

T.C.
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SERBEST ŞEKİLLİ YÜZEYLERİN İŞLENMESİNDE İŞLEME
PARAMETRELERİNİN FORM HATALARINA ETKİLERİNİN
İNCELENMESİ

Burak ÖZDEMİR

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Ocak-2015

Tezin Başlığı: Serbest Şekilli Yüzeylerin İşlenmesinde İşleme Parametrelerinin Form Hatalarına Etkilerinin İncelenmesi

Tezi Hazırlayan: Burak ÖZDEMİR

Sınav Tarihi: 19.01.2015

Yukarıda adı geçen tez jürimizce değerlendirilerek Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalında Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Sınav Juri Üyeleri

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Erkan BAHÇE

İnönü Üniversitesi



Doç. Dr. Cihan ÖZEL

Fırat Üniversitesi



Yrd. Doç. Dr. A.Muttalip ŞAHİNASLAN

İnönü Üniversitesi



Prof. Dr. Alaattin ESEN

Enstitü Müdürü

ONUR SÖZÜ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Serbest Şekilli Yüzeylerin İşlenmesinde İşleme Parametrelerinin Form Hatalarına Etkilerinin İncelenmesi” başlıklı bu çalışmanın bilimsel, ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma başvurmaksızın tarafımdan yazıldığını ve yararlandığım bütün kaynakların, hem metin içinde hem de kaynakçada yönetimine uygun biçimde gösterilenlerden oluştuğunu belirtir, bunu onurumla doğrularım.

Burak ÖZDEMİR



ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

SERBEST ŞEKİLLİ YÜZEYLERİN İŞLENMESİNDE İŞLEME PARAMETRELERİNİN FORM HATALARINA ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

Burak Özdemir

İnönü Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

106+ix sayfa

2015

Danışman : Yrd. Doç. Dr. Erkan Bahçe

Serbest şekilli yüzeylerin imalatı; ulaşım, elektronik ve havacılık sanayisinde oldukça önemlidir. Bu yüzeylerin imalatında işleme verimliliğinin artırılması ve ideal forma yaklaşılması işleme parametrelerinin optimizasyonu sayesinde elde edilir.

Bu çalışmada, B-Spline eğriler ile oluşturulan serbest şekilli bir yüzeyin imalatında farklı takım yollarının form hatalarına etkileri araştırıldı. B-spline eğrisi MATLAB ortamında hazırlanan program kullanılarak elde edildi ve bu eğrilerin tensörel çarpımıyla yüzey oluşturuldu. Serbest şekilli forma sahip bu yüzey BDT (Bilgisayar Destekli Tasarım) ortamında katı hale getirildi ve BDİ (Bilgisayar Destekli İmalat) programından yararlanarak takım yolları oluşturuldu. Serbest şekilli yüzey kaba, ara kaba ve ince olmak üzere üç aşamada işlenmiştir. Kaba işleme sabit (HM kaba) olmak üzere, üç farklı ara kaba yöntemi (ara kaba, kontür kaba, paralel kaba) ve dört farklı ince işleme yöntemi (eğriye paralel, paralel tarama, paralel doğrusal, paralel sabit z) uygulanarak 12 adet numune işlendi.

İşlenen numuneler, 3B tarama yöntemi ile taranıp yüzey haritaları çıkarıldı. Yüzey 9 farklı bölgeye bölünerek her bölgeden genişliğine göre ortalama 12 noktadan koordinat (X,Y,Z) ölçümleri alınarak referans yüzeydeki ölçüler ile karşılaştırıldı. Yüzey form hatası bakımından en iyi olan ara kaba takım yolu yöntemi Kontür Kaba ve finish(son işleme) takım yolu yöntemi Eğriye Paralel olarak belirlendi. En kötü sonucu veren ara kaba takım yolu yöntemi Paralel kaba ve finish takım yolu yöntemi ise Paralel Tarama olarak belirlendi. En iyi sonucu veren takım yolunda form hatalarının yoğun olduğu bölgelerde ilerleme %10 azaltılarak %17'ye varan iyileştirme elde edilmiştir.

ANAHTAR KELİMELEER: Serbest şekilli yüzey, B-Spline eğri, form hatası, takım yolu.

ABSTRACT

Master Thesis

RESEARCH TO THE EFFECT OF MACHINING PARAMETER ON FORM ERROR IN THE MILLING OF FREE FORM SURFACE

Burak Özdemir

İnönü University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering

106+ix pages

2015

Supervisor: Assist. Prof. Erkan Bahçe

Production of freeform surfaces is very important for transportation, electronics and aerospace industries. To increase the processing efficiency and to approach the ideal form for manufacturing of this surface is achieved through the optimization of processing parameters.

In this study, we investigate the effects of different tool path on form error which appearance the manufacturing of freeform surface formed by the B-spline curves. B-spline curves were obtained using a program developed in MATLAB and generated surface of the tensor multiplication of the curve. With free-form surface has become solid at CAD (Computer Aided Design) and tool paths was created by using CAM (Computer Aided Manufacturing) program.

Sample was machined three levels as rough cut, semi rough cut and finish cut. Rough cut (HM rough) which was same for all sample, three different semi rough method (semi rough, counter rough, parallel rough) and four finish cutting method (curve parallel, parallel scanning, parallel linear, parallel fixed z) was applied and 12 samples was machined.

The machining samples were scanned with a 3D surface scanning method have been mapped. Surface was divided by 9 different regions and 10-14 between point which was related to wide of surface was measured for coordinate point (X,Y,Z) on every region, later the measured was compared with measurements on the reference surface. The best semi rough tool path was determined by Counter Rough and finish tool path was determined by Curve Parallel. The worst semi rough tool path was determined by Parallel Rough and finish tool path was determined by Parallel Scanning. Improvements of up to 17 was obtained by feed was reduced %10 in the regions where intensive forms of error in the best results of tool path.

KEY WORDS: Free form surface, B-Spline curve, form error, tool path.

TEŞEKKÜR

Bu alıőmanın her aőamasında yardım, öneri ve desteğini esirgemeden beni yönlendiren danışman hocam Sayın Yrd. Do. Dr. Erkan BAHE'ye,

Atölye çalıőmalarında katkılarında dolayý Sayın Ümit ATEŐ'e,

Her zaman desteklerini esirgemeyen Hekimhan MES Meslek Yüksekokulun'daki iş arkadaşlarıma ve hayatımın her anında olduğu gibi çalıőmalarım boyunca da beni yalnız bırakmayan sevgili eőim ve oğluma teőekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	ÖZET.....	i
	ABSTRACT.....	ii
	TEŞEKKÜR.....	iii
	İÇİNDEKİLER.....	iv
	ŞEKİLLER DİZİNİ.....	v
	ÇİZELGELER DİZİNİ.....	vii
	SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	ix
1.	GİRİŞ.....	1
2.	GENEL BİLGİLER.....	6
2.1.	Bezier Eğriler.....	6
2.2.	B-Spline Eğriler.....	9
2.2.1.	B-Spline Temel fonksiyonları.....	12
2.2.2.	B-Spline Düğüm Vektörünün Tanımı.....	14
2.2.3.	B-Spline Eğrilerin Matematiksel Tanımı.....	21
2.3.	B-Spline Yüzey.....	29
2.4.	Alüminyum ve Alaşımları.....	30
2.4.1.	Alüminyum.....	30
2.4.2.	Alüminyum alaşımları.....	30
3.	MATERYAL VE YÖNTEM.....	33
3.1.	Deney Malzemesi.....	33
3.2.	Serbest Şekilli Yüzeyin CAD Ortamında Oluşturulması.....	34
3.3.	Serbest Şekilli Yüzeyin İmalatında Kullanılan Takım Yolları.....	37
3.4.	Yüzeylerin İmalatında Kullanılan Takımların Özellikleri.....	41
3.5.	Deneysel Çalışma.....	42
3.6.	Yüzeylerin 3 Boyutlu Taranması.....	43
4.	ARAŞTIRMA ve BULGULAR.....	45
4.1.	3 Boyutlu Yüzey Taramasına Ait Bulgular.....	45
4.2.	Yüzeyin 3B Taranması ve Referans Yüzey ile Karşılaştırma.....	51
5.	TARTIŞMA ve SONUÇ.....	61
5.1.	Takım Yolu Yöntemlerine Ait İşleme Süresi ve G-Kod Satır Sayıları.....	61
5.2.	Sapma Sayısı ve Miktarına Göre Numunelerin ve Bölgelerin Değerlendirilmesi.....	62
5.3.	Toplam Sapma ve Ortalama Sapma Miktarına Göre Numune ve Bölgelerin Değerlendirilmesi.....	64
5.4.	Toplam Sapma Miktarına Göre Ara Kaba ve Finish İşleme Yöntemlerinin Değerlendirilmesi.....	71
5.5.	Verilerin Değerlendirilmesi.....	72
6.	GENEL SONUÇLAR.....	78
7.	KAYNAKLAR.....	79
8.	EKLER.....	81
	ÖZGEÇMİŞ.....	106

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	Serbest şekilli yüzeyin imalat aşamaları.....	2
Şekil 2.1.	Dört kontrol noktasına sahip ($n=3$) Bezier eğrisine ait Bernstein polinomlarının grafikleri.....	6
Şekil 2.2	Bir kübik bezier eğrisi ve onu tanımlamak için kullanılan dört kontrol noktası.....	7
Şekil 2.3.	16 kontrol noktası tanımlanmış bir Bezier yüzeyi gösterilmektedir.....	8
Şekil 2.4	Bir B-spline eğrisi ve kontrol poligonu.....	9
Şekil 2.5.	Bezier eğrisine eşdeğer bir B-spline eğrisi.....	10
Şekil 2.6.	B-spline eğrisinin 1.ve 2.segmentini etkileyen kontrol noktaları.....	10
Şekil 2.7.	Kontrol noktası ile eğri mertebesi arasındaki ilişki.....	10
Şekil 2.8.	Eğrinin kontrol noktası ve mertebesinin, segment sayısına etkisi.....	11
Şekil 2.9.	Her bir polinom segmentini etkileyen kontrol noktaları.....	12
Şekil 2.10.	$N_{i,k}$ temel fonksiyonunun hesabı için gereken diğer temel fonksiyonlar.....	13
Şekil 2.11.	B-spline eğrilerinin sınıflandırılması.....	14
Şekil 2.12.	Açık üniform B-spline eğrisine ait temel fonksiyonlar ($k=3, n+1=4$)...	15
Şekil 2.13.	Açık üniform B-spline eğrisine ait temel fonksiyonlar ($k=3, n+1=5$)...	16
Şekil 2.14.	Periyodik üniform B-spline eğrisinin temel fonksiyonları($k=3, n+1=4$)	17
Şekil 2.15.	Periyodik (kapalı) bir B-spline eğrisi ve parametre değişimi.....	17
Şekil 2.16.	Quadratik eğriler olan $N_{1,3}, N_{2,3}, N_{3,3}$ temel fonksiyonları.....	21
Şekil 2.17.	Bir kübik B-spline eğrisi ($k=4$) tanımlayıcı kontrol poligonu.....	22
Şekil 2.18.	Kübik B-Spline eğrisi temel fonksiyonları.....	22
Şekil 2.19.	Örneğe göre B-spline eğrisi.....	25
Şekil 2.20.	Quadratik açık üniform ve non-üniform B-spline eğrilerinin karşılaştırılması.....	25
Şekil 2.21.	B-spline eğrisinin mertebesine göre değişimi.....	26
Şekil 2.22.	Tekrar edilen 4.kontrol noktasının B_4 , kübik B-spline eğrisine etkisi ($k=4$).....	26
Şekil 2.23.	Kontrol poligonunun konumunun değiştirilmesinin B-spline eğrisine etkisi.....	27
Şekil 2.24.	Farklı mertebeden B-spline segmentleri için çizilen konveks alanlar...	28
Şekil 2.25.	B-spline eğrisi ile doğru parçasının temsili.....	29
Şekil 2.26.	Alüminyum alaşımları genel üretim yöntemleri.....	31
Şekil 3.1.	Al 7075 serisi alüminyumların kullanım alanları.....	33
Şekil 3.2.	B-Spline eğri	36
Şekil 3.3.	Referans yüzeye ait iş parçası.....	36
Şekil 3.4.	HM kaba işleme takım yolu.....	37
Şekil 3.5.	Ara kaba takım yolu	37
Şekil 3.6.	Kontür Kaba takım yolu.....	38
Şekil 3.7.	Paralel Kaba takım yolu.....	38
Şekil 3.8.	Eğriye Paralel takım yolu.....	39
Şekil 3.9.	Paralel Tarama takım yolu.....	39
Şekil 3.10.	Paralel Doğrusal takım yolu.....	39
Şekil 3.11.	Paralel Sabit Z takım yolu.....	40
Şekil 3.12.	Kaba işlemede kullanılan 12 mm çaplı takım.....	41
Şekil 3.13.	Ara Kaba işlemede kullanılan 10 mm çaplı takım.....	42
Şekil 3.14.	Finish işlemede kullanılan 8 mm çaplı takım.....	42
Şekil 3.15.	Deney numunelerinin boyutları ve aralarındaki mesafeler.....	43
Şekil 3.16.	Alüminyum blokun dik işleme merkezli CNC freze tezgâhına bağlanması.....	43
Şekil 3.17.	Breuckmann Smart Scan R5 3 boyutlu tarama cihazı.....	44

Şekil 4.1.	Numunelerin yüzeyindeki ölçüm bölgeleri.....	45
Şekil 4.2.	Referans yüzey ve eğri görseli.....	45
Şekil 4.3.	A numunesine ait 3B taraması (renk diyagramı uygulanmamış).....	46
Şekil 5.1.	Toplam sapma miktarına göre numunelerin bölgesel grafiği.....	69
Şekil 5.2.	E numunesinde form hatası en yüksek olan bölgeler.....	76
Şekil 8.1.	HM kaba işleme parametreleri.....	82
Şekil 8.2.	HM kaba işleme pasolar.....	82
Şekil 8.3.	Ara Kaba işleme parametreleri.....	83
Şekil 8.4.	Ara Kaba işleme pasolar.....	83
Şekil 8.5.	Kontur Kaba işleme parametreleri.....	84
Şekil 8.6.	Kontur Kaba işleme pasolar.....	84
Şekil 8.7.	Paralel Kaba işleme parametreleri.....	85
Şekil 8.8.	Paralel Kaba işleme pasolar.....	85
Şekil 8.9.	Paralel Kesim Tarama işleme parametreleri.....	86
Şekil 8.10.	Paralel Kesim Tarama yüzey kalitesi parametreleri.....	86
Şekil 8.11.	Paralel Kesim Tarama işleme parametreleri.....	87
Şekil 8.12.	Paralel Kesim Tarama yüzey kalitesi parametreleri.....	87
Şekil 8.13.	Paralel Kesim Sabit Z işleme parametreleri.....	88
Şekil 8.14.	Paralel Kesim Sabit Z yüzey kalitesi parametreleri.....	88
Şekil 8.15.	Eğriye Paralel işleme parametreleri.....	89
Şekil 8.16.	Eğriye Paralel yüzey kalitesi parametreleri.....	89
Şekil 8.17.	A numunesi 1. bölge tarama sonuçları.....	90
Şekil 8.18.	A numunesi 2. Bölge tarama sonuçları.....	90
Şekil 8.19.	A numunesi 3. Bölge tarama sonuçları.....	91
Şekil 8.20.	A numunesi 4. Bölge tarama sonuçları.....	91
Şekil 8.21.	A numunesi 5. Bölge tarama sonuçları.....	92
Şekil 8.22.	A numunesi 6. Bölge tarama sonuçları.....	92
Şekil 8.23.	A numunesi 7. Bölge tarama sonuçları.....	93
Şekil 8.24.	A numunesi 8. Bölge tarama sonuçları.....	93
Şekil 8.25.	A numunesi 9. Bölge tarama sonuçları.....	94
Şekil 8.26.	A numunesine ait 3B tarama görseli.....	95
Şekil 8.27.	B numunesine ait 3B tarama görseli.....	95
Şekil 8.28.	C numunesine ait 3B tarama görseli.....	96
Şekil 8.29.	D numunesine ait 3B tarama görseli.....	96
Şekil 8.30.	E numunesine ait 3B tarama görseli.....	97
Şekil 8.31.	F numunesine ait 3B tarama görseli.....	97
Şekil 8.32.	G numunesine ait 3B tarama görseli.....	98
Şekil 8.33.	H numunesine ait 3B tarama görseli.....	98
Şekil 8.34.	I numunesine ait 3B tarama görseli.....	99
Şekil 8.35.	J numunesine ait 3B tarama görseli.....	99
Şekil 8.36.	K numunesine ait 3B tarama görseli.....	100
Şekil 8.37.	L numunesine ait 3B tarama görseli.....	100

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1.	Alüminyum alaşımların ısıl işlemleri ve özel üretim şekilleri	32
Çizelge 3.1.	AA 7075 kalite alüminyumun kimyasal bileşimi (% ağırlık).....	34
Çizelge 3.2.	Al 7075 alaşımının mekanik özellikleri.....	34
Çizelge 3.3.	B-Spline eğriye ait knot, kontrol noktaları ve derece değerleri	35
Çizelge 3.4.	Serbest şekilli yüzeylerin imalatında kullanılan takım yolları.....	40
Çizelge 3.5.	Kaba ve Ara Kaba takım yollarına ait işleme parametreleri.....	41
Çizelge 3.6.	Finish işleme takım yollarına ait işleme parametreleri.....	41
Çizelge 4.1.	A numunesi 1.bölgeye ait 3B tarama çizim karşılaştırma sonuçları...	46
Çizelge 4.2.	A numunesi 2.bölgeye ait 3B tarama çizim karşılaştırma sonuçları...	47
Çizelge 4.3.	A numunesi 3.bölgeye ait 3B tarama karşılaştırma sonuçları.....	47
Çizelge 4.4.	A numunesi 4.bölgeye ait 3B tarama karşılaştırma sonuçları.....	48
Çizelge 4.5.	A numunesi 5.bölgeye ait 3B tarama karşılaştırma sonuçları.....	48
Çizelge 4.6.	A numunesi 6.bölgeye ait 3B tarama karşılaştırma sonuçları.....	49
Çizelge 4.7.	A numunesi 7.bölgeye ait 3B tarama karşılaştırma sonuçları.....	49
Çizelge 4.8.	A numunesi 8.bölgeye ait 3B tarama karşılaştırma sonuçları.....	50
Çizelge 4.9.	A numunesi 9.bölgeye ait 3B tarama karşılaştırma sonuçları.....	50
Çizelge 4.10.	Numunelerin 1.bölgesine ait sapma değerleri.....	52
Çizelge 4.11.	Numunelerin 2.bölgesine ait sapma değerleri.....	53
Çizelge 4.12.	Numunelerin 3.bölgesine ait sapma değerleri.....	54
Çizelge 4.13.	Numunelerin 4.bölgesine ait sapma değerleri.....	55
Çizelge 4.14.	Numunelerin 5.bölgesine ait sapma değerleri.....	56
Çizelge 4.15.	Numunelerin 6.bölgesine ait sapma değerleri.....	57
Çizelge 4.16.	Numunelerin 7.bölgesine ait sapma değerleri.....	58
Çizelge 4.17.	Numunelerin 8.bölgesine ait sapma değerleri.....	59
Çizelge 4.18.	Numunelerin 9.bölgesine ait sapma değerleri.....	60
Çizelge 5.1.	Takım yollarına ait işleme zamanı ve G-kod satır sayısı.....	61
Çizelge 5.2.	$\pm 0,05$ mm tolerans değerini aşan noktaların sayısı ve toplam değerleri.....	62
Çizelge 5.3.	Numunelere göre aşma miktarının sıralanması.....	63
Çizelge 5.4.	Bölgelere göre aşma miktarı sıralaması.....	64
Çizelge 5.5.	Bölgelere göre aşma değeri sıralaması.....	64
Çizelge 5.6.	Bölgeler ve numunelere göre toplam ve ortalama sapma değerleri...	66
Çizelge 5.7.	Toplam sapma miktarına göre bölgelerin değerlendirilmesi.....	67
Çizelge 5.8.	Ortalama sapma miktarına göre bölgelerin değerlendirilmesi.....	67
Çizelge 5.9.	Toplam sapma miktarına göre numunelerin sıralanması.....	68
Çizelge 5.10.	Ortalama sapma miktarına göre numunelerin sıralanması.....	68
Çizelge 5.11.	Numunelerin toplam sapma miktarına göre grafiği.....	70
Çizelge 5.12.	Toplam sapma miktarına göre ara kaba yöntemlerinin değerlendirilmesi.....	72
Çizelge 5.13.	Toplam sapma miktarına göre ince işleme yöntemlerinin değerlendirilmesi.....	72
Çizelge 5.14.	E-F-L-D numunelerinin takım yollarına ait işleme süresi ve satır sayısı.....	73
Çizelge 5.15.	E numunesine ait bölgesel toplam sapma grafiği.....	74
Çizelge 5.16.	E numunesine ait ortalama sapma değerlerinin sıralanışı.....	75
Çizelge 5.17.	İlerleme hızı %10 azaltılarak işlenen E numunesinin form hatalarının karşılaştırılması.....	77
Çizelge 8.1.	1.Bölge Ortalama Sapma Grafiği.....	101
Çizelge 8.2.	2.Bölge Ortalama Sapma Grafiği.....	101

Çizelge 8.3.	3.Bölge Ortalama Sapma Grafiği.....	102
Çizelge 8.4.	4.Bölge Ortalama Sapma Grafiği.....	102
Çizelge 8.5.	5.Bölge Ortalama Sapma Grafiği.....	103
Çizelge 8.6.	6.Bölge Ortalama Sapma Grafiği.....	103
Çizelge 8.7.	7.Bölge Ortalama Sapma Grafiği.....	104
Çizelge 8.8.	8.Bölge Ortalama Sapma Grafiği.....	104
Çizelge 8.9.	9.Bölge Ortalama Sapma Grafiği.....	105

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Al	Alüminyum
Al7075	Alüminyum 7075 alaşımı
$B_i(u)$	B-Spline eğride kontrol noktası
B	Bor
Be	Berilyum
BDT	Bilgisayar destekli tasarım
BDİ	Bilgisayar destekli imalat
Bi	Bizmut
C^k	B-Spline eğri temel fonksiyonun türevi
Ca	Kalsiyum
CAD	Bilgisayar destekli tasarım
CADG	Bilgisayar destekli geometrik tasarım
CAM	Bilgisayar destekli imalat
CNC	Bilgisayarlı sayısal kontrol
Cu	Bakır
Co	Kobalt
d	B-Spline eğrinin derecesi
Fe	Demir
Gpa	Giga pascal
Hg	Cıva
HSSCo	Kobalt içeren çelik alaşımlı yüksek hızlı matkap ucu
I	İyot
k	B-Spline eğrinin mertebesi
Mg	Magnezyum
Mn	Mangan
Mpa	Mega pascal
n	B-Spline eğrinin kontrol noktası sayısının 1 eksiği
$N_{i,k}$	B-Spline eğrinin temel fonksiyonu
Na	Sodyum
Ni	Nikel
NURBS	Non-uniform Rational B-Spline
P_i	Bernstein polinomu kontrol noktası
Pb	Kurşun
Rm	Çekme mukavemeti
Rp	Elastiklik değeri
Si	Silisyum
Sn	Kalay
Sb	Antimon
Sr	Stronisyum
t	Knot (düğüm noktası)
Ti	Titanyum
u	B-Spline eğri yön vektörü
v	B-Spline eğri yön vektörü
V	Vanadyum
Zn	Çinko
Zr	Zirkonyum
X_i	B-Spline eğri düğüm vektörü elemanı
3B	3 boyut

1. GİRİŞ

Genel olarak yeni bir ürünü veya var olan bir ürünü geliştirmek için ileri mühendislik veya tersine mühendislik yöntemleri kullanılmaktadır. Bilindiği üzere ileri mühendislik yönteminde bir ürünün 3B (3 boyutlu) modeli, CAD (Computer Aided Design) ortamında oluşturulur ve CAD verileri elde edilir. Daha sonra uygun işleme yöntemlerine göre oluşturulan proses kullanılarak, CNC (Computer Numerical Control) tezgahlarda üretim yapılır. Tersine mühendislikte ise geometrik bilgi doğrudan fiziksel şekilden elde edilir ve bu bilgi ileri mühendisliğin alt süreçlerinden geçirilerek imalat gerçekleştirilir. Tersine mühendislikte genellikle koordinat ölçüm cihazları kullanılarak dağınık noktalardan datalar elde edilir ve bu datalar kullanılarak nokta bulutu oluşturulur. Sayısallaştırma cihazlarının özelliklerinden dolayı nokta bulutları düzenli ve düzensiz nokta bulutları olmak üzere ikiye ayrılır. Düzenli ve düzensiz nokta bulutlarının ikisinde de yüzey uydurma teknikleri uygulanarak ve yüzey modeli oluşturulur. Bu tür uygulamalar özellikle serbest şekilli yüzeyler için yoğun olarak uygulanmaktadır.

CAD/CAM (Computer Aided Design/Computer Aided Manufacturing) 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 kullanılan klasik CNC tezgâhları sadece lineer ve dairesel enterpolasyon sağlamaktadır. Klasik CNC tezgâhlarında, serbest şekilli yüzeyleri verilen toleranslar altında kontür geometriye yaklaştırmak için, CAM sistemleri kullanarak birçok doğru ve daire yaratma zorunluluğu ortaya çıkmaktadır. Fakat parça hassasiyeti artırıldıkça aşağıdaki sorunlarla karşılaşmaktadır.

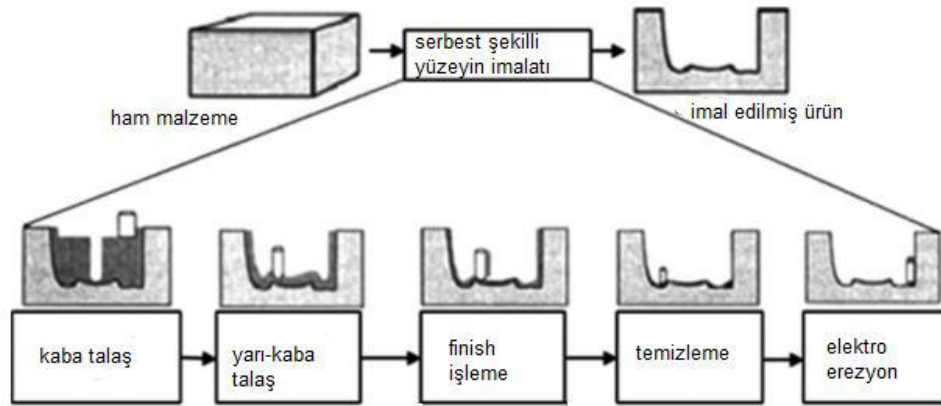
Toleransların artırılması durumunda karşılaşılan sorunlar;

- Çizgi ve daireden oluşan geometri değerlerin kısılmasına neden olmakta, buda CNC tezgâhına dönüşümü sağlayan NC kodların sayısının artmasına neden olmaktadır,
- CNC tezgahlar yüksek hızlı işleme esnasında yoğun data iletimi nedeni ile transfer edilen data miktarını yakalayamamakta ve imalat hatasına neden olmaktadır,
- Birbirine bağlı iki çizginin birleşme noktasında süreksizlik ve ilerlemede hatalar oluşturmakta,
- Yüksek hızda işlemede meydana gelen ani hareketler ve ani hızlanmalar titreşime sebep olmakta ve işleme kalitesi düşmektedir.

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 üretilmesindeki işleme yöntemleri kaba, yarı kaba ve hassas işleme olmak üzere üç aşamadır. Ürün üzerinden gereksiz malzemenin büyük bir bölümünün çıkartılmasına kaba talaş adı verilir. Daha sonra finish işleminde talaşın düzgün olarak alınması için yarı kaba olarak adlandırılan bir işlem uygulanır. Dizayn edilmiş yüzeyi elde etmek için ise finish işlemi (son işlem) uygulanır. Genel olarak kaba işlemede düz uçlu freze çakısı kullanılırken, yarı kaba ve finish işlemede ise radyuslu çakılar kullanılmaktadır. Bunlara rağmen halen talaş kalmışsa (özellikle eğrisel alanlarda ve kesici takımın ulaşamadığı yerlerde) temizleme işlemi uygulanır. Kesici takımla işlenemeyen alanlar ise elektro erozyon tezgâhlarında belirlenmiş toleranslar çerçevesinde işlenir (Şekil 1.1).



Şekil 1.1. Serbest şekilli yüzeyin imalat aşamaları

Serbest şekilli yüzeylerin kalitesi ve imalat süresi sanayide rekabeti etkileyen önemli faktörlerdir. Ürünün belirtilen tolerans içerisinde üretimini gerçekleştirmek, maliyet ve zamanı azaltmak imalat endüstrisinde çözülmesi gereken sorunlardandır. İşleme sürecinin uygun optimizasyonu ile yüksek kalitede ve uygun maliyette ürün üretimi sağlamak mümkündür. Klasik işleme yöntemleri düşük maliyetlerle üretim sağlamayı amaçlamasına rağmen serbest şekilli yüzeylerin imalatında bu hedefi gerçekleştirmek için farklı çalışmalar yapılması gerekmektedir.

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 nedenle konular üzerine yoğun bir şekilde çalışmalar yapılmaktadır. Bu konuda yapılan çalışmalar incelendiğinde;

Haldar [1], 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 (Numerical Control) kodları CNC Fanuc simülasyon programında test etmiş ve işleme uzunluğunu hesaplamıştır.

Abbas [2], 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 miktarında 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 [3], 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 ayarlamak,
- (ii) Uygun kontrol noktaları belirlemek,
- (iii) Kontrol noktalarına atanan ağırlıkları tanımlamak,
- (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 [4], 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 Geometric Design) ile incelemişlerdir.

Farouki vd. [5], 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-Keun Choi vd. [6], 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 geliştirmişleridir. Geliştirdikleri

algoritmayı matematiksel eğriler ve yüzeyler ile temsil edilen parçaya uygulayıp işleme zamanını azaltmayı başarmışlardır.

Kurt vd. [7], serbest şekilli yüzeylerin 3 eksenli CNC tezgâhta işlenmesinde takım yollarının form hatalarına ve yüzey pürüzlülüğüne etkilerini AL 7075 malzemesini işleyerek incelemiştir. 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.

Chanthasopephan vd. [8], eğri yüzeylerin CNC freze tezgâhında üretiminde form hatalarına, kesme gücünün etkisini, işleme yönünün etkisini ve kullanılan takımın çapının etkilerini araştırmışlardır.

Kim [9], 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 [10], serbest şekilli yüzeylerde uygun takım yolunun seçimini sağlayan, yüzeyin 3D topografyasını tahmin eden CAM yazılımı ile ilişkili yeni bir model geliştirmişlerdir.

Dhokia [11], 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 vd. [12], kalıp ve benzeri parçaların radyuslu takım ile üretiminde istenilen yüzey pürüzlülüğünü ve yüzey topografyasını tahmin etmek için bir sistem geliştirmiştir.

Zebala vd. [13], Serbest şekilli yüzeye sahip fiber kompozit bir malzemeyi CNC freze tezgâhında işleyerek, yüzey kalitesi ve pürüzlülüğünü kontrol etmişlerdir. Aynı takım yolu ile 3 farklı işleme yöntemi kullanarak pürüzlülüğe ve kaliteye etkisi en iyi olan yöntemi belirlemişlerdir.

Maekawa vd. [14], form hatalarını tespit etmek amacıyla yeni bir algoritma geliştirmişlerdir. Yapmış oldukları çalışmayı dış bükey bir eğri için uygulayıp oldukça başarılı sonuçlar elde etmişlerdir. Geliştirmiş oldukları bu algoritma geleneksel yöntemlere alternatif olarak geliştirilmiştir.

Özel ve Kılıçkap [15], C programlama kullanarak, bezier eğriler yardımıyla oluşturulan bir yüzeyin, CAD/CAM modelini oluşturmuşlardır. Yapmış oldukları model sayesinde piyasada oldukça pahalı olan CAD/CAM programlarına ihtiyaç olmadan imalat yapılabileceğini göstermişlerdir.

Yukarıdaki çalışmalar incelendiğinde, serbest şekilli yüzeylerin imalatında yeni takım yolu algoritmalarının geliştirilmesi, CAM programlarındaki finish işlemede takım yollarının form hatalarına etkilerine ve işleme zamanını azaltmaya yönelik çalışmalara yoğunlaşıldığı görülmektedir. Ayrıca çalışmaların büyük bir kısmında simülasyon ağırlıklı olarak gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışmada, diğer çalışmalardan farklı olarak, B-Spline eğrilerden yararlanılarak oluşturulan bir yüzeyin CAM programındaki kaba, ara kaba ve finish işleme takım yollarının form hatası üzerine etkileri incelendi. Deneyler sonucunda meydana gelen form hatalarını azaltmak amacıyla, hatalarının yoğun olarak meydana geldiği bölgeler tespit edildi. Bu bölgelerde oluşan form hatalarını en aza indirmek amacıyla tekrardan deney yapıldı. Yeni deneyde, deneyler sonucunda form hatasının en az meydana geldiği yüzey dikkate alındı. Bu yüzeyde form hatalarının olduğu bölgelerde ilerlemenin %10 azaltılmasının hatalara olan etkileri araştırıldı.

2. GENEL BİLGİLER

2.1. Bezier Eğriler

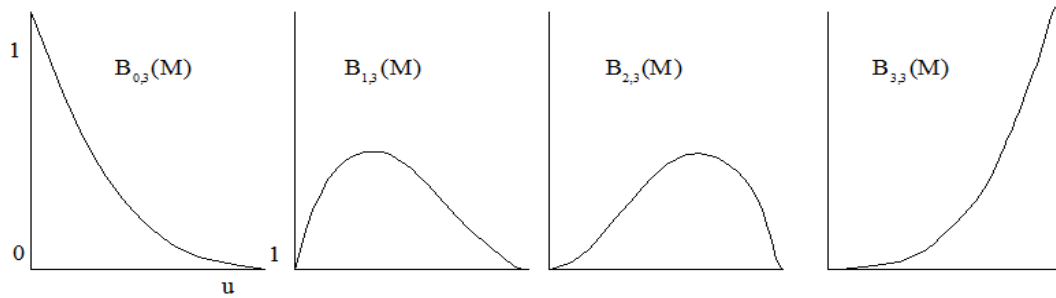
Bezier eğriler ilk olarak 1959 da Paul de Casteljaou tarafından ileri sürülmüştür. Ama 1970'lerde Renault'da çalışan fransız mühendis Pierre Bezier (1974) tarafından otomobillerin tasarımında kullanılmasıyla tanınmış bir hal almıştır. Bezier eğrilerinin sahip olduğu özellikler, onların eğri ve yüzey tasarımında kullanışlı olmasını sağlamıştır. Ayrıca, Bezier eğrilerin programlanması oldukça kolaydır. Bu özelliklerinden 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 bir çok alanda sıkça kullanılmaktadır. Pierre Bezier, $n+1$ adet p_i kontrol noktası tarafından kontrol edilen $p(u)$ eğrisini aşağıdaki gibi tanımlamıştır [16].

$$p(u) = \sum_{i=0}^n P_i B_{i,n}(u) \quad (2,1,1)$$

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

$$B_{i,n}(u) = \frac{n!}{i!(n-i)!} u^i (1-u)^{n-i} \quad (2,1,2)$$

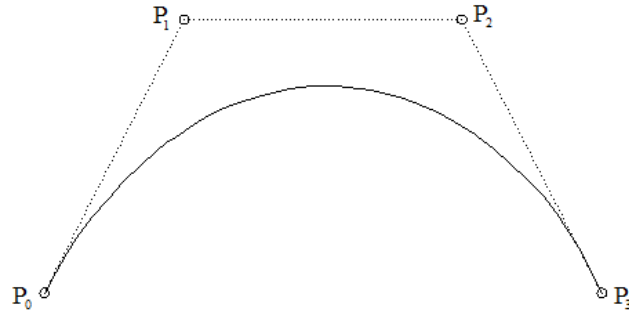
Bernstein polinomları Bezier eğrilerinin temelini oluşturur. Şekil 2.1 'de dört kontrol noktasına sahip Bezier eğrisinin dört Bernstein polinomu gösterilmektedir. Bernstein polinomları, u parametresinin değişik değerleri için, kontrol noktalarının Bezier eğrisi üzerindeki etkilerini belirtir. İlk kontrol 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 için kullanılan dört kontrol noktası

Aşağıda kübik Bezier eğrilerine ait Bernstein polinomlarının denklemleri gösterilmektedir.

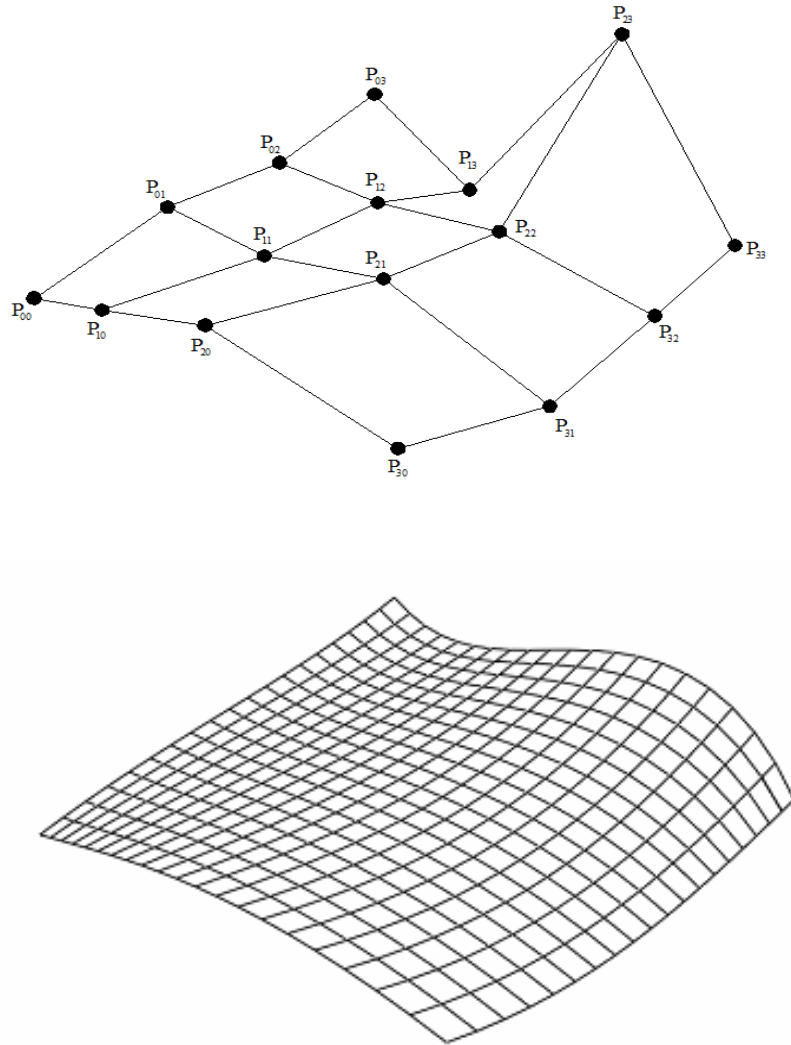
$$\begin{aligned}
 B_{0,3} &= (1-u)^3 \\
 B_{1,3} &= 3u(1-u)^2 \\
 B_{2,3} &= 3u^2(1-u) \\
 B_{3,3} &= u^3
 \end{aligned} \tag{2,1,3}$$

Buna göre, kübik Bezier eğrisinin denklemleri aşağıdaki gibi olacaktır.

$$P(u) = P_0(1-u)^3 + P_1 3u(1-u)^2 + P_2 3u^2(1-u) + P_3 u^3 \tag{2,1,4}$$

Dört kontrol noktasına sahip Bezier eğrilerinin gösterimi üçüncü dereceden (kübik) bir polinom olmaktadır. Polinom 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:

$$P(u, v) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m P_{i,j} B_{i,n}(u) B_{j,m}(v) \quad (2,1,5)$$

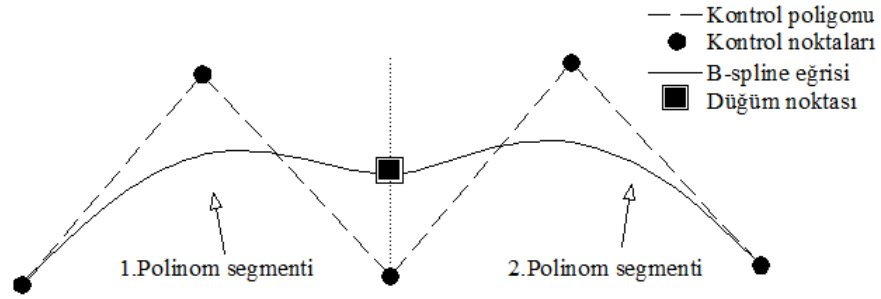


Şekil 2.3. 16 kontrol noktası tanımlanmış bir Bezier yüzeyi gösterilmektedir

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 [17].

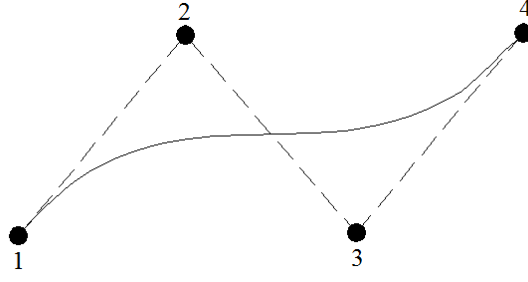
2.2. B-Spline Eğrileri

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 miktaris gibi davranarak eğrinin kontrol poligonunun şeklini takip etmesini sağlar ve sonuçta kontrol poligonunun sınırları içerisinde kalan karakteristik ve düzgün bir eğri elde edilir [18].



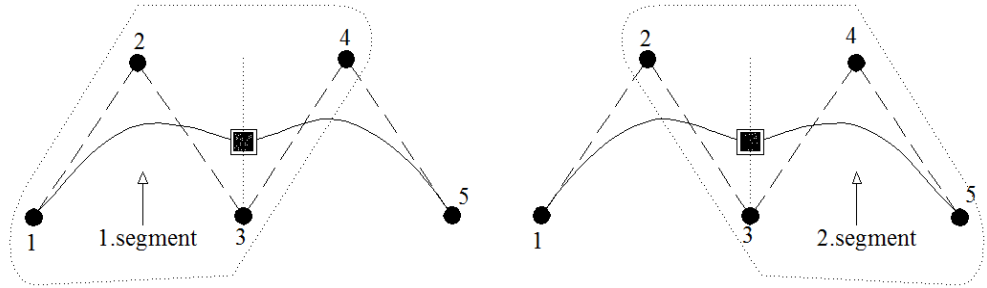
Şekil 2.4. Bir B-spline eğrisi ve kontrol poligonu

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.

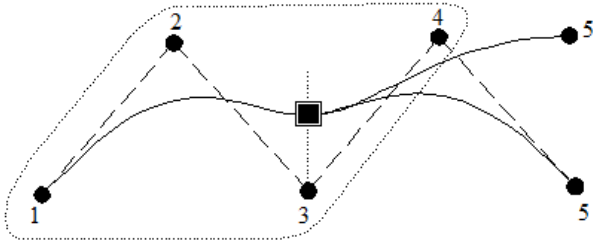


Şekil 2.5. Bezier eğrisine eşdeğer bir B-spline eğrisi

B-spline eğrisinin derecesi Bezier eğrilerinde olduğu gibi kontrol noktasına bağlı olmayıp, kontrolü mükündür. 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.

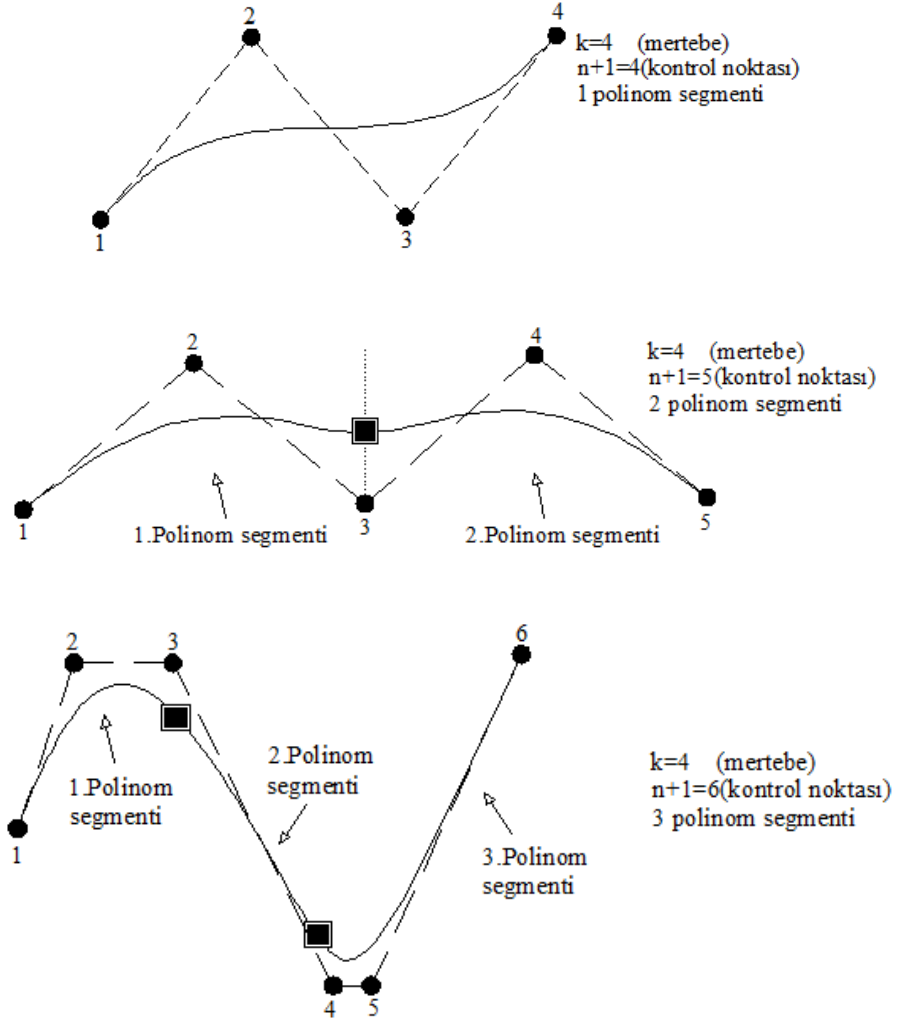


Şekil 2.6. B-spline eğrisinin 1. ve 2. segmentini etkileyen kontrol noktaları



Şekil 2.7. Kontrol noktası ile eğri mertebesi arasındaki ilişki

Kontrol noktası sayısı ile eğrinin mertebesi arasındaki ilişki eğrinin kaç polinom segmentinden oluşacağını belirler. B-spline eğrisinin mertebesi sayısından 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.

1	2	3	4	5	6	7	1.segment
1	2	3	4	5	6	7	2.segment
1	2	3	4	5	6	7	3.segment
1	2	3	4	5	6	7	4.segment
1	2	3	4	5	6	7	5.segment

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:

$$P(t) = \sum_{i=1}^{n+1} B_i N_{i,k}(t) \quad t_{\min} \leq t \leq t_{\max} \quad 2 \leq k \leq n+1 \quad (2,1,6)$$

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:

$$N_{i,1}(u) = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases}, \quad x_i \leq t \leq x_{i+1} \quad (2,2,1)$$

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,

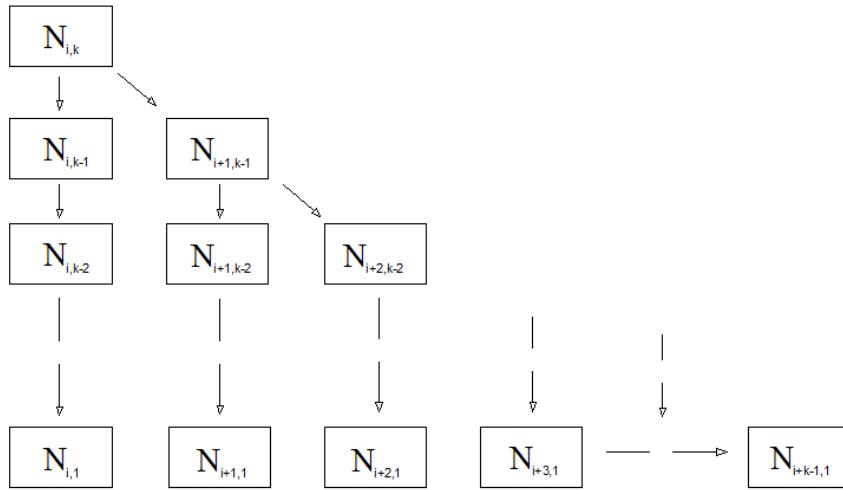
t : eğrinin parametresini,

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 [19].



Şekil 2.10. $N_{i,k}$ temel fonksiyonunun hesabı için gereken diğer temel fonksiyonlar

Normalleştirilmiş B-spline temel fonksiyonlarının bazı özellikleri aşağıda verilmektedir:

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

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

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

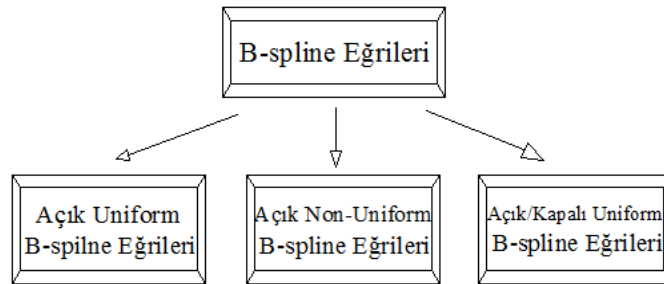
$$N_{i,k}(t) \text{ düğüm noktalarında } (k-2). \text{ mertebeden sürekliliğe sahiptir } (C)^{k-2}$$

2.2.2. B-Spline düğüm vektörünün tanımı

Her B-spline eğrisi için bir düğüm vektörü tanımlanmıştır. Bu vektör, B-spline eğrisinin parametre aralığını göstermektedir. B-spline temel fonksiyonlarının (2,2,2) denkleminde görülen x_i değerleri, eğri boyunca değişen t parametresini gösteren düğüm vektörünün elemanlarıdır. Monoton olarak artan reel sayılardan $x_i \leq x_{i+1}$ oluşan düğüm vektörünün B-spline fonksiyonlarının şekillenmesinde büyük önemi vardır. B-spline eğrisi bu düğüm vektörünün elemanlarının belirlediği sayıda ve şekilde parçalara ayrılır. Yani bir B-spline eğrisinin kaç polinom segmentinden oluşacağı düğüm vektörü tarafından belirlenir. Düğüm vektörünün elemanları, t_{\min} 'den t_{\max} 'a doğru monoton olarak t parametre değerleridir.

$$[X] = [t_{\min} = t_1 \quad (t_2) \dots (t_{n+k}) \quad t_{\max} = t_{n+1+k}] \quad (2,2,3)$$

B-spline eğrisinin üniform, non-üniform veya açık, kapalı bir eğri olup olmadığı düğüm vektörü ile belirlenir. Bir başka deyişle B-spline eğrileri kullanılan düğüm vektörünün tipine göre sınıflandırılır.



Şekil 2.11. B-spline eğrilerinin sınıflandırılması

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

Üniform bir düğüm vektörü eşit aralıklı artan parametre değerlerine sahiptir. Bu vektörün elemanları sıfırdan başlayıp maksimum parametre değerine kadar eşit aralıklı olarak artmaktadır. Eğer, normalize edilmiş 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,

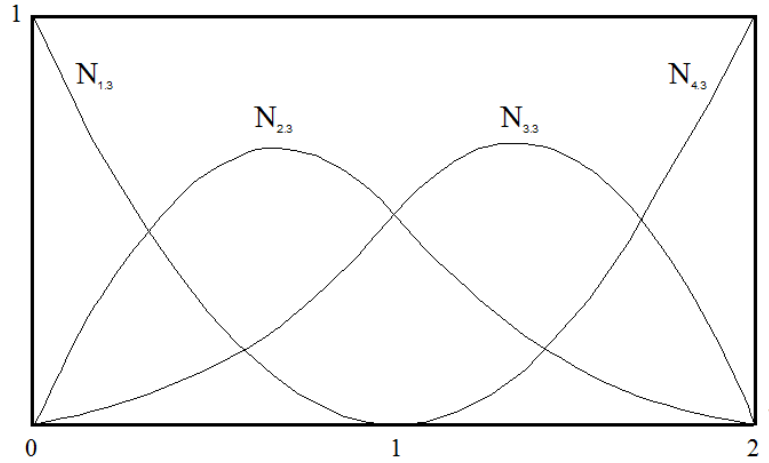
$$k=3 \text{ için } X=[0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 2 \ 3 \ 3 \ 3] \quad (2,2,4)$$

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.' de 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)

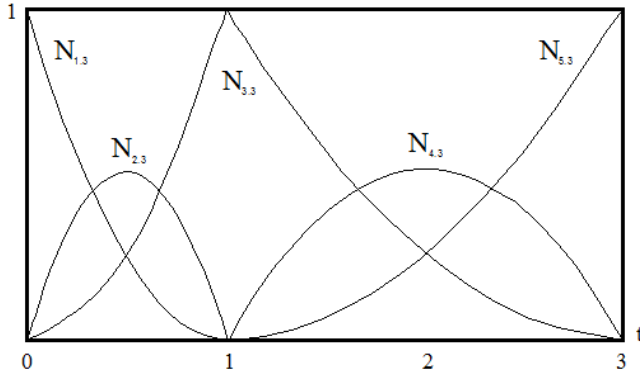
Eğer kontrol poligonuna ait nokta sayısı (n+1) ve eğrinin mertebesi (k) eşitse, açık üniform B-spline temel fonksiyonları Bernstein temel fonksiyonlarına indirgenir. (Bezier eğrileri) Örneğin, dört poligon noktası ile dördüncü mertebeden (k=4) bir eğrinin çizilmesiyle bir kübik Bezier/B-spline eğrisi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

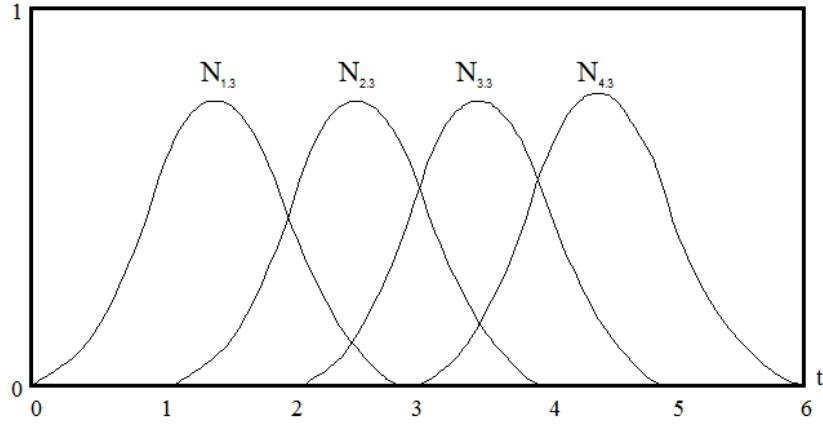
$t_{\max} = n + k$ arasında değişecektir ve eleman sayısı da $n+k+1$ olacaktır. Örneğin, ikinci derece ($k=3$) ve dört poligon noktası ($n+1=4$) olan bir eğri için, periyodik üniform düğüm vektörü;

$$X = [0 \ 1 \ 2 \ 3 \ 4 \ 5 \ 6] \quad (2,2,13)$$

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

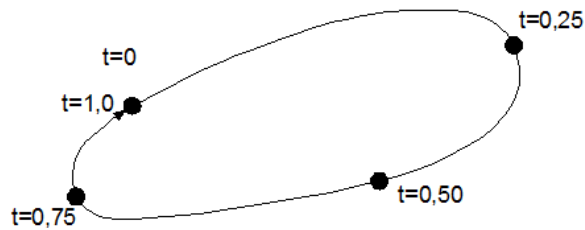
$$N_{i,k}(t) = N_{i-1,k}(t-1) = N_{i+1,k}(t+1) \quad (2,2,14)$$

Periyodik temel fonksiyonların bu özelliği Şekil 2.14'de görölmektedir.



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 görölmektedir:



Şekil 2.15. Periyodik (kapalı) bir B-spline eğrisi ve parametre değişimi

Örnek : Üç kontrol noktası ile tanımlanmış ($n+1=3$), quadratik bir B-spline eğrisinin ($k=3$)

periyodik temel fonksiyonlarını $N_{i,3}(t), i = 1, 2, 3$ hesaplayıp, çizelim.

Çözüm: Bu eğrinin parametre aralığı düğüm vektörü ile belirlenir.

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

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

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 (4.1) denkleminde de görülebileceği gibi 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.

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

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

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

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:

$$N_{1,1}(t) = 1 \quad ; \quad N_{i,1} = 0, \quad i \neq 1 \quad (2,2,15)$$

2.mertebe fonksiyonlar:

$$N_{1,2}(t) = \frac{(t-0)}{(1-0)} N_{1,1} + \frac{(2-t)}{(2-1)} N_{2,1} = t + 0 = t \quad ; \quad N_{i,2} = 0, \quad i \neq 1 \quad (2,2,16)$$

3.mertebe fonksiyonlar:

$$N_{1,3}(t) = \frac{(t-0)}{(2-0)} N_{1,2} + \frac{(3-t)}{(3-1)} N_{2,2} = \frac{t}{2} t + 0 = \frac{t^2}{2} \quad ; \quad N_{i,3} = 0, \quad i \neq 1 \quad (2,2,17)$$

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

1.mertebe fonksiyonlar:

$$N_{2,1}(t) = 1 \quad ; N_{i,1} = 0, i \neq 2 \quad (2,2,18)$$

2.mertebe fonksiyonlar:

$$N_{1,2}(t) = \frac{(t-0)}{(1-0)} N_{1,1} + \frac{(2-t)}{(2-1)} N_{2,1} = 0 + (2-t) = (2-t) \quad (2,2,19)$$

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

(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:

$$N_{5,1}(t) = 1 \quad ; N_{i,1} = 0, i \neq 5 \quad (2,2,34)$$

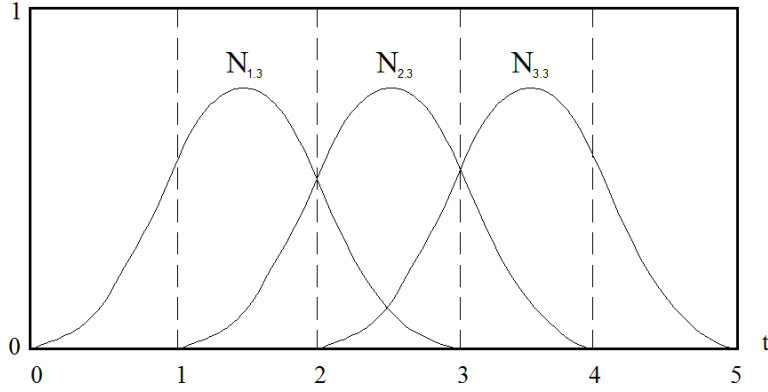
2.mertebe fonksiyonlar:

$$N_{4,2}(t) = (5-t) \quad ; N_{i,2} = 0, i \neq 4 \quad (2,2,35)$$

3.mertebe fonksiyonlar:

$$N_{3,3}(t) = \frac{(5-t)^2}{2} \quad ; \quad N_{i,3} = 0, \quad i \neq 3 \quad (2,2,36)$$

Quadratik eğriler olan $N_{1,3}$, $N_{2,3}$, $N_{3,3}$ temel fonksiyonlarını Şekil 2.16'da görülmektedir.



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.

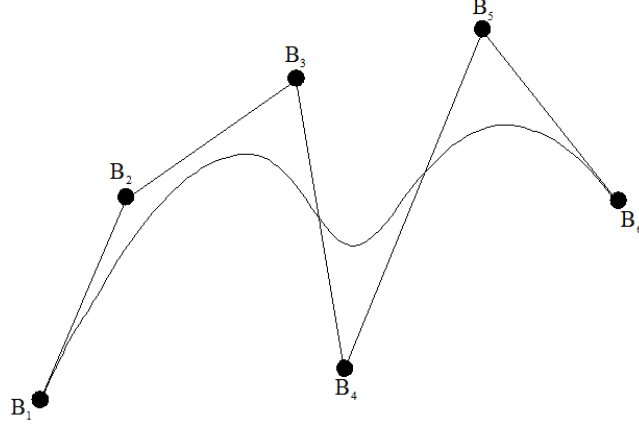
$$P(u, v) = \sum_{i=1}^{n+1} B_i N_{i,k}(t) \quad t_{\min} \leq t < t_{\max} \quad , \quad 2 \leq k < n+1 \quad (2,2,37)$$

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

Örnek: Dört kontrol noktası ile tanımlanmış ($n+1=4$), açık üniform quadratik B-spline eğrisinin ($k=3$) denklemini bulunuz. $B_1[1,1]$, $B_2[3,2]$, $B_3[5,1]$, $B_4[7,2]$

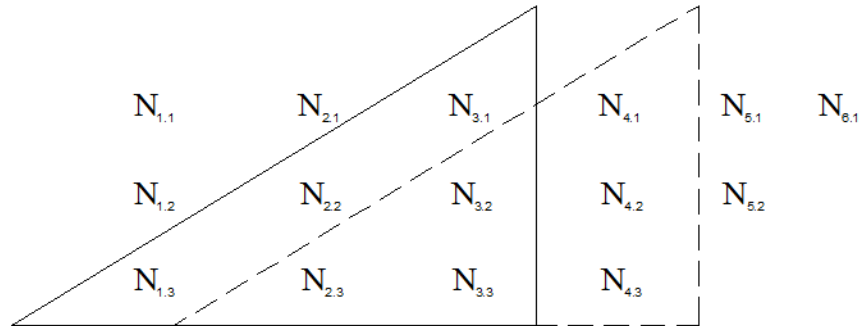
Çözüm:

Bu problemin 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:

$$N_{2,2}(t) = 1 - t \quad (2,2,39)$$

$$N_{3,2}(t) = t \quad ; \quad N_{i,2} = 0, \quad i \neq 2, 3 \quad (2,2,40)$$

3.mertebe fonksiyonlar:

$$N_{1,3}(t) = (1 - t)^2 \quad (2,2,41)$$

$$N_{2,3}(t) = t(1 - t) + \frac{(2 - t)}{2}t = \frac{4t - 3t^2}{2} \quad (2,2,42)$$

$$N_{3,3}(t) = \frac{t^2}{2} \quad ; \quad N_{i,3} = 0, \quad i \neq 1, 2, 3 \quad (2,2,43)$$

$$x_4 \leq t < x_5 \quad ; \quad 1 \leq t < 2 \quad (2,2,44)$$

1.mertebe fonksiyonlar:

$$N_{4,1}(t) = 1 \quad ; \quad N_{i,1} = 0, \quad i \neq 4 \quad (2,2,45)$$

2.mertebe fonksiyonlar:

$$N_{3,2}(t) = 2 - t \quad (2,2,46)$$

$$N_{4,2}(t) = t - 1 \quad ; \quad N_{i,2} = 0, \quad i \neq 3, 4 \quad (2,2,47)$$

3.mertebe fonksiyonlar:

$$N_{2,3}(t) = \frac{(2-t)^2}{2} \quad (2,2,48)$$

$$N_{3,3}(t) = \frac{t}{2}(2-t) + (2-t)(t-1) = \frac{(2-t)(3t-2)}{2} \quad (2,2,49)$$

$$N_{4,3}(t) = (t-1)^2 ; N_{i,3} = 0, i \neq 2, 3, 4 \quad (2,2,50)$$

(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;

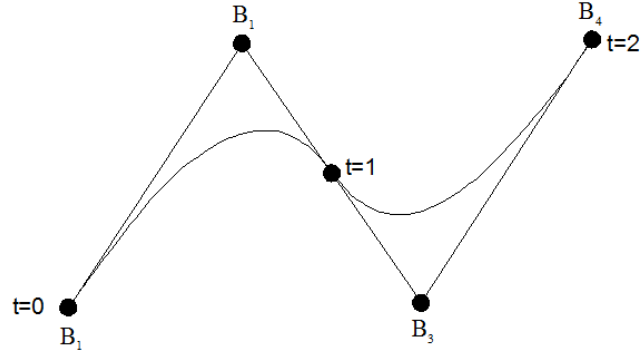
$$3. \quad P(t) = B_2 N_{2,3}(t) + B_3 N_{3,3}(t) + B_4 N_{4,3}(t) = B_2 \frac{(2-t)^2}{2} + B_3 \frac{(2-t) - (3t-2)}{2} + B_4 (t-1)^2 \quad (2,2,53)$$

$t=0$ 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)

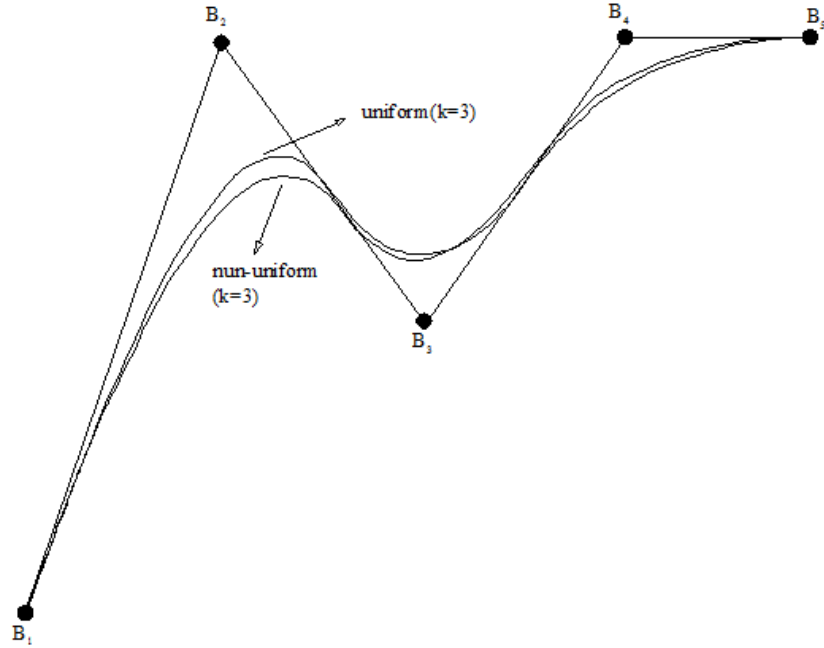
$t=1$ değeri için ise her iki polinom denkleminin vereceği değer aynıdır.

$$P(1) = B_2 \frac{1}{2} + B_3 \frac{1}{2} \quad (2,2,54)$$



Şekil 2.19. Örneğe göre B-spline eğrisi

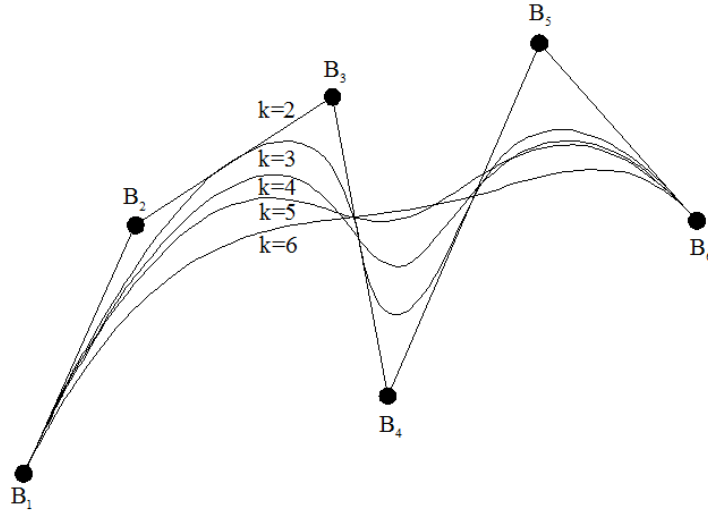
Değişik tipte düğüm vektörlerinin kullanılması sonucu elde edilen B-spline eğrileri Şekil 2.20'de karşılaştırılmaktadır. Şekilde açık üniform B-spline eğrisinin düğüm vektörü $(2,2,5)$ denklemi, non-üniform B-spline eğrisinin düğüm vektörü ise $(2,2,11)$ denklemi kullanılarak elde edilmiştir. Kontrol 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

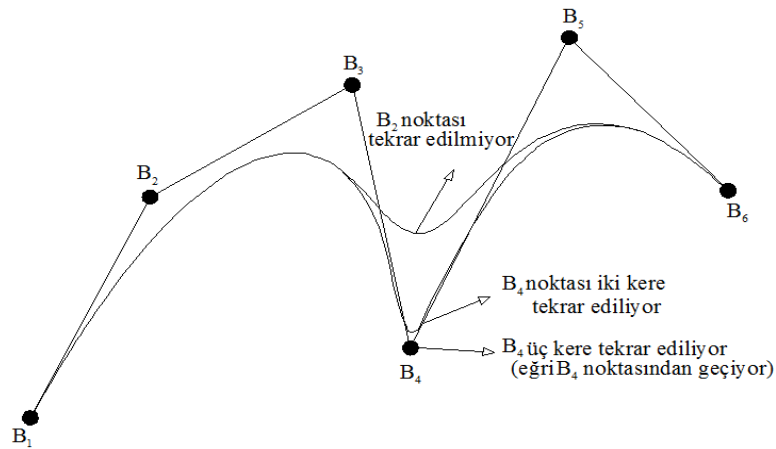
B-spline eğrilerinde mertebe değişiminin etkileri Şekil 2.21'de görülmektedir. Temelde, eğrinin mertebesi, eğrinin kontrol poligonunu ne kadar yakından takip edeceğini belirler. Eğrinin mertebesi düştükçe, oluşturulan eğri poligonuna daha yakın geçmekte, arttığı durumda ise giderek uzaklaşmaktadır. İkinci 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

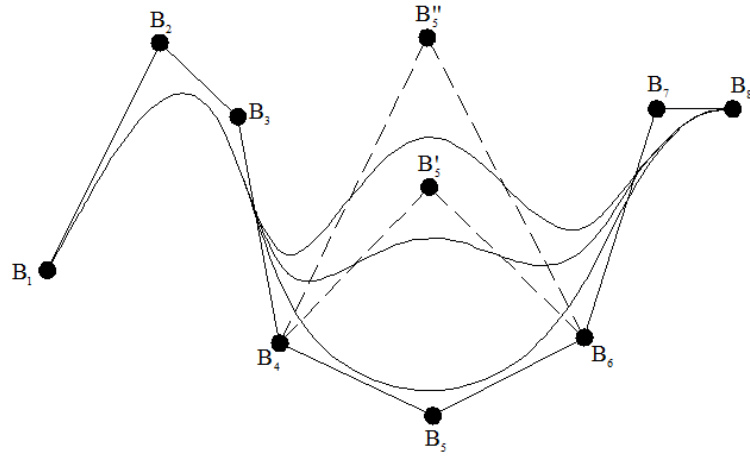
Şekil 2.22’de kontrol noktalarının tekrarlanması sonucu, eğrinin istenilen kontrol noktasına yaklaştırılabileceği hatta noktadan geçirilebileceği görülmektedir. Bu B-spline eğrilerinin en önemli özelliklerinden biridir. Bir poligon noktasının ($k-1$) kere tekrar edilmesi B-spline eğrisinin o poligon 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:

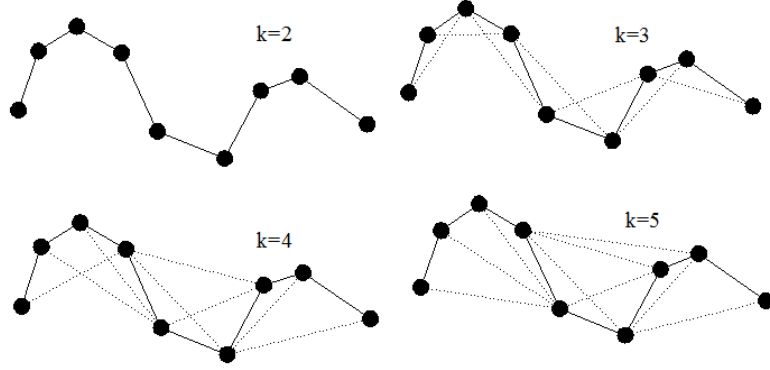
- Her kontrol noktası için farklı bir temel fonksiyon tanımlandığından, eğride yapılması istenen değişiklikler eğriyi lokal olarak etkilemektedir. Eğrinin polinom segmentleri, mertbe sayısı kadar ardışık kontrol noktasından etkilenmektedir ve o segment üzerinde diğer kontrol noktalarının hiçbir etkisi 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

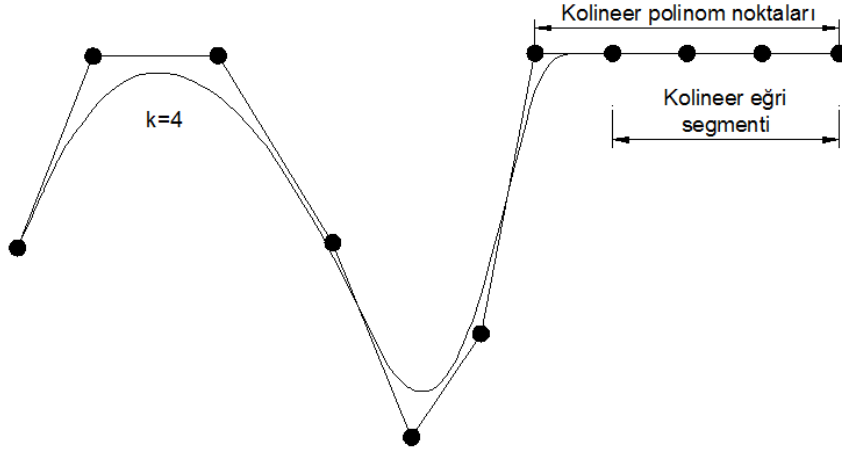
- B-spline eğrisi $P(t)$ her bir $x_i \leq t < x_{i+k}$ aralığında $(k-1)$. Dereceden sürekli bir eğridir ve $1, 2, \dots, (k-2)$. türevleri de eğri boyunca süreklidir. Süreklilik şartı (C^{k-2}) ile gösterilir.
- B-spline eğrisinin düğüm vektörü, o eğrinin parametre aralığını ve polinom segmentlerinin 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 mertbesi (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 için 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 tasarım ortamında karşılaşılabilecek tüm analitik şekilleri (çember, elips, yay) temsil edebilme kabiliyetidir. Dolayısıyla yakın zamanda tekne form tasarımında en çok tercih edilen ve en fazla uygulama alanı bulan matematiksel eğriler olmuşlardır[20].

B-Spline yüzeyler, yüzeyi oluşturan eğrilere benzer özellik göstermektedir. Eğrinin u ve v gibi iki farklı eksende tensör birleştirilmesi ile oluşur. B-Spline yüzeyler aşağıda verilen (2,2,55) eşitliği ile temsil edilir [18].

$$S(u, v) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^p T(P_{i,j}) N_{i,d}(u) N_{j,e}(v) \quad (2,2,55)$$

2.4. Alüminyum ve Alaşımları

2.4.1. Alüminyum

Alüminyum, demir-çelik malzemelerden sonra, mekanik özelliklerinin üstünlüğü nedeniyle, çağımızın en çok kullanılan ikinci metalidir. Alüminyumun metal olarak özellikleri birçok durumda onun ideal ve ekonomik bir malzeme olmasını sağlamaktadır. Alüminyumun;

1-Uygun mekanik özelliklerle birlikte düşük ağırlık,

2-Korozyona karşı dayanımı,

3-Alaşımlarının sağlamlık ve yumuşaklık açısından son derece çeşitli olması,

4-Koku ve kimyasallara karşı dayanım ve hijyenik koşullar,

5-Uygulanan enerjiyi barındırma yeteneği,

6-Geri dönüşebilir olması,

7-Yüksek elektrik ve ısı iletkenliği,

8-Parlama ve alev almazlık,

9-Magnetik nötralite,

10-Kolay işlenebilme ve biçimlendirilebilmesi,

11-Çok farklı yöntemlerle yüzey işlemleri, özellikleri kullanımının çok büyük bir hızla yaygınlaşmasına neden olmuş, böylelikle alüminyumu 21.yüzyıla damgasını vuran bir metal yapmıştır [21] .

2.4.2. Alüminyum alaşımları

Alüminyum alaşımları üretim metotları esas alınarak dövme ve döküm olmak üzere iki ana alt gruba ayrılmaktadır (Şekil 2.26). Bu da imal usullerinin farklı ihtiyaçları olduğunu göstermektedir. Plastik deformasyonla şekillendirilen dövme alaşımları, döküm alaşımlardan oldukça farklı mikroyapı ve kimyasal bileşime sahiptirler. Her iki ana grup içindeki alaşımlar, ısı işlem uygulanabilen ve uygulanamayan alaşımlar olmak üzere, iki alt gruba ayrılmaktadır. Isıl işlem uygulanabilir alüminyum alaşımlarında; bazı ısıl işleme çökelme sertleşmesi elde edilmektedir [22].



Şekil 2.26. Alüminyum alaşımları genel üretim yöntemleri

Bahsedilen ısı işlem, alüminyum alaşımlarda istenilen dayanımı elde etmek için uygulanan bir prosestir. Isıl işlem uygulanabilir alüminyum alaşımlarının 2XXX, 6XXX ve 7XXX serileri olmak üzere üç ana grubu bulunmaktadır. Isıl işlem uygulanamayan alüminyum alaşımları ise çökelmeyle sertleştirilemez, dayanımlarının artırılabilmesi sadece soğuk işlemeyle mümkündür[23]. Katı eriyik mukavemetlendirmesi, pekleşme ve dağılım mukavemetlendirmesiyle mukavemetlendirilirler. Isıl işlem uygulanamayan alüminyum alaşımlarının ise 1XXX, 3XXX ve 5XXX serileriyle üç ana grubu bulunmaktadır.

Mukavemetlendirme derecesi, alaşımın ısı işlem görebilir veya pekleştirilebilir olmasına göre temper tanımlaması “T” ve “H” ile gösterilmektedir (Çizelge 2.1). Diğer tanımlamalar alaşımın tavlandığını (O), çözündürme uygulandığını (W) veya üretildiği şekilde kullanıldığını (F) göstermektedir. “T” ve “H” yi takip eden numaralar pekleşme miktarını, gerçek ısı işlem tipini veya alaşımın diğer özel üretim işlem durumunu göstermektedir [24].

Çizelge 2.1. Alüminyum alaşımların ısıt işlemleri ve özel üretim şekilleri [25]

Temper no	Açıklama
F	İmal edildiği şekilde
O	Tavllanmış (Mümkün olan en yumuşak şartlarda)
H	Soğuk şekillendirilmiş
H1X	Sadece soğuk şekillendirilmiş (x soğuk şekillendirme miktarına ve mukavemetlendirmeye işaret eder)
H12	Soğuk şekillendirme, 0 ve H14 temperleri arasında, ortalarda bir çekme dayanımı sağlar
H14	Soğuk şekillendirme, 0 ve H18 temperleri arasında bir çekme dayanımı sağlar
H16	Soğuk şekillendirme, H14 ve H18 temperleri arasında ortalarda bir çekme dayanımı sağlar
H18	Soğuk şekillendirme, yaklaşık %75 azalma sağlar
H19	Soğuk şekillendirme, H18 temperleme ile elde edilen çekme dayanımından 2000 psi fazla dayanım sağlar
H2X	Soğuk şekillendirilmiş ve kısmen tavllanmış
H3X	Düşük sıcaklıkta yapının yaşlanmasını önlemek için soğuk şekillendirilmiş ve dengelenmiş
W	Çözelti ısıt işlemleri görmüş
T	Yaşlandırılmış
T1	İmalat sıcaklığından soğutulmuş ve doğal olarak yaşlandırılmış
T2	İmalat sıcaklığından soğutulmuş, soğuk şekillendirilmiş ve doğal yaşlandırılmış
T3	Çözelti ısıt işlemleri uygulanmış, soğuk işlenmiş ve esas olarak kararlı bir duruma doğal yaşlandırılmış
T4	Çözelti ısıt işlemleri uygulanmış ve esas olarak kararlı bir duruma doğal yaşlandırılmış
T5	Yüksek sıcaklıktaki şekillendirme işleminden ve soğuduktan sonra yapay yaşlandırılmış
T6	Çözelti ısıt işlemleri görmüş ve yapay yaşlandırılmış
T7	Çözelti ısıt işlemleri görmüş ve kararlılaştırılmış
T8	Çözelti ısıt işlemleri uygulanmış, soğuk işlenmiş ve yapay yaşlandırılmış
T9	Çözelti ısıt işlemleri uygulanmış, yapay yaşlandırılmış ve soğuk işlenmiş
T10	İmalat sıcaklığından soğutulmuş, soğuk şekillendirilmiş ve yapay yaşlandırılmış

Bu çalışmada serbest şekilli yüzeyin işlenmesi için Al 7075 serisi alüminyum tabaka kullanılmıştır.

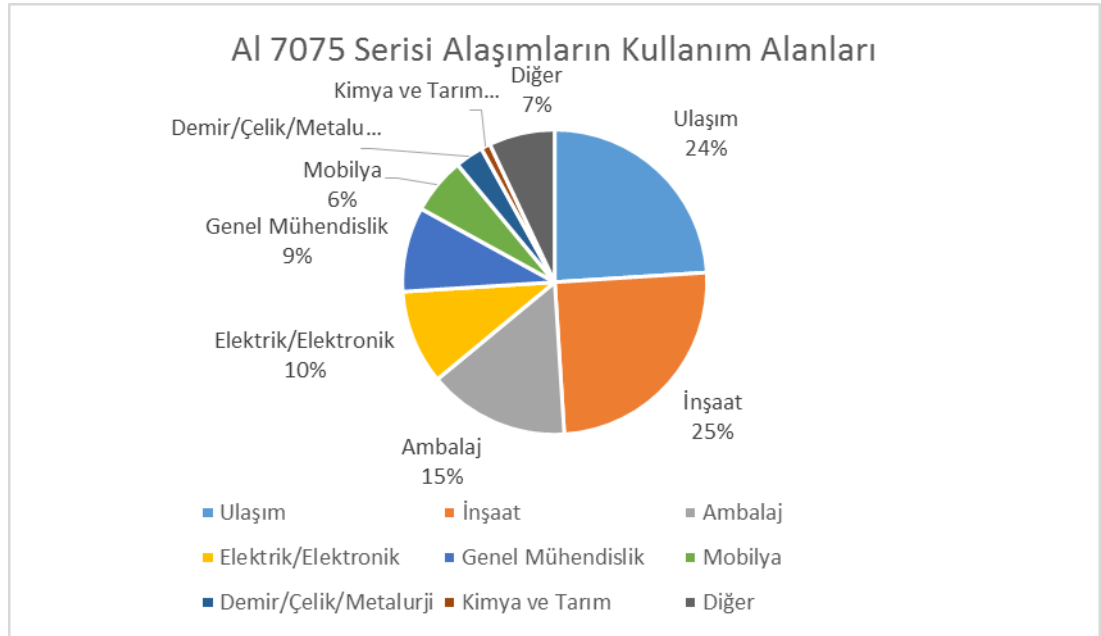
3. MATERYAL ve YÖNTEM

Bu çalışmada, dik işleme merkezli CNC freze tezgâhı kullanılarak, Al7075 malzemesinde serbest şekilli yüzeyin imalatı gerçekleştirildi. Serbest şekilli yüzeyin imalatında, ara kaba ve finish işlemede farklı takım yolları kullanılarak, takım yollarının form hatalarına etkileri araştırıldı.

Form hataları, CAD ortamında tasarlanmış yüzey ile 3B tarayıcı kullanılarak taranan yüzeyin karşılaştırılmasıyla belirlendi.

3.1. Deney Malzemesi

Deney malzemesi olarak ulaşım, medikal ve elektronik sanayisine kadar birçok endüstriyel alanda yaygın olarak kullanılan Al 7075 alaşımı seçildi (Şekil 3.1). Bu malzeme kolay işlenebilir olmasının yanı sıra, düşük yoğunluğa, yüksek korozyon direncine, mukavemete, elektrik ve ısı iletkenliğine sahiptir. Ancak literatürde bu malzeme üzerinde serbest şekilli yüzeylerin imalatı ile ilgili yeterince çalışma yapılmadığı dikkati çekmektedir.



Şekil 3.1. Al 7075 serisi alüminyumların kullanım alanları

Bu çalışmada kullanılan Al 7075 alaşımı Konya sanayi bölgesinden temin edildi. Bu malzemenin kimyasal bileşimi çizelge 3.1 'de verildi. Malzemeye ait mekanik ve ısı dayanımı çizelge 3.2.'de verildi.

Çizelge 3.1. AA 7075 kalite alüminyumun kimyasal bileşimi (% ağırlık)

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
0,0567	0,2763	1,4024	0,0108	2.3800	0,2009	6,0294	0,0778
B	Na	Ca	Ni	Pb	I	Sn	Co
0,0007	0.0018	0,0052	0,0027	0,0015	0,0002	0,00023	0,00035
V	Sb	Sr	Be	Hg	Zr	Bi	Al
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.[26-27] 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.

Çizelge 3.2. Al 7075 alaşımının mekanik özellikleri

Isıl İşlem (Temper)	Çekme Dayanımı, Rm MPa	Akma Dayanımı, Rp 0,2 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

Deneyler 600x400x50 mm ölçülerinde bir plaka kullanılarak gerçekleştirildi. Serbest şekilli yüzeyin imalatında, takım yollarının etkilerini görebilmek amacıyla plaka, CAD modeli oluşturulan yüzeyin boyutlarında 12 eşit parçaya ayrıldı.

3.2. Serbest Şekilli Yüzeyin CAD Ortamında Oluşturulması

Deneyde kullanılan serbest şekilli yüzey B-Spline eğriden yararlanılarak oluşturuldu. B-Spline eğrisi 2. dereceden bir fonksiyon olup eğrinin oluşturulmasında kullanılan kontrol noktaları ve knotlar, yüzeyin şekillendirilmesindeki kolaylığı göstermek amacıyla rastgele seçildi (Çizelge 3.3). Daha sonra MATLAB R2012a programında B-Spline baz fonksiyonlarını hesaplayan bir program yazıldı. Programa ait akış şeması Ek 1'de verildi.

Çizelge 3.3. B-Spline eğriye ait knot, kontrol noktaları ve derece değerleri

Knot	Değer
t_0	7
t_1	9
t_2	11
t_3	13
t_4	15
t_5	17
t_6	20

Kontrol Noktaları
$b_0(10,10)$
$b_0(30,3)$
$b_0(60,10)$
$b_0(70,2)$

Kontrol noktaları, knot değerleri ve eğrinin derecesi Ek 1'de verilen yazılıma değer olarak girildikten sonra, her bir knot aralığı dikkate alınarak, baz fonksiyonlar aşağıdaki şekilde elde edildi.

t_0 - t_1 aralığı;

$$P_1 = \frac{5}{4}(t^2-14t+49), \frac{5}{4}(t^2-14t+49) \quad 7 \leq t \leq 9 \quad (3,2,1)$$

t_1 - t_2 aralığı;

$$P_2 = \frac{5}{2}(t^2-15t+49), (-17t^2+336t-1697) \quad 9 \leq t \leq 11 \quad (3,2,2)$$

t_2 - t_3 aralığı;

$$P_3 = \frac{5}{2}(t^2-14t+49), \frac{1}{4}(7t^2-168t+1027) \quad 11 \leq t \leq 13 \quad (3,2,3)$$

t_3 - t_4 aralığı;

$$P_4 = -\frac{5}{2}(t^2-32t+229), -\frac{1}{8}(8t^2-418t+2847) \quad 13 \leq t \leq 15 \quad (3,2,4)$$

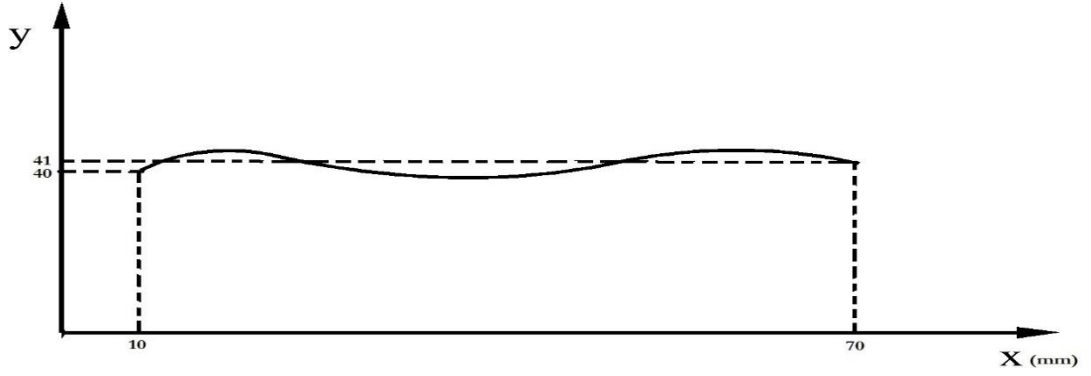
t_4 - t_5 aralığı;

$$P_5 = -\frac{5}{12}(17t^2-522t+3849), \frac{1}{6}(5t^2-174t+1521) \quad 15 \leq t \leq 17 \quad (3,2,5)$$

t_5 - t_6 aralığı;

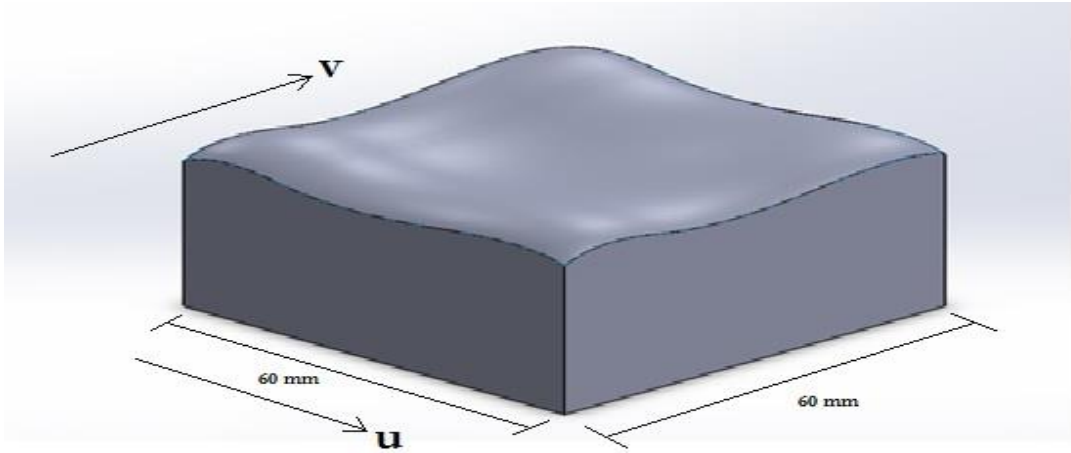
$$P_6 = \frac{35}{12} (t^2 - 42t + 441), \frac{1}{12} (t^2 - 42t + 441) \quad 17 \leq t \leq 20 \quad (3,2,6)$$

Bu baz fonksiyonları ve kontrol noktaları kullanılarak şekil 3.2’de görülen eğri oluşturulmuştur.



Şekil 3.2. B-Spline eğri

B-Spline baz fonksiyonları kullanılarak oluşturulan eğrinin u ve v yöndeki bileşenleri aynı formda fakat ayrı ayrı alınarak tensör çarpımları sonucu şekil 3.3’de görülen yüzey elde edildi. Bu yüzey oluşturulurken SOLIDWORKS 2014 paket programı kullanılarak, şeklin 3B ifade edilmesi sağlandı.

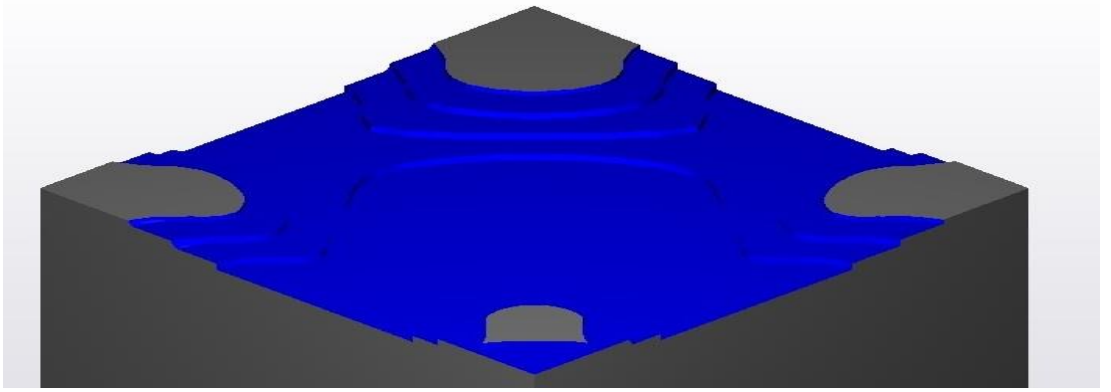


Şekil 3.3. Referans yüzeye ait iş parçası

3.3. Serbest Şekli Yüzeyin İmalatında Kullanılan Takım Yolları

B-Spline eğriden yararlanılarak oluşturulan yüzeyin CNC freze tezgahında imalatı için sanayide yaygın olarak kullanılan SOLİDCAM 2013 programında yer alan takım yolları algoritmalarından yararlanıldı.

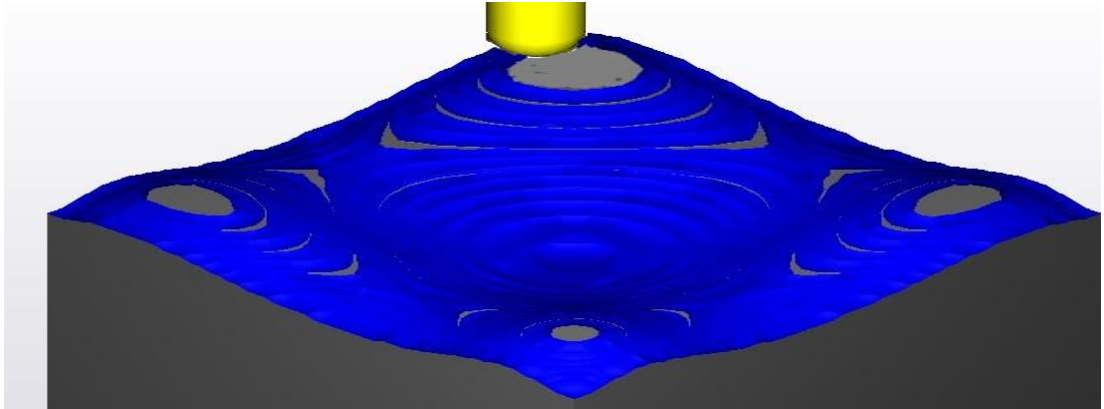
Yüzeyin imalatı 3 aşamaya ayrılarak kaba, ara kaba ve finish işleme olarak üç kısma ayrıldı. Kaba işlemede HM takım yolu algoritması kullanıldı. Bu algoritmanın takım yolu şekil 3.4 'de verildi.



Şekil 3.4. HM kaba işleme takım yolu

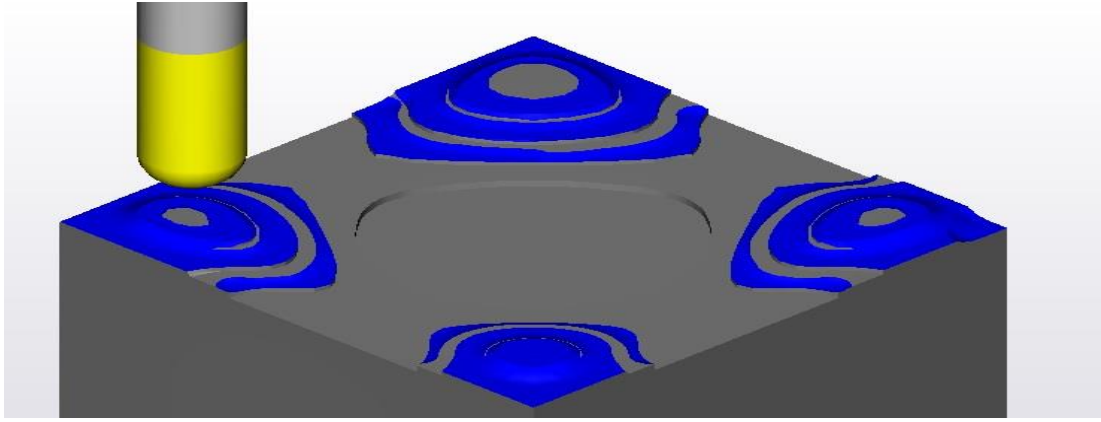
Ara kaba işlemede sanayide yaygın olarak kullanılan 3 farklı takım yolu kullanıldı. Bu yöntemler sırasıyla şekil 3.5-7' de verildi.

a) Ara Kaba



Şekil 3.5. Ara kaba takım yolu

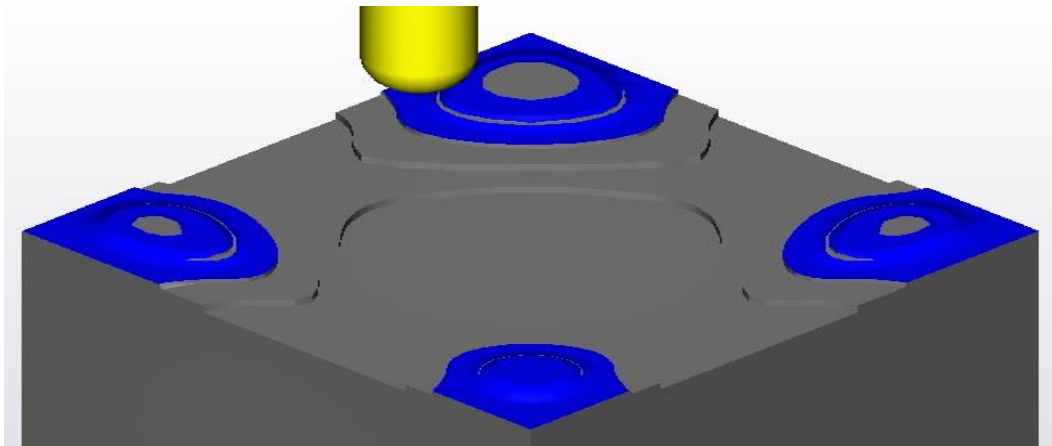
b) Kontür Kaba



Şekil 3.6. Kontür kaba takım yolu.

Kontür kaba işleme yöntemi ile paralel kaba işleme yöntemi görsellerde benzerlik olsa da farklı iki yöntemdir. Kontür kaba yönteminde kesici takım iş parçasının en üst noktasından başlayarak eğri formu değişene kadar aynı noktada işleme yapmaktadır (Şekil 3.6). Paralel Kaba yönteminde ise yine kesici takım en üst noktadan işlemeye başlar fakat tüm iş parçasının eş yükselti iz düşümlerini sırayla işleyerek bir alt eş yükseltiye geçiş yapar. Böylece bir turda parçanın aynı seviyesinde işleme yapar ve bir alt seviyeye geçiş yapar (Şekil 3.7).

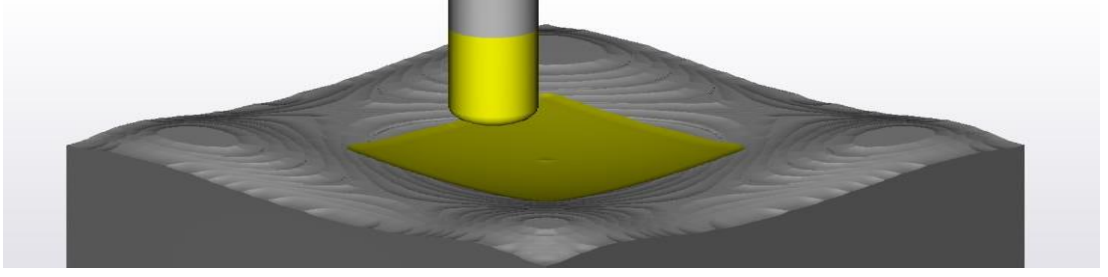
c) Paralel Kaba



Şekil 3.7. Paralel kaba takım yolu

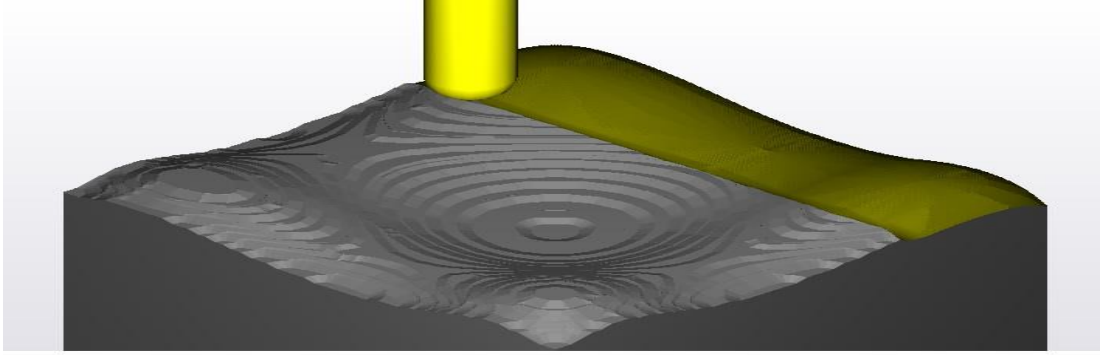
Finish işlemede ise yine sanayide yaygın olarak 4 farklı takım yolu kullanıldı. Bu yollar sırasıyla şekil 3.8-11 'de verildi.

a) Eğriye paralel



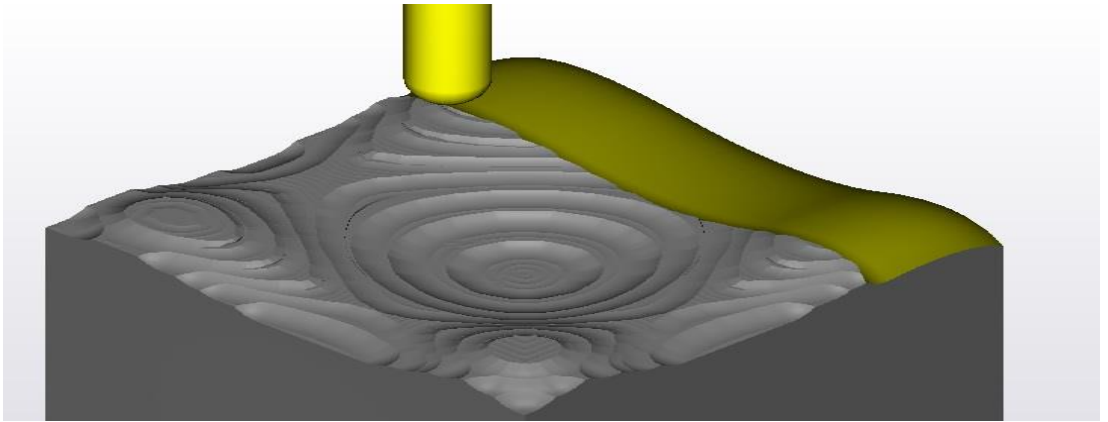
Şekil 3.8. Eğriye Paralel takım yolu

b) Paralel Tarama



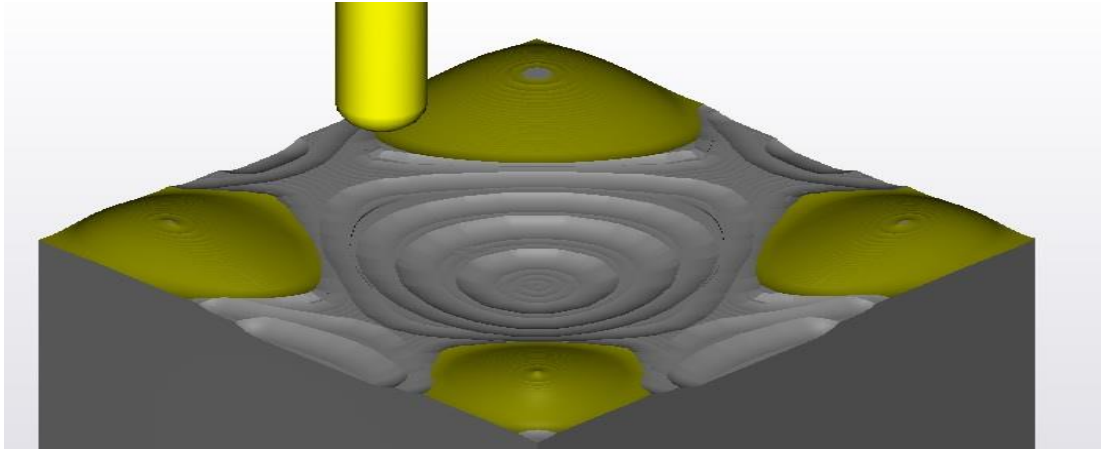
Şekil 3.9. Paralel Tarama takım yolu

c) Paralel Doğrusal



Şekil 3.10. Paralel Doğrusal takım yolu

d) Paralel Sabit Z



Şekil 3.11. Paralel Sabit Z takım yolu

Yukarıda belirtilen takım yolları literatür [1-2-7-8-10] çalışmaları dikkate alınarak belirlendi. Yapılan çalışmada serbest şekilli yüzeyler 12 farklı şekilde üretildi ve her bir işleme için çizelge 3.4’de görüldüğü gibi harf kodu verildi.

Çizelge 3.4. Serbest şekilli yüzeylerin imalatında kullanılan takım yolları

NUMUNE NO	HARF KODU	KABA İŞLEME	ARA KABA İŞLEME	İNCE İŞLEME
1	A	HM	ARA KABA	PARALEL TARAMA
2	B	HM	ARA KABA	EĞRİYE PARALEL
3	C	HM	ARA KABA	PARALEL DOĞRUSAL
4	D	HM	ARA KABA	PARALEL SABİT Z
5	E	HM	KONTUR KABA	EĞRİYE PARALEL
6	F	HM	KONTUR KABA	PARALEL DOĞRUSAL
7	G	HM	KONTUR KABA	PARALEL SABİT Z
8	H	HM	KONTUR KABA	PARALEL TARAMA
9	I	HM	PARALEL KABA	EĞRİYE PARALEL
10	J	HM	PARALEL KABA	PARALEL TARAMA
11	K	HM	PARALEL KABA	PARALEL DOĞRUSAL
12	L	HM	PARALEL KABA	PARALEL SABİT Z

Yukarıda belirtilen kaba, ara kaba ve finish işleme takım yollarının yüzeye etkilerini net olarak belirlemek için, her bir bölümün işleme parametrelerinin ayrı olmasına dikkat edildi. Takım yollarına ait işleme parametreleri çizelge 3.5 ve çizelge 3.6’da detaylı olarak verildi. İşleme parametrelerine ait SOLIDCAM verileri Ek-2 de verilmiştir.

Çizelge 3.5. Kaba ve Ara Kaba takım yollarına ait işleme parametreleri

TAKIM YOLU	TAKIM ÇAPI (mm)	İLERLEME HIZI (mm/dak)	DEVİR SAYISI	AŞAĞI ADIMLAMA (mm)
HM	12	1300	2000	1
ARA KABA	10	1500	3000	1
KONTUR KABA	10	1500	3000	1
PARALEL KABA	10	1500	3000	1

Çizelge 3.6. Finish işleme takım yollarına ait işleme parametreleri

TAKIM YOLU	TAKIM ÇAPI (mm)	İLERLEME HIZI (mm/dak)	DEVİR SAYISI	MAKSİMUM YANAL ADIM (mm)
EĞRİYE PARALEL	8	1500	4000	0,1
PARALEL DOĞRUSAL	8	1500	4000	0,1
PARALEL SABİT Z	8	1500	4000	0,1
PARALEL TARAMA	8	1500	4000	0,1

3.4. Yüzeylerin İmalatında Kullanılan Takımların Özellikleri

Numunelerin işlenmesi için üç farklı ölçüde dokuz adet kesici takım kullanıldı. Her bir kesici takım dört numune parçasını işledikten sonra değiştirildi. Kaba işlemede HSSCo-M35-DIN 1889/B 12 mm-2 ağızlı-düz takım, ara kaba işlemlerinde Karbürlü-10 mm-2 ağızlı-küresel başlı takım DIN 6528, ince işlemlerde ise Karbürlü-8 mm-2 ağızlı-küresel başlı takım DIN 6528 kullanıldı (Şekil 12-14).

Takımların ölçülerine karar verirken, kaba, ara kaba ve ince işlemlerin özellikleri, iş parçasının boyutları, literatürde yapılan çalışmalar ve diğer uygulamalarda sık kullanılan kesici takımlar dikkate alınarak belirlendi [1-7-13].



Şekil 3.12. Kaba işlemede kullanılan 12 mm çaplı takım



Şekil 3.13. Ara Kaba işlemede kullanılan 10 mm çaplı takım

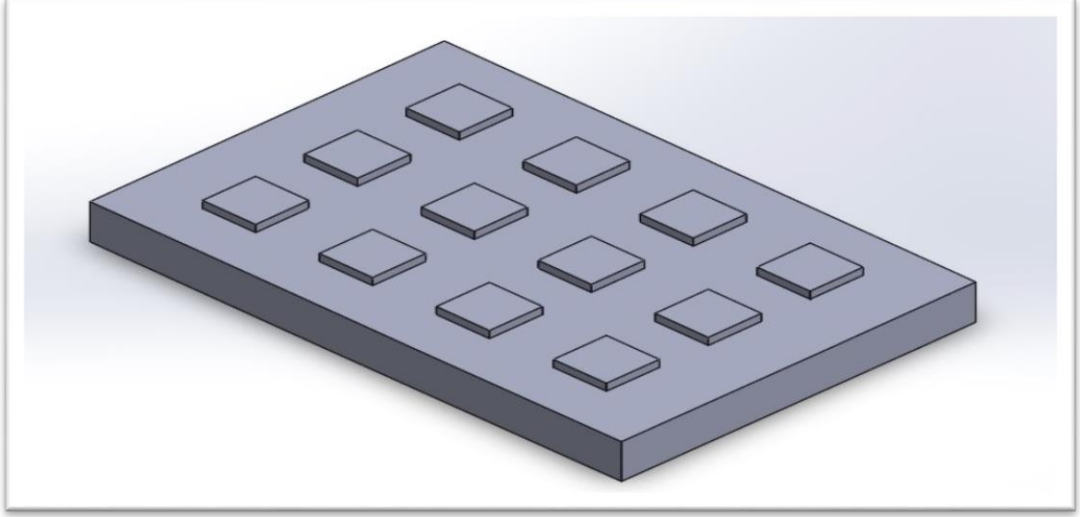


Şekil 3.14. Finish işlemede kullanılan 8 mm çaplı takım

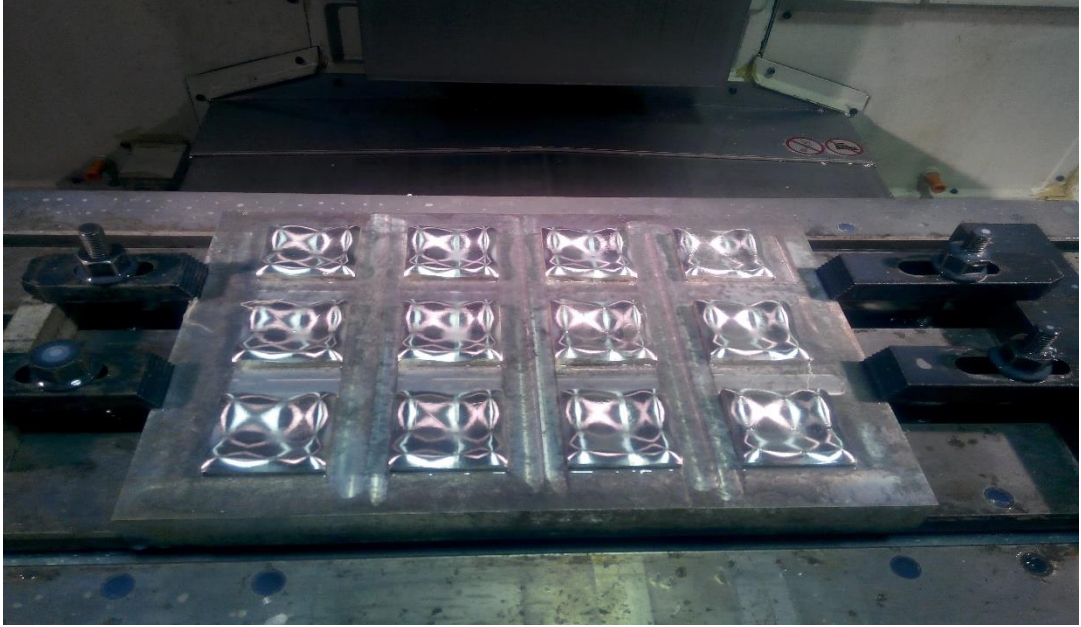
3.5. Deneysel Çalışma

Çalışmada kullandığımız iş parçası Bölüm 3.2’ de anlatıldığı şekilde tasarlandı. Daha sonra SOLIDCAM 2014 paket programı kullanılarak kaba, ara kaba ve ince işleme yöntemlerine ait takım yolları oluşturuldu ve 600x400x50 mm ebadındaki alüminyum blok, üzerinde 60x60x10 mm boyutlarında 12 adet numune parçası olacak şekilde araları boşaltıldı (Şekil 3.15).

Alüminyum blok şekil 3.16’de görüldüğü gibi bağlama pabuçları kullanılarak tezgaha bağlandı. Pabuçların tezgah tablasına simetrik olarak bağlanmasına özen gösterildi. Ayrıca deneylerde soğutma sıvısı olarak bor yağı kullanıldı. Tezgaha bağlanan iş parçası çizelge 3.4’de verilen numune sırasına göre işlenmiştir.



Şekil 3.15. Deney numunelerinin boyutları ve aralarındaki mesafeler



Şekil 3.16. Alüminyum blokun dik işleme merkezli CNC freze tezgâhına bağlanması

3.6. Yüzeylerin Üç Boyutlu Taranması

Deneylere ait numuneler imalatı gerçekleştirildikten sonra form hataları tespit edildi. Bu hataların tespitinde 3B tarayıcı kullanıldı. Form hatasının tespiti ise referans parçaya ait SOLIDWORK çizimi temel alınarak, numune parçaların eğrilik, yüzey ve ölçü verileri karşılaştırılarak yapıldı. Tarama işlemi “Breuckmann Smart Scan R5” isimli 3B tarama

sistemi kullanılarak gerçekleştirildi (şekil 3.17). Daha sonra elde edilen sonuçlar araştırma ve bulgular bölümünde detaylı olarak ele alınarak incelendi.



şekil 3.17. Breuckmann Smart Scan R5 üç boyutlu tarama cihazı

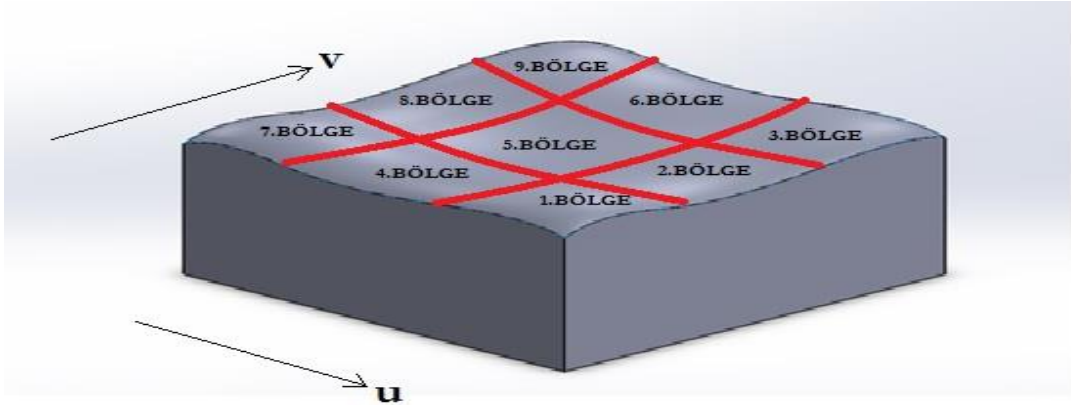
4. ARAŞTIRMA ve BULGULAR

Yapılan bu tez çalışmasında, takım yollarının yüzey formuna etkilerini daha iyi gözlemleyebilmek için yüzey 9 parçaya bölünerek ölçümler yapıldı ve aşağıda ayrı ayrı incelendi.

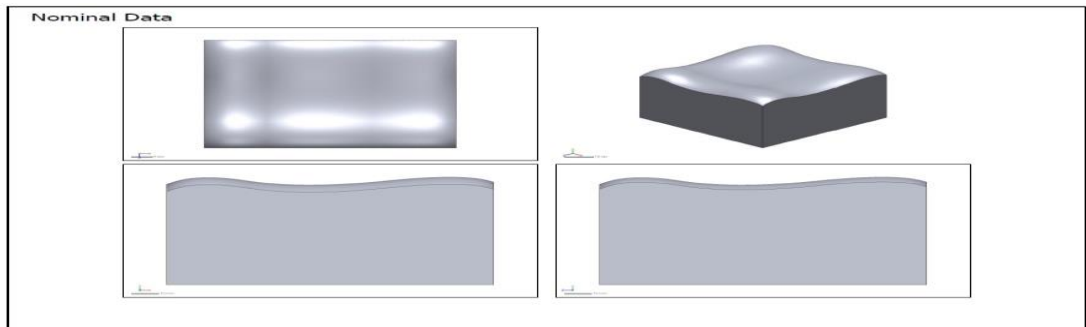
4.1. 3 Boyutlu Yüzey Taramasına Ait Bulgular

Numunelerin yüzeyleri 9 bölgeye ayrıldıktan sonra 3 boyutlu yüzey tarayıcı ile her bir bölgenin yüzey genişliğine göre değişen 10-14 adet noktanın koordinat değerleri (X,Y,Z) çıkarıldı (şekil 4.1). Bölge ve kontrol noktası sayısı yüzeyin genişliğine göre belirlendi. Elde edilen veriler referans yüzeye ait koordinat verileri ile karşılaştırılarak, artı veya eksi yöndeki form hata sapma değerleri tespit edildi. Bir sonraki aşamada ise bu değerler incelenerek, takım yolu yöntemlerinin form hatalarına etkileri araştırıldı.

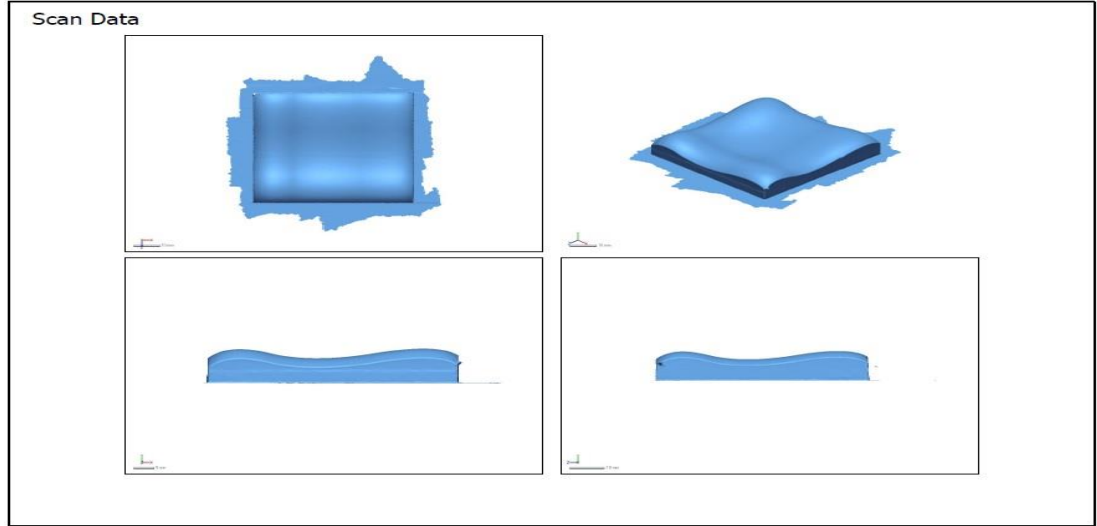
Aşağıda, şekil 4.2’de referans yüzeyin CAD görüntüsü ve şekil 4.3’de tarama görüntüsü verildi. Bu bölümde deney numunelerinin fazla olması ve fazla yer kaplaması nedeniyle sadece A numunesine ait bölgesel tarama sonuçları Ek-3’de verildi.



Şekil 4.1. Numunelerin yüzeyindeki ölçüm bölgeleri



Şekil 4.2. Referans yüzey ve eğri görseli



Şekil 4.3. A numunesine ait 3B taraması (renk diyagramı uygulanmamış)

Karşılaştırma sonuçlarında $\pm 0,1$ mm kabul edilebilir tolerans baz alınarak renk diyagramı oluşturuldu. Yapılan bu çalışmada, takım yolları arasındaki farkları daha hassas görebilmek için $\pm 0,05$ mm kabul edilebilir tolerans kullanılarak hesaplama yapıldı. Bu işlem diğer 11 numuneye de benzer şekilde uygulanarak değerler elde edildi. Çizelge 4.1-9 'da A numunesine ait $\pm 0,05$ mm tolerans aralığında elde edilen sonuçlar verildi. Diğer numunelere ait sonuçlar ise Bölüm 4.2'de özet tablolarda verildi.

Çizelge 4.1. A numunesi 1.bölgeye ait 3B tarama karşılaştırma sonuçları

ÖLÇÜM NOKTASI	REFERANS YÜZEY DEĞERLERİ			3B TARAMA DEĞERLERİ			SAPMA MİKTARI*	TOLERANS
	X	Y	Z	X	Y	Z		
CMP1: 1	58,0024	44,2887	-58,0024	57,9813	44,235	-57,9804	-0,0618	$\pm 0,05$
CMP1: 2	54,0031	45,1797	-58,0034	53,9998	45,1415	-57,9877	-0,0414	$\pm 0,05$
CMP1: 3	48,0023	45,0559	-58,0028	48,0066	45,0159	-57,9864	-0,0435	$\pm 0,05$
CMP1: 4	58,0034	45,1797	-54,0031	57,9953	45,1601	-54,0015	-0,0213	$\pm 0,05$
CMP1: 5	54,0022	46,0753	-54,0022	54,0046	46,1027	-54,0046	0,0275	$\pm 0,05$
CMP1: 6	58,0029	45,2204	-50,0025	57,9996	45,2121	-50,003	-0,0089	$\pm 0,05$
CMP1: 7	52,0017	46,2622	-52,0017	52,0018	46,2984	-52,0018	0,0362	$\pm 0,05$
CMP1: 8	48,0011	45,9914	-50,0012	47,9973	46,0272	-49,9991	0,036	$\pm 0,05$
CMP1: 9	52,0021	45,8745	-56,0023	52,0021	45,8718	-56,0017	-0,0027	$\pm 0,05$
CMP1: 10	56,002	45,657	-48,0017	56,0049	45,6715	-48,0002	0,0149	$\pm 0,05$
CMP1: 11	50,0012	45,9914	-48,0011	49,9989	46,0316	-47,9969	0,0404	$\pm 0,05$
CMP1: 12	46,0015	45,4029	-56,0019	46,0042	45,3845	-55,9982	-0,019	$\pm 0,05$

*Tablodaki değerlerin birimi mm'dir.

Çizelge 4.2. A numunesi 2.bölgeye ait 3B tarama karşılaştırma sonuçları

ÖLÇÜM NOKTASI	REFERANS YÜZEY DEĞERLERİ			3B TARAMA DEĞERLERİ			SAPMA MİKTARI*	TOLERANS
	X	Y	Z	X	Y	Z		
CMP2: 1	22,0014	42,1091	-58,0036	21,9959	42,0616	-57,9841	-0,0516	±0,05
CMP2: 2	28,0012	41,9268	-58,0026	28,003	41,8842	-57,9851	-0,046	±0,05
CMP2: 3	36,0013	42,8188	-58,0021	36,0091	42,7744	-57,9839	-0,0485	±0,05
CMP2: 4	36,0006	43,7138	-54,0009	35,9997	43,7189	-54,0013	0,0053	±0,05
CMP2: 5	30,0005	42,9374	-54,0009	29,9989	42,9578	-54,0027	0,0205	±0,05
CMP2: 6	24,0006	42,8466	-54,0015	24,0016	42,8676	-54,0033	0,0211	±0,05
CMP2: 7	26,0002	42,6646	-48,0004	26,0002	42,7037	-47,9963	0,0392	±0,05
CMP2: 8	30,0002	42,9776	-50,0003	29,9975	43,0116	-49,9984	0,0341	±0,05
CMP2: 9	36,0002	43,5893	-48,0002	35,9954	43,6164	-47,9973	0,0278	±0,05
CMP2: 10	30	42,5589	-46	29,9973	42,593	-45,995	0,0346	±0,05

*Tablodaki değerlerin birimi mm'dir.

Çizelge 4.3. A numunesi 3.bölgeye ait 3B tarama karşılaştırma sonuçları

ÖLÇÜM NOKTASI	REFERANS YÜZEY DEĞERLERİ			3B TARAMA DEĞERLERİ			SAPMA MİKTARI*	TOLERANS
	X	Y	Z	X	Y	Z		
CMP3: 1	2,0001	43,8764	-44,0027	2,0184	43,846	-44,0081	-0,0358	±0,05
CMP3: 2	2,0001	44,6223	-50,0034	2,0163	44,5956	-50,0049	-0,0313	±0,05
CMP3: 3	2,0002	43,6849	-58,0071	2,0419	43,6158	-57,9788	-0,0855	±0,05
CMP3: 4	8,0007	45,0769	-58,0053	7,9988	45,0332	-57,9874	-0,0472	±0,05
CMP3: 5	6,0005	45,8825	-54,0043	5,9992	45,8919	-54,0052	0,0095	±0,05
CMP3: 6	6,0004	45,5047	-46,0028	5,9968	45,5318	-45,9989	0,0276	±0,05
CMP3: 7	12,0006	45,2973	-48,0024	12,0014	45,3005	-48,0021	0,0033	±0,05
CMP3: 8	10,0005	45,8951	-52,0028	10,0049	45,9233	-52,0029	0,0285	±0,05
CMP3: 9	12,0013	44,5244	-58,0064	11,9905	44,4797	-57,9881	-0,0495	±0,05
CMP3: 10	14,0008	44,9619	-52,0031	13,9983	44,954	-52,0031	-0,0084	±0,05
CMP3: 11	14,0007	44,7445	-48,0025	14,0009	44,745	-48,0024	0,0005	±0,05

*Tablodaki değerlerin birimi mm'dir.

Çizelge 4.4. A numunesi 4.bölgeye ait 3B tarama karşılaştırma sonuçları

ÖLÇÜM NOKTASI	REFERANS YÜZEY DEĞERLERİ			3B TARAMA DEĞERLERİ			SAPMA MİKTARI*	TOLERANS
	X	Y	Z	X	Y	Z		
CMP4: 1	58,0021	42,8187	-36,0013	58,0004	42,8144	-36,0021	-0,0047	±0,05
CMP4: 2	58,0023	42,0423	-30,0012	58,004	42,0463	-30,0009	0,0044	±0,05
CMP4: 3	58,0036	42,1091	-22,0014	58,0032	42,1081	-22,0012	-0,0011	±0,05
CMP4: 4	54,0015	42,8466	-24,0006	54,0064	42,9034	-24,0033	0,057	±0,05
CMP4: 5	54,0009	42,9374	-30,0005	54,0063	42,9992	-29,9956	0,0622	±0,05
CMP4: 6	52,0006	43,4823	-34,0004	52,0008	43,5419	-33,9916	0,0602	±0,05
CMP4: 7	50,0008	42,8868	-24,0004	49,998	42,9344	-24,0026	0,0477	±0,05
CMP4: 8	46,0001	42,4435	-28,0001	45,9945	42,4826	-27,9985	0,0395	±0,05
CMP4: 9	46	43,0104	-34	45,9939	43,0525	-33,9939	0,0429	±0,05
CMP4: 10	48,0002	42,813	-30,0001	47,994	42,8716	-29,9955	0,0591	±0,05

*Tablodaki değerlerin birimi mm'dir.

Çizelge 4.5. A numunesi 5.bölgeye ait 3B tarama karşılaştırma sonuçları

ÖLÇÜM NOKTASI	REFERANS YÜZEY DEĞERLERİ			3B TARAMA DEĞERLERİ			SAPMA MİKTARI*	TOLERANS
	X	Y	Z	X	Y	Z		
CMP5: 1	37,9992	41,1507	-31,9993	37,9928	41,1822	-31,9957	0,0324	±0,05
CMP5: 2	29,999	39,99	-31,9989	29,9939	40,0541	-31,9916	0,0647	±0,05
CMP5: 3	23,9993	39,8994	-31,9991	24,0022	39,9616	-31,992	0,0627	±0,05
CMP5: 4	23,9994	39,6178	-23,9994	24,0018	39,6689	-24,0018	0,0512	±0,05
CMP5: 5	31,999	39,8417	-25,9992	31,9923	39,9008	-25,9992	0,0595	±0,05
CMP5: 6	37,9993	40,8444	-27,9995	37,9928	40,876	-27,9981	0,0323	±0,05
CMP5: 7	39,999	42,1348	-17,9996	39,9966	42,1454	-18,0021	0,0111	±0,05
CMP5: 8	33,9988	40,5895	-19,9993	33,9942	40,6206	-20,0047	0,0318	±0,05
CMP5: 9	23,9978	40,4443	-17,9983	23,9991	40,4719	-18,0049	0,0283	±0,05
CMP5: 10	27,9987	40,0228	-19,9991	27,9968	40,0692	-20,0072	0,0472	±0,05

*Tablodaki değerlerin birimi mm'dir.

Çizelge 4.6. A numunesi 6.bölgeye ait 3B tarama karşılaştırma sonuçları

ÖLÇÜM NOKTASI	REFERANS YÜZEY DEĞERLERİ			3B TARAMA DEĞERLERİ			SAPMA MİKTARI*	TOLERANS
	X	Y	Z	X	Y	Z		
CMP6: 1	2,0007	42,7162	-16,0053	2,0123	42,6969	-15,9993	-0,0234	±0,05
CMP6: 2	2,0005	41,511	-22,0055	2,0093	41,4965	-22,0041	-0,0171	±0,05
CMP6: 3	3	41,8362	-27,9998	3,0045	41,8266	-28,0003	-0,0106	±0,05
CMP6: 4	8	42,7198	-28	8,0022	42,771	-27,9979	0,0512	±0,05
CMP6: 5	7,0012	42,8003	-23,0039	6,9988	42,8584	-23,0085	0,0583	±0,05
CMP6: 6	6,0009	43,2652	-19,0028	5,9966	43,2976	-19,0091	0,0332	±0,05
CMP6: 7	10,0003	43,6488	-17,0005	10,0027	43,6644	-17,0045	0,0162	±0,05
CMP6: 8	10,0013	42,7308	-22,0029	10,0083	42,7761	-22,0081	0,0461	±0,05
CMP6: 9	10,0005	42,5153	-26,0012	10,0084	42,5674	-26,0012	0,0526	±0,05
CMP6: 10	14,0005	41,5999	-25,0009	14,0052	41,6146	-25,0013	0,0155	±0,05
CMP6: 11	13,001	42,3659	-20,0016	13,0044	42,3786	-20,0038	0,0133	±0,05
CMP6: 12	14,9954	41,9234	-18,9942	14,9977	41,9298	-18,9954	0,0068	±0,05

*Tablodaki değerlerin birimi mm'dir.

Çizelge 4.7. A numunesi 7.bölgeye ait 3B tarama karşılaştırma sonuçları

ÖLÇÜM NOKTASI	REFERANS YÜZEY DEĞERLERİ			3B TARAMA DEĞERLERİ			SAPMA MİKTARI*	TOLERANS
	X	Y	Z	X	Y	Z		
CMP7: 1	58,0064	43,9715	-14,0015	57,992	43,9365	-13,9905	-0,0394	±0,05
CMP7: 2	58,0053	45,0769	-8,0007	57,9999	45,0637	-8,0002	-0,0142	±0,05
CMP7: 3	58,0071	43,6849	-2,0002	57,9951	43,6558	-2,0178	-0,036	±0,05
CMP7: 4	54,0044	44,5817	-2,0002	54,0024	44,5591	-2,0138	-0,0265	±0,05
CMP7: 5	54,0043	45,8825	-6,0005	54,0064	45,9063	-5,9973	0,0241	±0,05
CMP7: 6	52,0031	45,5147	-12,0007	52,0031	45,5133	-12,0004	-0,0014	±0,05
CMP7: 7	50,0034	44,6223	-2,0001	50,0048	44,5979	-2,0149	-0,0286	±0,05
CMP7: 8	48,0031	45,7587	-6,0004	48,0005	45,7832	-5,9971	0,0249	±0,05
CMP7: 9	56,0043	44,5738	-14,0011	56,0007	44,5554	-13,9953	-0,0195	±0,05
CMP7: 10	48,0021	45,6776	-10,0004	47,9999	45,6981	-10,0036	0,0208	±0,05
CMP7: 11	44,0027	43,8763	-2,0001	44,0082	43,8454	-2,0188	-0,0366	±0,05
CMP7: 12	46,0022	44,4905	-14,0007	46,0043	44,4765	-13,9963	-0,0148	±0,05
CMP7: 13	56,0039	45,5071	-10,0007	56,0032	45,5032	-10,0001	-0,004	±0,05
CMP7: 14	52,0022	46,0667	-8,0003	52,0024	46,1024	-8,0019	0,0358	±0,05

*Tablodaki değerlerin birimi mm'dir.

Çizelge 4.8 A numunesi 8.bölgeye ait 3B tarama karşılaştırma sonuçları

ÖLÇÜM NOKTASI	REFERANS YÜZEY DEĞERLERİ			3B TARAMA DEĞERLERİ			SAPMA MİKTARI*	TOLERANS
	X	Y	Z	X	Y	Z		
CMP8: 1	38,0018	42,6049	-2,0001	38,0083	42,5732	-2,0192	-0,0375	±0,05
CMP8: 2	38,0001	43,9959	-8	37,9983	44,0047	-8,0004	0,009	±0,05
CMP8: 3	38,0011	42,8915	-14,0004	38,0046	42,8742	-13,9949	-0,0185	±0,05
CMP8: 4	31,997	41,264	-15,9985	31,9968	41,2662	-15,9992	0,0023	±0,05
CMP8: 5	25,9978	40,3866	-17,9984	25,9978	40,4194	-18,0063	0,0337	±0,05
CMP8: 6	26,0019	41,5821	-14,001	26,0019	41,5726	-13,998	-0,0099	±0,05
CMP8: 7	32,0005	42,8547	-10,0001	31,9985	42,8718	-10,0028	0,0174	±0,05
CMP8: 8	34,0018	41,8956	-2,0001	34,0056	41,87	-2,0156	-0,0302	±0,05
CMP8: 9	32,0017	42,9358	-6,0003	31,9989	42,9608	-5,997	0,0255	±0,05
CMP8: 10	28,0026	41,3286	-2,0002	28,0036	41,3048	-2,0146	-0,0279	±0,05
CMP8: 11	28	42,7198	-8	27,9986	42,7529	-8,0014	0,0331	±0,05
CMP8: 12	24,0024	42,1923	-12,0012	24,0029	42,2017	-12,0035	0,0097	±0,05
CMP8: 13	26,0029	42,5963	-6,0007	26,0029	42,6283	-5,9964	0,0323	±0,05

*Tablodaki değerlerin birimi mm'dir.

Çizelge 4.9 A numunesi 9.bölgeye ait 3B tarama karşılaştırma sonuçları

ÖLÇÜM NOKTASI	REFERANS YÜZEY DEĞERLERİ			3B TARAMA DEĞERLERİ			SAPMA MİKTARI*	TOLERANS
	X	Y	Z	X	Y	Z		
CMP9: 1	2,0041	43,0932	-2,0041	2,0266	43,0559	-2,0266	-0,049	±0,05
CMP9: 2	2,0039	44,3076	-10,0196	2,0203	44,2805	-10,0155	-0,0319	±0,05
CMP9: 3	3,999	43,06	-17,9955	3,9987	43,0611	-17,9958	0,0011	±0,05
CMP9: 4	8,0112	44,4809	-2,0028	8,0104	44,4632	-2,0135	-0,0207	±0,05
CMP9: 5	6,0072	45,7811	-8,0096	6,0032	45,8116	-8,0109	0,0309	±0,05
CMP9: 6	7,995	44,1122	-15,99	7,9954	44,1222	-15,9931	0,0104	±0,05
CMP9: 7	12,0308	43,9236	-2,0051	12,0257	43,9027	-2,0178	-0,025	±0,05
CMP9: 8	10,0116	45,6976	-8,0093	10,0158	45,7249	-8,0104	0,0277	±0,05
CMP9: 9	11,9978	43,5586	-15,9971	11,9971	43,5557	-15,9962	-0,0031	±0,05
CMP9: 10	15,9883	43,6004	-3,9971	15,9859	43,5925	-3,9998	-0,0087	±0,05
CMP9: 11	14,0616	44,569	-10,044	14,0581	44,5581	-10,0423	-0,0115	±0,05
CMP9: 12	17,9977	43,5711	-7,999	17,9994	43,578	-7,9993	0,0071	±0,05

*Tablodaki değerlerin birimi mm'dir.

Benzer şekilde diğerk takım yolları sonucunda elde edilen veriler değerlendirme bölümünde ortak bir çizelgede verileceği için bu bölümde gösterilmedi. Numunelere ait 3 boyutlu tarama sonucunda elde edilen renk diyagramı görselleri Ek-4'de verildi. Ekte verilen görsellerde $\pm 0,05$ mm değerini aşan form hataları sarı, mavi, kırmızı renkler ve tonları şeklinde görülmektedir. Bölüm 4.2'de numunelere ait ölçüm sonuçları işlenerek referans yüzeye en yakın sonucu veren takım yolu araştırıldı.

4.2. Yüzeyin 3B Taranması ve Referans Yüzey ile Karşılaştırma

BDÜ ortamında tasarlanan serbest şekilli yüzeyin farklı takım yollarıyla üretimi BDİ ortamında gerçekleştirildi. Elde edilen veriler 3B tarayıcı ile taranarak BDÜ ortamındaki referans yüzey ile karşılaştırıldı.

Bu bölümde, elde ettiğimiz yüzey form hataları her bir numune için ve bölgesel olarak değerlendirilecektir. Değerlendirmede, sapma miktarlarının ortalaması, kümülatif toplamı ve görülme sıklığı (tarama ölçüm değerinin referans yüzey ölçüsünden $\pm 0,05$ mm sapması ve bu durumun tekrarlama sayısı) baz alınarak, kullanılan takım yollarının etkinliği araştırılacaktır. Bölgeler ve numunelere göre sıralama yapılarak en iyi ve en kötü sonucu veren durumlar değerlendirilecektir.

Bu değerlendirme dikkate alınarak çizelge 4.10'dan, çizelge 4.18'e kadar her bir bölge için tarama ölçüm sonuçları $\pm 0,05$ mm toleransı aşan ölçümler kırmızı gösterilerek verildi. Bu çizelgelerdeki bütün numunelerde aynı sayıda ve aynı koordinatta ölçüm alınmasına dikkat edildi.

Çizelge 4.10. Numunelerin 1.bölgesine ait sapma değerleri

ÖLÇÜM NOKTASI	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	-0,0618	-0,0724	-0,0478	-0,0822	-0,0615	-0,0792	-0,0689	-0,1007	-0,1042	-0,0902	-0,0706	-0,0929
2	-0,0414	-0,0462	-0,0369	-0,0554	-0,035	-0,0499	-0,0338	-0,0706	-0,0624	-0,0617	-0,056	-0,0627
3	-0,0435	-0,032	-0,0382	-0,0406	-0,0287	-0,0399	-0,0204	-0,0646	-0,0416	-0,0565	-0,0583	-0,046
4	-0,0213	-0,0391	-0,0239	-0,0299	-0,0323	-0,0291	-0,0421	-0,0474	-0,0746	-0,0403	-0,0295	-0,0363
5	0,0275	0,0227	0,0247	0,0075	-0,0048	0,0015	0,0267	0,0254	0,0112	0,0291	0,0177	0,0034
6	-0,0089	-0,0355	-0,0196	-0,0119	-0,0242	-0,0198	-0,0337	-0,034	-0,0549	-0,0241	0,0269	-0,0269
7	0,0362	0,0382	0,0335	0,1291	-0,023	0,0089	0,1342	0,0383	0,02	0,0354	0,0269	0,1733
8	0,036	0,0405	0,0341	0,023	0,0028	0,0185	0,0466	0,0482	0,0347	0,0522	0,0264	0,0181
9	-0,0027	0,0025	-0,0041	0,0097	-0,0036	-0,0035	0,0222	-0,0042	-0,0056	-0,0015	-0,02	-0,0014
10	0,0149	-0,001	0,0046	0,0002	0,0033	0,0128	0,0065	0,0155	-0,0122	0,0115	0,0046	0,0047
11	0,0404	0,0378	0,0356	0,0245	0,0054	0,0173	0,044	0,0516	0,0344	0,0531	0,0307	0,016
12	-0,019	-0,0061	-0,0103	-0,0152	-0,0029	-0,0064	-0,0002	-0,0162	-0,0114	-0,0154	-0,0143	-0,0221
Tolerans Dışı Değer Sayısı	1	1	0	3	1	1	2	4	4	5	3	3

*Tablodaki değerlerin birimi mm'dir.

1.bölgede 144 ölçüm noktası içerisinde 28 noktada sapma değeri $\pm 0,05$ mm 'den fazladır. Tolerans değerini aşan sapma değerlerinin toplamı 2,1558 mm'dir.

Çizelge 4.11. Numunelerin 2.bölgesine ait sapma değerleri

ÖLÇÜM NOKTASI	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	-0,0516	-0,0222	-0,0437	-0,0182	0,0017	-0,0389	-0,0133	-0,0791	-0,0384	-0,0626	-0,0587	-0,051
2	-0,046	-0,0299	-0,0341	-0,0178	-0,0172	-0,032	-0,0169	-0,0694	-0,0378	-0,0589	-0,0517	-0,0389
3	-0,0485	-0,0303	-0,0361	-0,0412	-0,0134	-0,0348	-0,0316	-0,0679	-0,0321	-0,0551	-0,058	-0,0445
4	0,0053	0,0322	0,0108	0,0108	0,0262	0,014	0,0206	0,0162	0,0305	0,0139	0,0056	0,0001
5	0,0205	0,0424	0,0252	0,014	0,0185	0,0081	0,0425	0,0265	0,0398	0,0339	0,0147	0,003
6	0,0211	0,0389	0,0278	0,0295	0,0119	0,0058	0,0569	0,0282	0,0401	0,0332	0,0192	0,011
7	0,0392	0,0561	0,0337	0,0346	0,0268	0,018	0,0607	0,0504	0,063	0,0466	0,0327	0,0279
8	0,0341	0,0506	0,034	0,0272	0,0165	0,0166	0,0516	0,0414	0,0498	0,0462	0,0332	0,0148
9	0,0278	0,0292	0,0152	0,0208	0,028	0,0257	0,025	0,0256	0,0418	0,0308	0,0175	0,0139
10	0,0346	0,0226	0,031	0,0363	0,0226	0,0319	0,0527	0,0426	0,0448	0,0414	0,0337	0,018
Tolerans Dışı Değer Sayısı	1	2	0	0	0	0	4	4	1	3	3	1

*Tablodaki değerlerin birimi mm'dir.

2.bölgede 120 ölçüm noktası içerisinde 19 noktada sapma değeri $\pm 0,05$ mm 'den fazladır. Tolerans değerini aşan sapma değerlerinin toplamı 1,106 mm'dir.

Çizelge 4.12. Numunelerin 3.bölgesine ait sapma değerleri

ÖLÇÜM NOKTASI	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	-0,0358	-0,042	-0,0399	-0,03	-0,0464	-0,0161	-0,026	-0,0229	-0,0455	-0,0388	-0,0253	-0,0128
2	-0,0313	-0,0349	-0,0307	-0,0258	-0,0402	-0,017	-0,0261	-0,0298	-0,0483	-0,0334	-0,0242	-0,0167
3	-0,0855	-0,0858	-0,074	-0,0985	-0,0686	-0,0542	-0,0752	-0,0913	-0,0829	-0,0883	-0,073	-0,0632
4	-0,0472	-0,0617	-0,048	-0,0293	-0,0266	-0,0251	-0,0273	-0,0628	-0,059	-0,0507	-0,0485	-0,0481
5	0,0095	0,0119	0,0127	0,0168	0,0062	0,0188	0,0372	0,0218	0,028	0,0295	0,0144	0,0057
6	0,0276	0,0208	0,0174	0,0306	0,0188	0,0328	0,0351	0,0378	0,0334	0,0383	0,0297	0,015
7	0,0033	0,0115	-0,0008	-0,0061	0,0093	0,0135	0,0026	0,0039	-0,0045	0,0136	0,003	0,0008
8	0,0285	0,0188	0,023	0,0175	0,0022	0,0198	0,0487	0,0336	0,0176	0,0343	0,0239	0,0143
9	-0,0495	-0,0633	-0,0459	-0,0376	-0,0319	-0,0436	-0,0435	-0,0791	-0,0705	-0,0598	-0,055	-0,0675
10	-0,0084	-0,0105	-0,0157	-0,014	-0,005	-0,0016	-0,0134	-0,0238	-0,0282	-0,0107	-0,0132	-0,0164
11	0,0005	-0,0069	-0,0102	-0,0132	0,0007	0,0029	-0,0171	-0,0091	-0,0134	0,0009	-0,0019	-0,0122
Tolerans Dışı Değer Sayısı	1	3	1	1	1	1	1	3	3	3	2	2

*Tablodaki değerlerin birimi mm'dir.

3.bölgede 132 ölçüm noktası içerisinde 22 noktada sapma değeri $\pm 0,05$ mm 'den fazladır. Tolerans değerini aşan sapma değerlerinin toplamı 1,5699 mm'dir.

Çizelge 4.13. Numunelerin 4.bölgesine ait sapma değerleri

ÖLÇÜM NOKTASI	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	-0,0047	-0,0181	-0,0038	-0,0244	-0,0014	-0,0048	-0,0278	-0,0216	-0,0307	-0,0212	0,0018	-0,0199
2	0,0044	-0,0143	0,006	-0,0086	-0,0035	-0,0029	-0,0166	-0,005	-0,0232	-0,0174	0,0081	-0,0024
3	-0,0011	-0,0101	0,0074	-0,0119	-0,0034	-0,0054	-0,0231	-0,012	-0,027	-0,0235	0,004	0
4	0,057	0,0481	0,0451	0,0331	0,011	0,018	0,0515	0,0578	0,0391	0,0572	0,0463	0,0386
5	0,0622	0,049	0,0547	0,0189	0,0218	0,0314	0,0446	0,0656	0,0527	0,0577	0,0574	0,0247
6	0,0602	0,055	0,0538	0,0152	0,0304	0,0405	0,0334	0,0674	0,0541	0,0626	0,0569	0,0094
7	0,0477	0,0461	0,0448	0,0318	0,0127	0,0204	0,0575	0,056	0,0416	0,0495	0,0451	0,0351
8	0,0395	0,0273	0,0449	0,0373	0,0208	0,0385	0,0507	0,0475	0,0457	0,0493	0,0468	0,0288
9	0,0429	0,0226	0,0401	0,0299	0,0319	0,0429	0,024	0,0463	0,0372	0,0482	0,0407	0,0141
10	0,0591	0,0537	0,0582	0,0285	0,0277	0,039	0,0512	0,0641	0,064	0,0663	0,0566	0,0226
Tolerans Dışı Değer Sayısı	4	2	3	0	0	0	4	5	3	4	3	0

*Tablodaki değerlerin birimi mm'dir.

4.bölgede 120 ölçüm noktası içerisinde 28 noktada sapma değeri $\pm 0,05$ mm 'den fazladır. Tolerans değerini aşan sapma değerlerinin toplamı 1,6212 mm'dir.

Çizelge 4.14. Numunelerin 5.bölgesine ait sapma değerleri

ÖLÇÜM NOKTASI	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	0,0324	0,0169	0,0375	0,0257	0,0317	0,0416	0,0264	0,0349	0,0357	0,0315	0,0364	0,0239
2	0,0647	0,0311	0,0598	0,0322	0,0168	0,0435	0,056	0,0682	0,0536	0,0704	0,0593	0,03
3	0,0627	0,0403	0,0563	0,0237	0,0361	0,0381	0,0587	0,0622	0,0643	0,0689	0,0616	0,0304
4	0,0512	0,0271	0,0526	0,0358	0,0167	0,0213	0,0653	0,0495	0,0437	0,0563	0,0498	0,0374
5	0,0595	0,0369	0,0603	0,0367	0,0246	0,0395	0,0629	0,0699	0,0566	0,0701	0,0646	0,0273
6	0,0323	0,01	0,0364	0,0271	0,0259	0,0353	0,035	0,0356	0,0256	0,0378	0,0325	0,023
7	0,0111	-0,0214	0,0081	0,0057	0,0017	0,0255	0,0015	0,0127	-0,0033	0,0198	0,0158	-0,0021
8	0,0318	0,0101	0,0414	0,023	0,0259	0,0417	0,0279	0,046	0,0315	0,0385	0,0316	0,0182
9	0,0283	-0,0017	0,0318	0,0254	0,0182	0,0331	0,0249	0,0247	0,0114	0,0321	0,0264	0,015
10	0,0472	0,0187	0,0515	0,0324	0,0252	0,042	0,0441	0,0541	0,0393	0,0573	0,0476	0,0202
Tolerans Dışı Değer Sayısı	4	0	5	0	0	0	4	4	3	5	3	0

*Tablodaki değerlerin birimi mm'dir.

5.bölgede 120 ölçüm noktası içerisinde 28 noktada sapma değeri $\pm 0,05$ mm 'den fazladır. Tolerans değerini aşan sapma değerlerinin toplamı 1,6989 mm'dir.

Çizelge 4.15. Numunelerin 6.bölgesine ait sapma değerleri

ÖLÇÜM NOKTASI	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	-0,0234	-0,0414	-0,0216	-0,0479	-0,0397	-0,0125	-0,0363	-0,0339	-0,0518	-0,033	-0,0198	-0,0273
2	-0,0171	-0,011	-0,0079	-0,0237	-0,019	0,0092	-0,0115	-0,0171	-0,0337	-0,0267	-0,0029	0,0024
3	-0,0106	-0,009	-0,0067	0,0003	-0,0123	0,0123	-0,0026	-0,008	-0,0163	-0,0239	0,0066	0,0059
4	0,0512	0,0535	0,0515	0,0372	0,0194	0,0286	0,0645	0,0535	0,0494	0,0526	0,0556	0,0304
5	0,0583	0,0572	0,0546	0,0376	0,0234	0,0349	0,0559	0,0643	0,0564	0,0663	0,0563	0,0294
6	0,0332	0,0235	0,0271	0,0101	0,0269	0,0428	0,0127	0,033	0,0298	0,0402	0,0316	0,0067
7	0,0162	0,0107	0,0215	0,0035	0,0101	0,0225	-0,0076	0,0094	0,0069	0,0127	0,017	-0,0118
8	0,0461	0,0502	0,0424	0,0297	0,0317	0,0393	0,0419	0,0476	0,0381	0,0496	0,0469	0,0169
9	0,0526	0,0632	0,0509	0,0366	0,0345	0,0353	0,0541	0,0582	0,057	0,0624	0,0588	0,026
10	0,0155	-0,0126	0,0089	0,0099	0,0063	0,0069	0,0072	0,0132	-0,0062	0,0073	0,0097	0,0123
11	0,0133	-0,0132	0,0182	0,0093	0,0075	0,0171	0,0024	0,0081	0,0021	0,0118	0,0184	0,0047
12	0,0068	-0,0274	0,0183	0,0065	0,0014	0,007	-0,0025	-0,0084	-0,0156	-0,005	0,0065	-0,0031
Tolerans Dışı Değer Sayısı	3	4	3	0	0	0	3	3	3	3	3	0

*Tablodaki değerlerin birimi mm'dir.

6.bölgede 144 ölçüm noktası içerisinde 25 noktada sapma değeri $\pm 0,05$ mm 'den fazladır. Tolerans değerini aşan sapma değerlerinin toplamı 1,4109 mm'dir.

Çizelge 4.16. Numunelerin 7.bölgesine ait sapma değerleri

ÖLÇÜM NOKTASI	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	-0,0394	-0,0458	-0,0186	-0,057	-0,0377	-0,0392	-0,0548	-0,0525	-0,0728	-0,059	-0,0301	-0,0628
2	-0,0142	-0,0347	-0,0281	-0,027	-0,0312	-0,0341	-0,0317	-0,0196	-0,0553	-0,0315	-0,0187	-0,0134
3	-0,036	-0,0577	-0,0585	-0,0626	-0,0423	-0,0645	-0,0774	-0,0508	-0,0664	-0,0649	-0,0488	-0,0388
4	-0,0265	-0,0303	-0,0474	-0,0323	-0,0219	-0,0366	-0,0472	-0,0423	-0,0324	-0,0442	-0,0433	-0,0229
5	0,0241	0,0304	0,0125	0,0139	0,0097	0,0053	0,032	0,0399	0,0234	0,0315	0,023	0,0275
6	-0,0014	-0,0026	0,0026	0,0185	-0,0034	0,0053	0,0121	0,0095	-0,0098	0,0073	0,0015	-0,0022
7	-0,0286	-0,0216	-0,0456	-0,0134	-0,0146	-0,0301	-0,0325	-0,0401	-0,0221	-0,0403	-0,0408	-0,0169
8	0,0249	0,0366	0,016	0,0263	0,0189	0,0148	0,0386	0,0309	0,0372	0,0321	0,0208	0,0325
9	-0,0195	-0,0247	-0,0112	-0,0223	-0,0211	-0,0221	-0,0282	-0,0205	-0,0402	-0,0267	-0,0159	-0,0402
10	0,0208	0,0277	0,0138	0,0239	0,014	0,0148	0,0277	0,0335	0,0259	0,0279	0,0187	0,006
11	-0,0366	-0,0289	-0,0483	-0,0098	-0,0225	-0,031	-0,0389	-0,0476	-0,027	-0,0384	-0,0405	-0,0235
12	-0,0148	-0,0281	-0,005	-0,0147	-0,009	-0,0073	-0,0115	-0,0158	-0,0223	-0,0127	-0,016	-0,0186
13	-0,004	-0,0089	-0,0024	0,009	-0,0071	-0,0077	-0,0086	0,0044	-0,018	-0,0025	0,0017	-0,0091
14	0,0358	0,0437	0,0267	0,1282	0,0072	0,0038	0,1278	0,0414	0,0346	0,0396	0,0348	0,1225
Tolerans Dışı Değer Sayısı	0	1	1	3	0	1	3	2	3	2	0	2

*Tablodaki değerlerin birimi mm'dir.

7.bölgede 168 ölçüm noktası içerisinde 18 noktada sapma değeri $\pm 0,05$ mm 'den fazladır. Tolerans değerini aşan sapma değerlerinin toplamı 1,2955 mm'dir.

Çizelge 4.17. Numunelerin 8.bölgesine ait sapma değerleri

ÖLÇÜM NOKTASI	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	-0,0375	-0,0135	-0,0418	-0,0106	-0,0042	-0,036	-0,0348	-0,0435	-0,0133	-0,0448	-0,0407	-0,0194
2	0,009	0,0365	0,0093	0,0081	0,0347	0,0166	0,0211	0,0173	0,0369	0,0247	0,0167	0,01
3	-0,0185	-0,0175	-0,0112	-0,0199	0,0025	-0,0053	-0,0118	-0,018	-0,01	-0,0164	-0,0207	-0,0279
4	0,0023	-0,0107	0,0113	-0,0027	0,0106	0,0169	-0,0022	0,006	0,0038	0,0147	0,0081	-0,006
5	0,0337	0,0082	0,0357	0,0233	0,0231	0,0368	0,0257	0,0401	0,0158	0,0357	0,0281	0,01
6	-0,0099	-0,009	-0,0016	0,0111	0,0074	-0,0036	0,0062	-0,0103	0,0036	-0,0066	-0,0231	-0,0088
7	0,0174	0,0465	0,0198	0,0178	0,0339	0,0181	0,0319	0,0264	0,0424	0,0268	0,0242	0,0105
8	-0,0302	-0,0068	-0,0392	-0,01	-0,0038	-0,0312	-0,0301	-0,0499	-0,0087	-0,0392	-0,0344	-0,0097
9	0,0255	0,0571	0,0221	0,0239	0,0424	0,0141	0,0327	0,0264	0,0594	0,0373	0,0261	0,0247
10	-0,0279	-0,0116	-0,0364	-0,0124	-0,0071	-0,0347	-0,027	-0,044	-0,0099	-0,0379	-0,0376	-0,0077
11	0,0331	0,0585	0,0318	0,0375	0,0198	0,0054	0,059	0,0361	0,0456	0,0407	0,0365	0,0553
12	0,0097	0,0141	0,0035	0,0211	0,0201	0,0075	0,0269	0,0023	0,0097	0,0111	-0,0001	0,0179
13	0,0323	0,0697	0,0259	0,0389	0,0423	0,0037	0,0604	0,0305	0,0641	0,0403	0,0284	0,0478
Tolerans Dışı Değer Sayısı	0	3	0	0	0	0	2	0	2	0	0	1

*Tablodaki değerlerin birimi mm'dir.

8.bölgede 156 ölçüm noktası içerisinde 8 noktada sapma değeri $\pm 0,05$ mm 'den fazladır. Tolerans değerini aşan sapma değerlerinin toplamı 0,4835 mm'dir.

Çizelge 4.18. Numunelerin 9.bölgesine ait sapma değerleri

ÖLÇÜM NOKTASI	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	-0,049	-0,0446	-0,0386	-0,0507	-0,0697	-0,0446	-0,0636	-0,0535	-0,0556	-0,0637	-0,0393	-0,0416
2	-0,0319	-0,0458	-0,0276	-0,0383	-0,0469	-0,0213	-0,0334	-0,0378	-0,0558	-0,045	-0,0262	-0,0231
3	0,0011	-0,0019	0,005	-0,0192	0,0083	0,0222	-0,0143	0,0027	0,0006	0,0049	0,0095	-0,0081
4	-0,0207	-0,0273	-0,0216	-0,0264	-0,0268	-0,035	-0,0282	-0,0427	-0,0344	-0,0387	-0,0378	-0,0105
5	0,0309	0,0267	0,0324	0,0298	0,004	0,0164	0,0586	0,0402	0,0317	0,0377	0,028	0,032
6	0,0104	0,0139	0,0092	-0,0148	0,0154	0,0264	-0,0096	0,0042	0,0065	0,0169	0,0129	-0,0075
7	-0,025	-0,0374	-0,0454	-0,0484	-0,0242	-0,0438	-0,0457	-0,0482	-0,0426	-0,0395	-0,0385	-0,023
8	0,0277	0,0243	0,0274	0,0199	0,0042	0,0098	0,0442	0,0402	0,0225	0,0352	0,029	0,0269
9	-0,0031	-0,0041	0,0037	-0,0211	0,0021	0,0029	-0,0158	-0,0112	-0,018	-0,0095	-0,0031	-0,0206
10	-0,0087	0,0023	-0,0404	-0,0356	0,009	-0,0325	-0,0295	-0,0304	-0,0051	-0,0266	-0,0172	-0,0068
11	-0,0115	-0,0154	-0,0084	-0,009	-0,0155	-0,0115	-0,0103	-0,0187	-0,0316	-0,0168	-0,017	-0,0214
12	0,0071	0,0344	-0,002	0,0137	0,0357	0,002	0,0102	0,0071	0,0282	0,0114	0,008	0,0028
Tolerans Dışı Değer Sayısı	0	0	0	1	1	0	2	1	2	1	0	0

*Tablodaki değerlerin birimi mm'dir.

9.bölgede 144 ölçüm noktası içerisinde 8 noktada sapma değeri $\pm 0,05$ mm 'den fazladır. Tolerans değerini aşan sapma değerlerinin toplamı 0,4712 mm'dir

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Serbest şekilli yüzeylerde takım yolu stratejilerinin form hatalarının değerlendirilmesinde ölçüm sonuçlarının fazla olması nedeni ile sırasıyla;

- Takım yolu yöntemlerine ait sü ve G-kod satır sayısına göre değerlendirme.
- Finish işlemeye göre, yüzey formundan alınan ölçüm noktalarındaki değerlerin, numunelere ve bölgelere ait sapma sayıları ve miktarlarına göre değerlendirilmesi.
- Finish işlemeye göre yüzey formundan alınan ölçüm noktalarındaki değerlerin numuneler ve bölgelere ait toplam ve ortalama sapma miktarına göre değerlendirilmesi.
- Toplam sapma miktarına göre ara kaba ve finish işleminin değerlendirilmesi yapıldı.

5.1. Takım Yolu Yöntemlerine Ait İşleme Süresi ve G-Kod Satır Sayıları

Çalışma kapsamında numune ve bölgelerin karşılaştırılmasında kullanacağımız diğer veriler, serbest şekilli yüzey işlemede kullanılan takım yolu yöntemlerine ait işleme süresi ve BDİ ortamında elde edilen G-kodlarının satır sayısı veya uzunluğudur. Çizelge 5.1’de kaba, ara kaba ve finish işlemede kullanılan takım yollarına ait işleme süresi ve G-kod satır sayısı verilerini görmekteyiz.

Çizelge 5.1. Takım yollarına ait işleme zamanı ve G-kod satır sayısı

OPERASYON	YÖNTEM	İŞLEME ZAMANI (dak:sn)	G-KOD SATIR SAYISI
KABA İŞLEME	HM	1:20	1243
ARA KABA İŞLEME	ARA KABA	09:15	8157
	KONTUR KABA	13:38	9844
	PARALEL KABA	15:25	8320
FİNİŞ İŞLEME	EĞRİYE PARALEL	35:22	36345
	PARALEL TARAMA	56:24	41330
	PARALEL DOĞRUSAL	43:44	47288
	PARALEL SABİT Z	33:40	23068

Çizelge 5.1’de gördüğümüz gibi işleme süreleri ile satır sayıları arasında doğrusal bir ilişki yoktur. Bu sebeple sapma sayısı ve miktarı ile yapılan değerlendirmeden sonra, nihai kararı verirken bu tablodan yararlanıldı.

5.2. Sapma Sayısı ve Miktarına Göre Numunelerin ve Bölgelerin Değerlendirilmesi

Çizelge 4.10-18 de kırmızı renk ile verilen $\pm 0,05$ mm tolerans değerini aşan noktaların sayısına göre bölgeleri ve numuneleri, bu noktaların miktarlarının toplamına göre ise bölgeleri değerlendirebiliriz. Bu değerlendirme, tolerans dışı değerlerin gerçekleşme miktarını göstereceği gibi bir sonraki aşamada yapacağımız toplam miktar üzerindeki değerlendirmeye yardımcı olacaktır. Bu değerler çizelge 5.2 'de verilmiştir. Bir sonraki bölümde toplam sapma miktarına göre numuneleri değerlendireceğimiz için, bu bölümde toleransı aşan noktaların toplam miktarına göre numuneler değerlendirilmeyecektir.

Çizelge 5.2. $\pm 0,05$ mm tolerans değerini aşan noktaların sayısı ve toplam değerleri

NUMUNE	1. BÖLGE	2. BÖLGE	3. BÖLGE	4. BÖLGE	5. BÖLGE	6. BÖLGE	7. BÖLGE	8. BÖLGE	9. BÖLGE	TOPLAM
A	1	1	1	4	4	3	0	0	0	14
B	1	2	3	2	0	4	1	3	0	16
C	0	0	1	3	5	3	1	0	0	13
D	3	0	1	0	0	0	3	0	1	8
E	1	0	1	0	0	0	0	0	1	3
F	1	0	1	0	0	0	1	0	0	3
G	2	4	1	4	4	3	3	2	2	25
H	4	4	3	5	4	3	2	0	1	26
I	4	1	3	3	3	3	3	2	2	24
J	5	3	3	4	5	3	2	0	1	26
K	3	3	2	3	3	3	0	0	0	17
L	3	1	2	0	0	0	2	1	0	9
TOPLAM	28	19	22	28	28	25	18	8	8	172
AŞMA DEĞERİ (mm)	2,1558	1,106	1,5699	1,6212	1,6989	1,4109	1,2955	0,4835	0,4712	11,8129

Numunelerin toleransı aşan nokta sayısına göre büyükten küçüğe sıralama yaptığımızda, 26 nokta ile H ve J numunesinin en kötü sonucu verdiğini görüyoruz. E ve F numuneleri ise 3 nokta ile en iyi sonucu veren numunelerdir (çizelge 5.3). H,J,E ve F numunelerini işlemek için kullanılan takım yolu yöntemleri;

H numunesi-HM Kaba- Kontur Kaba-Paralel Tarama

J numunesi-HM Kaba-Paralel Kaba-Paralel Tarama

E numunesi- HM Kaba- Kontur Kaba-Eğriye Paralel

F numunesi- HM Kaba- Kontur Kaba-Paralel Doğrusal

şeklinde gerçekleşmiştir. En kötü sonuçlar Kontur Kaba ve Paralel Kaba, en iyi sonuç ise Kontur Kaba ara kaba işleme yönteminde gerçekleşmiştir. Bu değerlendirme yöntemi tek başına yeterli olmadığı için bir sonraki aşamada toplam sapma değerlerine göre inceleme yapılacaktır.

Çizelge 5.3. Numunelere göre aşma miktarının sıralanması

NUMENE	AŞMA MİKTARI	KABA İŞLEME	ARA KABA İŞLEME	İNCE İŞLEME
H	26	HM	KONTUR KABA	PARALEL TARAMA
J	26	HM	PARALEL KABA	PARALEL TARAMA
G	25	HM	KONTUR KABA	PARALEL SABİT Z
I	24	HM	PARALEL KABA	EĞRİYE PARALEL
K	17	HM	PARALEL KABA	PARALEL DOĞRUSAL
B	16	HM	ARA KABA	EĞRİYE PARALEL
A	14	HM	ARA KABA	PARALEL TARAMA
C	13	HM	ARA KABA	PARALEL DOĞRUSAL
L	9	HM	PARALEL KABA	PARALEL SABİT Z
D	8	HM	ARA KABA	PARALEL SABİT Z
E	3	HM	KONTUR KABA	EĞRİYE PARALEL
F	3	HM	KONTUR KABA	PARALEL DOĞRUSAL

Bölgeleri toleransı aşan nokta sayısına göre büyükten küçüğe doğru sıralama yaptığımızda (çizelge 5.4) 1, 4 ve 5. bölgeler aşma miktarı en çok olan, 8 ve 9. bölgeler ise aşma miktarı en az olan bölgelerdir. Daha hassas değerlendirme yapabilmek için sapma noktalarına ait toplam aşma değerlerini büyükten küçüğe sıraladığımızda (çizelge 5.5), 1. bölge toplam aşma değeri en yüksek olan bölge, 9. bölge ise toplam aşma değeri en düşük olan bölge olarak görülmektedir.

Bu iki sıralamayı birleřtirdiđimizde form hatasının en dűřűk olduđu bűlgenin 9. bűlge, en yűksek olduđu bűlgenin ise 1. bűlge olduđunu gűrmekteyiz. Elde ettiđimiz sonuçlar sadece $\pm 0,05$ mm tolerans aralıđına bađlı olmasından dolayı kűműlatif hataya gűre farklı sonuçlar verebileceđi dűřűnűlerek bűlűm 5.3’de, her bűlűműn toplam sapma deđerine gűre bűlgelerin form hata miktarı tekrardan deđerlendirilecektir. İyileřtirme yapılırken bu bűlgelerin iřlenmesi esnasında farklı parametreler kullanılarak daha iyi sonuçlar elde edilmeye çalıřılacaktır.

Çizelge 5.4. Bűlgelere gűre ařma miktarı sıralaması

BűLGE	AşMA MİKTARI (adet)
1.BűLGE	28
4.BűLGE	28
5.BűLGE	28
6.BűLGE	25
3.BűLGE	22
2.BűLGE	19
7.BűLGE	18
8.BűLGE	8
9.BűLGE	8

Çizelge 5.5. Bűlgelere gűre ařma deđerı sıralaması

BűLGE	AşMA DEğerİ (mm)
1.BűLGE	2,1558
5.BűLGE	1,6989
4.BűLGE	1,6212
3.BűLGE	1,5699
6.BűLGE	1,4109
7.BűLGE	1,2955
2.BűLGE	1,106
8.BűLGE	0,4835
9.BűLGE	0,4712

5.3. Toplam Sapma ve Ortalama Sapma Miktarına Gűre Numune ve Bűlgelerin Deđerlendirilmesi

Bu bűlűmde numunelerin bűlgelere gűre toplam sapma miktarları ve tűm bűlgelerin toplamında gerçekleřen sapma miktarları ele alınarak, referans yűzeye en yakın ve en uzak numunenin tespiti yapılacaktır. Daha sonraki ařamada bűlűm 5.2’de yapılmıř olan sapma miktarına gűre sıralama ile birleřtirilerek iřleme kalitesi en yűksek ve en dűřűk olan numune tespit edilecektir.

Bölüm 4.2. 'de çizelge 4.10-4.18'de verilen sapma değerleri negatif etkiden arındırılarak bölge ve numunelere göre toplam sapma ve ortalama sapma değerleri hesaplanmıştır (çizelge 5.6).

Çizelge 5.6. Bölgeler ve numunelere göre toplam ve ortalama sapma değerleri

		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	TOPLAM SAPMA
1.BÖLGE	ORTALAMA SAPMA	0,0295	0,0312	0,0261	0,0358	0,0190	0,0239	0,0399	0,0431	0,0389	0,0393	0,0318	0,0420	0,4004
	TOPLAM SAPMA	0,3536	0,3740	0,3133	0,4292	0,2275	0,2868	0,4793	0,5167	0,4672	0,4710	0,3819	0,5038	4,8043
2.BÖLGE	ORTALAMA SAPMA	0,0329	0,0354	0,0292	0,0250	0,0183	0,0226	0,0372	0,0447	0,0418	0,0423	0,0325	0,0223	0,3842
	TOPLAM SAPMA	0,3287	0,3544	0,2916	0,2504	0,1828	0,2258	0,3718	0,4473	0,4181	0,4226	0,3250	0,2231	3,8416
3.BÖLGE	ORTALAMA SAPMA	0,0297	0,0335	0,0289	0,0290	0,0233	0,0223	0,0320	0,0378	0,0392	0,0362	0,0284	0,0248	0,3652
	TOPLAM SAPMA	0,3271	0,3681	0,3183	0,3194	0,2559	0,2454	0,3522	0,4159	0,4313	0,3983	0,3121	0,2727	4,0167
4.BÖLGE	ORTALAMA SAPMA	0,0379	0,0344	0,0359	0,0240	0,0165	0,0244	0,0380	0,0443	0,0415	0,0453	0,0364	0,0196	0,3981
	TOPLAM SAPMA	0,3788	0,3443	0,3588	0,2396	0,1646	0,2438	0,3804	0,4433	0,4153	0,4529	0,3637	0,1956	3,9811
5.BÖLGE	ORTALAMA SAPMA	0,0421	0,0214	0,0436	0,0268	0,0223	0,0362	0,0403	0,0458	0,0365	0,0483	0,0426	0,0228	0,4285
	TOPLAM SAPMA	0,4212	0,2142	0,4357	0,2677	0,2228	0,3616	0,4027	0,4578	0,3650	0,4827	0,4256	0,2275	4,2845
6.BÖLGE	ORTALAMA SAPMA	0,0287	0,0311	0,0275	0,0210	0,0194	0,0224	0,0249	0,0296	0,0303	0,0326	0,0275	0,0147	0,3096
	TOPLAM SAPMA	0,3443	0,3729	0,3296	0,2523	0,2322	0,2684	0,2992	0,3547	0,3633	0,3915	0,3301	0,1769	3,7154
7.BÖLGE	ORTALAMA SAPMA	0,0233	0,0301	0,0241	0,0328	0,0186	0,0226	0,0406	0,0321	0,0348	0,0328	0,0253	0,0312	0,3483
	TOPLAM SAPMA	0,3266	0,4217	0,3367	0,4589	0,2606	0,3166	0,5690	0,4488	0,4874	0,4586	0,3546	0,4369	4,8764
8.BÖLGE	ORTALAMA SAPMA	0,0221	0,0277	0,0223	0,0183	0,0194	0,0177	0,0284	0,0270	0,0249	0,0289	0,0250	0,0197	0,2812
	TOPLAM SAPMA	0,2870	0,3597	0,2896	0,2373	0,2519	0,2299	0,3698	0,3508	0,3232	0,3762	0,3247	0,2557	3,6558
9.BÖLGE	ORTALAMA SAPMA	0,0189	0,0232	0,0218	0,0272	0,0218	0,0224	0,0303	0,0281	0,0277	0,0288	0,0222	0,0187	0,2911
	TOPLAM SAPMA	0,2271	0,2781	0,2617	0,3269	0,2618	0,2684	0,3634	0,3369	0,3326	0,3459	0,2665	0,2243	3,4936
TOPLAM SAPMA		2,9944	3,0874	2,9353	2,7817	2,0601	2,4467	3,5878	3,7722	3,6034	3,7997	3,0842	2,5165	

Toplam sapma miktarına göre bölgeleri büyükten küçüğe doğru sıraladığımızda, toplam sapma miktarının en yüksek olduğu bölgenin 7. bölge, en düşük olduğu bölgenin ise 9. bölge olduğunu görmekteyiz (çizelge 5.7). Fakat 1. bölgede 12, 7. bölgede 14 adet nokta ölçüldüğü için ortalama sapma değerlerini de kontrol etmemiz gerekmektedir.

Ortalama sapma miktarına göre en kötü bölgenin 5. bölge, en iyi bölgenin ise 8. bölge olduğu görülmektedir (çizelge 5.8). Fakat düşük değerlerde toplam sapma ortalama sapmaya göre daha geçerli bir sonuç vereceği için en iyi bölge 9. bölge olarak belirlenmiştir. Yaptığımız üç değerlendirme sonucu referans ölçülere en yakın bölge 9, en uzak bölge ise 5 olduğu tespit edilmiştir.

Çizelge 5.7. Toplam sapma miktarına göre bölgelerin değerlendirilmesi

BÖLGE	TOPLAM SAPMA
7.BÖLGE	4,8764
1.BÖLGE	4,8043
5.BÖLGE	4,2845
3.BÖLGE	4,0167
4.BÖLGE	3,9811
2.BÖLGE	3,8416
6.BÖLGE	3,7154
8.BÖLGE	3,6558
9.BÖLGE	3,4936

Çizelge 5.8. Ortalama sapma miktarına göre bölgelerin değerlendirilmesi

BÖLGE	ORTALAMA SAPMA
5.BÖLGE	0,4285
1.BÖLGE	0,4004
4.BÖLGE	0,3981
2.BÖLGE	0,3842
3.BÖLGE	0,3652
7.BÖLGE	0,3483
6.BÖLGE	0,3096
9.BÖLGE	0,2911
8.BÖLGE	0,2812

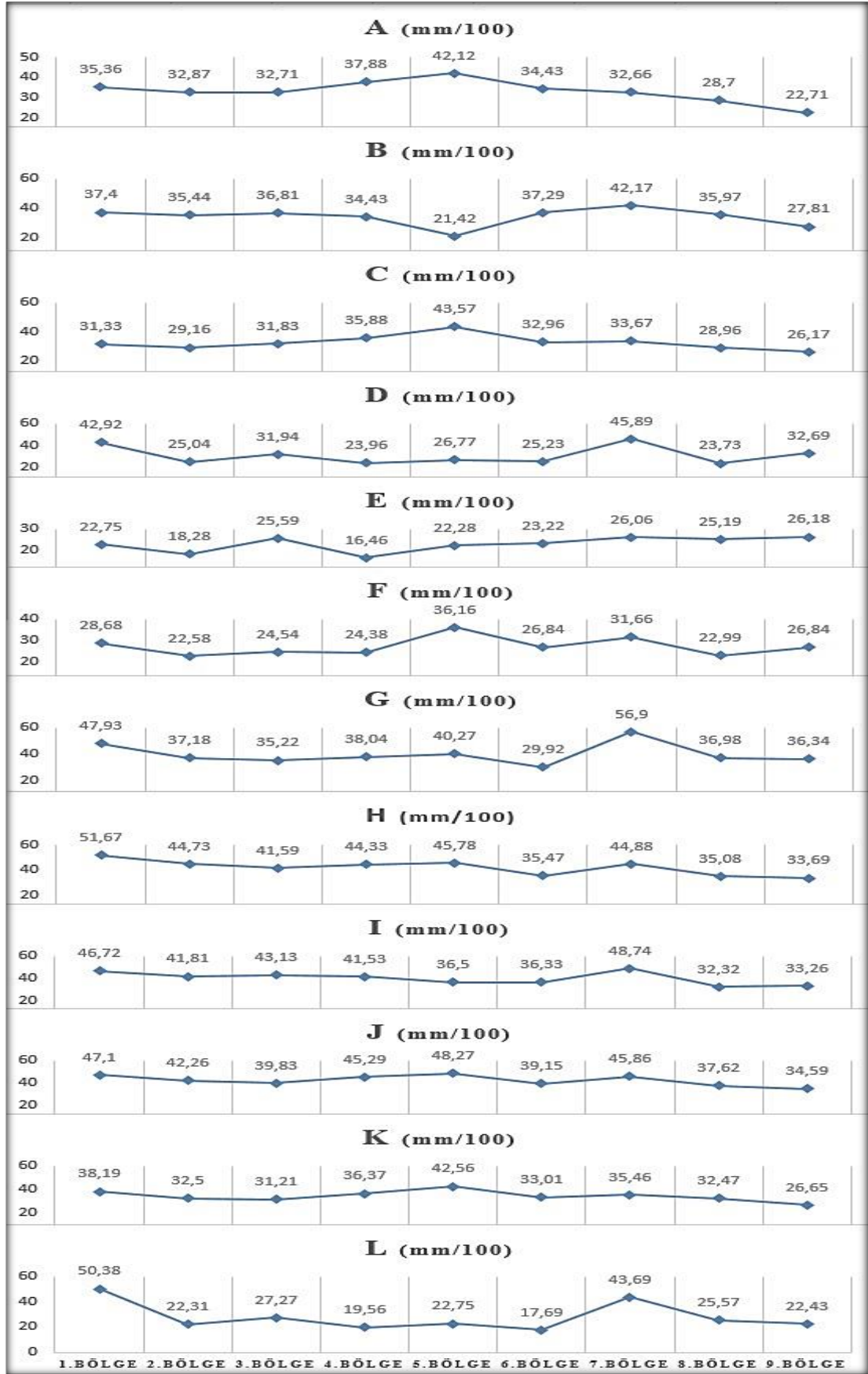
Numuneleri toplam sapma miktarına göre büyükten küçüğe sıraladığımızda en kötü sonucun J, en iyi sonucun E numunesi olduğunu görüyoruz (çizelge 5.9). Ortalama sapma miktarına göre numuneler büyükten küçüğe doğru sıralandığında yine aynı sonucu elde ederiz (çizelge 5.10). Bölüm 5.2 ‘de tolerans değerini aşan ölçümlerin sıralamasında da aynı sonuç elde edilmişti. Her bölümdeki numunelere ait ortalama sapma miktarı ve toplam sapma miktarına göre çizilmiş grafikler Ek 5’de verilmiştir. Toplam sapma miktarlarına göre numunelerin bölgesel grafiği şekil 5.1’de verilmiştir.

Çizelge 5.9. Toplam sapma miktarına göre numunelerin sıralanması

NUMUNE	TOPLAM SAPMA (mm)
J	3,7997
H	3,7722
I	3,6034
G	3,5878
B	3,0874
K	3,0842
A	2,9944
C	2,9353
D	2,7817
L	2,5165
F	2,4467
E	2,0601

Çizelge 5.10. Ortalama sapma miktarına göre numunelerin sıralanması

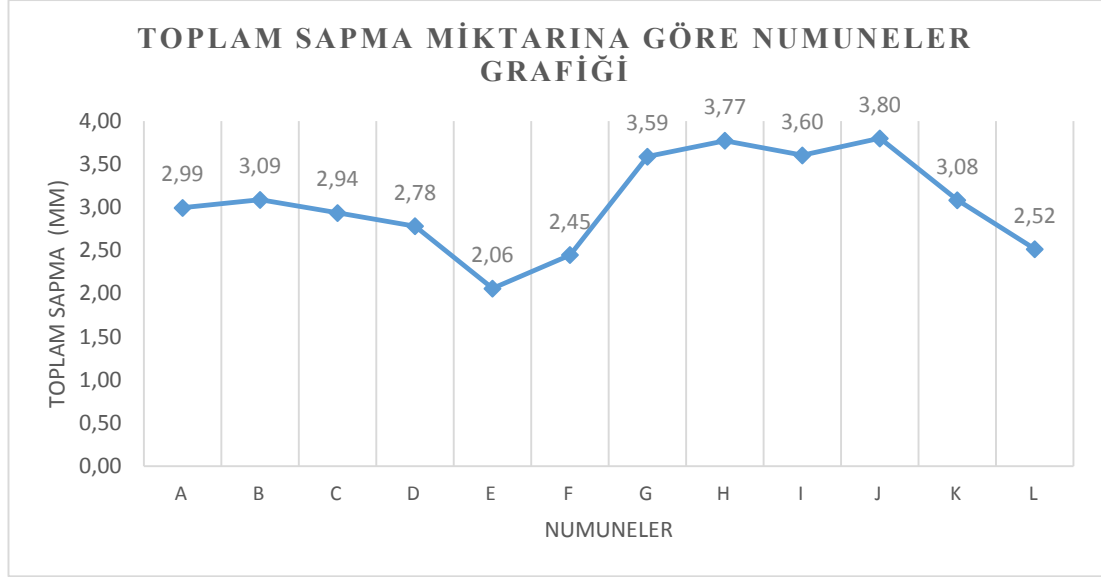
NUMUNE	ORTALAMA SAPMA (mm)
J	0,0372
H	0,0369
I	0,0351
G	0,0346
K	0,0302
B	0,0298
A	0,0295
C	0,0288
D	0,0267
L	0,0240
F	0,0238
E	0,0198



Şekil 5.1. Toplam sapma miktarına göre numunelerin bölgesel grafiği

Aşağıdaki grafikte numunelerin toplam sapma miktarına göre değişimini daha rahat görüyoruz (Çizelge 5.11)

Çizelge 5.11. Numunelerin toplam sapma miktarına göre grafiği



Grafiklerde görüleceği üzere takım yollarının form hataları üzerindeki etkisi 2. bölgeden başlayarak 7. bölgeye kadara belirgin şekilde değişiklik göstermektedir (Şekil 5.1).

Genel olarak form hataları incelendiğinde, en iyi sonuç E grafiğinde olduğu görülmektedir. Daha sonra sırasıyla F, L, D, C, A, K, B, G, I, H, J grafikleri gelmektedir.

Yarı kaba işlemede kalan talaş miktarı, Kaba talaş işleme yöntemine ve kesici takımın çapına bağlıdır. Bu durum finish işlemedeki kesme kuvvetlerinin artmasına neden olduğundan, form hatalarını artırmaktadır [7]. Takım yolu stratejileri hem işleme zamanını hem de form hatalarını önemli ölçüde etkilemektedir. Ayrıca eğimli yüzeylerin küresel başlı takım ile frezelenmesinde, değişken yüzey formu, değişken kesme kuvvetlerine neden olmaktadır. Kesme kuvvetleriyle oluşan esnemeler parça üzerinde göz ardı edilemeyecek form hataları oluşturabilmektedir.

Grafikler incelendiğinde dış bükey ve iç bükey yüzeyler için meydana gelen takım sehimi ve buna bağlı olarak form hata değerlerinin işleme yüzeyinde oluşum yeri incelendiğinde, genel olarak takımın tırmanma ve inme yaptığı bölgelerde maksimum form hataları olduğu göze çarpmaktadır. Takımın işlenen yüzey ile temas alanı azaldığı iç bölgelerde ise form hata değerlerinin azaldığı görülmektedir.

Grafikler incelendiğinde, parçanın en üst bölgesinde kesici takım temas yüzey alanı en aza yaklaştığından, kuvvet değerlerine bağlı olarak takımın sehimi azalır ve buna bağlı olarak form hataları da azalır.

Yine takım yolları açısından değerlendirildiğinde, yüzey formu için zıt yönlü frezeleme tekniğinin form hataları, eş yönlü frezelemenin form hatalarına göre daha fazla çıkmıştır. Bunun nedeni hem yüzey formu hem de takımın az talaştan çok talaşa doğru girmesi sonucu kesme kuvvetleri artmış ve yer yer tırlama titreşimlerine neden olmuştur. Aynı zamanda literatürde [28], eş yönlü frezeleme yönteminde daha düşük kesme kuvvetlerinin olduğu vurgulanmıştır. Yine grafik incelendiğinde E yöntemi, yani eğriye paralel işleme takım yolunun en iyi yöntem olduğu belirtilmiştir. Bunun sebebi, takım yolunun kavis eksenine paralel ve kısa süreli işlemeyi içermesidir. Yine benzer şekilde literatürde [29], eğime paralel işlemede talaşın kesme bölgesinden kolay uzaklaştırıldığı belirtilmektedir. Bu durum takımdaki talaş birikmesi nedeniyle meydana gelen sehimi ve titreşimi azaltmakta, dolayısıyla form hatalarını azaltmaktadır.

5.4. Toplam Sapma Miktarına Göre Ara Kaba ve Finish İşleme Yöntemlerinin Değerlendirilmesi

Çalışmada kullandığımız ara kaba takım yolu yöntemlerini, ince işlemeden sonraki toplam sapma miktarlarına göre kendi aralarında karşılaştırdığımızda, 13,0038 mm ile en yüksek toplam sapma değerinin Paralel Kaba yönteminde gerçekleştiğini görüyoruz. En düşük toplam sapma değeri ise 11,7988 mm ile Ara Kaba yönteminde gerçekleşmiştir (çizelge 5.12)

Bölüm 5.3'de en iyi sonuç veren numuneyi E ve en kötü sonuç veren numuneyi J olarak bulmuştuk. E numunesi Kontur Kaba yöntemi ile işlenmiş J numunesi ise Paralel Kaba yöntemi ile işlenmiştir. Ara kaba yöntemleri tek başına yeterli bir sonuç veremeyeceği için ince işleme yöntemleri ile birlikte değerlendirilmesi gerekir.

Çizelge 5.13'de ince işleme yöntemlerinin toplam sapma miktarlarına göre büyükten küçüğe sıralanmasını görmekteyiz. Bu çizelgeye göre Paralel Tarama yöntemi ile işlenen numunelerde toplamda daha fazla sapma yaşandığı görülmektedir. Eğriye Paralel, Paralel Sabit Z ve Paralel Doğrusal yöntemleri çok az farklarla birbirlerinden ayrılmaktadır.

En kötü sonucu aldığımız J ve ondan sonra gelen H numunelerinin Paralel Tarama yöntemi ile yapılması ve en iyi sonucu veren E numunesi ve kendisine en yakın sonucu veren F ve L yöntemlerinin diğer üç ince işleme yöntemi ile yapılması bu sonucu doğrulamaktadır.

Çizelge 5.12. Toplam sapma miktarına göre ara kaba yöntemlerinin değerlendirilmesi

	±0,05 TOLERANSI AŞAN DEĞER SAYISI	TOPLAM AŞMA DEĞERİ (mm)
I-J-K-L (PARALEL KABA)	76	13,0038
E-F-G-H (KONTUR KABA)	57	11,8668
A-B-C-D (ARA KABA)	51	11,7988

Çizelge 5.13. Toplam sapma miktarına göre ince işleme yöntemlerinin değerlendirilmesi

	±0,05 TOLERANSI AŞAN DEĞER SAYISI	TOPLAM AŞMA DEĞERİ (mm)
A-H-J (PARALEL TARAMA)	66	10,5663
D-G-L (PARALEL SABİT Z)	42	8,8860
B-E-I (EĞRİYE PARALEL)	43	8,7509
C-F-K (PARALEL DOĞRUSAL)	33	8,4662

Ara kaba yöntemlerini incelediğimizde çizelge 5.12’de görüldüğü üzere Paralel Kaba işleme yöntemi en kötü sonucu vermiştir. Bunun sebebi bölüm 5.3’ de belirtildiği gibi takım yolunun zıt yönlü frezeleme yapmasıdır. Paralel Kaba işleme yönteminde, kesici takım eş yükselti eğrilerini işleyerek referans ölçülere yaklaştığı için, işleme esnasında zıt yönlü frezeleme yapmaktadır. Özellikle eğimin yukarı doğru arttığı ve kesici takım temas yüzeyinin genişlediği bölgelerde form hataları daha çok artmaktadır.

Aynı şekilde çizelge 5.13’de Paralel Tarama işleme yöntemi de, finish işleme yöntemleri içerisinde benzer sebeplerden daha fazla form hatasına neden olmuştur. Paralel Doğrusal ve Eğriye Paralel finish işleme yöntemlerinde, takım yolunun kavis eksenine paralel olması, talaşın kesme bölgesinden kolay uzaklaştırılmasını sağlayarak form hatalarının azalmasına neden olmuştur.

5.5. Verilerin Değerlendirilmesi

Numunelere ait verileri değerlendirmek için aşağıdaki özet sonuçlar değerlendirildiğinde;

1. Bölüm 5.2.’de elde ettiğimiz veriler sonucunda toleransı aşan sapma sayısına göre değerlendirme.

En Kötü Sonuç

H-Kontur Kaba-Paralel Tarama

J-Paralel Kaba-Paralel Tarama

En İyi Sonuç

E-Kontur Kaba-Eğriye Paralel

F-Kontur Kaba Paralel Doğrusal

2. Bölüm 5.3’de elde ettiğimiz veriler sonucunda toplam sapma ve ortalama sapma miktarına göre değerlendirme.

En Kötü Sonuç

J-Paralel Kaba-Paralel Tarama

En İyi Sonuç

E-Kontur Kaba-Eğriye Paralel

E numunesine en yakın sonuçlar:

F-Kontur Kaba-Paralel Doğrusal

L-Paralel Kaba-Paralel Sabit Z

D-Ara Kaba-Paralel Sabit Z

3. İlk iki değerlendirmeye göre form hatası miktarı öncelikli olduğunda E numunesi en iyi numune çıkmaktadır. Fakat kendisine en yakın olan diğer üç numunenin (F-L-D) değerleri ile arasındaki fark az olduğundan, bu dört numune işleme süresi ,satır sayısı ve ara kaba ve finish işlemlerine ait toplam sapma miktarına göre değerlendirilip daha net bir sonuç alınabilir (Çizelge 5.14).

Çizelge 5.14. E-F-L-D numunelerinin takım yollarına ait işleme süresi ve satır sayısı

Numune	Takım Yolu	İşlem Süresi (dak:sn)	Satır sayısı
E	Kontur Kaba	13:38	9844
	Eğriye Paralel	<u>35:22</u>	<u>36345</u>
Toplam		49:00	46189
F	Kontur Kaba	13:38	9844
	Paralel Doğrusal	<u>43:44</u>	<u>47288</u>
Toplam		57:22	57132
L	Paralel Kaba	15:25	8320
	Paralel Sabit Z	<u>33:40</u>	<u>23068</u>
Toplam		49:05	31388
D	Ara Kaba	09:15	8157
	Paralel Sabit Z	<u>33:40</u>	<u>23068</u>
Toplam		42:55	31225

Çizelge 5.14’de görüldüğü üzere F ve L numunelerinin toplam işleme süresi E numunesinin işleme süresinden fazladır. Fakat D numunesi hem süre olarak hem de satır olarak E numunesinden daha iyi değerlere sahiptir. Bununla birlikte E numunesinin toplam

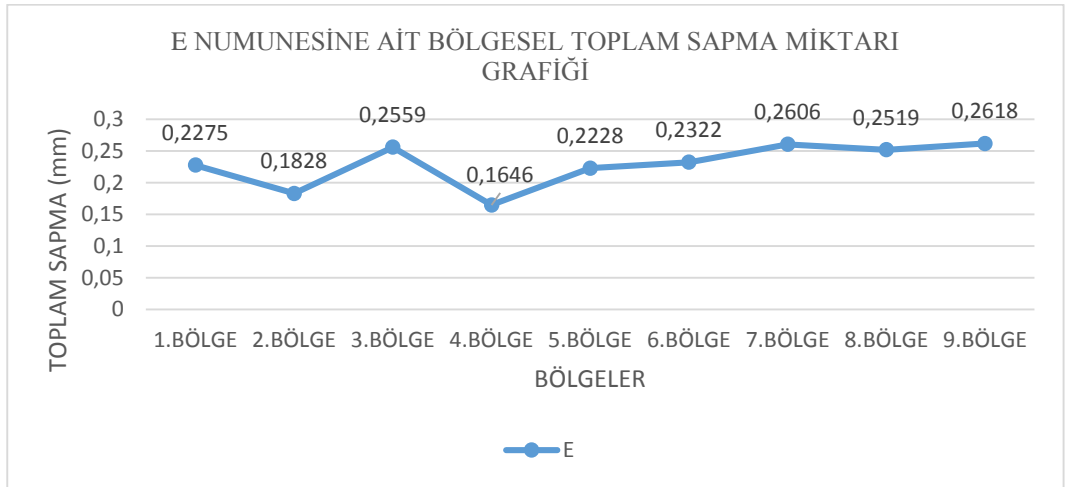
sapma miktarı 2,0601 mm, D numunesinin toplam sapma miktarı ise 2,7817 mm olarak gerçekleşmiştir. Aradaki fark 0,721 mm'dir. Bu rakam en yüksek sapma değerine sahip L numunesinin 1. bölgesinin 7. noktasına ait 0,1733 mm'lik sapma değerinin ortalama 4 katıdır. Aradaki toplam işleme süresi farkı ise 6 dk. 5 sn. olarak gerçekleşmiştir.

D numunesindeki sapma miktarını düzeltmek için yapılacak olan ikinci bir finish işleme süresi düşünüldüğünde E numunesinin en iyi sonuç olarak kabul edilmesi gerekmektedir.

4. Bölüm 5.2'de yapılan toleransı aşan sapma sayısına göre değerlendirme ve bölüm 5.3 de yapılan toplam ve ortalama sapma miktarına göre yapılan değerlendirmenin ikisinde de en iyi sonucu veren bölge 9, en kötü sonucu veren bölge ise 5 olarak gerçekleşti.

Bu çalışmanın amacının en iyi sonucu veren takım yolunun form hatasını %10 düşürmek olduğu için E numunesine ait bölgelerin değerlendirilmesi yapılmıştır. Çizelge 4.10-18 incelendiğinde, E numunesine ait bölgelerin toplam sapma miktarları çizelge 5.15'deki gibidir.

Çizelge 5.15. E numunesine ait bölgesel toplam sapma grafiği



Çizelge 5.15'de görüldüğü üzere E numunesinin toplam sapma miktarına göre en kötü sonucu veren bölgesi 9. bölge, en iyi sonucu veren bölgesi ise 4. bölge olarak gerçekleşmiştir. Bu sonuç numunelerin geneline bakıldığında farklılık göstermektedir. 8 numunede 9. bölge en iyi sonuç veya en iyi sonuca yakın değerler verirken sadece E numunesinde en kötü sonucu vermektedir. Her bölgedeki ölçüm noktasının farklı olması bu sonucu ortaya çıkarmaktadır. Bu durumu engellemek için E numunesine ait ortalama sapma değerine göre bölgeleri sıraladığımızda (çizelge 5.16) en kötü sonucu veren bölge 3 ve en iyi sonucu veren bölge 4 olarak gerçekleşmiştir. Daha etkin bir sonuç alabilmek için

iki durum birlikte değerlendirilecektir. Buna göre iyileştirme yapılması gereken bölgeler sırasıyla 9-3-7-5 olarak gerçekleşmiştir.

Çizelge 5.16. E numunesine ait ortalama sapma değerlerinin sıralanışı

BÖLGELER	ORTALAMA SAPMA MİKTARI (mm)
3.BÖLGE	0,0233
5.BÖLGE	0,0223
9.BÖLGE	0,0218
8.BÖLGE	0,0194
6.BÖLGE	0,0194
1.BÖLGE	0,0190
7.BÖLGE	0,0186
2.BÖLGE	0,0183
4.BÖLGE	0,0165

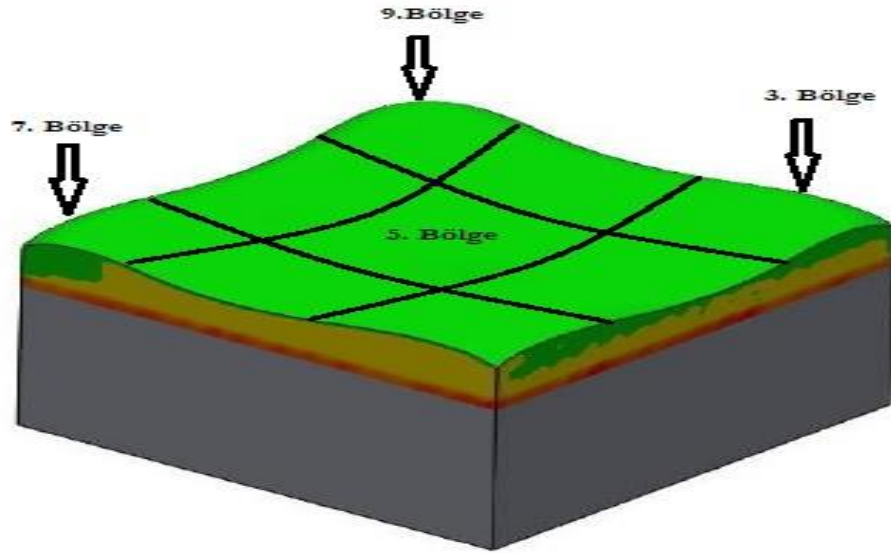
5. Bölüm 5.4’de yapılan ara kaba ve finish işleme toplam sapma değerlerinin sıralamasına göre, ara kaba işlemede en kötü sonuç 13,0038 mm ile paralel kaba işlemede gerçekleşmiştir. Ara kaba ve kontur kaba yöntemleri 11,7988 mm ve 11,8668 mm ile birbirlerine yakın sapma miktarına sahiptirler. En kötü sonucu veren J numunesinin paralel kaba işleme ile yapılması, en iyi sonucu veren E numunesinin ise kontur kaba yöntemi ile yapılması bu sonucu doğrulamaktadır.

Aynı şekilde finish işleme yöntemlerinde 10,5663 mm ile en kötü sonuç paralel tarama yönteminde gerçekleşmiştir. Paralel sabit z, eğriye paralel ve paralel doğrusal yöntemleri 8,8860 mm, 8,7509 mm ve 8,4662 mm toplam sapma miktarı ile birbirlerine yakın değerler vermektedir. En kötü sonucu veren H ve J numunelerinin paralel tarama ile işlenmesi, en iyi sonuçları veren E, F, L ve D numunelerinin diğer yöntemlerle yapılması bu sonucu doğrulamaktadır.

6. Deneysel çalışmalar sonucunda, eğimli yüzey üzerinde takım frezeleme pozisyonu arttıkça takım sehimi ve buna bağlı olarak form hatalarının arttığı görülmektedir [30]. En iyi sonucu veren E numunesi incelendiğinde özellikle yukarı yönlü eğimde bu durumun daha arttığı görülmektedir. İlerleme hızının artması ile takım sehimi artmaktadır. Bu sonuç literatür sonuçları [31] ile örtüşmüştür.

Yukarıda serbest şekilli yüzeylerin işlenmesinde farklı takım yollarının form hatalarına etkileri deneysel olarak incelendi. Bu form hatalarını azaltmak amacıyla CNC freze tezgahında kontrol sisteminin özelliklerinden faydalanılarak form hatalarının yoğun olduğu bölgelerde ilerlemenin azaltılması ile form hatalarının azaltılması hedeflendi. İlerlemenin azaltılmasının sebebi literatürde form hatalarının en önemli etkenlerinden birinin ilerleme olarak bahsedilmesidir [30]. Bu durum göz önüne alınarak form hatalarının etkin olduğu bölgelerde ilerleme değeri %10 azaltılarak form hatalarının azaltılması sağlandı. İlerlemenin azalma miktarının belirlenmesinde işleme zamanının artışı temel alındı.

Bu işlemin kararlılığını göstermek amacıyla form hatalarının en az gerçekleştiği E numunesinde uygulandı. Şekil 5.2’de verilen E numunesine ait görselde, bu numunedeki form hatalarının en yüksek olduğu bölgeler görülmektedir. Bu bölgelerde ilerleme %10 azaltılarak form hataları %17 azaltılmıştır. Buna karşılık işleme zamanı ise %8 uzamıştır.



Şekil 5.2. E numunesinde form hatası en yüksek olan bölgeler

Form hatasının en az olduğu E numunesinin ilerleme hızı %10 azaltılarak işlendikten sonraki 3B tarama sonuçları ve önceki sonuçlar çizelge 5.17’de karşılaştırıldı. Sonuçlar iyileştirme yapılmadan önceki sapma değerleri ile karşılaştırıldığında, toplam sapma miktarının 2,0601 mm’den 1,7015 mm’ye düşerek yaklaşık %17 azaldığı görülmektedir.

Çizelge 5.17. İlerleme hızı %10 azaltılarak işlenen E numunesinin form hatalarının karşılaştırılması

BÖLGELER	İYİLEŞTİRME ÖNCESİ	İYİLEŞTİRME SONRASI	FARK (mm)	%FARK
	TOPLAM SAPMA MİKTARI (mm)	TOPLAM SAPMA MİKTARI (mm)		
1.BÖLGE	0,2275	0,1706	0,0569	25
2.BÖLGE	0,1828	0,1791	0,0037	2
3.BÖLGE	0,2559	0,1868	0,0691	27
4.BÖLGE	0,1646	0,1597	0,0049	3
5.BÖLGE	0,2228	0,1894	0,0334	15
6.BÖLGE	0,2322	0,2183	0,0139	6
7.BÖLGE	0,2606	0,1824	0,0782	30
8.BÖLGE	0,2519	0,2267	0,0252	10
9.BÖLGE	0,2618	0,1885	0,0733	28
TOPLAM	2,0601	1,7012	0,3589	17

Çizelge 5.17’de görüldüğü üzere özellikle Bölüm 5.5’de 4.maddede verilen E numunesine ait en kötü 4 bölgede ilerleme hızının azaltılması, bu bölgelerde gerçekleşen toplam form hatalarının %25-30 aralığında azalmasına neden oldu. Literatürde ilerleme hızının artması sonucunda, kesici takımın önünde biriken talaş miktarının artacağı ve kesim bölgesinden kolayca uzaklaştırılamayacağı için form hatalarını artırdığından bahsetmektedir [29-30]. Bu durum özellikle eğimin yukarı yönde arttığı bölgelerde daha fazla görülmektedir. İlerleme hızı %10 azaltılmadan önce 3B tarama sonuçlarına göre elde ettiğimiz verilerde, form hatasının en çok olduğu bölgelerin kesici takımın tırmandığı ve iniş yaptığı yerlerde olması ve %10 ilerleme hızının azaltılması sonucu yine bu bölgelerde form hatalarında %25-30 aralığında azalma olması bu durumu doğrulamaktadır. Ayrıca kesici takımın özellikle eğimin tırmanma noktalarında temas yüzeyinin artması sonucu, kesme kuvvetlerinin artması ileri talaş birikmesine neden olmaktadır. İlerleme hızının %10 azaltılması bu durumun etkisini azaltarak form hatalarının azalmasını sağlamıştır.

6. GENEL SONUÇLAR

Bu çalışmada, Al 7075 alaşım kullanılarak serbest şekilli yüzeyin farklı takım yolları ile imalatında form hatalarının etkileri deneysel olarak incelendi. Ek olarak bu çalışmada, form hatalarının yoğun olduğu bölgelerde ilerlemenin azaltılmasının form hatalarına etkisi araştırıldı.

Yapılan deneyler sonucunda aşağıdaki sonuçlar elde edildi;

- Ara kaba işlemede, toplam sapma miktarına göre en iyi sonucu veren takım yolları, birbirlerinden çok az farkla ayrılan ara kaba ve kontur kaba olarak gerçekleşti.
- Ara kaba işlemede, işlem süresine göre en iyi sonucu veren takım yolu ara kaba olarak gerçekleşti.
- Finish işlemede, toplam sapma miktarına göre en iyi takım yolu birbirlerinden çok az farkla ayrılan paralel doğrusal ve eğriye paralel olarak gerçekleşti.
- Finish işlemede, işlem süresine göre en iyi takım yolu, paralel sabit z olarak gerçekleşti.
- Zıt yönlü frezelemede takım form hatası arttı. Eş yönlü işlemede ise azaldı.
- Yüzey form hatalarının ara kaba yöntemlerindeki toplam değerleri aşağıdaki şekilde gerçekleşti.

PARALEL KABA	13,0038 mm
KONTUR KABA	11,8668 mm
ARA KABA	11,7988 mm

- Yüzey form hatalarının finish işlemedeki toplam değerleri aşağıdaki şekilde gerçekleşti.

PARALEL TARAMA	10,5663 mm
PARALEL SABİT Z	8,8860 mm
EĞRİYE PARALEL	8,7509 mm
PARALEL DOĞRUSAL	8,4662 mm

- Form hatasının en az olduğu E numunesinde ilerlemenin %10 azaltılması ile form hataları %17 iyileştirildi.
- Yine form hatasının en az olduğu yüzeyde %17 başarı sağlanması, diğer numunelerde daha yüksek başarı oranları vereceği aşikârdır.

7. KAYNAKLAR

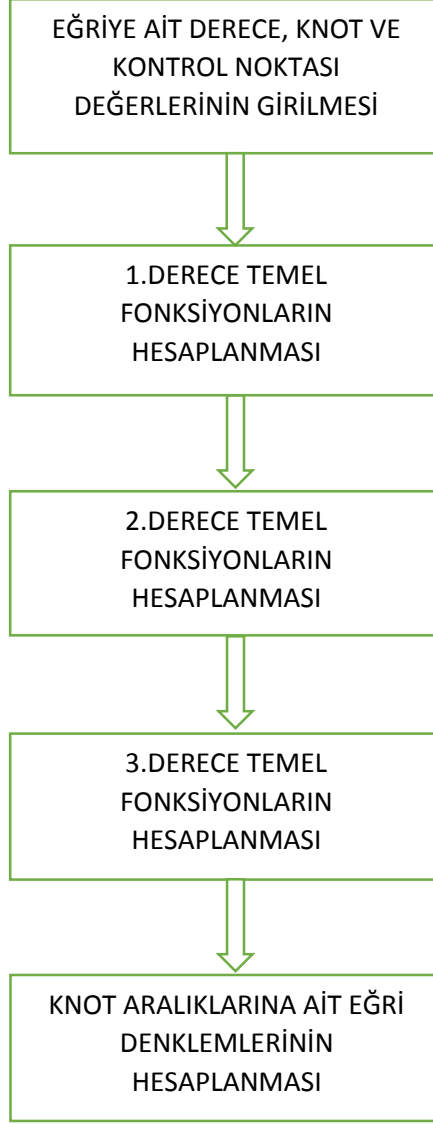
1. Haldar, B.K. (2010). *CNC tool path generation for free-form surface machining*, MS Thesis, Jadavpur University India.
2. Abbas, T.(2009), Automatic Tool Path Generation for Parametric Surfaces in Terms of Bezier Patches. *Eng.&Tech. Journal*, Vol.27, No.4.
3. Ülker, E. (2007). *Yapay Zeka Teknikleri Kullanılarak Yüzey Modelleme*. Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi, Konya.
4. Rockwood, A.P., Chambers, P. (1996). Introduction to Curves and Surfaces. A Multimedia Tutorial. Arizona,USA,92p
5. Farouki, R.T. (2014). Accuracy enhancements for CNC motion control through algorithms based on analytic path geometry. *SMART 2014*, Pontignano, September 28–October 1, Italy.
6. Choi, Y.K. (2004). *Tool path generation and 3D tolerance analysis for free-form surfaces*. Phd Thesis, Texas A&M University, USA.
7. Kurt, M., Hartomacıoğlu, S., Mutlu, B., Köklü, K. (2012). 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.
8. Chanthasopeephan, T., Desai, J.P., Lau, A.C.W. (2004). Study of soft tissue cutting forces and cutting speeds (pp:56-62). *Medicine Meets Virtual Reality 12*, IOS Press, Netherlands.
9. Kim, G.M., Cho, P.J., Chu, C.N. (1999). Cutting force prediction of sculptured surface ball-end milling using Z-map. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 40 (2000) 277–291.
10. Kaymakci, M., Lazoglu, I. (2008). Tool path selection strategies for complex sculptured surface machining (pp:12:1/119-132). *Machining Science and Technology*, Taylor&Francis, March 10, UK.
11. Dhokia, V. G., Kumar, S., Vichare, P., Newman, S. T., Allen, R.D. (2008). Surface roughness prediction model for CNC machining of polypropylene. *J. Engineering Manufacture*, Proc. IMechE Vol. 222 Part B.
12. Vakondios, D., Kyratsis, P., Yaldiz, S., Antoniadis, A. (2012). Influence of milling strategy on the surface roughness in ball end milling of the aluminum alloy Al7075-T6. *Measurement*, Vol 45, Issue 6.
13. Zebala, W., Matras, A., Kowalczyk, R. (2012). Optimization of TCF-5 and TJF composite free form surface milling. *Advances in Manufacturing Science Technology*. Vol 36, No 3.
14. Maekawa, T., Cho W., Patrikalakis, N.M. (1997). Computation of self intersections of sets of Bezier surface patches. *Journal of Mechanical Design*, Transactions of the ASME, 119(2):275-283.
15. Özel, C., Kılıçkap, E. (2006). Bezier yaklaşımı ile bir yüzeyin oluşturulması ve C programlama ile CAM kodlarının türetilmesi. *TİMAK*,26-28 Nisan, Balıkesir.
16. Andersson F. (2003). *Bezier and B-Spline Technology*. Metadata Version 3, 58 p.
17. Wang, J. (2008). *Parametrization and shape reconstruction techniques for doo-sabin subdivision surfaces*. MS Thesis, University of Kentucky, Lexington, USA.
18. Farin, G. (2002). *Curves and Surfaces for Computer Aided Geometric Design*. Academic Press, INC, USA.
19. Siddiqi, S.S., Younis, M. (2013). The m-Point Quaternary Approximating Subdivision Schemes. *American Journal of Computational Mathematics*, 3, 6-10.
20. Anonymous. (2014). Computer Aided Design-Nurbs Surface. Universite De Liege. Belgium.
21. Başer, T.A. (2012), Alüminyum alaşımları ve otomotiv endüstrisinde kullanımı. *Mühendis ve Makine*, cilt 53, sayı 635, s 51-58.

22. Demir, E. (2008). *Alüminyum alaşımlarda ısıtma işlem etkilerinin incelenmesi*. Yüksek lisans tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.
23. Yurdakul, M., Özbay, O., İç, Y.T. (2002). Havacılık alanında kullanılan alüminyum alaşımlarının seçimi. *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.* Cilt 17, No 2, 1-23.
24. Kvande, H. (1999). Environmental Improvements in Aluminum Production Technology, *Light Metal Age*, p.44.
25. Anonymous.(2014).<http://www.metalurji.kocaeli.edu.tr/files/DersNotlari/mmt419-06.pdf>
26. İpekoğlu, G., Çam, G. (2012). Farklı Al-Alaşımlı Levhaların (AA6061/AA7075) Sürtünme Karıştırma Kaynağına Temper Durumunun Etkisi. *TMMOB MMO Mühendis ve Makine Dergisi*, cilt 53, sayı 629, s. 40-47.
27. Williams, J.C., Starke, E.A. (2003). Progress in structural materials for aerospace systems. *Acta Materiala* 51, doi:10.1016/j.actamat.2003.08.023.
28. Akkurt, M., (2010). *Talaş Kaldırma Yöntemleri ve Takım Tezgâhları*, Seçkin Yayıncılık.
29. Şahin, Y., (2000). *Talaş Kaldırma Prensipleri Cilt 1-2*, Nobel Yayınevi.
30. Gök, A., Göloğlu, C., Demirci, H.İ. (2014). Dışbükey ve içbükey yüzeylerin küresel parmak frezelenmesinde takım sehimine bağlı form hatalarının belirlenmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, Cilt 29, No 2, Amasya
31. Bağcı, E. (2011). Monitoring analysis of MRR based feedrate optimization approach and effects of cutting conditions using acoustic sound pressure level in free form surface milling. *Scientific research end Essays*, Vol., 6(2), pp.256-277,18 January

8. EKLER

EK-1

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



EK-2

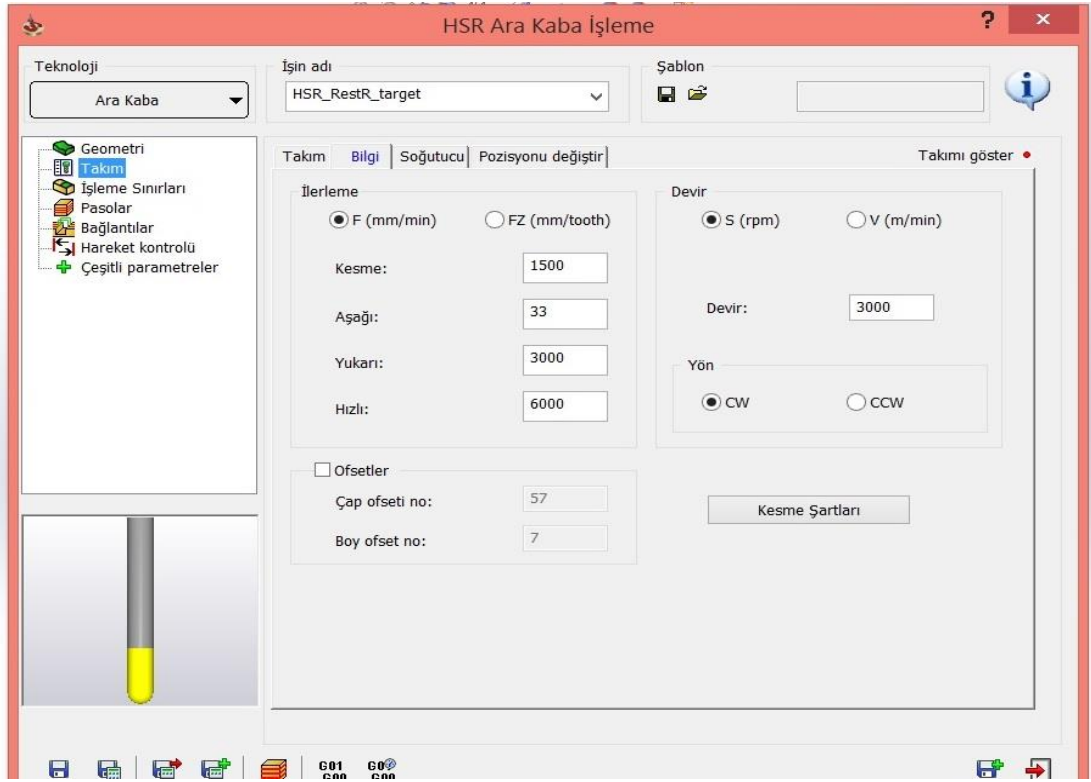
Takım Yolu Yöntemlerinin İşleme Parametreleri

The screenshot displays the 'HM Kaba İşleme' (Rough Machining) software interface. The window title is 'HM Kaba İşleme'. The 'Teknoloji' (Technology) dropdown is set to 'HM Kaba'. The 'İşin adı' (Job Name) is 'HSR_HMP_target'. The 'Şablon' (Template) field is empty. The 'Takım' (Tool) section is active, showing 'Bilgi' (Info), 'Soğutucu' (Coolant), and 'Pozisyonu değiştir' (Change Position) options. The 'İlerleme' (Feed) section has 'F (mm/min)' selected, with values: Kesme: 1300, Aşağı: 33, Yukarı: 2600, Hızlı: 6000. The 'Devir' (Spindle Speed) section has 'S (rpm)' selected, with a value of 2000. The 'Yön' (Direction) section has 'CW' selected. There are checkboxes for 'Ofsetler' (Offsets) with values: Çap ofseti no: 51, Boy ofseti no: 1. A 'Kesme Şartları' (Cutting Conditions) button is present. The bottom status bar shows 'G01 G00 G00'.

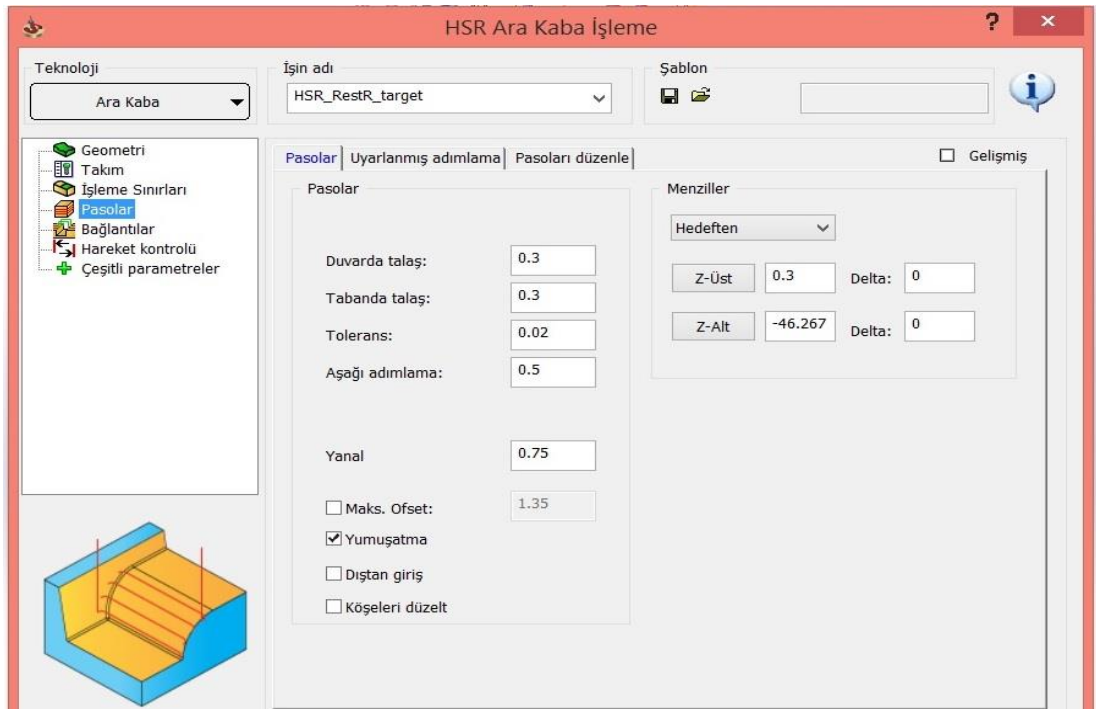
Şekil 8.1. HM kaba işleme parametreleri

The screenshot displays the 'HM Kaba İşleme' (Rough Machining) software interface, showing the 'Pasolar' (Finishing) section. The window title is 'HM Kaba İşleme'. The 'Teknoloji' (Technology) dropdown is set to 'HM Kaba'. The 'İşin adı' (Job Name) is 'HSR_HMP_target'. The 'Şablon' (Template) field is empty. The 'Pasolar' section is active, showing 'Aşağı adımlama' (Downward Machining) and 'Pasoları düzenle' (Adjust Finishes) options. The 'Pasolar' (Finishing) section has values: Duvarda talaş: 0.3, Tabanda talaş: 0.3, Tolerans: 0.02, Aşağı adımlama: 1. The 'Aşağı adımlama tipi' (Downward Machining Type) is 'Sabit' (Constant). There are checkboxes for 'Yana kayma' (Side Feed) with a value of 7.8, and '% Takım çapı' (Tool Diameter) with a value of 65. The 'Yana kayma tipi' (Side Feed Type) is 'HM spiral' (HM Spiral). There is a checked checkbox for 'Yumuşatma' (Softening). The 'İşleme Seviyeleri' (Finishing Levels) section has 'Hedefften' (Target) selected, with values: Z-Üst: 0.3, Delta: 0, Z-Alt: -46.267, Delta: 0. A 'Gelişmiş' (Advanced) checkbox is present. The bottom status bar shows 'G01 G00 G00'.

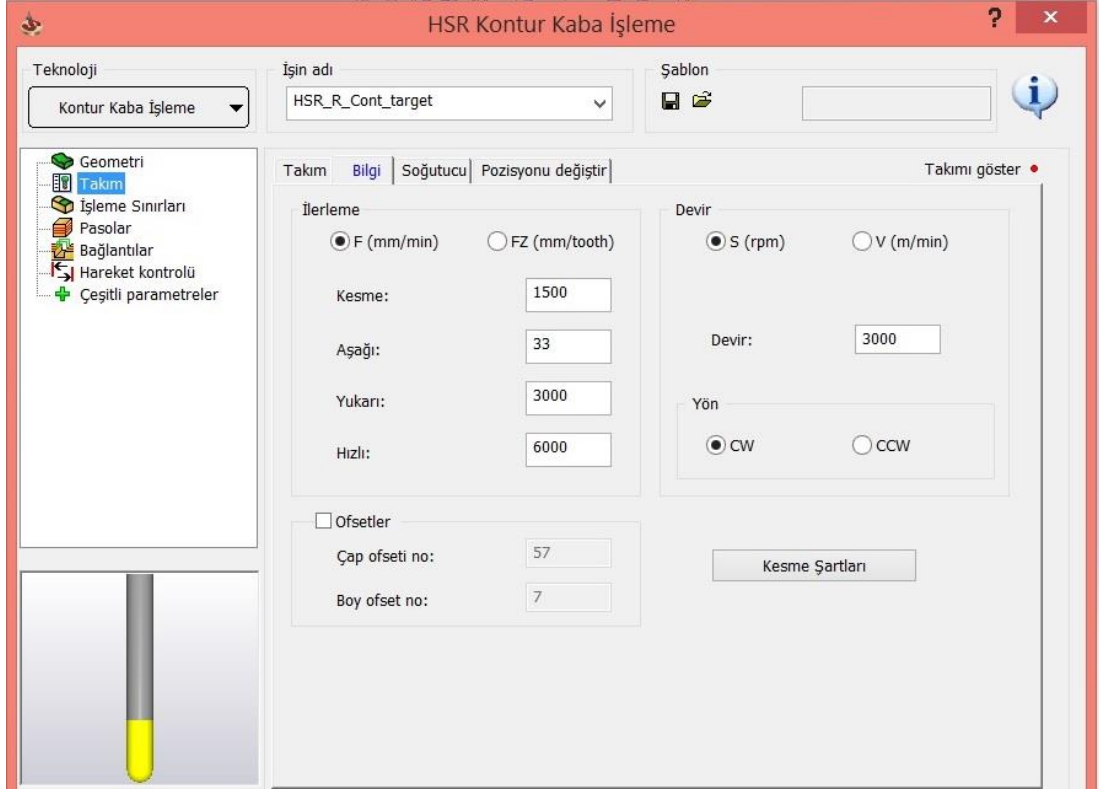
Şekil 8.2. HM kaba işleme pasolar



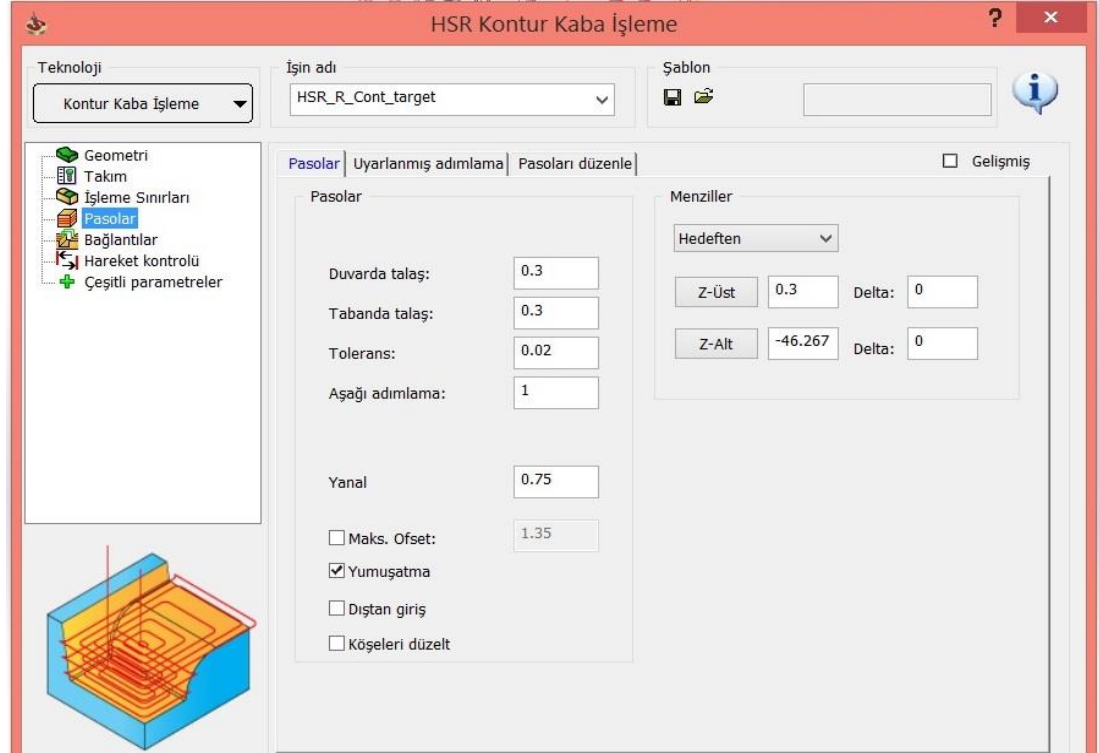
Şekil 8.3. Ara Kaba işleme parametreleri



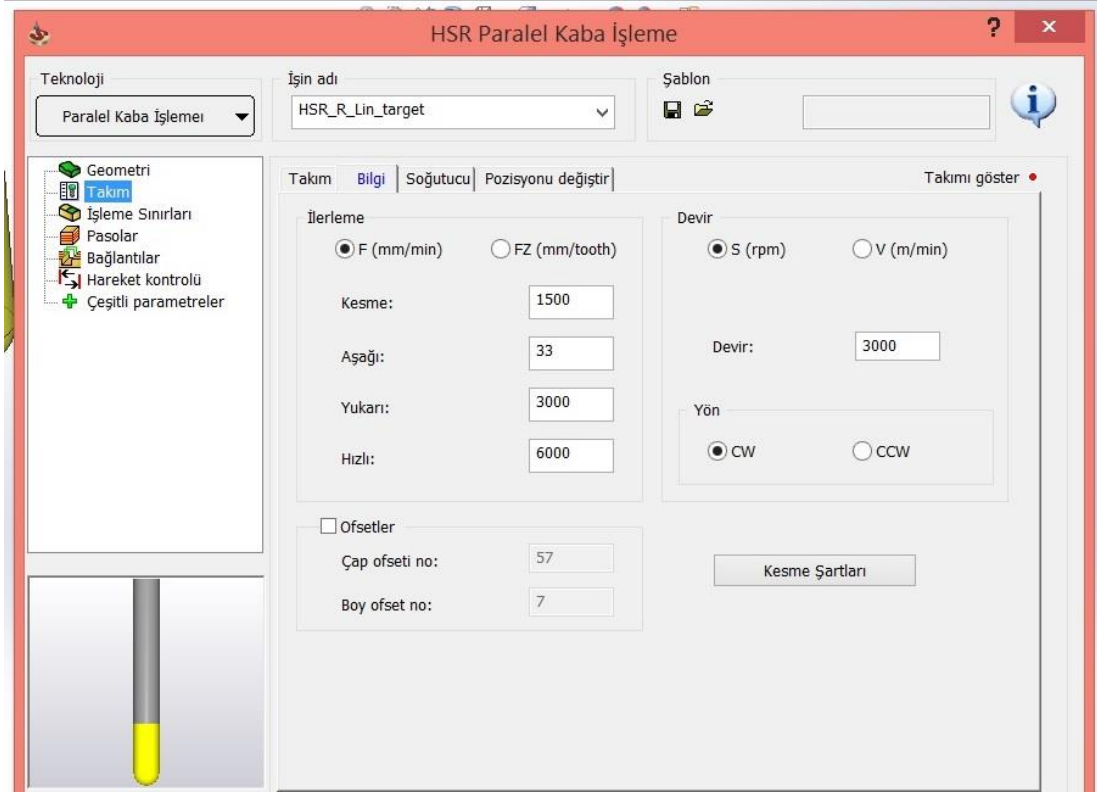
Şekil 8.4. Ara Kaba işleme pasolar



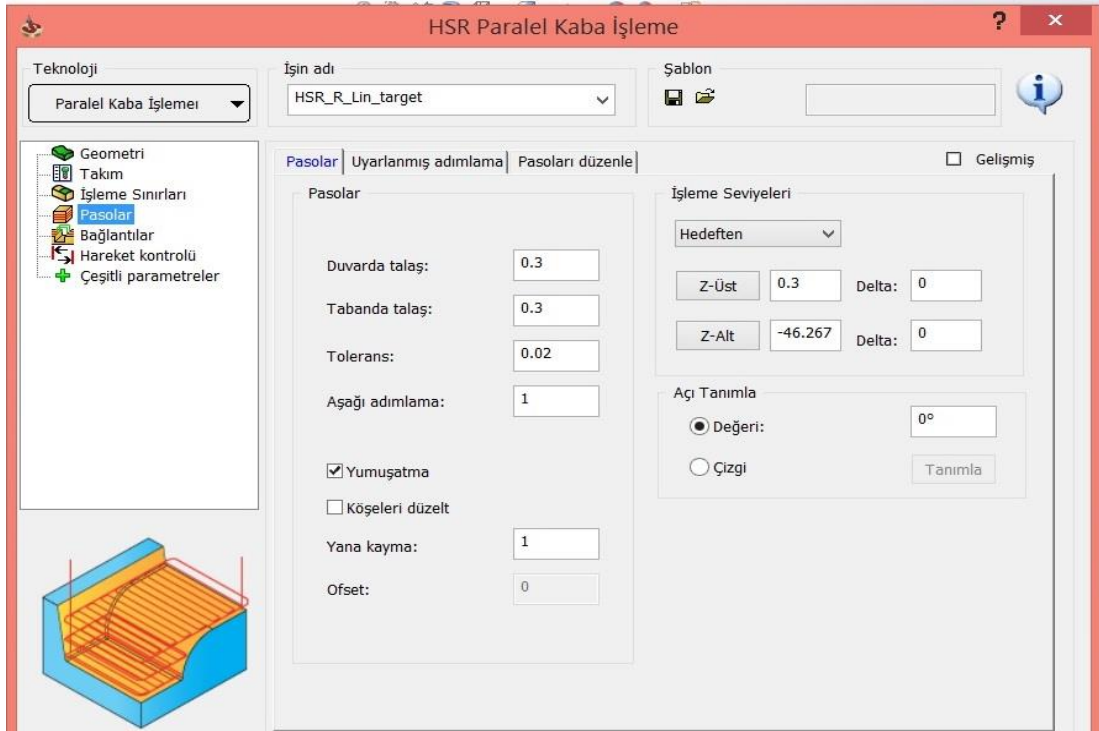
Şekil 8.5. Kontur Kaba işleme parametreleri



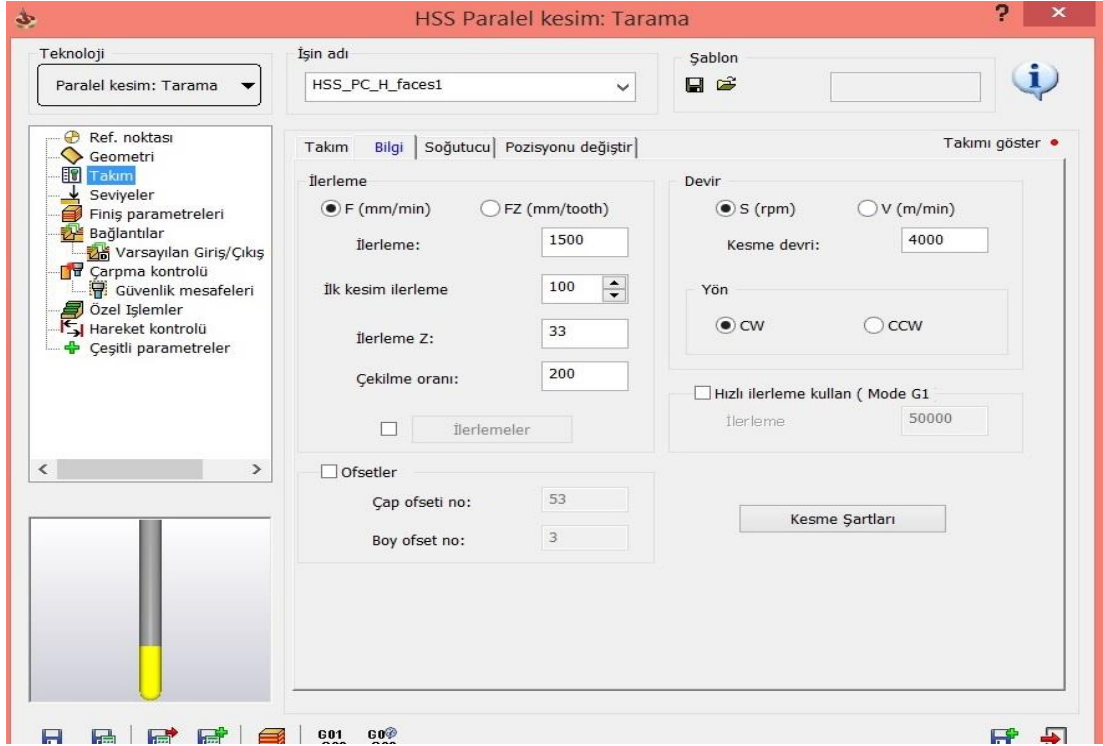
Şekil 8.6. Kontur Kaba işleme pasolar



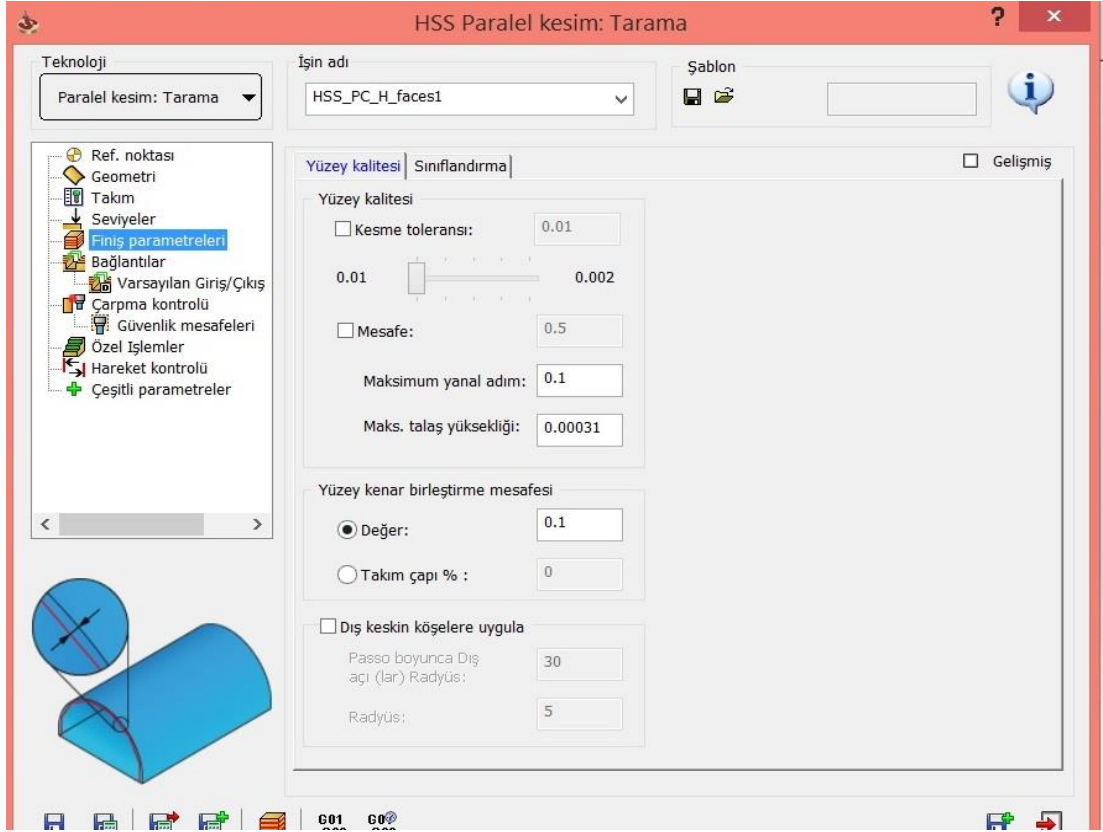
Şekil 8.7. Paralel Kaba işleme parametreleri



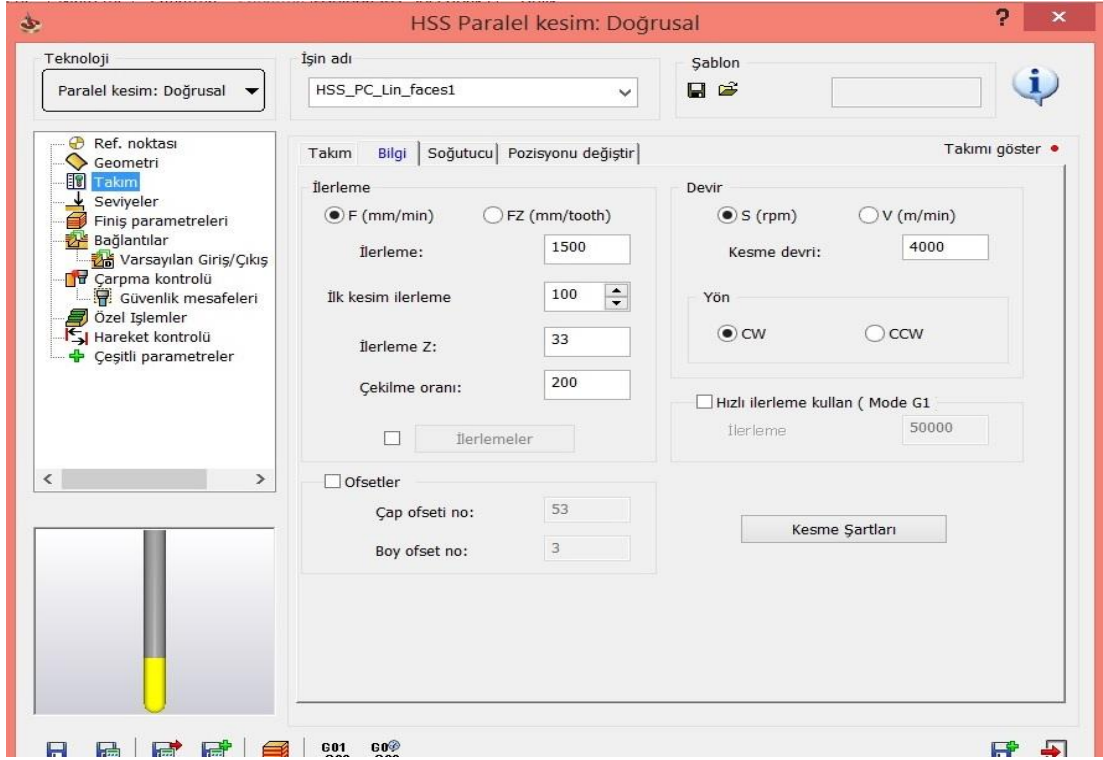
Şekil 8.8. Paralel Kaba işleme pasolar



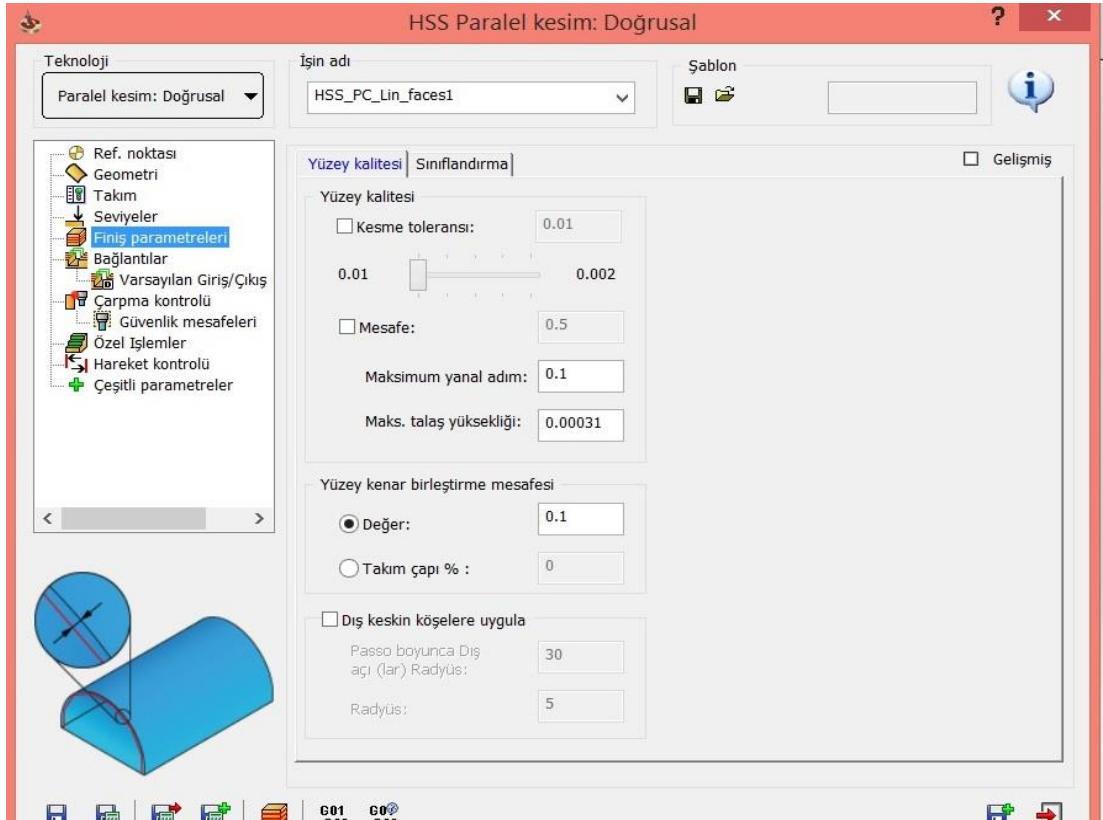
Şekil 8.9. Paralel Kesim Tarama işleme parametreleri



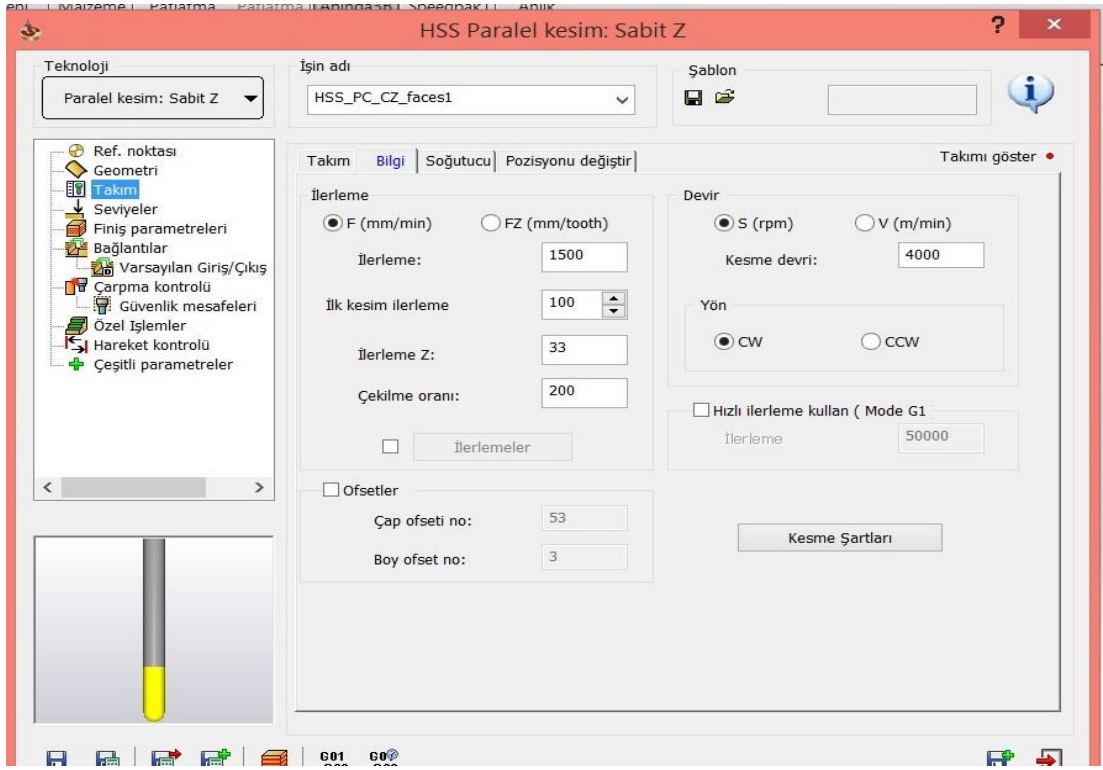
Şekil 8.10. Paralel Kesim Tarama yüzey kalitesi parametreleri



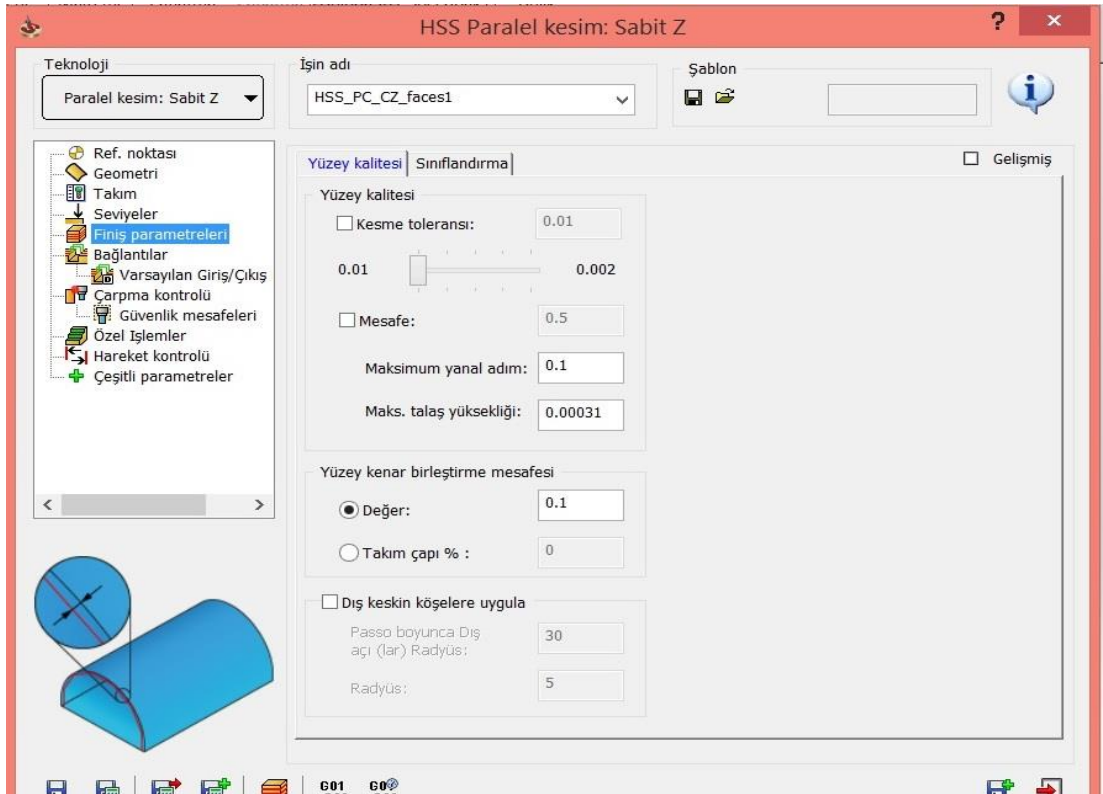
Şekil 8.11. Paralel Kesim Tarama işleme parametreleri



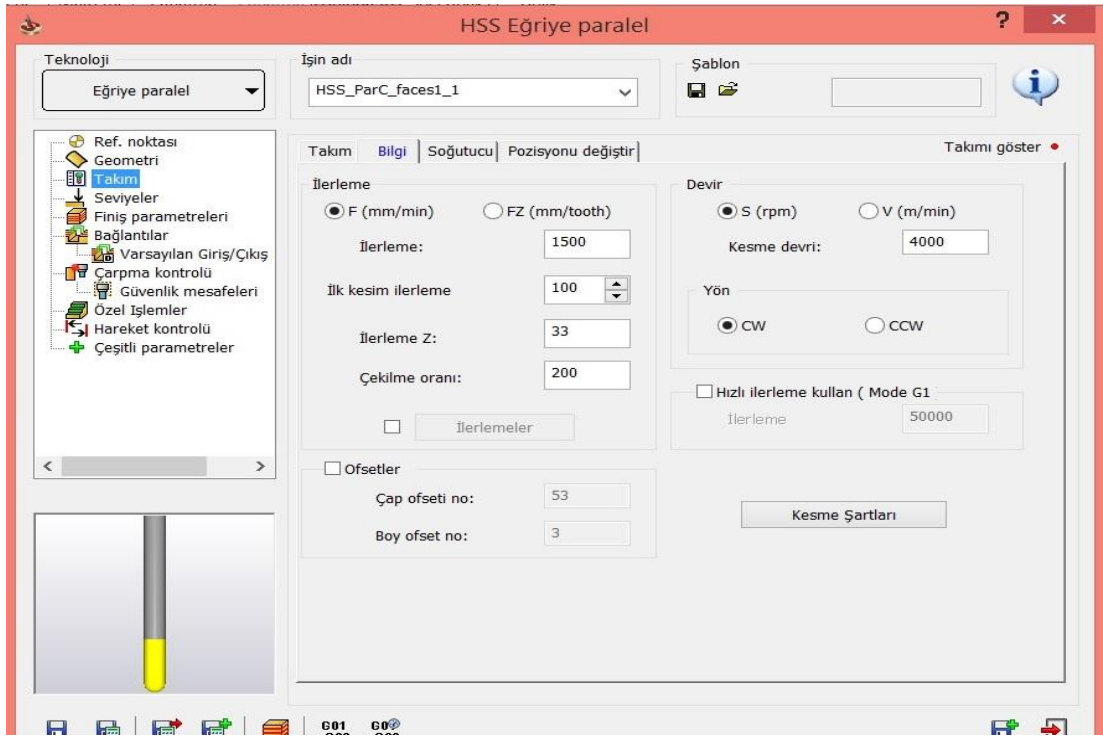
Şekil 8.12. Paralel Kesim Tarama yüzey kalitesi parametreleri



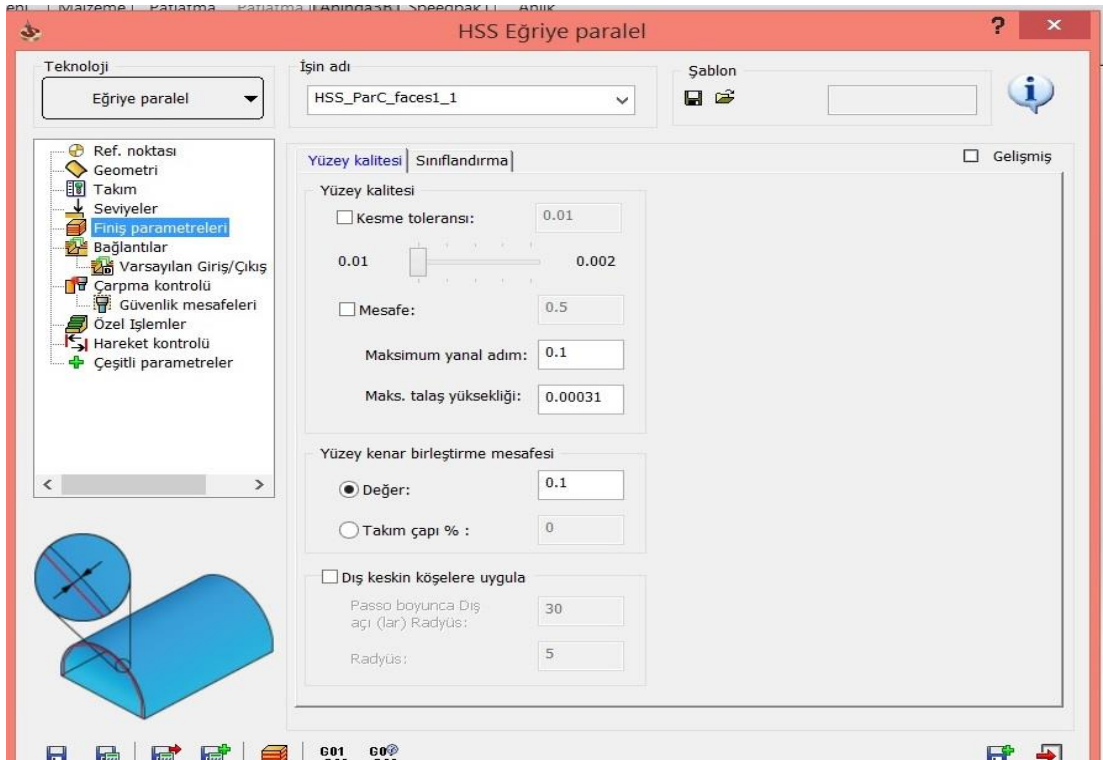
Şekil 8.13. Paralel Kesim Sabit Z işleme parametreleri



Şekil 8.14. Paralel Kesim Sabit Z yüzey kalitesi parametreleri



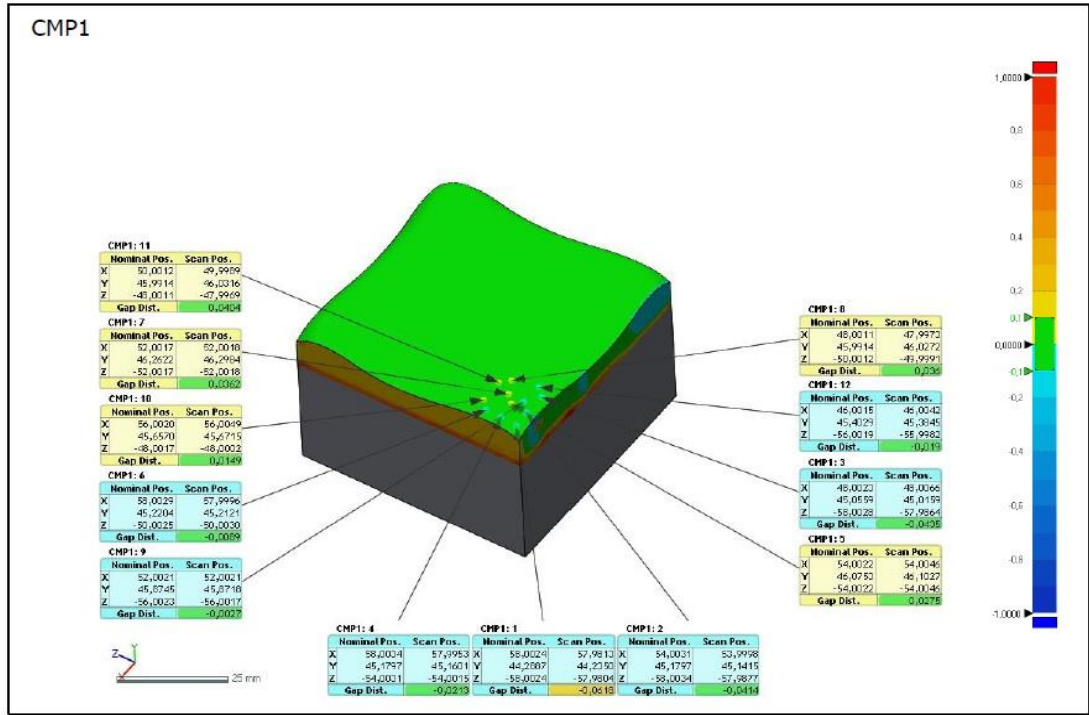
Şekil 8.15. Eğriye Paralel işleme parametreleri



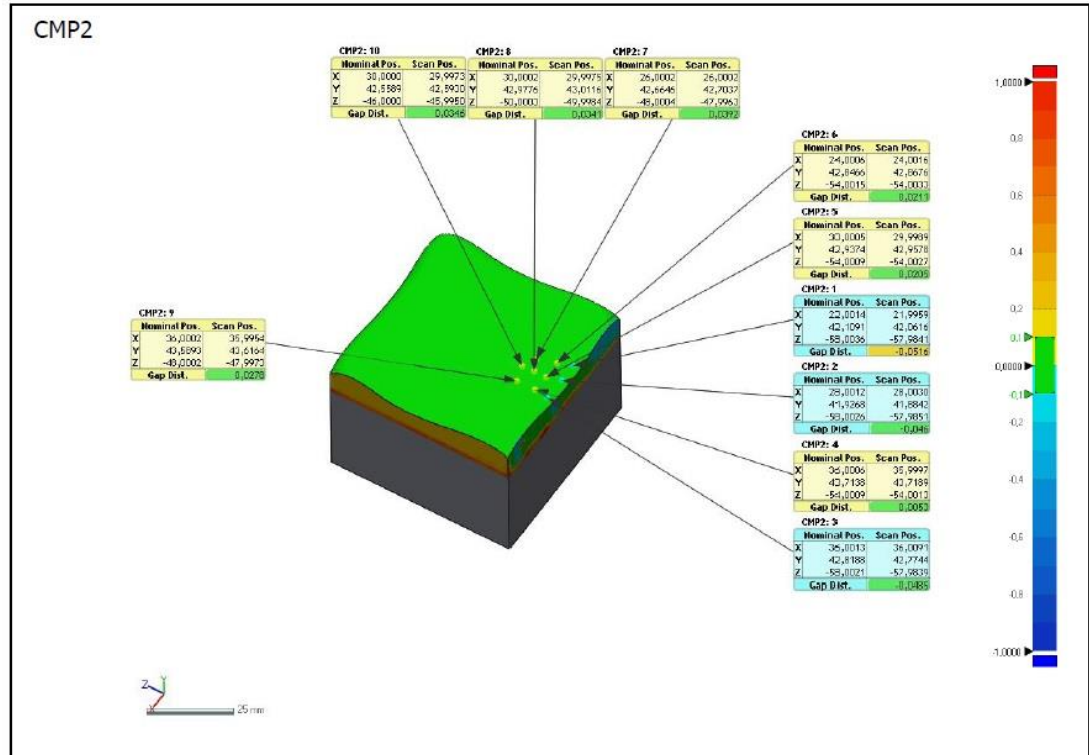
Şekil 8.16. Eğriye Paralel yüzey kalitesi parametreleri

EK-3

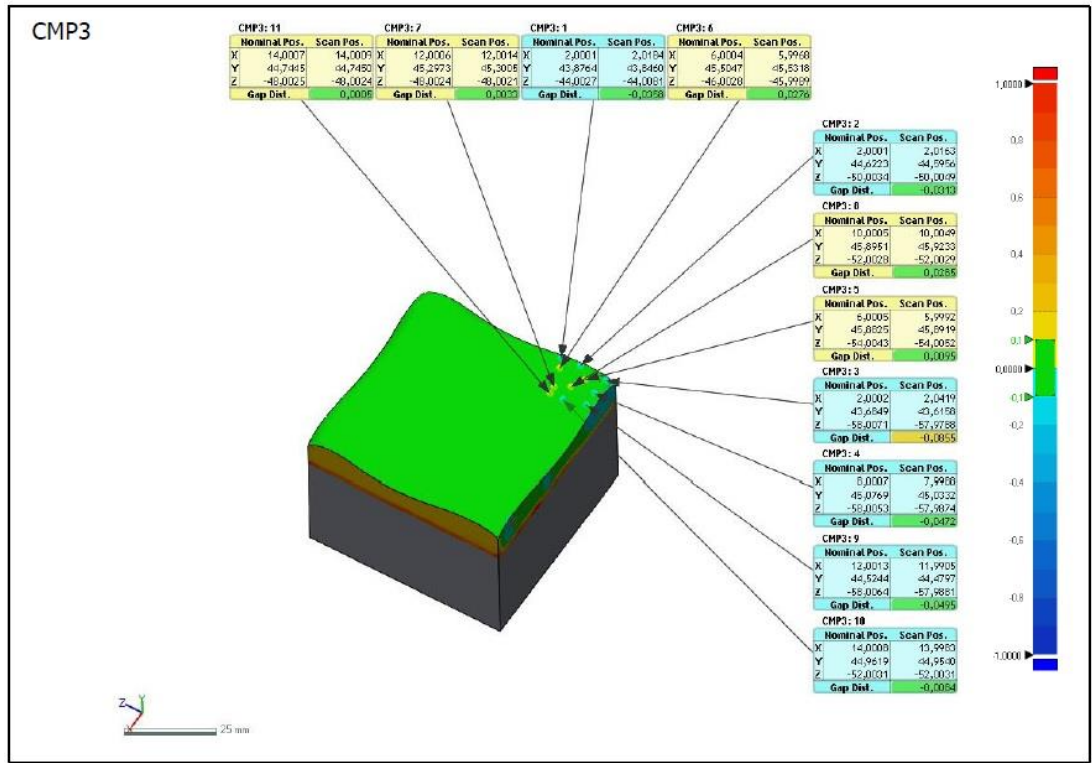
A numunesine ait bölgesel tarama sonuçları



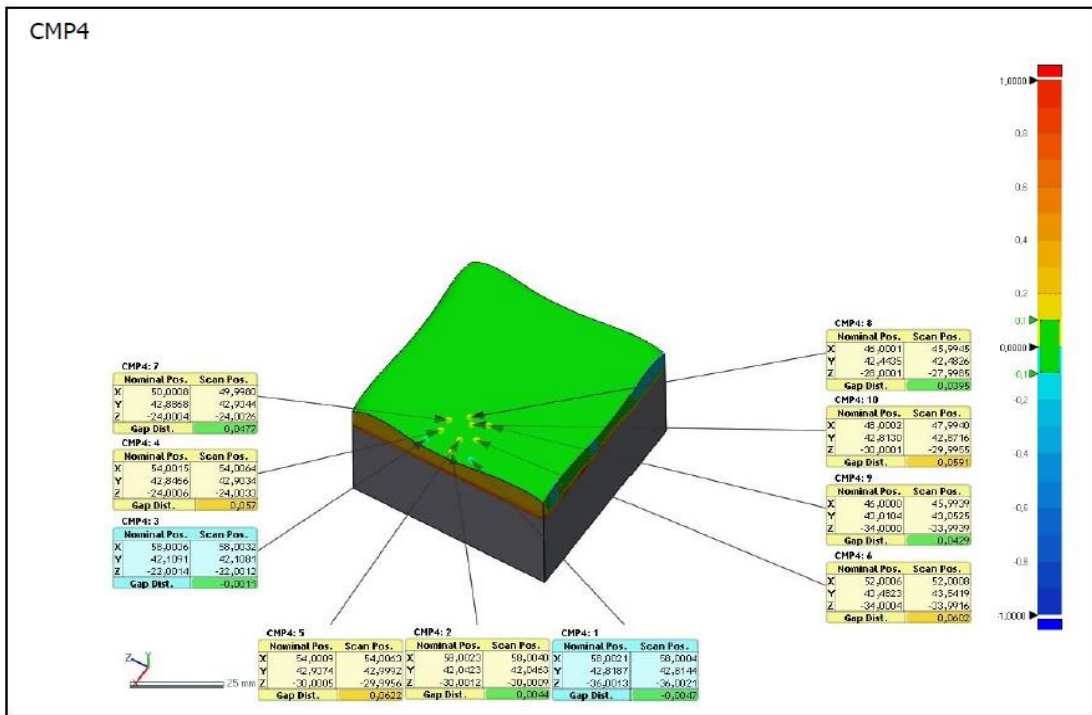
Şekil 8.17. A numunesi 1. bölge tarama sonuçları



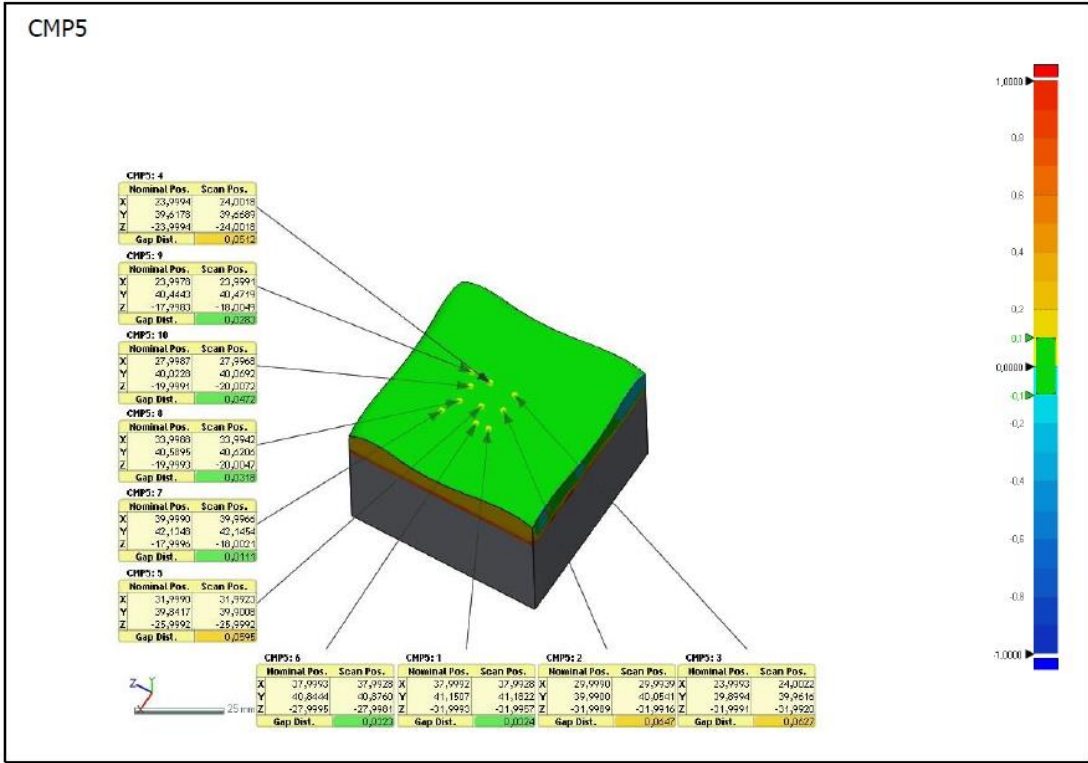
Şekil 8.18. A numunesi 2. Bölge tarama sonuçları



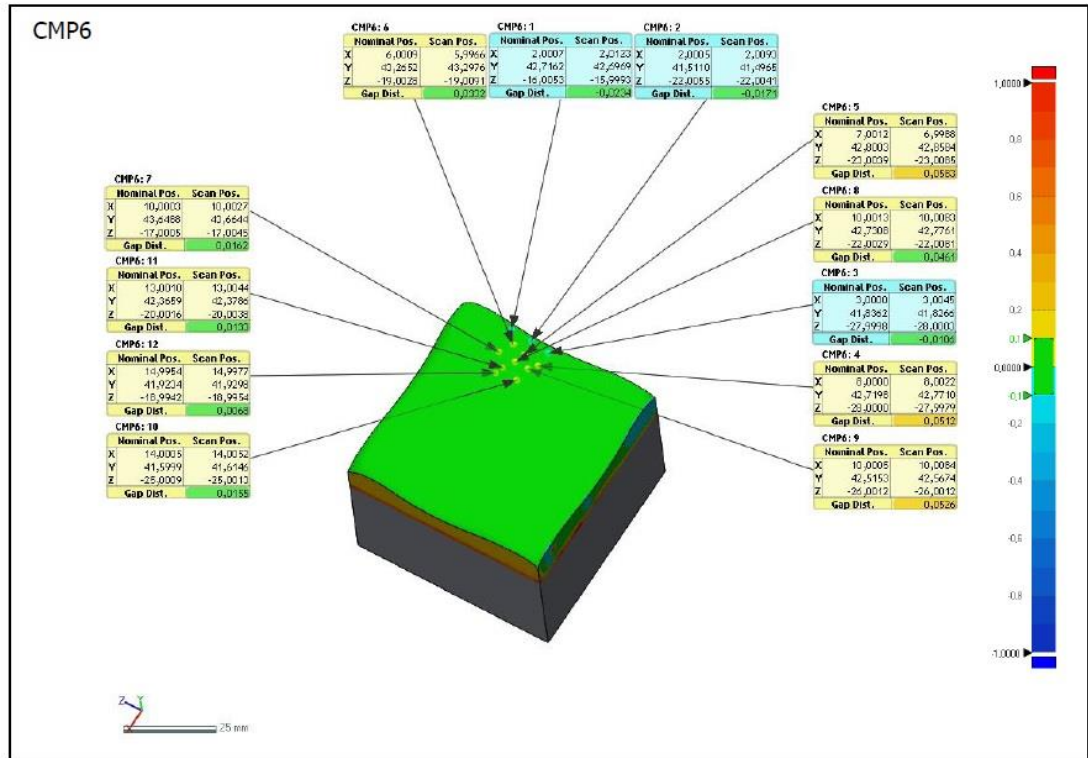
Şekil 8.19. A numunesi 3. Bölge tarama sonuçları



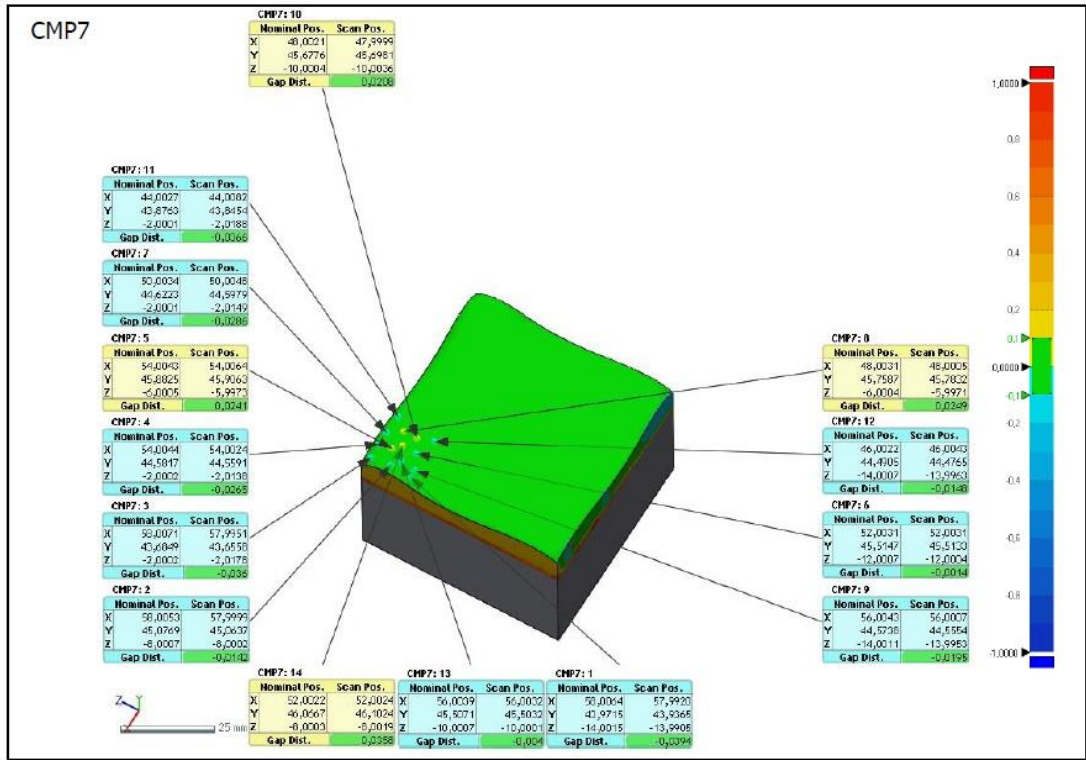
Şekil 8.20. A numunesi 4. Bölge tarama sonuçları



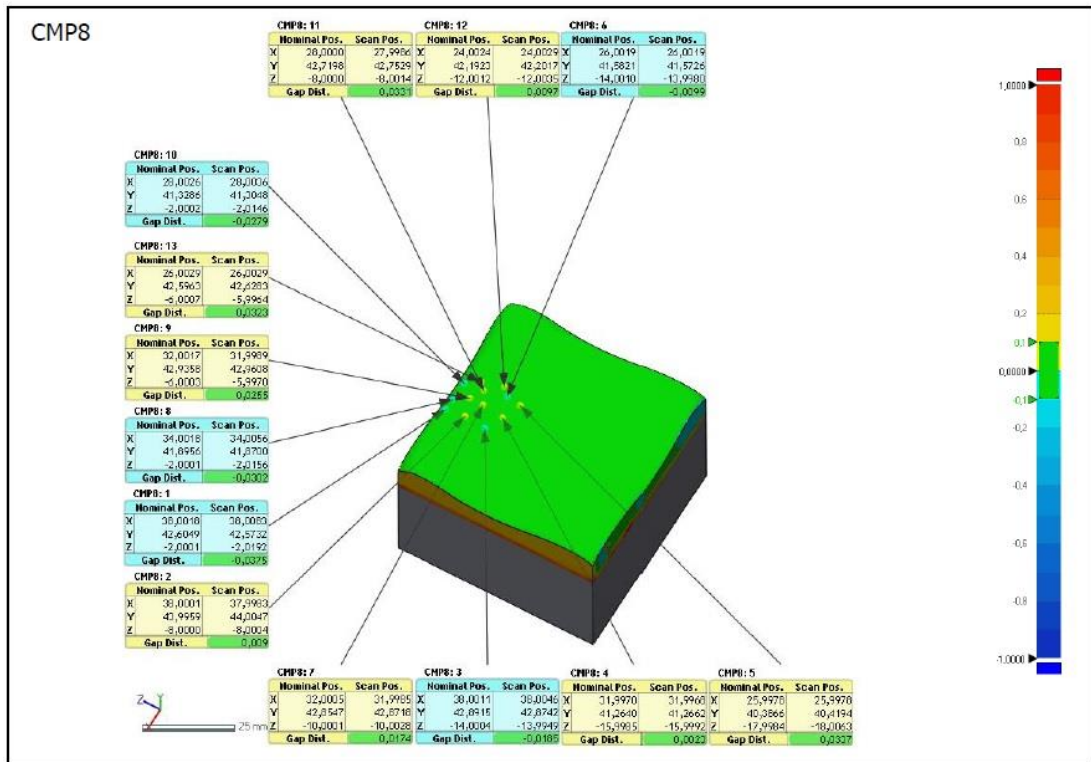
Şekil 8.21. A numunesi 5. Bölge tarama sonuçları



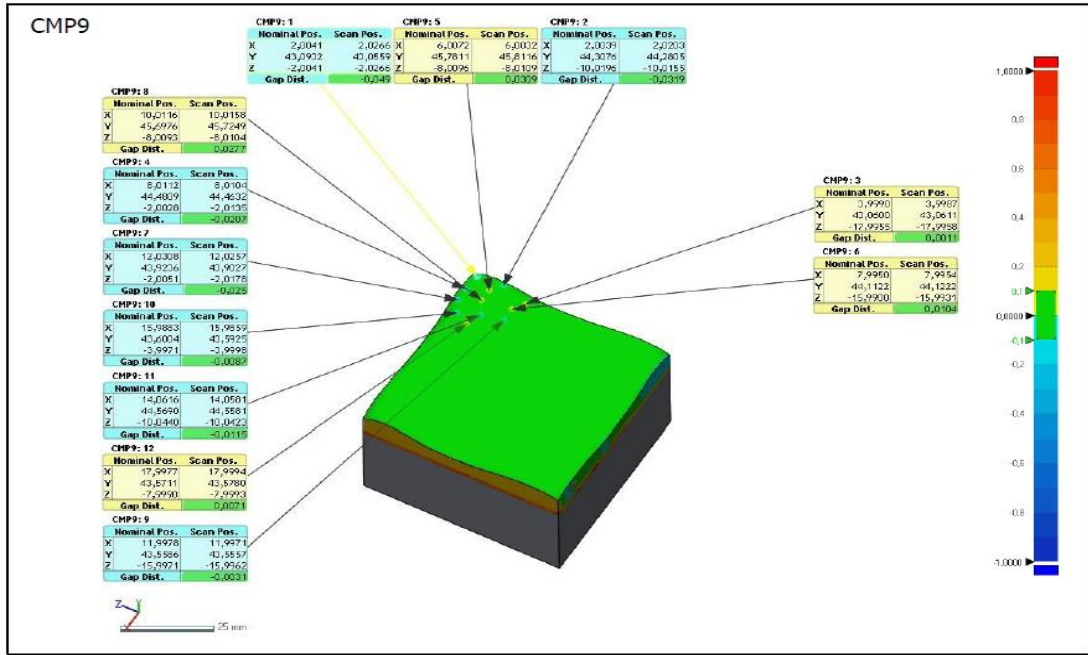
Şekil 8.22. A numunesi 6. Bölge tarama sonuçları



Şekil 8.23 A numunesi 7. Bölge tarama sonuçları



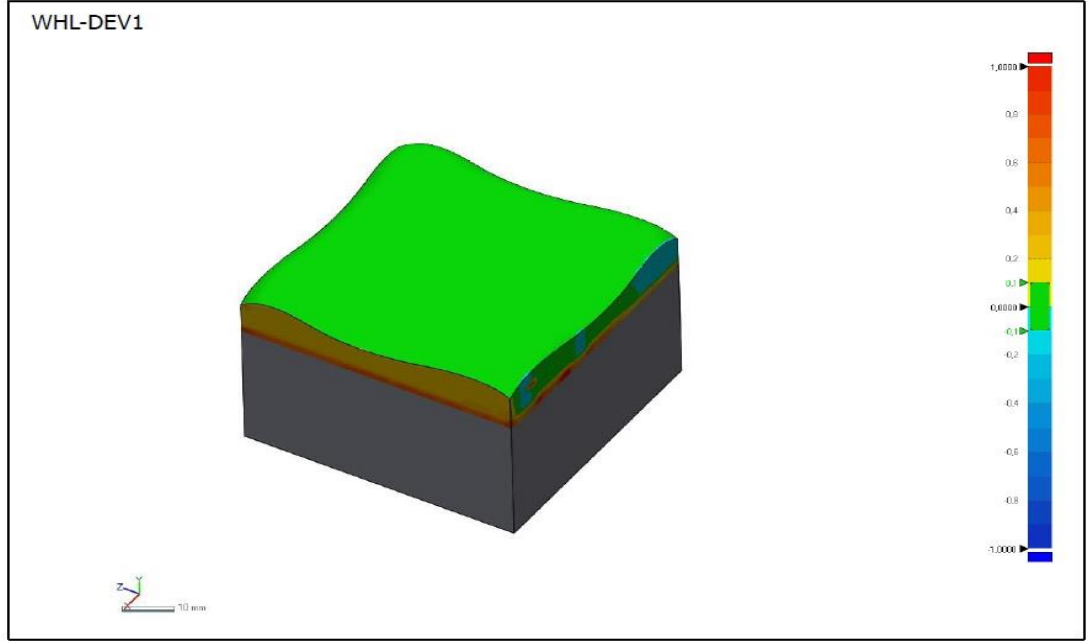
Şekil 8.24. A numunesi 8. Bölge tarama sonuçları



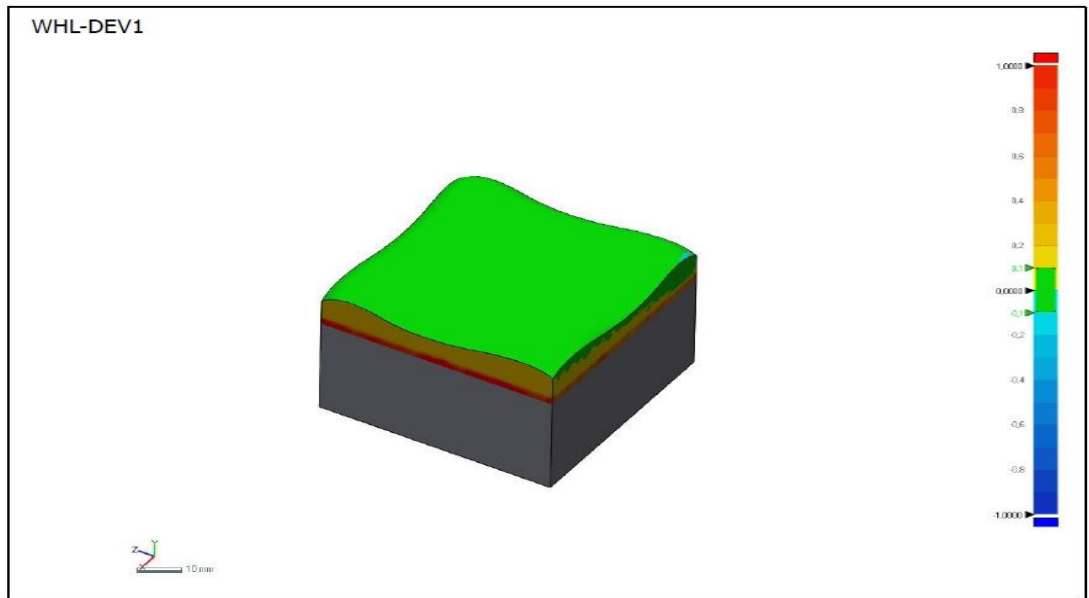
Şekil 8.25. A numunesi 9. Bölge tarama sonuçları

EK-4

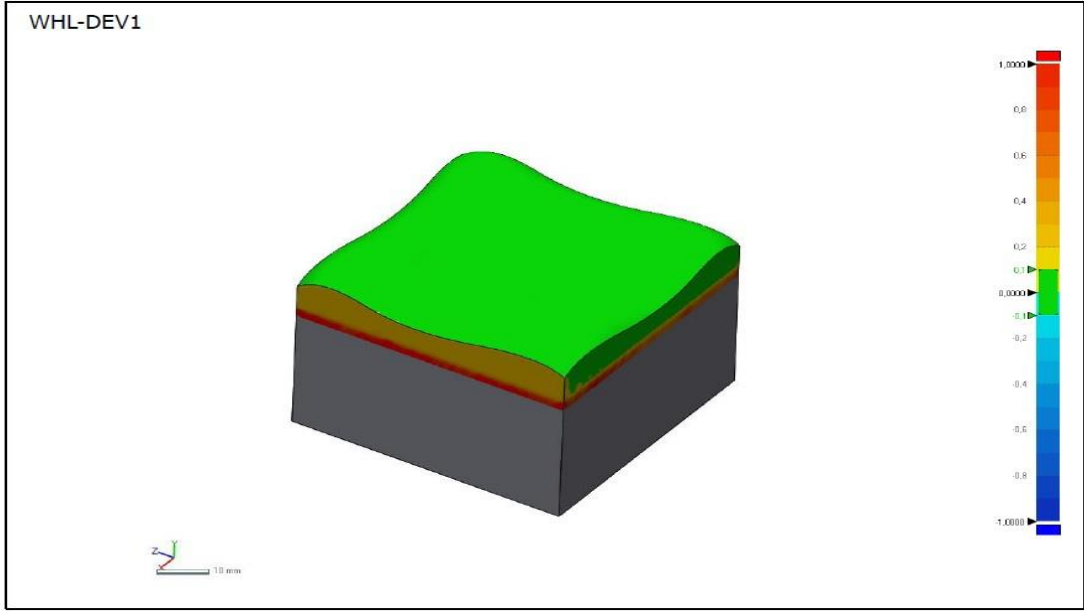
Numunelere ait 3B tarama görselleri



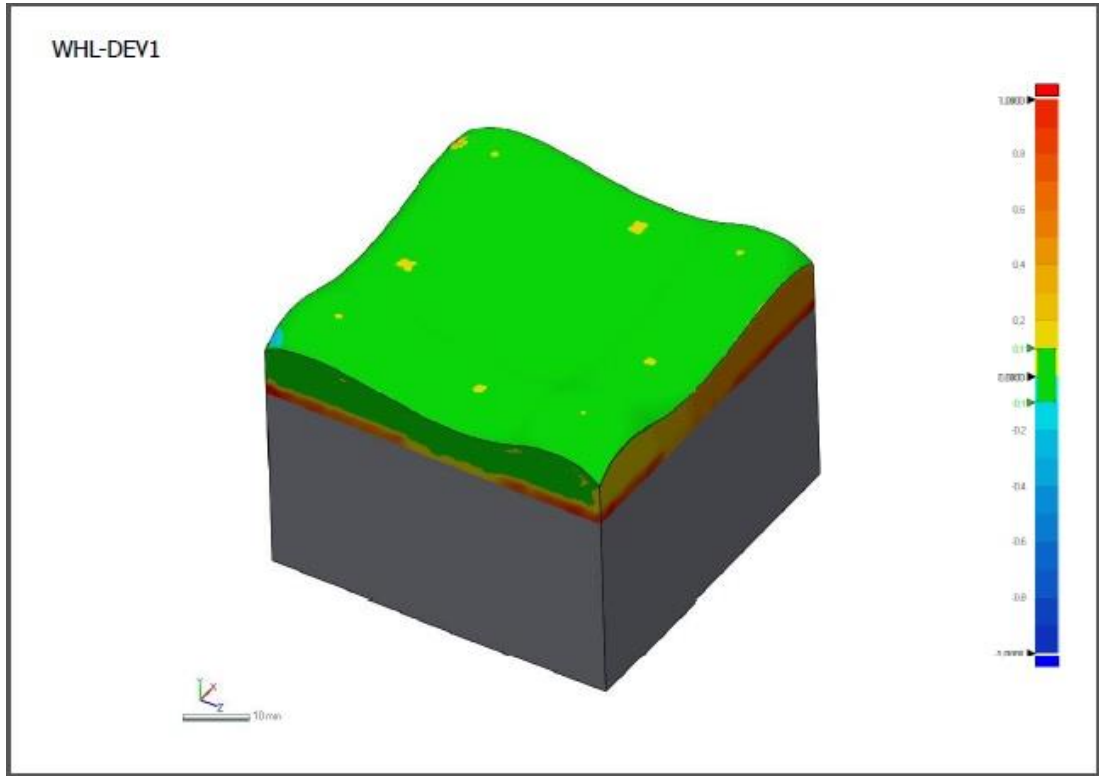
Şekil 8.26. A numunesine ait 3B tarama görseli



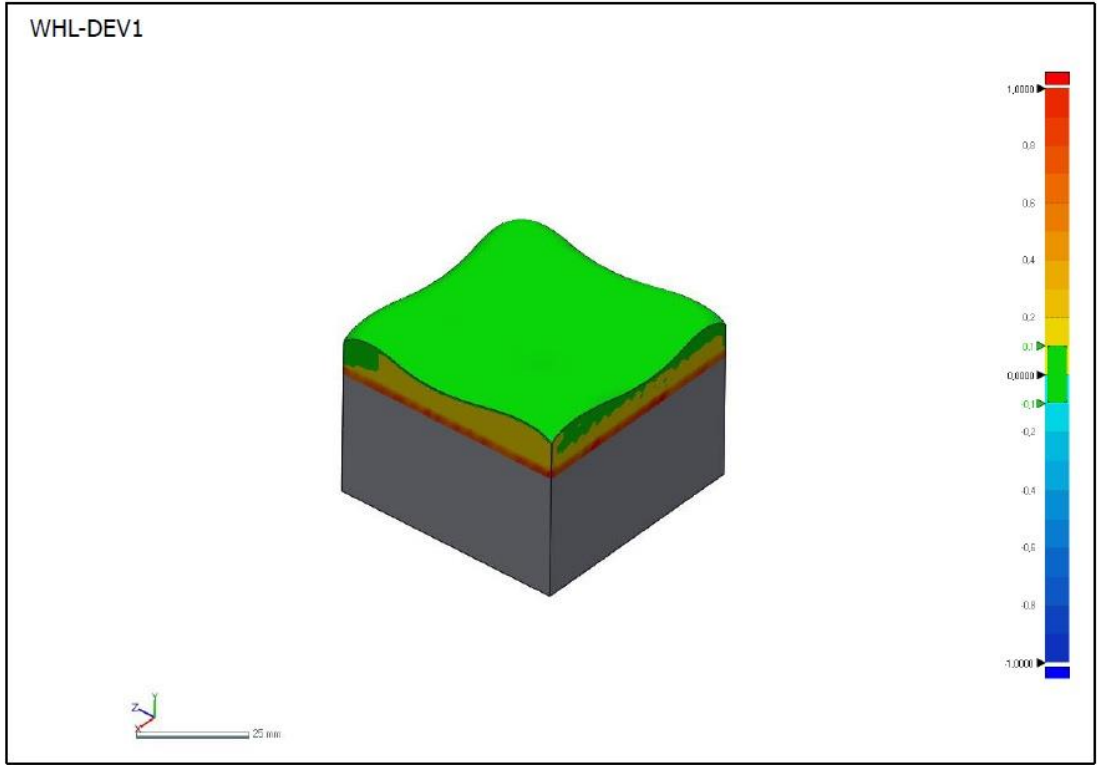
Şekil 8.27. B numunesine ait 3B tarama görseli



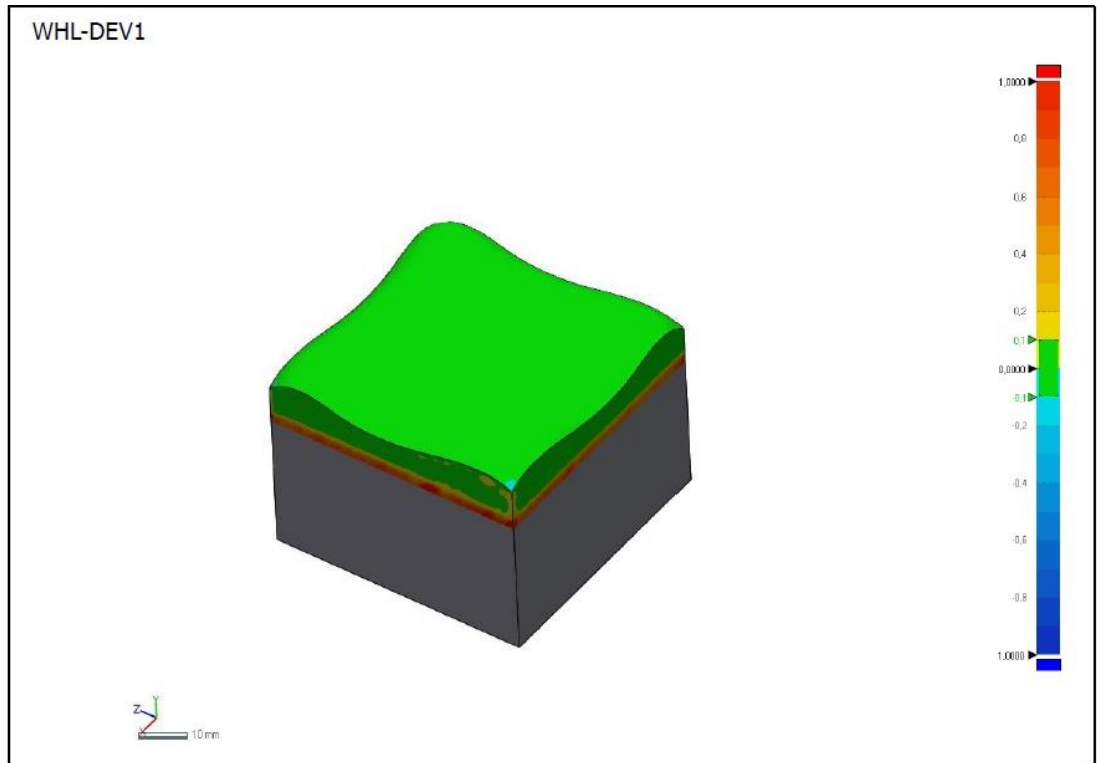
Şekil 8.28. C numunesine ait 3B tarama görseli



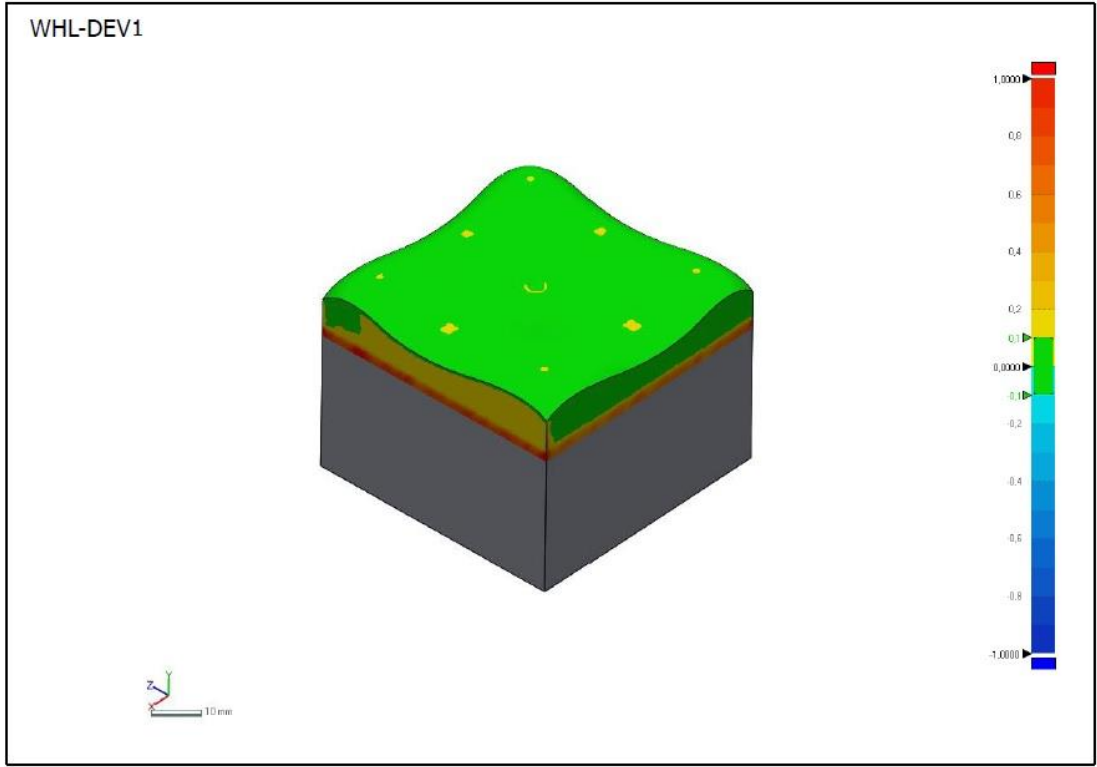
Şekil 8.29. D numunesine ait 3B tarama görseli



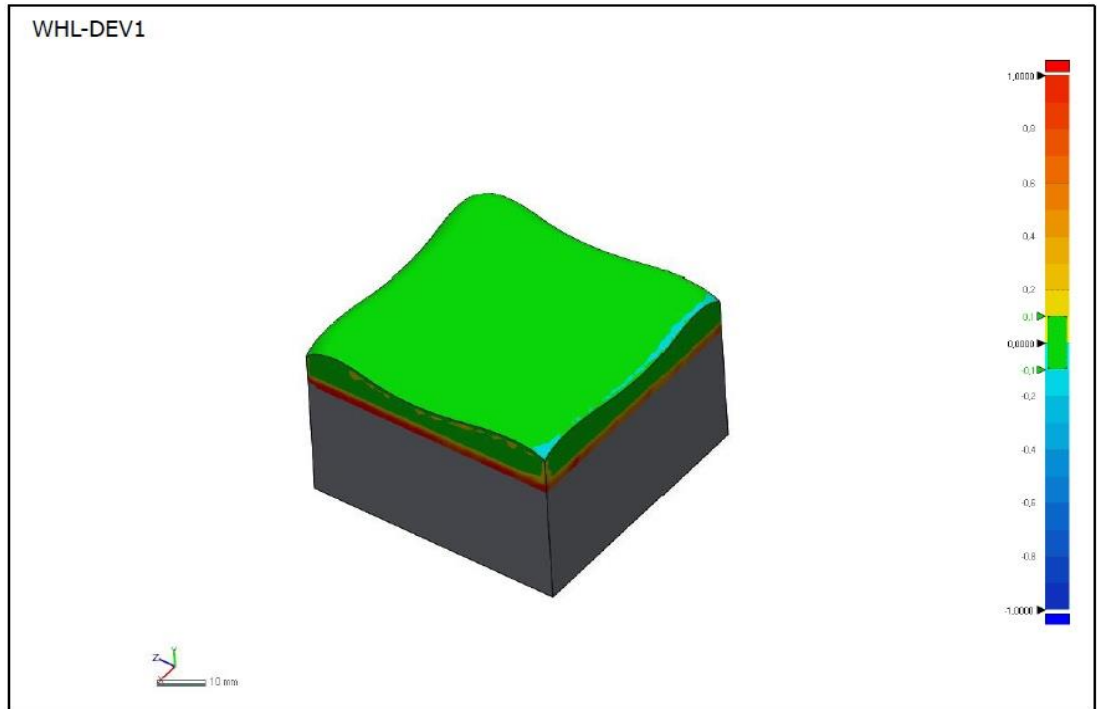
Şekil 8.30. E numunesine ait 3B tarama görseli



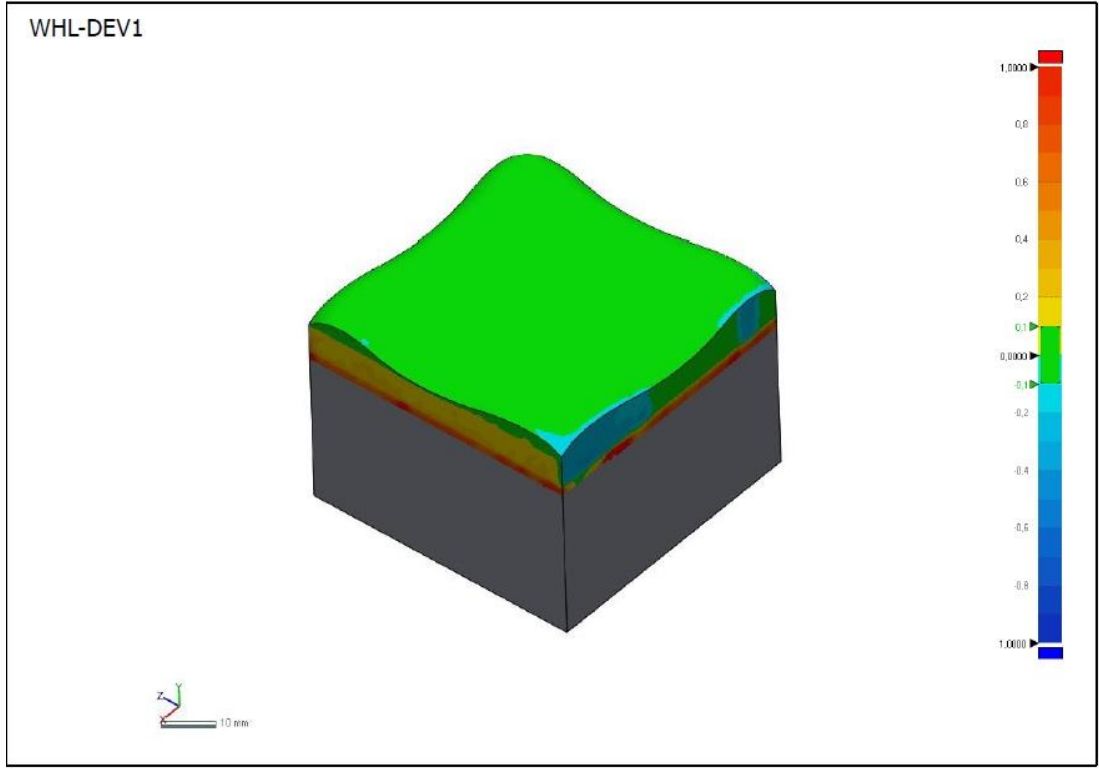
Şekil 8.31. F numunesine ait 3B tarama görseli



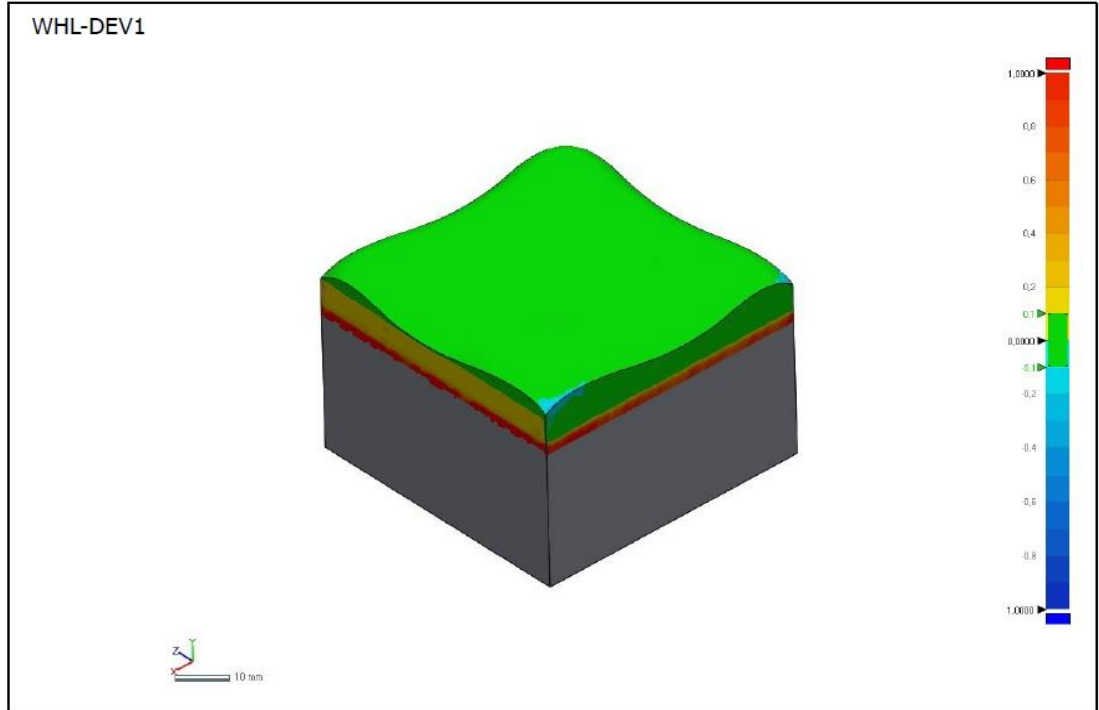
Şekil 8.32. G numunesine ait 3B tarama görseli



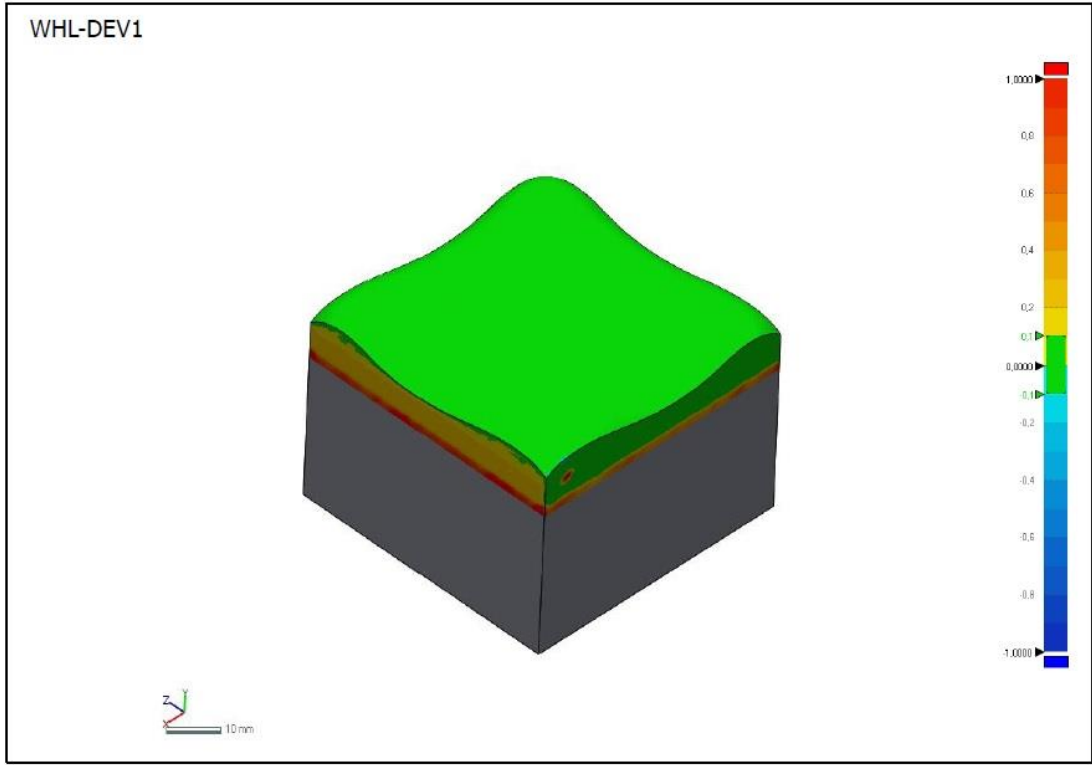
Şekil 8.33. H numunesine ait 3B tarama görseli



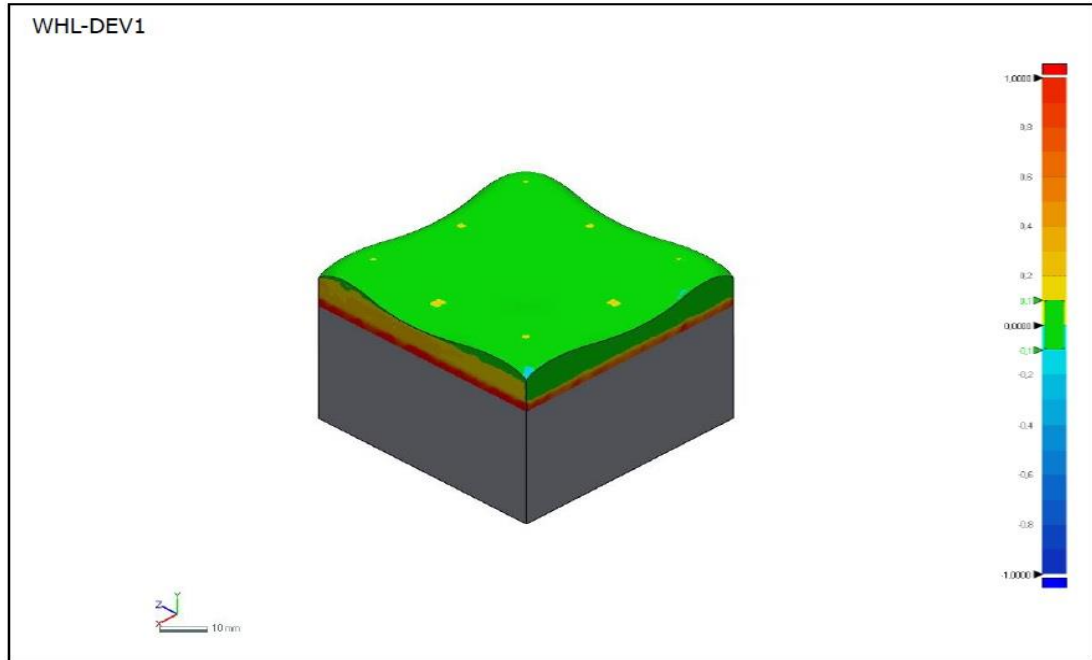
Şekil 8.34. I numunesine ait 3B tarama görseli



Şekil 8.35. J numunesine ait 3B tarama görseli



Şekil 8.36. K numunesine ait 3B tarama görseli

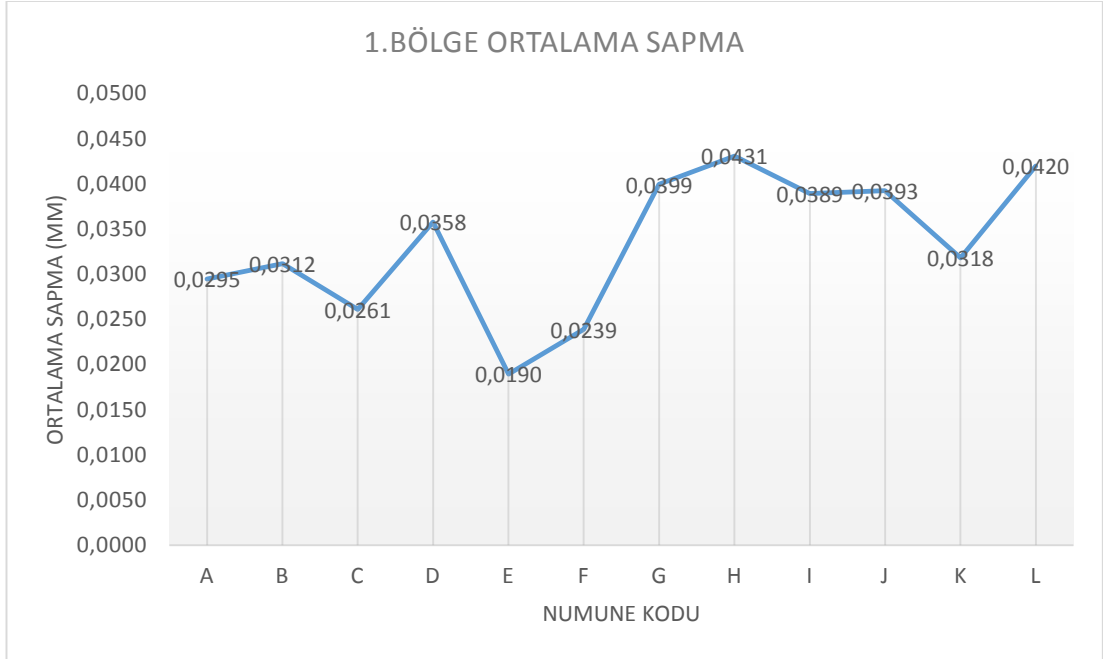


Şekil 8.37. L numunesine ait 3B tarama görseli

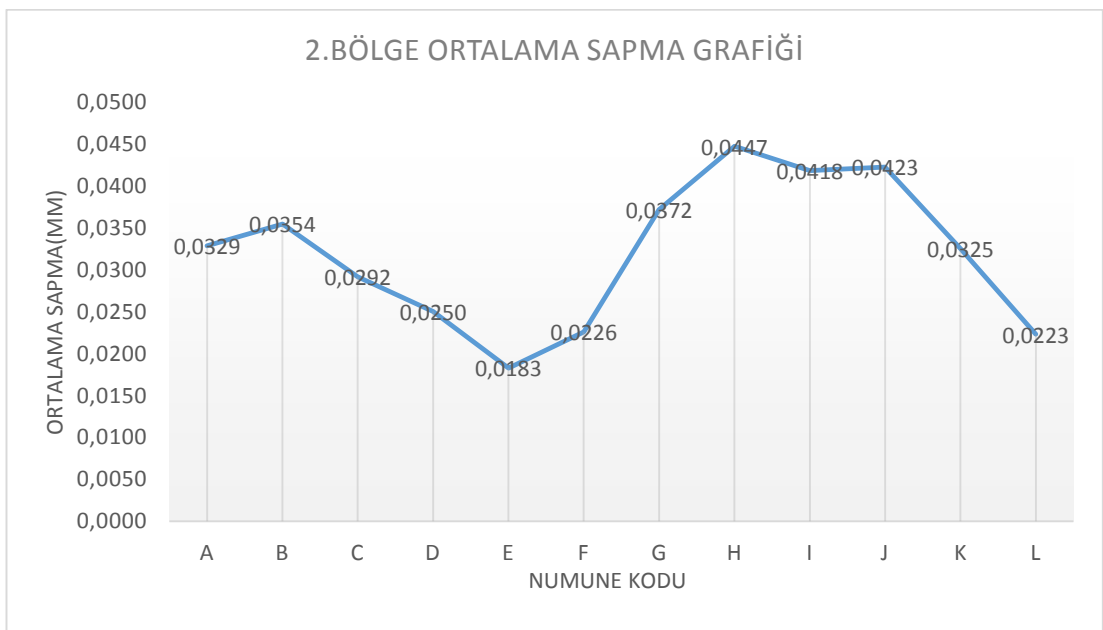
EK-5

Ortalama Sapma Miktarına Göre Bölgeler ve Numunelerin Grafikleri

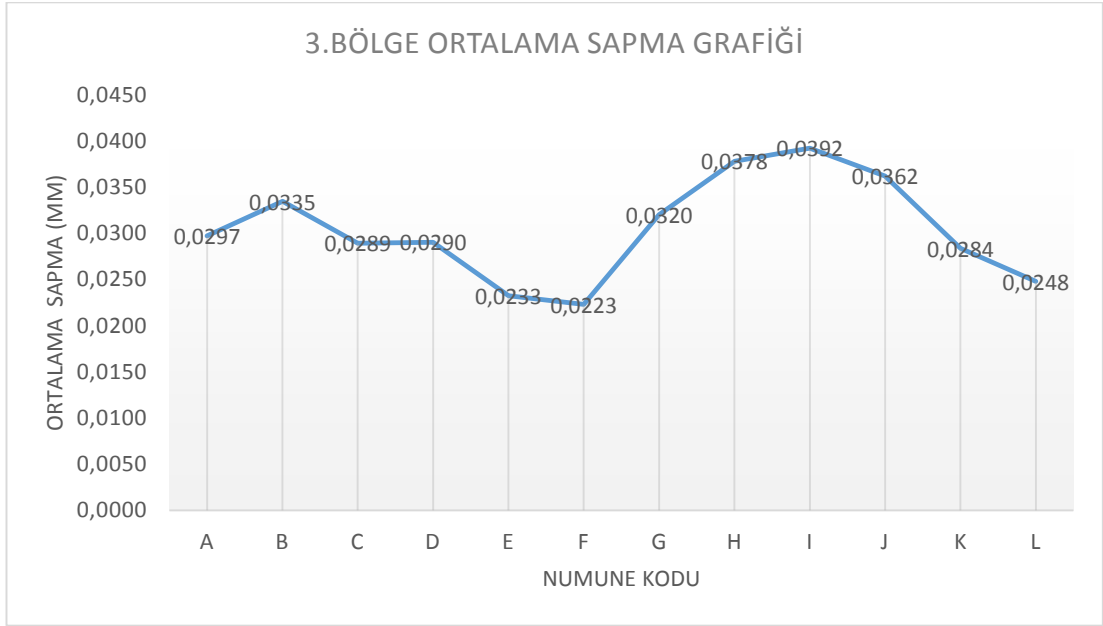
Çizelge 8.1. 1.Bölge Ortalama Sapma Grafiği



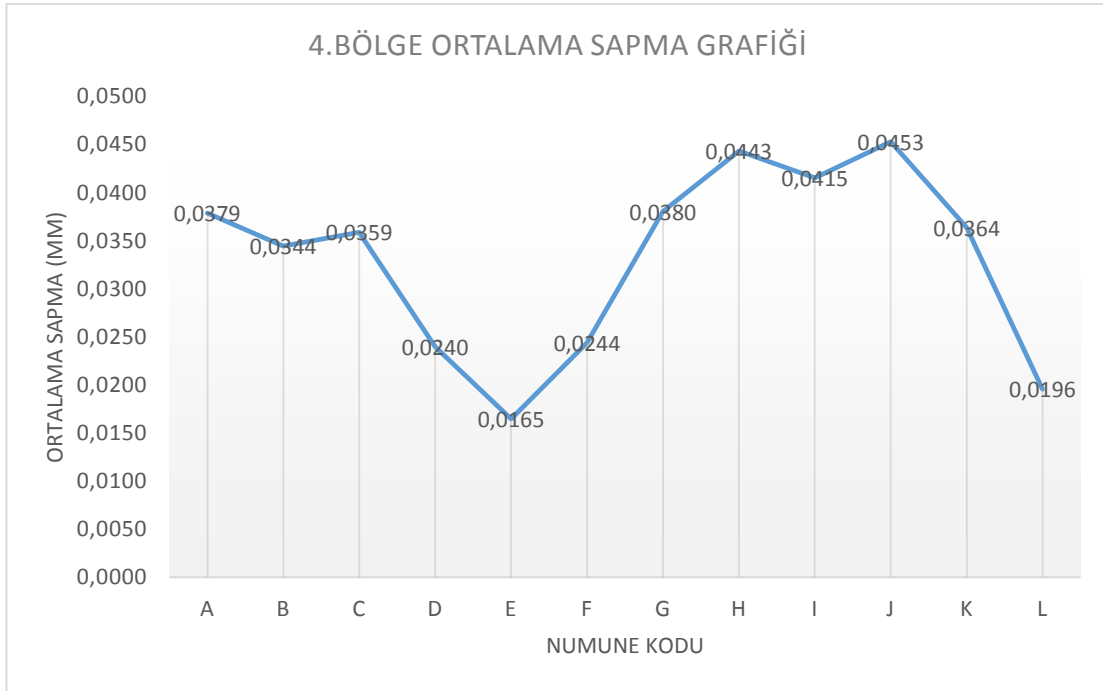
Çizelge 8.2. 2.Bölge Ortalama Sapma Grafiği



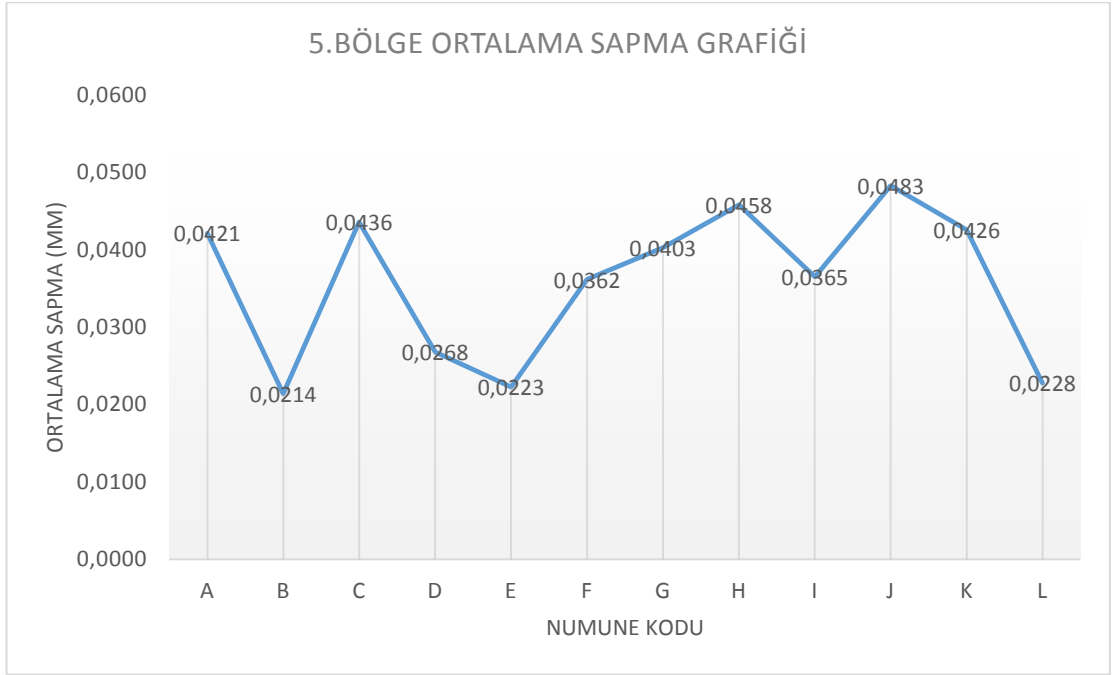
Çizelge 8.3. 3.Bölge Ortalama Sapma Grafiği



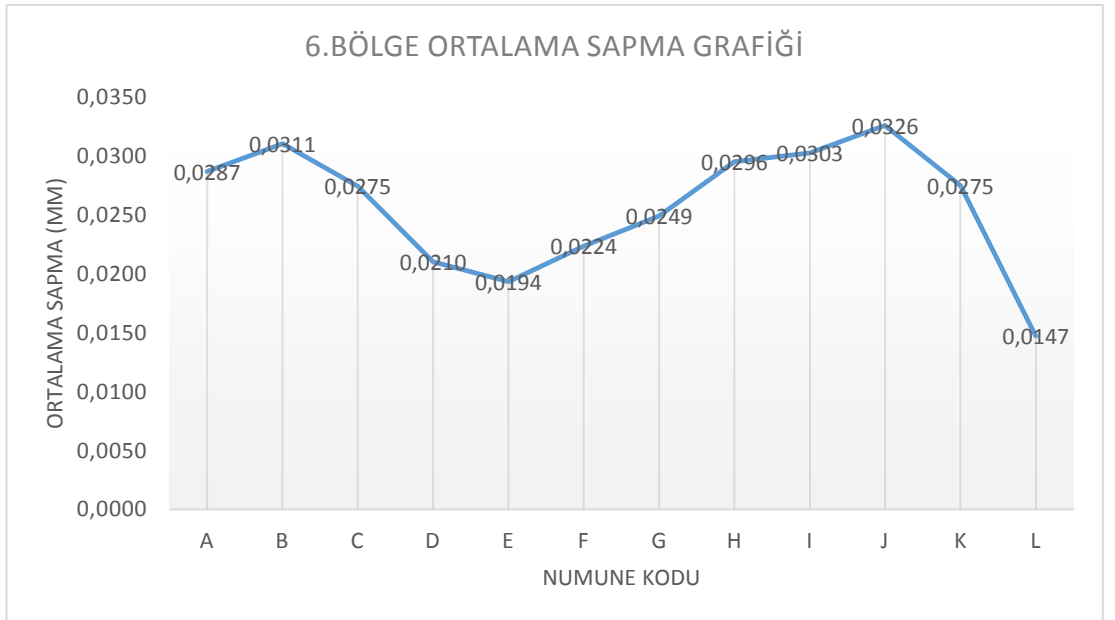
Çizelge 8.4. 4.Bölge Ortalama Sapma Grafiği



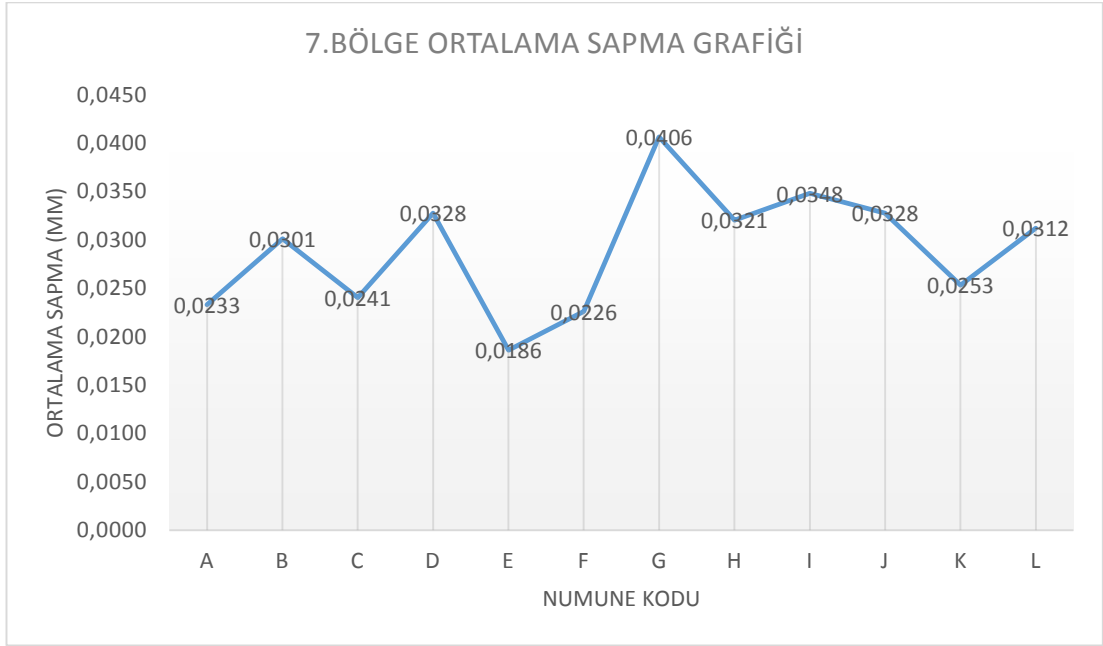
Çizelge 8.5. 5.Bölge Ortalama Sapma Grafiği



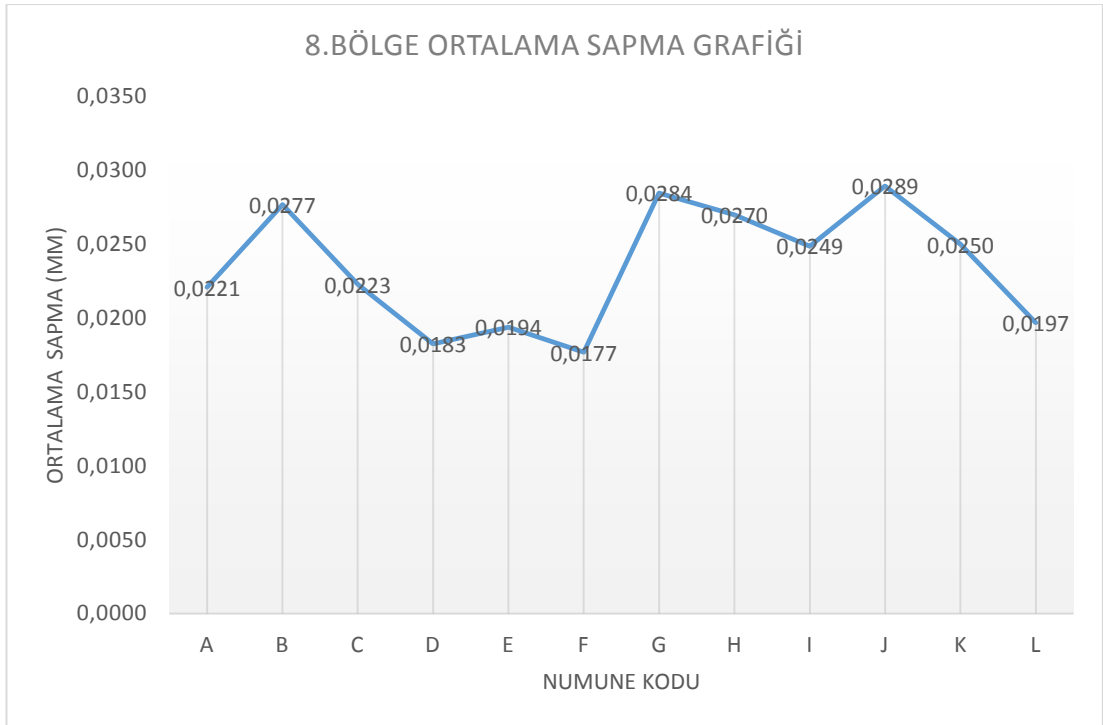
Çizelge 8.6. 6.Bölge Ortalama Sapma Grafiği



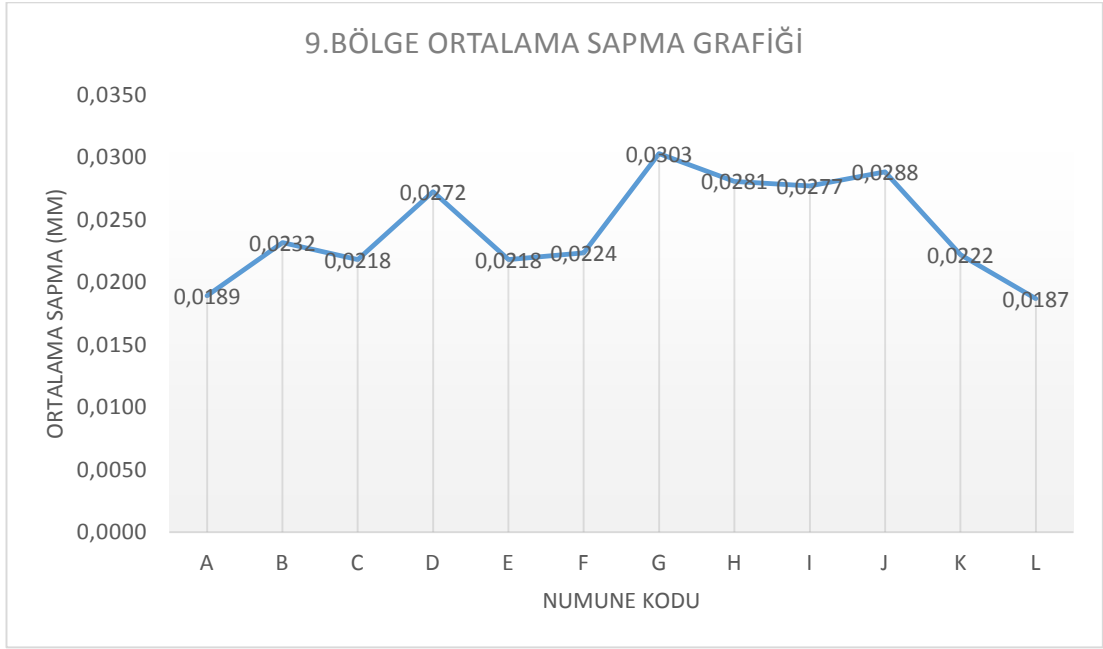
Çizelge 8.7. 7.Bölge Ortalama Sapma Grafiği



Çizelge 8.8. 8.Bölge Ortalama Sapma Grafiği



Çizelge 8.9. 9.Bölge Ortalama Sapma Grafiği



ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Burak ÖZDEMİR

Doğum Yeri ve Tarihi: MALATYA-18/10/1985

Adres: Hekimhan Mehmet Emin Sungur Meslek Yüksekokulu- Hekimhan/MALATYA

E-Posta: burak.ozdemir@inonu.edu.tr

Lisans: Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü

Mesleki Deneyim: Öğretim Görevlisi

Yayın Listesi:

Bahçe, E., Özdemir, B.(2014). Effects of different tool diameter on free form surfaces machining with B-spline curve. *I. Uluslararası Endüstriyel Tasarım Mühendisliği Sempozyumu (ISIDE14)*, 8-9 Mayıs 2014, Karabük, Türkiye