7075 malzemesine ait mekanik özellikleri ise Tablo 3.2'de verilmiştir.

**Tablo 3.1.** Al 7075 Kalite Alüminyumun Kimyasal Bileşimi (% Ağırlık)

<b>Si</b>	<b>Fe</b>	<b>Cu</b>	<b>Mn</b>	<b>Mg</b>	<b>Cr</b>	<b>Zn</b>	<b>Ti</b>
0,0567	0,2763	1,4024	0,0108	Şub.38	0,2009	6,0294	0,0778
<b>B</b>	<b>Na</b>	<b>Ca</b>	<b>Ni</b>	<b>Pb</b>	<b>I</b>	<b>Sn</b>	<b>Co</b>
0,0007	0,0018	0,0052	0,0027	0,0015	0,0002	0,00023	0,00035
<b>V</b>	<b>Sb</b>	<b>Sr</b>	<b>Be</b>	<b>Hg</b>	<b>Zr</b>	<b>Bi</b>	<b>Al</b>
0,0013	0,0007	0,00001	0,00072	0,00056	0,00078	0,0002	89,5

Alüminyum alaşımlarından 7xxx serisi, genellikle düşük yoğunluk, yüksek dayanım, süneklik, tokluk ve yorulmaya karşı direncinden dolayı yapısal uygulamalarda, uzay ve havacılık sanayinde yaygın olarak kullanılan malzemedir. Alüminyumun sertlik, çekme ve akma mukavemetlerini artırmak amacıyla Cu, Zn, Mg gibi elementlerle yaptığı alaşımlar diğer özelliklerinden ziyade mukavemetinin ön plana çıktığı taşıyıcı profiller ve konstrüksiyonlarda kullanılır.

**Tablo 3.2.** Al 7075 Alaşımının Mekanik Özellikleri

Isıl İşlem (Temper)	Çekme Dayanımı, Rm Mpa	Akma Dayanımı, Rp Mpa	Uzama Dayanımı %	Kesme Modülü MPa	Elastisite GPa
T651	572	503	11	331	72
T7351	503	434	13	303	72
T7651	503	434	13	303	72

### 3.2. Serbest Şekli Yüzeyin Oluşturulması ve İmalatı

Deneyde kullanılan serbest şekilli yüzey B-spline eğriden yararlanılarak oluşturulmuştur. B-Spline eğrinin oluşturulmasında kullanılan kontrol noktaları ve knotlar, yüzeyin şekillendirilmesindeki kolaylığı göstermek amacıyla rastgele seçilmiştir (Tablo 3.3). Daha sonra MATLAB R2012a programında B-Spline baz fonksiyonlarını hesaplayan bir program yazılmıştır.

**Tablo 3.3.** B-Spline Eğriye Ait Knot, Kontrol Noktaları ve Derece Değerleri

Knot	Değer	Kontrol Noktaları	Derece
t0	7	b0(10,1)	2
t1	9	b0(20,10)	
t2	11	b0(30,1)	
t3	13	b0(40,10)	
t4	15		
t5	17		
t6	20		

Bu programa ait akış şeması Ek-1'de verildi. Her bir knot aralığı dikkate alınarak, baz fonksiyonlar aşağıdaki şekilde elde edilmiştir.

t0-t1 aralığı için denklem;

$$V1 = [ 10*(t/2 - 7/2)*(t/4 - 7/4), (t/2 - 7/2)*(t/4 - 7/4)] \quad (3.2.1)$$

t1-t2 aralığı için denklem;



$$V2 = [ 20*(t/2 - 9/2)*(t/4 - 9/4) - 10*(t/2 - 11/2)*(t/4 - 7/4) - 10*(t/2 - 9/2)*(t/4 - 13/4), 10*(t/2 - 9/2)*(t/4 - 9/4) - (t/2 - 11/2)*(t/4 - 7/4) - (t/2 - 9/2)*(t/4 - 13/4)]$$

(3.2.2)

t2-t3 aralığı için denklem;

$$V3 = [ 30*(t/2 - 11/2)*(t/4 - 11/4) - 20*(t/2 - 13/2)*(t/4 - 9/4) - 20*(t/2 - 11/2)*(t/4 - 15/4) + 10*(t/2 - 13/2)*(t/4 - 13/4), (t/2 - 11/2)*(t/4 - 11/4) - 10*(t/2 - 13/2)*(t/4 - 9/4) - 10*(t/2 - 11/2)*(t/4 - 15/4) + (t/2 - 13/2)*(t/4 - 13/4)]$$

(3.2.3)

t3-t4 aralığı için denklem;

$$V4 = [ 40*(t/2 - 13/2)*(t/4 - 13/4) - 30*(t/2 - 15/2)*(t/4 - 11/4) - 30*(t/2 - 13/2)*(t/4 - 17/4) + 20*(t/2 - 15/2)*(t/4 - 15/4), 10*(t/2 - 13/2)*(t/4 - 13/4) - (t/2 - 15/2)*(t/4 - 11/4) - (t/2 - 13/2)*(t/4 - 17/4) + 10*(t/2 - 15/2)*(t/4 - 15/4)]$$

(3.2.4)

t4-t5 aralığı için denklem;

$$V5 = [ 30*(t/2 - 17/2)*(t/4 - 17/4) - 40*(t/2 - 15/2)*(t/4 - 19/4) - 40*(t/2 - 17/2)*(t/4 - 13/4), (t/2 - 17/2)*(t/4 - 17/4) - 10*(t/2 - 15/2)*(t/4 - 19/4) - 10*(t/2 - 17/2)*(t/4 - 13/4)]$$

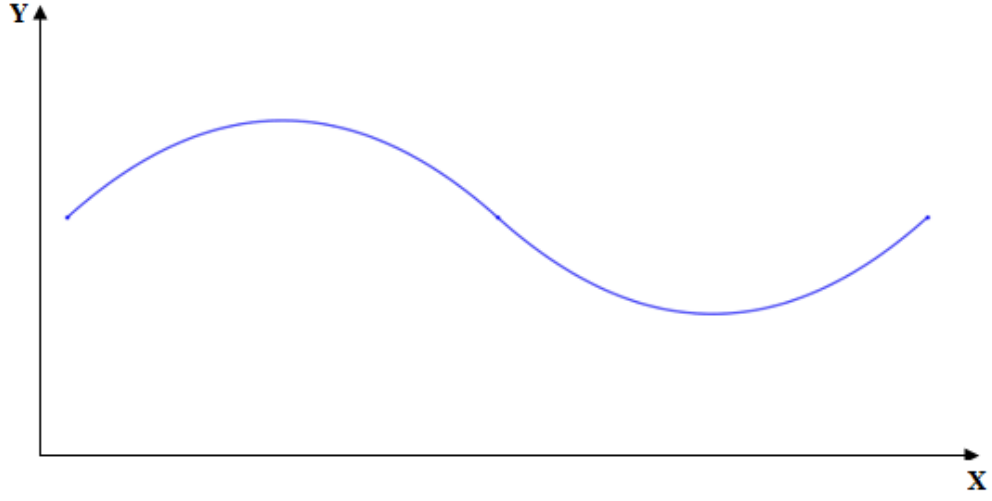
(3.2.5)

t5-t6 aralığı için denklem;

$$V6 = [ 40*(t/2 - 19/2)*(t/4 - 19/4), 10*(t/2 - 19/2)*(t/4 - 19/4)]$$

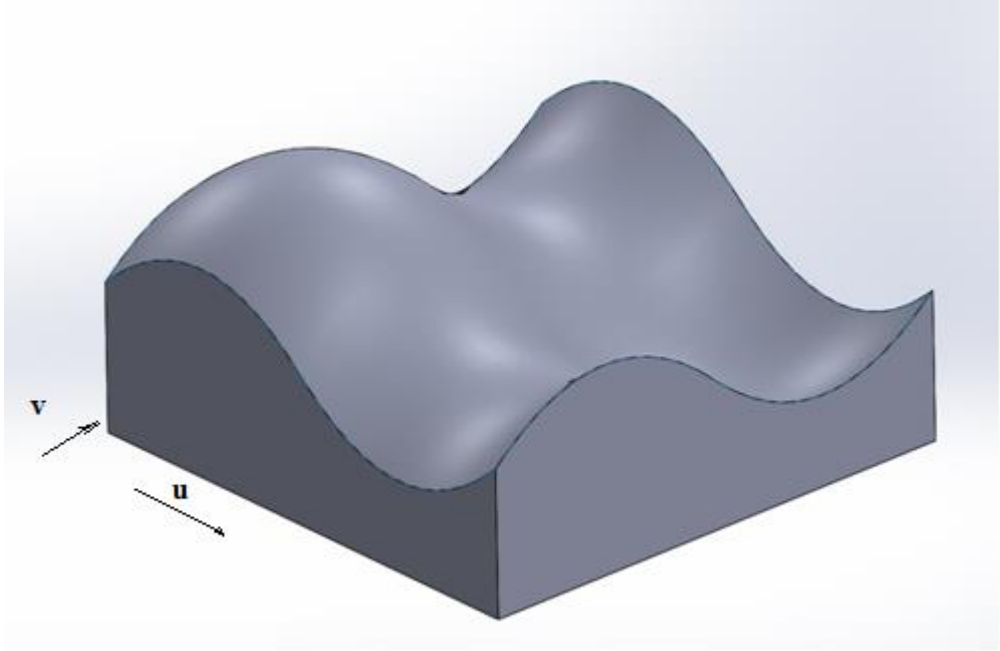
(3.2.6)

Bu baz fonksiyonları ve kontrol noktaları kullanılarak (Şekil 3.2)'de görülen eğri oluşturulmuştur.



**Şekil 3.2.** Baz Fonksiyonlarına Göre Elde Edilen B-Spline Eğri

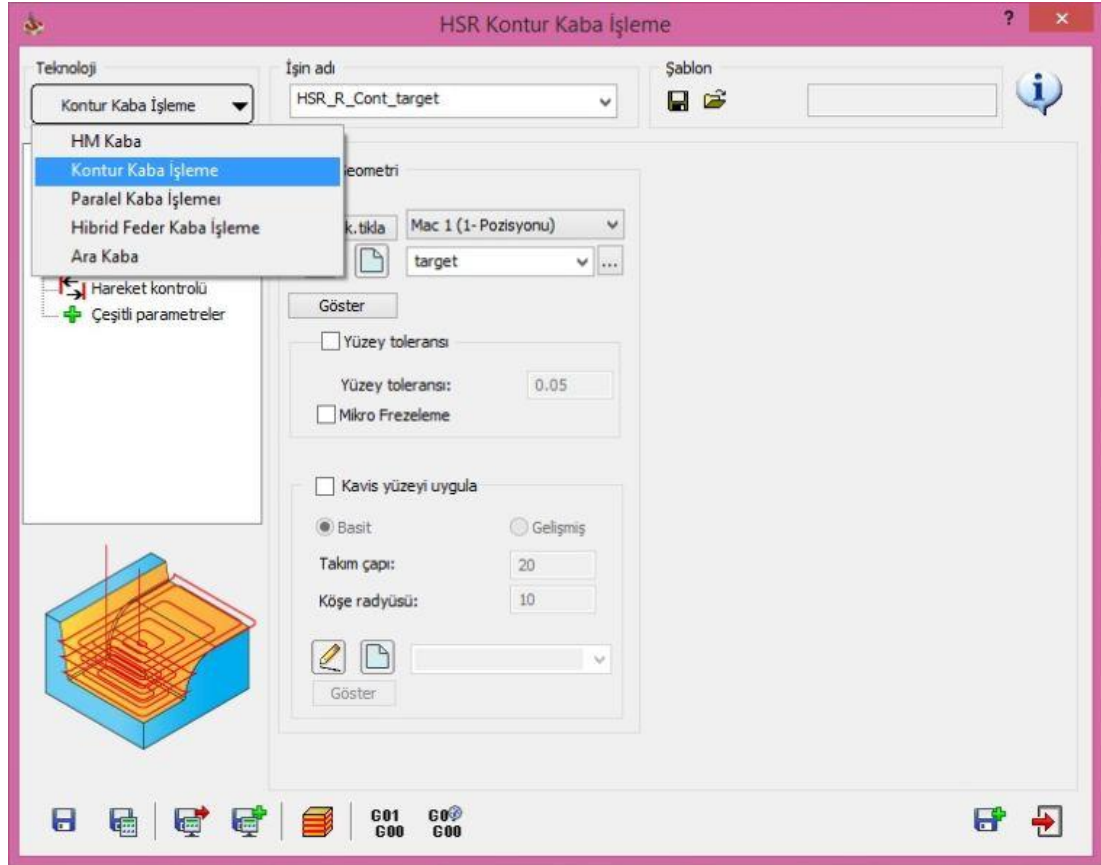
B-Spline baz fonksiyonları kullanılarak oluşturulan eğrinin u ve v yöndeki bileşenleri ayrı ayrı alınarak tensör çarpımları sonucu (Şekil 3.3) 'de görülen yüzey elde edilmiştir. Bu yüzey oluşturulurken SOLİDWORKS 2014 paket programı kullanılarak, şeklin 3B ifade edilmesi sağlanmıştır.



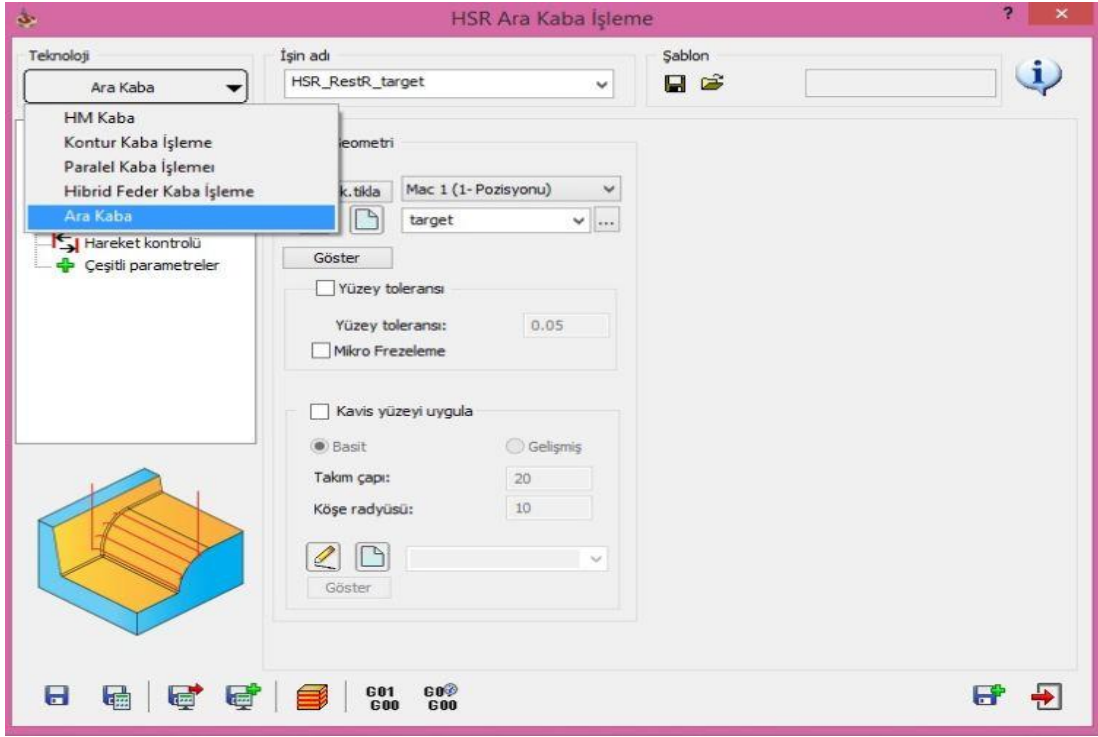
**Şekil 3.3.** CAD Ortamında Elde Edilen Serbest Şekilli Yüzey

CAD ortamında elde edilen yüzeyin imalatı için SOLİDCAM programı yardımı ile kaba, ara kaba ve finish işlemede kullanılacak takım yolları oluşturulmuştur. Kaba

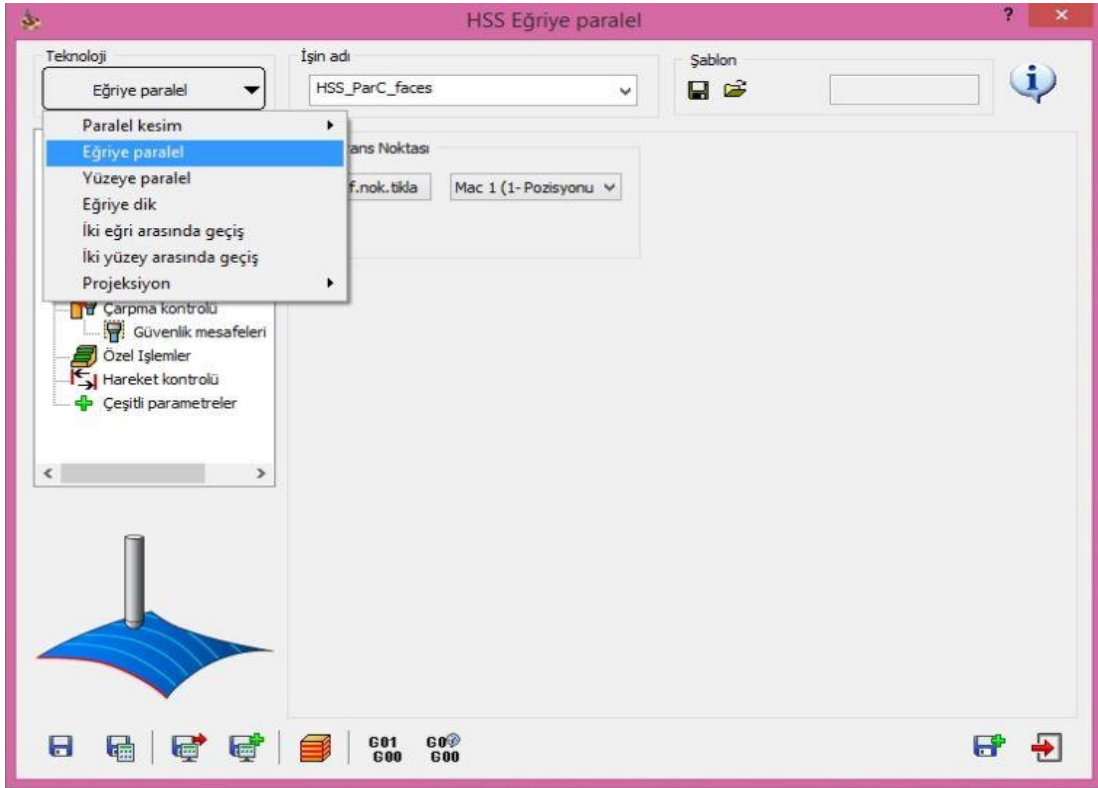
işlemede takım yolu olarak; kontur kaba işleme, ara kaba işlemede; takım yolu olarak ara kaba ve finish işlemede takım yolu olarak; tek yönlü eğriye paralel işleme seçilmiştir (Şekil 3.4-6)[1].



Şekil 3.4. Kaba İşleme Takım Yolu



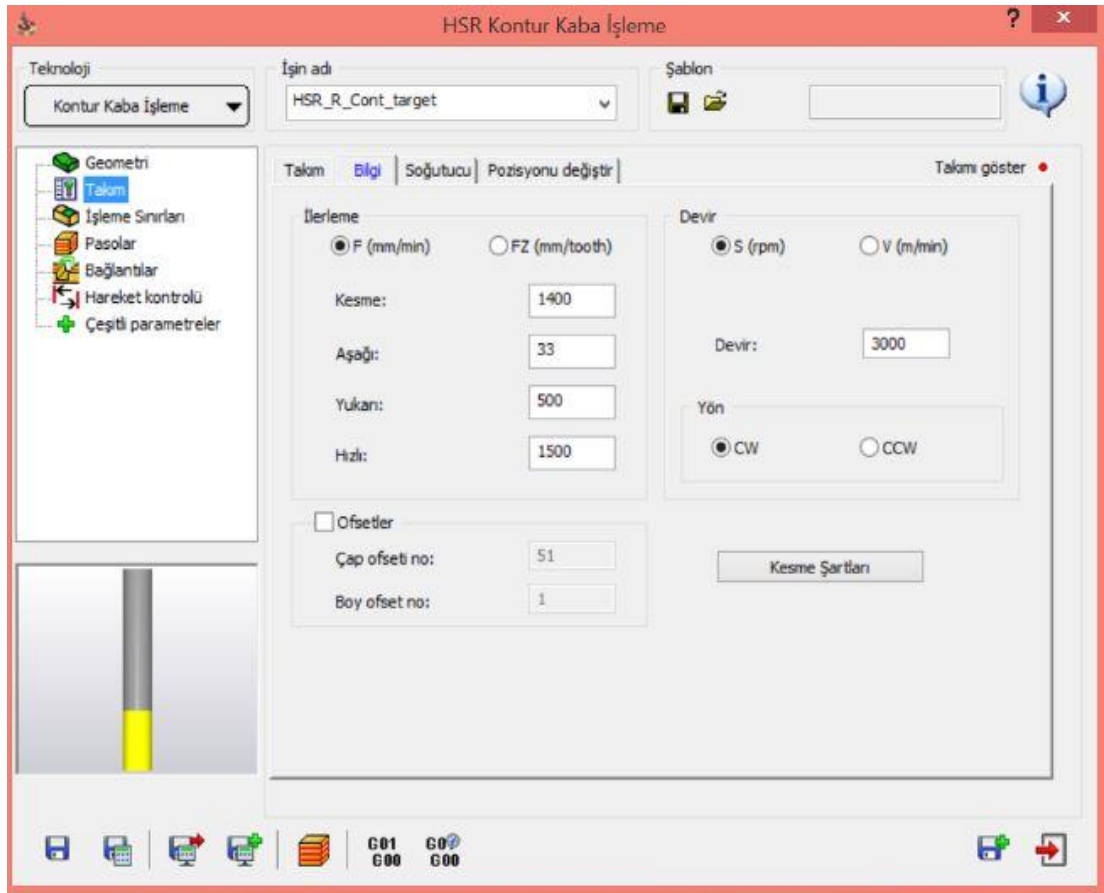
Şekil 3.5. Ara Kaba İşleme Takım Yolu



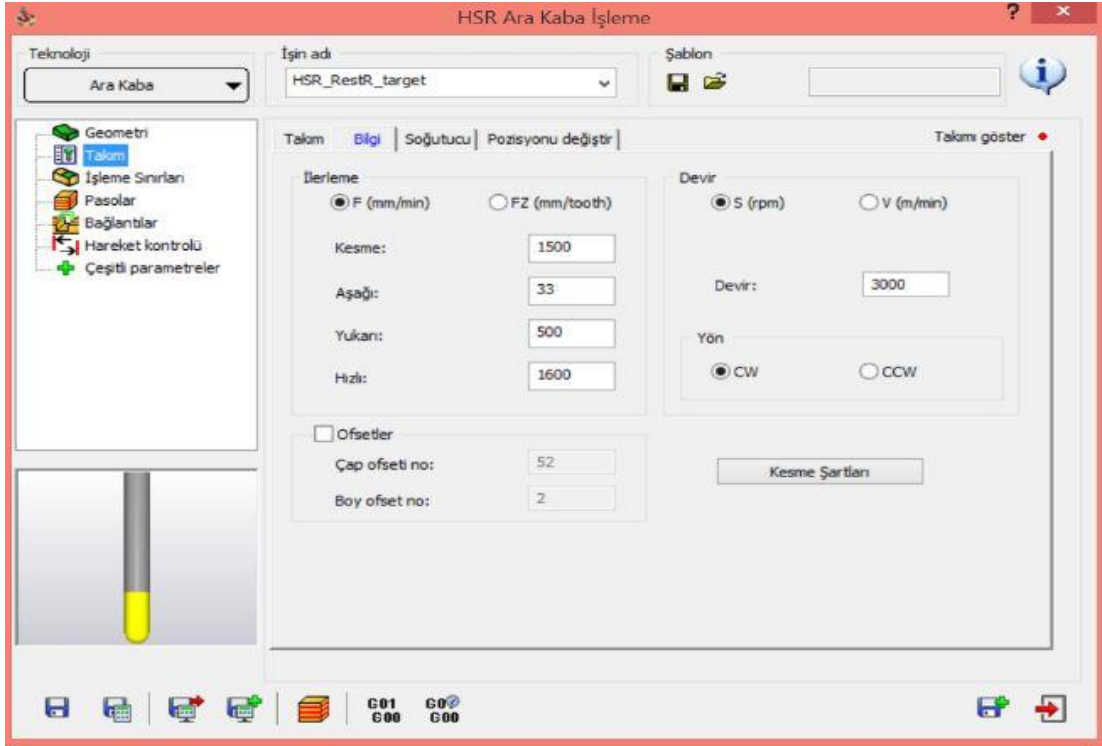
Şekil 3.6. Finish İşleme Takım Yolu

Takım yolları seçildikten sonra serbest şekilli yüzeylerin imalatı için CNC tezgahın CAM ortamında kaba, ara kaba ve finish işleme parametreleri seçilmiştir. (Şekil 3.7-9).

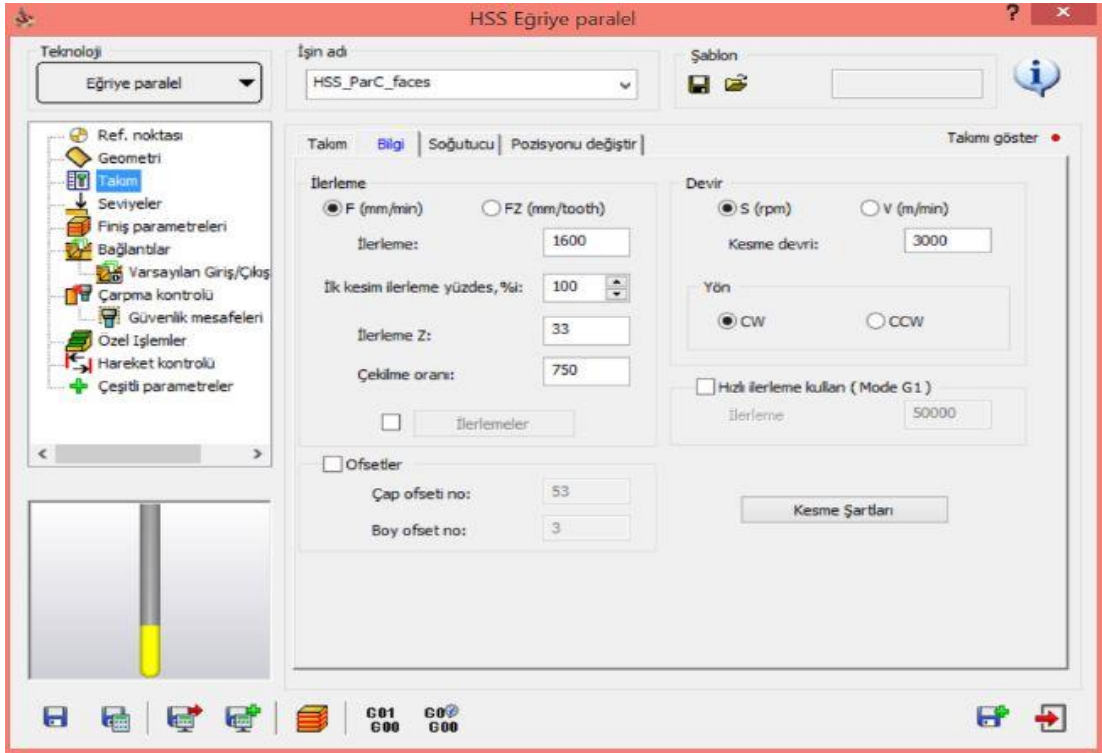
Serbest şekilli yüzeylerin CNC tezgâhta imalatı için CAM ortamında seçilen kaba, ara kaba ve finish işleme parametreleri tüm deneylerde değiştirilmeden kullanılmıştır.



Şekil 3.7. Kaba İşleme Parametreleri

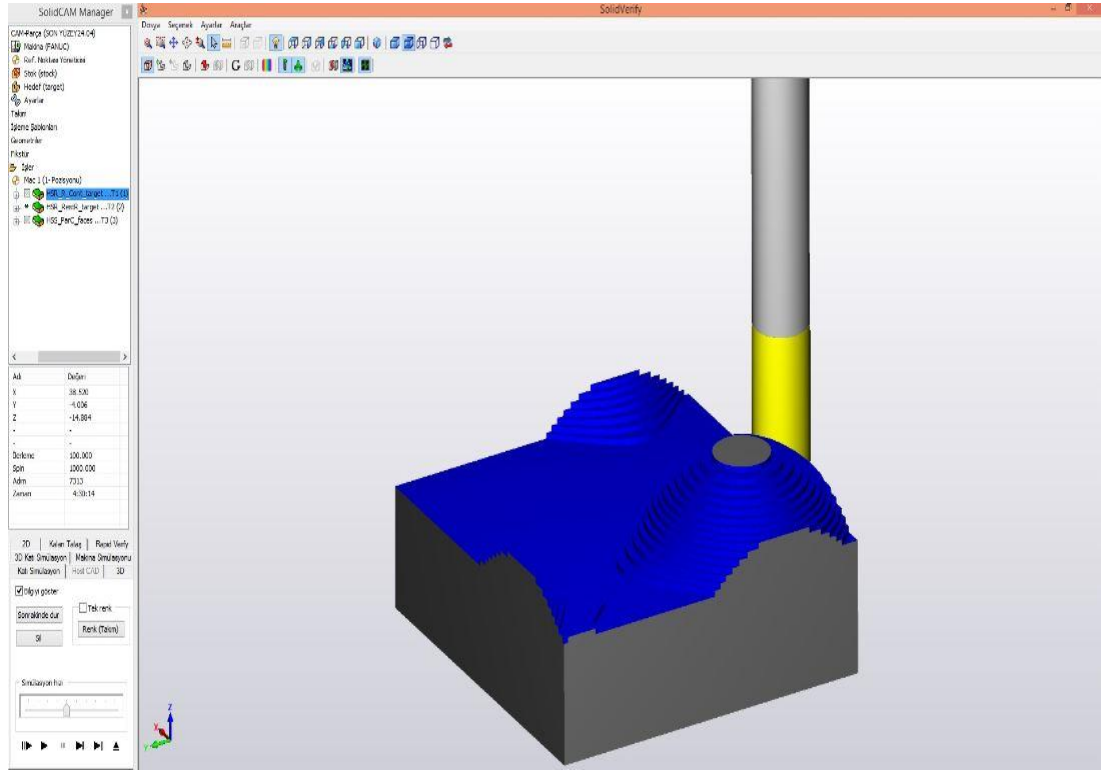


Şekil 3.8. Ara Kaba İşleme Parametreleri

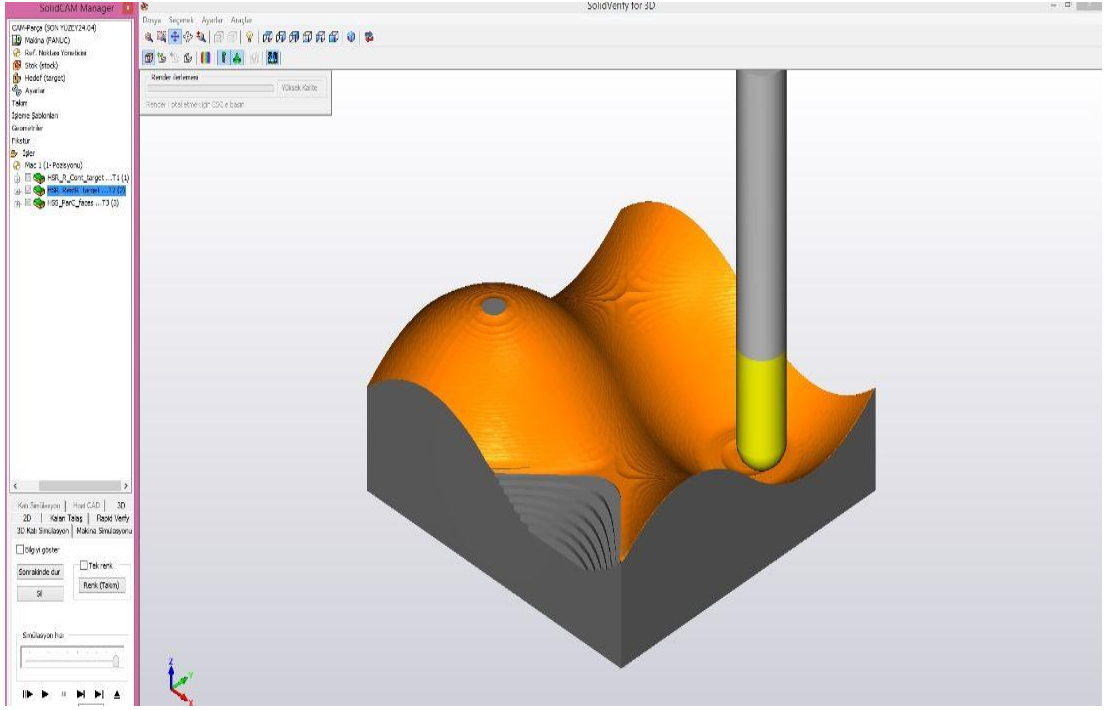


Şekil 3.9. Finish İşleme Parametreleri

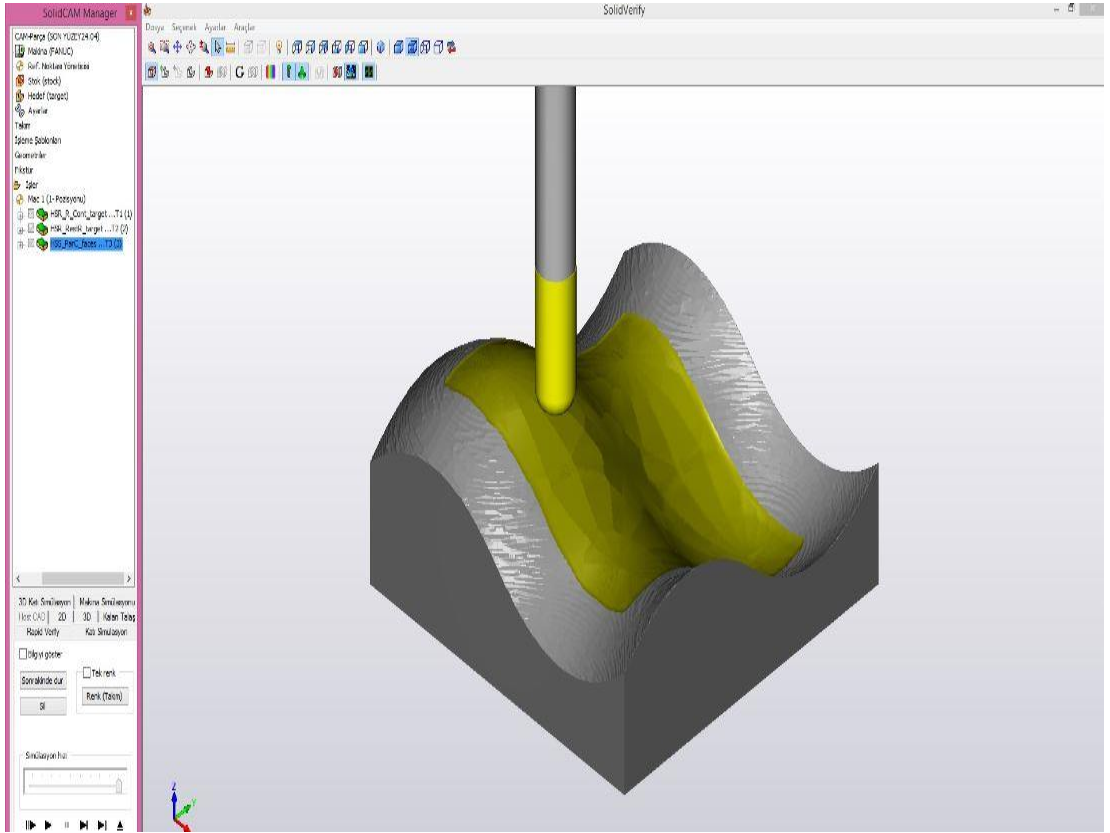
Serbest şekilli yüzeylerin imalatı için CAM ortamında işleme parametreleri seçildikten sonra kaba, ara kaba ve finish işlemler yine CAM ortamında gerçekleştirilerek işleme parametrelerinde hata olup olmadığı kontrol edilmiştir (Şekil 3.10-12). İşleme parametrelerinde herhangi bir hata olmadığı gözlenmiş ve numunelerin imalatı gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.10. CAM Ortamında Gerçekleştirilen Kaba İşleme



Şekil 3.11. CAM Ortamında Gerçekleştirilen Ara Kaba İşleme



Şekil 3.12. CAM Ortamında Gerçekleştirilen Finish İşleme



### 3.3. CNC Freze Tezgâhı ve Teknik Özellikleri

Serbest şekilli yüzeylere ait deneyler İnönü Üniversitesi Makine Mühendisliği laboratuvarında mevcut azami devri 8000 d/dak, iş mili gücü 5.5 KW olan Taksan TMC 700 V CNC tipi dik işleme merkezi tezgahıta gerçekleştirilmiştir. Bu tezgâha ait teknik özellikler ve işleme boyutları (Tablo3.4)' de verilmiştir.

**Tablo 3.4.** TMC 700 V CNC Tipi Dik İşleme Merkezi Tezgahın Teknik Özellikleri

<b>Teknik Özellikler</b>	<b>Değer / Birim</b>
Hareketler	TMC-700V
X/Y/Z Eksen Hareketleri	700/ 450/ 550 mm
İş Mili Burnu Tabla Arası Mesafe	100-650 mm
İş Mili Ekseninden Sütuna Olan Mesafe	490 mm
Tabla	
Tabla Ebadı	1020x510 mm
Çalışma Alanı	900x450 mm
Tabla Yüğü	750 kg
T-Kanalı genişlik x adet x aralık	18x4x100 mm
Tabla Yüzeyinin Yerden Yüksekliği	900 mm
İş Mili	
Devir Aralığı	60-6000 dev./dak.
İş Mili Koniği	ISO 40
Max. Tork	7.2 kgm
Yağlama Sistemi	Gres (Sonsuz Ömür)
İlerlemeler	
Hızlı İlerleme X,Y,Z	30 m/dak.

### 3.4. Kesici Takımlar ve Teknik Özellikleri

Yüzeylerin imalatında farklı özelliklerde, farklı markaların düz ve küresel ağızlı parmak frezeleri kullanılmıştır. Yapılan araştırmada literatürde serbest şekilli yüzeylerin imalatı 3 kademeli olup kaba, ara kaba ve finish işlemeden oluşmaktadır. Bu aşamalarda sırasıyla;

Kaba işlemede  $\varnothing$  12mm düz ağızlı parmak freze çakısı (Şekil 3.13), ara kaba işlemede  $\varnothing$  10mm küresel parmak freze çakısı (Şekil 3.14), finish işlemede  $\varnothing$  8mm küresel parmak freze çakısı kullanılmıştır (Şekil 3.14).



Şekil 3.13.  $\varnothing$  12mm Parmak Freze Çakısı



Şekil 3.14.  $\varnothing$  10mm ve  $\varnothing$  8mm Küresel Parmak Freze Çakısı

Numunelerin imalatında parmak freze çakıları 37 mm dalma yüksekliğine ayarlanarak tüm deneylerde bu dalma yüksekliği kullanılmıştır. Serbest şekilli yüzey numunelerinin üretiminde kullanılan parmak freze çakılarının marka kodlamaları (Tablo 3.5)'de, fiziksel özellikleri (Tablo 3.6)'de verilmiştir.

**Tablo 3.5.** Deneylerde Kullanılan Takımların Marka Kodlamaları

Deney No	Deneylerde Kullanılan Takım Markaları		
	Kaba İşleme	Ara Kaba İşleme	Finish İşleme
1. Deney	A	C	E
2. Deney	A	C	J
3. Deney	B	C	H
4. Deney	A	C	G
5. Deney	B	C	F
6. Deney	B	C	I
7. Deney	B	C	I

**Tablo 3.6.** Deneylerde Kullanılan Takımların Fiziksel Özellikleri

Çap (Ø)	Kaplama Özellikleri	Kesici Ağız Sayısı (R)	Boy (L1)	Boy (L2)	Marka
12mm	Karbür Kaplamalı	4	83 mm	26 mm	A
12mm	Karbür Kaplamalı	4	83 mm	26 mm	B
10mm	HSS	4	72 mm	22 mm	C
8mm	Karbür Kaplamalı	4	69 mm	19 mm	E
8mm	Karbür Kaplamalı	2	69 mm	19 mm	F
8mm	Karbür Kaplamalı	4	69 mm	19 mm	G
8mm	HSS	4	69 mm	19 mm	H
8mm	HSS	2	69 mm	19 mm	I
8mm	Karbür Kaplamalı	2	69 mm	19 mm	J

### 3.5. İş Parçasının Bağlanması

İş parçasını tezgâha bağlamak için mengene ve bağlama kalıpları kullanılarak aynı standartta bağlanılmasına özen gösterilmiştir (Şekil 3.15).



Şekil 3.15. Parçanın Tezgâha Bağlanması

### 3.6. Dinamometre ve Kuvvetlerin Ölçümü

Yapılan deneylerde ilerleme ve kesme kuvvetlerinin ölçümü için KİSTLER marka dinamometre kullanılmıştır. Dinamometre; amplifire, sensörlerin bağlı olduğu ve parçanın üzerine bağlandığı ölçüm tablası ve sensörlerden alınan verilerin işlendiği bilgisayar olmak üzere üç devre elemanından oluşmaktadır (Şekil 3.16-17). Sensörlerden gelen verileri ve sayısal verilere çevirmek için KİSTLER firmasının Dynoware yazılımı kullanılmıştır.

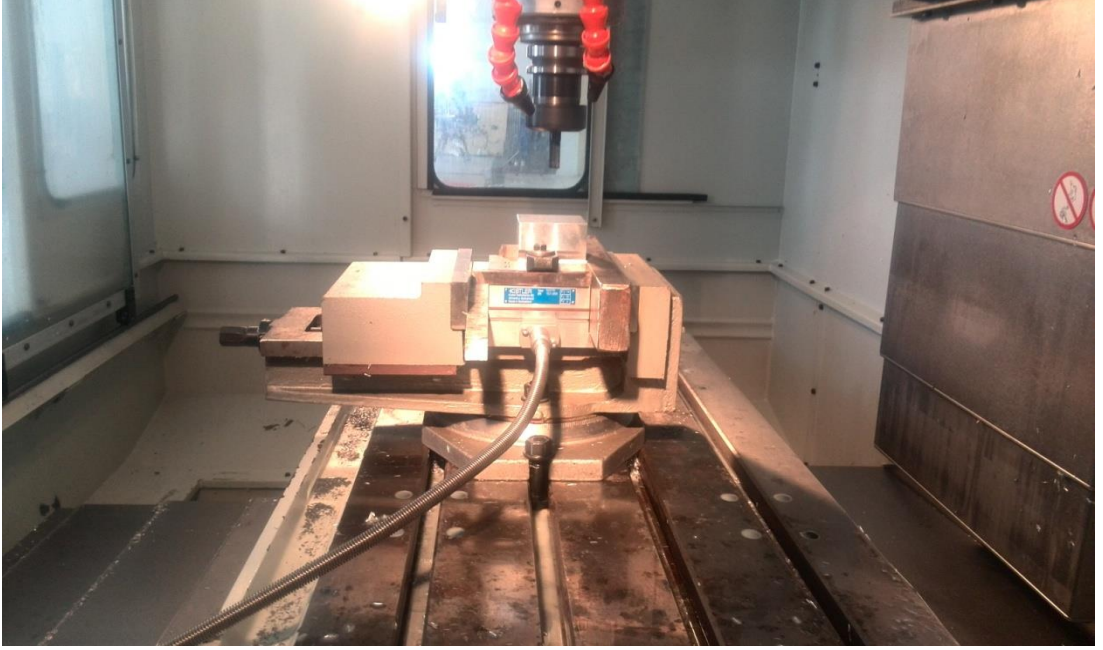
Ölçümler için numuneler dinamometrenin üzerine yerleştirilerek dinamometre mengene vasıtasıyla tezgâhın tablasına bağlanmıştır (Şekil 3.18). Bu şekilde bağlantı yapıldıktan sonra tezgâh ve dinamometre eş zamanlı çalıştırılarak kuvvet analizi yapılmıştır (Şekil 3.19).



Şekil 3.16. Dinamometrenin Ölçüm Tablası



Şekil 3.17. Dinamometrenin Kontrol Amplifire'ı



**Şekil 3.18.** Dinamometrenin Tezgâha Bağlanması



**Şekil 3.19.** Dinamometre ile Kuvvet Analizi



### 3.7. Termal Kamera ve Ölçümleri

Bir malzeme plastik olarak deforme edildiği zaman, uygulanan kuvvetlerden oluşan mekanik enerjinin hemen hemen tamamına yakın kısmı ısıya dönüşür. Talaş kaldırma sırasında malzeme, aşırı derecede gerinmeye maruz kalır. Gerinim için harcanan enerji, elastik gerinim için harcanan enerjiden oldukça yüksektir. Bu nedenle talaşlı imalat işleminde dikkate alınması gereken önemli faktör ısı oluşumu ve kesme bölgesindeki sıcaklıklardır. Bu sebeple kesme bölgesinde oluşan ısı, takım performansı ve iş parçası yüzey kalitesini önemli ölçüde etkilemektedir [27].

Bu nedenle numunelerin imalatı sırasında takımların ucunda ve yüzeyde oluşan sıcaklıkları ölçmek için deneylerde TESTO marka termal kamera kullanılmıştır. (Şekil 3.20). Termal kamera ölçümleri belirli bir mesafeden ve kamerayı tripod yardımıyla sabitleyerek yapılmıştır (Şekil 3.21). Termal kameradan alınan resim ve videoların analizi için yine TESTO firmasının kayıt programı kullanılmıştır (Tablo3.7).

**Tablo3.7.** Termal Kameranın Kayıt ve Kamera Özellikleri

Kamera	t885-2
Kamera seri no	2553111
Lens tipi	30°
Lens seri no	20347958
Emisivite	0,95
Yansıyan sıcaklık	20,0 °C
Minimum ölçüm aralığı	-20,0 °C
Maksimum ölçüm aralığı	100,0 °C



Şekil 3.20. TESTO Termal Kamera



Şekil 3.21. Termal Kamera Kaydı

### 3.8. 3B Tarayıcı ve Ölçümleri

İmalatı gerçekleştirilen numunelerin form hatalarının tespit edilmesi için 3B tarayıcı kullanılmıştır. Bu işlem numunelerin SOLİDWORKS programında elde edilen katı modeli ile 3B tarayıcıdan alınana modelin karşılaştırılması ile yapılmıştır. Katı model ile 3B tarayıcıdan alınan modelin karşılaştırılmasında numunelerin eğrilik, yüzey ve



ölçü verileri dikkate alınmıştır. 3B tarama işlemi “Breuckmann Smart Scan R5” isimli 3B tarama sistemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.22).



Şekil 3.22. Breuckmann Smart Scan R5 3B Tarayıcı

### 3.9. Taramalı Elektron Mikroskop Ölçümleri

Talaşlı imalatta takım ömrü, genelde takım aşınması kriter alınarak belirlenir. Bu nedenle, kesici takımın aşınması çalışmalarında; takımın en uzun ömürle kesme yapabilmesi, araştırılması gereken en önemli konulardan biridir. Takım aşınması, kesici kenar üzerindeki yük faktörlerinin (Mekanik, Termal, Kimyasal, Aşındırıcı) kombinasyonu sonucu meydana gelir. Kesici takım üzerine yapışan/kaynaklanan iş parçası malzemesi devam eden işleme sürecinde büyür ve belirli bir süre sonra maruz kaldığı gerilmelere dayanamayarak kesici takımdan koparak ayrılır. Talaşlı imalat işleminde iş parçası malzemesinin, takımın talaş yüzeyine (esas kesme kenarı) yapışması BUE (yığıntı talaş) olarak bilinir ve bu olay çoğunlukla sünek malzemelerin işlenmesinde sıkça görülür. Kesici takım yüzeyine talaşın kaynatarak oluşturduğu katmana BUL (yığıntı katmanı) adı verilir. Kesici takım üzerinde oluşan ve zamanla sertleşen BUE'lerin kopması ile kesici takımdan da parça kopar ve dolayısıyla yapışma aşınması mekanizması vasıtasıyla kırılmalar gerçekleşir. Kesici takımdaki bu aşınmalar TEM cihazı ile gözlemlenebilmektedir [28].

Bu nedenle numunelerin imalatında kullanılan parmak freze çakılarının kesici ağızlarındaki aşınmaların tespiti için taramalı elektron mikroskobu (TEM)

kullanılmıştır (Şekil 3.23). Parmak freze çakıları 20mm yüksekliğinde talaş kaldıran ağızlarından kesilerek, kesici ağızlar TEM cihazının ölçüm tablasına dik olarak yerleştirildi ve kesici ağızlardan 2500/1, 1000/1, 500/1, 250/1, 100/1, 35/1 ölçeklerinde resimler alınmıştır. TEM cihazı ölçümleri İnönü Üniversitesi Petrol Araştırma Laboratuvarında yapılmıştır.



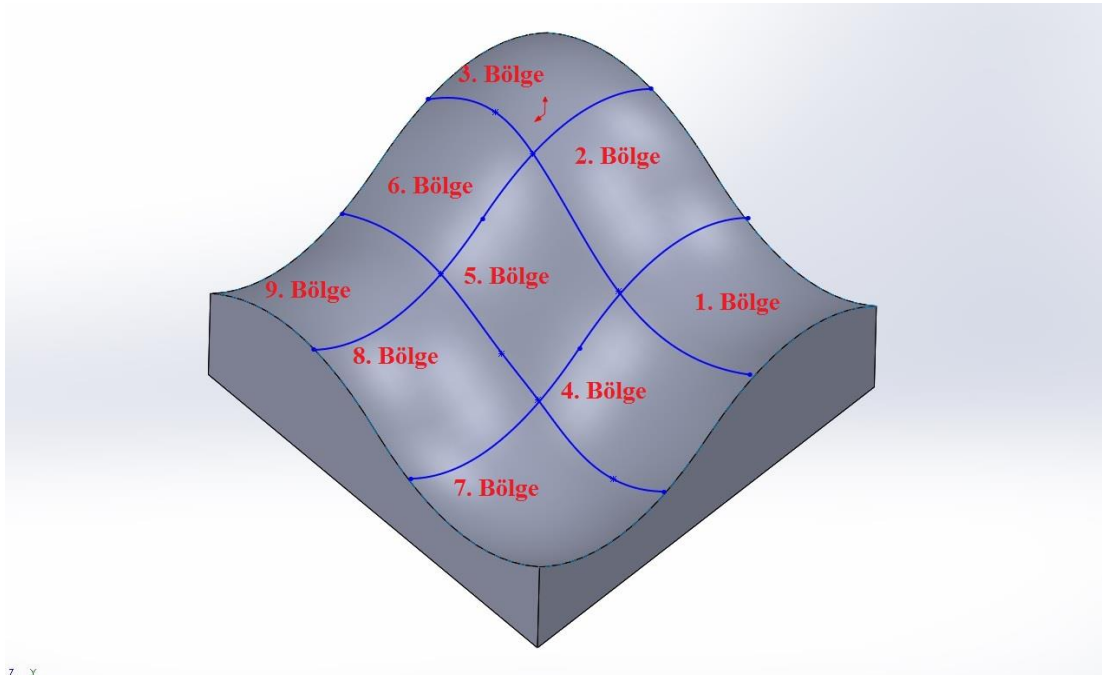
Şekil 3.23. TEM Cihazı

## 4. BULGULAR

### 4.1. 3B Yüzey Taramasına Ait Bulgular

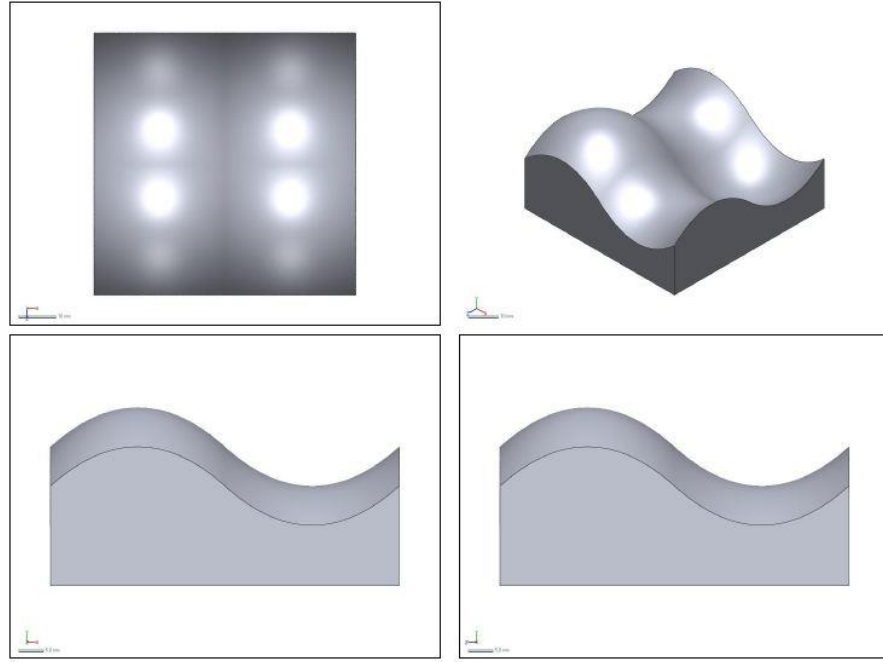
Numunelerin yüzeyleri 9 bölgeye ayrılmıştır, 3 boyutlu yüzey tarayıcı ile her bir bölge üzerinde ortalama 10 adet noktanın koordinat değerleri (X,Y,Z) çıkarılmıştır (Şekil 4.1). Bölge ve kontrol noktası sayısı yüzeyin genişliğine göre belirlenmiştir. Elde edilen veriler referans yüzeye ait koordinat verileri ile karşılaştırılarak artı veya eksi yöndeki form hata sapma değerleri belirlenmiştir.

Şekil 4.2’de referans yüzeyin CAD görüntüsü ve şekil 4.3’de tarama görüntüsü verilmiştir.



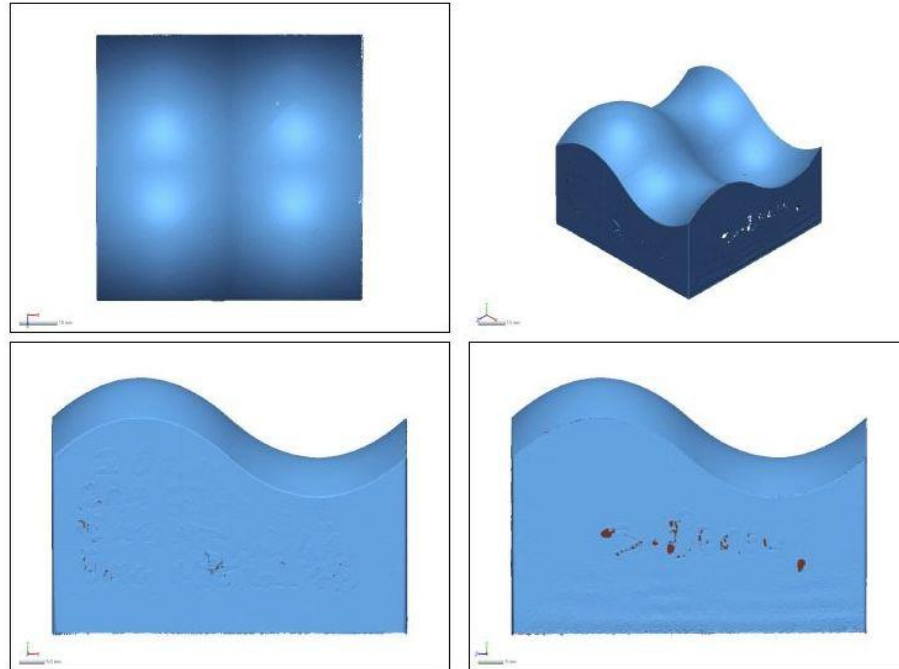
Şekil 4.1. Numunelerin Yüzeyindeki Ölçüm Bölgeleri

Nominal Data



Şekil 4.2. CAD Görüntüsü

Scan Data



Şekil 4.3. Numunelere Ait 3B Taraması (Renk Diyagramı Uygulanmamış)

Yapılan bu çalışmada, takımlar arasındaki farkları daha hassas görebilmek için  $\pm 0,05$  mm kabul edilebilir tolerans kullanılarak hesaplama yapılmıştır. Bu işlem diğer 6 numuneye de aynı şekilde uygulanarak değerler elde edilmiştir. Tablo 4.1-9 'da 1 numunesine ait  $\pm 0,05$  mm tolerans aralığında elde edilen sonuçlar verilmiştir.

**Tablo 4.1.** 1 Numunesi 1.Bölgeye Ait 3B Tarama Çizim Karşılaştırma Sonuçları

ÖLÇÜM NOKTASI	REFERANS YÜZEY DEĞERLERİ			3B TARAMA DEĞERLERİ			SAPMA MİKTARI*	TOLERANS
	X	Y	Z	X	Y	Z		
CMP1: 1	2,0009	17,2178	6,0028	1,9785	17,2456	6,0195	0,0394	$\pm 0,05$
CMP1: 2	1,9999	13,8832	15,9989	1,9798	13,9081	16,0006	0,032	$\pm 0,05$
CMP1: 3	2	14,919	23,9998	1,989	14,9326	23,9951	0,0181	$\pm 0,05$
CMP1: 4	7,9989	22,3601	3,9994	7,9978	22,3623	4,001	0,0029	$\pm 0,05$
CMP1: 5	5,9991	17,3764	11,9981	5,982	17,4048	12,006	0,034	$\pm 0,05$
CMP1: 6	5,9999	17,1272	21,9997	5,9851	17,1519	21,9937	0,0294	$\pm 0,05$
CMP1: 7	12,0026	22,6137	6,0013	12,0039	22,6091	5,9985	-0,0055	$\pm 0,05$
CMP1: 8	12,0001	19,2783	16,0002	11,9859	19,3294	16,0037	0,0532	$\pm 0,05$
CMP1: 9	10,0002	19,0787	22,0004	9,9931	19,0972	21,9959	0,0204	$\pm 0,05$
CMP1: 10	16,0023	23,3303	6,0009	16,0024	23,3284	5,9997	-0,0022	$\pm 0,05$
CMP1: 11	16,0003	21,0311	24,0004	15,9983	21,0595	23,9906	0,0301	$\pm 0,05$

\*Tablodaki değerlerin birimi mm'dir.

**Tablo 4.2.** 1 Numunesi 2.Bölgeye Ait 3B Tarama Çizim Karşılaştırma Sonuçları

ÖLÇÜM NOKTASI	REFERANS YÜZEY DEĞERLERİ			3B TARAMA DEĞERLERİ			SAPMA MİKTARI*	TOLERANS
	X	Y	Z	X	Y	Z		
CMP2: 1	18,0005	28,7587	36,0009	17,9993	28,725	36,0299	-0,0445	$\pm 0,05$
CMP2: 2	8,0003	28,0406	38,0013	8,0129	28,0141	38,0212	-0,0354	$\pm 0,05$
CMP2: 3	2,0001	25,5697	40,0012	2,0133	25,5532	40,0116	-0,0236	$\pm 0,05$
CMP2: 4	2	28,4881	46,001	2,0059	28,4809	46,0035	-0,0096	$\pm 0,05$
CMP2: 5	6,0001	31,2645	46,0009	6,007	31,2532	46,0049	-0,0138	$\pm 0,05$
CMP2: 6	10,0005	31,4757	42,0023	10,0064	31,4604	42,0106	-0,0184	$\pm 0,05$
CMP2: 7	16,0009	32,8599	42,0024	16,003	32,829	42,0191	-0,0352	$\pm 0,05$
CMP2: 8	14,0006	34,3443	46,0019	14,0024	34,3338	46,0055	-0,0112	$\pm 0,05$
CMP2: 9	8,0002	32,9041	48,0011	8,0059	32,8922	48,0041	-0,0136	$\pm 0,05$
CMP2: 10	2,0001	29,4025	50,0013	1,9948	29,4091	50,0004	0,0084	$\pm 0,05$

\*Tablodaki değerlerin birimi mm'dir.

**Tablo 4.3.** 1 Numunesi 3.Bölgeye Ait 3B Tarama Çizim Karşılaştırma Sonuçları

ÖLÇÜM NOKTASI	REFERANS YÜZEY DEĞERLERİ			3B TARAMA DEĞERLERİ			SAPMA MİKTARI*	TOLERANS
	X	Y	Z	X	Y	Z		
CMP3: 1	25,0013	34,1006	55,0028	25,0015	34,1012	55,0029	0,0007	±0,05
CMP3: 2	15,0007	35,3974	55,0026	14,9945	35,4422	55,0088	0,0456	±0,05
CMP3: 3	5,0002	31,5466	55,0021	4,9834	31,5731	55,0058	0,0317	±0,05
CMP3: 4	20,0008	34,0919	60,0025	20,0058	34,1275	60,016	0,0384	±0,05
CMP3: 5	10,0004	32,8144	60,0027	9,9932	32,8335	60,0099	0,0217	±0,05
CMP3: 6	20,0007	30,8316	66,0023	20,0065	30,8734	66,0313	0,0511	±0,05
CMP3: 7	11,0003	29,1914	67,0019	10,9872	29,2293	67,0303	0,0491	±0,05
CMP3: 8	3,0001	24,8736	67,0019	2,9733	24,9093	67,0287	0,052	±0,05
CMP3: 9	8,0003	33,0855	56,0022	7,9934	33,1	56,0047	0,0162	±0,05
CMP3: 10	14,0007	33,9425	60,003	13,9969	33,9643	60,0112	0,0236	±0,05
CMP3: 11	5,0001	29,3673	62,001	4,9844	29,392	62,0128	0,0316	±0,05

\*Tablodaki değerlerin birimi mm'dir.

**Tablo 4.4.** 1 Numunesi 4.Bölgeye Ait 3B Tarama Çizim Karşılaştırma Sonuçları

ÖLÇÜM NOKTASI	REFERANS YÜZEY DEĞERLERİ			3B TARAMA DEĞERLERİ			SAPMA MİKTARI*	TOLERANS
	X	Y	Z	X	Y	Z		
CMP4: 1	29,9995	19,973	4,9999	29,9903	19,9585	4,9907	-0,0195	±0,05
CMP4: 2	39,9989	12,2629	4,9999	40,0043	12,2713	5,0052	0,0113	±0,05
CMP4: 3	49,9996	8,4288	5	50,0033	8,4553	5,0167	0,0316	±0,05
CMP4: 4	44,9992	7,1349	9,9998	45,0023	7,143	10,0029	0,0092	±0,05
CMP4: 5	34,9985	13,5417	9,9996	34,9898	13,5319	9,9958	-0,0136	±0,05
CMP4: 6	39,9994	8,4116	14,9998	39,9982	8,4097	14,9995	-0,0022	±0,05
CMP4: 7	44,9995	5,852	14,9998	45,0038	5,8632	15,0014	0,0121	±0,05
CMP4: 8	34,9991	12,2632	19,9995	34,9771	12,2383	20,0029	-0,0334	±0,05
CMP4: 9	44,9995	5,8569	19,9998	44,999	5,8556	19,9999	-0,0014	±0,05

\*Tablodaki değerlerin birimi mm'dir.

**Tablo 4.5.** 1 Numunesi 5.Bölgeye Ait 3B Tarama Çizim Karşılaştırma Sonuçları

ÖLÇÜM NOKTASI	REFERANS YÜZEY DEĞERLERİ			3B TARAMA DEĞERLERİ			SAPMA MİKTARI*	TOLERANS
	X	Y	Z	X	Y	Z		
CMP5: 1	49,9998	8,4511	29,9999	49,9966	8,4282	30,0143	-0,0272	±0,05
CMP5: 2	39,9995	12,2847	29,9996	39,9793	12,2527	30,0198	-0,0429	±0,05
CMP5: 3	30	19,9951	30	29,9818	19,9663	30,0182	-0,0387	±0,05
CMP5: 4	49,9999	12,3154	34,9999	49,9938	12,2718	35,0385	-0,0585	±0,05
CMP5: 5	39,9998	16,1488	34,9998	39,9778	16,1141	35,0306	-0,0514	±0,05
CMP5: 6	30,0004	23,8596	35,0005	29,9864	23,8375	35,02	-0,0326	±0,05
CMP5: 7	44,9998	17,4358	39,9998	44,9842	17,3947	40,0258	-0,0511	±0,05
CMP5: 8	35,0003	23,8414	40,0003	34,9749	23,8127	40,0185	-0,0424	±0,05
CMP5: 9	45	19,9951	45	44,9855	19,9569	45,0145	-0,0433	±0,05
CMP5: 10	40,0003	22,5543	45,0003	39,9935	22,5437	45,0044	-0,0133	±0,05

\*Tablodaki değerlerin birimi mm'dir.

**Tablo 4.6.** 1 Numunesi 6.Bölgeye Ait 3B Tarama Çizim Karşılaştırma Sonuçları

ÖLÇÜM NOKTASI	REFERANS YÜZEY DEĞERLERİ			3B TARAMA DEĞERLERİ			SAPMA MİKTARI*	TOLERANS
	X	Y	Z	X	Y	Z		
CMP6: 1	50,0002	19,9802	55,0002	50,0102	20,0517	55,0102	0,0728	±0,05
CMP6: 2	40,0002	23,8135	55,0003	40,003	23,8179	55,0009	0,0052	±0,05
CMP6: 3	30,0009	31,5234	55,0017	29,9935	31,5117	55,0001	-0,014	±0,05
CMP6: 4	50,0001	18,6804	60,0001	50,008	18,7369	60,0216	0,0609	±0,05
CMP6: 5	48,0001	14,2763	68,0002	48,0108	14,32	68,0354	0,0571	±0,05
CMP6: 6	46,0001	17,6279	64,0002	46,0133	17,6659	64,0231	0,0463	±0,05
CMP6: 7	41,9999	18,0766	65,9999	42,016	18,1064	66,0205	0,0397	±0,05
CMP6: 8	38	23,8984	60	37,9998	23,8982	59,9999	-0,0003	±0,05
CMP6: 9	34,0006	23,9741	66,0011	34,0068	23,9814	66,0061	0,0108	±0,05
CMP6: 10	32,001	28,8301	60,0019	31,998	28,826	60,0004	-0,0053	±0,05

\*Tablodaki değerlerin birimi mm'dir.

**Tablo 4.7.** 1 Numunesi 7.Bölgeye Ait 3B Tarama Çizim Karşılaştırma Sonuçları

ÖLÇÜM NOKTASI	REFERANS YÜZEY DEĞERLERİ			3B TARAMA DEĞERLERİ			SAPMA MİKTARI*	TOLERANS
	X	Y	Z	X	Y	Z		
CMP7: 1	67,9993	15,1698	4	67,9859	15,1864	4,0115	0,0242	±0,05
CMP7: 2	61,9998	10,0053	6	61,9922	10,0212	6,0096	0,02	±0,05
CMP7: 3	53,9996	7,7198	6	53,9973	7,7522	6,0195	0,0379	±0,05
CMP7: 4	67,9994	11,2649	11,9999	67,9804	11,2884	12,0064	0,0309	±0,05
CMP7: 5	61,9997	7,3867	11,9999	61,9923	7,402	12,0042	0,0175	±0,05
CMP7: 6	57,9996	5,372	13,9999	57,9921	5,399	14,0046	0,0284	±0,05
CMP7: 7	49,9997	4,4761	15,9999	50,0035	4,5035	16,0018	0,0277	±0,05
CMP7: 8	67,9995	10,4975	17,9999	67,9825	10,5186	17,9991	0,0272	±0,05
CMP7: 9	61,9998	6,7764	19,9999	61,9949	6,7865	19,9985	0,0113	±0,05
CMP7: 10	53,9997	4,852	21,9999	53,9977	4,8809	21,9928	0,0299	±0,05

\*Tablodaki değerlerin birimi mm'dir.

**Tablo 4.8.** 1 Numunesi 8.Bölgeye Ait 3B Tarama Çizim Karşılaştırma Sonuçları

ÖLÇÜM NOKTASI	REFERANS YÜZEY DEĞERLERİ			3B TARAMA DEĞERLERİ			SAPMA MİKTARI*	TOLERANS
	X	Y	Z	X	Y	Z		
CMP8: 1	64,9998	12,3518	29,9999	65,0092	12,337	30,0093	-0,0199	±0,05
CMP8: 2	54,9996	8,4658	29,9998	55,002	8,4489	30,0105	-0,0202	±0,05
CMP8: 3	49,9999	12,3154	34,9999	49,9938	12,2718	35,0385	-0,0585	±0,05
CMP8: 4	54,9999	16,1764	39,9999	55,0062	16,1312	40,0285	-0,0539	±0,05
CMP8: 5	65	16,2163	35	65,02	16,1847	35,028	-0,0467	±0,05
CMP8: 6	65,0004	22,6222	45,0003	65,0173	22,5955	45,0104	-0,0331	±0,05
CMP8: 7	59,9998	13,6299	34,9999	60,0128	13,5956	35,0303	-0,0476	±0,05
CMP8: 8	60,0001	20,0357	45,0001	60,0121	20,0041	45,0121	-0,0358	±0,05
CMP8: 9	45	19,9951	45	44,9855	19,9569	45,0145	-0,0433	±0,05
CMP8: 10	54,9998	20,0099	49,9998	54,9983	20,0208	49,9983	0,0111	±0,05

\*Tablodaki değerlerin birimi mm'dir.



**Tablo 4.9.** 1 Numunesi 9.Bölgeye Ait 3B Tarama Çizim Karşılaştırma Sonuçları

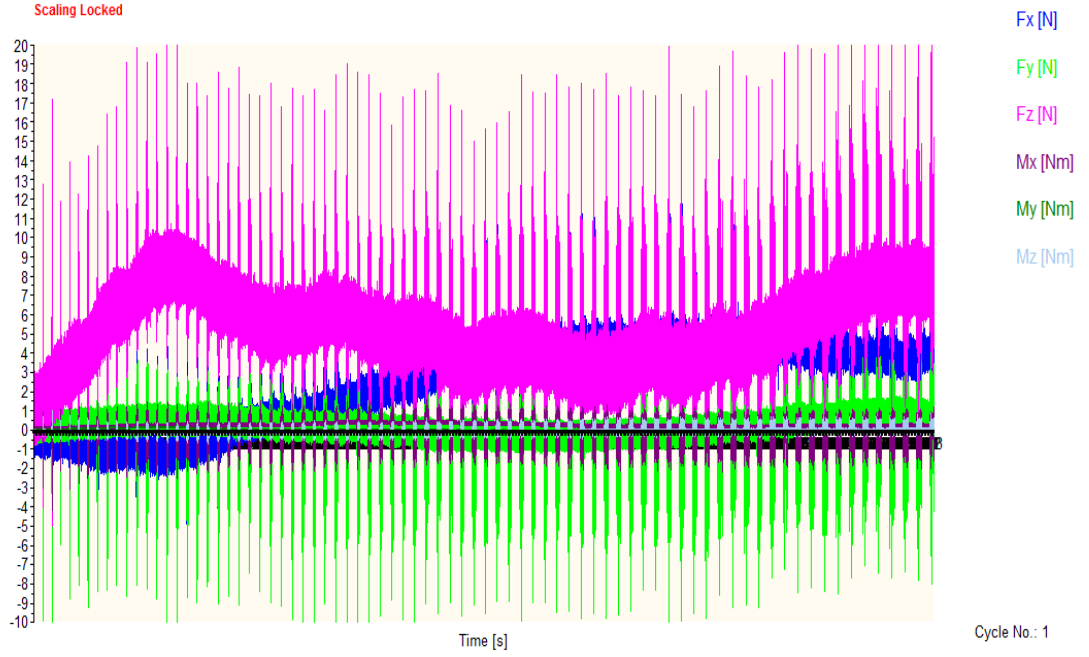
ÖLÇÜM NOKTASI	REFERANS YÜZEY DEĞERLERİ			3B TARAMA DEĞERLERİ			SAPMA MİKTARI*	TOLERANS
	X	Y	Z	X	Y	Z		
CMP9: 1	68	19,9951	68	67,9805	20,0194	68,0196	0,0368	±0,05
CMP9: 2	62,0002	16,1165	68,0002	61,9812	16,1563	68,0322	0,0544	±0,05
CMP9: 3	52	15,2717	66	52,0017	15,3217	66,0345	0,0607	±0,05
CMP9: 4	55,9999	15,5926	65,9999	55,9907	15,646	66,0368	0,0655	±0,05
CMP9: 5	65,9998	22,3755	61,9998	65,9959	22,3811	62,0025	0,0074	±0,05
CMP9: 6	60	18,0281	64	59,9827	18,0737	64,0274	0,0559	±0,05
CMP9: 7	68	26,1593	54	68,0104	26,1464	53,9991	-0,0166	±0,05
CMP9: 8	62,0003	22,0174	56,0003	62,0033	22,0111	55,9992	-0,007	±0,05
CMP9: 9	56	19,5269	58	55,9889	19,5905	58,0177	0,0669	±0,05
CMP9: 10	50,0002	19,3551	58,0002	50,0103	19,4277	58,0204	0,0761	±0,05

\*Tablodaki değerlerin birimi mm'dir.

Benzer şekilde diğer takımların işleme sonucunda elde edilen veriler bölüm 5'de ortak tablolarda verileceği için bu bölümde gösterilmemiştir. Numunelere ait 3 boyutlu tarama sonucunda elde edilen renk diyagramı görselleri Ek-2'de verilmiştir. Ekte verilen görsellerde  $\pm 0,05$  mm değerini aşan form hataları sarı, mavi, kırmızı renkler ve tonları şeklinde görülmektedir. Bölüm 5'de diğer numunelere ait ölçüm sonuçları incelenerek referans yüzeye en yakın sonucu veren takımların performansları karşılaştırılmıştır.

#### 4.2. Dinamometre ile Kuvvet Ölçümüne Ait Bulgular

Numunelerin imalatı sırasında oluşan ilerleme ve kesme kuvvetlerini ve bu kuvvetlerdeki değişimleri incelemek için deney numunelerinin altına dinamometre bağlanmıştır. Serbest şekilli yüzeyin imalatı sırasında birim zamandaki takımın bir kontur'unda yüzeyin geometrisindeki inişler ve çıkışlar dinamometreden alınan kuvvet hareketleriyle karşılaştırılarak kuvvet değişiklikleri incelenmiştir. 2.Numunenin finish işlemede kuvvet değişimleri şekil 4.4' de verilmiştir.

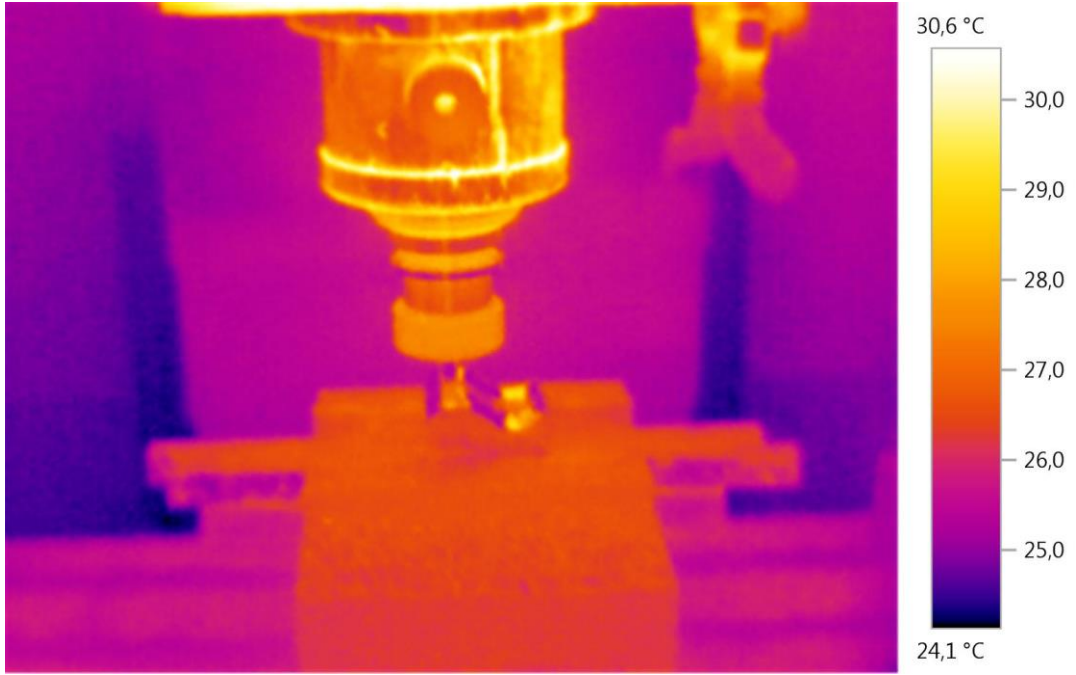


**Şekil 4.4.** 2. Numunenin Finish İşlemede Kuvvet Değişimleri

Benzer şekilde diğer numunelerin imalatında, finish işleme esnasında dinamometreden alınan kuvvet ölçümlerinin grafikleri Ek-3’de verilmiştir. Yüzeyin imalatı sırasında daha kolay ve anlaşılır kuvvet analizleri yapmak ve bu analizleri değerlendirmek için takım yolu olarak eğriye paralel takım yolu seçilen finish işlemedeki kuvvet ölçümleri incelenmiştir.

### **4.3. Termal Kameradan Alınan Sıcaklık Değişimlerin İncelenmesi**

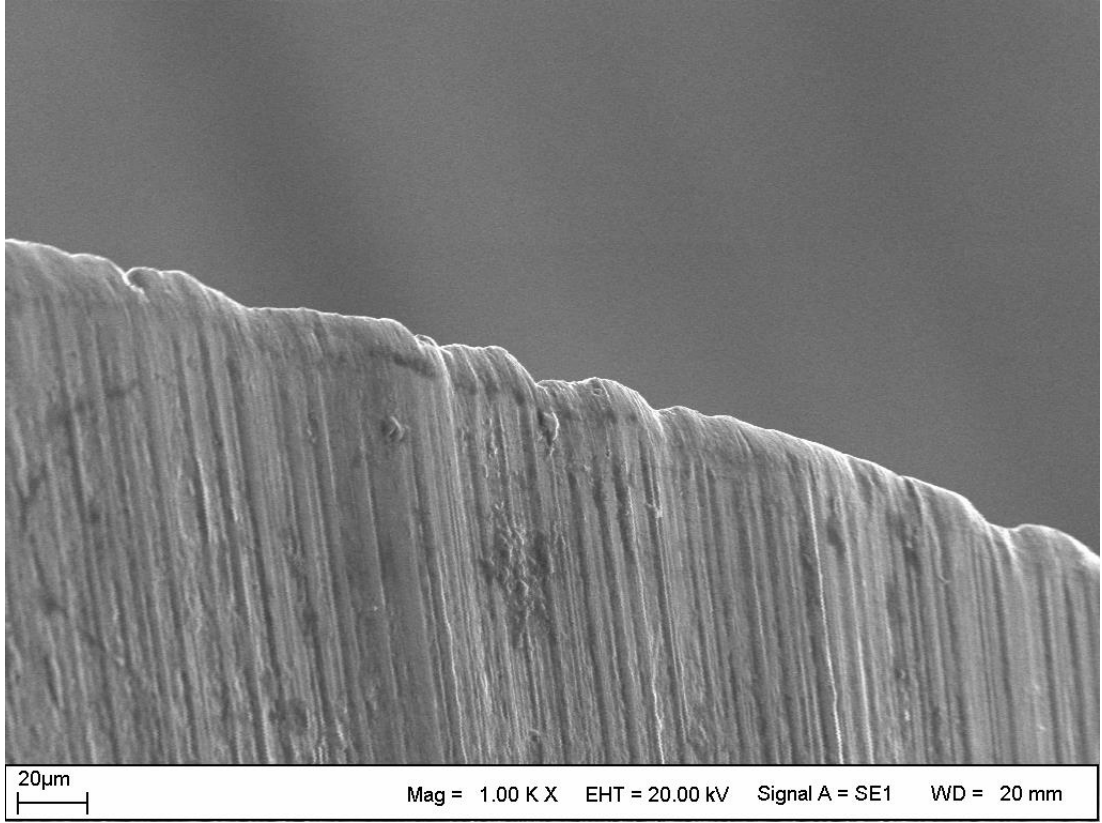
Numunelerin imalatı sırasında takımlarda ve yüzeyde oluşan anlık sıcaklık değişimlerinin ölçmek ve buna bağlı olarak takımlardaki aşınmaları yorumlamak için numunelerin imalatı termal kamera ile kaydedilmiştir. İmalat esnasında alınan videolar ve resimler TESTO yazılımı ile işlenerek sıcaklık değişimlerinin grafikleri oluşturulmuştur. 1. Numunenin imalatı esnasında finish işlemede alınan termal görüntü şekil 4.5’de verilmiştir. Benzer şekilde diğer numunelerden alınan termal görüntüler Ek-4’de verilmiştir.



**Şekil 4.5.** 1. Numunenin Finish İşlenmesi Esnasında Alınan Termal Görüntü

#### **4.4. Parmak Freze Çakılarındaki Aşınmaların İncelenmesi**

Serbest şekilli yüzeyler aynı takım yolları kullanılarak imal edildiğinden kaba işleme, ara kaba işleme ve finish işlemede kullanılan Ø12mm, Ø10mm ve Ø8mm ölçülerindeki parmak freze çakılarının kesici ağızlarındaki aşınmaları görmek amacıyla TEM cihazı kullanılarak kesici ağızlardan 40/1, 100/1, 500/1, 1000/1, 2500/1 ölçeklerinde resimler alınmıştır. Ancak serbest şekilli yüzeylerin imalatında oluşan form hatalarının büyük çoğunluğu finish işlemede gerçekleştiğinden numunelerin finish işlenmesinde kullanılan parmak freze çakılarındaki aşınmalar incelenmiştir. Şekil 4.6'da TEM cihazı ile 1. numuneye ait Ø8mm ölçüsündeki küresel parmak freze çakısının kesici ağzından alınan 1000/1 ölçeğindeki resim verilmiştir.



**Şekil 4.6.** 1. Numune Ø8mm Parmak Freze Çakısı

Şekil 4.6 'da 1. Numunenin imalatında finish işlemede kullanılmış Ø8 mm küresel parmak freze çakısının kesici ağzından alınan 1000/1 ölçeğindeki resmi verilmiştir. Şekil 4.6 incelendiğinde sürtünme ile ortaya çıkan yüksek sıcaklık nedeniyle kesici ağızda oluşan aşınma ve yığıntı talaşlar görülmektedir.

Benzer şekilde Ø12mm, Ø10mm ve ölçülerindeki parmak freze çakılarının kesici ağızlarından TEM cihazı ile alınan resimleri Ek-5'de verilmiştir.

## **5. TARTIŞMA, SONUÇ VE ÖNERİLER**

Bu çalışmada; yapılan literatür araştırması ve deneyler sonucunda elde edilen veriler incelenerek çeşitli ölçümler yapıldı ve bu ölçümler sonucunda serbest şekilli yüzeylerin imalatında kullanılan parmak freze çakıların yüzeylerde oluşan form hatalarına etkileri incelenmiştir.

### **5.1. Yüzeyin 3B Taranması ve Referans Yüzey ile Karşılaştırılması**

CAD ortamında tasarlanan serbest şekilli yüzeyin farklı kesici takımlarla üretimi CAM ortamında gerçekleştirilmiştir. Elde edilen veriler 3B tarayıcı ile taranarak CAD ortamındaki referans yüzey ile karşılaştırılmıştır.

Bu bölümde elde edilen yüzey form hataları her bir numune için ve bölgesel olarak değerlendirilmiştir. Değerlendirmede, sapma miktarları ve toplam sapma miktarları baz alınarak kullanılan takımların performansları karşılaştırılmış, bölgeler ve numunelere göre sıralama yapılarak en iyi ve en kötü sonucu veren durumlar değerlendirilmiştir.

Bu değerlendirme dikkate alınarak tablo 5,1'den tablo 5,9'akadar her bir bölge için tarama ölçüm sonuçları  $\pm 0,05$  mm toleransı aşan ölçümler kırmızı gösterilerek verilmiştir. Bu tablolardaki bütün numunelerde aynı sayıda ve aynı koordinatta ölçüm alınmasına dikkat edilmiştir.

**Tablo 5.1.** Numunelerin 1.Bölgesine Ait Sapma Değerleri

ÖLÇÜM NOKTASI	NUMUNE NUMARALARI						
	1	2	3	4	5	6	7
<b>CMP1:1</b>	0,0394	0,026	0,1125	0,0099	-0,0632	0,0264	0,0621
<b>CMP1:2</b>	0,032	0,0328	0,127	0,0295	-0,0463	0,0815	0,1134
<b>CMP1:3</b>	0,0181	0,007	0,1093	0,023	-0,035	0,0875	0,1279
<b>CMP1:4</b>	0,0029	-0,0054	0,0506	-0,006	-0,068	-0,0139	0,0089
<b>CMP1:5</b>	0,034	0,0237	0,0957	0,0295	-0,0313	0,08	0,0825
<b>CMP1:6</b>	0,0294	0,0262	0,0967	0,0394	-0,0091	0,1114	0,1192
<b>CMP1:7</b>	-0,0055	-0,0156	0,0259	-0,0052	-0,0537	0,0046	-0,009
<b>CMP1:8</b>	0,0532	0,0387	0,0839	0,0362	0,0391	0,1015	0,1153
<b>CMP1:9</b>	0,0204	0,032	0,0723	0,0275	0,0237	0,1359	0,1236
<b>CMP1:10</b>	-0,0022	-0,0139	0,0043	-0,003	-0,0301	0,0123	-0,01
<b>CMP1:11</b>	0,0301	0,0249	0,05	0,0289	0,0579	0,1016	0,1042
<b>Sapma Toplamları</b>	<b>0,0532</b>	<b>0</b>	<b>0,798</b>	<b>0</b>	<b>0,2428</b>	<b>0,6994</b>	<b>0,8482</b>
<b>Tolerans Dışı Değer Sayısı</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>9</b>	<b>0</b>	<b>4</b>	<b>7</b>	<b>8</b>

\*Tablodaki değerlerin birimi mm'dir.

1.bölgede 77 ölçüm noktası içerisinde 29 noktada sapma değeri  $\pm 0,05$  mm 'den fazladır. Tolerans değerini aşan sapma değerlerinin toplamı 2,6416 mm'dir.

Numunelerin 1. Bölgeleri incelendiğinde en yüksek sapma miktarının 3. Numunede olduğu görülmektedir. Buna göre 1. Bölgedeki form hatalarının büyükten küçüğe sıralanışı

3.Numune > 7.Numune > 6.Numune > 5.Numune > 1.Numune > 2.Numune = 4.Numune şeklindedir.

**Tablo 5.2.** Numunelerin 2.Bölgesine Ait Sapma Değerleri

ÖLÇÜM NOKTASI	NUMUNE NUMARALARI						
	1	2	3	4	5	6	7
<b>CMP2:1</b>	-0,0445	-0,0238	-0,0062	-0,0032	-0,011	0,0009	0,0256
<b>CMP2:2</b>	-0,0354	-0,0287	0,033	-0,0083	-0,0441	0,0359	0,0725
<b>CMP2:3</b>	-0,0236	-0,0314	0,0617	-0,0115	-0,0616	0,0469	0,0943
<b>CMP2:4</b>	-0,0096	-0,0357	0,0743	-0,003	-0,0608	0,0629	0,0906
<b>CMP2:5</b>	-0,0138	-0,0099	0,0512	0,0055	-0,0501	0,0715	0,0736
<b>CMP2:6</b>	-0,0184	-0,0322	0,0259	-0,0001	-0,0295	0,0594	0,0645
<b>CMP2:7</b>	-0,0352	-0,0282	-0,0126	-0,0036	0,001	0,0475	0,0375
<b>CMP2:8</b>	-0,0112	-0,0246	0,0189	-0,0058	-0,0014	0,0738	0,0648
<b>CMP2:9</b>	-0,0136	-0,0152	0,0295	-0,0052	-0,0304	0,0833	0,0731
<b>CMP2:10</b>	0,0084	-0,0342	0,0813	0,0087	-0,0629	0,0673	0,0847
<b>Sapma Toplamları</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0,2685</b>	<b>0</b>	<b>0,2354</b>	<b>0,4182</b>	<b>0,6181</b>
<b>Tolerans Dışı Değer Sayısı</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>4</b>	<b>0</b>	<b>4</b>	<b>6</b>	<b>8</b>

\*Tablodaki değerlerin birimi mm'dir.

2.bölgede 70 ölçüm noktası içerisinde 22 noktada sapma değeri  $\pm 0,05$  mm 'den fazladır. Tolerans değerini aşan sapma değerlerinin toplamı 1,5402 mm'dir.

Numunelerin 2. Bölgeleri incelendiğinde en yüksek sapma miktarının 7. Numunede olduğu görülmektedir. Buna göre 2. Bölgedeki form hatalarının büyükten küçüğe sıralanışı

7.Numune > 6.Numune > 5.Numune = 4.Numune > 1.Numune = 2.Numune = 3.Numune şeklindedir.

**Tablo 5.3.** Numunelerin 3.Bölgesine Ait Sapma Değerleri

ÖLÇÜM NOKTASI	NUMUNE NUMARALARI						
	1	2	3	4	5	6	7
CMP3:1	0,0007	0,0022	-0,0221	-0,0109	0,0134	0,0038	-0,033
CMP3:2	0,0456	-0,0071	0,041	0,0185	0,0341	0,054	0,0544
CMP3:3	0,0317	0,0004	0,0834	0,0407	-0,0276	0,0917	0,0779
CMP3:4	0,0384	0,0154	0,0181	0,0102	0,0217	0,0411	-0,0047
CMP3:5	0,0217	-0,0117	0,0412	0,0155	-0,028	0,0492	0,0246
CMP3:6	0,0511	0,0167	0,0293	0,0318	-0,0081	-0,0186	-0,0434
CMP3:7	0,0491	-0,0036	0,0639	0,0261	-0,0441	-0,0083	-0,0128
CMP3:8	0,052	-0,0028	0,1002	0,0299	-0,062	0,0088	0,032
CMP3:9	0,0162	-0,0031	0,0488	0,0181	-0,0235	0,0837	0,0642
CMP3:10	0,0236	-0,0062	0,0324	0,0055	-0,0115	0,0589	0,0184
CMP3:11	0,0316	-0,0048	0,0832	0,0277	-0,0538	0,0414	0,0402
<b>Sapma Toplamları</b>	<b>0,1031</b>	<b>0</b>	<b>0,3307</b>	<b>0</b>	<b>0,1158</b>	<b>0,2883</b>	<b>0,1965</b>
<b>Tolerans Dışı Değer Sayısı</b>	<b>2</b>	<b>0</b>	<b>4</b>	<b>0</b>	<b>2</b>	<b>4</b>	<b>3</b>

\*Tablodaki değerlerin birimi mm'dir.

3.bölgede 77 ölçüm noktası içerisinde 15 noktada sapma değeri  $\pm 0,05$  mm 'den fazladır. Tolerans değerini aşan sapma değerlerinin toplamı 1,0344mm'dir.

Numunelerin 3. Bölgeleri incelendiğinde en yüksek sapma miktarının 3. ve 6. Numunede olduğu görülmektedir. Buna göre 3. Bölgedeki form hatalarının büyükten küçüğe sıralanışı

3.Numune = 6.Numune > 7.Numune > 5.Numune = 1.Numune > 2.Numune = 4.Numune şeklindedir.



**Tablo 5.4.** Numunelerin 4.Bölgesine Ait Sapma Değerleri

ÖLÇÜM NOKTASI	NUMUNE NUMARALARI						
	1	2	3	4	5	6	7
<b>CMP4:1</b>	-0,0195	-0,0351	-0,0488	-0,0187	-0,0134	-0,0832	-0,0891
<b>CMP4:2</b>	0,0113	-0,0119	-0,0313	0,0104	0,0202	-0,0545	-0,0665
<b>CMP4:3</b>	0,0316	-0,011	-0,0093	0,0253	0,0135	0,0074	-0,0378
<b>CMP4:4</b>	0,0092	-0,0013	-0,0442	0,0096	0,0455	0,0069	-0,0438
<b>CMP4:5</b>	-0,0136	-0,0171	-0,0597	-0,0105	0,0169	-0,0886	-0,0888
<b>CMP4:6</b>	-0,0022	-0,0094	-0,0582	0,0129	0,0415	-0,0367	-0,0682
<b>CMP4:7</b>	0,0121	0,0096	-0,0308	0,0059	0,0627	0,0341	-0,0165
<b>CMP4:8</b>	-0,0334	-0,0089	-0,0649	-0,0054	0,0219	-0,0838	-0,0797
<b>CMP4:9</b>	-0,0014	0,0133	-0,0364	-0,0023	0,0613	0,0343	-0,0143
<b>Sapma Toplamları</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0,1828</b>	<b>0</b>	<b>0,124</b>	<b>0,3101</b>	<b>0,3923</b>
<b>Tolerans Dışı Değer Sayısı</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>3</b>	<b>0</b>	<b>2</b>	<b>4</b>	<b>5</b>

\*Tablodaki değerlerin birimi mm'dir.

4.bölgede 63 ölçüm noktası içerisinde 14 noktada sapma değeri  $\pm 0,05$  mm 'den fazladır. Tolerans değerini aşan sapma değerlerinin toplamı 1,0092 mm'dir.

Numunelerin 4. Bölgeleri incelendiğinde en yüksek sapma miktarının 7. Numunede olduğu görülmektedir. Buna göre 4. Bölgedeki form hatalarının büyükten küçüğe sıralanışı

7.Numune > 6.Numune > 3.Numune > 5.Numune > 1.Numune = 2.Numune = 4.Numune şeklindedir.

**Tablo 5.5.** Numunelerin 5.Bölgesine Ait Sapma Değerleri

ÖLÇÜM NOKTASI	NUMUNE NUMARALARI						
	1	2	3	4	5	6	7
<b>CMP5:1</b>	-0,0272	0,0251	-0,0241	0,0034	0,0205	0,006	-0,0047
<b>CMP5:2</b>	-0,0429	0,0097	-0,0548	-0,0139	0,0135	-0,066	-0,0564
<b>CMP5:3</b>	-0,0387	-0,0023	-0,0484	-0,0122	0,0083	-0,0611	-0,0503
<b>CMP5:4</b>	-0,0585	0,0054	-0,0377	-0,0245	-0,0095	-0,0456	-0,0246
<b>CMP5:5</b>	-0,0514	0,0014	-0,0589	-0,0277	-0,0006	-0,0877	-0,0595
<b>CMP5:6</b>	-0,0326	0,0022	-0,0382	-0,0075	0,0061	-0,0621	-0,0358
<b>CMP5:7</b>	-0,0511	-0,0016	-0,0547	-0,0186	-0,0027	-0,0575	-0,0622
<b>CMP5:8</b>	-0,0424	0,002	-0,0577	-0,0263	0,0039	-0,1004	-0,0784
<b>CMP5:9</b>	-0,0433	-0,0076	-0,0736	-0,0252	0,0104	-0,0148	-0,0537
<b>CMP5:10</b>	-0,0133	0,028	-0,0412	0,0133	0,0287	-0,0391	-0,0566
<b>Sapma Toplamları</b>	<b>0,161</b>	<b>0</b>	<b>0,2997</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0,4348</b>	<b>0,4171</b>
<b>Tolerans Dışı Değer Sayısı</b>	<b>3</b>	<b>0</b>	<b>5</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>6</b>	<b>7</b>

\*Tablodaki değerlerin birimi mm'dir.

5.bölgede 70 ölçüm noktası içerisinde 21 noktada sapma değeri  $\pm 0,05$  mm 'den fazladır. Tolerans değerini aşan sapma değerlerinin toplamı 1,3126 mm'dir.

Numunelerin 5. Bölgeleri incelendiğinde en yüksek sapma miktarının 7. Numunede olduğu görülmektedir. Buna göre 5. Bölgedeki form hatalarının büyükten küçüğe sıralanışı

7.Numune > 6.Numune > 3.Numune > 1.Numune > 2.Numune = 4.Numune = 5.Numune şeklindedir.

**Tablo 5.6.** Numunelerin 6.Bölgesine Ait Sapma Değerleri

ÖLÇÜM NOKTASI	NUMUNE NUMARALARI						
	1	2	3	4	5	6	7
<b>CMP6:1</b>	0,0728	0,0469	0,0257	0,0541	0,1104	0,0628	0,0423
<b>CMP6:2</b>	0,0052	0,0248	-0,0358	0,0155	0,0277	-0,0372	-0,0759
<b>CMP6:3</b>	-0,014	-0,0005	-0,0551	-0,0082	-0,0004	-0,0639	-0,0886
<b>CMP6:4</b>	0,0609	0,0385	0,0175	0,0446	0,07	0,0609	0,0107
<b>CMP6:5</b>	0,0571	0,0378	0,0339	0,0537	0,0191	-0,0355	-0,046
<b>CMP6:6</b>	0,0463	0,0396	0,01	0,0502	0,0306	-0,0198	-0,0531
<b>CMP6:7</b>	0,0397	0,0418	-0,0006	0,0374	0,0165	-0,073	-0,0738
<b>CMP6:8</b>	-0,0003	0,0154	-0,0424	-0,0022	0,0041	-0,0959	-0,1
<b>CMP6:9</b>	0,0108	0,0252	-0,0288	-0,0124	-0,013	-0,1407	-0,1193
<b>CMP6:10</b>	-0,0053	0,0103	-0,0424	-0,0078	-0,0107	-0,0988	-0,1064
<b>Sapma Toplamları</b>	<b>0,1908</b>	<b>0</b>	<b>0,0551</b>	<b>0,158</b>	<b>0,1804</b>	<b>0,569</b>	<b>0,6171</b>
<b>Tolerans Dışı Değer Sayısı</b>	<b>3</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>3</b>	<b>2</b>	<b>7</b>	<b>7</b>

\*Tablodaki değerlerin birimi mm'dir.

6.bölgede 70 ölçüm noktası içerisinde 23 noktada sapma değeri  $\pm 0,05$  mm 'den fazladır. Tolerans değerini aşan sapma değerlerinin toplamı 1,7974mm'dir.

Numunelerin 6. Bölgeleri incelendiğinde en yüksek sapma miktarının 6. ve 7. Numunede olduğu görülmektedir. Buna göre 6. Bölgedeki form hatalarının büyükten küçüğe sıralanışı

7.Numune = 6.Numune > 4.Numune = 1.Numune > 5.Numune > 3.Numune > 2.Numune şeklindedir.

**Tablo 5.7.** Numunelerin 7.Bölgesine Ait Sapma Değerleri

ÖLÇÜM NOKTASI	NUMUNE NUMARALARI						
	1	2	3	4	5	6	7
<b>CMP7:1</b>	0,0242	-0,02	0,0436	-0,0104	-0,0382	-0,0066	0,0114
<b>CMP7:2</b>	0,02	-0,0254	0,0241	0,0038	-0,0282	0,0113	-0,0004
<b>CMP7:3</b>	0,0379	0,0027	0,0078	0,0271	0,0285	0,0388	-0,0012
<b>CMP7:4</b>	0,0309	-0,0015	0,0527	0,008	-0,0236	0,0363	0,0529
<b>CMP7:5</b>	0,0175	-0,0066	0,0128	0,0006	0,0063	0,0578	0,0266
<b>CMP7:6</b>	0,0284	-0,0048	0,0108	-0,0093	0,0332	0,0558	0,0484
<b>CMP7:7</b>	0,0277	0,0098	-0,0137	0,0156	0,1067	0,0435	0,0205
<b>CMP7:8</b>	0,0272	0,0175	0,0475	0,0016	-0,0128	0,0342	0,0639
<b>CMP7:9</b>	0,0113	0,0184	0,0216	0,0005	0,0213	0,074	0,064
<b>CMP7:10</b>	0,0299	0,0331	0,0111	0,016	0,0782	0,0575	0,068
<b>Sapma Toplamları</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0,0527</b>	<b>0</b>	<b>0,1849</b>	<b>0,2451</b>	<b>0,2488</b>
<b>Tolerans Dışı Değer Sayısı</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>2</b>	<b>4</b>	<b>4</b>

\*Tablodaki değerlerin birimi mm'dir.

7.bölgede 70 ölçüm noktası içerisinde 11 noktada sapma değeri  $\pm 0,05$  mm 'den fazladır. Tolerans değerini aşan sapma değerlerinin toplamı 0,7315 mm'dir.

Numunelerin 7. Bölgeleri incelendiğinde en yüksek sapma miktarının 6. ve 7. Numunede olduğu görülmektedir. Buna göre 7. Bölgedeki form hatalarının büyükten küçüğe sıralanışı

7.Numune = 6.Numune > 5.Numune > 3.Numune > 1.Numune = 2.Numune = 4.Numune şeklindedir.

**Tablo 5.8.** Numunelerin 8.Bölgesine Ait Sapma Değerleri

ÖLÇÜM NOKTASI	NUMUNE NUMARALARI						
	1	2	3	4	5	6	7
<b>CMP8:1</b>	-0,0199	0,0149	0,021	-0,0182	-0,0281	-0,0002	0,0422
<b>CMP8:2</b>	-0,0202	0,0263	-0,011	-0,0012	0,012	0,0197	0,0161
<b>CMP8:3</b>	-0,0585	0,0054	-0,0377	-0,0245	-0,0095	-0,0456	-0,0246
<b>CMP8:4</b>	-0,0539	-0,0002	-0,0365	-0,0232	-0,0218	-0,0044	-0,0135
<b>CMP8:5</b>	-0,0467	-0,001	-0,003	-0,048	-0,0528	-0,0475	0,0206
<b>CMP8:6</b>	-0,0331	-0,0293	-0,0164	-0,027	-0,0485	-0,0121	0,0102
<b>CMP8:7</b>	-0,0476	0,0059	-0,0085	-0,0302	-0,0368	-0,0315	0,0131
<b>CMP8:8</b>	-0,0358	-0,0195	-0,0413	-0,0288	-0,0226	0,0154	0,0109
<b>CMP8:9</b>	-0,0433	-0,0076	-0,0736	-0,0252	0,0104	-0,0148	-0,0537
<b>CMP8:10</b>	0,0111	-0,008	-0,0192	-0,0057	0,0492	0,0227	0,0231
<b>Sapma Toplamları</b>	<b>0,1124</b>	<b>0</b>	<b>0,0736</b>	<b>0</b>	<b>0,0528</b>	<b>0</b>	<b>0,0537</b>
<b>Tolerans Dışı Değer Sayısı</b>	<b>2</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>1</b>

\*Tablodaki değerlerin birimi mm'dir.

8.bölgede 70 ölçüm noktası içerisinde 5 noktada sapma değeri  $\pm 0,05$  mm 'den fazladır. Tolerans değerini aşan sapma değerlerinin toplamı 0,2925 mm'dir.

Numunelerin 8. Bölgeleri incelendiğinde en yüksek sapma miktarının 1. Numunede olduğu görülmektedir. Buna göre 8. Bölgedeki form hatalarının büyükten küçüğe sıralanışı

1.Numune > 3.Numune = 5.Numune = 7.Numune > 2.Numune = 4.Numune = 6.Numune şeklindedir.

**Tablo 5.9.** Numunelerin 9. Bölgesine Ait Sapma Değerleri

ÖLÇÜM NOKTASI	NUMUNE NUMARALARI						
	1	2	3	4	5	6	7
<b>CMP9:1</b>	0,0368	-0,0456	0,0445	0,0181	-0,035	-0,0023	0,0146
<b>CMP9:2</b>	0,0544	-0,013	0,0568	0,047	0,001	0,0125	0,0138
<b>CMP9:3</b>	0,0607	0,0233	0,0384	0,064	0,0279	0,0135	-0,0166
<b>CMP9:4</b>	0,0655	0,0158	0,0562	0,0717	0,0301	0,0359	0,0069
<b>CMP9:5</b>	0,0074	-0,0627	0,007	-0,0029	-0,0591	0,0016	-0,0006
<b>CMP9:6</b>	0,0559	-0,0555	-0,0007	-0,0173	-0,0522	-0,0001	0,0168
<b>CMP9:7</b>	-0,0166	-0,0376	-0,0186	-0,0043	-0,0231	0,0346	0,0095
<b>CMP9:8</b>	-0,007	0,0192	0,0307	0,0404	0,0512	0,066	0,0462
<b>CMP9:9</b>	0,0669	0,0425	0,0291	0,0484	0,0783	0,0508	0,0292
<b>CMP9:10</b>	0,0761	-0,0105	0,0011	0,0148	0,0004	0,0481	0,0115
<b>Sapma Toplamları</b>	<b>0,3795</b>	<b>0,1182</b>	<b>0,113</b>	<b>0,1357</b>	<b>0,2408</b>	<b>0,1168</b>	<b>0</b>
<b>Tolerans Dışı Değer Sayısı</b>	<b>6</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>4</b>	<b>2</b>	<b>0</b>

\*Tablodaki değerlerin birimi mm'dir.

9.bölgede 70 ölçüm noktası içerisinde 18 noktada sapma değeri  $\pm 0,05$  mm 'den fazladır. Tolerans değerini aşan sapma değerlerinin toplamı 1,104 mm'dir.

Numunelerin 9. Bölgeleri incelendiğinde en yüksek sapma miktarının 1. Numunede olduğu görülmektedir. Buna göre 9. Bölgedeki form hatalarının büyükten küçüğe sıralanışı

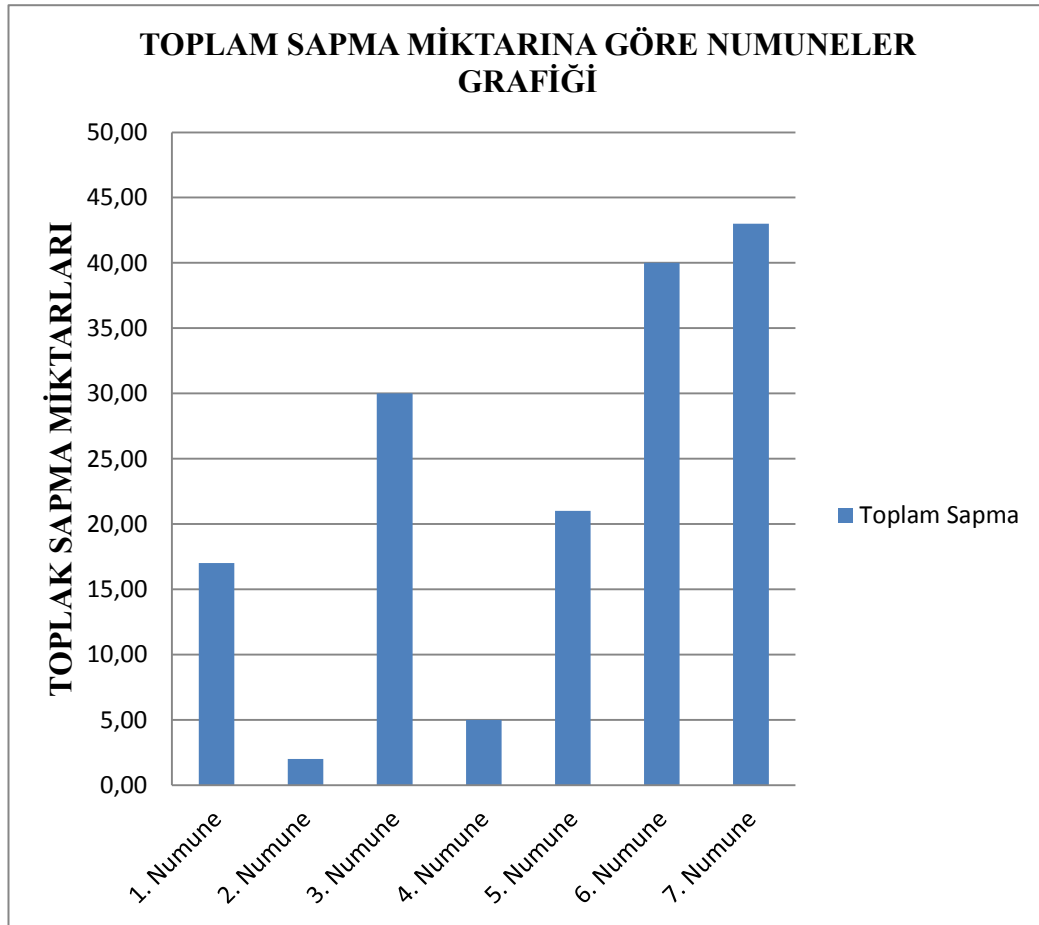
1.Numune > 5.Numune > 2.Numune = 3.Numune= 4.Numune = 6.Numune > 7.Numune şeklindedir.

**Tablo 5.10.** Numunelerdeki Toplam Sapma Miktarları

		NUMUNE NUMARALARI							TOPLAM SAPMA	TOPLAM SAPMA (ADET)
		1	2	3	4	5	6	7		
1.BÖLGE	SAPMA	0,0532	0	0,798	0	0,2428	0,6994	0,8482	<b>2,6416</b>	
	SAPMA (ADET)	1	0	9	0	4	7	8		<b>29</b>
2.BÖLGE	SAPMA	0	0	0,2685	0	0,2354	0,4182	0,6181	<b>1,5402</b>	
	SAPMA (ADET)	0	0	4	0	4	6	8		<b>22</b>
3.BÖLGE	SAPMA	0,1031	0	0,3307	0	0,1158	0,2883	0,1965	<b>1,0344</b>	
	SAPMA (ADET)	2	0	4	0	2	4	3		<b>15</b>
4.BÖLGE	SAPMA	0	0	0,1828	0	0,124	0,3101	0,3923	<b>1,0092</b>	
	SAPMA (ADET)	0	0	3	0	2	4	5		<b>14</b>
5.BÖLGE	SAPMA	0,161	0	0,2997	0	0	0,4348	0,4171	<b>1,3126</b>	
	SAPMA (ADET)	3	0	5	0	0	6	7		<b>21</b>
6.BÖLGE	SAPMA	0,1908	0	0,0551	0,158	0,1804	0,569	0,6171	<b>1,7974</b>	
	SAPMA (ADET)	3	0	1	3	2	7	7		<b>23</b>
7.BÖLGE	SAPMA	0	0	0,0527	0	0,1849	0,2451	0,2488	<b>0,7315</b>	
	SAPMA (ADET)	0	0	1	0	2	4	4		<b>11</b>
8.BÖLGE	SAPMA	0,1124	0	0,0736	0	0,0528	0	0,0537	<b>0,2925</b>	
	SAPMA (ADET)	2	0	1	0	1	0	1		<b>5</b>
9.BÖLGE	SAPMA	0,3795	0,1182	0,113	0,1357	0,2408	0,1168	0	<b>1,104</b>	
	SAPMA (ADET)	6	2	2	2	4	2	0		<b>18</b>
TOPLAM SAPMA		<b>1,8936</b>	<b>0,1182</b>	<b>2,1741</b>	<b>0,2937</b>	<b>1,3769</b>	<b>3,0817</b>	<b>3,3918</b>		
TOPLAM SAPMA (ADET)		<b>17</b>	<b>2</b>	<b>30</b>	<b>5</b>	<b>21</b>	<b>40</b>	<b>43</b>		

Tablo 5.10 dikkate alınarak en yüksekten en düşüğe form hataları sırasıyla;

7. Numune >6. Numune >3. Numune >5. Numune >1. Numune >4. Numune >2. Numune şeklinde sıralanmaktadır. Şekil 5,1'dede görüleceği üzere en kötü kesici takım performansını 7. Numunenin imalatında kullanılan takımlar, en iyi takım performansını ise 2. Numunenin imalatında kullanılan takımlar göstermiştir.

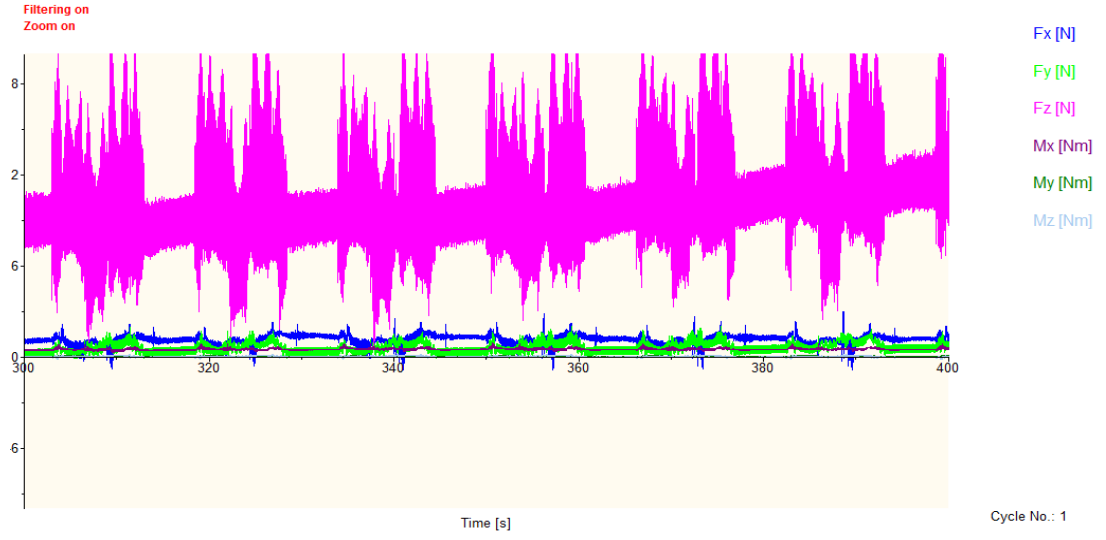


**Şekil 5.1.** Numunelerin Toplam Sapma Miktarına Göre Grafığı

## 5.2. Kuvvet Değişimlerinin İncelenmesi

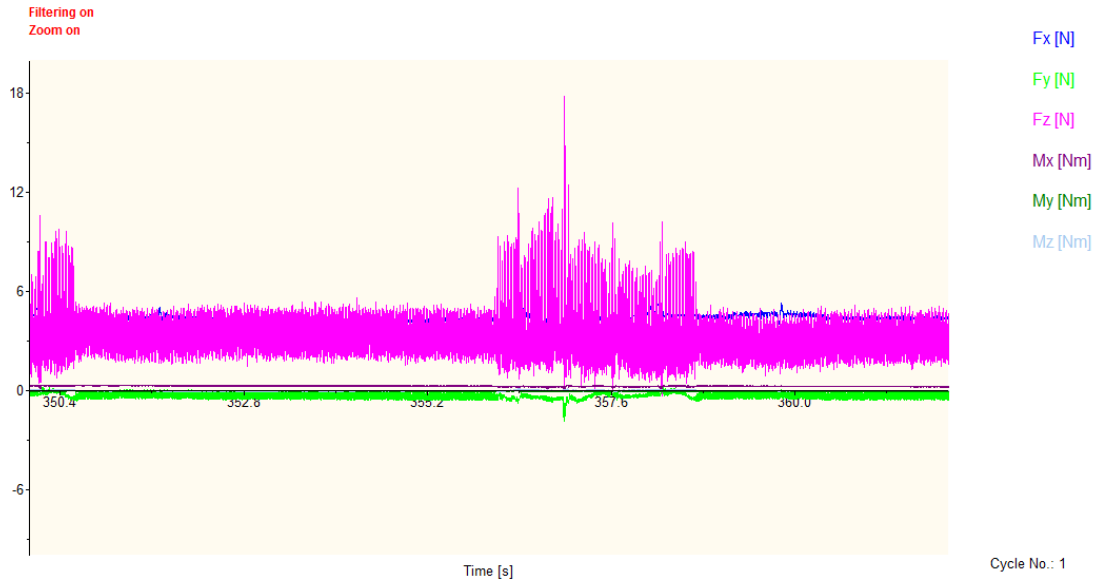
Serbest şekilli yüzeyin geometrisindeki inişler ve çıkışlar dinamometreden alınan kuvvet hareketleriyle karşılaştırılarak incelenmiştir. 2. Numunenin finish işlenmesinde Fz kuvvetindeki değişimleri şekil 5.2'de verilmiştir.





**Şekil 5.2.** 2. Numunenin Finish İşlenmesinde Fz Kuvvetindeki Değişimler

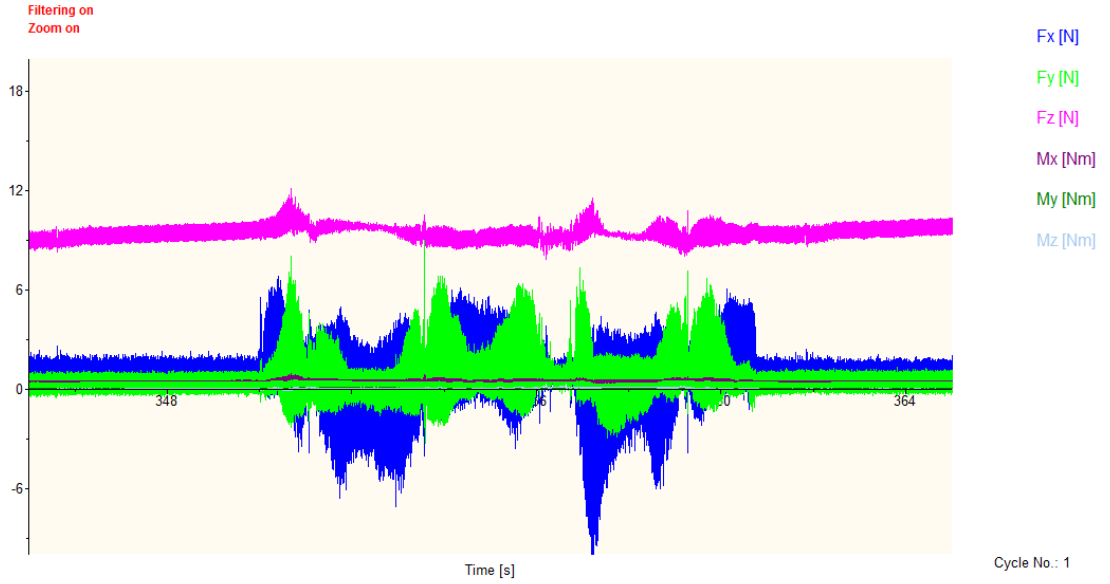
Fz Kuvvetindeki artma ve azalmalar serbest şekilli yüzeyin geometrisiyle eşleştirildiğinde; Fz kuvvetindeki artışlar takım tırmanışta iken, azalmalar takım inişte iken gerçekleşmiştir. İmalat sırasında dinamometreden alınan kuvvet değişim grafiğinde, takımın numune üzerinden eğri boyunca herhangi bir tam tur talaş kaldırması incelendiğinde Fz kuvvetindeki artış ve azalışlar daha net görülmektedir (Şekil 5.3).



**Şekil 5.3.** 2. Numunenin Finish İşlenmesinde Fz Kuvvetinin 350-362. Saniyeler Arasındaki Değişimi

Fz kuvvetindeki artışlar parmak freze çakısının ucundaki sürtünme direncini arttırarak kesme kuvvetinde de artışa sebep olmuştur.

Benzer şekilde x ve y yönündeki ilerleme Fx, Fy ilerleme kuvvetleri incelendiğinde yine takım tırmanışta iken Fx ve Fy ilerleme kuvvetlerinde en yüksek artış, takım inişte iken Fx ve Fy ilerleme kuvvetlerinde azalış gözlemlenmektedir. 2. Numunenin imalatında takımın numune üzerinden eğri boyunca herhangi bir tam tur talaş kaldırması incelendiğinde Fx ve Fy ilerleme kuvvetindeki değişimler daha net görülmektedir (Şekil 5.4).



**Şekil 5.4.** 2. Numunenin Finish İşlenmesinde Fx ve Fy İlerleme Kuvvetlerinin 350- 362. saniyeler arasındaki değişimi

Kesici takımın çapı arttıkça işleme süresi azalmakta, ilerleme ve kesme kuvvetleri artmaktadır. Kesme kuvvetlerindeki artış ise doğru orantılı olarak form hatalarını arttırmaktadır[8].

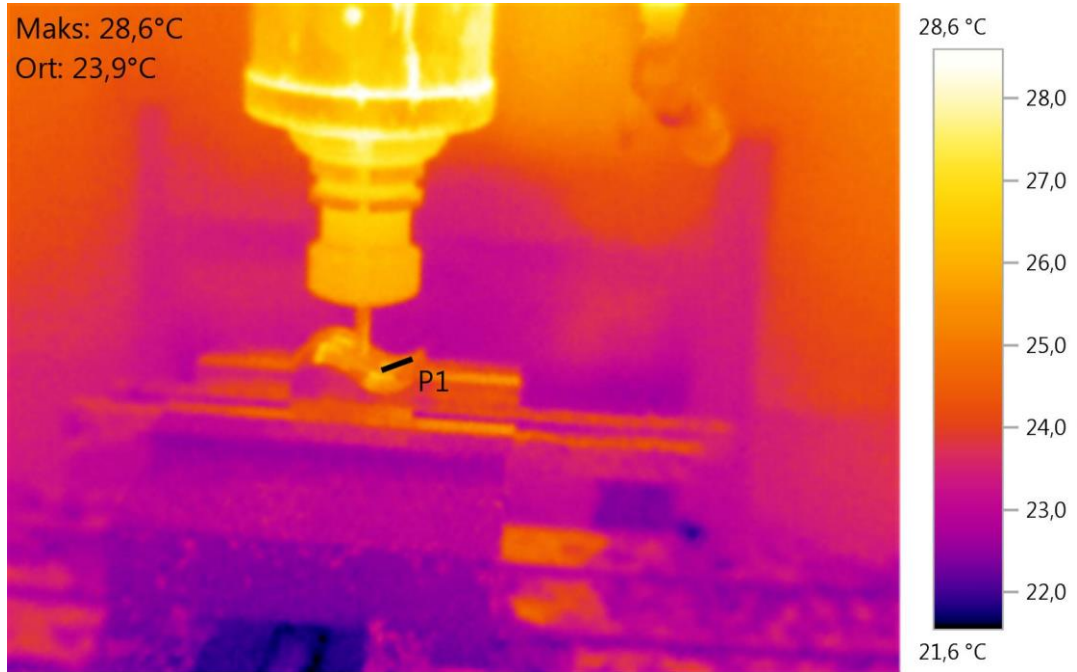
Tüm numunelerde yapılan kuvvet analizlerinden elde edilen sonuçlar Kurt ve arkadaşlarının serbest şekilli yüzeylerdeki form hataları ile ilgili yapmış oldukları çalışmayla örtüşmektedir. Yapılan gözlemler sonucunda takım tırmanışta iken ilerleme ve kesme kuvvetlerinin arttığı ve en yüksek değerlerine ulaştığı, takım inişte iken bu kuvvetlerin tırmanışa göre azaldığı görülmüştür. Yapılan deneylerde finish işlemede kullanılan parmak freze çakılarında oluşan kesme ve ilerleme

kuvvetlerindeki artış ile 3B tarayıcıdan alınan form hataları karşılaştırıldığında; küresel parmak freze çakısının numune üzerinden eğri boyunca herhangi bir tam tur talaş kaldırması esnasında kesme ve ilerleme kuvvetlerindeki artış, 3B tarayıcıdan alınan form hataları ile benzerlik göstermektedir.

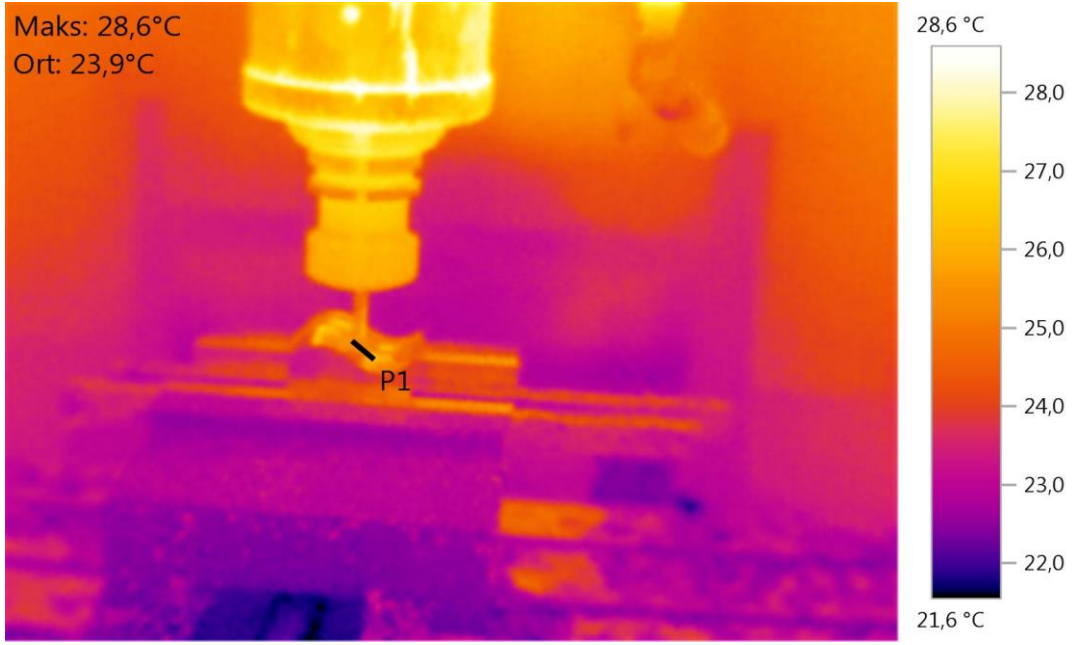
Kesme ve ilerleme kuvvetlerindeki en büyük artışlar büyükten küçüğe; 7. Numune >6. Numune >3. Numune >5. Numune >1. Numune >4. Numune >2. Numune şeklinde sıralanmaktadır. Sonuç olarak en çok form hatasının tespit edildiği numune aynı zamanda kesme ve ilerleme kuvvetlerinin en yüksek olduğu numune olarak tespit edilmiştir.

### 5.3. Termal Görüntülerin İncelenmesi

Serbest şekilli yüzeylerin finish işlenmesi esnasında kullanılan küresel parmak freze çakılarında sürtünme ve talaş yığılmalarından dolayı oluşan sıcaklık artışları gözlemlendi. Buna göre 1.numunenin finish işlenmesi esnasında alınan termal görüntüler şekil 5.5 ve şekil 5.6'da verilmiştir.

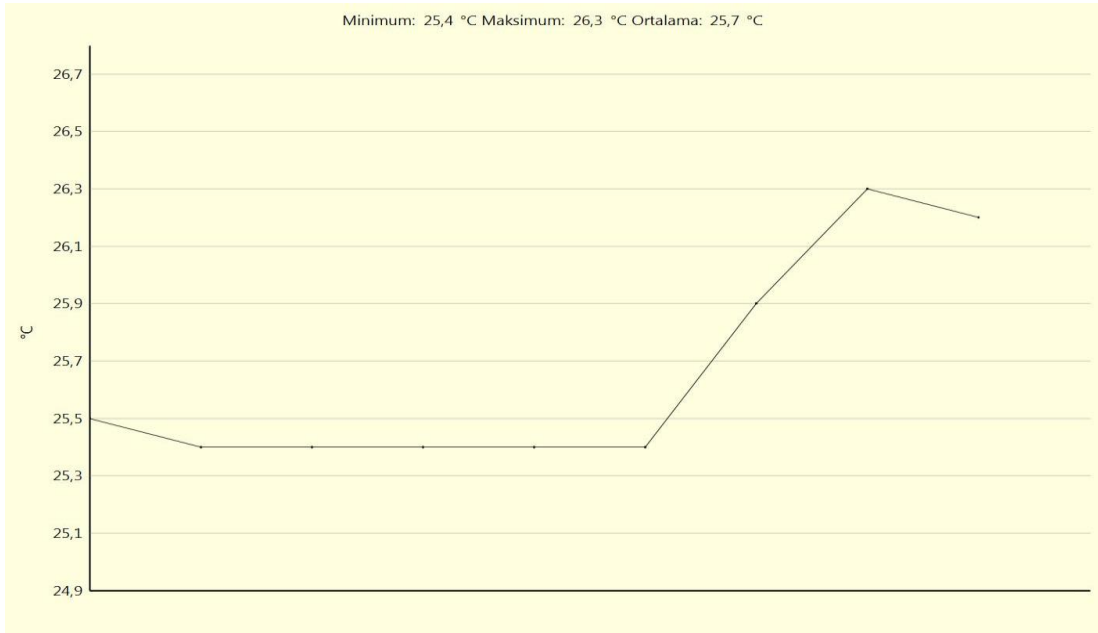


Şekil 5.5. Takım Tırmanışta İken Alınan Termal Görüntü

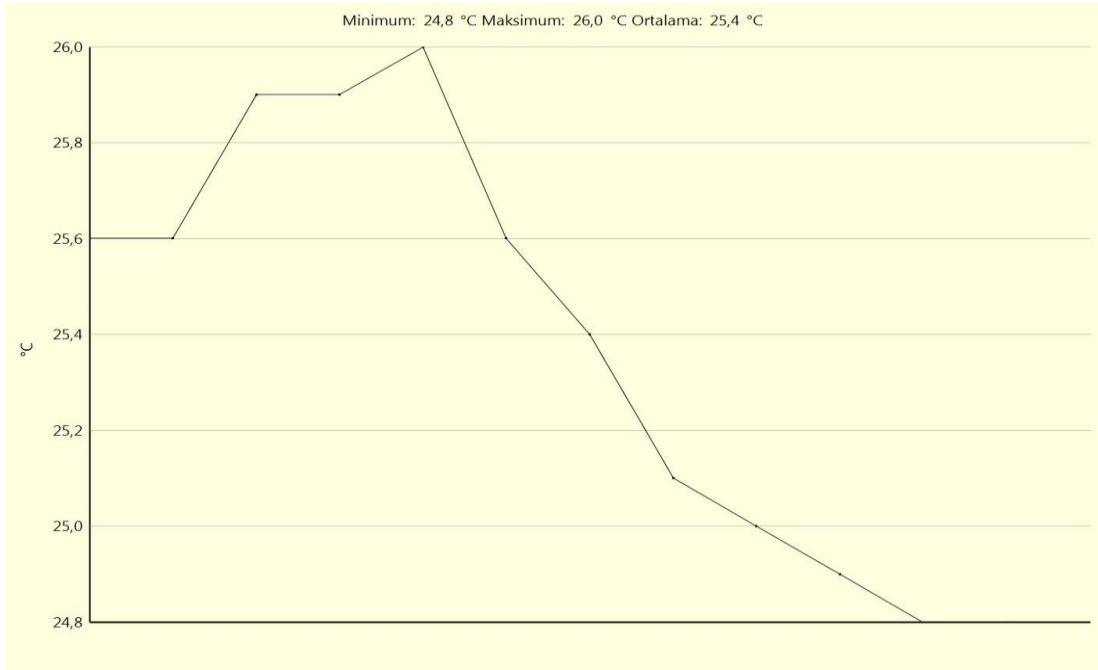


**Şekil 5.6.** Takım İnişte İken Alınan Termal Görüntü

Şekil 5.5 ve Şekil 5.6'daki görüntülerde tırmanış ve iniş hattına P1 çizgileri çekilmiş ve bu çizgiler üzerindeki sıcaklık değişimleri grafiğe dönüştürülmüştür.



**Şekil 5.7.** Takım Tırmanışta İken Sıcaklık Değişim Grafiği

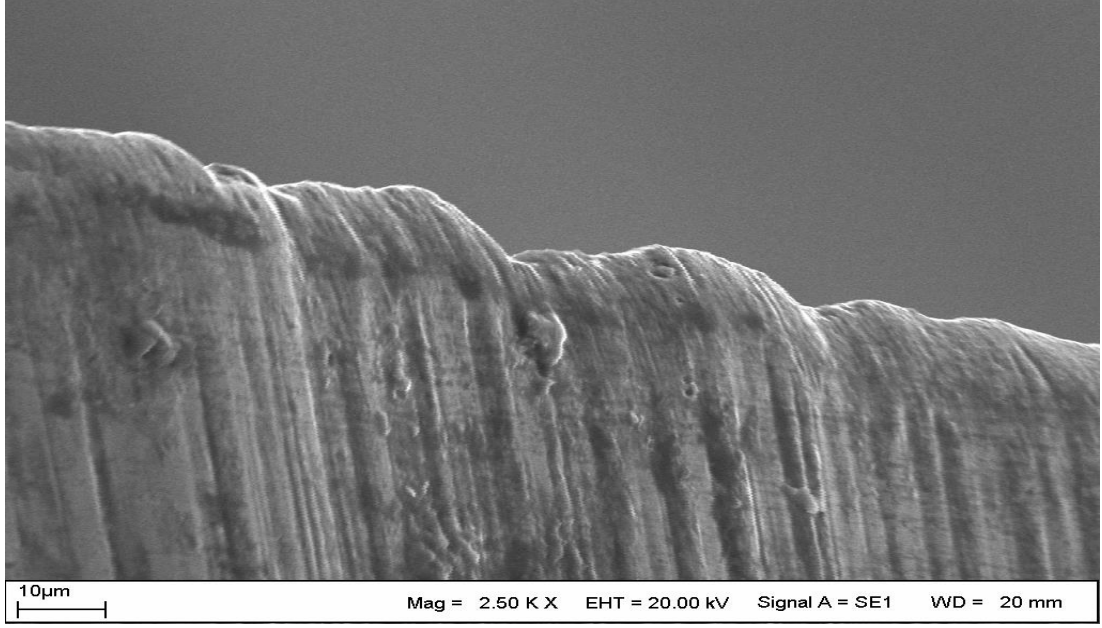


**Şekil 5.8.** Takım İnişte İken Sıcaklık Değişim Grafiği

Şekil 5.7 ve şekil 5.8’de görüleceği üzere tırmanışta iken sıcaklık artış göstermekte, takım inişte iken sıcaklık azalış göstermektedir. Bu sıcaklık değişiminden anlaşılacağı üzere takımda meydana gelen aşınma tırmanışta iken inişe göre daha fazladır.

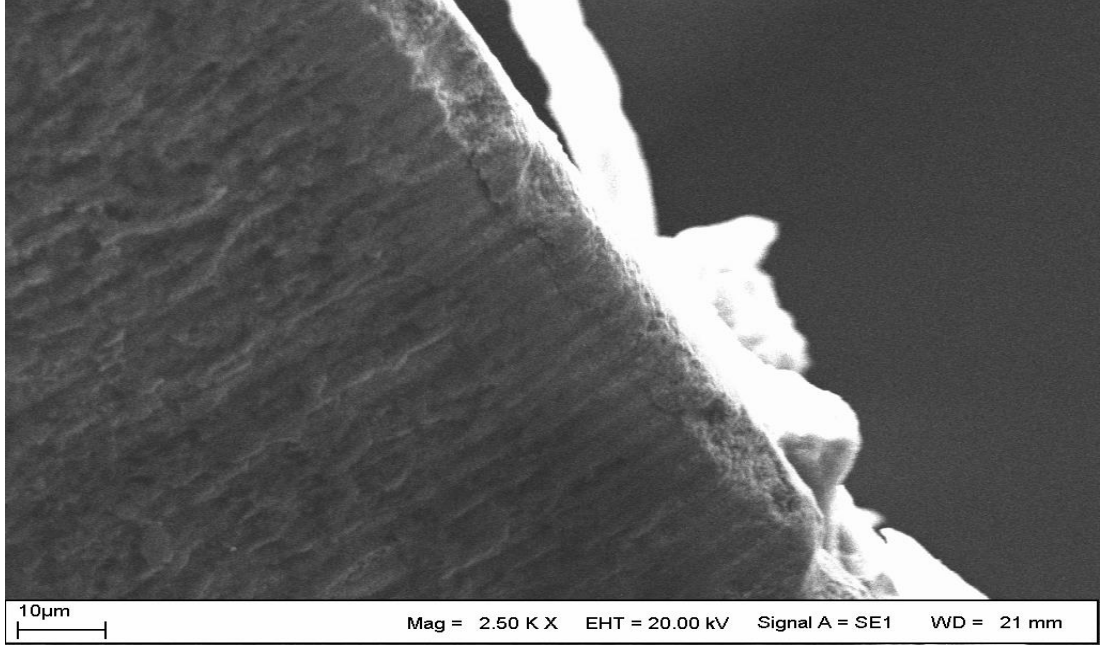
#### **5.4. Çakıların Kesici Ağzlarındaki Aşınmaların Karşılaştırılması**

Serbest şekilli yüzeylerin imalatında kullanılan parmak freze çakılarının performanslarının karşılaştırılması amacıyla çakıların kesici ağzlarındaki aşınmalar incelenmiştir. Şekil 5.9-15’de numunelerin finish işlenmesinde kullanılan Ø8mm ölçüsündeki parmak freze çakılarının kesici ağzlarından TEM cihazı ile alınan 2500/1 ölçeğindeki resimleri verilmiştir.



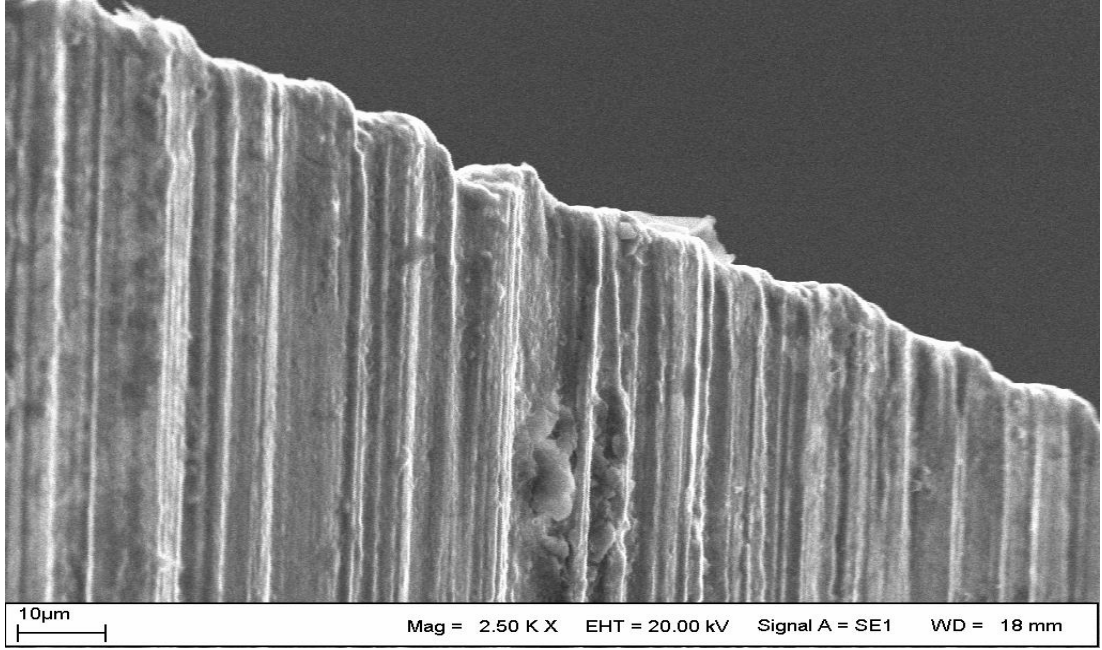
**Şekil 5.9.** 1. Numune Ø8mm Radyuslu Parmak Freze Çakısı

Şekil 5.9 incelendiğinde sürtünme ile ortaya çıkan yüksek sıcaklık nedeniyle kesici ağızda oluşan aşınma ve yığıntı talaşlar görülmektedir.



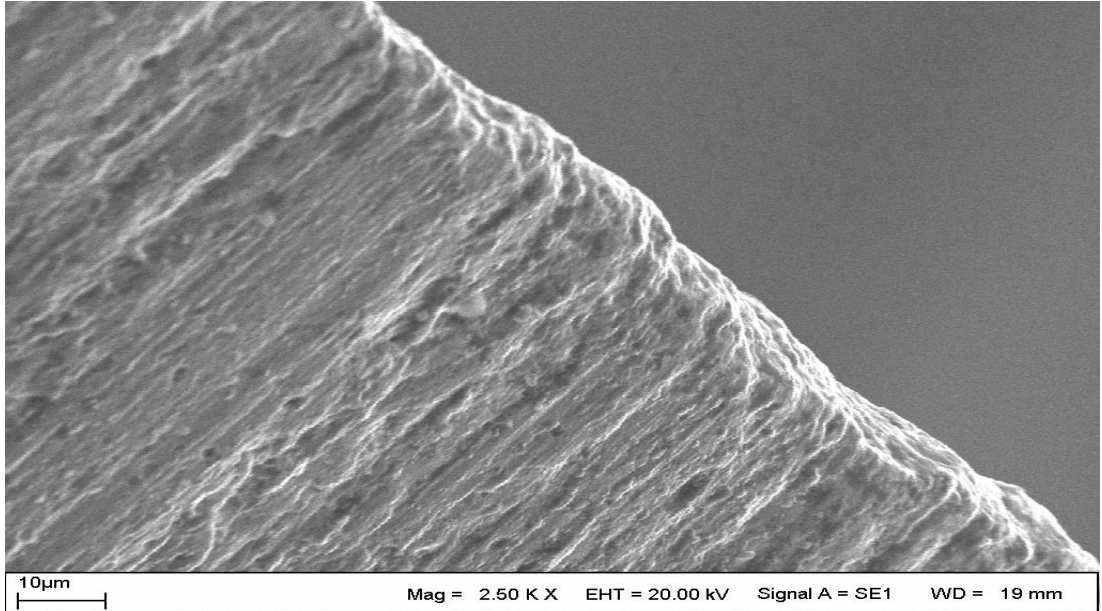
**Şekil 5.10.** 2. Numune Ø8mm Radyuslu Parmak Freze Çakısı

Şekil 5.10 incelendiğinde yığıntı talaşın oluşmadığı ve yer yer aşınmalar olduğu görülmektedir.



**Şekil 5.11.** 3. Numune Ø8mm Radyuslu Parmak Freze Çakısı

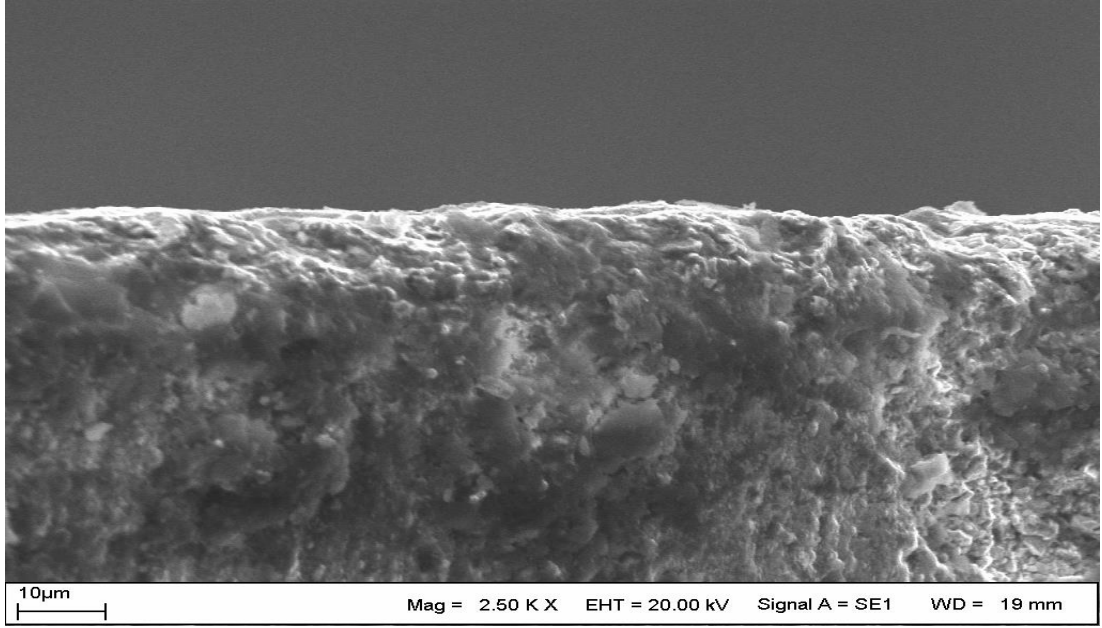
Şekil 5.11 incelendiğinde sürtünme ile ortaya çıkan yüksek sıcaklık nedeniyle kesici ağızda oluşan aşınma ve yığıntı talaşların 1. ve 2. Numunelerin imalatında kullanılan çakılara göre daha fazla olduğu görülmektedir.



**Şekil 5.12.** 4. Numune Ø8mm Radyuslu Parmak Freze Çakısı

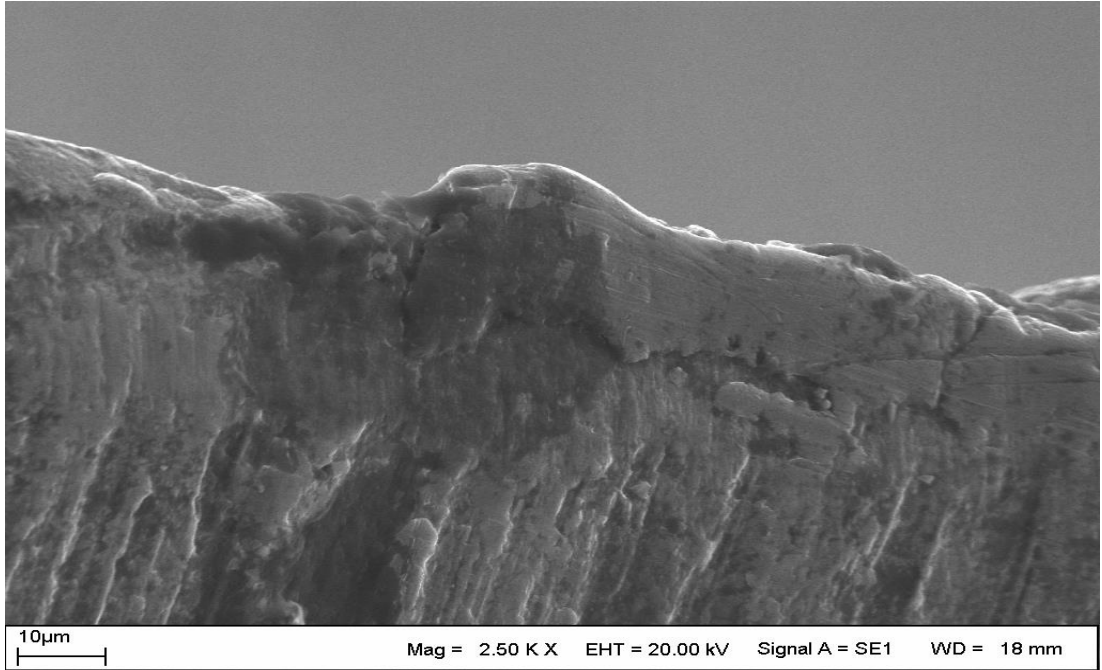
Şekil 5.12 incelendiğinde yığıntı talaşın oluşmadığı fakat bölgesel aşınmalar oluştuğu görülmektedir.





**Şekil 5.13.** 5. Numune Ø8mm Radyuslu Parmak Freze Çakısı

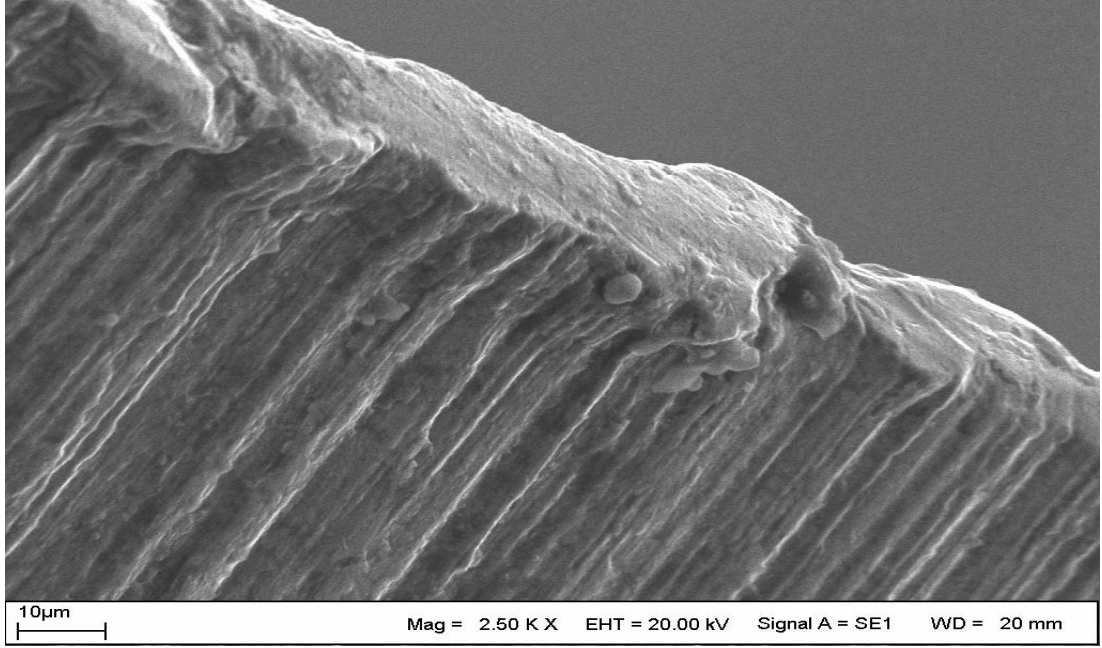
Şekil 5.13 incelendiğinde sürtünme nedeni ile oluşan sıcaklığa bağlı yüksek miktarda yığıntı talaş oluştuğu görülmektedir.



**Şekil 5.14.** 6. Numune Ø8mm Radyuslu Parmak Freze Çakısı

Şekil 5.14 incelendiğinde sürtünme nedeni ile oluşan sıcaklığa bağlı yüksek miktarda yığıntı talaş oluştuğu görülmektedir.





**Şekil 5.15.** 7. Numune Ø8mm Radyuslu Parmak Freze Çakısı

Şekil 5.15 incelendiğinde sürtünme nedeni ile oluşan sıcaklığa bağlı yüksek miktarda yığıntı talaş oluştuğu görülmektedir.

TEM görüntüleri incelendiğinde aşınmanın kesici kenar boyunca oluştuğu görülmektedir.

Şekil 5.9-15'den anlaşılacağı üzere deney; 3, deney 6 ve deney 7'de finish işlemede kullanılan Ø8mm parmak freze çakılarındaki aşınmaların diğer deneylerde finish işlemede kullanılan parmak freze çakılarındaki aşınmalardan fazla olduğu görülmüştür. Bu sonuçlara göre kesme kuvvetlerindeki değişimlere bağlı olarak meydana gelen adhesif aşınmanın neden olduğu kararsız talaş yığılmasının (BUE) takım ve malzeme üzerindeki etkisini arttırdığı düşünülmektedir.

Yapılarında birden fazla faz bulunduran pek çok alaşımın işlenmesinde deformasyon sertleşmesi nedeniyle kesici ağızlara talaş yapışarak BUE oluştuğu görülmektedir [20].

Al ve alaşımları birden fazla faz ihtiva ettiğinden kesici takımlarda şekil 5.13-15 'de görüldüğü gibi BUE oluşmuş ve buda yüzey kalitesini olumsuz etkilemiştir. Kesici takımda oluşan BUE kesici takımın geometrik yapısını olumsuz etkilediğinden

kesme işleminin kararlı ve ideal yapısını bozmaktadır. Yine kesici ağızlarda oluşan BUE ısıl gerilmenin ve kuvvetlerin etkisiyle koparken şekil 5.9 ve şekil 5.11de görüldüğü gibi kesme kenarlarında kırılmalara ve aşınmalara neden olmaktadır.

Buna göre; TEM cihazından alınan resimler ile 3B tarayıcıdan alınan sonuçlar karşılaştırıldığında en çok form hatasının gözlemlendiği numunelerin imalatında finish işlemede kullanılan parmak freze çakılarının kesici ağzındaki BUE ve aşınmaların benzer şekilde diğer çakılardan fazla olduğu görülmektedir.

### **5.5 Genel Sonuçlar**

Bu çalışmada, Al 7075 malzemesi kullanılarak serbest şekilli yüzeylerin imalatında kullanılan parmak freze çakılarının performansları ve yüzeyde oluşan form hatalarına etkileri incelenmiştir. Ek olarak bu çalışmada serbest şekilli yüzeylerin işlenmesinde kullanılan parmak freze çakılarında oluşan ilerleme ve kesme kuvvetleri incelenmiştir.

Yapılan deneyler sonucunda aşağıdaki sonuçlar gözlemlendi;

- Serbest şekilli yüzeylerin imalatında oluşan form hatalarının büyükten küçüğe doğru sıralanışı; 7. Numune >6. Numune >3. Numune >5. Numune >1. Numune >4. Numune >2. Numune şeklindedir.
- Form hatalarının sıralamasına göre numunelerin imalatında kullanılan parmak freze çakılarının performanslarının genel olarak kötüden iyiye doğru sıralanışı; 7. Numune >6. Numune >3. Numune >5. Numune >1. Numune >4. Numune >2. Numune şeklindedir.
- Form hatalarının sıralamasına göre numunelerin imalatında finish işlemede kullanılan küresel parmak freze çakılarının performansları kötüden iyiye doğru  $I > H > F > E > G > J$  şeklinde sıralanmıştır.
- Form hatalarının sıralamasına göre numunelerin imalatında kullanılan parmak freze çakıları genel olarak materyalleri bakımından karşılaştırıldığında karbür kaplamalı parmak freze çakılarının performanslarının, diğer (HSS) parmak freze çakılarının performanslarına göre daha iyi olduğu tespit edilmiştir.

- Finish işlemede kullanılan küresel parmak freze çakıları materyalleri bakımından karşılaştırıldığında yine karbür kaplamalı küresel parmak freze çakılarının performanslarının diğer (HSS) parmak freze çakılarına göre daha iyi oluşu tespit edilmiştir.
- Finish işlemede kullanılan küresel parmak freze çakıları kesici ağız sayıları bakımından karşılaştırıldığında ise genel olarak 4 ağızlı çakıların performanslarının 2 ağızlı çakılara göre daha iyi olduğu tespit edilmiştir.
- Finish işlemede kullanılan küresel parmak freze çakılarında oluşan kesme ve ilerleme kuvvetleri incelendiğinde; küresel parmak freze çakıları tırmanışta iken oluşan kesme ve ilerleme kuvvetlerinin, küresel parmak freze çakıları inişte iken oluşan kesme ve ilerleme kuvvetlerine göre daha büyük olduğu ve en yüksek kuvvetlerin tırmanış esnasında oluştuğu tespit edilmiştir.

Bu sonuçlara göre serbest şekilli yüzeylerin imalatında finish işleme prosesinde 4 ağızlı çakıların, 2 ağızlı çakılara tercih edilmesi önerilmektedir. Benzer şekilde serbest şekilli yüzeylerin imalatında finish işlemede kuvvet değişimlerine bağlı olarak oluşan yığıntı talaşların kaplamalı çakılarda daha az oluştuğu görülmüştür, bu nedenle kaplamalı çakıların, kaplamasız HSS çakılara tercih edilmesi önerilmektedir.

## KAYNAKLAR

1. Özdemir, B. Serbest şekilli yüzeylerin işlenmesinde işleme parametrelerinin form hatalarına etkilerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Malatya, Ocak 2015.
2. Haldar, B.K. CNC tool path generation for free-form surface machining, MS Thesis, Jadavpur University India, 2010.
3. Abbas, T., Automatic Tool Path Generation for Parametric Surfaces in Terms of Bezier Patches. Eng.&Tech. Journal, Vol.27, No.4, 2009.
4. Ülker, E., Yapay Zeka Teknikleri Kullanılarak Yüzey Modelleme. Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi, Konya, 2007.
5. Rockwood, A.P., Chambers, P. Introduction to Curves and Surfaces. A Multimedia Tutorial. Arizona, USA,92p, 1996.
6. Farouki, R.T., Accuracy enhancements for CNC motion control through algorithms based on analytic path geometry. SMART 2014, Pontignano, September 28–October , Italy, 2014.
7. Choi, Y.K., Tool path generation and 3D tolerance analysis for free-form surfaces. Phd Thesis,Texas A&M University, USA, 2004.
8. Kurt, M., Hartomacıoğlu, S., Mutlu, B., Köklü, K., Minimization of the surface roughness and form error on the milling of free-form surfaces using a grey relational analysis. Materials and technology, 46 (2012) 3, 205–213, 2012.
9. Chanthasopephan, T., Desai, J.P., Lau, A.C.W., Study of soft tissue cutting forces and cutting speeds (pp:56-62). Medicine Meets Virtual Reality 12, IOS Press, Netherlands, 2004.
10. 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 (2000) 277–291, 1999.
11. Kaymakci, M., Lazoglu, I., Tool path selection strategies for complex sculptured surface machining (pp:12:1/119-132). Machining Science and Technology, Taylor&Francis, March 10, UK, 2008.
12. Dhokia, V. G., et al.,Surface roughness prediction model for CNC machining of polypropylene. J. Engineering Manufacture, Proc. IMechE Vol. 222 Part B, 2008.

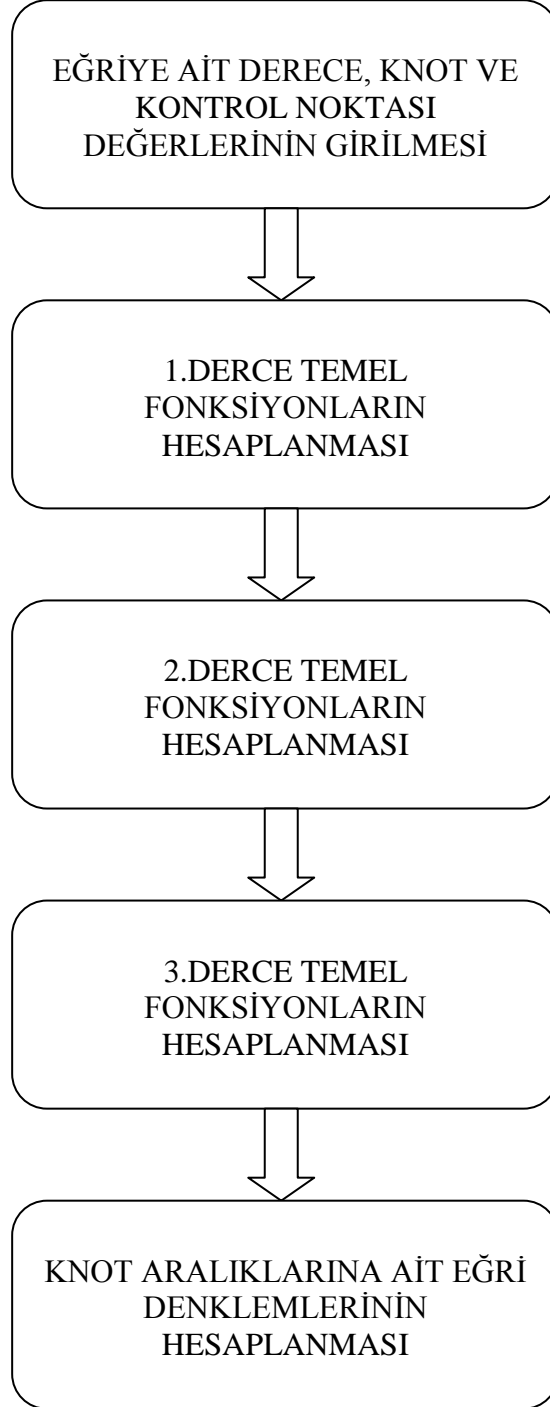
13. Vakondios, D., Kyratsis, P., Yaldiz, S., Antoniadis, A., Influence of milling strategy on the surface roughness in ball end milling of the aluminum alloy Al7075-T6. *Measurement*, Vol 45, Issue 6, 2012.
14. Can A., Ünüvar A., Five-axis tool path generation for 3D curves created by projection on B-spline surfaces. *Int J Adv Manuf Technol.* 49: 1047-1057, 2010.
15. Galvez A., Iglesias A., Gutierrez F., Applying MATLAB to Computer Graphics and CAGD. Application to a Visualization Problem in the Automotive Industry. IX International Conference on Computer Graphics and Vision, Graphicon 99, Rusia
16. Omirou S.T., Nearchou A.C., A CNC machine tool interpolator for surfaces of cross-sectional design. *Journal Robotics and Computer-Integrated Manufacturing.* 23, 257–264, 2007.
17. Zhang Z., Savchenko M., Hagiwara I., Ren B., 3-Axis NC Tool Path Generation and Machining Simulation for Subdivision Surface of Complex Models. *International Journal of CAD/CAM* Vol. 10, No. 1, 2010.
18. Andersson F., Bezier and B-Spline Technology. Metadata Version 3, 58 p, 2003.
19. Wang, J., Parametrization and shape reconstruction techniques for doo-sabin subdivision surfaces. MS Thesis, University of Kentucky, Lexington, USA, 2008.
20. Farin, G., *Curves and Surfaces for Computer Aided Geometric Design.* Academic Press, INC, USA, 2002.
21. Siddiqi, S.S., Younis, M., The m-Point Quaternary Approximating Subdivision Schemes. *American Journal of Computational Mathematics*, 3, 6-10, 2013.
22. Anonymous. *Computer Aided Design-Nurbs Surface.* Universite De Liege. Belgium, 2014.
23. Groover M., P., *Fundamentals of Modern Manufacturing, Theory of Metal Machining*, Chapter 21, 3th ed. USA, 2007.
24. Akdoğan A., Makine Mühendisliği Bölümü, Yıldız Teknik Üniversitesi, Türkiye,  
[http://www.yildiz.edu.tr/~akdogan/lessons/malzeme2/Aluminyum\\_ve\\_Aluminyum\\_Alasimlari.pdf](http://www.yildiz.edu.tr/~akdogan/lessons/malzeme2/Aluminyum_ve_Aluminyum_Alasimlari.pdf), Kasım, 2008.

25. Seymen S., Makine Mühendisliği Bölümü, Gazi Üniversitesi, <http://www.cadcamsektoru.com/makaleler/Talasli-Imalatta-Kullanilan-Kesici-Takimler-9949.htm>, Ekim, 2008.
26. Hüseyinoğlu M., Tosun N., Effect of Minimum Quantity Coolant on Surface Roughness in Milling of 7075 Al Alloy, 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu, Karabük, Türkiye, 13-15 Mayıs, 2009.
27. Gökkaya H., Nalbant M., Talaş Kaldırma Sırasında Isı Oluşumu Ve Dağılımı, Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi, Türkiye, MTED (2) 33-43, 2006.
28. Gökkaya H., Nalbant M., Kesme Hızının Yığıntı Katmanı ve Yığıntı Talaş Oluşumu Üzerindeki Etkilerinin SEM ile İncelenmesi, Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der., Türkiye, Cilt 22, No 3, 481-488, 2007

## EKLER

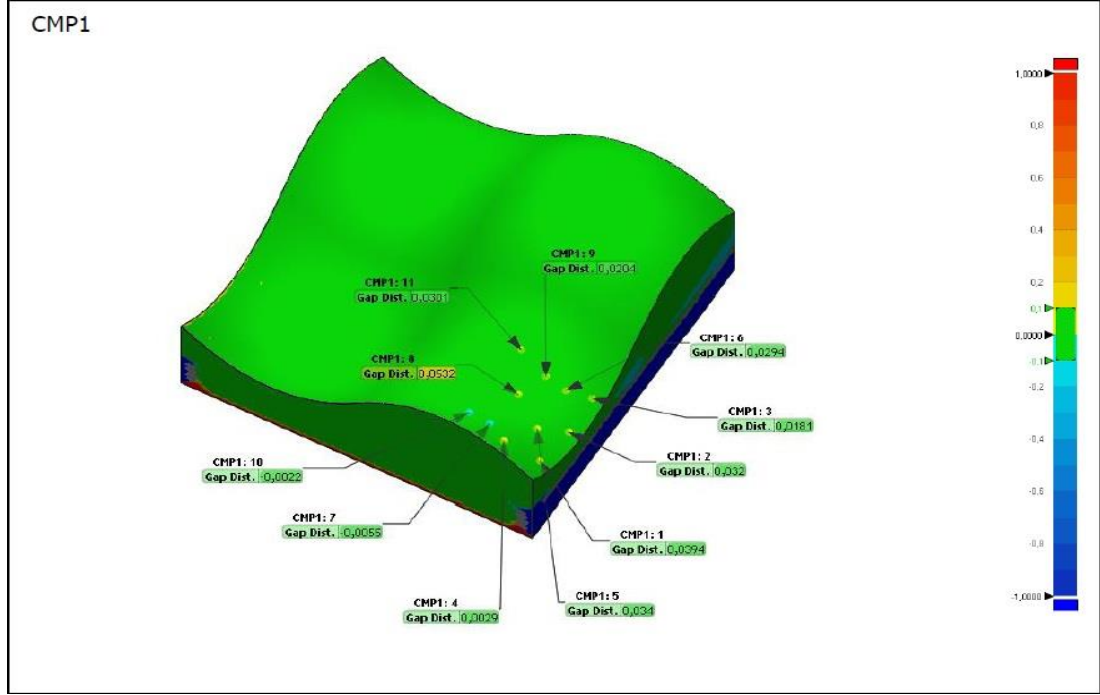
### EK-1

#### B-Spline Eğriyi Oluşturmak İçin Yazılan Matlab Programına Ait Akış Şeması

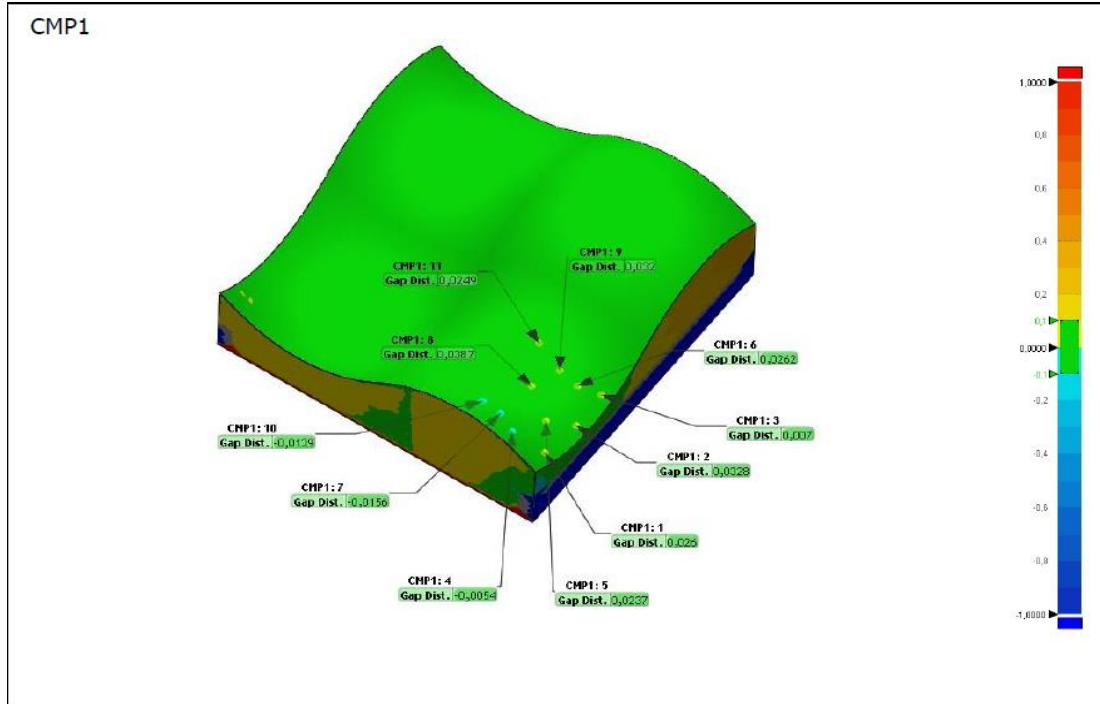


## EK-2

### Numunelere ait 3B tarama görselleri

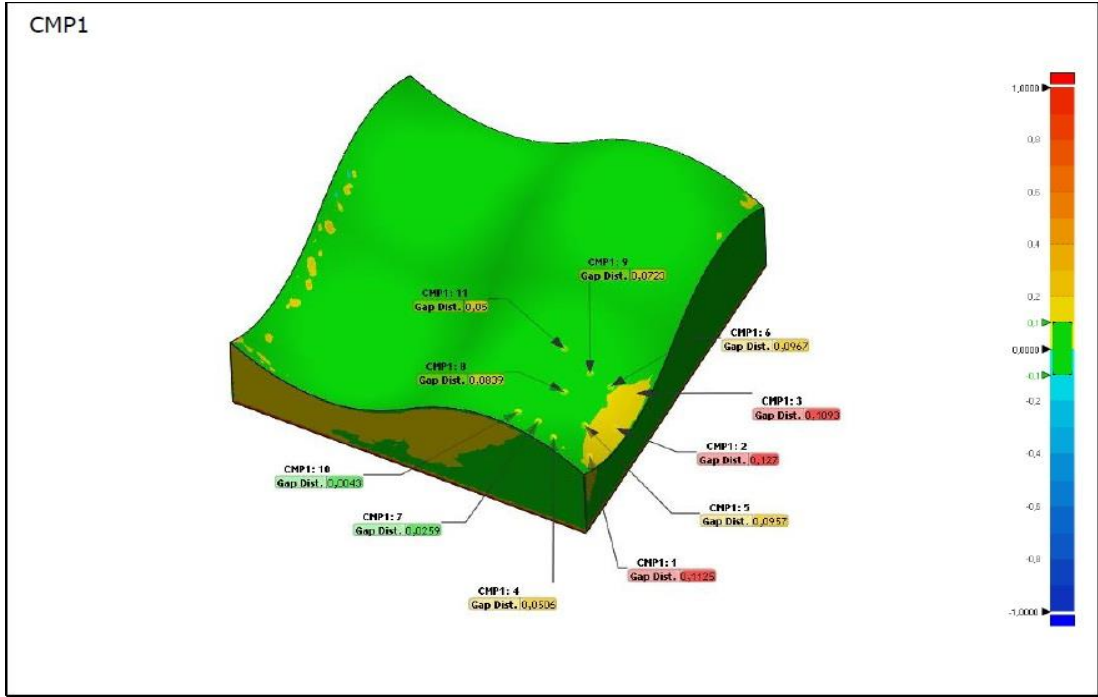


Şekil 7.1. 1. Numuneye Ait 3B Tarama Görüntüsü

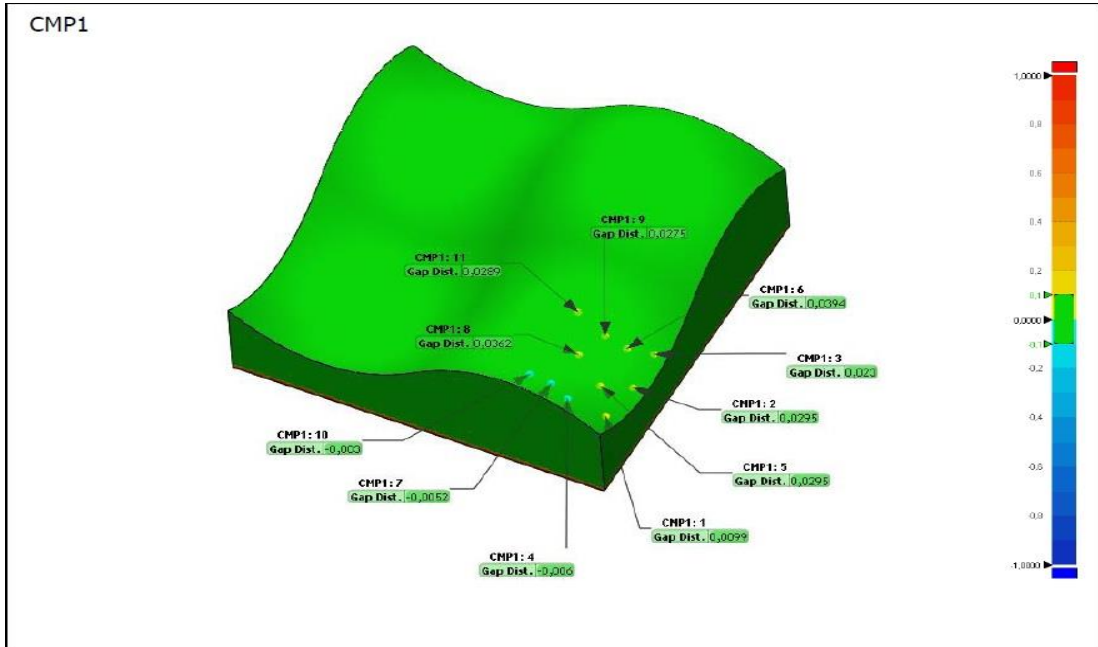


Şekil 7.2. 2. Numuneye Ait 3B Tarama Görüntüsü

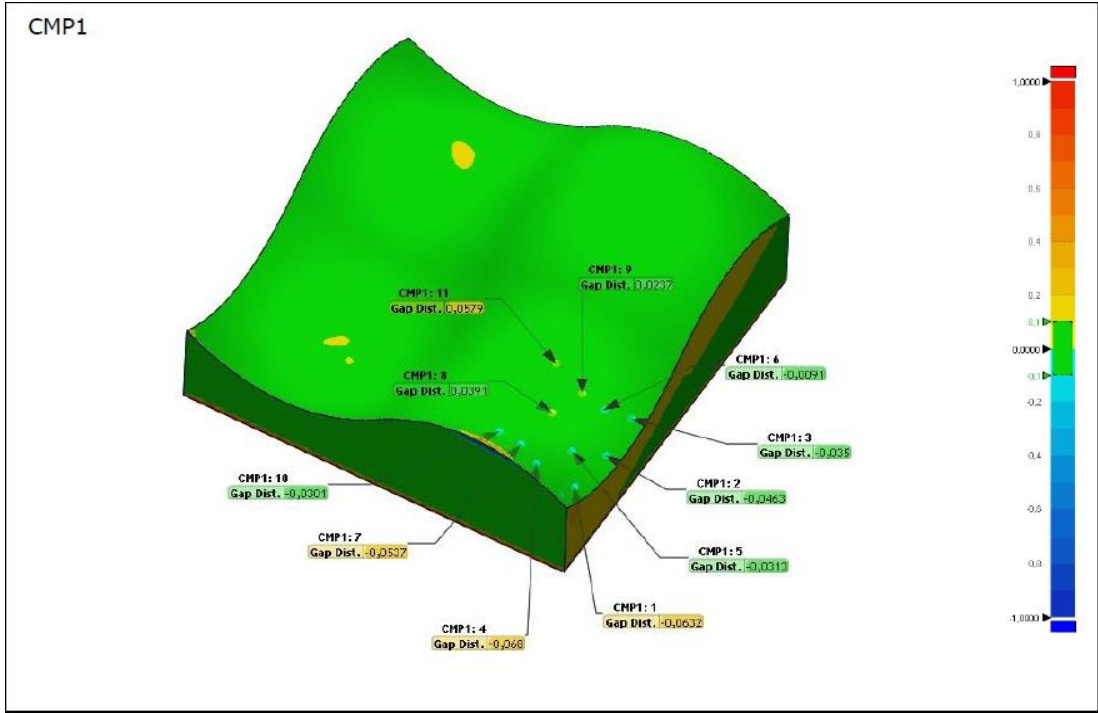




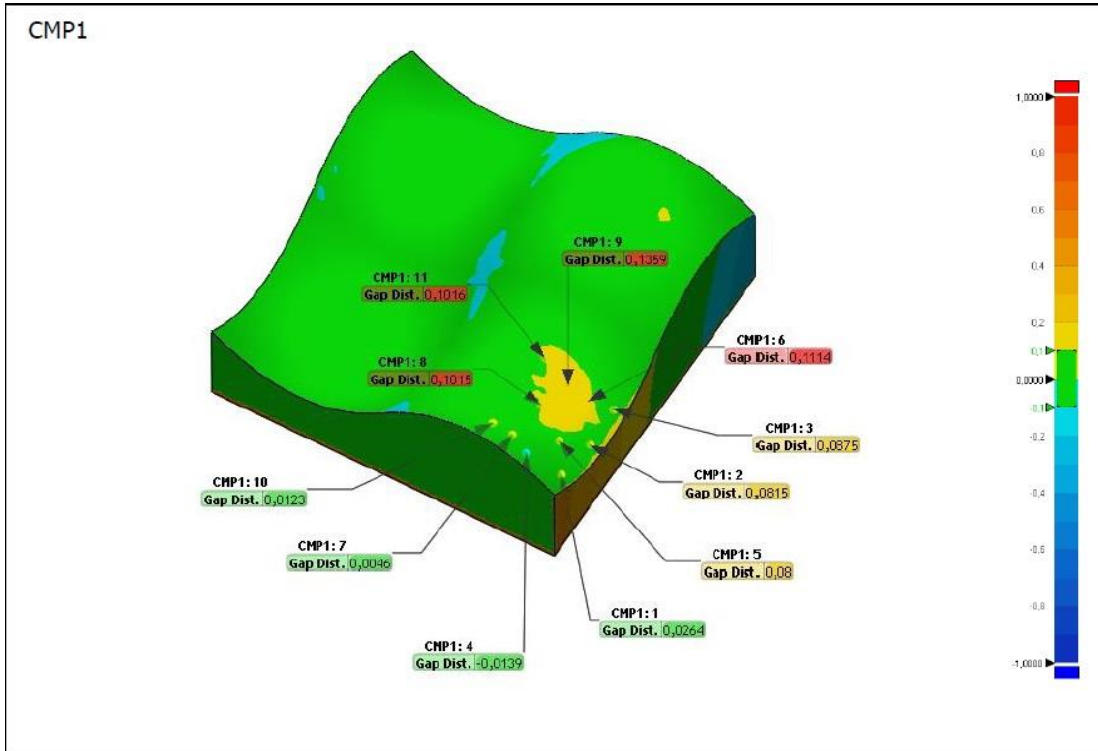
Şekil 7.3. 3. Numuneye Ait 3B Tarama Görüntüsü



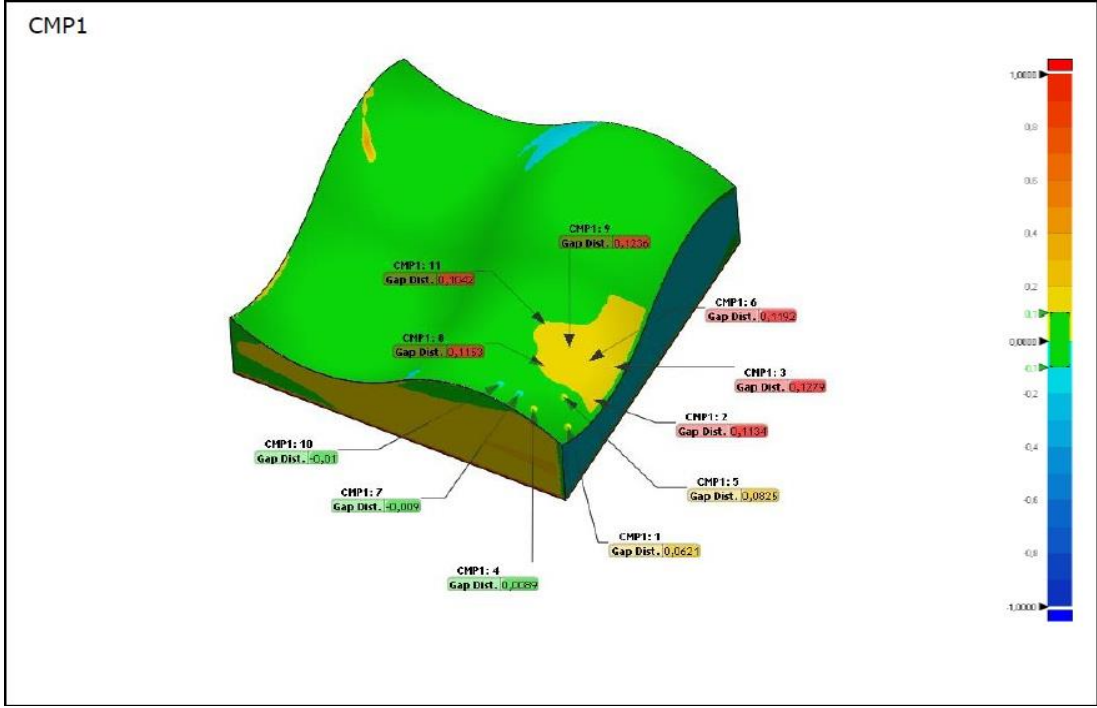
Şekil 7.4. 4. Numuneye Ait 3B Tarama Görüntüsü



Şekil 7.5. 5. Numuneye Ait 3B Tarama Görüntüsü



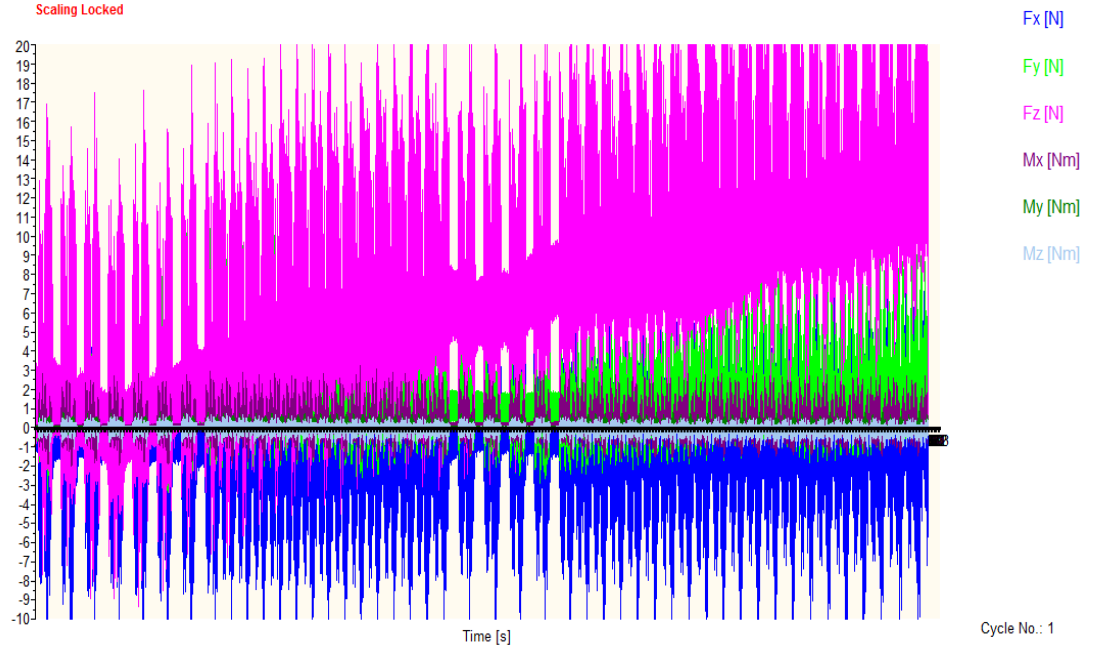
Şekil 7.6. 6. Numuneye Ait 3B Tarama Görüntüsü



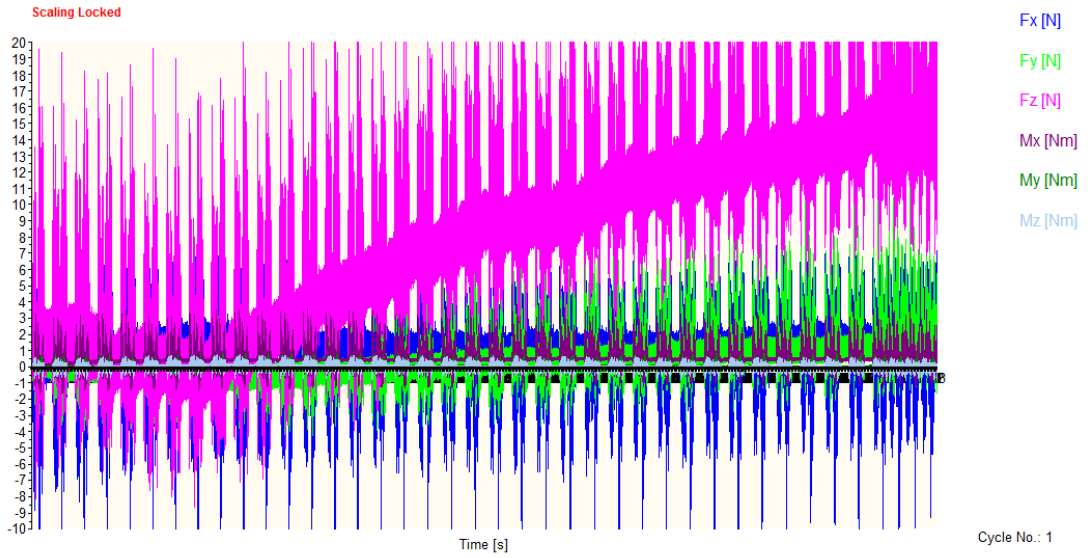
Şekil 7.7. 7. Numuneye Ait 3B Tarama Görüntüsü

## EK-3

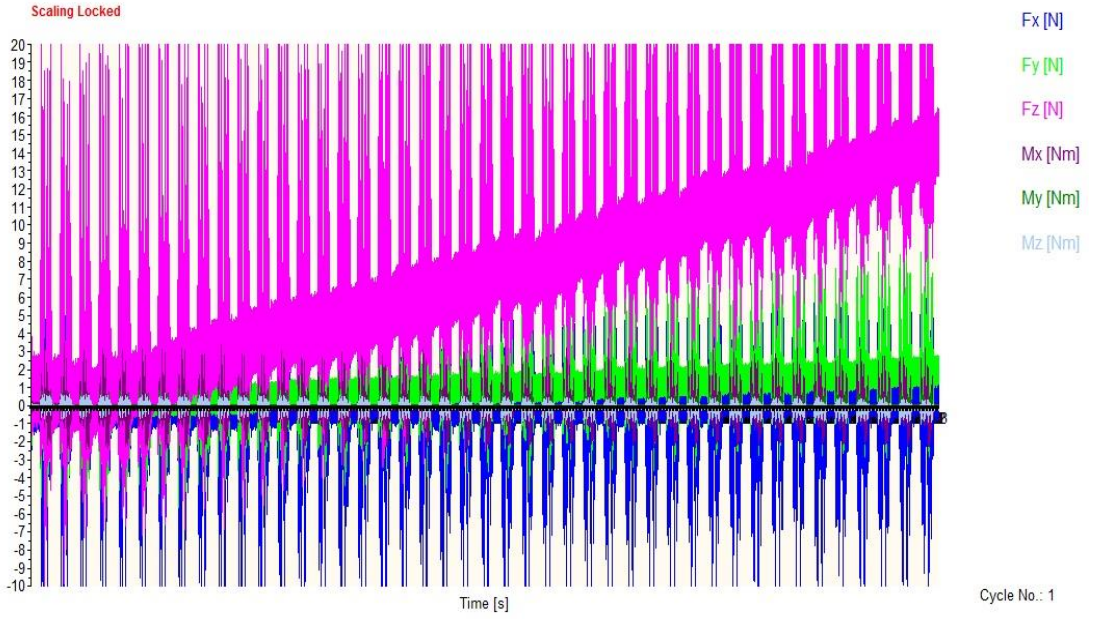
### Finish işleme esnasında dinamometreden alınan kuvvet eğrileri



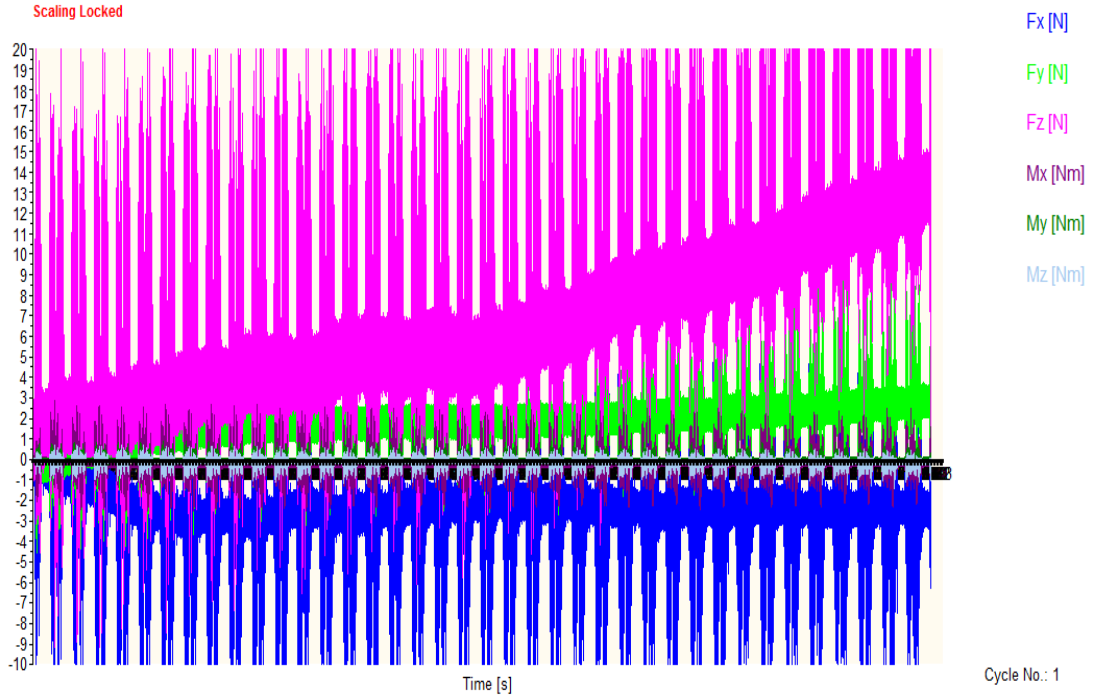
Şekil 7.8. 7. Numuneye Ait Kuvvet Eğrisi



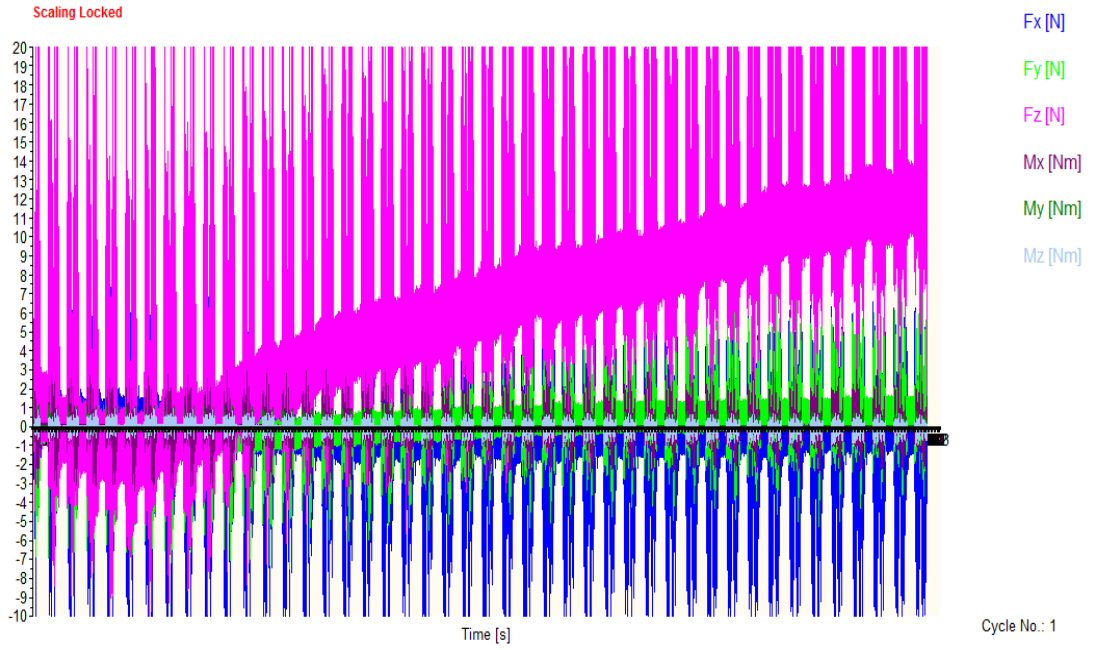
Şekil 7.9. 6. Numuneye Ait Kuvvet Eğrisi



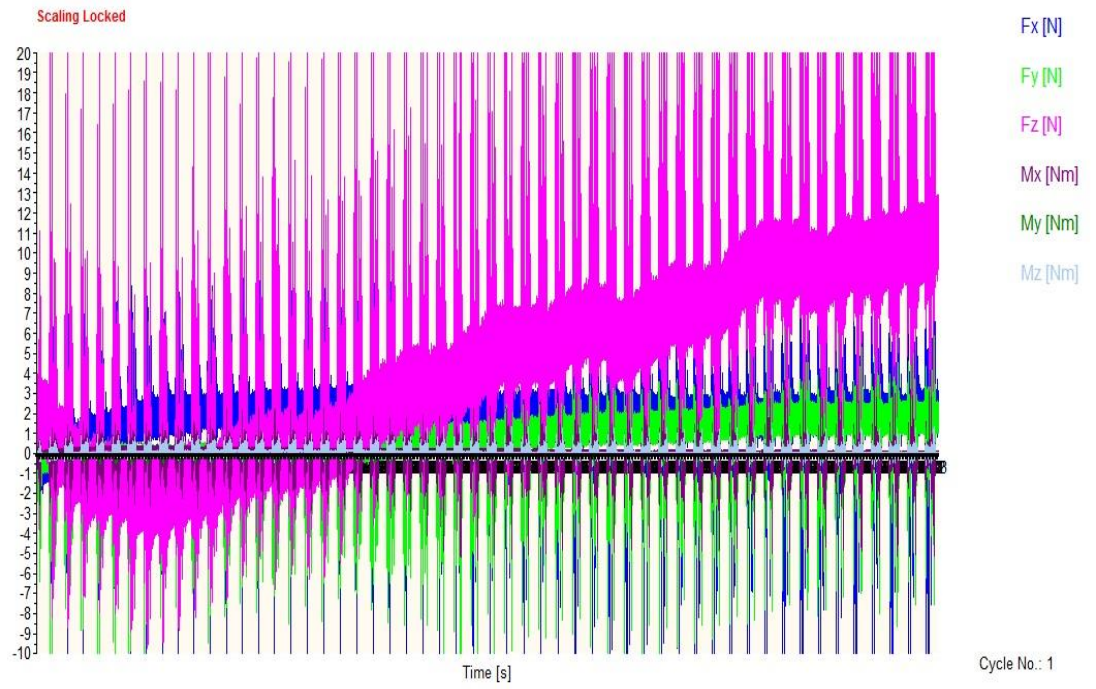
Şekil 7.10. 3. Numuneye Ait Kuvvet Eğrisi



Şekil 7.11. 5. Numuneye Ait Kuvvet Eğrisi



Şekil 7.12. 1. Numuneye Ait Kuvvet Eğrisi

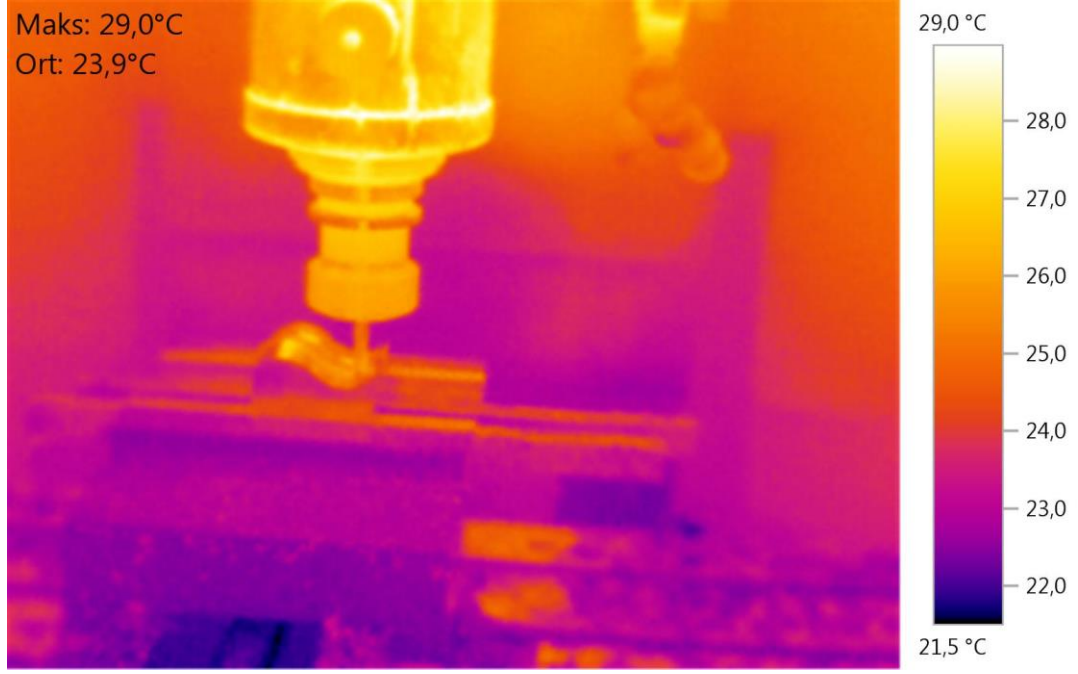


Şekil 7.13. 4. Numuneye Ait Kuvvet Eğrisi

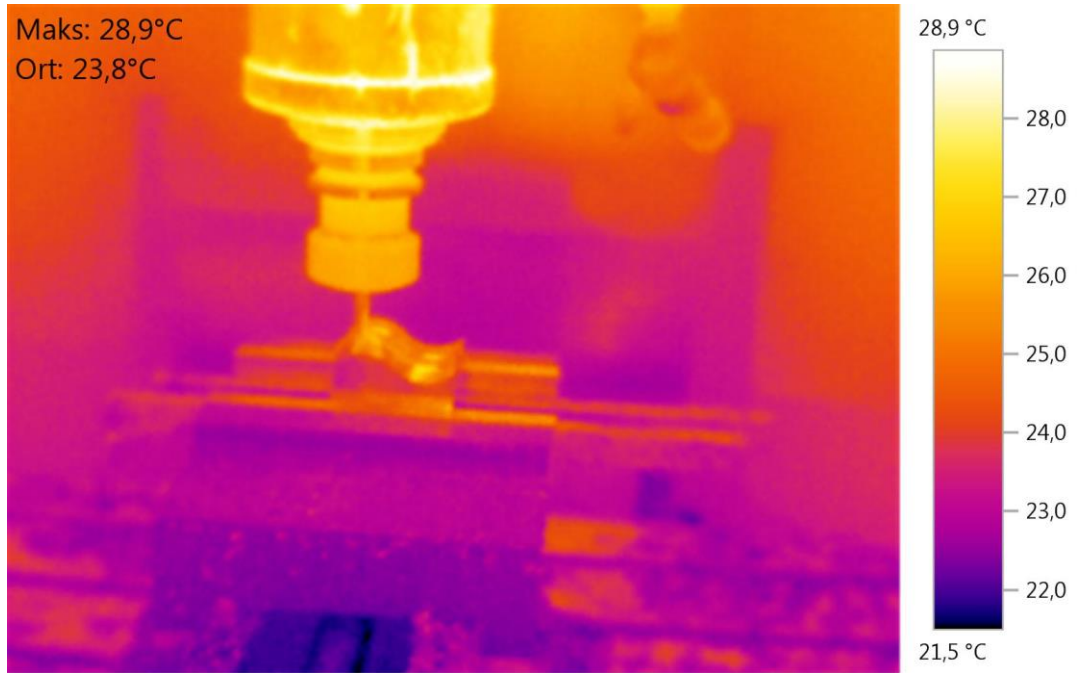


## EK-4

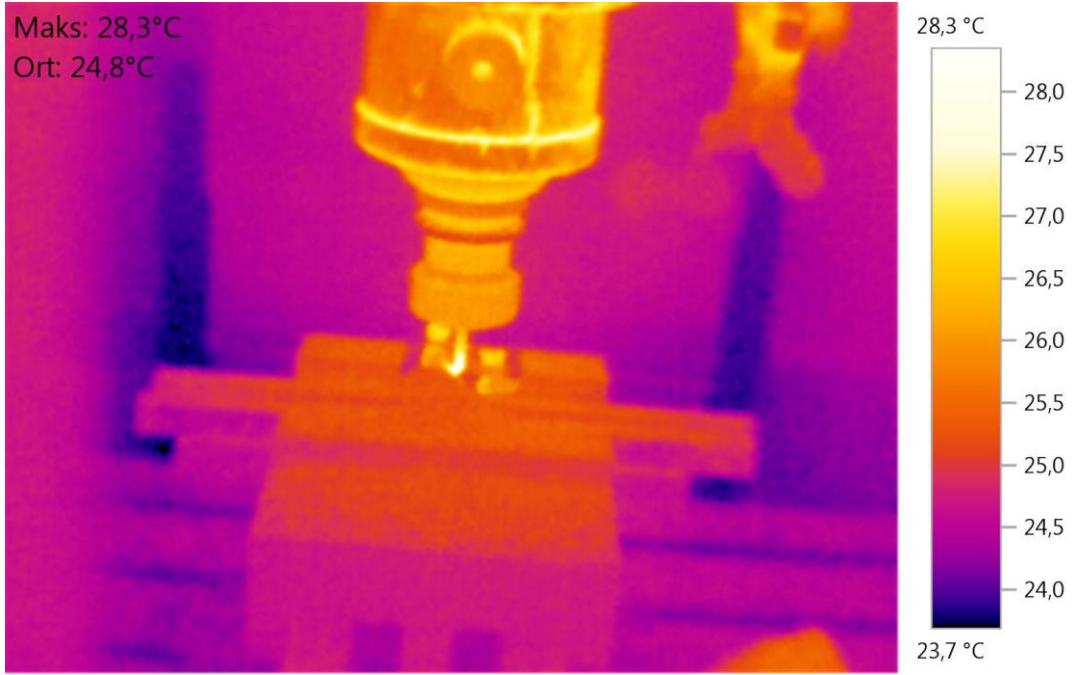
### Termal kameradan alınan görseller



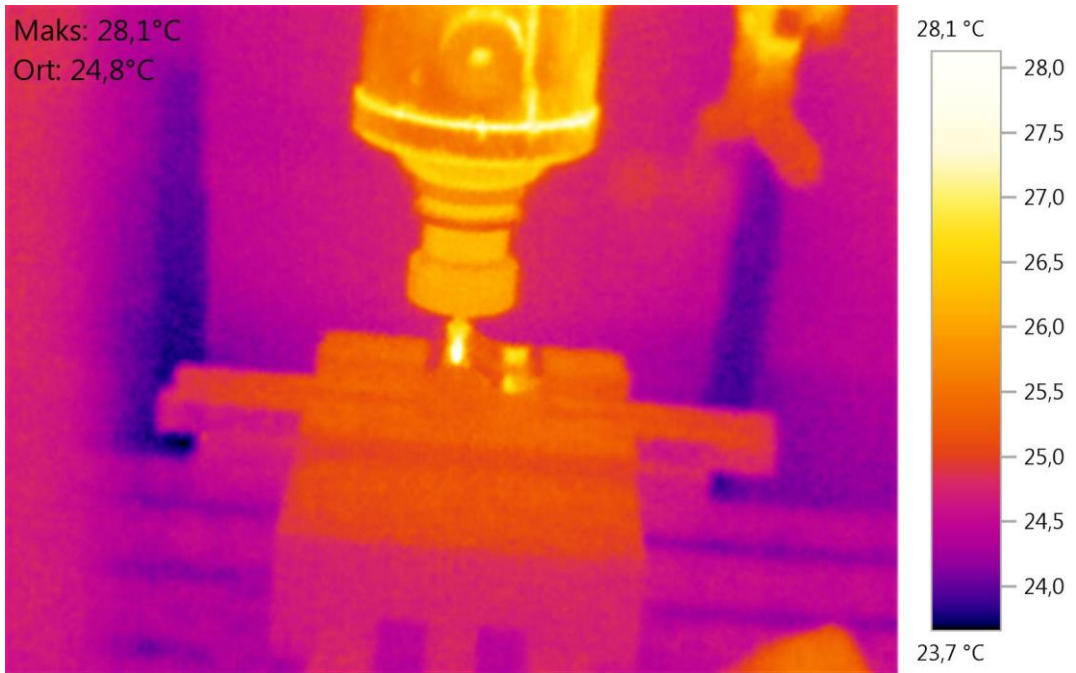
Şekil 7.14. 7. Numuneye Ait Termal Görüntü



Şekil 7.15. 6. Numuneye Ait Termal Görüntü

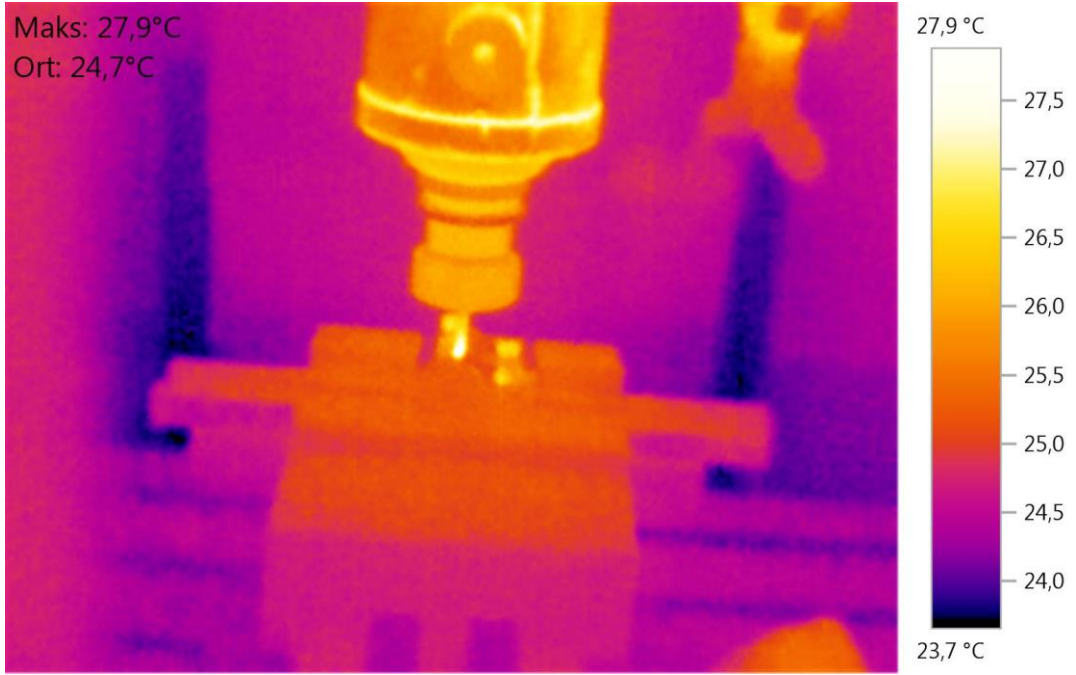


Şekil 7.16. 3. Numuneye Ait Termal Görüntü

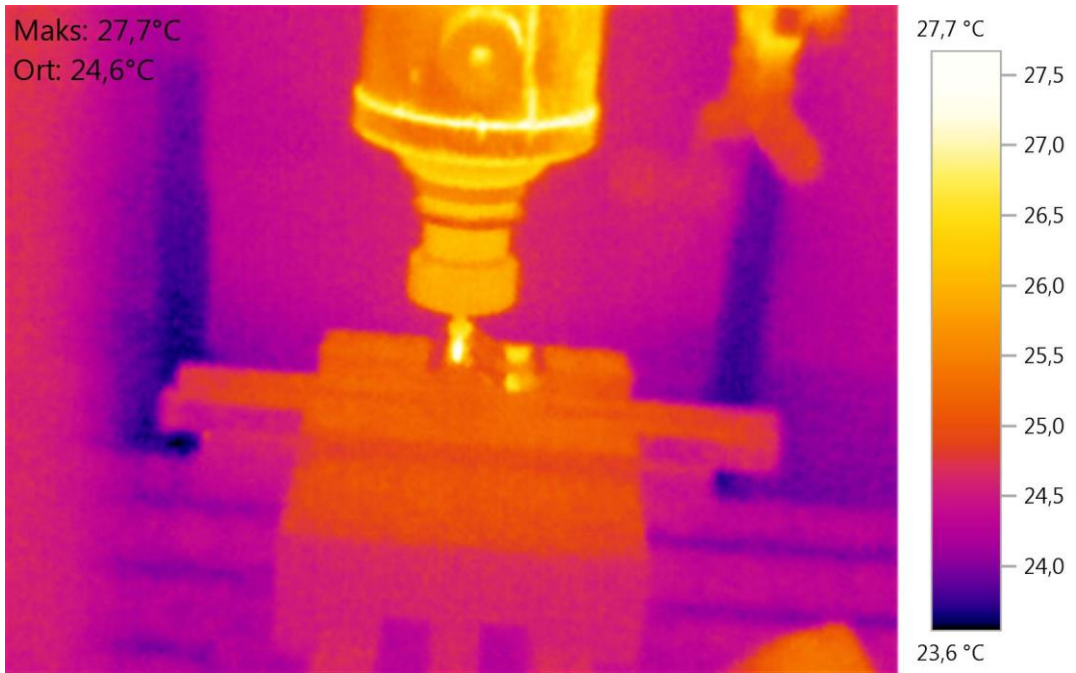


Şekil 7.17. 5. Numuneye Ait Termal Görüntü





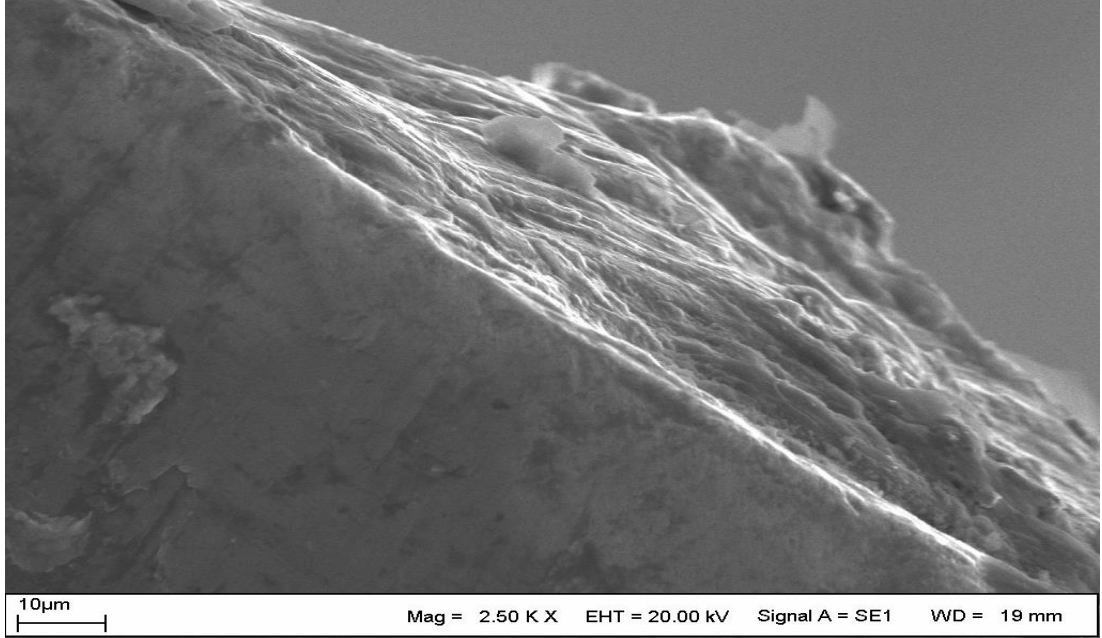
Şekil 7.18. 1. Numuneye Ait Termal Görüntü



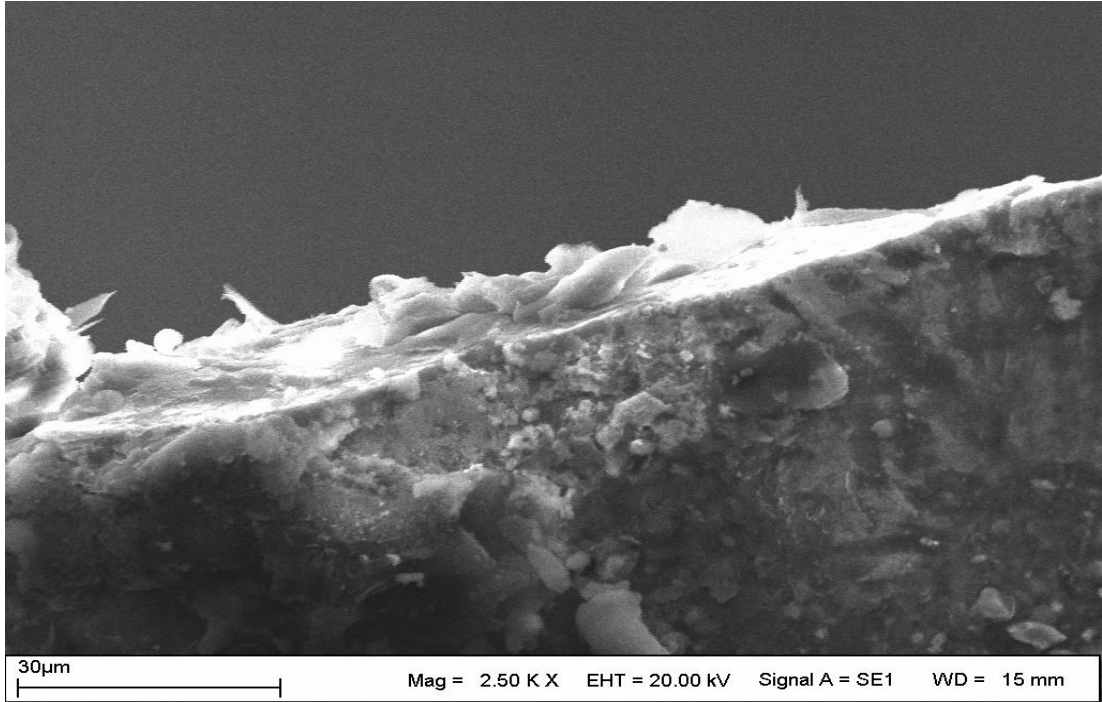
Şekil 7.19. 4. Numuneye Ait Termal Görüntü

## EK-5

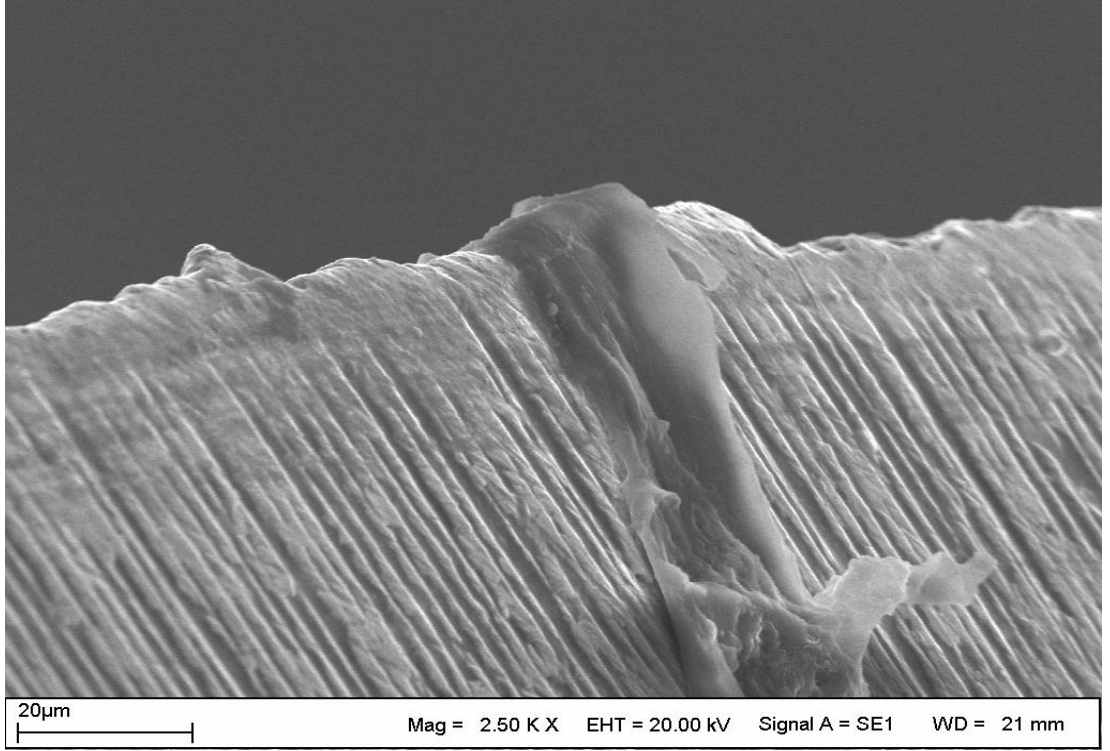
### TEM cihazından alınan görseller



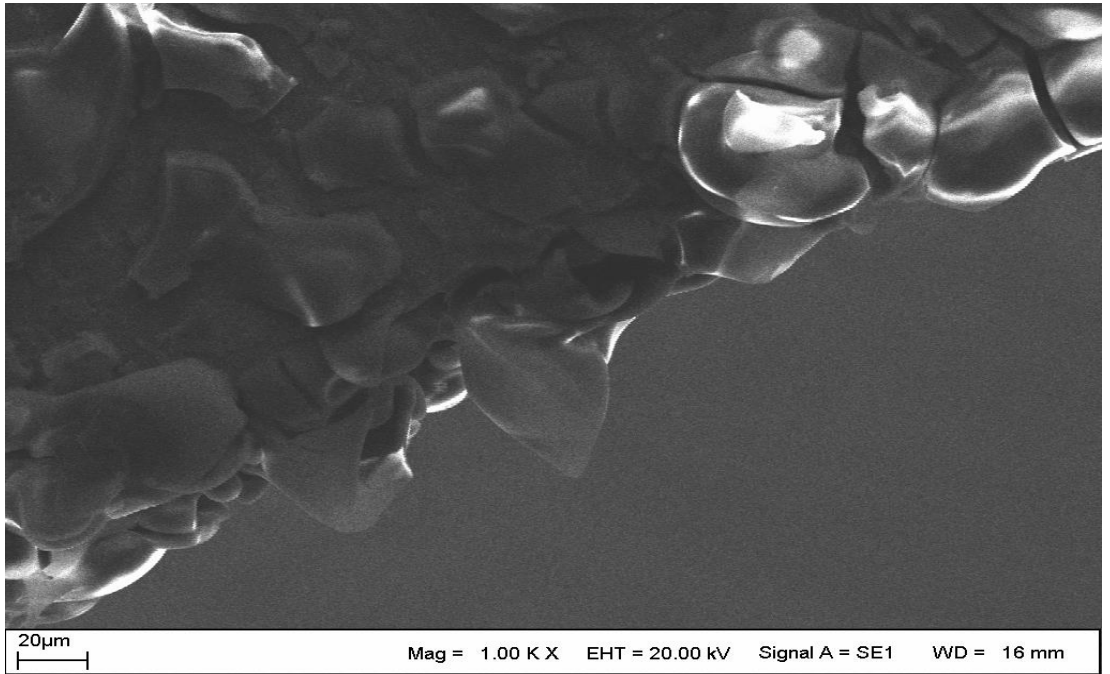
Şekil 7.20. 1. Numune Ø12mm Radyuslu Parmak Freze Çakısı



Şekil 7.21. 4. Numune Ø12mm Radyuslu Parmak Freze Çakısı



Şekil 7.22. 1. Numune Ø10mm Radyuslu Parmak Freze Çakısı



Şekil 7.23. 4. Numune Ø10mm Radyuslu Parmak Freze Çakısı

## ÖZGEÇMİŞ

1988 yılında Malatya’da doğan Mustafa Ercan GÜNDÜZ, ilk, orta ve lise öğrenimini sırayla İnönü İ.Ö.O, Malatya Lisesinde tamamlamıştır. 2006 yılında kazandığı Bozok Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümünü 2012 yılında başarıyla bitirmiştir.

2013 yılında yüksek lisans eğitimine Bozok Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalında başlamıştır. 2015 yılında danışmanı Doç. Dr. Hamza Kemal AKYILDIZ gözetiminde “Serbest Şekilli Yüzeylerin İşlenmesinde Kullanılan Küresel Uçlu Parmak Freze Takımlarının Performanslarının Karşılaştırılması” konusunda çalışarak yüksek lisans tezi hazırlamıştır.

### İletişim Bilgileri

Adres: Cevherizade mah. Cengiztopel cad. birlik apt. no:88

MALATYA / Battalgazi

44200/ MALATYA

GSM: 0532 552 60 34

E-posta: ercan.gunduz@mmo.org.tr