

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**BİLGİSAYAR ORTAMINDA GEOMETRİK
MODELLERİN YÜZEY VERİLERİNİ AZALTARAK
TAKIM YOLU OLUŞTURULMASININ İNCELENMESİ**

Makine Yük. Müh. Gökhan YURTSEVER

**Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
İmal Usulleri Programı'nda Hazırlanan**

DOKTORA TEZİ

Tez Savunma Tarihi : 12.01.2010
Tez Danışmanı : Prof. Dr. Erhan ALTAN (YTÜ)
Jüri Üyeleri : Prof. M. Emin YURCİ (YTÜ)
: Prof. Dr. Ata MUĞAN (İTÜ)
: Prof. Dr. M. Cemal ÇAKIR (UÜ)
: Prof. Dr. Mesut ÖZGÜRLER (YTÜ)

İSTANBUL, 2010

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	iv
KISALTMA LİSTESİ	v
ŞEKİL LİSTESİ	vi
ÇİZELGE LİSTESİ	x
ÖNSÖZ	xi
ÖZET	xii
ABSTRACT	xiii
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı	1
1.2 Tezin Önemi	1
1.3 Yöntem	2
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	4
2.1 Eğrilerde Veri Azaltılması Konusunda Yapılan Çalışmalar	4
2.2 Yüzeylerde Veri Azaltılması Konusunda Yapılan Çalışmalar	6
3. YÜZEYLERİN GEOMETRİK MODELLEMESİ	14
3.1 Parametrik Yüzeyler	14
3.2 Poligonal Yüzeyler	15
3.3 Z-Map ve Genişletilmiş Z-Map Modeli	17
4. TAKIM YOLU OLUŞTURULMASI	20
4.1 Parametrik Yüzeylerden Takım Yolu Oluşturulması	21
4.2 Poligonal Yüzeylerden Takım Yolu Oluşturulması	22
4.3 Z-map Yüzeyi Üzerinde Takım Yolu Oluşturulması	24
5. TEKİL DEĞERLERE AYRIŞTIRMA (TDA)	26
6. GEOMETRİK MODELLERİN TANIMLANMASI VE YÜZEY VERİLERİNİN AZALTILMASI KONUSUNDA YENİ YAKLAŞIMLAR	28
6.1 Z-Map Yüzeylerinin Tekil Değerlere Ayrıştırılması	28
6.2 Z-Map Yüzeylerinin Tekil Değerlere Ayrıştırılmasına Ait Sayısal Örnek	29
6.3 Düzenli Yüzey Verilerini Azaltarak Takım Yolunun Oluşturulması	35
6.4 Düzenli Yüzey Verilerinin Azaltılmasına Ait Sayısal Örnek	37
6.5 XY'ye Bağlı Z-Map Modeli	41

6.6	Düzensiz Yüzey Verilerini Azaltarak Takım Yolunun Oluşturulması.....	42
6.7	Düzensiz Yüzey Verilerinin Azaltılmasına Ait Sayısal Örnek.....	43
7.	YENİ YAKLAŞIMA AİT UYGULAMALAR.....	48
7.1	Bilgisayar Programı	48
7.1.1	Düzenli Yüzey Verilerini Azaltan Programın Algoritması	48
7.1.2	Düzensiz Yüzey Verilerinin Azaltan Programın Algoritması	49
7.1.3	Sonuçların Dosyaya Yazdırılması	50
7.2	Hata Ölçümü.....	53
7.3	Uygulamalar	53
7.4	Düzenli Ve Düzensiz Yüzey Verileri Kullanılarak Yapılan Uygulamalar Ve Sonuçlarının Karşılaştırılması	55
7.4.1	Düzenli Yüzey Verileri Kullanılarak Yapılan Uygulamalar	57
7.4.1.1	Birinci Model Üzerinde İnce İşlemeye Ait Uygulama.....	57
7.4.1.2	Birinci Model Üzerinde Kaba İşlemeye Ait Uygulama	60
7.4.1.3	İkinci Model Üzerinde İnce İşlemeye Ait Uygulama.....	63
7.4.1.4	İkinci Model Üzerinde Kaba İşlemeye Ait Uygulama	67
7.4.2	Poligonal Modelden Gelen Düzensiz Yüzey Verileri Kullanılarak Yapılan Uygulamalar	70
7.4.2.1	Birinci Model Üzerinde İnce İşlemeye Ait Uygulama.....	70
7.4.2.2	Birinci Model Üzerinde Kaba İşlemeye Ait Uygulama	74
7.4.2.3	İkinci Model Üzerinde İnce İşlemeye Ait Uygulama.....	77
7.4.2.4	İkinci Model Üzerinde Kaba İşlemeye Ait Uygulama	80
7.4.3	Tersine Mühendislikten Gelen Düzensiz Yüzey Verileri Kullanılarak Yapılan Uygulamalar	84
7.4.3.1	Birinci Model Üzerinde İnce İşlemeye Ait Uygulama.....	84
7.4.3.2	Birinci Model Üzerinde Kaba İşlemeye Ait Uygulama	87
7.4.3.3	İkinci Model Üzerinde İnce İşlemeye Ait Uygulama.....	90
7.4.3.4	İkinci Model Üzerinde Kaba İşlemeye Ait Uygulama	94
7.4.4	Düzenli Ve Düzensiz Yüzey Verileri Kullanılarak Yapılan Uygulamaların Sonuçlarının Karşılaştırılması	97
7.5	Düzensiz Yüzey Verilerini Azaltan Yöntemin Literatür İle Karşılaştırılması	103
7.5.1.1	“Bunny” Modeli.....	104
7.5.1.2	“Fandisk” Modeli.....	107
8.	SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	111
	KAYNAKLAR.....	114
	İNTERNET KAYNAKLARI.....	116
	ÖZGEÇMİŞ.....	117

SİMGE LİSTESİ

a	Takım eksen vektörü
A, B	Matrisler
I	Birim matris
l_i	Dışbükey nokta aralığı
l_o	İçbükey nokta aralığı
n	Birim yüzey normal vektörü
P	Parametrik yüzey fonksiyonu
P	Yüzey üzerinde alınan bir noktanın koordinatları
r	Matrisin rankı veya kullanılacak tekil değer sayısı
r_{cl}	Takım konum noktası vektörü
r_{cc}	Takım temas noktası vektörü
R	Takımın ilerleme yönünde yüzey eğrilik yarıçapı
ρ	Takım yarıçapı
S	Tekil değer matrisi
t_i	İç tolerans
t_o	Dış tolerans
t_1, t_2, t_3	Takım öteleme vektörleri
u, v	Yüzey parametreleri
U, V	Sağ ve sol tekil vektörler
x, y, z	Kartezyen nokta koordinatları
X, Y, Z	Z-map ve XY'ye bağlı Z-map matrisleri
γ	Z-map ağ adımı
γ_x, γ_y	X ve Y eksen doğrultularında Z-map ağ adımı
λ	Özdeğerler
χ	Takım köşe yarıçapı

KISALTMA LİSTESİ

CAD	Computer Aided Design (Bilgisayar Destekli Tasarım)
CAM	Computer Aided Manufacturing (Bilgisayar Destekli Üretim)
CC	Cutter Contact (Takım Temas)
CL	Cutter Location (Takım Konum)
CNC	Computer Numerically Controlled (Bilgisayar Kontrollü Takım Tezgâhı)
TDA	Tekil Değerlere Ayrıştırma (Singular Value Decomposition)

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1. Douglas-Peucker Algoritması	4
Şekil 2.2 Yıldız-formlu Douglas-Peucker algoritması (Wu, Marquez ,2003).....	6
Şekil 2.3 DeHeamer ve Zyda'nın bölümlleme yöntemi (DeHaemer, Zyda 1991).....	7
Şekil 2.4 T_i üçgeninin atılması ve yeniden üçgenleştirme (Hamann, 1994)	8
Şekil 2.5 Yeniden örnekleme ve nokta atma yöntemi (Turk, 1992)	9
Şekil 2.6 Kalvin ve Taylor'ın süperyüz yöntemi (Kalvin, Taylor, 1996)	11
Şekil 2.7 Temas eden ve etmeyen nokta çiftlerinin birleştirilmesi (Garland, Heckbert, 1997a).....	13
Şekil 3.1 Yüzeyin parametrik gösterimi (Zeid, 1991)	15
Şekil 3.2 Poligonal yüzey elemanları [1]	16
Şekil 3.3 Köşe- köşe ağı [1]	16
Şekil 3.4 Ağ noktalarından Z-map oluşturulması (Park vd., 2002).....	17
Şekil 3.5 Z-map ile tanımlanmasında güçlükler olan geometriler (Park vd., 2002).....	18
Şekil 3.6 Genişletilmiş Z-Map modeli (Park vd., 2002)	19
Şekil 4.1 Takım konum – CL yüzeyi.....	20
Şekil 4.2 Takım konum noktasının hesabı (Choi ve Jerard, 1998).....	22
Şekil 4.3 Poligonal ağ ofseti (Park, 2004)	22
Şekil 4.4 Ofsetlenmiş poligonal ağ dilimleme (Park, 2004).....	23
Şekil 6.1 Örnek modele ait Z-map matrisi	30
Şekil 6.2 Örnek modelin farklı bakış açılarından Matlab grafiği	30
Şekil 6.3 A matrisine ait tekil değerler	31
Şekil 6.4 A matrisine ait U tekil vektörleri	31
Şekil 6.5 A matrisine ait V tekil vektörleri	32
Şekil 6.6 $U_1 S_1 V_1^T$ çarpımı.....	32
Şekil 6.7 $U_2 S_2 V_2^T$ çarpımı.....	33
Şekil 6.8 $U_3 S_3 V_3^T$ çarpımı.....	33
Şekil 6.9 $U_4 S_4 V_4^T$ çarpımı.....	34
Şekil 6.10 $U_5 S_5 V_5^T$ çarpımı.....	34
Şekil 6.11 $U_1 S_1 V_1^T, U_2 S_2 V_2^T, U_3 S_3 V_3^T, U_4 S_4 V_4^T, U_5 S_5 V_5^T$ toplamı.....	35
Şekil 6.12 İç ve dış tolerans.....	36
Şekil 6.13 Örnek bir tekil vektör üzerinde azaltılmış noktaların dağılımı	37
Şekil 6.14 Orijinal U_1 tekil değer vektörü	38
Şekil 6.15 Orijinal V_1 tekil değer vektörü.....	38
Şekil 6.16 Noktaları azaltılmış U_1' tekil değer vektörü.....	39

Şekil 6.17 Noktaları azaltılmış V_1' tekil değer vektörü	39
Şekil 6.18 Noktaları azaltılmış $U_1' S_1 V_1'^T$ çarpımı	40
Şekil 6.19 Azaltılmış $U_1' S_1 V_1'^T, U_2' S_2 V_2'^T, U_3' S_3 V_3'^T, U_4' S_4 V_4'^T, U_5' S_5 V_5'^T$ toplamı ..	40
Şekil 6.20 XY'ye bağlı Z-map modeli	42
Şekil 6.21 Düzensiz yüzey verilerinden XY'ye bağlı Z-map modeli oluşturulması.....	43
Şekil 6.22 Örnek modele ait poligonal yüzey	44
Şekil 6.23 Ağ üzerine yerleştirilmiş köşe noktaları.....	44
Şekil 6.24 Örneğe ait XY'ye bağlı Z-map modeli.....	45
Şekil 6.25 XY'ye bağlı Z-map modeline ait X matrisi	45
Şekil 6.26 XY'ye bağlı Z-map modeline ait Y matrisi	46
Şekil 6.27 XY'ye bağlı Z-map modeline ait Z matrisi	46
Şekil 6.28 Orijinal XY'ye bağlı Z-map yüzeyi	47
Şekil 6.29 Verileri azaltılmış XY'ye bağlı Z-map yüzeyi.....	47
Şekil 7.1 Raw dosyası için seçilen üçgensel yapı.....	50
Şekil 7.2 Düzenli yüzey verilerini azaltan programın akış şeması.....	51
Şekil 7.3 Düzensiz yüzey verilerini azaltan programın akış şeması.....	52
Şekil 7.4 Uygulamalar için seçilen birinci model.....	56
Şekil 7.5 Uygulamalar için seçilen ikinci model.....	56
Şekil 7.6 Z-map modeli	57
Şekil 7.7 Basitleştirilmiş poligonal model.....	58
Şekil 7.8 Bilgisayar ortamında hata grafiği	58
Şekil 7.9 İşlenen model	59
Şekil 7.10 İşlenen modelin ölçüm sonuçları.....	60
Şekil 7.11 Basitleştirilmiş poligonal model.....	61
Şekil 7.12 Bilgisayar ortamında hata grafiği	62
Şekil 7.13 İşlenen model	62
Şekil 7.14 İşlenen modelin ölçüm sonuçları.....	63
Şekil 7.15 Z-map modeli	63
Şekil 7.16 Basitleştirilmiş poligonal model.....	65
Şekil 7.17 Bilgisayar ortamında hata grafiği	65
Şekil 7.18 İşlenen model	66
Şekil 7.19 İşlenen modelin ölçüm sonuçları.....	66
Şekil 7.20 Basitleştirilmiş poligonal model.....	68
Şekil 7.21 Bilgisayar ortamında hata grafiği	68
Şekil 7.22 İşlenen model	69

Şekil 7.23 İşlenen modelin ölçüm sonuçları.....	69
Şekil 7.24 Orijinal poligonal model	70
Şekil 7.25 Basitleştirilmiş poligonal model.....	71
Şekil 7.26 Bilgisayar ortamında hata grafiği	72
Şekil 7.27 İşlenen model	73
Şekil 7.28 İşlenen modelin ölçüm sonuçları.....	73
Şekil 7.29 Basitleştirilmiş poligonal model.....	75
Şekil 7.30 Bilgisayar ortamında hata grafiği	75
Şekil 7.31 İşlenen model	76
Şekil 7.32 İşlenen modelin ölçüm sonuçları.....	76
Şekil 7.33 Orijinal poligonal model	77
Şekil 7.34 Basitleştirilmiş poligonal model.....	78
Şekil 7.35 Bilgisayar ortamında hata grafiği	79
Şekil 7.36 İşlenen model	79
Şekil 7.37 İşlenen modelin ölçüm sonuçları.....	80
Şekil 7.38 Basitleştirilmiş poligonal model.....	81
Şekil 7.39 Bilgisayar ortamında hata grafiği	82
Şekil 7.40 İşlenen model	83
Şekil 7.41 İşlenen modelin ölçüm sonuçları.....	83
Şekil 7.42 Orijinal tersine mühendislik noktaları	84
Şekil 7.43 Basitleştirilmiş poligonal model.....	85
Şekil 7.44 Bilgisayar ortamında hata grafiği	86
Şekil 7.45 İşlenen model	86
Şekil 7.46 İşlenen modelin ölçüm sonuçları.....	87
Şekil 7.47 Basitleştirilmiş poligonal model.....	88
Şekil 7.48 Bilgisayar ortamında hata grafiği	89
Şekil 7.49 İşlenen model	89
Şekil 7.50 İşlenen modelin ölçüm sonuçları.....	90
Şekil 7.51 Orijinal tersine mühendislik noktaları	90
Şekil 7.52 Basitleştirilmiş poligonal model.....	92
Şekil 7.53 Bilgisayar ortamında hata grafiği	92
Şekil 7.54 İşlenen model	93
Şekil 7.55 İşlenen modelin ölçüm sonuçları.....	93
Şekil 7.56 Basitleştirilmiş poligonal model.....	95
Şekil 7.57 Bilgisayar ortamında hata grafiği	95

Şekil 7.58 İşlenen model	96
Şekil 7.59 İşlenen modelin ölçüm sonuçları.....	96
Şekil 7.60 “Bunny” modeli ve eklenen yüzey	105
Şekil 7.61 Azaltılmış nokta sayısı oranı – maksimum hata değerleri grafiği.....	106
Şekil 7.62 Azaltılmış nokta sayısı oranı – ortalama hata değerleri grafiği.....	107
Şekil 7.63 “Fandisk” modeli ve eklenen yüzey	108
Şekil 7.64 Azaltılmış nokta sayısı oranı – maksimum hata değerleri grafiği.....	109
Şekil 7.65 Azaltılmış nokta sayısı oranı – ortalama hata değerleri grafiği.....	109

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 7.1 Birinci model üzerinde ince işlemeye ait uygulamaların sonuçları	98
Çizelge 7.2 İkinci model üzerinde ince işlemeye ait uygulamaların sonuçları	99
Çizelge 7.3 Birinci model üzerinde kaba işlemeye ait uygulamaların sonuçları.....	99
Çizelge 7.4 İkinci model üzerinde kaba işlemeye ait uygulamaların sonuçları	100
Çizelge 7.5 Azaltılmış nokta sayısı oranı – maksimum hata değerleri	105
Çizelge 7.6 Azaltılmış nokta sayısı oranı – ortalama hata değerleri	106
Çizelge 7.7 Azaltılmış nokta sayısı oranı – maksimum hata değerleri	108
Çizelge 7.8 Azaltılmış nokta sayısı oranı – ortalama hata değerleri	109

ÖNSÖZ

Bilgisayar destekli tasarım (CAD) ve bilgisayar destekli üretimin (CAM) endüstrideki kullanımı ve öneminin artması ile birlikte, dünyada bu konuda yapılan araştırma ve çalışmalarda büyük bir artış gözlenmektedir. Ülkemizde, CAD/CAM uygulamaları hazır paket programlar şeklinde yoğun olarak kullanılmakla birlikte, konunun temellerinin daha iyi anlaşılması ve geliştirilmesi konusundaki bilimsel çalışmalar yeterince yapılmamaktadır.

CAD/CAM konusunun temelinde yapılacak çalışmalar, endüstrideki uygulamaların daha verimli olmasını sağlayacak ve gelecekte ülkemizde geliştirilebilecek uygulama ve yazılımlara yol gösterecektir. Güncel bir konu olan yüzey basitleştirmede, farklı bir yöntem sunan bu çalışmanın, gelecekte bu konuda yapılacak diğer çalışmalara katkıda bulunmasını diliyorum.

Doktora çalışmamın her aşamasında bana büyük desteği olan tez danışmanın Sayın Prof. Dr. Erhan ALTAN'a, ayrıca değerli yorumları ve tavsiyeleri ile tez çalışmamı destekleyen tez izleme jürisi hocalarım Sayın Prof. M. Emin YURCİ ve Sayın Prof. Dr. Ata MUĞAN'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Tez çalışmamda, atölyesinin tüm imkânlarını kullanımına açıp her türlü desteği sağlayan Bilgin Makine Kalıp ve Nümerik Kontrol Grup firmalarına, üç boyutlu ölçüm ve kalite kontrol konusunda destek olan Defne Mühendislik'e teşekkürü borç bilirim.

Çalışmam süresince bana destek veren aileme ve çalışma arkadaşlarıma, gösterdikleri özveri ve anlayış için çok teşekkür ederim.

ÖZET

CAD/CAM uygulamalarının temelini oluşturan geometrik yüzey modelleme, üç boyutlu bir nesnenin bilgisayar ortamında tanımlanmasıdır. Yüzey modellemeye yönelik olarak, parametrik yüzeyler, poligonal yüzeyler, Z-map gibi birçok yöntem geliştirilmiştir. Her yöntem çeşitli uygulama alanlarına yönelik avantaj ve dezavantajlar içermektedir. Son yıllarda takım yolu hesaplamasında, çeşitli avantajları nedeniyle parametrik olmayan yüzey tanımlamalarının kullanımı artmıştır. Modellerin karmaşıklaşması, özellikle parametrik olmayan yüzey verilerinin çok büyümesine neden olmakta ve yüzey verilerinin azaltılması ihtiyacını ortaya çıkarmaktadır. Yüzey verilerinin azaltılması, modelin, yapısının korunarak, belirli bir tolerans dâhilinde daha az veri ile tanımlanmasıdır. Yüzey modellerin basitleştirilmesine yönelik verimli ve hızlı bir yöntem CAD/CAM uygulamalarında önemli avantajlar sağlayacaktır.

Yüzey verilerinin azaltılması için, tekil değerlere ayrıştırma yöntemine dayalı, takım yolu hesabını da göz önüne alan bir yöntem geliştirilmiş ve sonuçları irdelenmiştir. Tekil değerlere ayrıştırma yönteminin, düzensiz noktalar veya düzenli ağ noktalarından oluşan modeller üzerine uygulaması yapılmıştır. Düzensiz noktalarından oluşan, poligonal yüzey modeller ile tersine mühendislik verilerinin matris formunda tanımlanmasını sağlayan yeni bir yaklaşım olan XY'ye bağlı Z-map yöntemi geliştirilmiştir. Geometrik modellemede alternatif bir yaklaşım olarak kullanılabilecek XY'ye bağlı Z-map yöntemi, bilinen Z-map yöntemini iyileştirmektedir.

Tekil değerlere ayrıştırma işlemi, 3 boyutta incelenen problemin 2 boyutta incelenebilmesini sağlamaktadır. Bunun sonucunda problem basitleşerek, verimli ve hızlı bir veri azaltma işlemi yapılabilmektedir. Veri azaltma işlemi, takım yolu hesabında kullanılacak parametreler göz önünde bulundurularak yapılmaktadır. Bunun sonucunda, takım yolu hesabının hızlanması ve işlemede hedeflenen özelliklerden uzaklaşmadan veri azaltılması mümkün olmaktadır.

Matlab ortamında program geliştirilerek yöntemin uygulamaları yapılmıştır. Yöntem, yapılan uygulamalar ile test edilmiş ve elde edilen sonuçlar, yaygın kullanılan ticari CAM yazılımlarından birinin sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Bilinen veri azaltma yöntemlerinin sonuçları ile bu çalışmada elde edilen sonuçların karşılaştırılması için literatürde bulunan bir yazılım kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar, yöntemin hızlı ve verimli bir şekilde yüzey verilerini azaltabildiğini fakat etkinliğinin yüzey formuna bağlı olduğunu göstermiştir. Diğer veri azaltma yöntemleri ile kıyaslandığında kaba işlemeye yönelik uygulamalarda daha başarılı sonuçlar alınabildiği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Poligonal yüzey basitleştirme, tekil değerlere ayrıştırma, Z-map, XY'ye bağlı Z-map

ABSTRACT

AN INVESTIGATION OF TOOL PATH GENERATION BY REDUCING SURFACE DATA OF COMPUTER BASED GEOMETRIC MODELS

Geometrical surface modeling, which is a base for CAD/CAM applications, is defined as the determination of a three dimensional object in a computer environment. Various methods such as Parametric Surfaces, Polygonal Surfaces, Z-map have been developed with the intention of surface modeling. Each method has both advantages and disadvantages within assorted application areas. Due to conspicuous advantages, utilization of nonparametric surface modeling for the calculation of tool-path has grown in the recent years. Complicated models specially cause the increase of nonparametric surface data thus the need for surface simplification appears. Surface simplification is defined as an expression of the model using less data within specified limits while maintaining the structure of that model. An effective and rapid algorithm intending simplification of surface models provides significant advantages for CAD/CAM applications.

An algorithm based on singular value decomposition was developed considering tool path calculation for surface simplification and the results were analyzed. Singular value decomposition was applied to surface models formed by irregular points and regular grid points. An XY dependent Z-map method formed by irregular points, which is a new approach, has been developed in order to define polygonal surface models and reverse engineering data in a matrix form. The XY dependent Z- map method, which can be used as an alternative in geometric modeling, improves the existing Z-map method.

Singular value decomposition enables analysis of a three dimensional problem in two dimensional way. As a result the problem was simplified; an effective and rapid data reduction was conducted. This data reduction was conducted considering the parameters utilized during tool path calculation. Consequently, accelerated tool path calculation and data reduction without leading away from targeted machining values were realized.

A software application was developed as an executable model in Matlab. The results of this executable model were compared with the results of well known commercial software used in CAM applications. Software commonly referred for academic purposes was used in order to compare the results of this study with the results of well known surface simplification methods. The results showed that the algorithm reduced the surface data in an effective and rapid way but also showed that its effectiveness depended on surface shape. When compared to other surface simplification methods, it was seen that better results were achieved for roughing operations.

Key Words: Polygonal surface simplification, singular value decomposition, Z-map, XY dependent Z-map

1. GİRİŞ

Yüzeylerin basitleştirilmesi, son yıllarda çok daha detaylı modellerin oluşturulmasının mümkün olmasıyla birlikte önem kazanmıştır. Basitleştirme işlemi ile verinin saklanması, aktarımı, hesaplanması ve gösterimi daha verimli olmaktadır. Özellikle bilgisayar destekli üretim için takım yolu oluşturma gibi yoğun hesaplama gerektiren işlemlerde, hesaplama zamanlarında önemli azalmalar sağlanırken, gerekli işlem gücü ve hafıza alanı ihtiyacı önemli ölçüde düşmektedir. Bu sayede çok daha hassas takım yollarının zaman kayıpsız hesaplanabilmesi mümkün olmaktadır.

1.1 Tezin Amacı

Bilinen nokta azaltma yöntemleri yerine, yüzeylerin daha az veri ile farklı bir yöntem kullanılarak yeterli hassasiyette tanımlanması ve bu veriler üzerinden takım yolu hesaplanması amaçlanmaktadır. Yüzey verilerinin azaltılması için, yeni bir Z-map modeli ve daha önce geometrik modellemeye uygulanmamış olan tekil değerlere ayrıştırma yöntemi (TDA) kullanılmıştır.

Literatürdeki çoğu yöntem, 3 boyutlu poligonal modellerin basitleştirilmesi için geliştirilmiştir. Bu çalışmada farklı olarak, nokta azaltma işleminden önce Z-map ve XY'ye bağlı Z-map matrisleri, tekil değerlere ayrıştırma (TDA) yöntemi kullanılarak bileşenlerine ayrılmıştır. Yöntemdeki amaç, tekil vektörlerin yüzey bileşenleri üzerinde karakteristik bir özellik ifade etmesinden faydalanarak, yüzeyde nokta azaltma işleminin eğride nokta azaltma işlemine dönüştürülerek basitleştirilmesidir. Ayrıca, modelin yeterli hassasiyette daha az veri ile tanımlanmasının, takım yolu hesaplama ve işlenen parça yönünden getirileri ve etkileri de incelenmiştir.

1.2 Tezin Önemi

Takım yolu oluşturulmada kullanılacak yüzeyin verileri, daha önce bu alanda uygulaması olmayan TDA yöntemi kullanılarak azaltılmıştır. TDA yönteminin bilinen birçok uygulama alanı olmasına karşın, Z-map tabanlı yüzey modeller üzerinde kullanımı ilk kez yapılmış ve anlamı irdelenmiştir. TDA işlemi, yüzey tanımlamasını çok daha basit bir forma indirgeyerek, üzerinde yapılabilecek birçok işlemi kolaylaştırmaktadır. Ayrıca, yeni bir yöntem olan XY'ye bağlı Z-map modeli geliştirilmiş ve buna bağlı olarak TDA işlemi uygulanmıştır.

Literatürdeki poligonal yüzey basitleştirme yöntemleri, bilgisayar grafiği ve bilgisayar destekli tasarım konularında çalışan araştırmacılar tarafından, bu alandaki sorunların çözümüne yönelik geliştirilmişlerdir. Günümüzde çoğu modern CAM yazılımı poligonal yüzey modellere dayalı olarak çalışmaktadır. Oluşturulan takım yolları, hesaplamanın yapıldığı poligonal yüzeyin yapısından doğrudan etkilenirler. Bu nedenle poligonal yüzeyler üzerinde yapılacak veri azaltma gibi yapısal değişiklikler, takım yolunun özelliklerini de etkileyecektir. Poligonal yüzeyler üzerinde veri azaltma işleminin, takım yolu hesabındaki parametreler göz önüne alınarak yapılması ile işleme sonucunun hedeflenen özellikleri taşınması sağlanacaktır. Tezde, yöntemin takım yolu oluşturma alanında getirileri de değerlendirilmiştir.

Düzenli aralıklı noktalardan oluşturulan Z-map modelleri, dik duvarlar, keskin kenarlar ve ters açılı yüzeyler gibi formları, yeterince hassas tanımlayabilmek için fazla nokta kullanımı gerektirir. Bu tür geometrilerde daha verimli bir tanımlama yapılabilmesi için, düzensiz noktaların kullanılabildiği XY'ye bağlı Z-map modeli geliştirilmiştir. Geliştirilen yöntemin düzensiz noktalar üzerine de uygulanabilir olması, başlangıçta modelin tanımlanmasından kaynaklanabilecek kayıpların azaltmakta ve daha geniş uygulama alanlarında kullanım imkânı sunmaktadır.

Geliştirilen XY'ye bağlı Z-map yöntemi, tersine mühendislik verileri üzerinden doğrudan model kurabilmekte ve veri azaltabilmektedir. Böylece, geliştirilen yöntemden verileri azaltılmış model, poligonal yapıda alınabilmekte ve çeşitli uygulamalarda kullanabilmektedir.

1.3 Yöntem

Geliştirilen yüzey basitleştirme algoritması, düzenli veya düzensiz aralıklı noktalardan oluşan modeller üzerinde çalışmaktadır. Yöntemde, düzenli yüzey noktalarından Z-map modeli veya poligonal yüzey noktaları ile tersine mühendislik verileri gibi düzensiz yüzey noktalarından XY'ye bağlı Z-map modeli oluşturulmaktadır. Oluşturulan orijinal modele, takım yolu hesabında kullanılacak parametrelere göre belirlenen nokta aralığı sağlanacak şekilde veri azaltma işlemi uygulanmaktadır.

Oluşturulan Z-map veya XY'ye bağlı Z-map matrisleri, TDA yöntemi ile tekil değer ve vektörlerine ayrıştırılmıştır. TDA yönteminin sağladığı kolaylıktan faydalanarak, matrislerin üzerinde yapılacak nokta azaltma işlemi iki boyutta incelenebilmiş ve önemli ölçüde kolaylaşmıştır. TDA vektörleri üzerinde yapılan nokta azaltma işleminden sonra, bu vektörler

arpılarak verileri azaltılmış modele ait matris elde edilmiştir. Takım yolu hesabı için, model matrisindeki noktalardan üçgensel poligonal yüzey yapısına geçilmiştir. Poligonal yüzey üzerinde Hypermill CAM yazılımı kullanılarak takım yolları oluşturulmuştur. Daha sonra, hesaplanan takım yolları 3 eksen CNC freze ile işlenmiştir.

Yöntemin farklı yüzey formlarına uygulanabilirliğinin incelenebilmesi için, değişik geometrik özellikler içeren iki farklı model üzerinde deneyler yapılmıştır. Veri azaltma işlemi uygulanan modeller, orijinal modeller ile öncelikle bilgisayar ortamında karşılaştırılmıştır. Daha sonra CNC freze ile işlenen parçaların üç boyutlu ölçüm cihazında ölçümleri yapılmıştır. lm verileri orijinal model ile karşılaştırılarak, talaş kaldırma işleminin de olası etkileri değerlendirilmiştir. Ayrıca, yöntemin literatür ile karşılaştırmasının yapılabilmesi için, bu konuda yapılan çalışmalarda sıklıkla kullanılan iki farklı model üzerinde uygulama yapılmıştır ve karşılaştırmalı sonuçlar sunulmuştur.

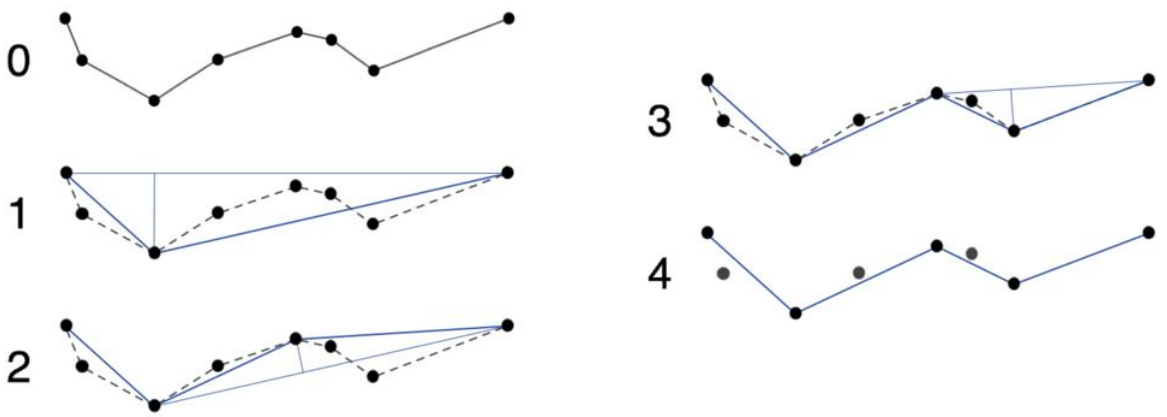
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Günümüzde detaylı modellerin oluşturulması ihtiyacı veri azaltmanın önemini arttırmıştır. Veri azaltma ile ilgili çalışmalar özellikle çokgen yapıdaki eğri ve yüzeylerin kullanıldığı haritacılık, bilgisayar grafiği (sanal gerçeklik, bilgisayar destekli geometrik tasarım), sonlu elemanlar analizi, takım yolu oluşturulması gibi alanlarda yoğunlaşmaktadır. Geometrik modellerin verilerinin azaltılması, depolama, iletim, hesaplama ve görüntülemeye önemli avantajlar sağlamaktadır. Eğri ve yüzeylerde veri azaltma için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir.

2.1 Eğrilerde Veri Azaltılması Konusunda Yapılan Çalışmalar

Temel olarak eğri basitleştirme problemi, belirli adette noktaya sahip çokgen yapıdaki eğrinin ele alınması ve daha az sayıda noktaya sahip çokgen yapıdaki yaklaşık benzer eğrinin belirlenen hata toleransı içerisinde elde edilmesidir. Eğrilerde basitleştirme yöntemleri özellikle haritacılık, bilgisayarda görüntüleme ve grafik alanlarında uygulanmıştır.

En çok kullanılan eğri basitleştirme algoritmalarından biri Douglas–Peucker (1973) Algoritması’dır. Algoritma, eğrinin ilk ve son noktasından geçen bir doğru oluşturup, eğrinin bu doğruya en uzak konumdaki noktasını bulur. Bulunan nokta ile doğru arasındaki mesafe istenilen sapma miktarından küçük ise algoritma yaklaşımı durdurur, eğer büyük ise bu noktadan ilk ve son noktalara birer doğru çizerek ilk doğruyu ikiye böler. İstenilen hata toleransı yakalanıncaya kadar algoritma, doğruları en uzak noktadan bölmeye devam eder.



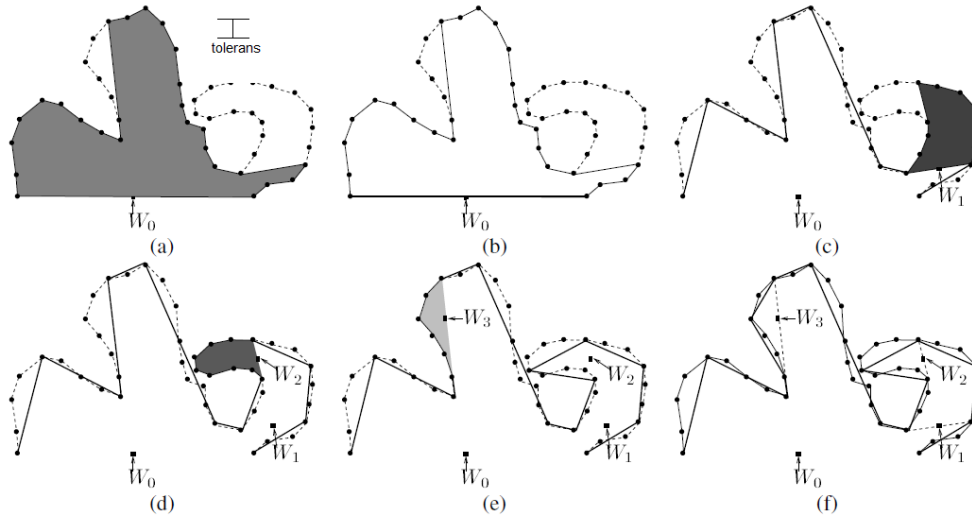
Şekil 2.1. Douglas-Peucker Algoritması

Yöntemin en çok hesaplama gerektiren bölümü çizilen doğruya eğrinin tüm noktalarının uzaklığının hesaplanmasıdır. En kötü durumda, istenilen hata toleransının sağlanabilmesi için

nokta azaltılmadığında, yöntemin hesaplama sayısı, başlangıçtaki nokta sayısının karesi ile orantılı olacaktır. En iyi durumda ise, ilk çizilen doğru istenilen toleransı sağlayacak ve bu durumda da hesaplama sayısı, eğrinin nokta sayısı ile orantılı olacaktır.

Hershberger ve Snoeyink (1992), Douglas–Peucker Algoritması’nın bölme noktasını bulma yöntemini iyileştirmişlerdir. Hershberger ve Snoeyink, bölme noktasının, eğrinin dışbükey bölümü üzerinde olacağını göstermiştir. Yöntemin temeli verimli bir şekilde dışbükey eğri bölümlerini bulmak ve saklamaktır. Eğrinin başlangıç ve bitiş noktalarından geçen doğrudan alınan paralel doğrunun, dışbükey eğri parçasına teğet olduğu nokta bölme işleminin yapılacağı en uzak nokta olarak seçilir. Douglas–Peucker Algoritması’nın en kötü sonuç verdiği durumda, hesaplama süresi başlangıçtaki n nokta sayısının karesinin bir fonksiyonuyken (n^2), Hershberger ve Snoeyink’in önerdiği yöntemde hesaplama süresinin her zaman altında kaldığı değer ($n \cdot \log_2 n$)’nin fonksiyonudur. Uygulamalar, standart algoritmanın en iyi sonuç verdiği durumlarda yeni algoritmanın 2,5 ila 3 kat daha yavaş olduğunu fakat buna karşılık standart algoritmanın en kötü sonuç verdiği durumda yeni algoritmanın 150 ila 10.000 kat daha iyi sonuç verebildiğini göstermiştir.

Douglas-Peucker Algoritması’nda, tanımlanan herhangi bir tolerans değeri için, basitleştirilen eğrinin kendini kesme durumu ortaya çıkabilir. Wu ve Marquez (2003) önceden belirlenmiş herhangi bir hata toleransı için orijinal ve basitleştirilmiş iki boyutlu eğrilerin topolojik tutarlılığını koruyan yıldız-formlu Douglas-Peucker algoritmasını geliştirmişlerdir. Wu ve Marquez, eğrinin her parçasına ait dışbükey nokta sıraları ile basitleştirilmiş eğriye ait diğer parçalar arasındaki ilişkiyi verimli bir şekilde kontrol eden bir yöntem geliştirmişlerdir (Şekil 2.2). Şekil 2.2a’da yıldız formlu bölgenin ilk durumu gösterilmiştir. Başlangıç ve bitiş noktaları düz bir doğru ile birleştirilerek ilk basitleştirme yapılır (Şekil 2.2b). Eğer, basitleştirilen eğri ile başlangıç eğrisi arasındaki tüm mesafeler belirlenen toleranstan küçük ise işlem durur. Belirlenen toleranstan daha büyük noktalardan yeni bir yıldız formlu bölge oluşturulur (Şekil 2.2c). Ölçülen tüm mesafeler belirlenen toleranstan küçük oluncaya kadar işlemler tekrarlanır (Şekil 2.2d-f).



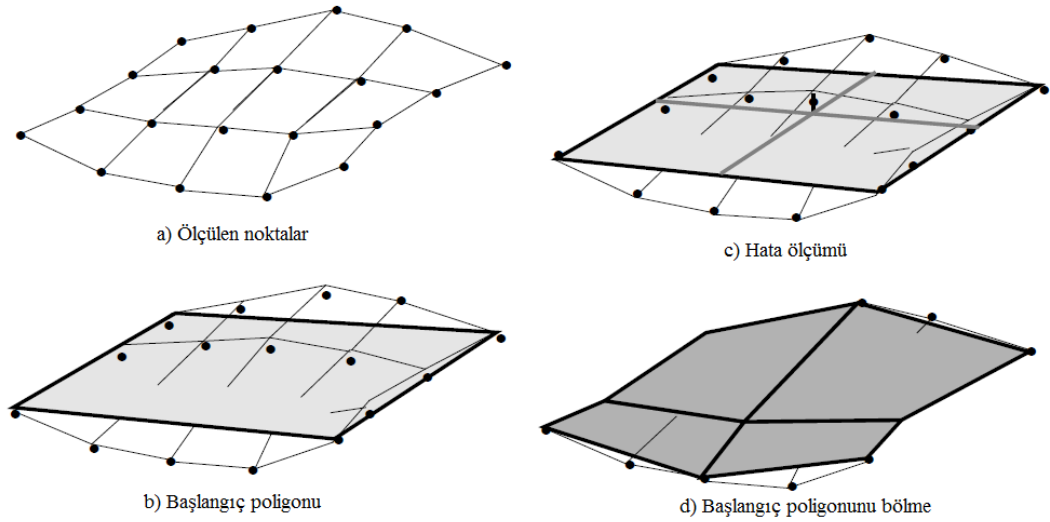
Şekil 2.2 Yıldız-formlu Douglas-Peucker algoritması (Wu, Marquez ,2003)

2.2 Yüzeylerde Veri Azaltılması Konusunda Yapılan Çalışmalar

Üç boyutlu modellerin çeşitli uygulama alanlarında çok yaygın olarak çokgen yapıda tanımlanması, çokgen modellerde veri azaltma yöntemleri üzerine birçok çalışmanın yapılmasına neden olmuştur. Geliştirilen algoritmalar genel olarak, uyarlanabilir alt bölümlenme, nokta atma, yeniden örnekleme veya bunların birleşimi şeklinde sınıflandırılabilir.

Uyarlanabilir alt bölümlenme yöntemini Schmitt ve Barsky (1986) üç boyutlu tarayıcıdan alınan noktalar üzerine uygulamışlardır. Yöntem başlangıçta kaba bir yaklaşım yüzeyi ile başlar ve ardışık adımlar ile yaklaşımın kötü olduğu bölgeleri iyileştirir. Yöntem başlangıçta, pozisyon ve teğetlik sürekliliği sağlayabilen, parametrik parçalı bikübik Bernstein-Bezier yüzeyini kullanır. Daha sonra elde edilen yüzey ile mevcut noktalar arasında hata kontrolü yapılır. Belirlenen hata toleransından daha büyük bir değer elde edildiğinde yüzey dört parçaya ayrılır. Bölümlenme esnasında komşu yüzeylerle süreklilik sağlanacak şekilde yeni yüzey parçaları oluşturulur. Yöntem, istenilen hata toleransı yakalanıncaya kadar yüzeyleri dörde bölmeye devam eder. Bu yaklaşımın avantajı, büyük verilerin işlenebilmesine imkân sağlayarak hesaplama ihtiyacını azaltacak şekilde iyileştirmenin sadece gerekli bölgelerde uygulanabilmesidir.

DeHaemer ve Zyda (1991), Schmitt'in bikübik yüzeylere uyguladığı uyarlanabilir alt bölümlene yöntemini, benzer şekilde poligonal yapıdaki yüzeylere uygulamışlardır. İşlem bir tane dörtgen yapıdaki poligon ile başlar. İstenilen hata toleransı sağlanıncaya kadar yöntem tekrarlanarak poligonu böler. Hata toleransını sağlamayan poligon iki veya dört parçaya bölünebilir (Şekil 2.3). Poligon iki parçaya bölünecekse, bölme işlemi en uzun kenar doğrultusunda olur. Bölme noktası poligonun merkez noktası veya en büyük hatanın olduğu nokta olabildiği gibi maksimum eğriliğin olduğu nokta olarak da seçilebilir. Yöntem, bölme işleminden sonra komşu poligonlar arasında oluşabilecek boşlukları doldurmaktadır. Yaptıkları örnek bir çalışmada bir insan büstü modelinde 112.640 noktadan oluşan veri 0,838 mm hata toleransı elde edilecek şekilde 12.821 poligon ile tanımlanabilmiştir. Yöntemde genel olarak kaba toleranslar verildiğinde çok başarılı sonuçlar elde edilmektedir.

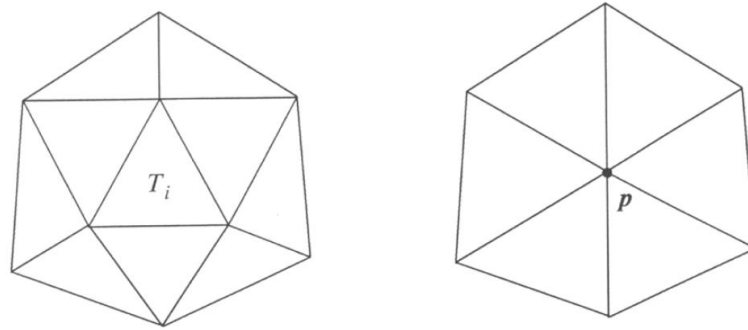


Şekil 2.3 DeHaemer ve Zyda'nın bölümlene yöntemi (DeHaemer, Zyda 1991)

Hinker ve Hansen (1993) eş düzlemli veya yaklaşık eş düzlemli poligonların birleştirilerek karmaşık tek bir poligona dönüştürülmesi ve daha sonra bu karmaşık poligondan az sayıda basit poligon elde edilmesini önermişleridir. Yöntem ilk aşamada poligonları normallerine göre hızlı bir şekilde yaklaşık eş düzlemli gruplara ayırmaktadır. Her grup poligonların normallerinin ortalama değeri olan bir temsili normal doğrultuya sahiptir. Yöntem poligonun normali ile temsili poligonun normalini karşılaştırır. Eğer her iki normal de belirli bir açısal tolerans dâhilinde ise poligon gruba eklenir ve temsili normal yeniden hesaplanır. İkinci

aşamada hızlı bir yaklaşım ile eş düzlemli poligon grupları birleştirilir ve sınır poligonu elde edilir. Son aşamada ise basit ve güçlü bir üçgenleştirme algoritması birleştirilmiş poligonu üçgenlere çevirir. Algoritmada basitleştirilen modelin köşe noktaları, orijinal modelin köşe noktalarının alt kümesidir. Bu sayede köşe noktalarının taşıdığı bilgiler işlem sırasında değişmeden kalabilmektedir. Uygulamalarda, parça formunun kademeli olarak değiştiği bölgelerde yöntem en iyi sonuçları vermektedir. Yüksek eğriliğe sahip modellerde geniş alanlarda aynı düzlemde poligonlar bulunmadığından, yöntem çok etkili değildir.

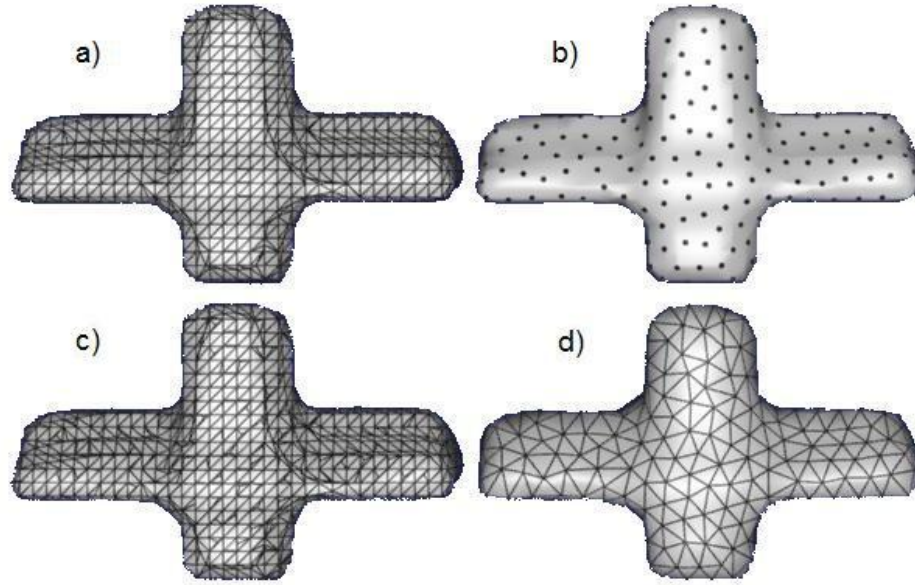
Hamann'ın (1994) üçgenleştirilmiş yüzeyler için veri azaltma yönteminde, üçgenleştirilmiş yüzeylerin her köşe noktasının eğrilik değerleri hesaplanır. Daha sonra her üçgen için köşelerinin eğriliklerinin ortalaması alınarak ağırlık değeri hesaplanır. Köşelerinde küçük eğrilik değerleri olan üçgenlerin ağırlığı da küçük olacaktır. En küçük ağırlığa sahip üçgen tespit edilir ve kendisine komşu üçgenlerle beraber üçgenleştirmeden atılır. Atılan üçgen yerine, kendisine komşu üçgenlerden en küçük kareler yaklaşımı ile bulunan nokta yerleştirilir. Son olarak, üçgenin atılmasından etkilenen bölge, yerleştirilen nokta kullanılarak yeniden üçgenleştirilir ve yeni üçgenlerin ağırlık değerleri hesaplanır (Şekil 2.4). Yöntem, her adımda en küçük ağırlığa sahip nokta atılacak şekilde tekrarlanarak devam eder. Uygulanan yöntemin sonunda küçük eğriliğe sahip bölgeler daha büyük üçgenler ile temsil edilir. Yöntemde azaltma miktarı yüzde olarak belirtilebilir.



Şekil 2.4 T_i üçgeninin atılması ve yeniden üçgenleştirme (Hamann, 1994)

Türk'un (1992) yeniden örnekleme ve nokta atma yöntemi, kullanıcının belirlediği köşe noktası sayısına göre modelin yeniden oluşturulmasına dayanmaktadır. Yöntem, poligonal model yüzeyleri üzerinde, kullanıcının belirlediği sayıda köşe noktalarının rastgele yerleştirilmesi ile başlar. Daha sonra, rastgele yerleştirilen her noktaya, yakınındaki diğer noktalardan uzaklaştırma işlemi uygulanır. Uzaklaştırma işlemi, rastgele yerleştirilen noktalar arasında itme kuvvetleri olduğu kabulüne dayanır. Bunun için, ele alınan bir noktada,

yüzeye teğet olan düzleme yakınındaki noktaların iz düşümü alınır. Bu noktaya, yakın diğer noktalar tarafından uygulanan itme kuvveti hesaplanır. Nokta, uygulandığı düşünülen kuvvete bağlı olarak poligonal yüzey üzerinde hareket ettirilir. Bir poligon üzerinden itilen nokta komşu poligon üzerine geçiş yapabilir. Bir noktanın diğer bir noktaya uyguladığı itme kuvvetinin, hesaplama hızı düşünülerek lineer olarak azaldığı ve belirli bir mesafede sıfır olduğu kabul edilir. Üç boyutlu veri yapısındaki tüm noktaların ele alınması yerine sadece belirli mesafe içerisindeki noktaların ele alınması, işlemin kısa bir sürede yapılabilmesini sağlar. Üçüncü adımda, itme kuvvetleri ile dağılan noktalar ve orijinal modelin köşe noktaları kullanılarak yeniden üçgenleştirme yapılır. Son olarak üçgenleştirmeden orijinal noktalar atılır ve basitleştirilmiş model elde edilir. Şekil 2.5 yöntemin işlem basamaklarını göstermektedir. Yöntem, keskin kenarlar içeren modeller yerine eğrisel yüzeyler içeren modellerde daha başarılıdır.



Şekil 2.5 Yeniden örnekleme ve nokta atma yöntemi (Turk, 1992)

Schroeder, Zarge ve Lorensen (1992) üçgensel yüzeylerin topolojisini bozmadan ve orijinal geometriye iyi yaklaşım sağlayabilecek bir seyreltme yöntemi önermişlerdir. Yöntem, tüm ağ noktalarını birçok sefer tarayarak işlem yapmaktadır. Tarama işleminde her nokta, azaltma kriterlerine göre değerlendirilir. Eğer nokta belirlenen kriterlere uyuyorsa, o nokta ve noktayı kullanan tüm üçgenler silinir. Ağ üzerinde oluşan boşluk lokal üçgenleştirme ile kapatılır. Nokta atma işlemi, yöntemi durduracak şartlardan biri sağlanıncaya kadar devam eder. Durma şartı, orijinal yüzey üzerinden yüzde olarak azalma miktarı veya azaltılacak nokta miktarı

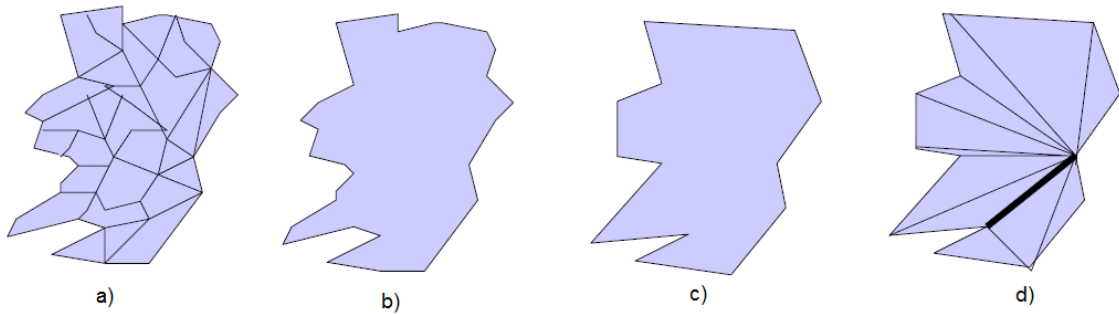
olarak verilebilir. Azaltma kriterleri ise noktanın yüzey üzerinde veya sınırların hemen içinde olmasına göre değişmektedir. Eğer nokta yüzey üzerinde ise, kendisine komşu noktalardan geçen ortalama düzleme göre olan mesafe, belirlenen mesafeden küçük ise bu nokta atılır. Sınırlara komşu olan noktalar ise sınır üzerinde kendisine en yakın iki noktadan geçen doğruya olan mesafeleri ile değerlendirilirler. Eğer bu mesafe belirlenen değerden küçük ise nokta atılır. Yöntemde, basitleştirilmiş modelin noktaları her zaman orijinal modelin noktalarının alt kümesidir.

Hoppe vd. (1993) ağ optimizasyonu yönteminde, bir enerji fonksiyonu tanımlayarak, değerini minimize etmeye çalışmışlardır. Enerji fonksiyonunun üç bileşeni vardır. Bunlar; mesafe enerjisi, nokta enerjisi ve yay enerjisidir. Mesafe enerjisi, yeni nokta grubunun yüzeye olan mesafelerinin karelerinin toplamıdır. Bu değer orijinal ve basitleştirilmiş noktaların birbirine yakınlığını ölçer. Nokta enerjisi, basitleştirilmiş modelin nokta sayısı ile orantılıdır ve modelin fazla sayıda nokta içermesini engeller. Optimizasyon işlemi, ağa nokta eklenebilmesine ve atılabilmesine imkân sağlar. Ağa nokta eklendiğinde mesafe enerjisi azalırken, nokta enerjisi artarak sürekli nokta eklenmesini engeller. Yapılan çalışmalar istenilen sonucu vermediği için enerji fonksiyonuna yay enerjisi ilave edilmiştir. Yay enerjisi, oluşturulacak yeni ağın kenarlarına yerleştirilen yayların etkisini simüle eder. Optimizasyon çözüme yaklaştıkça, yay enerjisi de kademeli olarak azalır ve enerji fonksiyonunun minimuma ulaşmasına yardımcı olur. Yöntem iç içe iki döngü çalıştırır. Dış optimizasyon döngüsü, kenar kaldırma, kenar bölme veya kenar değiştirme işlemleri ile enerji fonksiyonunu minimize etmeye çalışır. Döngü aynı zamanda bu işlemler sırasında olabilecek global ve lokal topoloji hatalarını da kontrol eder ve gerekirse işlemi geri alarak hata oluşmasını engeller. İç optimizasyon döngüsü, noktaların sadece konumlarını optimize ederek, mesafe ve yay enerjilerini minimize etmeye çalışır. Nokta sayısı değişmediğinden, nokta enerjisi bu işlemten etkilenmez.

Hoppe (1996) ağ optimizasyonu yöntemini geliştirerek iki yeni enerji fonksiyonu ilave etmiştir. Yöntemde, mesafe ve yay enerjileri ağ optimizasyonu yöntemine benzer şekildedir. İlave edilen skaler enerji fonksiyonu, ağın köşe noktalarının skaler niteliklerinin korunmasını sağlamaktadır. Skaler nitelikler, ağ üzerinde renk dağılımı, normal vektörü ve doku koordinatları gibi bilgiler içeren gölgelendirme fonksiyonunun parametreleridir. Ayrıca süreksizlik eğrilerinin geometrik hassasiyetini ölçen süreksizlik fonksiyonu da enerji fonksiyonuna ilave edilmiştir. Süreksizlik fonksiyonu, parça kenarları gibi formu belirleyen özelliklerin korunabilmesini sağlar. Ayrıca bu çalışmada, kenar kaldırma, kenar bölme ve

kenar değiştirme işlemlerinden sadece kenar kaldırma işleminin yüzey basitleştirme için yeterli olabildiği gösterilmiştir.

Kalvin ve Taylor'ın (1996) süperyüz yöntemi üç temel adıma dayanır. Bunlar süperyüz oluşturulması, sınır düzeltme ve süperyüz üçgenleştirmesidir. İlk adımda süperyüz oluşumu için bir kaynak yüz seçilir ve komşu yüzler bu kaynak yüz'e eklemeye çalışır. Eğer eklenecek yüz, yaklaşım düzlemine uygunluk ve sınır hatası şartlarını karşılıyorsa süperyüz'e eklenir. Süperyüz daha fazla büyüemeyecek duruma geldiğinde yöntem yeni bir kaynak yüz seçer ve tüm yüzler bir süperyüz'e dâhil oluncaya kadar ekleme işlemleri devam eder. İkinci adımda, komşu süperyüzler arasındaki kenarlar tek bir doğrusal süperkenara dönüştürölür. Oluşan büyük süperkenar, her sınır noktası belirlenen hata toleransı içerisinde kalacak şekilde tekrarlamalı olarak ikiye bölünür. Son olarak, üçgenleştirme adımında tüm süperyüzler yaklaşık düzleme izdüşürölür. Oluşan iki boyutlu poligon, yıldız poligonlara ayrıştırılır ve yıldız poligon üçgenleştirilir (şekil 2.6). Yöntem, her zaman belirlenen hata toleransı içerisinde kalınmasını garanti eder ve basitleştirilen modelin noktaları orijinal modelin noktalarının alt kümesi olur.



şekil 2.6 Calvin ve Taylor'ın süperyüz yöntemi (Kalvin, Taylor, 1996)

Cohen vd. (1996) model üzerinde global hatanın kontrolünü sağlayabilecek bir nokta atma yöntemi geliştirmişleridir. Yöntem, verileri azaltılmış model yüzeyini, belirlenen hata değerine göre oluşturulan iç ve dış ofset yüzeyleri arasında kalmaya zorlayarak hata kontrolünü sağlar. Yöntemde öncelikle, azaltılmış yüzeyi belirleyen aday üçgenler hesaplanır. Aday üçgenler, iki ofset yüzeyi arasında bulunma ve yüzeylerle kesişmeme şartları göz önünde bulundurularak oluşturulur. Daha sonra aday üçgenler, her aday üçgenin örttüğü nokta sayılarına göre sıralanır. En çok nokta örten aday üçgenden başlayarak, aday üçgenin örttüğü noktalar atılır. Noktaların atılması ile oluşan boşluk, delik doldurma işlemi ile kapatılır.

Eck vd. (1995) farklı detay seviyelerini bir modelde barındırmak için wavelett yöntemini kullanmışlardır. Bu detay seviyeleri arasında geçiş yapmak için sadece wavelett katsayıları ilave etmek veya çıkartmak gerekir. Algoritma üç adımdan oluşur. Bu adımlar; bölümlleme, parametrik hale dönüştürme ve yeniden örneklemedir. Bölümlleme adımında, orijinal ağ bölgelere ayrılır. Bunun için, gelişigüzel tek bir yüz seçilir ve artımsal olarak komşu üçgenler bu temel yüze eklenir. Tüm temel yüzlerin büyümesi tamamlandığında, Voronoi diyagramına benzer bir yapı elde edilir. Ekleme işleminin aşağıdaki şartları sağlaması gerekir. Şartlardan biri ihlal edildiğinde yeni bir temel yüz seçilerek işlem devam eder.

- Eklenen yüzlerden oluşan bölge disk ile topolojik olarak aynı yapıda olmalıdır.
- Bölge çiftleri birden fazla ağı ait sınırı paylaşmamalıdır.
- Üçten fazla bölgenin bir noktada buluşmaması gerekir.

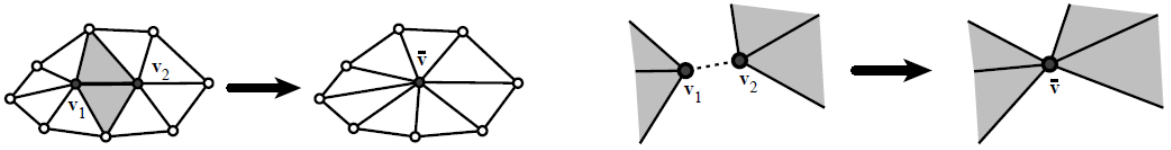
Ayrıca oluşan bölgelerin Delaunay üçgenleştirmesine uygun olup olmadığı kontrol edilir. Gerekğinde bölgeyi oluşturan yüzey bölümlenerek üçgen yapı düzeltilir.

Sonraki adımda, bölge sınırlarında sürekli olacak şekilde tüm bölgelerde, wavelett tanımlaması için parametrik hale dönüştürme yapılır. Son aşama olan yeniden örneklemede, ağı ait tüm bölgeler tekrarlamalı olarak bölümlenir. Her bölümlleme adımında, bir üçgen dört üçgene bölünür. Bölümlleme işlemi belirlenen hata toleransı elde edilinceye kadar devam eder.

Shroeder vd.'nin (1992) noktaların topolojik sınıflandırılmasına dayanan azaltma yöntemini temel alan bir yöntem Ciampalini vd. (1997) tarafından geliştirilmiştir. Topolojik sınıflandırma sonrası, yeni bir yaklaşım olan global yaklaşım hatası kriterini sağlayan tüm atılmaya aday noktalar modelden çıkarılır. Noktaların modelden çıkarılması sırasında hatanın bölgesel yığılmasını engellemek için aday nokta seçimine yönelik özel bir yöntem geliştirilmiştir. Bunun için atılacak aday noktalar global ve lokal hata azalacak şekilde sıralanırlar. Noktalar atıldıktan sonra modelde oluşan boşluklar üçgenleştirme ile kapatılır.

Garland ve Heckbert (1997a) nokta çiftleri arasında tekrarlamalı birleştirme işlemine dayalı yüzey basitleştirme algoritması geliştirmişlerdir. Yöntem aynı zamanda, ardışık nokta çiftlerinin birleştirilmesi sayesinde, modeldeki temas etmeyen bölgelerin birbirine bağlanmasını da sağlar (Şekil 2.7). Bu, hem görsel olarak hem de geometrik hata bakımından çok daha iyi bir yaklaşıma olanak sağlar. Ayrıca, topolojik olarak bağlantının sağlanabilmesi için manifold olmayan poligonal modeller de desteklenir. Yöntemde, köşe noktalarının bir kenar ile birbirine bağlı olması gerekmemektedir. Ele alınan nokta çifti taşınarak, farklı bir

pozisyonundaki bir noktada birleştirilir. Bu esnada noktaların kaldırılması nedeniyle bozulan üçgenler de atılır. Birleştirilecek nokta çiftlerinin seçim kriteri, noktaların birleşme işlemi için orijinal konumlarına göre en az miktarda yer değiştirmesinin en iyi yaklaşımı sağlayacağı kabulüne dayanır. Yeni noktanın konumunun bulunabilmesi için, orijinal noktaların konumlarının geometrik ortalaması bulunabilir. Ancak bu basit yaklaşım yerine, ikinci dereceden hata fonksiyonunun minimumunun bulunması, çok daha iyi bir yaklaşım sağlar. Önceki yöntemlerle kıyaslandığında, etkinlik, kalite ve her tür poligonal modele uygulanabilirlik özelliklerinin tümünü sağlaması bakımından avantajlıdır.



Şekil 2.7 Temas eden ve etmeyen nokta çiftlerinin birleştirilmesi (Garland, Heckbert, 1997a)

Yüzeylerde veri azaltmanın öneminin her geçen gün artması nedeniyle, bu alanda çalışmalar devam etmekte ve yeni yöntemler geliştirilmektedir.

3. YÜZEYLERİN GEOMETRİK MODELLEMESİ

CAD/CAM’de kullanılan yüzey modelleme yöntemleri genel olarak “parametrik” ve “parametrik olmayan” olarak ikiye ayrılabilir. Parametrik yüzey formlarından yaygın olanlarından biri NURBS (Non-Uniform Rational Bezier-Spline)’dır. Yaygın kullanılan parametrik olmayan yüzey modelleme yöntemleri ise poligonal yüzey, Z-map ve bunların farklı formlarıdır. Her matematiksel yöntem, kullanıldığı uygulamalara göre avantaj ve dezavantajlar içermektedir. Özellikle CAD uygulamalarında parametrik yüzey yöntemlerinin avantajları daha fazladır. Ancak takım yolu oluşturma gibi özel hesaplamalarda, parametrik olmayan yüzey formları daha avantajlıdır.

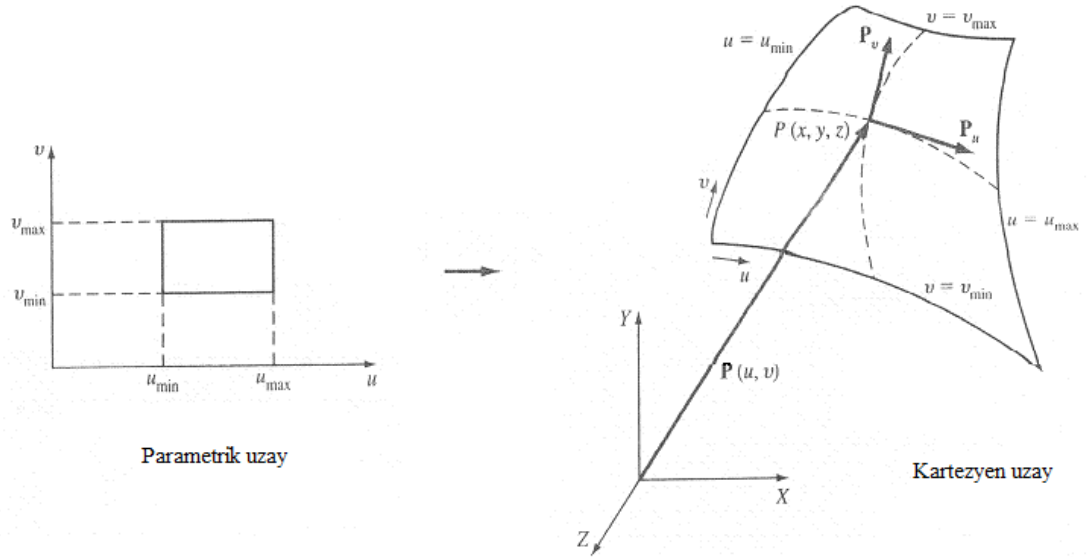
3.1 Parametrik Yüzeyler

Yüzeylerin parametrik gösterimi, u ve v parametreleri ile değişen $\mathbf{P}(u,v)$ sürekli vektör fonksiyonu ile yüzeylerin ifade edilmesidir. Parametrelerin, u - v düzleminde belirlenen aralıkta değişmesi ile $\mathbf{P}(u,v)$ yüzey üzerindeki tüm noktaları tanımlar. En genel durumda, üç boyutlu parametrik yüzeyin denklemi aşağıdaki gibidir.

$$\mathbf{P}(u, v) = [x \quad y \quad z]^T = [x(u, v) \quad y(u, v) \quad z(u, v)]^T \quad (3.1)$$

Bu denklemde parametreler, $u_{\min} \leq u \leq u_{\max}$ ve $v_{\min} \leq v \leq v_{\max}$ aralığında tanımlanır. Denklem, yüzey üzerindeki bir noktanın koordinatlarını, pozisyon vektörünün bileşenleri şeklinde verir. Aynı zamanda $\mathbf{P}(u,v)$ fonksiyonu Şekil 3.1’de görülebileceği gibi, parametrik uzayı (u ve v) Kartezyen uzaya eşler (x , y ve z). u ve v parametreleri, minimum ve maksimum değerler arasında limitlenmiştir. Genellikle bu limit $[0, 1]$ aralığıdır.

Parametrik gösterim ile düzlemsel yüzeyler, doğrusal yüzeyler, silindirik yüzeyler, dönel yüzeyler gibi analitik yüzeyler tanımlanabileceği gibi, serbest formlu sentetik yüzeyler de tanımlanabilir. Yaygın kullanılan sentetik yüzey türleri, coons yüzeyler, bikübik yüzeyler, Bezier yüzeyleri, B-spline yüzeyleri ve NURBS (Non-Uniform Rational B-Spline) yüzeyleridir.



Şekil 3.1 Yüzeyin parametrik gösterimi (Zeid, 1991)

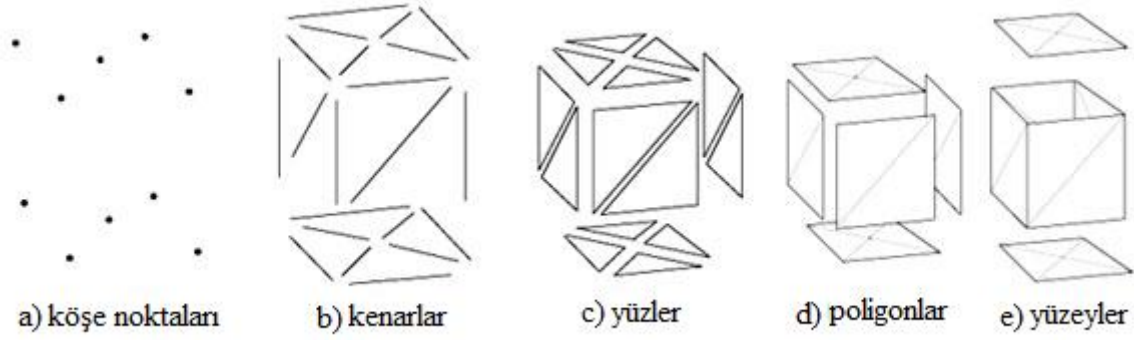
CAD/CAM uygulamalarında çok yaygın olarak kullanılan NURBS yüzeyler, Bezier ile B-spline yüzeylerinin genelleştirilmiş halidir ve aşağıdaki denklem ile tanımlanır.

$$\mathbf{P}(u, v) = \frac{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m N_{i,p}(u) N_{j,q}(v) \omega_{i,j} \mathbf{P}_{i,j}}{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m N_{i,p}(u) N_{j,q}(v) \omega_{i,j}} \quad 0 \leq u \leq 1 \text{ ve } 0 \leq v \leq 1 \quad (3.2)$$

Denklemden, u ve v parametreler, u yönündeki derece p , v yönündeki derece q , $N_{i,p}$ ve $N_{j,q}$ B-spline taban fonksiyonları, $\mathbf{P}_{i,j}$ kontrol noktaları, $\omega_{i,j}$ ağırlık değerleridir. Her tür analitik ve sentetik yüzeyi ifade edebilmesi, kontrol noktalarının ağırlıklarının tanımlanabilmesi ve yüzey üzerinde lokal kontrolün mümkün olması gibi avantajları nedeniyle günümüzde en yaygın kullanılan parametrik yüzey tanımlama yöntemidir.

3.2 Poligonal Yüzeyler

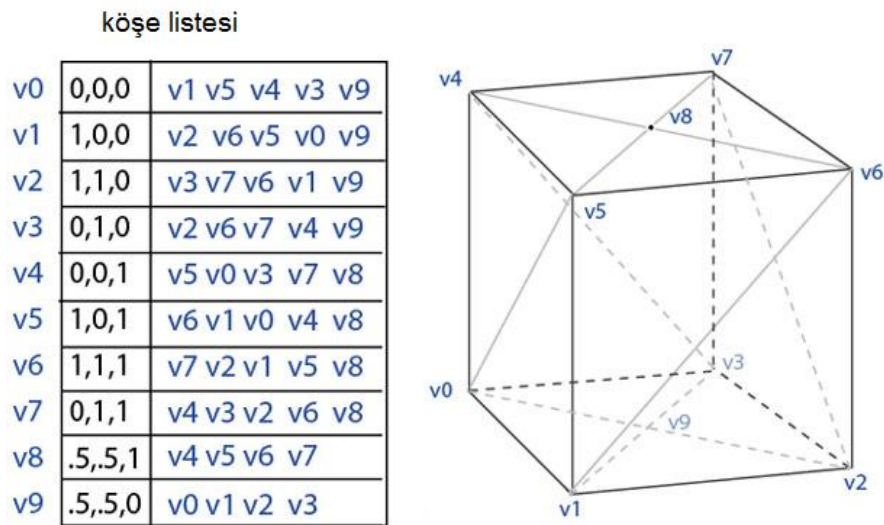
Poligon ağı bir nesne formunun, köşe noktaları, doğrusal kenarlar ve düzlemsel yüzler ile tanımlanmasıdır. Düzlemsel yüzler, üçgenlerden, dörtgenlerden veya çokgenlerden oluşabilir. Poligonal yüzeyler, bilgisayar grafiği ve geometrik modellemede çok yaygın olarak kullanılmaktadır.



Şekil 3.2 Poligonal yüzey elemanları [1]

Poligonal model, köşe noktaları, kenarlar, yüzler, poligonlar ve yüzeyler gibi farklı elemanlar içerebilir (Şekil 3.2). Poligonal yüzeyler, köşeler, kenarlar ve yüzler gibi elemanları barındıran çeşitli yöntemlerle tanımlanabilirler [1]. Bu yöntemler şunlardır;

- Köşe - köşe ağları: Poligonların kullandığı köşe noktalarının basit bir listesidir. En basit tanımlama şeklidir. Poligonal ağın yüz ve kenar bilgileri bu yöntemde saklanmaz. Köşe - köşe ağlarına bir örnek Şekil 3.3'te verilmiştir. Gölgeleme ve kaplama gibi işlemler için yüzlerin oluşturulması gerektiğinden bilgisayar grafiğinde genellikle tercih edilmez. Az hafıza alanı gerektirmesi nedeniyle, sadece parça formunun ifade edileceği durumlarda tercih edilebilir. Takım yolu hesaplamaları için sadece parça formu yeterli olduğundan sıklıkla kullanılan yöntemdir.

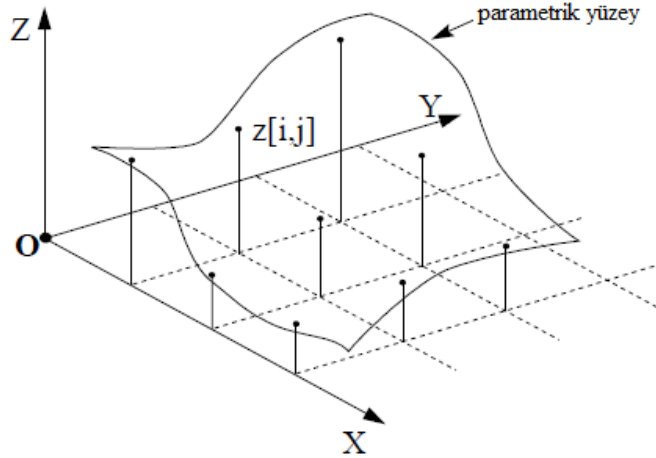


Şekil 3.3 Köşe- köşe ağı [1]

- Yüz - köşe ağları: Modele ait köşe noktalarının listesi ile birlikte yüzlerin listesinin de oluşturulduğu yöntemdir. Yüz listesinde, yüzlere ait köşe noktaları ve köşe listesinde, o köşenin çevresindeki yüzler bulunur. Bilgisayar grafiğinde en çok kullanılan yöntemdir.
- Kanatlı kenar ağları: Modele ait köşe noktaları, yüzler ve kenarların birlikte saklandığı yöntemdir. Yüz - köşe ağlarından farklı olarak, 4 kenara ait bilgiyi bulunduran kenar listesinde, bir kenardan ayrılan her iki uçtaki seçilen kenara en yakın iki kenar saklanır. Yöntemin dezavantajı geniş hafıza alanı gerektirmesidir. Ancak poligonal model üzerinde değişiklik yapmayı kolaylaştırması nedeniyle buna yönelik yazılımlar tarafından tercih edilmektedir.

3.3 Z-Map ve Genişletilmiş Z-Map Modeli

Z-map modeli, parametrik olmayan yüzey modellemenin özel bir formudur ve XY düzlemindeki ağ noktalarına karşılık gelen yükseklik değerlerini içeren iki boyutlu bir dizedir (Şekil 3.4). Z-map modeli takım yolu hesaplama, takım yolu doğrulama ve simülasyonu, CAPP (Computer-Aided Process Planning) gibi alanlarda yaygın şekilde kullanılmaktadır.

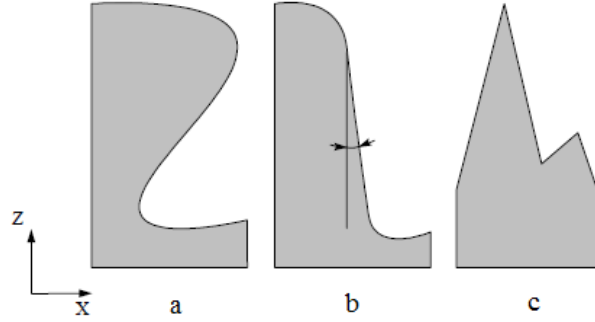


Şekil 3.4 Ağ noktalarından Z-map oluşturulması (Park vd., 2002)

Basit veri yapısı sebebiyle yüzey üzerinde yapılacak değişiklik ve hesaplamalar için Z-map oldukça iyi bir yüzey tanımlama formudur. Ancak dezavantajı, özellikle yüksek hassasiyet gerektiren uygulamalarda çok yüksek hafıza ve hesaplama süresi gerektirmesidir. Örneğin 0,05 birim hassasiyette 1000x1000 birimlik bir XY alanında, her bir ağ noktası için 4 bayt'lık veri depolandığında, tüm model için 1,49 GB'lık depolama alanı gerekmektedir. Bu nedenle yöntemin çok yüksek hassasiyet gerektiren ve çok geniş XY alanlarına uygulanması pratik bir

çözüm değildir.

Ayrıca bazı geometrik şekillerin de Z-map ile hassas bir şekilde tanımlanmasında güçlükler vardır. Bunlar, ters açılı yüzeyler (a), dik ve dike yakın açıdaki duvarlar (b) ve keskin kenarlardır (c) (Şekil 3.5).



Şekil 3.5 Z-map ile tanımlanmasında güçlükler olan geometriler (Park vd., 2002)

Parametrik bir yüzeyin Z-map modeline dönüştürülmesi, 2 boyutlu bir ızgarada her ağ noktasına (i,j) karşılık gelen yükseklik değerinin $z[i,j]$ hesaplanması ile yapılabilir. Z-map modeli elde edildikten sonra birçok önemli operasyon istenilen konumdaki z değerinin hesaplanması haline dönüşür. İstenilen bir (x,y) konumdaki z değerinin elde edilmesi, o noktaya karşılık gelen ağ noktasının (i,j) bulunması ve buradaki $z(i,j)$ değerinin okunması şeklinde gerçekleşir. Eğer istenilen (x,y) konumu, tanımlanan ağ noktaları üzerine denk gelmedi ise, çevre noktaların z değerlerinden bir enterpolasyon yöntemi ile ara noktanın z değeri hesaplanabilir. Tüm yüzey geometrisi pürüzsüz, dik duvar ve keskin kenar içermeyen bir form olduğunda enterpolasyon ile hesaplanan z değeri ile gerçek z değeri bir birine çok yakın olacaktır.

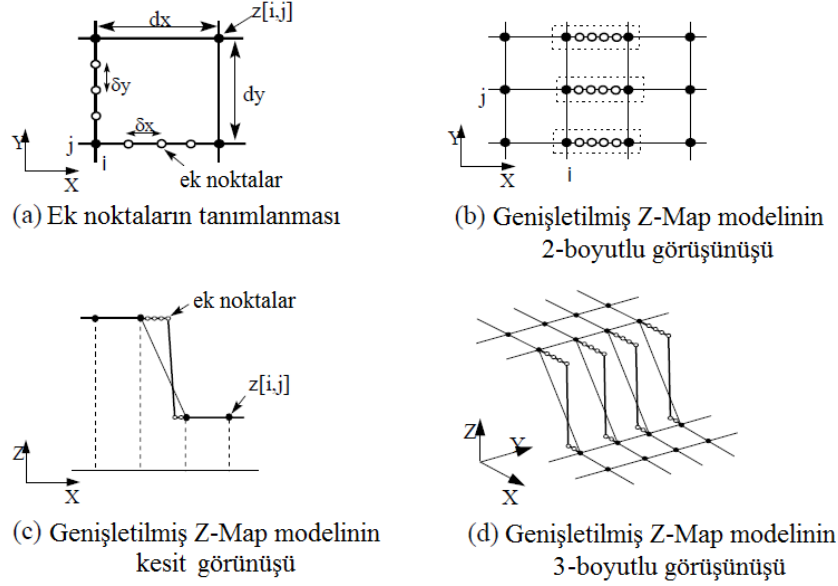
Parametrik bir yüzeyi Z-map formuna dönüştürülmesinde kullanılabilecek yöntemlerden biri 2D Jacobian Inversion olarak adlandırılan diferansiyel geometri kullanımıdır. Z-map dönüşüm işlemi aşağıdaki işlem basamakları ile gerçekleştirilir. Köşe noktası (x_0, y_0) noktasında bulunan, dikdörtgensel parametrik olmayan bir bölgede, düzenli bir ağ tanımlandığında, γ ağ adımı olarak kabul edildiğinde, ağ noktaları aşağıdaki denklemler ile tanımlanabilir.

$$x_i = x_0 + \gamma \cdot i \quad \text{ve} \quad y_i = y_0 + \gamma \cdot j \quad \{x_i, y_i : i \in [0,m], j \in [0,n]\} \quad (3.3)$$

Bu noktadaki z değeri ise $z(i,j)$ matris elemanı olacaktır. Ağ noktalarının Z-map matrisindeki karşılığı olan i ve j indisleri ise aşağıdaki denklemler ile hesaplanabilir.

$$i = (x - x_0) / \gamma \quad \text{ve} \quad j = (y - y_0) / \gamma \quad (3.4)$$

Keskin kenarlar veya dik duvarlar gibi formlar içeren parça yüzeylerinin tanımlanması için Z-Map yöntemi hassasiyet bakımından yeterli olmayabilir. Bu problemin aşılmasına yönelik olarak geliştirilen “genişletilmiş Z-Map” modelinde, temel Z-Map modelinin belirli dilimlerine ek ağ noktaları yerleştirilerek, gerekli hafıza miktarında çok büyük artışlara neden olmadan lokal olarak hassasiyet artırılabilir.



Şekil 3.6 Genişletilmiş Z-Map modeli (Park vd., 2002)

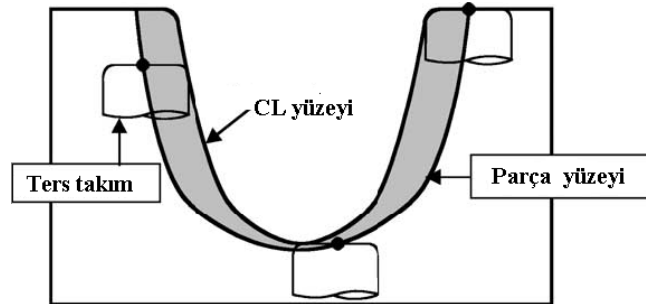
Genişletilmiş Z-Map modelinde, ağ kenarı üzerine yerleştirilen ek noktalar üniform olarak dağılmaktadır (Şekil 3.6) ve ek noktalar arasındaki iki boyutlu mesafe istenilen işleme toleransına bağlı olarak belirlenmektedir. Park vd.’nin (2002) yapmış oldukları uygulamada, 1190x890 birim ölçülerinde örnek bir model, 0,8 birim adım değerinde Z-Map modeli ile tanımlandığında 6,62 MB hafıza alanı gerektirmektedir. Aynı modelin 0,04 birim adım değerinde Z-Map modeli ile tanımlanması ise 2,6 GB hafıza alanı gerektirecektir. Bunun yerine sadece dik duvar ve keskin kenarlara denk gelen bölgelere 0,04 birim adım değerinde ek noktalar ilave edilen genişletilmiş Z-Map modeli ise 14,62 MB hafıza alanı gerektirmiş ve dik duvar ve keskin kenarların daha hassas tanımlanmasını sağlamıştır.

Ters açılı formlar Z-map’in daha geliştirilmiş bir formlarından biri olan çok katmanlı Z-map yöntemi ile tanımlanabilmektedir. Bu durumda, verilen bir (x,y) ağ noktasında birden fazla z değeri bulunabilmektedir.

4. TAKIM YOLU OLUŞTURULMASI

Seçilen takıma göre, parça yüzeyinden ardışık takım konum noktalarının (cutter-location (CL)) hesaplanması takım yolu oluşturma temelidir. Takım yolu oluşturma yöntemleri, takım yolu oluşturma yüzeyine göre takım temas (cutter-contact (CC)) yüzeyi yaklaşımı (aynı zamanda parça yüzeyi) ve CL yüzeyi yaklaşımı olmak üzere iki gruba ayrılır. CC yüzeyi yaklaşımında parça yüzeyinden örneklenen sıralı CC noktaları takım yolunu oluşturur ve her CC noktası CL noktasına dönüştürülür. CL yüzeyi yaklaşımında ise CL yüzeyi, takım yollarının üzerinde oluşturulduğu, yol oluşum yüzeyi olarak kullanılır. Genellikle CL yüzeyi yaklaşımının takım yolunun yumuşaklığı, talaş yüklemesinin aynı kalması veya değişiminin düzgün olması gibi yüksek hızlı işleme gereksinimlerini karşılama bakımından CC yüzeyi yaklaşımından daha iyi olduğu bilinir.

CL yüzeyi yaklaşımında ilk adım, parça yüzeyi ile ters takım yüzeyinin toplamı ile tanımlanan CL yüzeyinin hesaplanmasıdır. Diğer bir deyişle, CL yüzeyi ters takımın süpürme hacminin parça yüzeyine eklenmesi ile elde edilir (Şekil 4.1). Parça yüzeyinin genellikle bir grup parametrik yüzey ile tanımlanmasına karşın, parametrik yüzeylerin toplama operasyonu altında sabit olmamaları nedeniyle CL yüzeyinin parametrik yüzeyler formunda elde edilmesi çok güçtür. Bu güçlükten kaçınmak için CL yüzeyi hesaplamasında toplama operasyonunda sabit olan üçgenleştirilmiş ağ veya Z-map modeli gibi farklı tanımlama formları kullanılabilir (Choi ve Jerard, 1998).



Şekil 4.1 Takım konum – CL yüzeyi

Ayrık parametrik olmayan yüzey modellemenin özel bir formu olan Z-map, düzenli ağ noktalarından örneklenen yüzeyin Z değerleri olan reel sayıların iki boyutlu dizisidir. Basitliği nedeniyle Z-map modeli 3 eksen NC işleme uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak, Z-map modeli, yüksek hassasiyet elde etmek için çok fazla işlem zamanı ve çok geniş bellek alanı gerektirdiğinden yüksek hassasiyetteki işlemeye uygulanması zordur.

Modelin küçük üçgensel yüzeylerden oluşturulduğu üçgenleştirilmiş ağ tabanlı takım yolu oluşturma algoritmaları, yüzey tabanlı algoritmalara göre daha kararlıdır ve aynı zamanda veri büyüklüğü ve hesaplama süresi bakımından, Z-Map tabanlı yaklaşımlara göre biraz daha avantajlıdır (Park, 2004).

Üçgenleştirilmiş ağ ve Z-Map yöntemleri takım yolu oluşturma algoritmalarında başarı ile kullanılmalarına rağmen, her iki yöntem de yüksek hassasiyet için fazla işlem zamanı ve bellek alanı gerektirmektedir. Bu amaçla ağ ve nokta yapılı geometrik modellerde veri azaltma amaçlı çeşitli algoritmalar geliştirilmiştir. Bunların temel amacı, objeyi tam olarak daha az nokta veya üçgen kullanarak tanımlayabilmektir.

4.1 Parametrik Yüzeylerden Takım Yolu Oluşturulması

Parametrik formda tanımlanan yüzeylerde takım yolu hesabı için, parametre yardımı ile yüzeyden örneklenen CC noktaları, takım ofseti eklenerek CL noktasına dönüştürülür. Parça yüzeyi ile takım temas noktasında (CC noktası) temas halinde olan küresel uçlu takımın, takım konum noktası (CL noktası) aşağıdaki denklem ile tanımlanır (Şekil 4.2 a);

$$\mathbf{r}_{cl} = \mathbf{r}_{cc} + \rho \cdot (\mathbf{n} - \mathbf{a}) \quad (4.1)$$

Burada, $\mathbf{r}_{cl}$ takım konum (CL) noktası vektörü, $\mathbf{r}_{cc}$ takım temas (CC) noktası vektörü, ρ küresel uçlu takımın yarıçapı, $\mathbf{a}$ takım eksen vektörü olarak adlandırılan birim vektör, $\mathbf{n}$ takım temas (CC) noktasındaki birim yüzey normal vektörüdür. 3 eksen takım yolu hesabı için $\mathbf{a}$ vektörünün değeri (0, 0, 1)'dir.

Takım yarıçapı ρ ve köşe yarıçapı χ olarak verilen bir köşe yarıçaplı takım için, CL noktası $\mathbf{r}_{cl}$, üç öteleme vektörünün toplamı olarak ifade edilir (Şekil 4.2 b);

$$\mathbf{r}_{cl} = \mathbf{r}_{cc} + \mathbf{t}_1 + \mathbf{t}_2 + \mathbf{t}_3 \quad (4.2)$$

Bu denklemde;

$$\mathbf{t}_1 = \chi \cdot \mathbf{n} \quad (4.3)$$

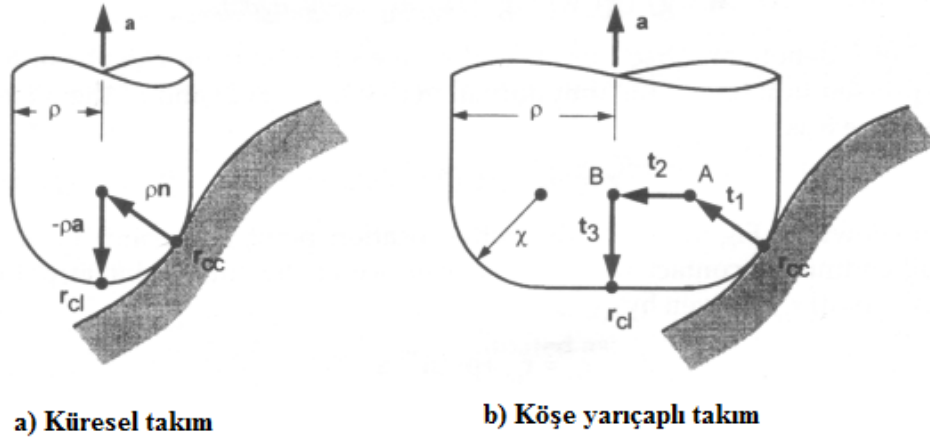
$$\begin{aligned} \mathbf{t}_2 &= (\rho - \chi) \cdot ((\mathbf{n} \times \mathbf{a}) \times \mathbf{a}) / |(\mathbf{n} \times \mathbf{a}) \times \mathbf{a}| \\ &= (\rho - \chi) \cdot (\mathbf{n} - (\mathbf{a} \cdot \mathbf{n}) \cdot \mathbf{a}) / (1 - (\mathbf{a} \cdot \mathbf{n})^2)^{1/2} \end{aligned} \quad (4.4)$$

$$\mathbf{t}_3 = -\chi \cdot \mathbf{a} \quad (4.5)$$

Buna göre $\mathbf{r}_{cl}$

$$\mathbf{r}_{cl} = \mathbf{r}_{cc} + \chi \cdot (\mathbf{n} - \mathbf{a}) + (\rho - \chi) \cdot (\mathbf{n} - \alpha \cdot \mathbf{a}) / (1 - \alpha^2)^{1/2}, \text{ eğer } \alpha \neq 1 \text{ ise} \quad (4.6)$$

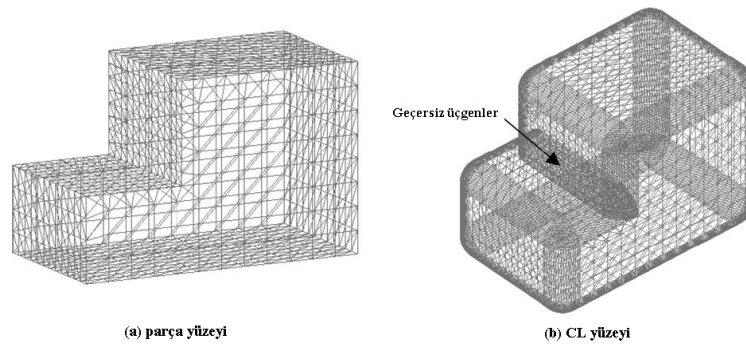
Burada $\alpha = \mathbf{a} \cdot \mathbf{n}$ 'dir. (4.6) denkleminde, $\mathbf{r}_{cc}$ yerine parametrik yüzey denklemi $\mathbf{r}(u, v)$ konulduğunda, denklem takım konum yüzeyini (CL) tanımlayacaktır



Şekil 4.2 Takım konum noktasının hesabı (Choi ve Jerard, 1998)

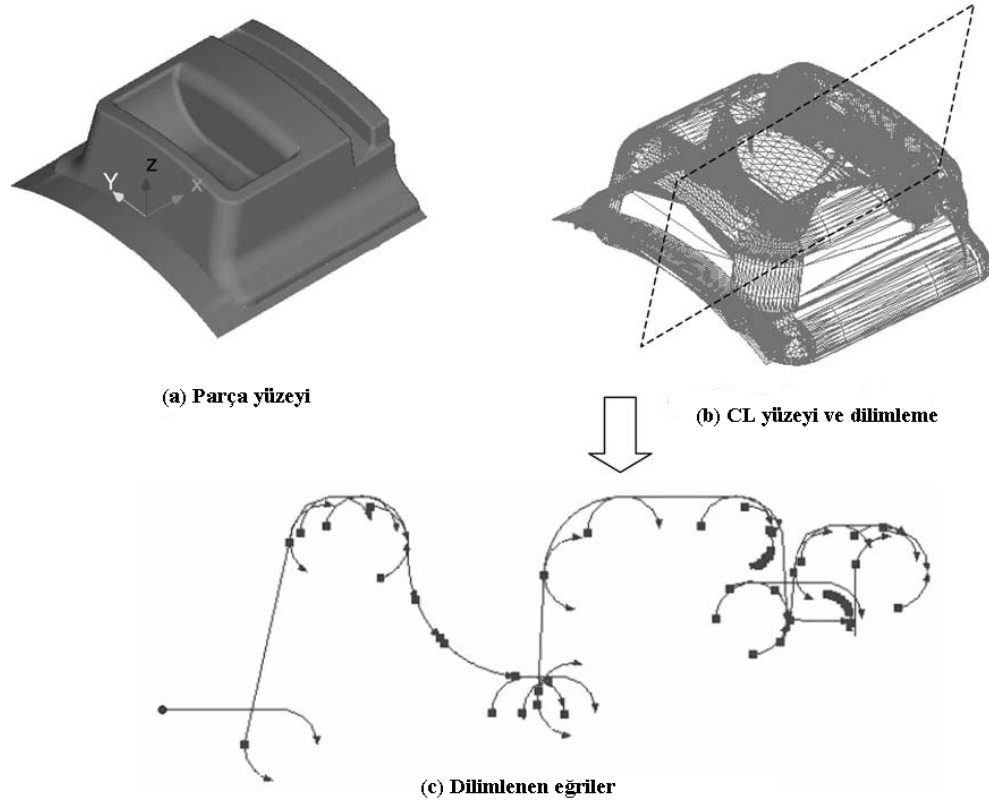
4.2 Poligonal Yüzeylerden Takım Yolu Oluşturulması

3 eksen formülü yüzey işlemede poligonal yüzeyler kullanıldığında CL yüzeyi, küresel takım için poligonal ağın ofsetlenmesi ile elde edilir. Ancak ofsetlenmiş poligonal ağ, CL yüzeyine katılmaması gereken birçok geçersiz poligon içerebilir (Şekil 4.3). Doğru bir takım yolu elde edilebilmesi için CL yüzeyinin içerdiği geçersiz üçgenlerin ayıklanması gereklidir.



Şekil 4.3 Poligonal ağ ofseti (Park, 2004)

Takım yollarını, ofsetlenmiş poligonal ağ üzerinden dilimlenen eğriler oluşturur. Ofsetlenmiş poligonal ağ üzerinden dilimlenen eğriler, dalmaya neden olabilecek kesişmeler ve geçersiz bölümler içerebileceğinden, doğrudan işleme için kullanılamazlar (Şekil 4.4). Bunu engellemek için iki temel yaklaşım kullanılabilir. İlk yaklaşım, dilimlemeden önce CL yüzeyinden geçersiz üçgenlerin çıkarılmasıdır. Diğer yaklaşım ise, CL yüzeyi dilimlendikten sonra, dilimlenen eğrilerden geçersiz bölümlerin çıkarılmasıdır.



Şekil 4.4 Ofsetlenmiş poligonal ağ dilimleme (Park, 2004)

Formlu yüzey işlemede çok yaygın yöntemlerden biri de, belirlenen sınır eğrileri ile limitlenen bölgede yapılan işleme operasyonu olan bölgesel işlemedir. Bu durumda ofsetlenmiş poligonal ağın dilimlemesi yerine, iki boyutlu takım yolu elemanları CL yüzeyi üzerine izdüşürülmektedir. Bölgesel işlemede takım yolu oluşturma prosedürü iki adımdan oluşur. İlk adımda işleme bölgesi iki boyutlu takım yolu elemanları ile doldurulur, ikinci adımda ise bu elemanlar CL yüzeyi üzerine izdüşürülür. İki boyutlu takım yolu elemanları, doğru parçaları, sınır eğrilerinin ardışık ofset eğrileri veya gelişigüzel formda eğriler gibi herhangi bir iki boyutlu geometri olabilir.

Poligonal yüzey tabanlı tüm işleme yöntemlerinde, takım yolu noktalarının düzeni ve sıklığı, poligonal yüzeyin yapısına doğrudan bağlıdır. Bu nedenle doğrudan düzgün nokta dağılımlı bir takım yolu elde edilebilmesi, poligon yapısı ve sıklığının buna uygun olmasına bağlıdır. Benzer şekilde takım yolunun hesaplama hızı da poligon sayısı ile ters orantılı olarak değişir. Bu nedenle poligonal yüzeyler üzerinde veri azaltma ve poligon yapısını düzenleme işlemleri, takım yolu kalitesini arttıracaktır.

4.3 Z-map Yüzeyi Üzerinde Takım Yolu Oluşturulması

Takım yoluna temel teşkil eden CL yüzeyinin, Z-map yapısında oluşturulması “CL Z-map” olarak adlandırılır. CL Z-map oluşturma için iki yöntem mevcuttur. Bunlar “ters-ofset yöntemi” ve “ofset yüzeyi sayısallaştırma yöntemi”dir. CAD modelinden CL Z-map oluşturmak için en basit yöntem, Şekil 4.1’de de gösterilen, takımın parça yüzeyine ters olarak konumlandırıldığı ters-ofset yönteminin kullanımıdır. Bu yöntemde, Z-map örnekleme ile ana Z-map matrisi oluşturulduktan sonra, ters-ofset uygulanarak CL Z-map hesaplanır. Ofset yüzeyi sayısallaştırma yönteminde ise, Z-map modelindeki noktalar arasında üçgenler oluşturularak poligonal yüzey yapısına geçilir. Bu aşamadan sonra takım yolu oluşturma süreci, poligonal yüzeylerde takım yolu oluşturma şeklinde gerçekleşir. Ters ofset yöntemi genel olarak ofset yüzeyi sayısallaştırma yöntemine göre hassasiyet olarak daha kötü olmakla birlikte kaba işleme operasyonları için yeterli hassasiyete sahiptir.

Ters-ofset yönteminde, ters takım yüzeyi bir Z-map noktası üzerinde konumlandırılmakta ve Z-map noktalarından bir bölümü ters takım yüzeyinin içerisinde kalmaktadır. Ters takım yüzeyi içerisinde kalan noktaların ters takım yüzeyine olan mesafelerinin en büyük değeri, takım ofsetini belirlemektedir. Ağ aralıkları γ_x ve γ_y olan Z-map modeli $z[i,j]$ olarak tanımlandığında, $(x[m], y[n])$ ile gösterilen bir ağ noktasında CL Z-map üzerinde küresel takımın z değerleri $z^b[m,n]$ aşağıdaki denklem ile tanımlanabilir;

$$z^b[m,n] = \max \{ z[i,j] + h(i,j,m,n | \rho) \mid (i,j) \in I(m,n | \rho) \} \quad (4.7)$$

burada,

$$I(m,n | \rho) = \{ (i,j) \mid (\gamma_x^2(i-m)^2 + (\gamma_y^2(j-n)^2) \leq \rho^2 \}, \quad (4.8)$$

$$h(i,j,m,n | \rho) = (\rho^2 - (\gamma_x^2(m-i)^2 + (\gamma_y^2(n-j)^2))^{1/2}, \quad (4.9)$$

Denklemden ρ küresel takımın yarıçapını tanımlamaktadır. $I(m,n \mid \rho)$ fonksiyonu, merkezi $(x[m], y[n])$ noktasında olan ρ yarıçaplı daire içerisine düşen $\{(i,j)\}$ ağ noktalarını ve $h(i,j,m,n \mid \rho)$ fonksiyonu, küre merkezi $(x[m], y[n], 0)$ noktasında konumlandırıldığında $(x[i], y[j])$ ağ noktasındaki küre yüzeyinin z değerini gösterir. Denklem (i,j) ağ noktaları için ise aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$z^b[i,j] = \max\{ z^b[i,j], z[m,n] + h(i,j,m,n \mid \rho) \} : (i,j) \in I(m,n \mid \rho) \quad (4.10)$$

Ters ofset işlemi için, her (m,n) ağ noktasında (4.10) denklemi $(\rho/\gamma)^2$ defa hesaplanacaktır.

5. TEKİL DEĞERLERE AYRIŞTIRMA (TDA)

Genel bir $m \times n$ elemandan oluşan reel A matrisi, aşağıdaki şekilde üç ayrı matrisin çarpımı şeklinde ayrıştırılabilir;

$$A_{m \times n} = U_{m \times m} S_{m \times n} V_{n \times n}^T \quad (5.1)$$

Burada U ve V ortogonal matrislerdir. U matrisinin kolonları sol, V matrisinin kolonları ise sağ tekil vektörleri içerir. S ise diyagonal matristir ve tekil değerleri içerir. S matrisinin köşegen değerleri her zaman reel sayılardır ve sol üst köşeden itibaren büyükten küçüğe doğru sıralanırlar. U ve V ortogonal matrisler olmalarından dolayı devrikleri terslerine eşittir ve aşağıdaki şartları sağlarlar:

$$U^T U = U U^T = I_{m \times m} \quad (5.2)$$

$$U^T = U^{-1} \quad (5.3)$$

$$V^T V = V V^T = I_{n \times n} \quad (5.4)$$

$$V^T = V^{-1} \quad (5.5)$$

A matrisinin ayrıştırılması AA^T ve $A^T A$ matrislerinin özdeğer ve özvektörlerinin hesaplanmasına dayanır. $A^T A$ matrisinin özvektörleri V matrisinin kolonlarını oluşturmakta, AA^T matrisinin özvektörleri ise U matrisinin kolonlarını oluşturmaktadır. S matrisinin diyagonal değerleri ise AA^T veya $A^T A$ matrislerinin öz değerlerinin karekökleridir ve tekil değer olarak adlandırılırlar. Bu değerler her zaman reel sayıdır ve azalacak şekilde sıralanmışlardır.

A matrisinin özvektörleri aşağıdaki denklem ile tanımlanabilir. Bu denklemde λ , A matrisinin özdeğerleri x ise özvektörleridir.

$$(A - \lambda I) x = 0 \quad (5.6)$$

Denklem sisteminin çözümünün olabilmesi için aşağıdaki şartın sağlanması gerekir. Bu denklemin λ için çözümleri özdeğerleri verecektir.

$$\det(A - \lambda I) = 0 \quad (5.7)$$

Eğer A matrisi reel matris ise U ve V matrisleri de reel matrislerdir. A matrisi kompleks bile olsa S her zaman reel olur. $p = \min(m, n)$ ve $s = \max(m, n)$ olmak üzere A matrisinin s tane tekil değeri vardır ve bunlardan $s-p$ adedi sıfır değerini alır. $m \geq n$ olduğu kabul edildiğinde ve eğer $r = \text{rank}(A) < n$ ise bu durumda;

$$\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_r > \sigma_{r+1} = \dots = \sigma_n = 0 \quad (5.8)$$

Eğer $\sigma_r \neq 0$ ve $\sigma_{r+1} = \dots = \sigma_n = 0$ ise r , A matrisinin rankıdır. Bu durumda S , $r \times r$ elemanlı bir matris haline gelir. Buna paralel olarak da U ve V de küçülecektir. Böylece TDA, rank hesaplaması için de kullanılabilir. Bu durumda U , S ve V matrisleri aşağıdaki formda yazılabilirler:

$$U_{m \times m} = \begin{bmatrix} U_r \\ U_0 \end{bmatrix} \quad (5.9)$$

$$V_{n \times n} = \begin{bmatrix} V_r \\ V_0 \end{bmatrix} \quad (5.10)$$

$$S_{m \times n} = \begin{bmatrix} S_r & 0 \\ 0 & S_0 \\ \dots & \dots \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5.11)$$

Köşegen S matrisinin belirli bir elemandan sonraki değerleri sıfıra çok yaklaştığından, uygulamalarda ayrılmış U , S ve V matrislerinin tüm değerlerinin kullanımı yerine hız, depolama alanı ve hesaplama miktarı bakımından ayrıştırma işleminin azaltılmış hali uygulanabilir. U matrisinin sadece r adet kolon vektörleri ve buna karşılık gelen V^T satır vektörleri hesaplanır. Geriye kalan U ve V^T kolon vektörleri hesaplanmaz. Bu da tüm ayrışma matrisinin hesaplanmasına göre önemli miktarda hız ve ekonomiklik sağlar.

$$B = U_r S_r V_r^T \quad (5.12)$$

r değerinin p değerinden küçük olması durumunda elde edilen B matrisi orijinal A matrisine çok yakın olacaktır. r değeri p 'ye yaklaştıkça B matris değerleri orijinal A matris değerlerine yaklaşır. Bu durumda U_r matrisi $m \times r$, S_r matrisi $r \times r$ diyagonal ve V_r^T matrisi $r \times n$ olacaktır.

A matrisi $m \times n$ adet eleman içerirken, ayrıştırılan matrislerden r adet terim kullanılmasıyla hesaplanan B matrisinin tanımlanması için toplam $(r \times (m+n+1))$ adet eleman kullanılacaktır. r , gerekli hassasiyeti sağlayacak minimum değer olarak seçildiğinde hesaplamalar için gerekli veri miktarında önemli miktarda azalmalar olacaktır.

6. GEOMETRİK MODELLERİN TANIMLANMASI VE YÜZEY VERİLERİNİN AZALTILMASI KONUSUNDA YENİ YAKLAŞIMLAR

6.1 Z-Map Yüzeylerinin Tekil Değerlere Ayırıştırılması

Tekil değerlere ayırıştırılmış Z-map yüzeyi üzerinde işlemler yapılabilmesi için TDA işleminin anlamının irdelenmesi gereklidir. Bunun için, (5.12) denklemi açık şekilde yazılabilir.

$$B_{m \times n} = \begin{bmatrix} u_{11} & u_{12} & \dots & u_{1r} \\ u_{21} & u_{22} & \dots & u_{2r} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ u_{m1} & \dots & \dots & u_{mr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & s_2 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & s_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{11} & v_{12} & \dots & v_{1n} \\ v_{21} & v_{22} & \dots & v_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ v_{r1} & \dots & \dots & v_{rn} \end{bmatrix}^T \quad (6.1)$$

$$B_{m \times n} = \begin{bmatrix} u_{11} \\ u_{21} \\ \dots \\ u_{m1} \end{bmatrix} s_1 \begin{bmatrix} v_{11} & v_{21} & \dots & v_{r1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_{12} \\ u_{22} \\ \dots \\ u_{m2} \end{bmatrix} s_2 \begin{bmatrix} v_{12} & v_{22} & \dots & v_{r2} \end{bmatrix} + \dots$$

$$\cdot \begin{bmatrix} u_{1r} \\ u_{2r} \\ \dots \\ u_{mr} \end{bmatrix} s_r \begin{bmatrix} v_{1n} & v_{2n} & \dots & v_{rn} \end{bmatrix} \quad (6.2)$$

$$B_{m \times n} = U_1 S_1 V_1^T + U_2 S_2 V_2^T + \dots + U_r S_r V_r^T \quad (6.3)$$

$$B_{m \times n} = B_1 + B_2 + \dots + B_r \quad (6.4)$$

B matrisi kısaca aşağıdaki toplam ile de tanımlanabilir.

$$B = \sum_{k=1}^r U_{ik} S_k V_{kj}^T \quad (i = 1, 2, \dots, m; \quad j = 1, 2, \dots, r) \quad (6.5)$$

B matrisi $U_{ik} S_k V_{kj}^T$ çarpımlarının ayrı ayrı verdiği matrislerin toplamı şeklinde ifade edilmektedir. Öncelikle $U_{ik} S_k V_{kj}^T$ çarpımının daha iyi irdelenebilmesi için, ilk ifade ($k = 1$) ele alınıp, açık şekilde yazılabilir.

$$\begin{bmatrix} u_{11} \\ u_{21} \\ \dots \\ u_{m1} \end{bmatrix} S_1 \begin{bmatrix} v_{11} & v_{21} & \dots & v_{r1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{11}v_{11}S_1 & u_{11}v_{21}S_1 & u_{11}v_{31}S_1 & \dots & u_{11}v_{r1}S_1 \\ u_{21}v_{11}S_1 & u_{21}v_{21}S_1 & u_{21}v_{31}S_1 & \dots & u_{21}v_{r1}S_1 \\ u_{31}v_{11}S_1 & u_{31}v_{21}S_1 & u_{31}v_{31}S_1 & \dots & u_{31}v_{r1}S_1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ u_{m1}v_{11}S_1 & u_{m1}v_{21}S_1 & u_{m1}v_{31}S_1 & \dots & u_{m1}v_{r1}S_1 \end{bmatrix} \quad (6.6)$$

Matrisin tanımladığı yüzey yapısını, bir yönde U diğer yönde de V matrisleri oluşturmaktadır. Aynı zamanda U ve V her iki doğrultuda yüzey karakteristiğinin özelliklerini taşımaktadır. Bunun sonucunda her bir üç boyutlu matris bileşeni, 2 boyutlu U ve V matrisleri ile tanımlanabilmektedir.

Bunun sağladığı avantaj, 3 boyutlu problemin, 2 boyutlu hale indirgenebilmesidir. Böylece karmaşık yüzey problemlerini, daha basit olan eğri problemi haline getirmek mümkün olmaktadır. TDA işleminin kullanımı ile orijinal matrisin her bir bileşeni, 2 boyutta incelenebilecek çok daha basit bir yapıya sahip olabilmektedir. Bu sayede çalışmanın konusu olan veri azaltma işlemi, yüzey üzerinde 3 boyutlu nokta azaltma yerine, çok daha basit olan 2 boyutlu eğri üzerinde nokta azaltma işlemi şeklinde uygulanabilir.

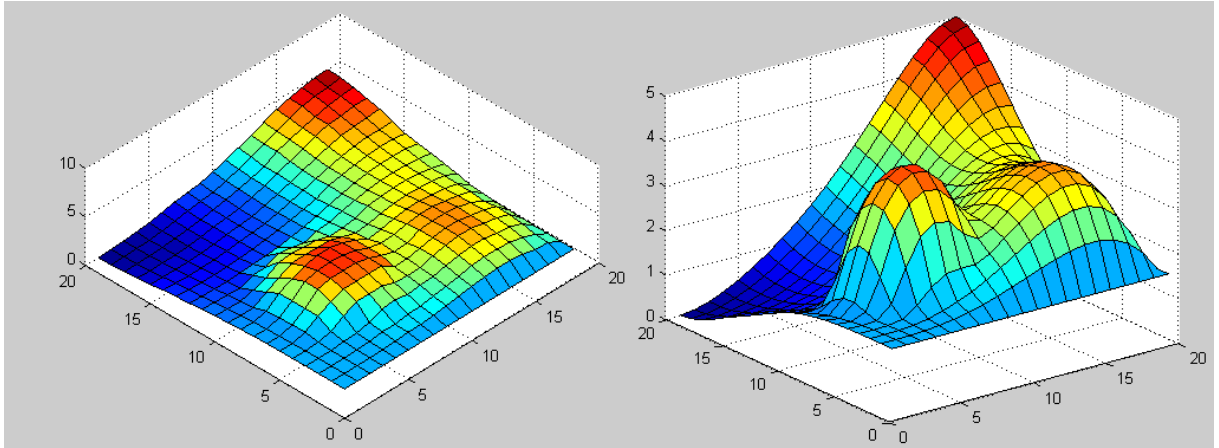
Ayrıca, tekil değer ve vektörlerin tamamı yerine bir bölümünün kullanılması da Z-map modelinin daha az veri ile tanımlanmasını sağlamaktadır. Tekil değerlere ayrıştırılan $m \times n$ adet eleman içeren bir matris, r kullanılan tekil değer sayısı olmak üzere, $(r \times (m+n+1))$ adet eleman ile tanımlanabilmektedir. Kullanılan tekil değer sayısının küçük olması ile birlikte, modeli ifade eden matris çok daha az eleman ile tanımlanabilir hale gelmektedir. Bu sayede, model üzerinde yapılan işlemler daha az eleman üzerinden hesaplanabilmekte ve önemli hız artışı sağlanabilmektedir. Geliştirilen yöntem, hem tekil değerlere ayrıştırma işleminin modeli oluşturan matrisi daha az eleman ile tanımlamasından faydalanmakta, hem de az eleman ile tanımlanabilen model üzerinde veri azaltma işlemi yapmaktadır.

6.2 Z-Map Yüzeylerinin Tekil Değerlere Ayrıştırılmasına Ait Sayısal Örnek

Şekil 6.1’de sayısal değerleri bulunan örnek bir modele ait Z-map matrisine (A matrisi), tekil değerlere ayrıştırma işlemi uygulanmıştır. Tekil değerlere ayrıştırma işleminin sonucu olarak modelde, U , V ve S matrislerinin sadece bir kısmı kullanılarak veri azaltılabilmektedir. Örnek model Şekil 6.2’de grafik olarak görülmektedir.

$$A = \begin{bmatrix} 1,429 & 1,429 & 1,429 & 1,429 & 1,429 & 1,429 & 1,429 & 1,429 & 1,429 & 1,429 & 1,429 & 1,429 & 1,429 & 1,429 & 1,429 & 1,429 & 1,429 & 1,429 & 1,429 & 1,429 \\ 1,429 & 1,429 & 1,435 & 1,452 & 1,482 & 1,530 & 1,596 & 1,680 & 1,781 & 1,895 & 2,018 & 2,141 & 2,255 & 2,348 & 2,404 & 2,408 & 2,337 & 2,169 & 1,876 & 1,429 \\ 1,428 & 1,426 & 1,435 & 1,463 & 1,515 & 1,602 & 1,719 & 1,853 & 2,024 & 2,217 & 2,423 & 2,628 & 2,817 & 2,970 & 3,061 & 3,062 & 2,941 & 2,658 & 2,171 & 1,431 \\ 1,425 & 1,418 & 1,425 & 1,476 & 1,697 & 2,012 & 2,235 & 2,260 & 2,260 & 2,412 & 2,670 & 2,926 & 3,160 & 3,347 & 3,456 & 3,454 & 3,300 & 2,948 & 2,346 & 1,438 \\ 1,417 & 1,400 & 1,415 & 1,705 & 2,416 & 3,018 & 3,254 & 3,190 & 2,826 & 2,634 & 2,784 & 3,067 & 3,324 & 3,528 & 3,646 & 3,641 & 3,471 & 3,087 & 2,436 & 1,458 \\ 1,402 & 1,371 & 1,499 & 2,185 & 3,137 & 3,643 & 3,847 & 3,791 & 3,464 & 2,941 & 2,833 & 3,084 & 3,349 & 3,559 & 3,680 & 3,677 & 3,506 & 3,121 & 2,470 & 1,496 \\ 1,376 & 1,330 & 1,594 & 2,616 & 3,476 & 3,945 & 4,137 & 4,084 & 3,778 & 3,174 & 2,850 & 3,009 & 3,273 & 3,482 & 3,606 & 3,608 & 3,451 & 3,090 & 2,477 & 1,561 \\ 1,336 & 1,278 & 1,580 & 2,674 & 3,522 & 3,987 & 4,178 & 4,125 & 3,822 & 3,211 & 2,765 & 2,870 & 3,129 & 3,336 & 3,463 & 3,478 & 3,346 & 3,028 & 2,481 & 1,661 \\ 1,280 & 1,199 & 1,408 & 2,378 & 3,288 & 3,776 & 3,975 & 3,920 & 3,603 & 2,959 & 2,560 & 2,693 & 2,946 & 3,154 & 3,289 & 3,324 & 3,228 & 2,967 & 2,504 & 1,801 \\ 1,205 & 1,109 & 1,150 & 1,678 & 2,715 & 3,273 & 3,495 & 3,434 & 3,077 & 2,455 & 2,285 & 2,503 & 2,754 & 2,965 & 3,114 & 3,177 & 3,126 & 2,931 & 2,562 & 1,987 \\ 1,111 & 1,005 & 0,939 & 1,087 & 1,608 & 2,340 & 2,623 & 2,547 & 2,140 & 1,942 & 2,055 & 2,320 & 2,572 & 2,794 & 2,964 & 3,061 & 3,061 & 2,939 & 2,669 & 2,222 \\ 0,998 & 0,886 & 0,815 & 0,791 & 0,893 & 1,117 & 1,325 & 1,421 & 1,480 & 1,635 & 1,894 & 2,161 & 2,421 & 2,659 & 2,856 & 2,994 & 3,051 & 3,005 & 2,831 & 2,506 \\ 0,866 & 0,756 & 0,688 & 0,665 & 0,692 & 0,767 & 0,890 & 1,057 & 1,263 & 1,502 & 1,764 & 2,038 & 2,313 & 2,574 & 2,805 & 2,988 & 3,104 & 3,133 & 3,051 & 2,834 \\ 0,720 & 0,619 & 0,560 & 0,546 & 0,578 & 0,657 & 0,783 & 0,952 & 1,161 & 1,405 & 1,675 & 1,962 & 2,257 & 2,546 & 2,814 & 3,046 & 3,222 & 3,322 & 3,323 & 3,200 \\ 0,564 & 0,480 & 0,437 & 0,437 & 0,482 & 0,571 & 0,704 & 0,880 & 1,097 & 1,349 & 1,632 & 1,937 & 2,255 & 2,576 & 2,884 & 3,165 & 3,399 & 3,564 & 3,637 & 3,590 \\ 0,406 & 0,345 & 0,325 & 0,346 & 0,408 & 0,512 & 0,658 & 0,846 & 1,074 & 1,338 & 1,636 & 1,961 & 2,306 & 2,658 & 3,006 & 3,333 & 3,620 & 3,842 & 3,974 & 3,984 \\ 0,256 & 0,222 & 0,230 & 0,277 & 0,363 & 0,487 & 0,650 & 0,852 & 1,093 & 1,372 & 1,686 & 2,030 & 2,398 & 2,780 & 3,163 & 3,531 & 3,862 & 4,131 & 4,309 & 4,359 \\ 0,128 & 0,122 & 0,160 & 0,237 & 0,350 & 0,497 & 0,680 & 0,899 & 1,154 & 1,445 & 1,772 & 2,132 & 2,518 & 2,922 & 3,331 & 3,729 & 4,094 & 4,398 & 4,607 & 4,681 \\ 0,036 & 0,055 & 0,124 & 0,232 & 0,373 & 0,546 & 0,749 & 0,983 & 1,249 & 1,549 & 1,883 & 2,249 & 2,642 & 3,056 & 3,478 & 3,892 & 4,275 & 4,598 & 4,825 & 4,911 \\ 0,000 & 0,036 & 0,130 & 0,266 & 0,435 & 0,632 & 0,853 & 1,098 & 1,370 & 1,670 & 1,999 & 2,357 & 2,742 & 3,147 & 3,563 & 3,973 & 4,355 & 4,680 & 4,911 & 5,000 \end{bmatrix}$$

Şekil 6.1 Örnek modele ait Z-map matrisi



Şekil 6.2 Örnek modelin farklı bakış açılarından Matlab grafiği

Şekil 6.1’de sayısal değerleri verilen örnek modelin, tekil değerlerine ayrılması ile elde edilen tekil değerler Şekil 6.3’te ve tekil vektörler Şekil 6.4 ve Şekil 6.5’te verilmiştir.

$$S = \begin{bmatrix} 47,545 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 \\ 0,000 & 14,090 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 \\ 0,000 & 0,000 & 3,362 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 \\ 0,000 & 0,000 & 0,000 & 1,789 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 \\ 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,875 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 \\ 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,330 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 \\ 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,194 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 \\ 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,183 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 \\ 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,058 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 \\ 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,039 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 \\ 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,031 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 \\ 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,014 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 \\ 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,009 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 \\ 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,005 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 \\ 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,003 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 \\ 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 \\ 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 \\ 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 \\ 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 \\ 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 \\ 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 \end{bmatrix}$$

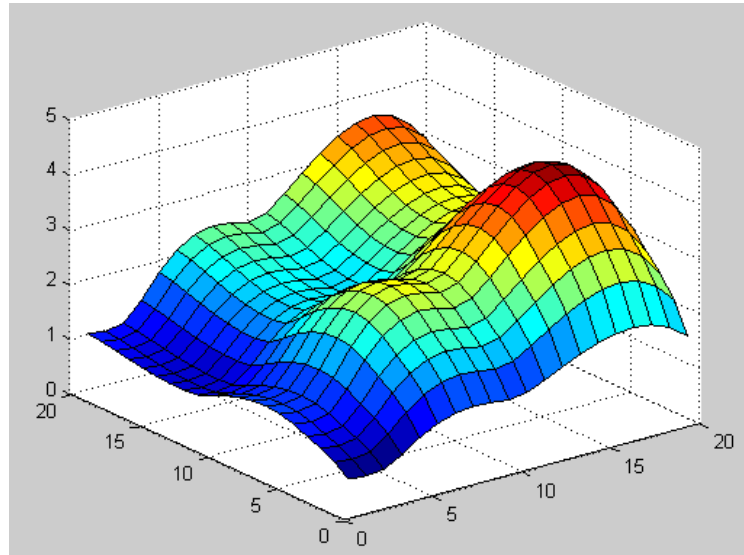
Şekil 6.3 A matrisine ait tekil değerler

$$U = \begin{bmatrix} -0,127 & -0,097 & -0,213 & 0,783 & -0,132 & 0,277 & -0,123 & -0,236 & 0,137 & -0,062 & -0,174 & 0,107 & 0,028 & -0,076 & -0,145 & 0,245 & -0,005 & -0,002 & 0,004 & 0,002 \\ -0,174 & -0,076 & -0,360 & 0,257 & 0,107 & 0,112 & -0,080 & 0,048 & -0,205 & 0,132 & 0,225 & -0,212 & -0,084 & 0,146 & 0,326 & -0,668 & 0,004 & 0,001 & -0,006 & 0,000 \\ -0,206 & -0,063 & -0,459 & -0,101 & 0,264 & 0,046 & -0,045 & 0,296 & -0,260 & 0,189 & 0,399 & -0,065 & -0,023 & -0,092 & -0,186 & 0,511 & 0,005 & 0,003 & 0,001 & -0,005 \\ -0,231 & -0,086 & -0,412 & -0,318 & 0,077 & 0,178 & 0,116 & 0,024 & -0,186 & -0,140 & -0,607 & 0,422 & 0,044 & 0,069 & 0,016 & -0,092 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 \\ -0,257 & -0,175 & -0,142 & -0,342 & -0,242 & 0,163 & -0,166 & -0,436 & 0,110 & -0,469 & 0,187 & -0,371 & -0,075 & 0,172 & -0,147 & 0,038 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 \\ -0,274 & -0,251 & 0,060 & -0,189 & 0,002 & -0,099 & -0,435 & -0,228 & 0,226 & 0,327 & 0,010 & 0,195 & -0,103 & -0,514 & 0,316 & 0,006 & 0,001 & 0,001 & 0,000 & -0,001 \\ -0,280 & -0,293 & 0,177 & -0,007 & 0,278 & -0,088 & 0,139 & -0,229 & 0,227 & 0,442 & 0,027 & 0,097 & 0,171 & 0,543 & -0,258 & -0,028 & -0,001 & -0,001 & 0,000 & 0,001 \\ -0,276 & -0,298 & 0,249 & 0,109 & 0,321 & -0,024 & 0,358 & 0,002 & -0,144 & -0,299 & -0,047 & -0,255 & 0,446 & -0,332 & 0,204 & 0,039 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 \\ -0,264 & -0,264 & 0,282 & 0,133 & 0,106 & -0,085 & 0,133 & 0,240 & -0,040 & -0,255 & 0,021 & 0,146 & -0,756 & 0,018 & -0,098 & -0,024 & 0,001 & 0,000 & 0,000 & -0,001 \\ -0,243 & -0,184 & 0,244 & 0,050 & -0,371 & -0,102 & -0,504 & 0,466 & -0,256 & -0,015 & -0,156 & -0,072 & 0,285 & 0,200 & -0,095 & -0,003 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 \\ -0,216 & -0,056 & 0,056 & -0,050 & -0,660 & 0,196 & 0,512 & 0,007 & -0,112 & 0,225 & 0,282 & 0,221 & 0,055 & -0,093 & 0,071 & -0,010 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 \\ -0,192 & 0,078 & -0,193 & -0,025 & -0,166 & -0,128 & 0,227 & 0,254 & 0,397 & 0,261 & -0,410 & -0,575 & -0,160 & -0,080 & 0,004 & 0,057 & 0,001 & 0,001 & 0,000 & -0,001 \\ -0,185 & 0,139 & -0,192 & 0,036 & -0,009 & -0,315 & 0,018 & 0,192 & 0,384 & -0,244 & 0,217 & 0,242 & 0,211 & -0,181 & -0,326 & -0,288 & -0,262 & -0,186 & -0,076 & 0,289 \\ -0,186 & 0,180 & -0,119 & 0,068 & -0,035 & -0,337 & 0,021 & 0,030 & 0,163 & -0,175 & 0,107 & 0,156 & 0,088 & 0,080 & 0,110 & 0,017 & 0,396 & 0,303 & 0,474 & -0,453 \\ -0,191 & 0,223 & -0,047 & 0,077 & -0,040 & -0,319 & 0,018 & -0,103 & -0,044 & -0,087 & 0,014 & 0,067 & -0,009 & 0,187 & 0,295 & 0,182 & -0,102 & 0,108 & -0,744 & -0,215 \\ -0,199 & 0,263 & 0,021 & 0,064 & -0,024 & -0,253 & 0,008 & -0,189 & -0,202 & 0,004 & -0,049 & -0,012 & -0,062 & 0,140 & 0,220 & 0,170 & 0,334 & -0,489 & 0,183 & 0,507 \\ -0,210 & 0,299 & 0,083 & 0,035 & 0,009 & -0,132 & -0,009 & -0,212 & -0,274 & 0,078 & -0,077 & -0,065 & -0,070 & -0,017 & -0,039 & 0,030 & -0,558 & 0,494 & 0,297 & 0,231 \\ -0,221 & 0,325 & 0,136 & -0,003 & 0,057 & 0,044 & -0,032 & -0,155 & -0,228 & 0,109 & -0,064 & -0,076 & -0,038 & -0,183 & -0,312 & -0,140 & -0,144 & -0,488 & 0,044 & -0,557 \\ -0,232 & 0,339 & 0,175 & -0,039 & 0,110 & 0,271 & -0,058 & -0,002 & -0,029 & 0,065 & -0,006 & -0,032 & 0,011 & -0,191 & -0,317 & -0,180 & 0,530 & 0,359 & -0,284 & 0,209 \\ -0,240 & 0,335 & 0,196 & -0,059 & 0,159 & 0,537 & -0,084 & 0,258 & 0,346 & -0,092 & 0,099 & 0,080 & 0,042 & 0,205 & 0,362 & 0,137 & -0,199 & -0,104 & 0,109 & -0,008 \end{bmatrix}$$
Şekil 6.4 A matrisine ait U tekil vektörleri

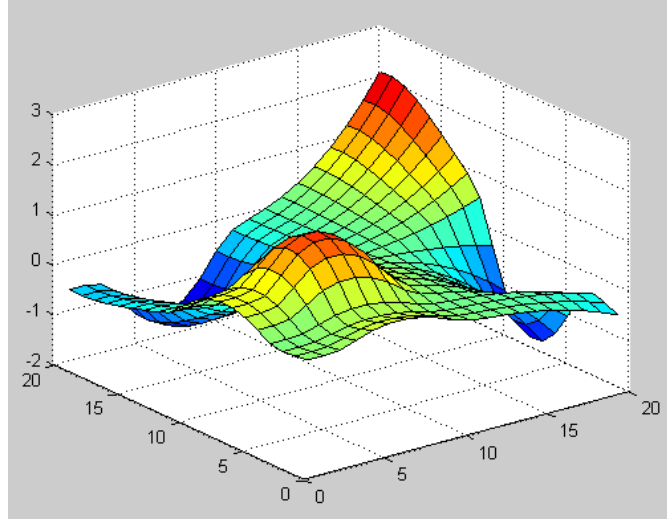
$$V = \begin{bmatrix} -0,088 & -0,127 & -0,387 & 0,324 & -0,388 & -0,442 & 0,152 & 0,271 & 0,287 & -0,215 & -0,019 & 0,004 & 0,151 & 0,230 & 0,271 & -0,024 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 \\ -0,084 & -0,126 & -0,389 & 0,310 & -0,269 & 0,025 & -0,176 & -0,035 & -0,300 & 0,068 & 0,121 & 0,069 & -0,576 & -0,147 & -0,395 & 0,038 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 \\ -0,089 & -0,143 & -0,313 & 0,319 & 0,031 & 0,225 & -0,035 & -0,211 & -0,430 & 0,239 & -0,165 & -0,172 & 0,572 & -0,151 & 0,160 & -0,008 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 \\ -0,118 & -0,220 & -0,047 & 0,321 & 0,523 & -0,146 & 0,491 & -0,351 & 0,263 & 0,234 & 0,084 & 0,076 & -0,173 & 0,059 & -0,048 & 0,003 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 \\ -0,155 & -0,302 & 0,186 & 0,174 & 0,261 & -0,297 & -0,667 & -0,193 & 0,140 & -0,246 & -0,208 & -0,220 & -0,054 & -0,066 & 0,053 & -0,001 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 \\ -0,183 & -0,338 & 0,276 & 0,010 & -0,240 & 0,049 & -0,035 & -0,300 & -0,096 & -0,239 & 0,483 & 0,478 & 0,278 & 0,109 & -0,090 & 0,001 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 \\ -0,200 & -0,336 & 0,291 & -0,063 & -0,371 & 0,163 & 0,270 & -0,103 & 0,009 & 0,027 & -0,683 & 0,095 & -0,179 & -0,031 & 0,043 & 0,001 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 \\ -0,206 & -0,300 & 0,263 & -0,038 & -0,209 & 0,070 & 0,133 & 0,166 & 0,047 & 0,206 & 0,420 & -0,682 & -0,064 & -0,094 & 0,059 & -0,002 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 \\ -0,203 & -0,229 & 0,163 & 0,050 & 0,230 & -0,117 & -0,153 & 0,644 & -0,165 & 0,442 & -0,050 & 0,319 & 0,080 & 0,174 & -0,097 & 0,003 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 \\ -0,196 & -0,131 & -0,057 & 0,047 & 0,342 & 0,215 & 0,254 & 0,364 & -0,225 & -0,633 & 0,025 & 0,020 & -0,085 & -0,320 & 0,128 & -0,004 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 \\ -0,204 & -0,062 & -0,216 & -0,051 & 0,114 & 0,471 & -0,076 & 0,019 & 0,143 & -0,181 & -0,073 & -0,203 & 0,038 & 0,692 & -0,292 & 0,007 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 \\ -0,226 & -0,033 & -0,229 & -0,133 & -0,001 & 0,338 & -0,225 & -0,030 & 0,286 & 0,190 & 0,119 & 0,214 & -0,190 & -0,124 & 0,474 & -0,441 & 0,003 & -0,243 & 0,048 & 0,042 \\ -0,252 & -0,009 & -0,201 & -0,188 & -0,007 & 0,111 & -0,094 & -0,005 & 0,269 & 0,099 & 0,031 & 0,104 & 0,034 & -0,208 & 0,071 & 0,426 & 0,145 & 0,652 & -0,248 & -0,083 \\ -0,275 & 0,022 & -0,166 & -0,227 & -0,006 & -0,072 & 0,002 & -0,007 & 0,181 & 0,032 & -0,027 & 0,018 & 0,147 & -0,219 & -0,198 & 0,375 & -0,565 & -0,343 & 0,341 & -0,045 \\ -0,295 & 0,063 & -0,124 & -0,240 & 0,002 & -0,194 & 0,059 & -0,032 & 0,043 & -0,007 & -0,050 & -0,038 & 0,151 & -0,153 & -0,284 & -0,042 & 0,721 & -0,260 & 0,151 & 0,223 \\ -0,308 & 0,113 & -0,072 & -0,217 & 0,012 & -0,242 & 0,074 & -0,070 & -0,114 & -0,018 & -0,040 & -0,059 & 0,067 & -0,026 & -0,183 & -0,358 & -0,203 & -0,093 & -0,656 & -0,323 \\ -0,313 & 0,175 & -0,007 & -0,145 & 0,018 & -0,213 & 0,053 & -0,104 & -0,241 & -0,009 & -0,006 & -0,049 & -0,060 & 0,121 & 0,048 & -0,301 & -0,264 & 0,450 & 0,268 & 0,525 \\ -0,305 & 0,250 & 0,073 & -0,008 & 0,010 & -0,114 & 0,011 & -0,109 & -0,273 & 0,009 & 0,030 & -0,017 & -0,161 & 0,216 & 0,277 & 0,109 & 0,171 & 0,040 & 0,377 & -0,636 \\ -0,283 & 0,337 & 0,170 & 0,209 & -0,025 & 0,035 & -0,027 & -0,053 & -0,125 & 0,016 & 0,037 & 0,017 & -0,133 & 0,153 & 0,279 & 0,444 & 0,014 & -0,322 & -0,378 & 0,385 \\ -0,243 & 0,438 & 0,287 & 0,526 & -0,108 & 0,200 & -0,027 & 0,108 & 0,307 & -0,017 & -0,033 & 0,025 & 0,154 & -0,216 & -0,277 & -0,226 & -0,021 & 0,119 & 0,098 & -0,088 \end{bmatrix}$$

Şekil 6.5 A matrisine ait V tekil vektörleri

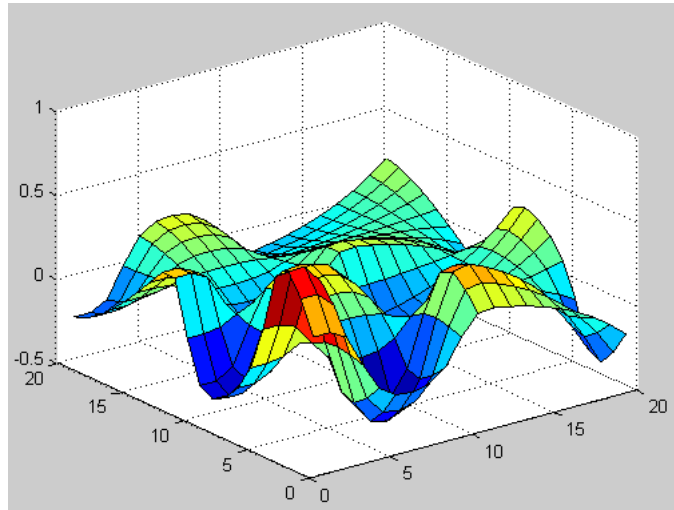
Tekil değer ve vektörlerin tamamı yerine sadece bir kısmının kullanılması, modeli yaklaşık olarak tanımlamak için yeterli olabilmektedir. Örnek modelde, sadece ilk 5 tekil değer ve vektör kullanılarak elde edilen sonuçlar Şekil 6.6 - 6.10'da gösterilmiştir. Bu durumda yaklaşık model, denklem (6.3)'e göre $U_r S_r V_r^T$ ($r=1, 2, \dots, 5$) çarpımlarının toplamı şeklinde ifade edilmektedir.

Şekil 6.6 $U_1 S_1 V_1^T$ çarpımı

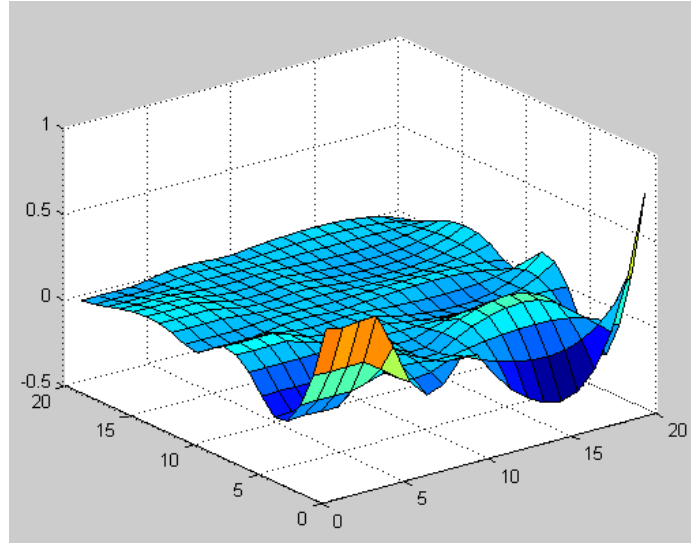
$U_1 S_1 V_1^T$ çarpımı incelendiğinde U_1 ve V_1 vektörleri, X ve Y eksen doğrultularında yüzeyin formunu oluşturmaktadır. U_1 ve V_1 tekil vektörleri ile S_1 tekil değerinin çarpımı yüzeyi oluşturmaktadır. Bir doğrultudaki yüzey formunu U vektörü, diğer yöndeki yüzey formunu ise V vektörü belirlemektedir. U ve V vektörü üzerinde yapılacak değişiklikler ile yüzey formu değiştirilebilir. Benzer şekilde, yüzey verilerinin azaltılması, U ve V vektörlerinin elemanlarının azaltılması ile gerçekleştirilebilir. Bu özellik, tüm $U_r S_r V_r^T$ çarpımları için benzer şekildedir.



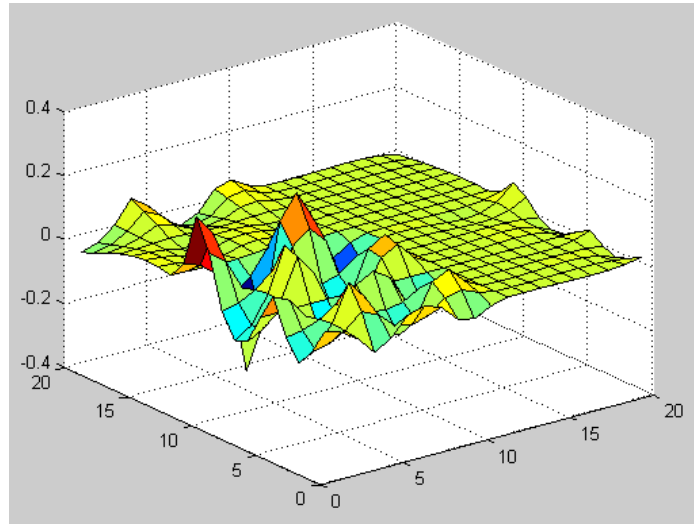
Şekil 6.7 $U_2 S_2 V_2^T$ çarpımı



Şekil 6.8 $U_3 S_3 V_3^T$ çarpımı

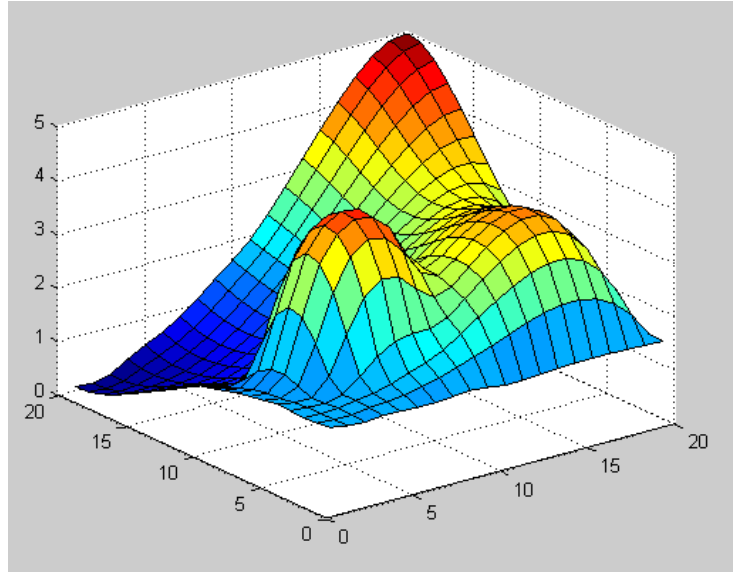


Şekil 6.9 $U_4 S_4 V_4^T$ çarpımı



Şekil 6.10 $U_5 S_5 V_5^T$ çarpımı

A matrisi, ilk 5 tekil değer ve vektör esas alındığında, yaklaşık olarak $U_1 S_1 V_1^T + U_2 S_2 V_2^T + U_3 S_3 V_3^T + U_4 S_4 V_4^T + U_5 S_5 V_5^T$ toplamı şeklinde ifade edilebilir. Bu toplamın ifade ettiği yüzey Şekil 6.11’de verilmiştir. Matlab ortamında, 5 tekil değer oluşturduğu yaklaşık model ile orijinal model (Şekil 6.2) karşılaştırıldığında maksimum hata 0,0892 birim olmuştur. Kullanılan tekil değer ve vektör sayısını arttırarak orijinal modele daha hassas olarak yaklaşmak, kullanılan tekil değer ve vektör sayısını azaltarak orijinal modele daha kaba olarak yaklaşmak mümkündür.



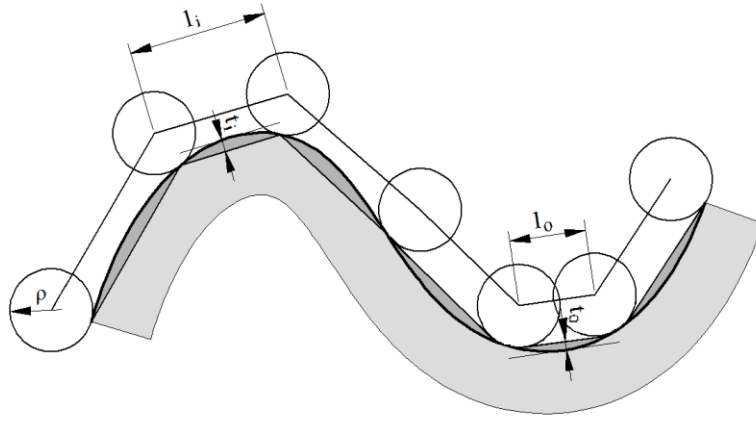
Şekil 6.11 $U_1 S_1 V_1^T, U_2 S_2 V_2^T, U_3 S_3 V_3^T, U_4 S_4 V_4^T, U_5 S_5 V_5^T$ toplamı

6.3 Düzenli Yüzey Verilerini Azaltarak Takım Yolunun Oluşturulması

3 boyutlu bir tarayıcıdan gelen veya 3 boyutlu model üzerinden alınan düzenli ağ noktaları ile oluşturulan Z-map modeli, yüksek hassasiyet gerektiren durumlarda çok fazla sayıda nokta içermekte ve üzerinde yapılacak işlemleri zorlaştırmaktadır. Üzerinde takım yolu hesaplanacak Z-map modellerinin, takım yolu hesaplamasında gerekli olacak kadar veri içerecek şekilde basitleştirilmesi hesaplama sürecini oldukça kolaylaştıracaktır.

3 boyutlu model üzerinde doğrusal enterpolasyon ile oluşturulmuş 3 eksen bir takım yolu, takımın referans noktasının üzerinde gideceği noktaların birbirine bağlanması ile elde edilir (Şekil 6.12). İşleme sonucunda elde edilecek modelin yüzey kalitesi ve toleransı bu noktaların sıklığı ve dağılımından etkilenir. Yüzey kalitesini ve toleransını etkileyen iki temel parametre takım yolu adımı ve nokta aralığıdır.

Şekil 6.12’de parça yüzeyi üzerinde oluşturulan takım yoluna ait noktalar ve bu noktalarda konumlandırılan takım geometrisi görünmektedir. Nokta aralığı, ardışık iki noktayı birbirine bağlayan doğru olarak tanımlanabilir. Bu doğru ile parça yüzeyi arasındaki sapma, dışbükey bölgelerde yüzeye dalmaya, içbükey bölgelerde ise talaş bırakmaya neden olur. Kabul edilebilir dalma ve talaş bırakma miktarı sırasıyla iç tolerans ve dış tolerans olarak adlandırılır. Formlu yüzey işlemede, adım uzunluklarının tolerans limitlerini aşmayacak şekilde olabildiğince büyük olması istenir.



Şekil 6.12 İç ve dış tolerans

Küre takım için, iç tolerans değerlerine bağlı olarak takım merkezinin bulunduğu iki nokta arası bir dairesel yay ile tanımlandığında, dışbükey bölgede kabul edilebilir maksimum nokta aralığı aşağıdaki formül ile hesaplanabilir (Choi, Jerard, 1998).

$$l_i = 2\sqrt{2t_i(R + \rho) - t_i^2} \quad (6.7)$$

Burada l_i dışbükey nokta aralığı, R takımın ilerleme yönündeki yüzey eğrilik yarıçapı, ρ takım yarıçapı, t_i iç toleransı ifade etmektedir. Benzer şekilde içbükey bölgede kabul edilebilir maksimum nokta aralığı aşağıdaki formül ile hesaplanabilir.

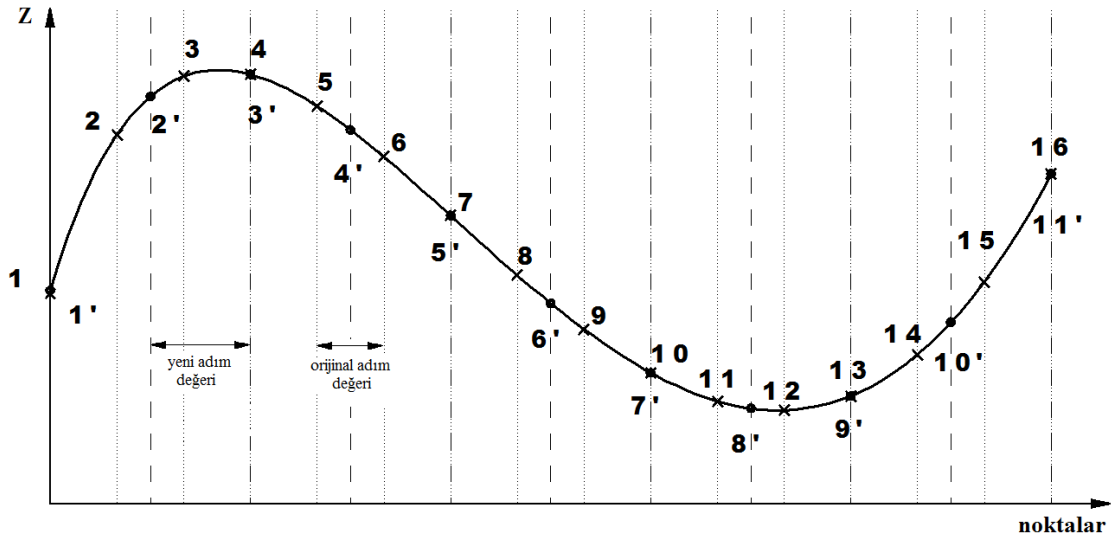
$$l_o = 2\sqrt{2t_o(R - \rho) - t_o^2} \quad (6.8)$$

Burada t_o dış toleransı ifade etmektedir.

Z-map modeli kurulurken seçilecek adım değeri, bulunan iç ve dış nokta aralıklarından en küçüğü olarak seçildiğinde, hedeflenen yüzey toleransı elde edilebilir. Takım yolu hesabında kullanılacak Z-map modelinin nokta sıklığının, istenilen tolerans miktarına bağlı olarak hesaplanabilen içbükey ve dışbükey bölgede kabul edilebilir maksimum nokta sıklığından daha fazla olması gerekmez. CAM işlemlerine yönelik olarak, Z-map modelinin gereksiz noktalarının atılarak, takım yolu hesabında gerekli olacak nokta sıklığına indirgenmesi, takım yolu hesaplamasını oldukça kolaylaştıracaktır. Nokta aralığına bağlı olarak hesaplanabilen takım yolu için gerekli nokta sayısının, başlangıçta verilen nokta sayısına oranı, yapılması gereken veri azaltma işleminin “azaltma oranı” olarak tanımlanabilir.

Z-map matrisi, tekil değerlere ayrıştırma yöntemi kullanılarak bileşenlerine ayrıldığında, U ve V tekil vektörleri, X ve Y eksen doğrultularında yüzeyin formunu belirlemektedir. U ve V tekil vektörlerinin eleman sayıları düşürülerek, tekil vektörlerin tanımladığı yüzeyin verileri azaltılabilir. Takım yolu hesaplamasına yönelik olarak, toleransa bağlı yeni adım değeri kullanılarak tekil vektörler üzerinde yeni bir nokta dağılımı oluşturulabilir. Şekil 6.13'te örnek bir tekil vektör üzerinde orijinal noktalar (1, 2, 3,...) ve belirlenen yeni adım değerine göre oluşturulan noktalar (1', 2', 3',...) gösterilmektedir. Şekilde 16 nokta, 11 noktaya düşürülmektedir.

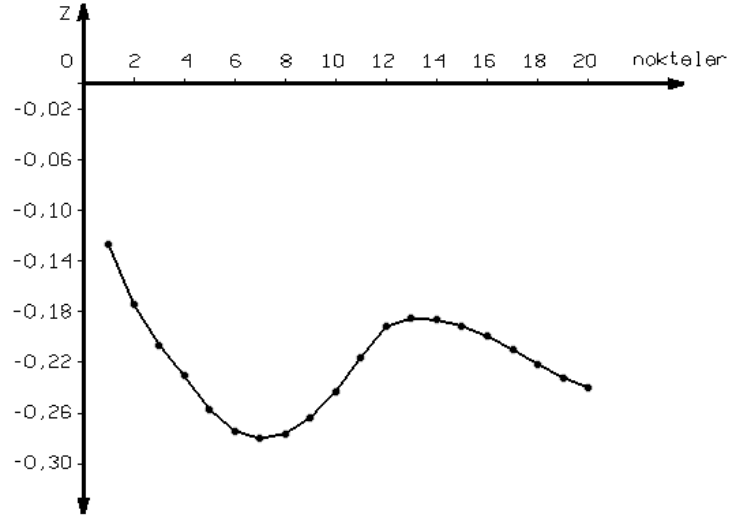
Hesaplanan yeni noktalardan oluşan U' ve V' tekil vektörleri ve S matrisi yeniden çarpılarak, orijinal Z-map matrisinin azaltılmış hali elde edilir. Azaltma işlemi sadece 2 boyutta yapıldığından, yöntem oldukça hızlı bir şekilde sonuca ulaşabilmektedir.



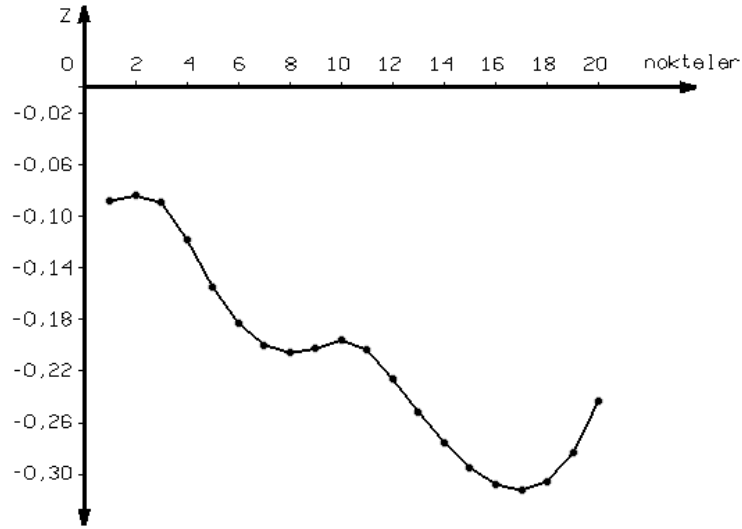
Şekil 6.13 Örnek bir tekil vektör üzerinde azaltılmış noktaların dağılımı

6.4 Düzenli Yüzey Verilerinin Azaltılmasına Ait Sayısal Örnek

Bölüm 6.2'de verilen sayısal örnekteki U_1 ve V_1 vektörlerini ele alalım. U_1 ve V_1 vektörleri, $U_1 S_1 V_1^T$ çarpımının ifade ettiği yüzeyin formunu belirlemektedir. Daha önce Şekil 6.6'da $U_1 S_1 V_1^T$ çarpımının grafiği verilmiş olup, U_1 ve V_1 vektörlerinin grafikleri ise ayrı olarak Şekil 6.14 ve 6.15'te verilmiştir.



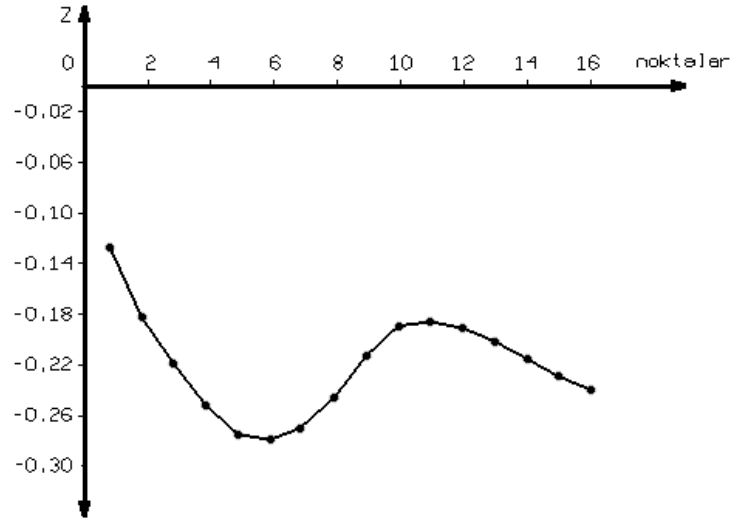
Şekil 6.14 Orijinal U_1 tekil değer vektörü



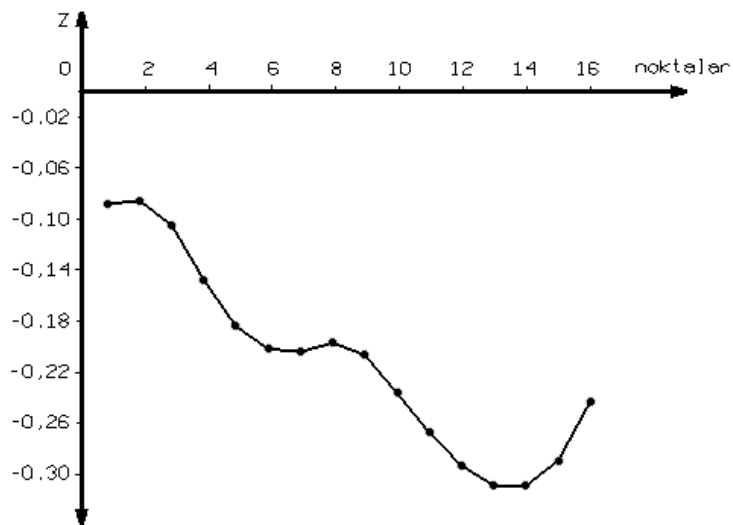
Şekil 6.15 Orijinal V_1 tekil değer vektörü

U_1 ve V_1 tekil değer vektörleri toplam 20 nokta ile ifade edilmektedir. Nokta sayısında %25'lik bir azaltma yapıldığında, her iki vektör de 16 nokta ile ifade edilir hale gelecektir.

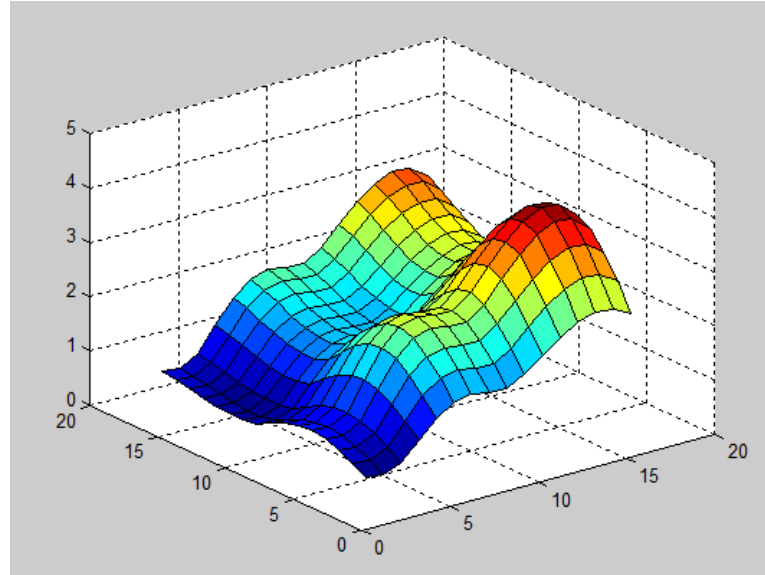
Yeni noktalar, orijinal tekil vektör üzerinde 16 eşit aralıklı noktanın hesaplanması ile bulunabilir. 16 noktadan oluşan yeni U_1' ve V_1' vektörleri Şekil 6.16 ve 6.17'de gösterilmiştir. Noktaları azaltılmış vektörlerin $U_1' S_1 V_1'^T$ çarpımı ise Şekil 6.18'de gösterilmiştir.



Şekil 6.16 Noktaları azaltılmış U_1' tekil değer vektörü

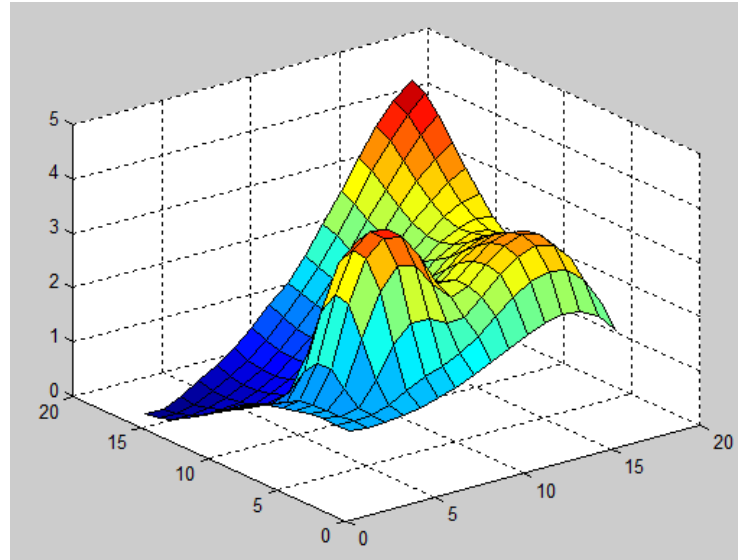


Şekil 6.17 Noktaları azaltılmış V_1' tekil değer vektörü



Şekil 6.18 Noktaları azaltılmış $U_1' S_1 V_1^T$ çarpımı

Azaltılmış $U_1' S_1 V_1^T$ çarpımı ile Şekil 6.6'da verilmiş olan orijinal $U_1 S_1 V_1^T$ çarpımı arasında, thinkdesign CAD yazılımında ölçü analizi yapıldığında, iki yüzey arasında maksimum fark 0,088 birim ve mutlak ortalama fark 0,025 birim olarak ölçülmektedir. Benzer işlemler, hesaplamaya dâhil edilecek diğer 5 tekil vektörlere de uygulandıktan sonra toplam yüzey formu Şekil 6.19'da görüldüğü gibi olacaktır.



Şekil 6.19 Azaltılmış $U_1' S_1 V_1^T$, $U_2' S_2 V_2^T$, $U_3' S_3 V_3^T$, $U_4' S_4 V_4^T$, $U_5' S_5 V_5^T$ toplamı

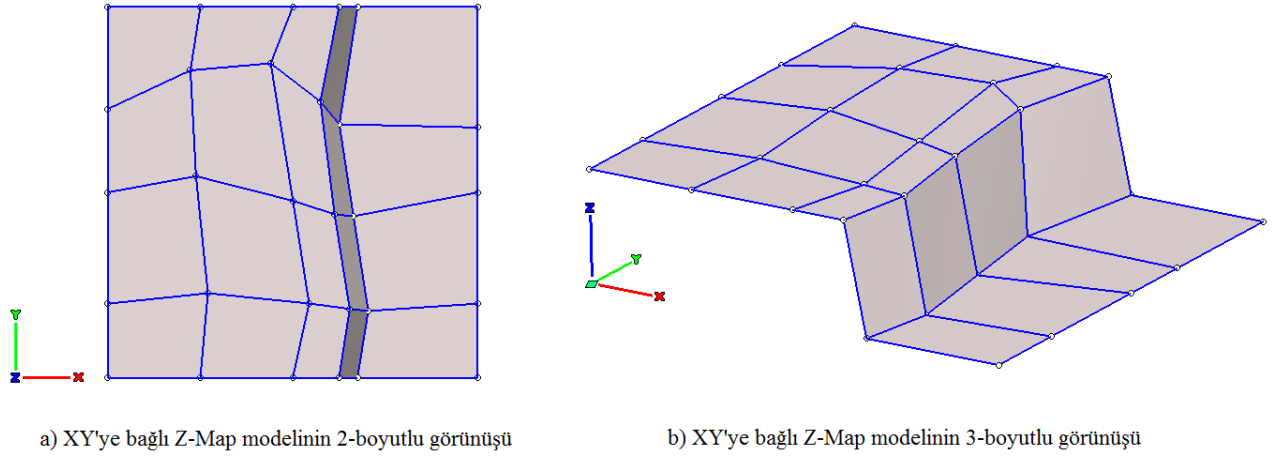
Bu örnekte 20x20 elemanlı Z-map matrisi, 16x16 elemanlı bir Z-map matrisine dönüşmüştür. Her iki matrisin ifade ettiği yüzey arasında thinkdesign CAD yazılımında ölçü analizi yapıldığında mutlak ortalama fark ise 0,039 birim olarak ölçülmüştür. Azaltılmış Z-map matrisi orijinal yüzey model ile karşılaştırıldığında ise mutlak ortalama fark 0,081 birim olarak ölçülmüştür.

6.5 XY'ye Bağlı Z-Map Modeli

Z-map modelinin, dik duvarlar ve keskin kenarlar içeren geometrileri tanımlamasında güçlükler vardır. Bu tür modellerde yeterli hassasiyetin sağlanabilmesi için nokta sıklığının artırılması gerekir. Bu da tüm model üzerinde çok yoğun noktasal veri oluşumuna yol açmakta ve tanımlamayı zorlaştırmaktadır. Bu problemin aşılmasına yönelik olarak, Bölüm 3.3'te bahsedilen genişletilmiş Z-map yöntemi geliştirilerek, nokta sıklığının lokal olarak problemlili bölgelerde artırılması sağlanmış ve tüm model üzerinde yoğun nokta oluşumunun önüne geçilmiştir. Ancak lokal olarak nokta sıklığını arttırmak, model tanımlama hassasiyetini ideal hale getirememekte ve nokta sayısının artmasına neden olmaktadır.

Bu sorunların çözümüne yönelik olarak yeni bir yaklaşım olan “XY'ye bağlı Z-map” yöntemi geliştirilmiştir. Yöntemde, noktalar geometriye uyacak şekilde model üzerine yerleştirildiklerinden ve dağılımları düzensiz olduğundan, noktaların z koordinatları ile birlikte aynı zamanda x ve y koordinatları da ayrı matrislerde saklanmıştır. Bu yöntem sayesinde problemlili geometrilerdeki sorun büyük ölçüde aşılabilmektedir. Böylece tanımlanması güç geometrilerde fazla nokta kullanımının önüne geçilerek, yöntemle çok daha geniş bir kullanım alanı bulunabilmektedir. Aynı zamanda, günümüzde oldukça yaygın kullanılmaya başlanan optik ve lazer tarayıcılar gibi düzensiz nokta bulutu veren ölçüm cihazlarından alınan noktalardan da model kurabilmek mümkündür. Bunun yanında, nokta dağılımı ne şekilde olursa olsun, herhangi bir poligonal yapıdaki model veya bir takım yolu üzerinden alınan noktalardan da model kurup verilerini azaltmak mümkündür.

XY'ye bağlı Z-map modelinde, noktalar aralarında sabit bir ağ adımı olması yerine, matris yapısı oluşturacak şekilde geometri üzerine serbest bir şekilde yerleştirilmektedir. Nokta yerleştirme işleminin parça formunu ve kenarlarını takip edecek şekilde yapılması, özellikle kenar tanımlama hassasiyetini nokta sayısını arttırmadan çok daha iyi hale getirebilmektedir. Yöntemde, noktaların z koordinatları bir matriste saklanmakla birlikte, düzenli ağ yönteminden farklı olarak x ve y koordinatları da ayrı matrislerde saklanmaktadır. Yöntemde Z-map modeline benzer şekilde basit matris formundaki yapı korunmaktadır.



Şekil 6.20 XY'ye bağı Z-map modeli

X yönünde m ve Y yönünde n nokta içeren bir XY'ye bağı Z-map modelinde, bir noktanın konumu aşağıdaki denklem ile tanımlanabilir.

$$P(i,j) = (X(i,j), Y(i,j), Z(i,j)) \quad \{i \in [0,m], j \in [0,n]\} \quad (6.9)$$

6.6 Düzensiz Yüzey Verilerini Azaltarak Takım Yolunun Oluşturulması

Geliştirilen XY'ye bağı Z-map yöntemi, kaynağı ne olursa olsun, poligonal yapıdaki modelin noktaları, bir takım yolu üzerinden alınan noktalar veya tersine mühendislikten gelen nokta bulutları gibi tüm veri türlerinin tanımlanmasına ve azaltılmasına uygulanabilir. Alınan noktalardan XY'ye bağı Z-map modelinin kurulabilmesi için, gelen noktaların matris formunda bir yapı oluşturacak şekilde düzenlenmesi gerekir. Noktaların matrise yerleştirilebilmesi için çeşitli yöntemlerin kullanılabilmesi mümkün olmakla beraber, her tür geometride sonuç alınabilecek ve uygulaması kolay olan bir yöntem tasarlanmıştır.

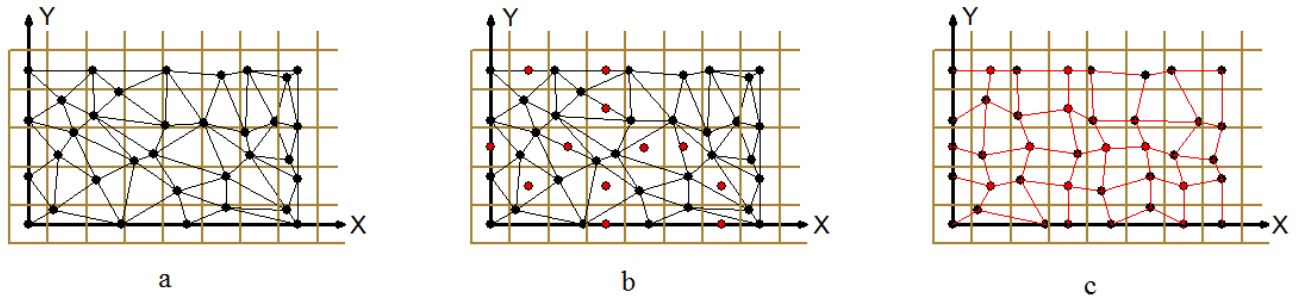
Yöntemin, karmaşık bir poligonal modelde çalışma prensibi Şekil 6.21'de gösterilmiştir. Öncelikle dışarıdan alınan bir poligonal model üzerine, hedeflenen tanımlama hassasiyetini sağlayabilecek sabit aralıklı bir referans ağı yerleştirilir (Şekil 6.21a). Poligonal modelin köşe noktalarının içine düştüğü hücrelerde, köşe noktalarının x, y ve z değerleri X, Y ve Z matrislerinde ilgili hücrelere kaydedilir. Bir hücreye birden fazla nokta denk geldiği durumda, sadece en büyük z değerinin olduğu nokta matrise yazılır. Buradaki amaç, XY'ye bağı Z-map modelinin, orijinal modele göre pozitif toleransta kalabilmesidir.

Köşe noktalarının matrise yerleştirilmesi işleminden sonra, özellikle parça formunun değişkenlik göstermediği bölgelerdeki bazı hücreler boş kalacaktır. Parça formunun

değişkenlik göstermediği bölgelerde birbirinin tamamen aynısı olan satır ve sütunlar da oluşabilmektedir. Düzenli verilerde kullanılan yöntemden farklı olarak, aynı değerle tekrarlanan satır ile sütunlar ve tamamen boş satır ile sütunlar matrislerden atılmaktadır. Bu sayede, modeli tanımlayan matrisler birbirini tekrarlayan gereksiz satır ve sütunlar içermemekte ve düzenli veri yöntemine göre çok daha verimli bir model tanımlayabilmek mümkün olmaktadır.

Geriye kalan boş hücrelerde, XY düzleminde hücre merkezlerinde noktalar oluşturulup poligonal model üzerine izdüşürülerek, bu noktaların z değerleri bulunur (Şekil 6.21b). Tersine mühendislik gibi poligonal modelin mevcut olmadığı durumlarda ise boş hücrelerin değerleri, dolu hücreler arasında yapılacak lineer enterpolasyon ile hesaplanır. Boş hücreye yerleştirilen noktaların x, y ve z koordinatları da ilgili matrislere yerleştirilir.

Şekil 6.21c'de poligonal modelden elde edilen XY'ye bağlı Z-map modeli görülmektedir. Oluşan dörtgen yapılı poligonlar daha sonra bilgisayar programında köşegenlerinden biri doğrultusunda ikiye bölünerek üçgen yapılı poligonlara dönüştürülmektedir.

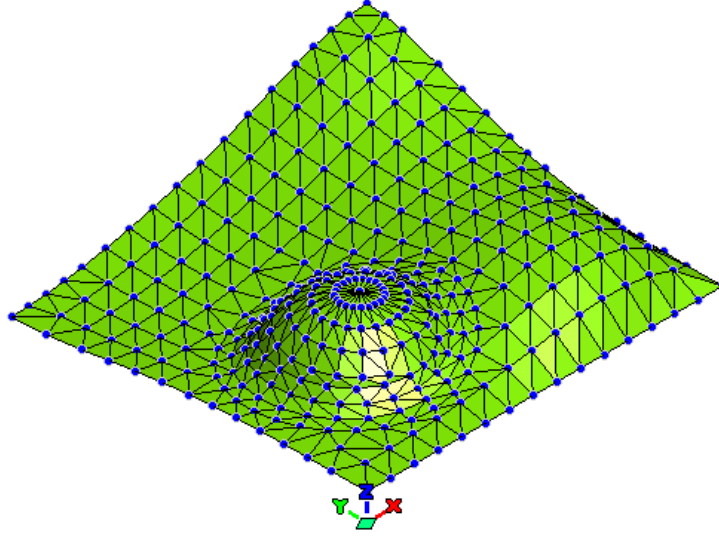


Şekil 6.21 Düzensiz yüzey verilerinden XY'ye bağlı Z-map modeli oluşturulması

Düzensiz yüzey verilerinden XY'ye bağlı Z-map model, kurulduktan sonra, yöntem düzenli yüzey verilerindekine benzer şekilde tekil değerlere ayrıştırma ve veri azaltma işlemi yapmaktadır. Tekil değerlere ayrıştırma işlemi tüm matrislere uygulanabildiği için, XY'ye bağlı Z-map matrislerine de rahatlıkla uygulanabilir.

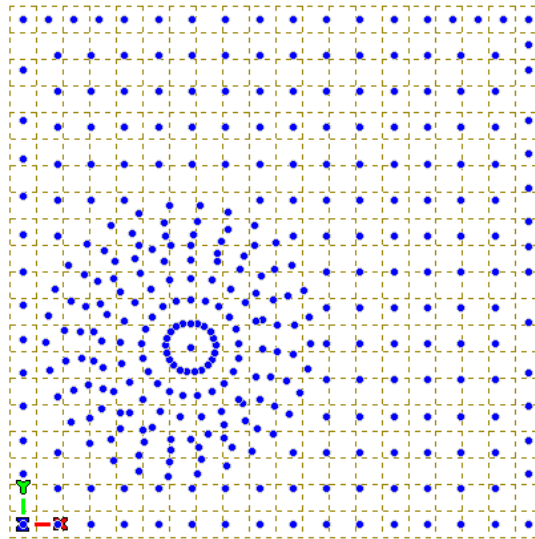
6.7 Düzensiz Yüzey Verilerinin Azaltılmasına Ait Sayısal Örnek

Bölüm 6.2'de Z-map matrisi verilen örnek modele ait orijinal poligonal yüzey Şekil 6.22'de gösterilmiştir. Bu poligonal modelden yola çıkarak, modele ait XY'ye bağlı Z-map matrislerini Bölüm 6.6'da prensipleri verilen yöntem ile oluşturalım.



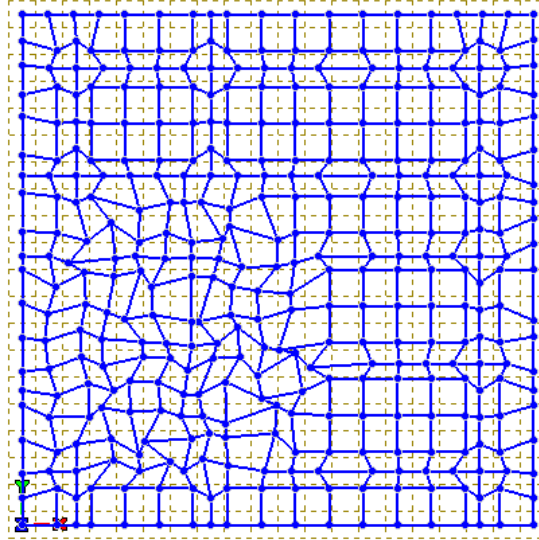
Şekil 6.22 Örnek modele ait poligonal yüzey

Öncelikle poligonal modelin köşe noktaları eşit adımlı bir ağ üzerine yerleştirilir. Sayısal örnekte model 19x19 birimdir ve ağ adımı 1 birim olarak seçilmiştir. Şekil 6.23'te ağ üzerine yerleştirilmiş köşe noktaları gösterilmiştir.



Şekil 6.23 Ağ üzerine yerleştirilmiş köşe noktaları

Her hücreye, hücre içerisinde maksimum yüksekliğe sahip ağ noktası yerleştirilerek, boş kalan hücrelerin merkezlerinde oluşturulan noktaların da poligonal yüzeye izdüşürülmesi ile satır ve sütunlardan oluşan matris formunda XY'ye bağlı Z-map modeli elde edilir. Şekil 6.24'te XY'ye bağlı Z-map modeli gösterilmiştir.



Şekil 6.24 Örneğe ait XY'ye bağlı Z-map modeli

XY'ye bağlı Z-map modeli X , Y ve Z matrisleri ile tanımlanmaktadır. Matrislerin sayısal değerleri Şekil 6.25 - 6.27'de gösterilmiştir.

$$X = \begin{bmatrix} 0,000 & 1,267 & 2,000 & 2,533 & 3,800 & 5,067 & 6,333 & 7,000 & 7,600 & 8,867 & 10,133 & 11,400 & 12,667 & 13,933 & 15,200 & 16,467 & 17,000 & 17,733 & 19,000 \\ 0,000 & 1,267 & 2,000 & 2,533 & 3,800 & 5,067 & 6,333 & 7,000 & 7,600 & 8,867 & 10,133 & 11,400 & 12,667 & 13,933 & 15,200 & 16,467 & 17,000 & 17,733 & 19,000 \\ 0,000 & 1,000 & 2,000 & 3,360 & 4,344 & 5,482 & 6,000 & 6,706 & 7,634 & 9,000 & 10,000 & 11,000 & 13,000 & 14,000 & 15,000 & 16,000 & 17,000 & 18,000 & 19,000 \\ 0,000 & 1,267 & 2,000 & 3,297 & 4,321 & 4,521 & 6,271 & 6,962 & 7,558 & 9,377 & 10,133 & 11,400 & 12,667 & 13,933 & 15,200 & 16,467 & 17,000 & 17,733 & 19,000 \\ 0,000 & 1,000 & 2,468 & 2,923 & 3,989 & 5,127 & 5,885 & 6,678 & 7,562 & 9,444 & 9,972 & 11,400 & 12,667 & 13,933 & 15,200 & 16,467 & 17,000 & 17,733 & 19,000 \\ 0,000 & 1,278 & 2,424 & 3,362 & 3,977 & 5,032 & 6,008 & 6,555 & 7,531 & 8,913 & 10,404 & 11,400 & 12,667 & 13,933 & 15,200 & 16,467 & 17,000 & 17,733 & 19,000 \\ 0,000 & 0,954 & 2,162 & 2,995 & 4,490 & 5,471 & 6,142 & 7,092 & 8,073 & 8,716 & 10,141 & 10,683 & 13,000 & 14,000 & 15,000 & 16,000 & 17,000 & 18,000 & 19,000 \\ 0,000 & 0,832 & 2,139 & 2,920 & 4,449 & 5,348 & 6,281 & 7,215 & 7,992 & 8,978 & 9,524 & 11,400 & 12,667 & 13,933 & 15,200 & 16,467 & 17,000 & 17,733 & 19,000 \\ 0,000 & 0,915 & 2,348 & 3,144 & 3,805 & 4,845 & 6,281 & 6,557 & 7,718 & 8,758 & 10,000 & 11,400 & 12,667 & 13,933 & 15,200 & 16,467 & 17,000 & 17,733 & 19,000 \\ 0,000 & 1,204 & 2,269 & 3,401 & 4,383 & 4,783 & 6,281 & 7,066 & 7,780 & 8,728 & 9,953 & 11,400 & 12,667 & 13,933 & 15,200 & 16,467 & 17,000 & 17,733 & 19,000 \\ 0,000 & 1,000 & 1,700 & 3,452 & 4,195 & 5,288 & 6,281 & 7,275 & 8,148 & 9,459 & 10,115 & 11,000 & 13,000 & 14,000 & 15,000 & 16,000 & 17,000 & 18,000 & 19,000 \\ 0,000 & 1,267 & 2,403 & 3,295 & 4,325 & 5,345 & 6,281 & 7,414 & 7,696 & 9,489 & 10,133 & 11,400 & 12,667 & 13,933 & 15,200 & 16,467 & 17,000 & 17,733 & 19,000 \\ 0,000 & 1,267 & 2,000 & 2,533 & 4,339 & 5,473 & 6,000 & 6,619 & 7,706 & 8,867 & 10,133 & 11,400 & 12,667 & 13,933 & 15,200 & 16,467 & 17,000 & 17,733 & 19,000 \\ 0,000 & 1,000 & 2,000 & 3,000 & 4,000 & 5,000 & 6,000 & 7,000 & 8,000 & 9,000 & 10,000 & 11,000 & 13,000 & 14,000 & 15,000 & 16,000 & 17,000 & 18,000 & 19,000 \\ 0,000 & 1,267 & 2,000 & 2,533 & 3,800 & 5,067 & 6,333 & 7,000 & 7,600 & 8,867 & 10,133 & 11,400 & 12,667 & 13,933 & 15,200 & 16,467 & 17,000 & 17,733 & 19,000 \\ 0,000 & 1,267 & 2,000 & 2,533 & 3,800 & 5,067 & 6,333 & 7,000 & 7,600 & 8,867 & 10,133 & 11,400 & 12,667 & 13,933 & 15,200 & 16,467 & 17,000 & 17,733 & 19,000 \\ 0,000 & 1,267 & 2,000 & 2,533 & 3,800 & 5,067 & 6,333 & 7,000 & 7,600 & 8,867 & 10,133 & 11,400 & 12,667 & 13,933 & 15,200 & 16,467 & 17,000 & 17,733 & 19,000 \\ 0,000 & 1,000 & 2,000 & 3,000 & 4,000 & 5,000 & 6,000 & 7,000 & 8,000 & 9,000 & 10,000 & 11,000 & 13,000 & 14,000 & 15,000 & 16,000 & 17,000 & 18,000 & 19,000 \\ 0,000 & 1,267 & 2,000 & 2,533 & 3,800 & 5,067 & 6,333 & 7,000 & 7,600 & 8,867 & 10,133 & 11,400 & 12,667 & 13,933 & 15,200 & 16,467 & 17,000 & 17,733 & 19,000 \\ 0,000 & 0,950 & 1,900 & 2,850 & 3,800 & 5,067 & 6,333 & 7,000 & 7,600 & 8,867 & 10,133 & 11,400 & 12,667 & 13,933 & 15,200 & 16,150 & 17,100 & 18,050 & 19,000 \end{bmatrix}$$

Şekil 6.25 XY'ye bağlı Z-map modeline ait X matrisi

$$Y = \begin{bmatrix} 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 \\ 1,000 & 1,357 & 1,000 & 1,357 & 1,357 & 1,357 & 1,357 & 1,000 & 1,357 & 1,357 & 1,357 & 1,357 & 1,357 & 1,357 & 1,357 & 1,357 & 1,000 & 1,357 & 1,000 \\ 1,900 & 2,000 & 2,000 & 2,424 & 1,993 & 2,343 & 2,000 & 2,438 & 2,214 & 2,000 & 2,000 & 2,000 & 2,000 & 2,000 & 2,000 & 2,000 & 2,000 & 2,000 & 1,900 \\ 3,167 & 2,714 & 3,000 & 3,190 & 2,608 & 3,088 & 3,214 & 3,402 & 3,263 & 3,397 & 2,714 & 2,714 & 2,714 & 2,714 & 2,714 & 2,714 & 3,000 & 2,714 & 3,167 \\ 4,433 & 4,000 & 4,027 & 4,361 & 4,198 & 4,272 & 4,038 & 4,038 & 3,774 & 4,433 & 4,145 & 4,071 & 4,071 & 4,071 & 4,071 & 4,071 & 4,000 & 4,071 & 4,433 \\ 5,000 & 4,808 & 5,259 & 4,984 & 5,339 & 5,322 & 4,852 & 4,852 & 5,322 & 4,688 & 4,968 & 5,429 & 5,429 & 5,429 & 5,429 & 5,429 & 5,000 & 5,429 & 5,000 \\ 5,700 & 5,811 & 6,242 & 5,919 & 6,260 & 6,201 & 5,743 & 6,201 & 6,260 & 5,548 & 6,405 & 5,858 & 6,000 & 6,000 & 6,000 & 6,000 & 6,000 & 6,000 & 5,700 \\ 6,967 & 6,840 & 7,247 & 6,921 & 6,807 & 6,739 & 6,669 & 6,739 & 7,341 & 6,603 & 6,501 & 6,786 & 6,786 & 6,786 & 6,786 & 6,786 & 7,000 & 6,786 & 7,000 \\ 8,233 & 7,857 & 8,222 & 7,901 & 7,641 & 7,815 & 7,576 & 7,564 & 7,815 & 7,641 & 8,000 & 8,143 & 8,143 & 8,143 & 8,143 & 8,143 & 8,000 & 8,143 & 7,600 \\ 9,500 & 8,833 & 9,403 & 9,248 & 9,454 & 8,868 & 9,248 & 9,212 & 8,868 & 8,703 & 8,595 & 9,500 & 9,500 & 9,500 & 9,500 & 9,500 & 9,000 & 9,500 & 9,500 \\ 10,000 & 10,000 & 9,741 & 9,916 & 9,998 & 9,890 & 9,947 & 9,890 & 9,578 & 9,626 & 9,743 & 10,000 & 10,000 & 10,000 & 10,000 & 10,000 & 10,000 & 10,000 & 10,450 \\ 10,925 & 10,857 & 10,553 & 11,231 & 10,519 & 10,863 & 10,516 & 10,635 & 11,108 & 10,589 & 10,857 & 10,857 & 10,857 & 10,857 & 10,857 & 10,857 & 11,000 & 10,857 & 11,400 \\ 12,350 & 12,214 & 12,000 & 12,214 & 11,726 & 11,992 & 12,000 & 12,003 & 11,758 & 12,214 & 12,214 & 12,214 & 12,214 & 12,214 & 12,214 & 12,214 & 12,000 & 12,214 & 12,000 \\ 13,000 & 13,000 & 13,000 & 13,000 & 13,000 & 13,000 & 13,000 & 13,000 & 13,000 & 13,000 & 13,000 & 13,000 & 13,000 & 13,000 & 13,000 & 13,000 & 13,000 & 13,000 & 12,667 \\ 13,775 & 13,571 & 14,000 & 13,571 & 13,571 & 13,571 & 13,571 & 13,571 & 14,000 & 13,571 & 13,571 & 13,571 & 13,571 & 13,571 & 13,571 & 13,571 & 14,000 & 13,571 & 13,933 \\ 15,200 & 14,929 & 15,000 & 14,929 & 14,929 & 14,929 & 14,929 & 14,929 & 15,000 & 14,929 & 14,929 & 14,929 & 14,929 & 14,929 & 14,929 & 14,929 & 15,000 & 14,929 & 15,200 \\ 16,000 & 16,286 & 16,000 & 16,286 & 16,286 & 16,286 & 16,286 & 16,000 & 16,286 & 16,286 & 16,286 & 16,286 & 16,286 & 16,286 & 16,286 & 16,286 & 16,000 & 16,286 & 16,000 \\ 17,100 & 17,000 & 17,000 & 17,000 & 17,000 & 17,000 & 17,000 & 17,000 & 17,000 & 17,000 & 17,000 & 17,000 & 17,000 & 17,000 & 17,000 & 17,000 & 17,000 & 17,000 & 17,100 \\ 18,000 & 17,643 & 18,000 & 17,643 & 17,643 & 17,643 & 17,643 & 18,000 & 17,643 & 17,643 & 17,643 & 17,643 & 17,643 & 17,643 & 17,643 & 17,643 & 18,000 & 17,643 & 18,050 \\ 19,000 & 19,000 & 19,000 & 19,000 & 19,000 & 19,000 & 19,000 & 19,000 & 19,000 & 19,000 & 19,000 & 19,000 & 19,000 & 19,000 & 19,000 & 19,000 & 19,000 & 19,000 & 19,000 \end{bmatrix}$$

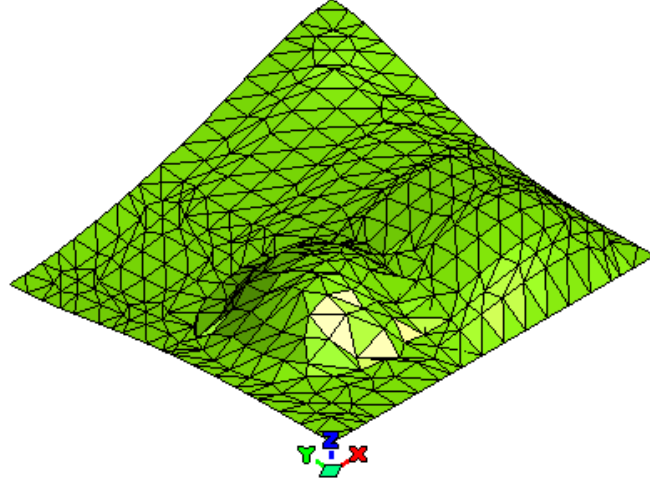
Şekil 6.26 XY'ye bağlı Z-map modeline ait Y matrisi

$$Z = \begin{bmatrix} 1,429 & 1,429 & 1,429 & 1,429 & 1,429 & 1,429 & 1,429 & 1,429 & 1,429 & 1,429 & 1,429 & 1,429 & 1,429 & 1,429 & 1,429 & 1,429 & 1,429 & 1,429 & 1,429 \\ 1,429 & 1,430 & 1,435 & 1,445 & 1,487 & 1,563 & 1,676 & 1,680 & 1,826 & 2,006 & 2,203 & 2,399 & 2,566 & 2,670 & 2,666 & 2,501 & 2,169 & 2,114 & 1,429 \\ 1,428 & 1,426 & 1,435 & 1,480 & 1,539 & 1,748 & 1,719 & 1,932 & 1,993 & 2,217 & 2,423 & 2,628 & 2,970 & 3,061 & 3,062 & 2,941 & 2,658 & 2,171 & 1,430 \\ 1,424 & 1,421 & 1,425 & 1,563 & 1,637 & 1,914 & 2,487 & 2,629 & 2,407 & 2,559 & 2,647 & 2,951 & 3,208 & 3,363 & 3,349 & 3,088 & 2,948 & 2,486 & 1,441 \\ 1,411 & 1,400 & 1,510 & 1,801 & 2,591 & 3,272 & 3,272 & 3,272 & 2,817 & 2,736 & 2,783 & 3,180 & 3,474 & 3,648 & 3,629 & 3,328 & 3,087 & 2,644 & 1,472 \\ 1,402 & 1,373 & 1,760 & 2,591 & 3,272 & 3,781 & 3,781 & 3,781 & 3,781 & 2,868 & 2,913 & 3,173 & 3,475 & 3,654 & 3,639 & 3,344 & 3,121 & 2,674 & 1,496 \\ 1,385 & 1,339 & 1,712 & 2,591 & 3,781 & 4,095 & 4,095 & 4,095 & 3,781 & 3,257 & 2,820 & 2,933 & 3,482 & 3,606 & 3,608 & 3,451 & 3,089 & 2,477 & 1,538 \\ 1,337 & 1,290 & 1,644 & 2,591 & 3,781 & 4,095 & 4,200 & 4,095 & 3,781 & 3,244 & 2,937 & 3,012 & 3,310 & 3,492 & 3,495 & 3,244 & 3,028 & 2,655 & 1,661 \\ 1,264 & 1,215 & 1,549 & 2,591 & 3,272 & 3,781 & 4,101 & 4,095 & 3,781 & 3,272 & 2,560 & 2,771 & 3,064 & 3,257 & 3,295 & 3,116 & 2,967 & 2,651 & 1,739 \\ 1,161 & 1,110 & 1,102 & 1,890 & 2,591 & 3,272 & 3,335 & 3,272 & 3,272 & 2,801 & 2,400 & 2,513 & 2,809 & 3,026 & 3,118 & 3,031 & 2,931 & 2,712 & 2,098 \\ 1,111 & 1,005 & 0,983 & 1,326 & 1,780 & 2,591 & 2,698 & 2,591 & 2,486 & 2,077 & 2,130 & 2,320 & 2,794 & 2,964 & 3,061 & 3,061 & 2,939 & 2,669 & 2,344 \\ 1,007 & 0,881 & 0,855 & 0,764 & 1,271 & 1,312 & 1,922 & 1,694 & 1,407 & 1,822 & 1,950 & 2,287 & 2,601 & 2,857 & 3,017 & 3,037 & 3,005 & 2,868 & 2,632 \\ 0,817 & 0,705 & 0,688 & 0,643 & 0,745 & 0,820 & 0,890 & 0,988 & 1,228 & 1,444 & 1,777 & 2,130 & 2,476 & 2,787 & 3,027 & 3,157 & 3,133 & 3,134 & 2,834 \\ 0,720 & 0,619 & 0,560 & 0,546 & 0,578 & 0,657 & 0,783 & 0,952 & 1,161 & 1,404 & 1,674 & 1,962 & 2,546 & 2,814 & 3,046 & 3,222 & 3,322 & 3,323 & 3,075 \\ 0,600 & 0,522 & 0,437 & 0,480 & 0,509 & 0,612 & 0,787 & 0,880 & 1,030 & 1,333 & 1,683 & 2,064 & 2,455 & 2,829 & 3,154 & 3,391 & 3,564 & 3,497 & 3,563 \\ 0,375 & 0,344 & 0,325 & 0,337 & 0,397 & 0,524 & 0,718 & 0,846 & 0,979 & 1,300 & 1,676 & 2,093 & 2,534 & 2,973 & 3,380 & 3,714 & 3,842 & 3,926 & 4,062 \\ 0,256 & 0,191 & 0,230 & 0,232 & 0,334 & 0,496 & 0,719 & 0,852 & 1,004 & 1,349 & 1,752 & 2,204 & 2,689 & 3,185 & 3,661 & 4,071 & 4,131 & 4,360 & 4,359 \\ 0,116 & 0,122 & 0,160 & 0,237 & 0,350 & 0,497 & 0,680 & 0,898 & 1,154 & 1,445 & 1,772 & 2,132 & 2,922 & 3,331 & 3,729 & 4,094 & 4,397 & 4,607 & 4,709 \\ 0,036 & 0,086 & 0,124 & 0,180 & 0,332 & 0,536 & 0,792 & 0,983 & 1,102 & 1,468 & 1,889 & 2,361 & 2,872 & 3,403 & 3,920 & 4,377 & 4,598 & 4,712 & 4,919 \\ 0,000 & 0,032 & 0,118 & 0,243 & 0,399 & 0,646 & 0,932 & 1,098 & 1,258 & 1,628 & 2,045 & 2,508 & 3,010 & 3,535 & 4,052 & 4,408 & 4,708 & 4,919 & 5,000 \end{bmatrix}$$

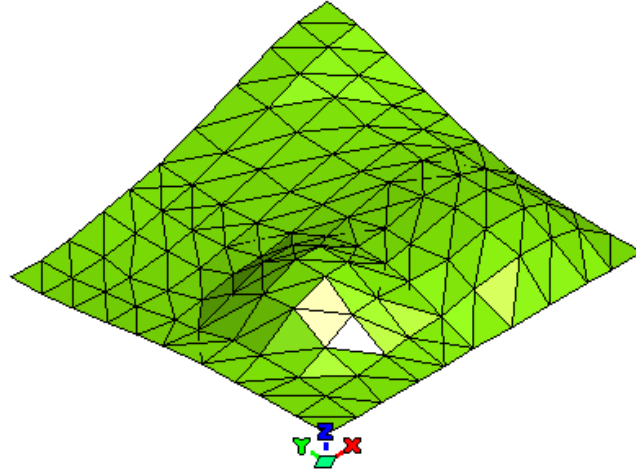
Şekil 6.27 XY'ye bağlı Z-map modeline ait Z matrisi

Sayısal örneğe ait X, Y ve Z matrisleri ile tanımlanan, XY'ye bağlı Z-map yüzeyi Şekil 6.28'de gösterilmiştir. XY'ye bağlı Z-map modelinde, tekil değerlere ayrıştırma ve tekil vektörler üzerinde yapılan nokta azaltma işlemi X, Y ve Z matrislerinin her üçü için de uygulanır. Düzenli yüzey verilerinin azaltılmasının incelendiği Bölüm 6.4'te sadece Z matrisi için yapılan sayısal uygulama, düzensiz yüzey verilerinin azaltılmasında aynı zamanda X ve Y matrisleri için de benzer şekilde uygulanır. 20 nokta ile ifade edilen tekil değer vektörleri üzerinde örnek olarak %25'lik bir azaltma yapıldığında 16 nokta ile ifade edilebilirler. Her

matrisin ilk 5 tekil değer vektörü kullanılarak yapılan uygulamaya ait, verileri azaltılmış XY'ye bağlı Z-map modeli Şekil 6.29'da gösterilmiştir.



Şekil 6.28 Orijinal XY'ye bağlı Z-map yüzeyi



Şekil 6.29 Verileri azaltılmış XY'ye bağlı Z-map yüzeyi

Bu örnekte 20x20 elemanlı XY'ye bağlı Z-map matrisleri, 16x16 elemanlı XY'ye bağlı Z-map matrislerine dönüşmüştür. Her iki matrisin ifade ettiği yüzey arasında thinkdesign CAD yazılımında ölçü analizi yapıldığında, iki yüzey arasındaki mutlak ortalama fark 0,064 birim olarak bulunmuştur. Orijinal poligonal modelle kıyaslandığında ise mutlak ortalama hata 0,078 birim olarak bulunmuştur.

7. YENİ YAKLAŞIMA AİT UYGULAMALAR

7.1 Bilgisayar Programı

Teorik alt yapısı kurulan yöntemin uygulamalarının yapılabilmesi için, düzenli ve düzensiz nokta verilerini azaltabilen Matlab ortamında iki ayrı program geliştirilmiştir. Matlab ortamının tercih edilmesinin sebebi, matris işlemlerinin kolaylıkla yapılabilmesi ve hesaplama hızının yüksek oluşudur.

7.1.1 Düzenli Yüzey Verilerini Azaltan Programın Algoritması

Matlab ortamında geliştirilen program, yedi adımda işlemleri gerçekleştirmektedir. İlk adımda, 3 boyutlu model üzerindeki en küçük ve en büyük eğrilik yarıçapı değerleri, kullanılacak kesici takımın çapı ve modelden istenilen tolerans değerleri programa girilmektedir. Aynı zamanda, yüzey üzerine iz düşürülmüş düzenli aralıklara sahip noktaların koordinatlarını içeren veri dosyası programa alınır.

İkinci adımda program girilen değerlere göre, model üzerinde takım yolu hesabında ihtiyaç duyulacak en küçük adım değerini hesaplayıp kullanıcıya önerir ve veri azaltma işlemlerinde bu değeri kullanır.

Üçüncü adımda, alınan ağ noktaları, karışık sırada da olsalar, sıralanarak düzenli Z-map matrisi oluşturulmaktadır.

Dördüncü adımda oluşturulan Z-map matrisi, TDA yöntemi kullanılarak bileşenlerine ayrılmaktadır. Oluşan U ve V matrislerinin sadece belirli bir sayıda sütunu kullanılarak daha az veriyle model tanımlanabilir hale getirilmektedir. Sonraki adımda, U ve V tekil vektörleri üzerinde ilk aşamada hesaplanan adım değerine göre veri azaltma işlemi yapılmaktadır. Orijinal model üzerinde üç boyutlu olarak hesaplanması gereken veri azaltma işlemi, U ve V tekil vektörleri üzerinde iki boyutlu olarak hesaplanabilmektedir. Bunun sonucunda veri azaltma işlemi daha kolay ve hızlı bir şekilde gerçekleştirilebilmektedir.

Kullanılacak tekil değer ve vektör sayısının seçimi elde edilebilecek toleransı etkilemektedir. Bunun için programda, her yeni tekil değer ve vektör kullanılan adımda, modeli tanımlayan matrisin değişimi gözlenmekte ve değişim miktarı toleransın altında kaldığında döngü durdurulmaktadır. Döngünün tekrarlama miktarı, kullanılan tekil değer ve vektörlerin sayısıdır. Bu sayede, sadece gerekli sayıda tekil değer ve vektör kullanımı sağlanmaktadır.

Altıncı adımda, veri azaltma işlemi sonunda tekil vektörler tekrar çarpılarak basitleştirilmiş Z-map matrisi elde edilir. Son adımda ise azaltılmış model matrisi raw formatında dosyaya yazılmaktadır. Programa ait akış şeması Şekil 7.2’de verilmiştir.

7.1.2 Düzensiz Yüzey Verilerinin Azaltan Programın Algoritması

Düzensiz noktalar üzerinde veri azaltma yapan bilgisayar programı 9 adımda işlemleri gerçekleştirmektedir. İlk adımda, 3 boyutlu model üzerindeki en küçük ve en büyük eğrilik yarıçapı değerleri, kullanılacak kesici takımın çapı ve modelden istenilen tolerans değerleri programa girilmektedir. Aynı zamanda dışarıdan gelen poligonal modele ait köşe noktaları veya tersine mühendislikten gelen noktaların koordinatlarını içeren veri dosyası programa alınır.

İkinci adımda program girilen değerlere göre, XY’ye bağlı Z-map modelinin kurulmasında ihtiyaç duyulacak sabit adımlı referans ağın adım değeri hesaplanır.

Üçüncü adımda, dışarıdan alınan veri dosyasındaki noktalar referans ağın üzerine yerleştirilerek, hücelere denk gelen noktaların x, y ve z koordinatları ayrı matrislere yazılmaktadır. Alınan noktaların, referans ağ hücreleri içerisinde serbest yerleşiminden dolayı, x, y ve z koordinatlarından ayrı matrisler oluşturulmaktadır. Düzensiz yüzey verilerini azaltan program tüm aşamalarda hesaplama ve kontrolleri Z matrisini baz alarak yapmakta ancak Z matrisi üzerinde yapılan işlem aynı şekilde X ve Y matrisleri üzerine de uygulanmaktadır.

Dördüncü adımda, tüm değerleri aynı olan satır ve sütunlar ile içerisinde hiç nokta bulunmayan boş satır ve sütunlar tespit edilerek matrislerden atılır.

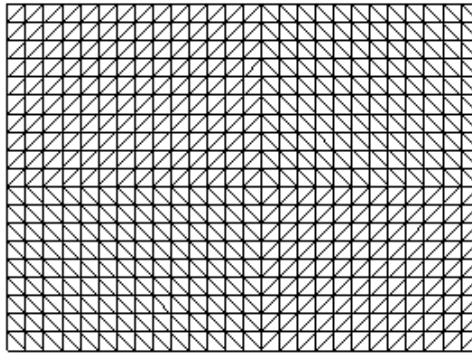
Yapılan işlemler sonucunda matrislerin bazı hücreleri boş kalabilmektedir. Beşinci adımda boş hücreler, referans ağın hücre merkezlerinde oluşturulan noktaların model üzerine izdüşürülmesi ile hesaplanan noktalar ile doldurulur. Tersine mühendislikten gelen nokta bulutlarında ise boş hücreler lineer enterpolasyon ile doldurulur. Bu işlemler sonucunda XY’ye bağlı Z-map modelini oluşturan X, Y ve Z matrisleri elde edilir.

Program altıncı adımda, X, Y ve Z matrislerini tekil değerlerine ayrıştırma işlemini ve yedinci adımda tekil vektörler üzerinden veri azaltma işlemlerini gerçekleştirmektedir. Bu işlemler düzenli yüzey verilerinin azaltılmasına benzer şekildedir. Düzenli yüzey verilerinin azaltılmasında kullanılan yöntemle göre farklı olan işlem, hesaplamaların sadece Z matrisi üzerinde değil, aynı zamanda X ve Y matrislerinde de yapılıyor olmasıdır. Sekizinci adımda,

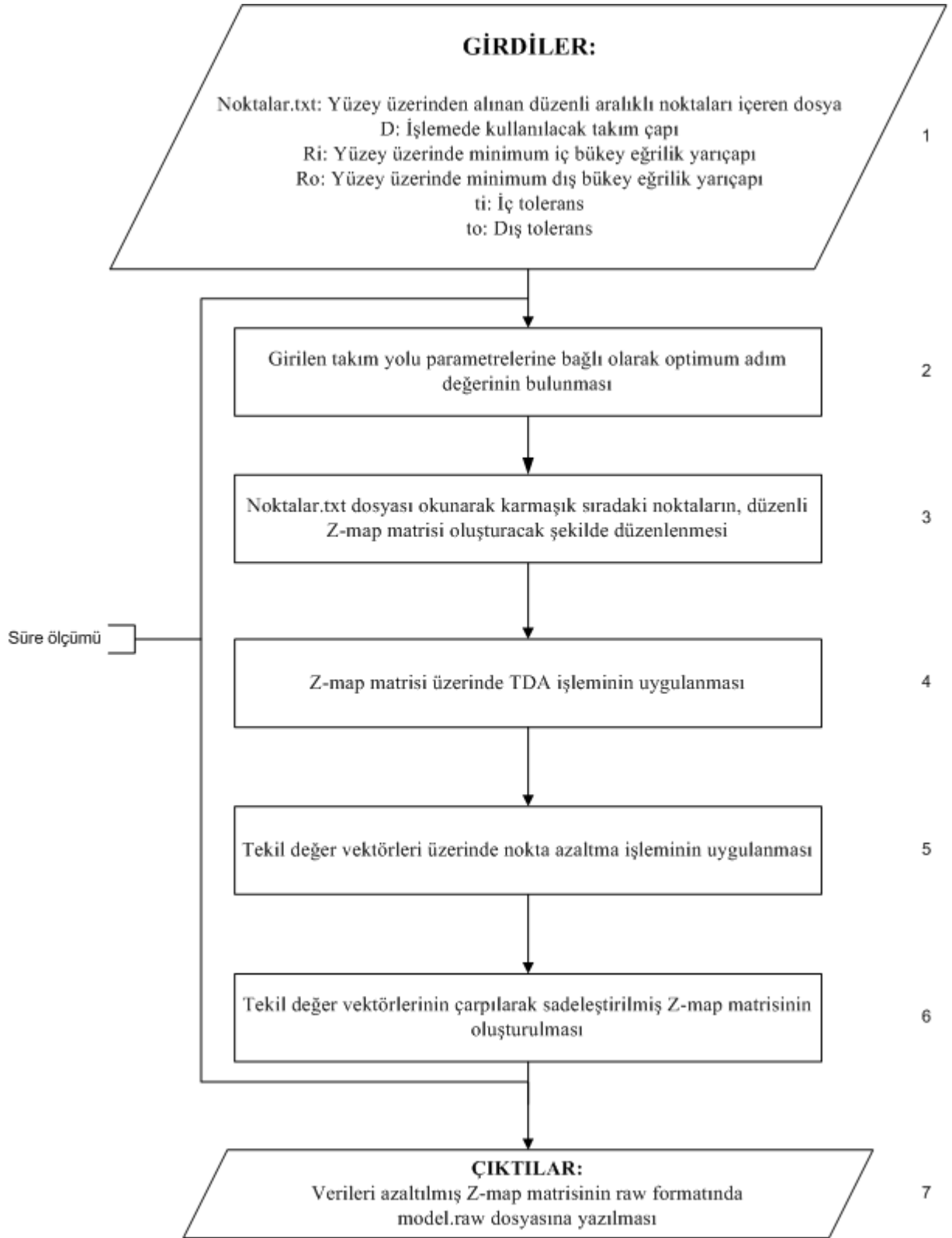
veri azaltma işlemi sonunda tekil vektörler tekrar çarpılarak basitleştirilmiş XY'ye bağlı Z-map matrisleri elde edilir. Son adımda ise azaltılmış model matrislerindeki veriler raw formatında dosyaya yazılmaktadır. Düzensiz noktalar üzerinde çalışan programa ait akış şeması Şekil 7.3'te verilmiştir.

7.1.3 Sonuçların Dosyaya Yazdırılması

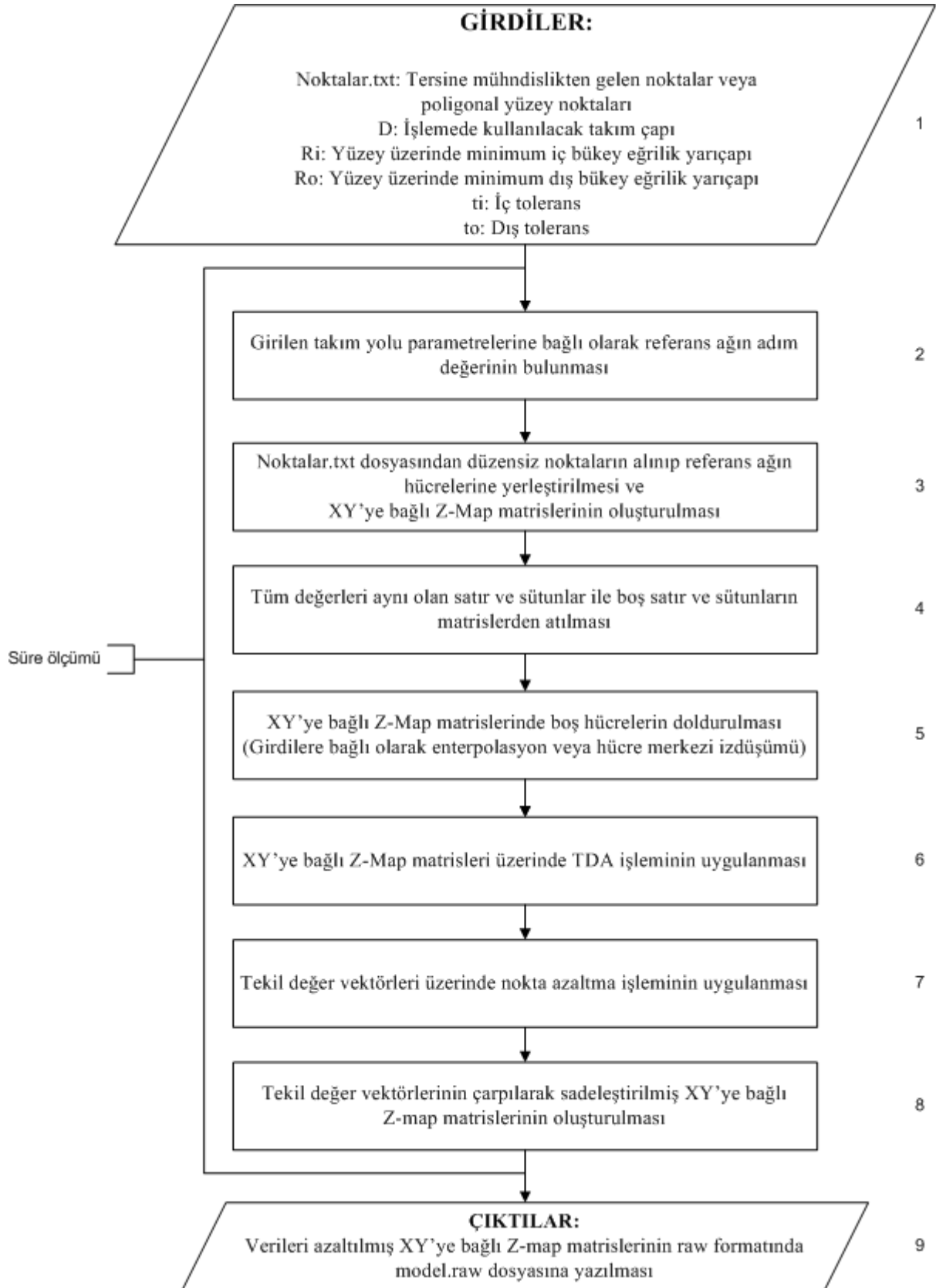
Geliştirilen her iki programın azaltılmış yüzey verilerini takım yolu hesabı, ölçü kontrolü gibi işlemler için bilinen yaygın bir formatta çıktı olarak verebilmesi gerekir. Z-map matrisindeki noktalardan üçgenleştirme işlemi ile poligonal yüzey elde edilmektedir. Çoğu CAD/CAM yazılımı genellikle stl, raw gibi poligonal yüzey formatlarını desteklemektedir. Programda, yapısının basitliği nedeniyle poligonal ağ dosyalama yöntemlerinden “raw” dosya türü tercih edilmiştir. Raw formatı, Bölüm 3.3'te detayları verilen köşe – köşe yapısında bir poligonal yüzey tanımlama yöntemidir. Raw dosyaları, basit metin yapısında dosyalardır. Noktalar, her üç nokta bir üçgen oluşturacak şekilde raw dosya formatında kaydedilmektedir. Üç noktanın x, y ve z koordinatları, sırasıyla her satırda dokuz sayı olacak şekilde kaydedilir. Yüzeyi tanımlayan matrsten poligonal model elde edilirken, birbirine komşu dört noktadan iki üçgen elde edilecek şekilde üçgenleştirme işlemi yapılmaktadır. Bunun için, dört noktadan oluşan dörtgensel yapı poligonlar köşegenlerden biri doğrultusunda ikiye bölünmektedir. Yüzey yapısına etkisi olan köşegenlerin doğrultusu ve üçgenlerin yönelimi kullanıcı tarafından seçilebilmektedir. Yapılan uygulamalarda genel olarak iyi sonuç verebilen yöntem, üçgenlerin parça merkezine doğru yönelmesi olmuştur (Şekil 7.1) ve bu yöntem program tarafından standart yöntem olarak kullanılmıştır. Kaydedilen raw dosyaları CAD/CAM yazılımlarına aktararak, üzerlerinde kontrol ve takım yolu hesaplaması gibi işlemler yapılmıştır.



Şekil 7.1 Raw dosyası için seçilen üçgensel yapı



Şekil 7.2 Düzenli yüzey verilerini azaltan programın akış şeması



Şekil 7.3 Düzensiz yüzey verilerini azaltan programın akış şeması

7.2 Hata Ölçümü

Son yıllarda poligonal yapıdaki yüzeylerde veri azaltılmasına yönelik önemli sonuçlar elde edilen çalışmalar yapılmıştır (Cignoni vd. 1998a). Bu çalışmalarda geliştirilen yöntemler, farklı veri azaltma miktarları ve tolerans değerleri sağlamaktadır. Yöntemlerin, herbiri çok farklı kriter ve yaklaşımlarla veri azalttıkları ve hata ölçümünün bir çok yolu olabildiğinden bunlar kolaylıkla karşılaştırılamazlar. Bu nedenle Cignoni vd. (1998b), orijinal ve basitleştirilmiş poligonal modeller arasındaki gerçek geometrik farkı ölçebilecek “Metro” isimli bir yazılım geliştirmişlerdir.

Metro yazılımı, stl veya ply dosya türünde iki farklı üçgen yapıları poligonal modeli sayısal olarak birbiri ile karşılaştırmaktadır. Yazılım çıktı olarak modellerin nokta ve üçgen sayıları, çevrel sınır ölçüleri, yüzey alanları ve hacimleri, maksimum mutlak hata, ortalama hata ve modeller üzerinde renklendirme ile hata dağılım grafiği vermektedir. Yazılımdan elde edilen hata dağılım grafikleri, mavi maksimum hatayı ve kırmızı hatasız bölgeleri gösterecek şekilde renklendirilmektedir.

Yazılımda ölçüm yapılan kontrol noktaları üç farklı yöntem ile seçilebilmektedir. Bunlardan birincisi Montecarlo örneklemesidir. Bu yöntemde her üçgen içinde belirli sayıda gelişigüzel nokta kontrol noktası olarak alınır. İkinci yöntem altbölümleme örneklemesidir. Bu yöntemde her üçgen tekrarlamalı olarak en uzun kenarı boyunca ikiye bölünür ve bölünen üçgenlerin merkezleri kontrol noktası olarak alınır. Son yöntem ise benzer üçgenler bölümlemesidir. Üçgen kendisine benzer alt üçgenlere bölünür ve ana üçgen içinde kalan alt üçgenlerin köşe noktaları kontrol noktaları olarak alınır. Yazılım standart ayar olarak bu yöntemi kullanmaktadır.

Literatürde birçok araştırmaya ait Metro yazılımı ile elde edilmiş karşılaştırma sonuçları olması sebebiyle (Cignoni vd. 1998a), bu çalışmada kullanılması tercih edilmiştir. Yazılımın güncel 4.07 sürümü kullanılmıştır ve yazılım serbest kullanıma açıktır [2].

7.3 Uygulamalar

Geliştirilen yöntemin sonuçlarının değerlendirilebilmesi için, değişik geometrik özellikler içeren modeller üzerinde uygulamalar yapılmıştır. Veri azaltma işlemi uygulanacak olan modellerin, keskin kenarlar içermesi veya yumuşak geçişlere sahip formu bir yüzey olması hem geliştirilen mevcut yöntemin, hem de daha önce incelenen literatürdeki birçok yöntemin performansını etkilemektedir. Çalışmada takım yolu hesabına yönelik yüzey basitleştirme

incelendiğinden, bu amaca yönelik iki farklı model seçilmiştir. Bu modeller üzerinde değişen veri azaltma oranlarının etkilerinin incelenebilmesi için modellerin karakteristiğine uygun işleme parametreleri seçilmeye çalışılmıştır.

Bilgisayar ortamındaki hesaplamalar, Intel Core2Duo T9300 (2,5 Ghz) çift çekirdekli işlemci, 4GB RAM'e sahip bir bilgisayar üzerinde ve Windows Vista işletim sisteminde yapılmıştır. Hesaplama süreleri Matlab ve Hypermill yazılımları tarafından dâhili olarak ölçülebilmektedir. Hesaplama sürelerinin karşılaştırılmasında bu veriler kullanılmıştır.

Veri azaltma işleminden sonra programdan alınan üçgen yapıdaki model, endüstride yaygın kullanılan CAM yazılımlarından biri olan Hypermill yazılımı kullanılarak işlenmiştir. Hypermill yüzey üzerinden takım yolu hesabında, parametrik yüzeyler yerine 3df formatlı poligonal model kullanmaktadır. Hypermill'de hem dışarıdan alınan poligonal yapıdaki modellerin işlenmesi, hem de parametrik yüzeylerin işlenmesi mümkündür. Parametrik yüzeyler işleme esnasında dâhili olarak poligonal modele çevrildiğinden, çalışmada geliştirilen yöntemin verdiği poligonal model ile Hypermill'in kullandığı poligonal modelin doğrudan karşılaştırılabilmesi mümkün olmaktadır.

Takım yolu hesaplaması yapılan modeller EN AW-5083 alüminyum alaşım malzeme üzerine işlenmiştir. Alüminyumun tercih edilme nedeni, işleme kolaylığı ve kolay temin edilebilirliğinin yanında, takım yolu oluşturma ve işleme sürecindeki tüm parametrelerin olumlu veya olumsuz etkilerini işlenmiş yüzey üzerinde gösterebilmesidir. Modeller Fanuc 18-iMB kontrol üniteli Awea AF-1000 3 eksen CNC dik işleme merkezinde işlenmiştir.

Geliştirilen yöntem kaba ve ince işleme yöntemlerine uygun hassasiyetler için uygulanmış ve her iki işleme türü üzerindeki sonuçları değerlendirilmiştir. Uygulama yapılan tüm modeller öncelikle yüzey üzerinde 0,3 mm talaş bırakılacak şekilde kaba olarak işlenmiştir. Sonrasında her uygulamada uygulamanın özelliklerine göre belirlenmiş farklı ince işleme parametreleri kullanılarak ince işlemleri yapılmıştır. Hassasiyetin yöntemin performansına etkilerinin incelenebilmesi için, her uygulamada farklı hassasiyet değerleri kullanılmıştır.

İşlemleri yapılan modeller, öncelikle bilgisayar ortamında ölçüsel olarak değerlendirildikten sonra, Breuckmann Opto Top He model optik üç boyutlu koordinat ölçme cihazında ölçümleri yapılmış ve Rapidform yazılımı kullanılarak ölçüm raporları çıkarılmıştır. Kullanılan optik tarayıcının hassasiyeti 500 mm'den küçük parçalar için ortalama 0,05 mm'dir. Optik tarama yöntemi, parçanın tümü üzerinden çok fazla sayıda noktanın alınabilmesi ve çok detaylı bir kontrol yapılabilmesi imkânı sunmaktadır. Yöntemin bir

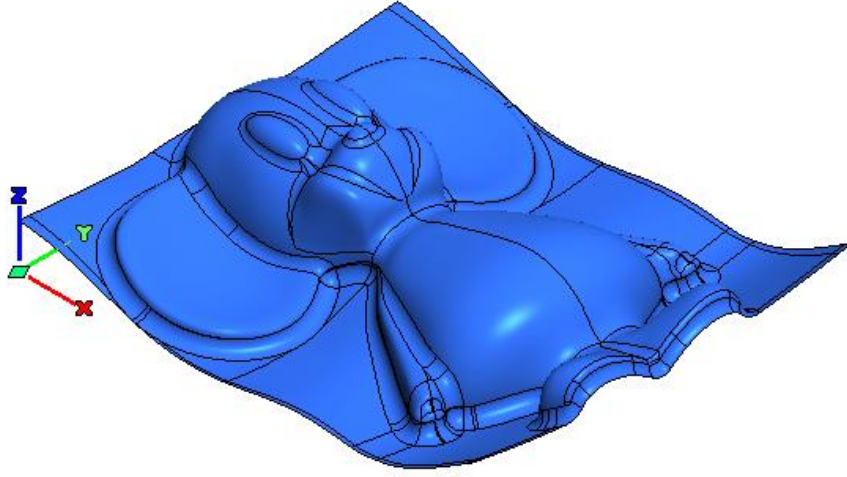
dezavantajı, modellerin ölçülebilmesi için yüzey üzerine kalınlığı 0,01 ile 0,02 mm arasında değişen toz boya uygulanması gerekliliğidir. Boya ölçüm sonuçlarını az da olsa etkilemektedir. Ancak boya kalınlığı cihaz hassasiyetinin yanında küçük bir değer olup, hatanın ortaya çıkabileceği bölgelerin tespit edilmesi üzerindeki etkisi azdır.

Modeller üzerinde veri azaltma işleminden sonra, azaltma oranları hesaplanarak sonuçlarda verilmiştir. Veri azaltma oranı, başlangıç nokta sayısından azaltılmış model nokta sayısının çıkarılıp başlangıç nokta sayısına bölümü ile hesaplanmaktadır. Bu nedenle veri artışının olduğu durumlarda negatif azalma oranları bulunmuştur.

7.4 Düzenli Ve Düzensiz Yüzey Verileri Kullanılarak Yapılan Uygulamalar Ve Sonuçlarının Karşılaştırılması

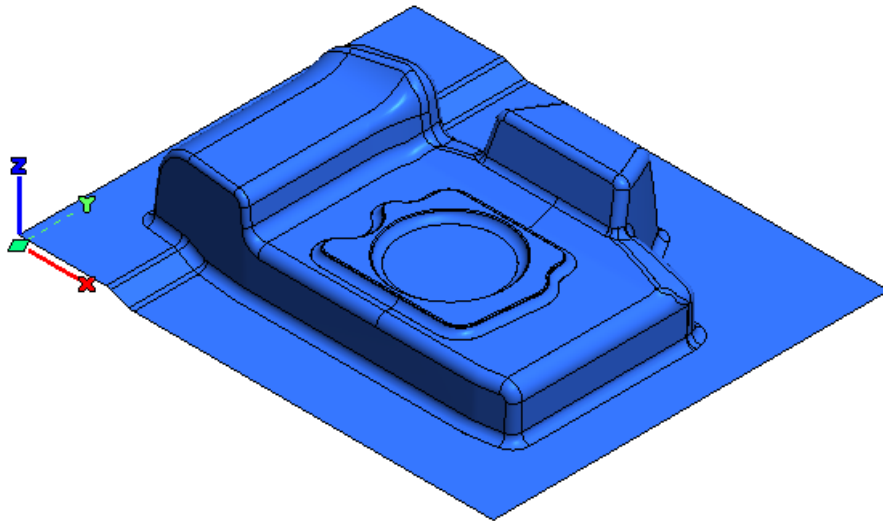
Poligonal modellerin basitleştirilmesi ile ilgili literatürdeki çalışmalar incelendiğinde, ilk yapılan çalışmaların geometrik olmayan yüzeylerden oluşmuş karmaşık formlu parçalarda iyi sonuçlar verdiği, daha güncel çalışmaların ise aynı zamanda keskin kenarlar içeren modellerde de iyi sonuçlar verdiği görülmektedir (Garland, Heckbert, 1997b). Literatürdeki çalışmalarda çoğunlukla geometrik olmayan yüzeylerden oluşmuş karmaşık formlu modeller (insan yüzü veya çeşitli hayvan figürleri gibi) üzerinde uygulamalar görülmektedir.

Uygulamalar için seçilen birinci model karmaşık formlu yüzeylerden oluşmaktadır. Model 120x100x28,2 mm ölçülerindedir ve Şekil 7.4'te görülmektedir. Yapısal olarak birbirine teğet, yumuşak geçişleri olan ve XY düzlemine dik olmayan yüzeylerden oluşmaktadır. Model incelendiğinde, geometri üzerinde en küçük içbükey yüzey eğrilik yarıçapı 3 mm, dışbükey yüzey eğrilik yarıçapı 1 mm olarak ölçülmüştür. Modelin formu ve üzerindeki en küçük yarıçap göz önüne alınarak, işlemlerde Ø6 mm küre uçlu kesici takım kullanılmıştır.



Şekil 7.4 Uygulamalar için seçilen birinci model

Geliştirilen yöntemin keskin kenarlar ve dik duvarlar içeren bir model üzerinde de sonuçlarının değerlendirilebilmesi gerekmektedir. Bu amaçla seçilen ikinci model, yumuşak geçişlerin olduğu formlu yüzeylerle birlikte keskin kenarlar ve dik duvarlar da içermekte ve en genel durumda karşılaşılabilecek bir modele ait özellikleri taşımaktadır. Model 120x100x25,35 mm ölçülerindedir ve Şekil 7.5'te görülmektedir. Model üzerinde en küçük içbükey yüzey eğrilik yarıçapı 2mm ve dışbükey yüzey eğrilik yarıçapı sıfırdır. Bu durumda toleransa bağlı nokta aralığı denklemlerinin (6.7 ve 6.8) sonuç verebilmesi için dış dışbükey yüzey eğrilik yarıçapı istenilen tolerans değerinde kabul edilmiştir. Modelin işlenmesinde Ø4 mm küre uçlu kesici takım kullanılmıştır.

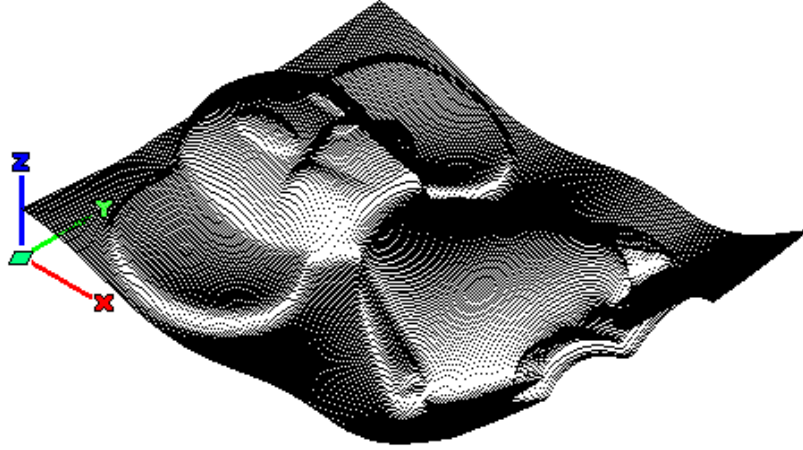


Şekil 7.5 Uygulamalar için seçilen ikinci model

7.4.1 Düzenli Yüzey Verileri Kullanılarak Yapılan Uygulamalar

7.4.1.1 Birinci Model Üzerinde İnce İşlemeye Ait Uygulama

Birinci modele ait 0,5 mm düzenli aralıklı noktalardan oluşan Z-map modeli Şekil 7.6'da gösterilmiştir.



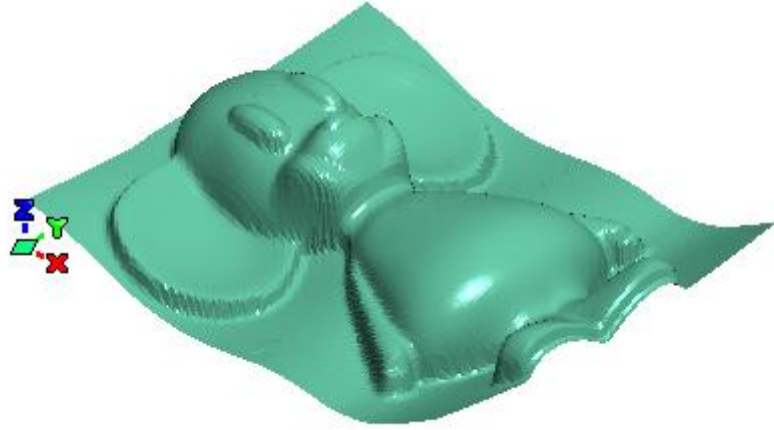
Şekil 7.6 Z-map modeli

Örnekteki model için ince işlemede istenilen iç ve dış tolerans değeri 0,05 mm olarak kabul edilmiştir. İşlemede kullanılacak olan Ø6 mm küre uçlu kesici takım ve 0,05 mm iç ve dış tolerans değeri göz önüne alındığında, önerilen nokta aralığı 0,773 mm olarak hesaplanır. 0,5 mm nokta aralığına sahip orijinal Z-map modeli, bir doğrultuda 241, diğer doğrultuda 201 nokta olmak üzere toplam 48.441 nokta içermektedir. Model 0,773 mm nokta aralığına sahip olacak şekilde basitleştirildiğinde, bir doğrultuda 156, diğer doğrultuda 130 nokta, toplamda 20.280 nokta içerir. Bu durumda modelin toplam nokta sayısında %58,1'lik bir azalma sağlanmaktadır.

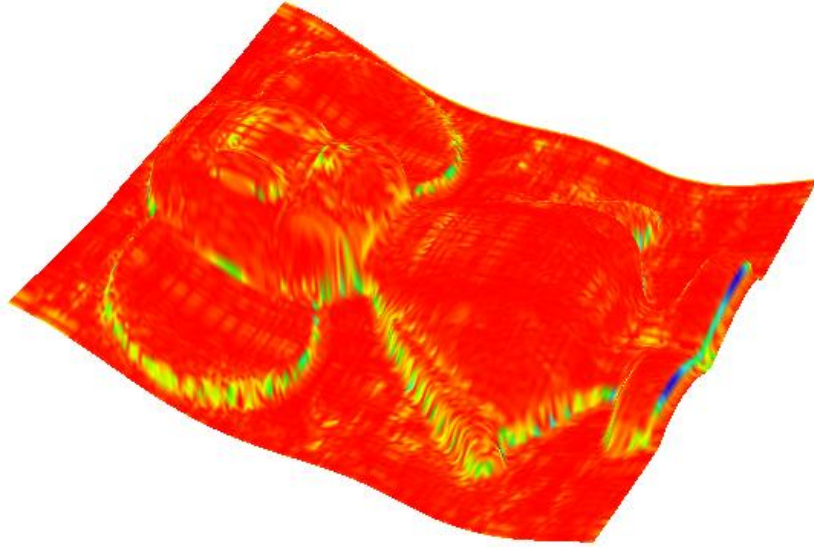
Program çalıştırıldığında gerekli toleransın sağlanması için 58 tekil değer ve bunlara karşılık gelen tekil vektörlerin kullanılması gerektiği sonucu alınmakta ve nokta azaltma işlemi 1,05 sn sürmektedir. Uygulanan tekil değerlere ayrıştırma işleminin sonucunda, 58 tekil değer ve vektörün modeli ifade edebilmesi sayesinde hesaplamalar basitleşmiş ve toplam 25.694 elemandan oluşan matrisler üzerinde yapılabilmektedir. Bu da %47 daha az veri içeren matrisler üzerinde hesaplama yapabilme imkânı sağlamıştır.

Azaltılmış model, programdan poligonal model olarak raw formatında alınmaktadır (Şekil 7.7). Orijinal model ile veri azaltılmış model Metro yazılımı ile bilgisayar ortamında

karşılaştırıldığında maksimum hata miktarı 0,564 mm, ortalama mutlak hata miktarı 0,030 mm olarak hesaplanmıştır. Noktaların yaklaşık %85,1'i hedeflenen 0,05 mm toleransın içerisinde kalmıştır. Hata dağılım grafiği Şekil 7.8'de gösterilmiştir. Veri azaltılmış model, programdan alınan verileri azaltılmamış Z-map modeli ile karşılaştırıldığında ise maksimum hata miktarı 0,456 mm, ortalama mutlak hata miktarı 0,018 mm olarak hesaplanmıştır. Noktaların yaklaşık %92'si hedeflenen 0,05 mm toleransın içerisinde kalmıştır. Sonuç ortalama hata bazında incelendiğinde, hatanın %60'ı veri azaltmadan, %40'ı ise model oluşturmadan kaynaklanmaktadır.



Şekil 7.7 Basitleştirilmiş poligonal model



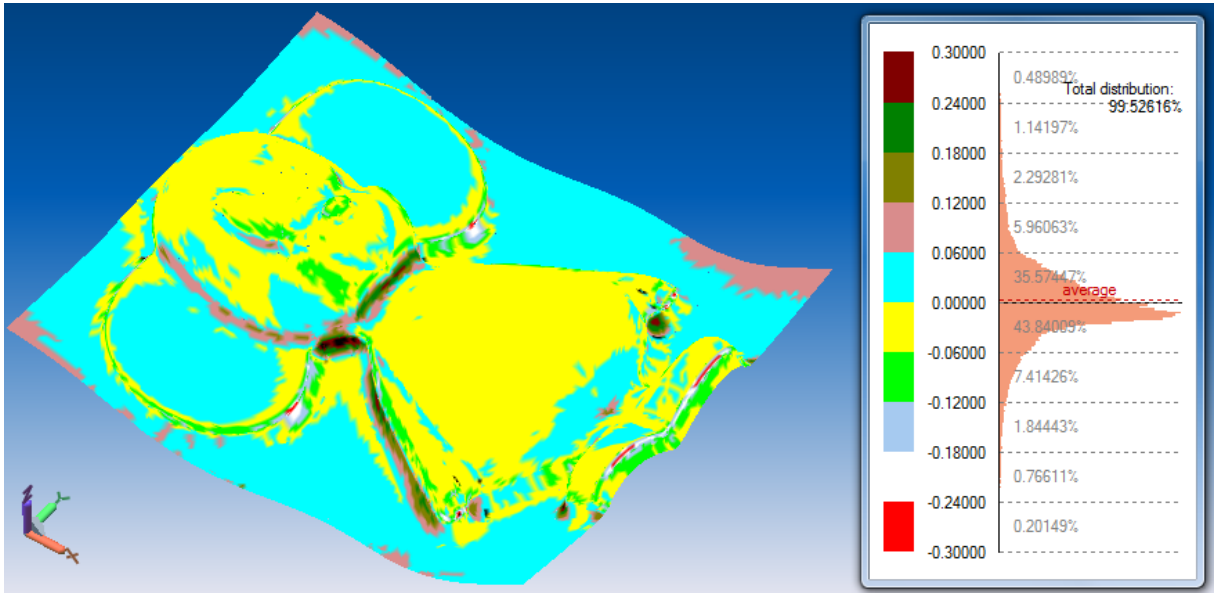
Şekil 7.8 Bilgisayar ortamında hata grafiği

Programdan alınan basitleştirilmiş poligonal model üzerinde Hypermill yazılımı kullanılarak takım yolları oluşturulmuştur. Son işleme için Ø6 mm küre uçlu takım, 0,15 mm yanıl adım ve optimize edilmiş paralel takım yolu yöntemi kullanılmıştır. CNC frezede işlenen model Şekil 7.9’da görölmektedir. Hypermill ile yöntemden elde edilen yüzey verileri azaltılmış model üzerinde takım yolu hesabı 17 sn sürmüştür. Hypermill’in dahili poligon dönüştürücüsü ile modelin hesaplama süresi de 17 sn’dir.

İşlemesi yapılan model üç boyutlu optik ölçüm cihazı ile ölçölmüştür. Ölçüm sonucunda hata miktarını gösteren grafik Şekil 7.10’da görölmektedir. Ölçüm sonucunda maksimum pozitif hata miktarı 0,307 mm, maksimum negatif hata miktarı 0,259 mm, standart sapma 0,074 olarak bulunmuştur. Noktaların %99,53’ü 0,3 mm toleransın içerisinde kalmış, %74,37’si ise hedeflenen 0,05 mm toleransın içerisinde kalmıştır.



Şekil 7.9 İşlenen model



Şekil 7.10 İşlenen modelin ölçüm sonuçları

Hypermill yazılımının takım yolu hesabı için kullandığı poligon dönüştürücüsü orijinal modeli, aynı tolerans değerinde 23.399 noktadan oluşan bir poligonal yüzey ile tanımlamıştır. Bu da, önerilen yöntemden elde edilen 20.280 noktalık poligonal modelin yaklaşık %13,3 daha az veri içerdiğini göstermektedir.

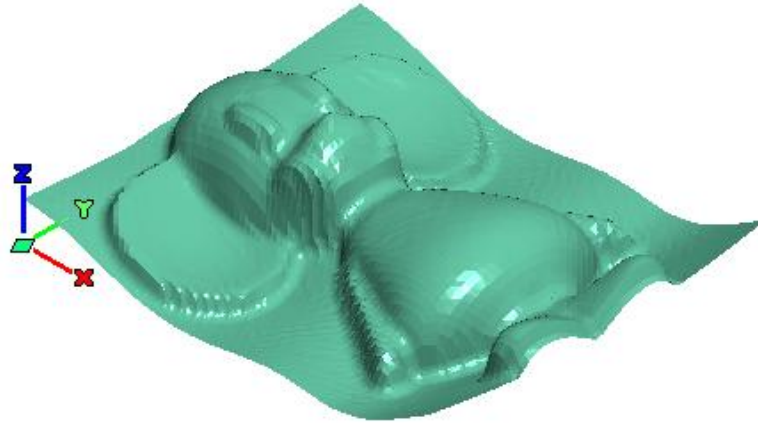
7.4.1.2 Birinci Model Üzerinde Kaba İşlemeye Ait Uygulama

Birinci modele ait 0,5 mm düzenli aralıklı noktalardan oluşan ve Şekil 7.6’da görülen Z-map modeli üzerinde kaba işleme parametreleri kullanılarak veri azaltma işlemi yapılmıştır. Örnekteki model için kaba işlemede istenilen iç ve dış tolerans değeri 0,2 mm olarak kabul edilmiştir. İşlemede kullanılacak olan Ø6 mm küre uçlu kesici takım ve 0,2 mm iç ve dış tolerans değeri göz önüne alındığında, önerilen nokta aralığı 1,536 mm olarak hesaplanır. 0,5 mm nokta aralığına sahip orijinal Z-map modeli, bir doğrultuda 241, diğer doğrultuda 201 nokta olmak üzere toplam 48.441 nokta içermektedir. Model 1,536 mm nokta aralığına sahip olacak şekilde basitleştirildiğinde, bir doğrultuda 79, diğer doğrultuda 66 nokta, toplamda 5.214 nokta içerir. Bu durumda modelin toplam nokta sayısında %89,2’lik bir azalma sağlanmaktadır.

Program çalıştırıldığında gerekli toleransın sağlanması için 20 tekil değer ve bunlara karşılık gelen tekil vektörlerin kullanılması gerektiği sonucu alınmakta ve nokta azaltma işlemi 1,38 sn sürmektedir. Uygulanan tekil değerlere ayrıştırma işleminin sonucunda, 20 tekil değer ve vektörün modeli ifade edebilmesi sayesinde hesaplamalar basitleşmiş ve toplam 8.860

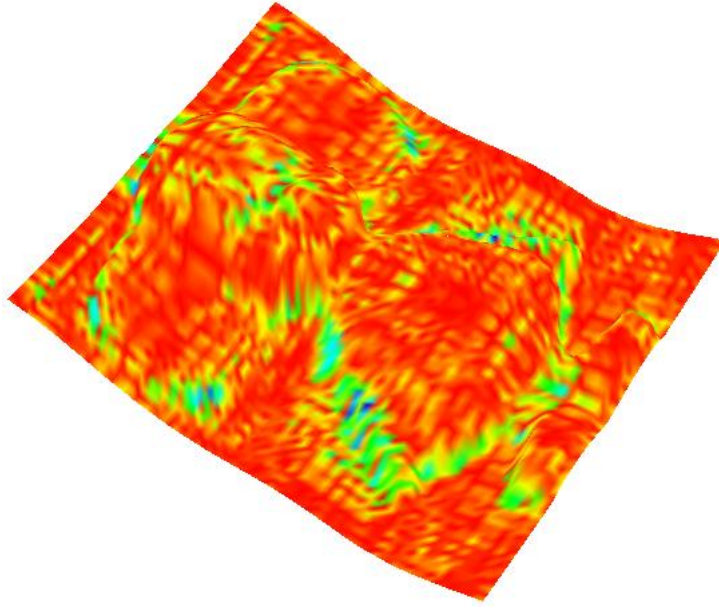
elemandan oluşan matrisler üzerinde yapılabilmektedir. Bu da %81,7 daha az veri içeren matrisler üzerinde hesaplama yapabilme imkânı sağlamıştır.

Azaltılmış model, programdan poligonal model olarak raw formatında alınmaktadır (Şekil 7.11). Orijinal model ile veri azaltılmış model Metro yazılımı ile bilgisayar ortamında karşılaştırıldığında maksimum hata miktarı 1,078 mm, ortalama mutlak hata miktarı 0,088 mm olarak hesaplanmıştır. Noktaların yaklaşık %87,4'ü hedeflenen 0,2 mm toleransın içerisinde kalmıştır. Hata dağılım grafiği Şekil 7.12'de gösterilmiştir. Veri azaltılmış model, programdan alınan verileri azaltılmamış Z-map modeli ile karşılaştırıldığında ise hata miktarı 1,029 mm, ortalama mutlak hata miktarı 0,077 mm olarak hesaplanmıştır. Noktaların yaklaşık %90'ı hedeflenen 0,2 mm toleransın içerisinde kalmıştır. Sonuç ortalama hata bazında incelendiğinde, hatanın %87,5'i veri azaltmadan, %12,5'i ise model oluşturmada kaynaklanmaktadır.



Şekil 7.11 Basitleştirilmiş poligonal model

Programdan alınan basitleştirilmiş poligonal model üzerinde Hypermill yazılımı kullanılarak takım yolları oluşturulmuştur. Son işleme için Ø6 mm küre uçlu takım, 0,15 mm yanıl adım ve optimize edilmiş paralel takım yolu yöntemi kullanılmıştır. CNC frezede işlenen model Şekil 7.13'te görülmektedir. Hypermill ile yöntemden elde edilen yüzey verileri azaltılmış model üzerinde takım yolu hesabı 11 sn sürmüştür. Hypermill'in dahili poligon dönüştürücüsü ile modelin hesaplama süresi ise 12 sn'dir.

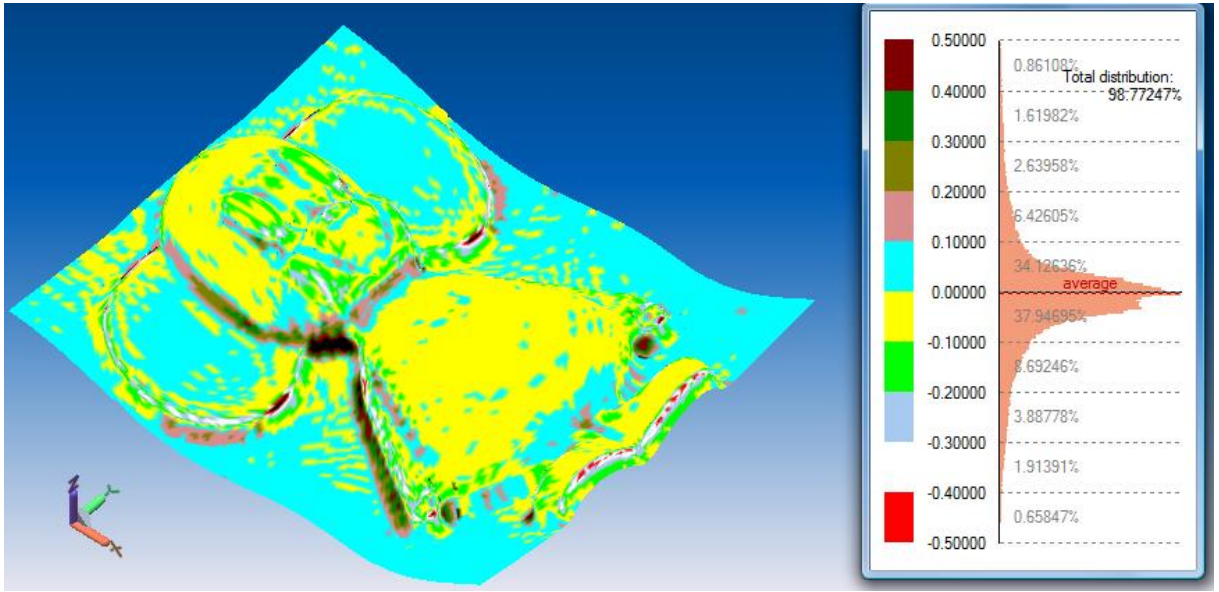


Şekil 7.12 Bilgisayar ortamında hata grafiği

İşlemesi yapılan model üç boyutlu optik ölçüm cihazı ile ölçülmüştür. Ölçüm sonucunda hata miktarını gösteren grafik Şekil 7.14'te görülmektedir. Ölçüm sonucunda maksimum pozitif hata miktarı 0,649 mm, maksimum negatif hata miktarı 0,537 mm, standart sapma 0,147 olarak bulunmuştur. Noktaların %98,77'si 0,5 mm toleransın içerisinde kalmış, %87,2'si ise hedeflenen 0,2 mm toleransın içerisinde kalmıştır.



Şekil 7.13 İşlenen model

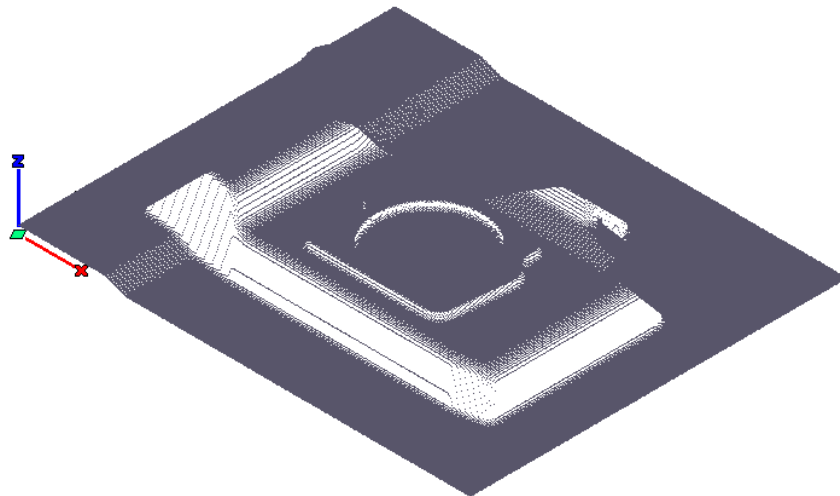


Şekil 7.14 İşlenen modelin ölçüm sonuçları

Hypermill yazılımının takım yolu hesabı için kullandığı poligon dönüştürücüsü orijinal modeli, aynı tolerans değerinde 6.785 noktadan oluşan bir poligonal yüzey ile tanımlamıştır. Bu da, önerilen yöntemden elde edilen 5.214 noktalık poligonal modelin yaklaşık %23,2 daha az veri içerdiğini göstermektedir.

7.4.1.3 İkinci Model Üzerinde İnce İşlemeye Ait Uygulama

İkinci modele ait 0,25 mm düzenli aralıklı noktalardan oluşan Z-map modeli Şekil 7.15'te gösterilmiştir.

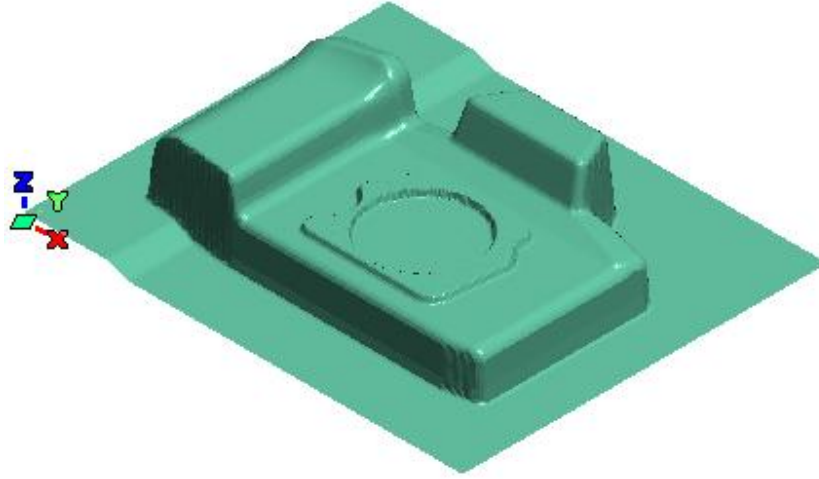


Şekil 7.15 Z-map modeli

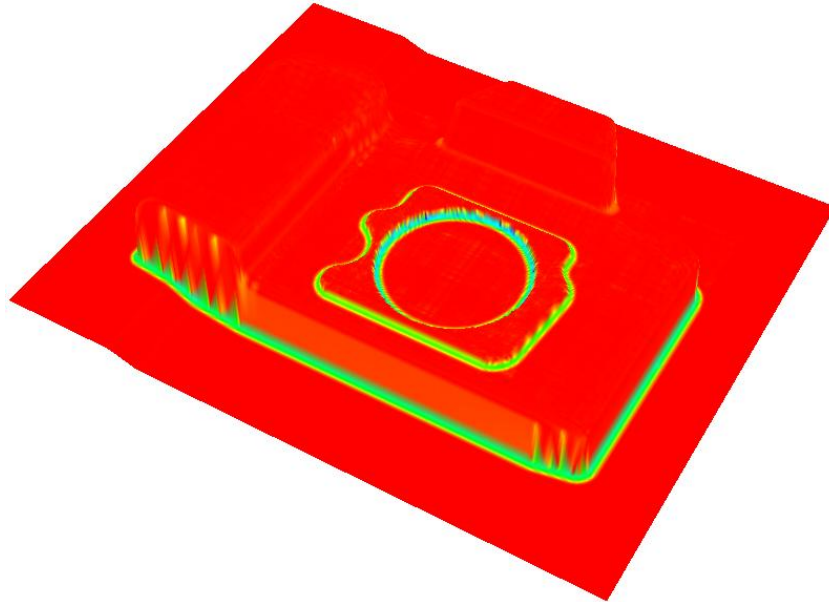
Örnekteki model için ince işlemede istenilen iç ve dış tolerans değeri 0,02 mm olarak kabul edilmiştir. İşlemede kullanılacak olan Ø4 mm küre uçlu kesici takım ve 0,02 mm iç ve dış tolerans değeri göz önüne alındığında, önerilen nokta aralığı 0,399 mm olarak hesaplanır. 0,25 mm nokta aralığına sahip orijinal Z-map modeli, bir doğrultuda 481, diğer doğrultuda 401 nokta olmak üzere toplam 192.881 nokta içermektedir. Model 0,399 mm nokta aralığına sahip olacak şekilde basitleştirildiğinde, bir doğrultuda 301, diğer doğrultuda 251 nokta, toplamda 75.551 nokta içerir. Bu durumda modelin toplam nokta sayısında %60,8'lik bir azalma sağlanmaktadır.

Program çalıştırıldığında gerekli toleransın sağlanması için 112 tekil değer ve bunlara karşılık gelen tekil vektörlerin kullanılması gerektiği sonucu alınmakta ve nokta azaltma işlemi 5,12 sn sürmektedir. Uygulanan tekil değerlere ayrıştırma işleminin sonucunda, 112 tekil değer ve vektörün modeli ifade edebilmesi sayesinde hesaplamalar basitleşmiş ve toplam 98.896 elemandan oluşan matrisler üzerinde yapılabilmektedir. Bu da %48,7 daha az veri içeren matrisler üzerinde hesaplama yapabilme imkânı sağlamıştır.

Azaltılmış model, programdan poligonal model olarak raw formatında alınmaktadır (Şekil 7.16). Orijinal model ile veri azaltılmış model Metro yazılımı ile bilgisayar ortamında karşılaştırıldığında maksimum hata miktarı 0,491 mm, ortalama mutlak hata miktarı 0,020 mm olarak hesaplanmıştır. Noktaların yaklaşık %84,3'ü hedeflenen 0,02 mm toleransın içerisinde kalmıştır. Hata dağılım grafiği Şekil 7.17'de gösterilmiştir. Veri azaltılmış model, programdan alınan verileri azaltılmamış Z-map modeli ile karşılaştırıldığında ise maksimum hata miktarı 0,282 mm, ortalama mutlak hata miktarı 0,008 mm olarak hesaplanmıştır. Noktaların yaklaşık %87,4'ü hedeflenen 0,02 mm toleransın içerisinde kalmıştır. Sonuç ortalama hata bazında incelendiğinde, hatanın %40'ı veri azaltmadan, %60'ı ise model oluşturmadan kaynaklanmaktadır.



Şekil 7.16 Basitleştirilmiş poligonal model



Şekil 7.17 Bilgisayar ortamında hata grafiği

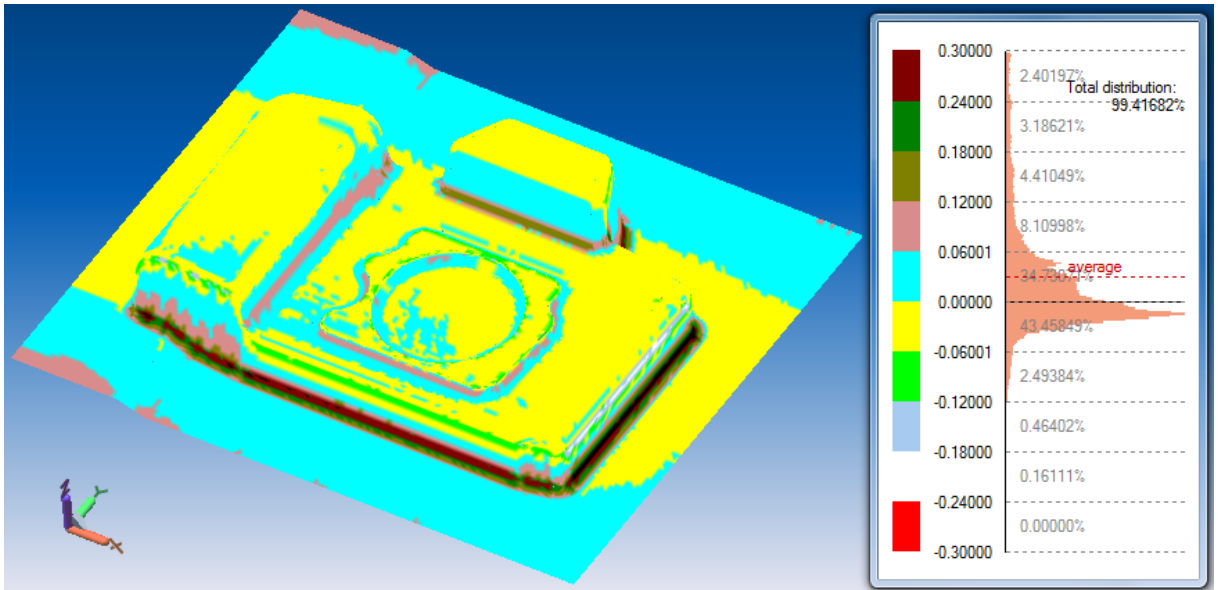
Programdan alınan basitleştirilmiş poligonal model üzerinde Hypermill yazılımı kullanılarak takım yolları oluşturulmuştur. Son işleme için Ø4 mm küre uçlu takım, 0,15 mm yanıl adım ve optimize edilmiş paralel takım yolu yöntemi kullanılmıştır. CNC frezede işlenen model Şekil 7.18’de görölmektedir. Hypermill ile yöntemden elde edilen yüzey verileri azaltılmış model üzerinde takım yolu hesabı 28 sn sürmüştür. Hypermill’in dahili poligon dönüştürücüsü ile modelin hesaplama süresi ise 12 sn’dir.

İşlemesi yapılan model üç boyutlu optik ölçüm cihazı ile ölçölmüştür. Ölçüm sonucunda hata

miktarını gösteren grafik Şekil 7.19’da görülmektedir. Ölçüm sonucunda maksimum pozitif hata miktarı 0,330 mm, maksimum negatif hata miktarı 0,140 mm, standart sapma 0,074 olarak bulunmuştur. Noktaların %99,42’si 0,3 mm toleransın içerisinde kalmış, %44,69’u ise hedeflenen 0,02 mm toleransın içerisinde kalmıştır.



Şekil 7.18 İşlenen model



Şekil 7.19 İşlenen modelin ölçüm sonuçları

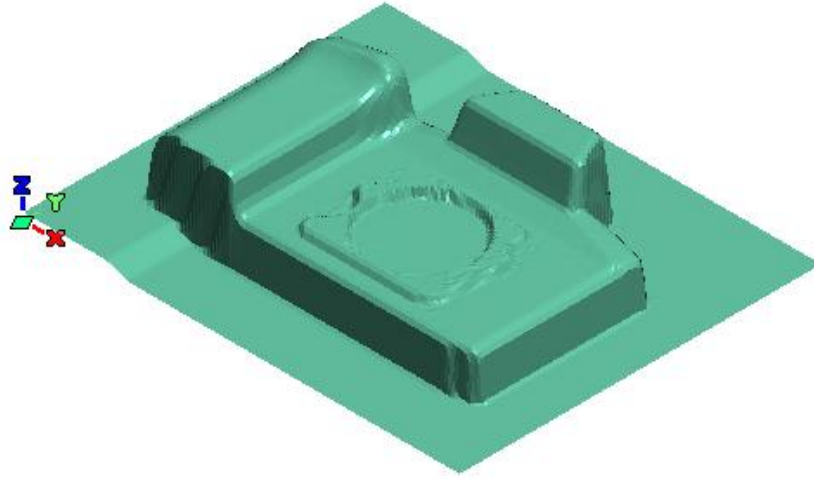
Hypermill yazılımının takım yolu hesabı için kullandığı poligon dönüştürücüsü orijinal modeli, aynı tolerans değerinde 44.596 noktadan oluşan bir poligonal yüzey ile tanımlamıştır. Bu da, önerilen yöntemden elde edilen 75.551 noktalık poligonal modelin yaklaşık %69,4 daha fazla veri içerdiğini göstermektedir.

7.4.1.4 İkinci Model Üzerinde Kaba İşlemeye Ait Uygulama

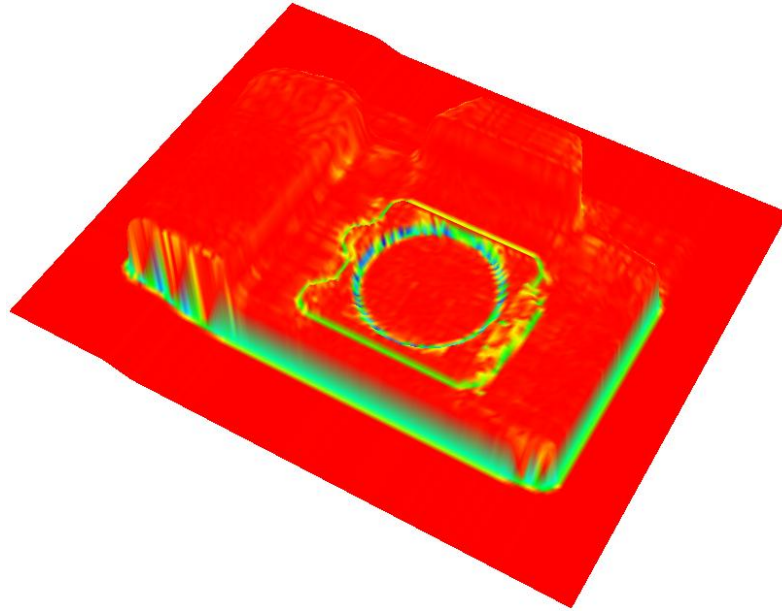
İkinci modele ait 0,25 mm düzenli aralıklı noktalardan oluşan ve Şekil 7.15'te görülen Z-map modeli üzerinde kaba işleme parametreleri kullanılarak veri azaltma işlemi yapılmıştır. Örnekteki model için kaba işlemede istenilen iç ve dış tolerans değeri 0,1 mm olarak kabul edilmiştir. İşlemede kullanılacak olan Ø4 mm küre uçlu kesici takım ve 0,1 mm iç ve dış tolerans değeri göz önüne alındığında, önerilen nokta aralığı 0,888 mm olarak hesaplanır. 0,25 mm nokta aralığına sahip orijinal Z-map modeli, bir doğrultuda 481, diğer doğrultuda 401 nokta olmak üzere toplam 192.881 nokta içermektedir. Model 0,888 mm nokta aralığına sahip olacak şekilde basitleştirildiğinde, bir doğrultuda 136, diğer doğrultuda 113 nokta, toplamda 15.368 nokta içerir. Bu durumda modelin toplam nokta sayısında %92'lik bir azalma sağlanmaktadır.

Program çalıştırıldığında gerekli toleransın sağlanması için 58 tekil değer ve bunlara karşılık gelen tekil vektörlerin kullanılması gerektiği sonucu alınmakta ve nokta azaltma işlemi 4,32 sn sürmektedir. Uygulanan tekil değerlere ayrıştırma işleminin sonucunda, 58 tekil değer ve vektörün modeli ifade edebilmesi sayesinde hesaplamalar basitleşmiş ve toplam 51.214 elemandan oluşan matrisler üzerinde yapılabilmektedir. Bu da %73,45 daha az veri içeren matrisler üzerinde hesaplama yapabilme imkânı sağlamıştır.

Azaltılmış model, programdan poligonal model olarak raw formatında alınmaktadır (Şekil 7.20). Orijinal model ile veri azaltılmış model Metro yazılımı ile bilgisayar ortamında karşılaştırıldığında maksimum hata miktarı 0,620 mm, ortalama mutlak hata miktarı 0,038 mm olarak hesaplanmıştır. Noktaların yaklaşık %87,7'si hedeflenen 0,1 mm toleransın içerisinde kalmıştır. Hata dağılım grafiği Şekil 7.21'de gösterilmiştir. Veri azaltılmış model, programdan alınan verileri azaltılmamış Z-map modeli ile karşılaştırıldığında ise maksimum hata miktarı 0,653 mm, ortalama mutlak hata miktarı 0,034 mm olarak hesaplanmıştır. Noktaların yaklaşık %87,1'i hedeflenen 0,1 mm toleransın içerisinde kalmıştır. Sonuç ortalama hata bazında incelendiğinde, hatanın %89,5'i veri azaltmadan, %10,5'i ise model oluşturmadan kaynaklanmaktadır.



Şekil 7.20 Basitleştirilmiş poligonal model

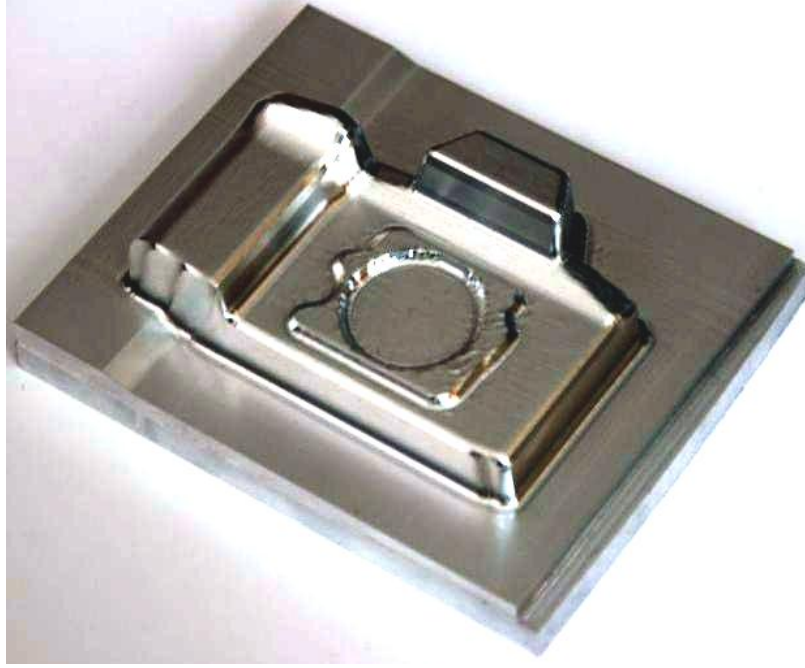


Şekil 7.21 Bilgisayar ortamında hata grafiği

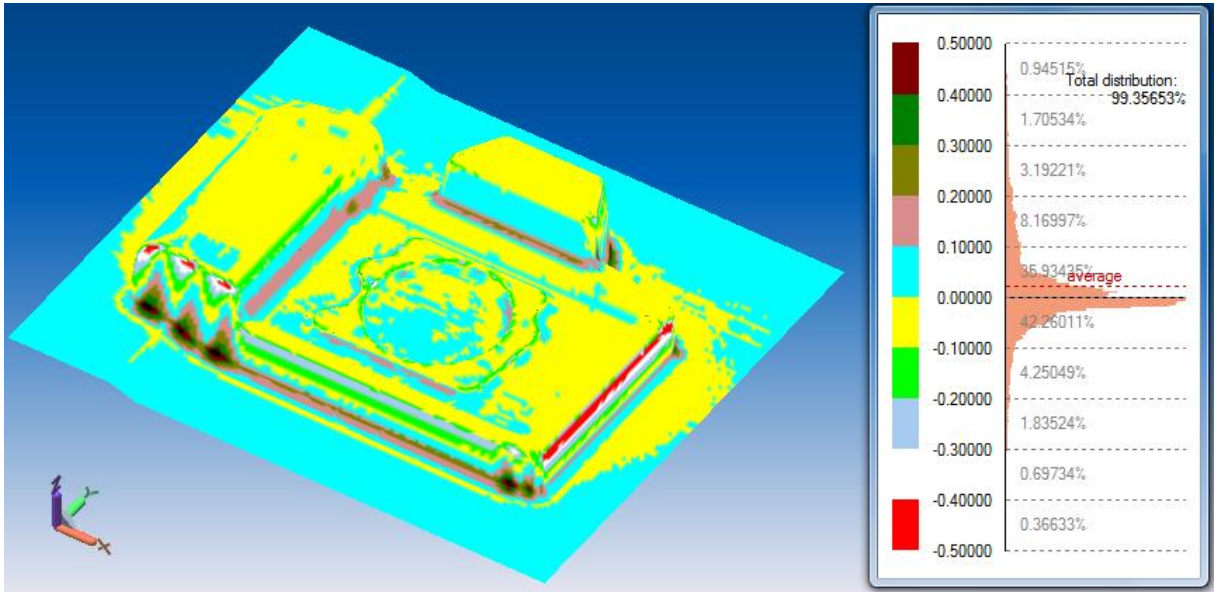
Programdan alınan basitleştirilmiş poligonal model üzerinde Hypermill yazılımı kullanılarak takım yolları oluşturulmuştur. Son işleme için Ø4 mm küre uçlu takım, 0,15 mm yanıl adım ve optimize edilmiş paralel takım yolu yöntemi kullanılmıştır. CNC frezede işlenen model Şekil 7.22’de görölmektedir. Hypermill ile yöntemden elde edilen yüzey verileri azaltılmış model üzerinde takım yolu hesabı 11 sn sürmüştür. Hypermill’in dahili poligon dönüştürücüsü ile modelin hesaplama süresi ise 8 sn’dir.

İşlemesi yapılan model üç boyutlu optik ölçüm cihazı ile ölçölmüştür. Ölçüm sonucunda hata

miktarını gösteren grafik Şekil 7.23'te görülmektedir. Ölçüm sonucunda maksimum pozitif hata miktarı 0,551 mm, maksimum negatif hata miktarı 0,469 mm, standart sapma 0,021 olarak bulunmuştur. Noktaların %99,36'sı 0,5 mm toleransın içerisinde kalmış, %78,14'ü ise hedeflenen 0,1 mm toleransın içerisinde kalmıştır.



Şekil 7.22 İşlenen model



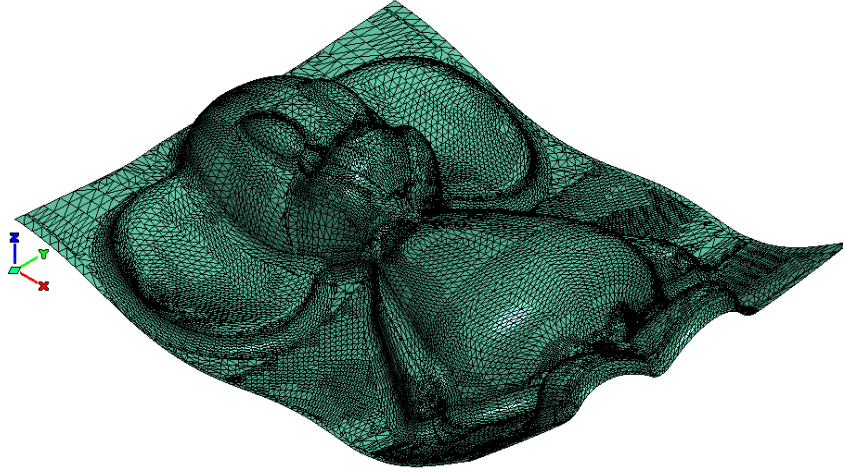
Şekil 7.23 İşlenen modelin ölçüm sonuçları

Hypermill yazılımının takım yolu hesabı için kullandığı poligon dönüştürücüsü orijinal modeli, aynı tolerans değerinde 10.621 noktadan oluşan bir poligonal yüzey ile tanımlamıştır. Bu da, önerilen yöntemden elde edilen 15.368 noktalık poligonal modelin yaklaşık %44,7 daha fazla veri içerdiğini göstermektedir.

7.4.2 Poligonal Modelden Gelen Düzensiz Yüzey Verileri Kullanılarak Yapılan Uygulamalar

7.4.2.1 Birinci Model Üzerinde İnce İşlemeye Ait Uygulama

Birinci modelin Hypermill yazılımı ile 0,05 tolerans değeriyle poligonal yapıya dönüştürülmesi ile elde edilen orijinal model Şekil 7.24'te gösterilmiştir. Orijinal poligonal model 23.399 köşe noktası içermektedir.

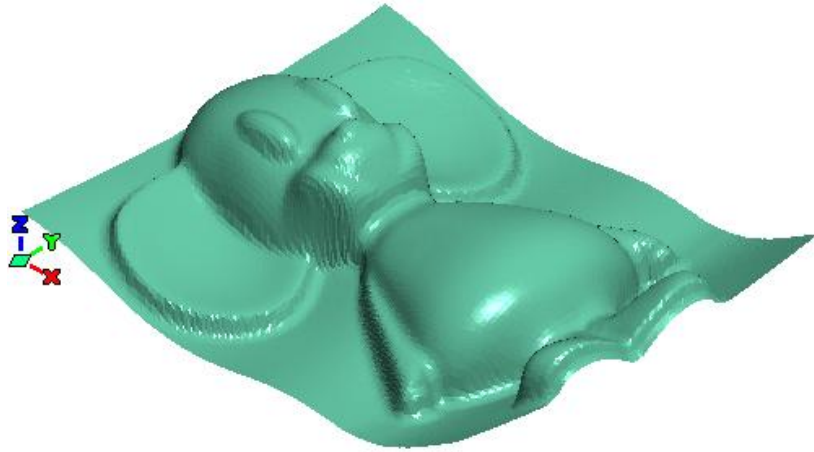


Şekil 7.24 Orijinal poligonal model

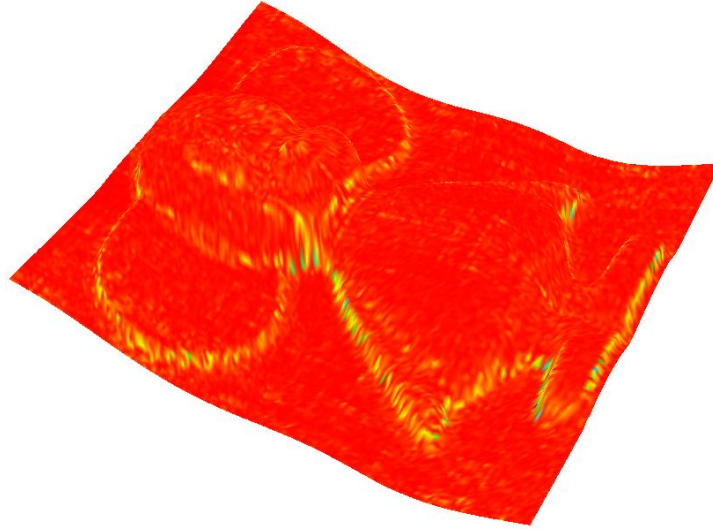
Örnekteki model için ince işlemede istenilen iç ve dış tolerans değeri 0,05 mm olarak kabul edilmiştir. İşlemede kullanılacak olan Ø6 mm küre uçlu kesici takım ve 0,05 mm iç ve dış tolerans değeri göz önüne alındığında, önerilen nokta aralığı 0,773 mm olarak hesaplanır. Poligonal modelin orijinal köşe noktalarından XY'ye bağlı Z-map modeli kurulabilmesi için, referans ağ adımı düzenli verilerde yapılan örnekteki benzer şekilde 0,5 mm olarak seçilmiştir. Bu verilere göre oluşturulan XY'ye bağlı Z-map modeli, bir doğrultuda 241, diğer doğrultuda 201 nokta olmak üzere toplam 48.441 nokta içermektedir. Model 0,773 mm nokta aralığına sahip olacak şekilde basitleştirildiğinde, bir doğrultuda 156, diğer doğrultuda 130 nokta, toplamda 20.280 nokta içerir. Bu durumda modelin toplam nokta sayısında %58,1'lik bir azalma sağlanmaktadır.

Program çalıştırıldığında gerekli toleransın sağlanması için 64 tekil değer ve bunlara karşılık gelen tekil vektörlerin kullanılması gerektiği sonucu alınmakta ve nokta azaltma işlemi 1,46 sn sürmektedir. Uygulanan tekil değerlere ayrıştırma işleminin sonucunda, 64 tekil değer ve vektörün modeli ifade edebilmesi sayesinde hesaplamalar basitleşmiş ve toplam 28.352 elemandan oluşan matrisler üzerinde yapılabilmektedir. Bu da %41,5 daha az veri içeren matrisler üzerinde hesaplama yapabilme imkânı sağlamıştır.

Azaltılmış model, programdan poligonal model olarak raw formatında alınmaktadır (Şekil 7.25). Orijinal model ile veri azaltılmış model Metro yazılımı ile bilgisayar ortamında karşılaştırıldığında maksimum hata miktarı 0,586 mm, ortalama mutlak hata miktarı 0,026 mm olarak hesaplanmıştır. Noktaların yaklaşık %88,1'i hedeflenen 0,05 mm toleransın içerisinde kalmıştır. Hata dağılım grafiği Şekil 7.26'da gösterilmiştir. Veri azaltılmış model, programdan alınan verileri azaltılmamış XY'ye bağlı Z-map modeli ile karşılaştırıldığında ise maksimum hata miktarı 0,392 mm, ortalama mutlak hata miktarı 0,014 mm olarak hesaplanmıştır. Noktaların yaklaşık %95,2'si hedeflenen 0,05 mm toleransın içerisinde kalmıştır. Sonuç ortalama hata bazında incelendiğinde, hatanın %53,8'i veri azaltmadan, %46,2'si ise model oluşturmada kaynaklanmaktadır.



Şekil 7.25 Basitleştirilmiş poligonal model



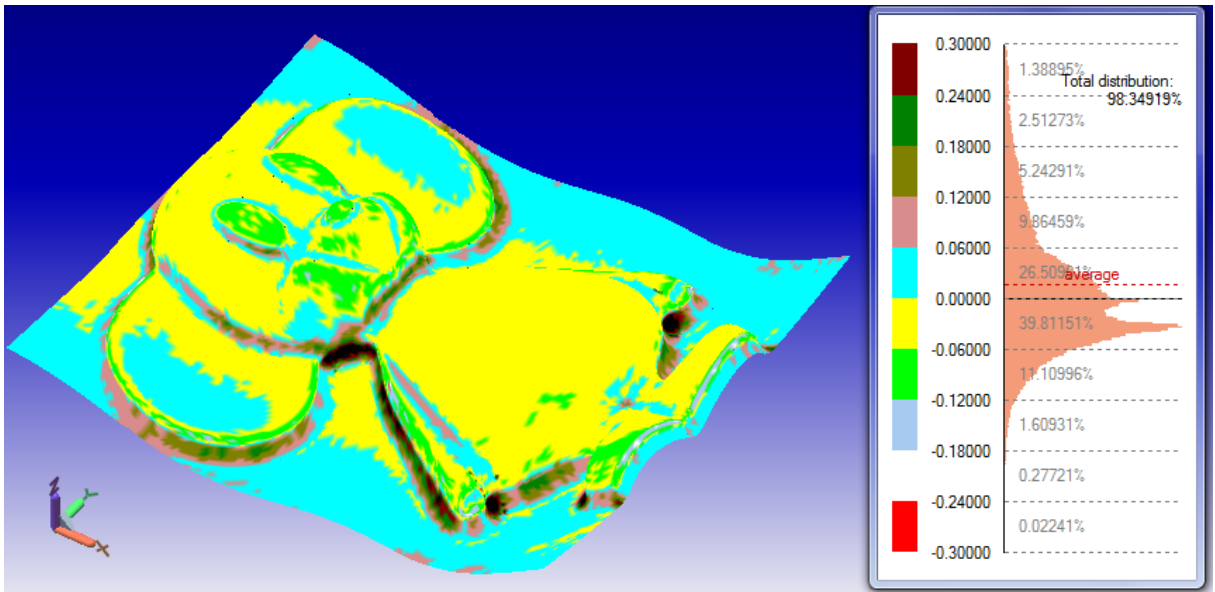
Şekil 7.26 Bilgisayar ortamında hata grafiği

Programdan alınan basitleştirilmiş poligonal model üzerinde Hypermill yazılımı kullanılarak takım yolları oluşturulmuştur. Son işleme için Ø6 mm küre uçlu takım, 0,15 mm yanıl adım ve optimize edilmiş paralel takım yolu yöntemi kullanılmıştır. CNC frezede işlenen model Şekil 7.27’de görölmektedir. Hypermill ile yöntemden elde edilen yüzey verileri azaltılmış model üzerinde takım yolu hesabı 17 sn sürmüştür. Hypermill’in dahili poligon dönüştürücüsü ile modelin hesaplama süresi de 17 sn’dir.

İşlemesi yapılan model üç boyutlu optik ölçüm cihazı ile ölçölmüştür. Ölçüm sonucunda hata miktarını gösteren grafik Şekil 7.28’de görölmektedir. Ölçüm sonucunda maksimum pozitif hata miktarı 0,431 mm, maksimum negatif hata miktarı 0,202 mm, standart sapma 0,098 olarak bulunmuştur. Noktaların %98,35’i 0,3 mm toleransın içerisinde kalmış, %59,89’u ise hedeflenen 0,05 mm toleransın içerisinde kalmıştır.



Şekil 7.27 İşlenen model



Şekil 7.28 İşlenen modelin ölçüm sonuçları

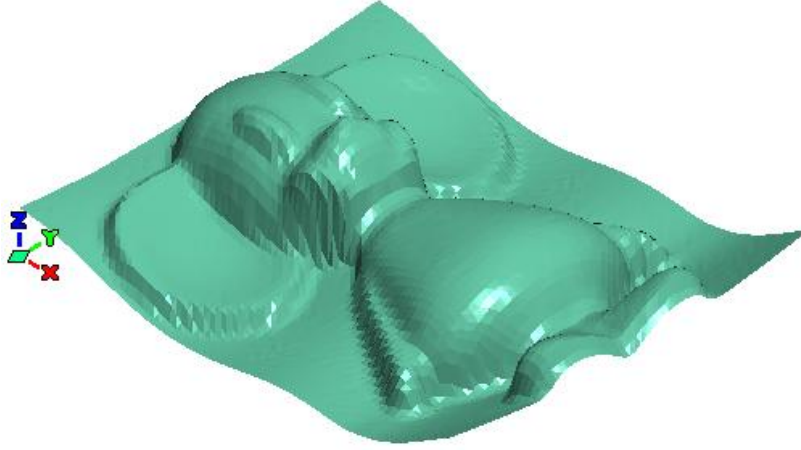
Birinci modelin, Hypermill yazılımı ile 0,05 tolerans değeriyle poligonal yapıya dönüştürülmesi ile elde edilen orijinal model 23.399 noktadan oluşmaktadır. Önerilen yöntemden elde edilen 20.280 noktalık poligonal model, yaklaşık %13,3 daha az veri içermektedir.

7.4.2.2 Birinci Model Üzerinde Kaba İşlemeye Ait Uygulama

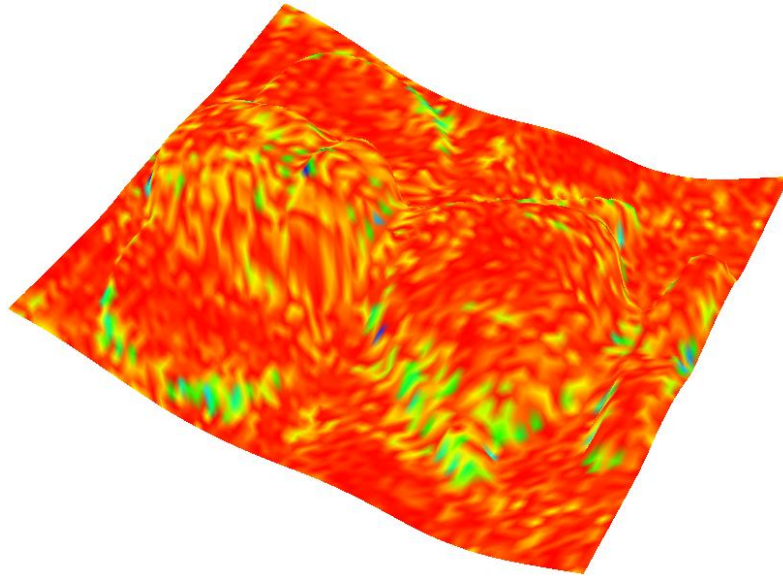
Birinci modele ait ince işlemede kullanılan XY'ye bağlı Z-map modeli üzerinde, kaba işleme parametreleri kullanılarak veri azaltma işlemi yapılmıştır. Örnekteki model için kaba işlemede istenilen iç ve dış tolerans değeri 0,2 mm olarak kabul edilmiştir. İşlemede kullanılacak olan Ø6 mm küre uçlu kesici takım ve 0,2 mm iç ve dış tolerans değeri göz önüne alındığında, önerilen nokta aralığı 1,536 mm olarak hesaplanır. Orijinal XY'ye bağlı Z-map modeli, bir doğrultuda 241, diğer doğrultuda 201 nokta olmak üzere toplam 48.441 nokta içermektedir. Model 1,536 mm nokta aralığına sahip olacak şekilde basitleştirildiğinde, bir doğrultuda 79, diğer doğrultuda 66 nokta, toplamda 5.214 nokta içerir. Bu durumda modelin toplam nokta sayısında %89,2'lik bir azalma sağlanmaktadır.

Program çalıştırıldığında gerekli toleransın sağlanması için 27 tekil değer ve bunlara karşılık gelen tekil vektörlerin kullanılması gerektiği sonucu alınmakta ve nokta azaltma işlemi 1,18 sn sürmektedir. Uygulanan tekil değerlere ayrıştırma işleminin sonucunda, 27 tekil değer ve vektörün modeli ifade edebilmesi sayesinde hesaplamalar basitleşmiş ve toplam 11.961 elemandan oluşan matrisler üzerinde yapılabilmektedir. Bu da %75,3 daha az veri içeren matrisler üzerinde hesaplama yapabilme imkânı sağlamıştır.

Azaltılmış model, programdan poligonal model olarak raw formatında alınmaktadır (Şekil 7.29). Orijinal model ile veri azaltılmış model Metro yazılımı ile bilgisayar ortamında karşılaştırıldığında maksimum hata miktarı 1,063 mm, ortalama mutlak hata miktarı 0,066 mm olarak hesaplanmıştır. Noktaların yaklaşık %91,6'sı hedeflenen 0,2 mm toleransın içerisinde kalmıştır. Hata dağılım grafiği Şekil 7.30'da gösterilmiştir. Veri azaltılmış model, programdan alınan verileri azaltılmamış XY'ye bağlı Z-map modeli ile karşılaştırıldığında ise maksimum hata miktarı 0,873 mm, ortalama mutlak hata miktarı 0,053 mm olarak hesaplanmıştır. Noktaların yaklaşık %94,3'ü hedeflenen 0,2 mm toleransın içerisinde kalmıştır. Sonuç ortalama hata bazında incelendiğinde, hatanın %80,3'ü veri azaltmadan, %19,7'si ise model oluşturmada kaynaqlanmaktadır.



Şekil 7.29 Basitleştirilmiş poligonal model



Şekil 7.30 Bilgisayar ortamında hata grafiği

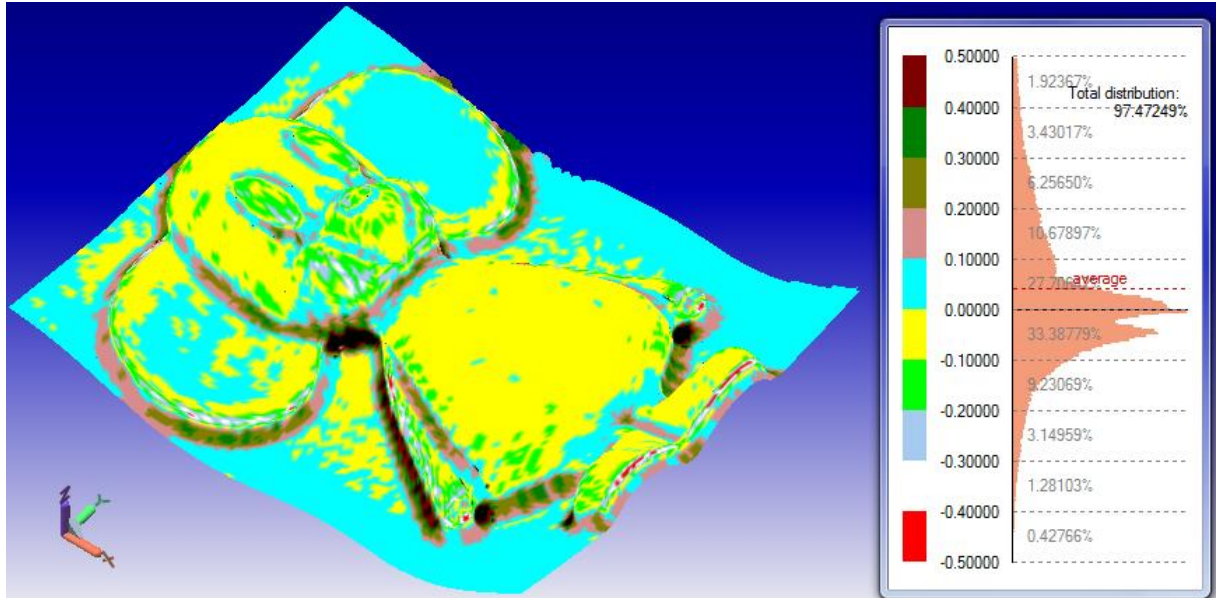
Programdan alınan basitleştirilmiş poligonal model üzerinde Hypermill yazılımı kullanılarak takım yolları oluşturulmuştur. Son işleme için Ø6 mm küre uçlu takım, 0,15 mm yanıl adım ve optimize edilmiş paralel takım yolu yöntemi kullanılmıştır. CNC frezede işlenen model Şekil 7.31’de görölmektedir. Hypermill ile yöntemden elde edilen yüzey verileri azaltılmış model üzerinde takım yolu hesabı 11 sn sürmüştür. Hypermill’in dahili poligon dönüştürücüsü ile modelin hesaplama süresi ise 12 sn’dir.

İşlemesi yapılan model üç boyutlu optik ölçüm cihazı ile ölçölmüştür. Ölçüm sonucunda hata miktarını gösteren grafik Şekil 7.32’de görölmektedir. Ölçüm sonucunda maksimum pozitif

hata miktarı 0,738 mm, maksimum negatif hata miktarı 0,516 mm, standart sapma 0,192 olarak bulunmuştur. Noktaların %97,47'si 0,5 mm toleransın içerisinde kalmış, %80,81'i ise hedeflenen 0,2 mm toleransın içerisinde kalmıştır.



Şekil 7.31 İşlenen model

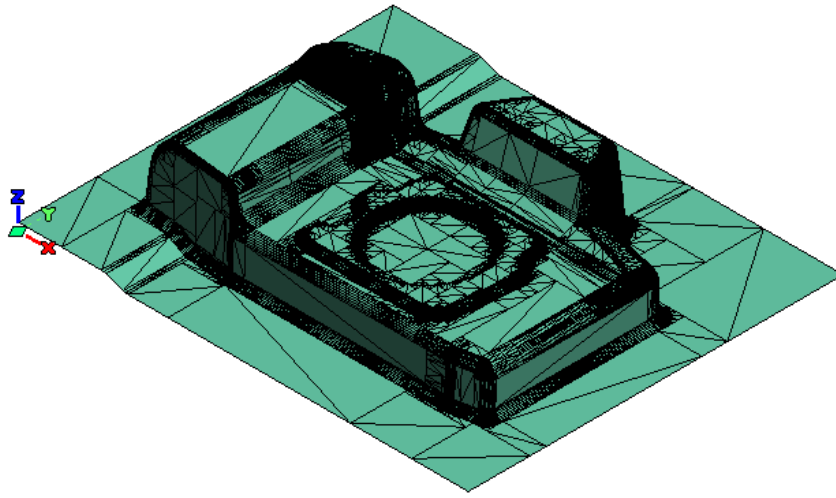


Şekil 7.32 İşlenen modelin ölçüm sonuçları

Birinci modelin, Hypermill yazılımı ile 0,2 tolerans değeriyle poligonal yapıya dönüştürülmesi ile elde edilen orijinal model 6.785 noktadan oluşmaktadır. Önerilen yöntemden elde edilen 5.214 noktalık poligonal model, yaklaşık %23,2 daha az veri içermektedir.

7.4.2.3 İkinci Model Üzerinde İnce İşlemeye Ait Uygulama

İkinci modelin Hypermill yazılımı ile 0,02 tolerans değeriyle poligonal yapıya dönüştürülmesi ile elde edilen orijinal model Şekil 7.33'te gösterilmiştir. Orijinal poligonal model 44.596 köşe noktası içermektedir.

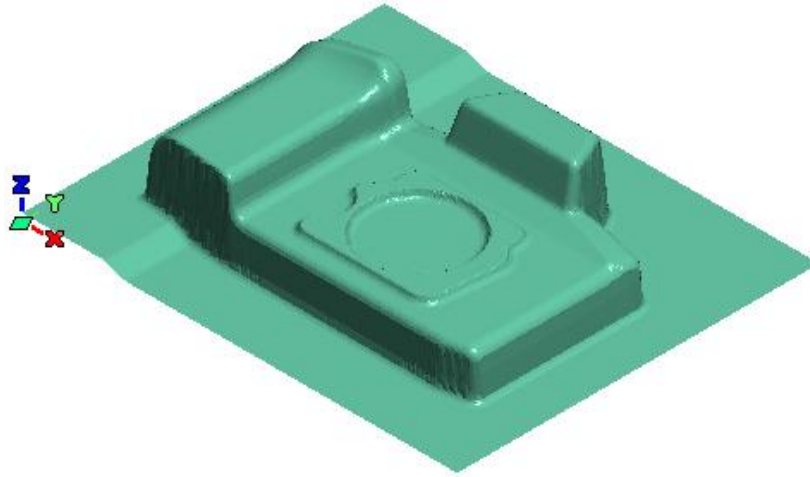


Şekil 7.33 Orijinal poligonal model

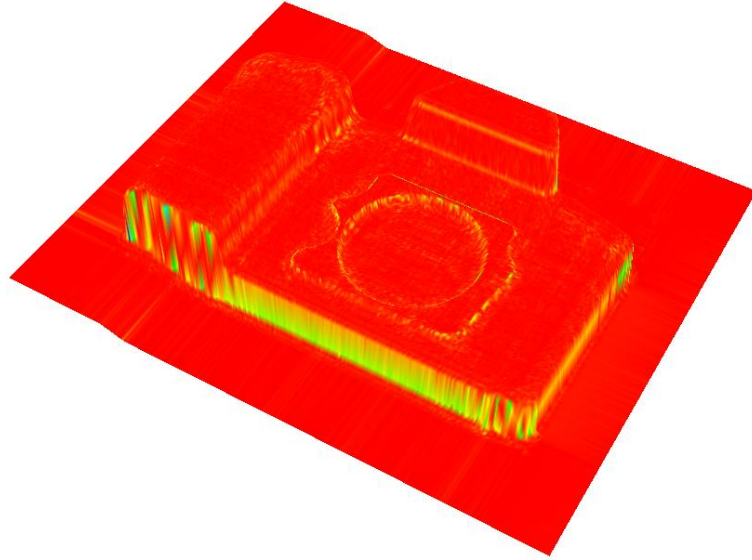
Örnekteki model için ince işlemede istenilen iç ve dış tolerans değeri 0,02 mm olarak kabul edilmiştir. İşlemede kullanılacak olan Ø4 mm küre uçlu kesici takım ve 0,02 mm iç ve dış tolerans değeri göz önüne alındığında, önerilen nokta aralığı 0,399 mm olarak hesaplanır. Poligonal modelin orijinal köşe noktalarından XY'ye bağlı Z-map modeli kurulabilmesi için, referans ağ adımı düzenli verilerde yapılan örnekteki benzer şekilde 0,25 mm olarak seçilmiştir. Bu verilere göre oluşturulan XY'ye bağlı Z-map modeli, modelin formu değişmeyen bölgelerindeki fazla satır ve sütunlarının kaldırılması ile bir doğrultuda 390, diğer doğrultuda 283 nokta olmak üzere toplam 110.370 nokta içermektedir. Model 0,399 mm nokta aralığına sahip olacak şekilde basitleştirildiğinde, bir doğrultuda 243, diğer doğrultuda 176 nokta, toplamda 42.768 nokta içerir. Bu durumda modelin toplam nokta sayısında %61,3'lük bir azalma sağlanmaktadır. Düzensiz veri ile tanımlanan model, düzenli veri ile tanımlanan modele göre %43,4 daha az nokta içermektedir.

Program çalıştırıldığında gerekli toleransın sağlanması için 133 tekil değer ve bunlara karşılık gelen tekil vektörlerin kullanılması gerektiği sonucu alınmakta ve nokta azaltma işlemi 4,3 sn sürmektedir. Uygulanan tekil değerlere ayrıştırma işleminin sonucunda, 133 tekil değer ve vektörün modeli ifade edebilmesi sayesinde hesaplamalar basitleşmiş ve toplam 55.860 elemandan oluşan matrisler üzerinde yapılabilmektedir. Bu da %49,4 daha az veri içeren matrisler üzerinde hesaplama yapabilme imkânı sağlamıştır.

Azaltılmış model, programdan poligonal model olarak raw formatında alınmaktadır (Şekil 7.34). Orijinal model ile veri azaltılmış model Metro yazılımı ile bilgisayar ortamında karşılaştırıldığında maksimum hata miktarı 0,411 mm, ortalama mutlak hata miktarı 0,013 mm olarak hesaplanmıştır. Noktaların yaklaşık %86,9'u hedeflenen 0,02 mm toleransın içerisinde kalmıştır. Hata dağılım grafiği Şekil 7.35'te gösterilmiştir. Veri azaltılmış model, programdan alınan verileri azaltılmamış XY'ye bağlı Z-map modeli ile karşılaştırıldığında ise maksimum hata miktarı 0,283 mm, ortalama mutlak hata miktarı 0,01 mm olarak hesaplanmıştır. Noktaların yaklaşık %88,4'ü hedeflenen 0,02 mm toleransın içerisinde kalmıştır. Sonuç ortalama hata bazında incelendiğinde, hatanın %76,9'u veri azaltmadan, %23,1'i ise model oluşturmada kaynaklanmaktadır.



Şekil 7.34 Basitleştirilmiş poligonal model



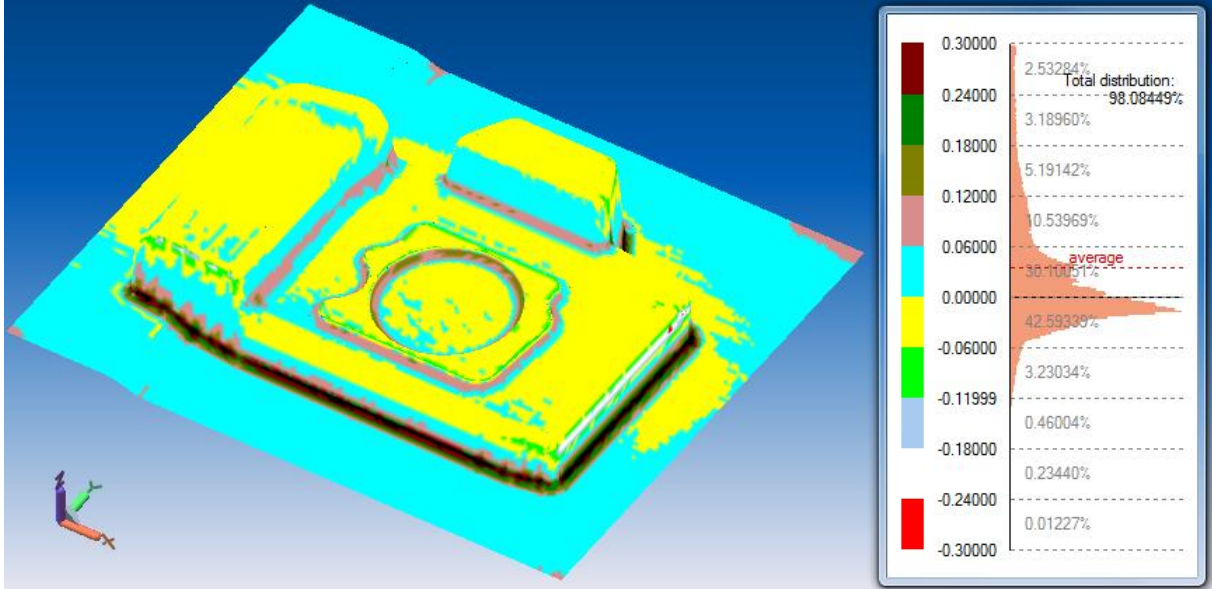
Şekil 7.35 Bilgisayar ortamında hata grafiği

Programdan alınan basitleştirilmiş poligonal model üzerinde Hypermill yazılımı kullanılarak takım yolları oluşturulmuştur. Son işleme için Ø4 mm küre uçlu takım, 0,15 mm yanıl adım ve optimize edilmiş paralel takım yolu yöntemi kullanılmıştır. CNC frezede işlenen model Şekil 7.36'da görölmektedir. Hypermill ile yöntemden elde edilen yüzey verileri azaltılmış model üzerinde takım yolu hesabı 23 sn sürmüştür. Hypermill'in dahili poligon dönüştürücüsü ile modelin hesaplama süresi ise 12 sn'dir.



Şekil 7.36 İşlenen model

İşlemesi yapılan model üç boyutlu optik ölçüm cihazı ile ölçülmüştür. Ölçüm sonucunda hata miktarını gösteren grafik Şekil 7.37’de görülmektedir. Ölçüm sonucunda maksimum pozitif hata miktarı 0,350 mm, maksimum negatif hata miktarı 0,218 mm, standart sapma 0,085 olarak bulunmuştur. Noktaların yaklaşık %98,08’i 0,3 mm toleransın içerisinde kalmış, %39,81’i ise hedeflenen 0,02 mm toleransın içerisinde kalmıştır.



Şekil 7.37 İşlenen modelin ölçüm sonuçları

İkinci modelin, Hypermill yazılımı ile 0,02 tolerans değeriyle poligonal yapıya dönüştürülmesi ile elde edilen orijinal model 44.596 noktadan oluşmaktadır. Önerilen yöntemden elde edilen 42.768 noktalık poligonal model, yaklaşık %4,1 daha az veri içermektedir.

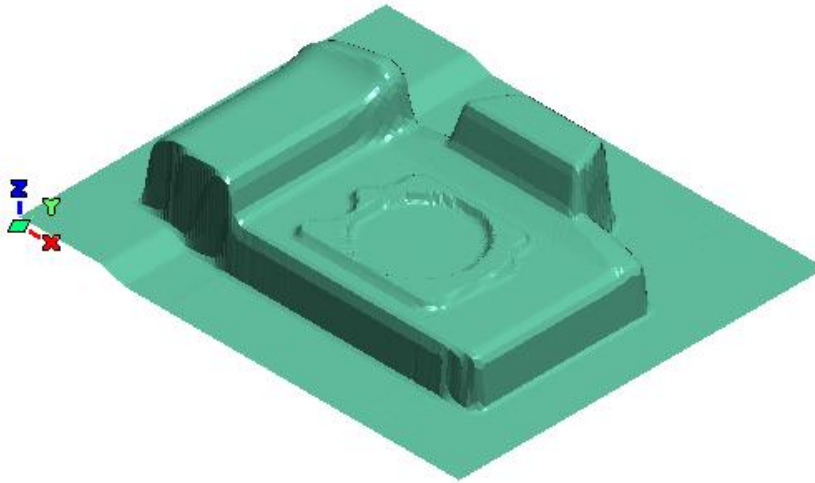
7.4.2.4 İkinci Model Üzerinde Kaba İşlemeye Ait Uygulama

İkinci modele ait ince işlemede kullanılan XY’ye bağlı Z-map modeli üzerinde, kaba işleme parametreleri kullanılarak veri azaltma işlemi yapılmıştır. Örnekteki model için kaba işlemede istenilen iç ve dış tolerans değeri 0,1 mm olarak kabul edilmiştir. İşlemede kullanılacak olan Ø4 mm küre uçlu kesici takım ve 0,1 mm iç ve dış tolerans değeri göz önüne alındığında, önerilen nokta aralığı 0,888 mm olarak hesaplanır. Orijinal XY’ye bağlı Z-map modeli, modelin formu değişmeyen bölgelerindeki fazla satır ve sütunlarının kaldırılması ile bir doğrultuda 390, diğer doğrultuda 283 nokta olmak üzere toplam 110.370 nokta içermektedir. Model 0,888 mm nokta aralığına sahip olacak şekilde basitleştirildiğinde, bir doğrultuda 109,

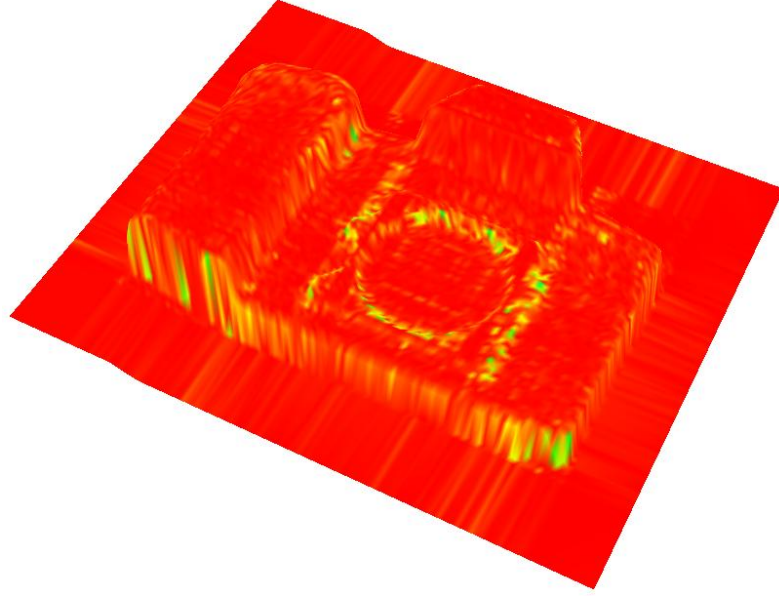
diğer doğrultuda 79 nokta, toplamda 8.611 nokta içerir. Bu durumda modelin toplam nokta sayısında %92,2'lik bir azalma sağlanmaktadır. Düzensiz veri ile tanımlanan model, düzenli veri ile tanımlanan modele göre %43,9 daha az nokta içermektedir.

Program çalıştırıldığında gerekli toleransın sağlanması için 90 tekil değer ve bunlara karşılık gelen tekil vektörlerin kullanılması gerektiği sonucu alınmakta ve nokta azaltma işlemi 4,15 sn sürmektedir. Uygulanan tekil değerlere ayrıştırma işleminin sonucunda, 90 tekil değer ve vektörün modeli ifade edebilmesi sayesinde hesaplamalar basitleşmiş ve toplam 61.110 elemandan oluşan matrisler üzerinde yapılabilmektedir. Bu da %44,6 daha az veri içeren matrisler üzerinde hesaplama yapabilme imkânı sağlamıştır.

Azaltılmış model, programdan poligonal model olarak raw formatında alınmaktadır (Şekil 7.38). Orijinal model ile veri azaltılmış model Metro yazılımı ile bilgisayar ortamında karşılaştırıldığında maksimum hata miktarı 0,818 mm, ortalama mutlak hata miktarı 0,049 mm olarak hesaplanmıştır. Noktaların yaklaşık %86,6'sı hedeflenen 0,1 mm toleransın içerisinde kalmıştır. Hata dağılım grafiği Şekil 7.39'da gösterilmiştir. Veri azaltılmış model, programdan alınan verileri azaltılmamış XY'ye bağlı Z-map modeli ile karşılaştırıldığında ise maksimum hata miktarı 0,717 mm, ortalama mutlak hata miktarı 0,046 mm olarak hesaplanmıştır. Noktaların yaklaşık %86,7'si hedeflenen 0,1 mm toleransın içerisinde kalmıştır. Sonuç ortalama hata bazında incelendiğinde, hatanın %93,8'i veri azaltmadan, %6,2'si ise model oluşturmada kaynaklanmaktadır.



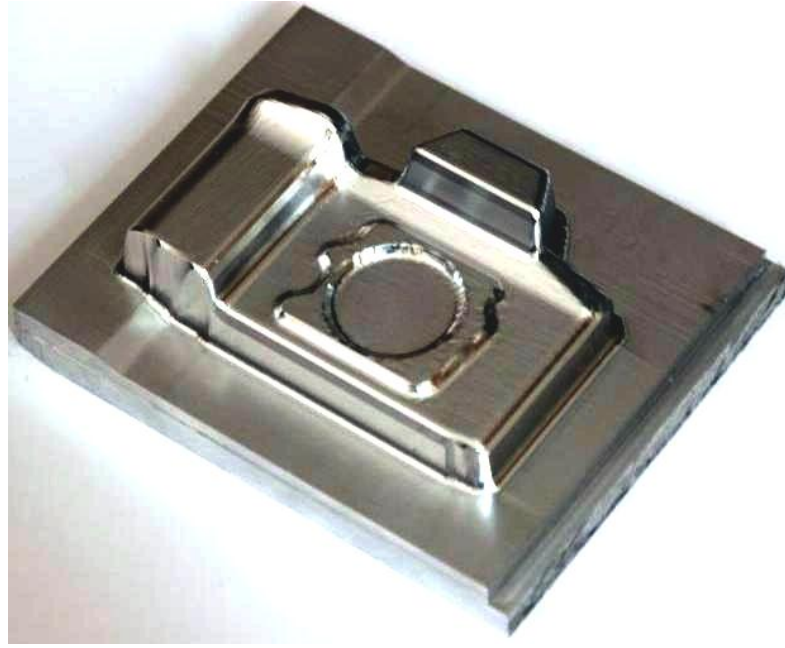
Şekil 7.38 Basitleştirilmiş poligonal model



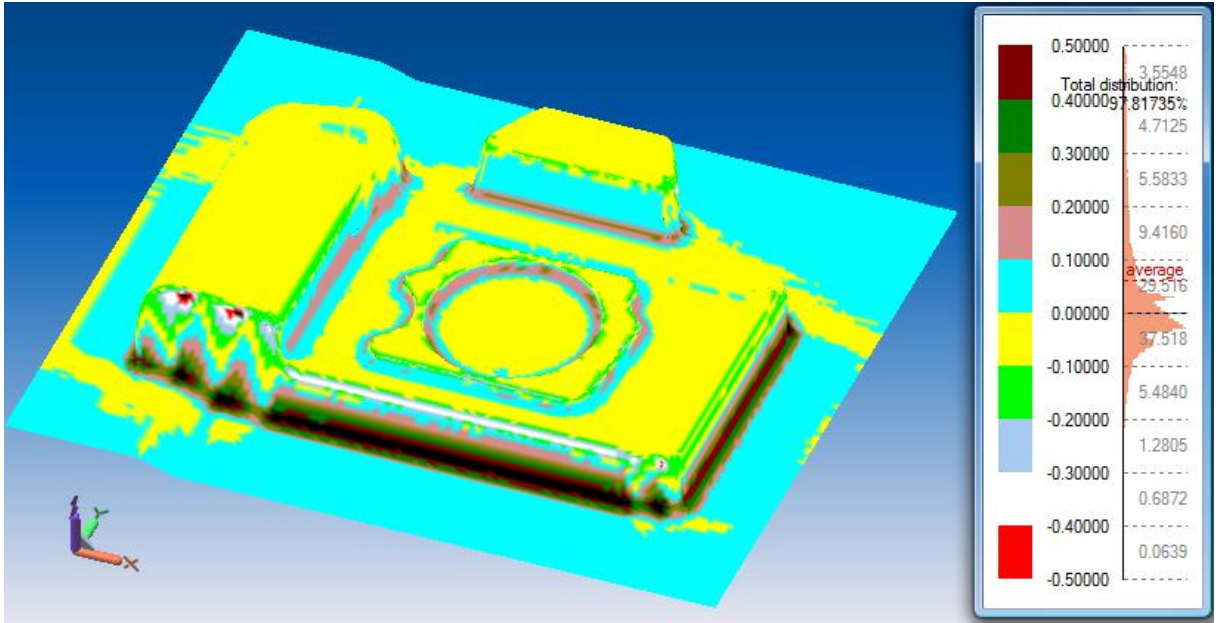
Şekil 7.39 Bilgisayar ortamında hata grafiği

Programdan alınan basitleştirilmiş poligonal model üzerinde Hypermill yazılımı kullanılarak takım yolları oluşturulmuştur. Son işleme için Ø4 mm küre uçlu takım, 0,15 mm yanıl adım ve optimize edilmiş paralel takım yolu yöntemi kullanılmıştır. CNC frezede işlenen model Şekil 7.40'ta görölmektedir. Hypermill ile yöntemden elde edilen yüzey verileri azaltılmış model üzerinde takım yolu hesabı 10 sn sürmüştür. Hypermill'in dahili poligon dönüştürücüsü ile modelin hesaplama süresi ise 8 sn'dir.

İşlemesi yapılan model üç boyutlu optik ölçüm cihazı ile ölçölmüştür. Ölçüm sonucunda hata miktarını gösteren grafik Şekil 7.41'de görölmektedir. Ölçüm sonucunda maksimum pozitif hata miktarı 0,652 mm, maksimum negatif hata miktarı 0,369 mm, standart sapma 0,165 olarak bulunmuştur. Noktaların %97,82'si 0,5 mm toleransın içerisinde kalmış, %67,02'si ise hedeflenen 0,1 mm toleransın içerisinde kalmıştır.



Şekil 7.40 İşlenen model



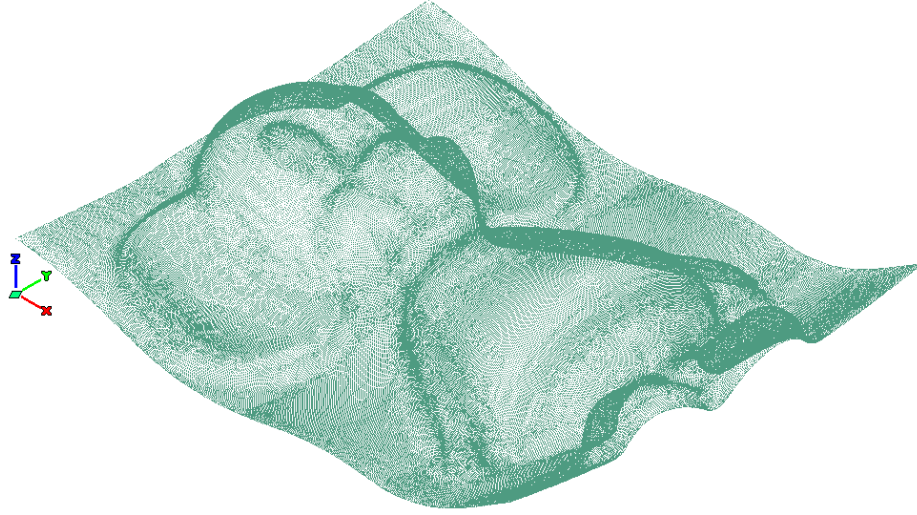
Şekil 7.41 İşlenen modelin ölçüm sonuçları

Birinci modelin, Hypermill yazılımı ile 0,1 tolerans değeriyle poligonal yapıya dönüştürülmesi ile elde edilen orijinal model 10.621 noktadan oluşmaktadır. Önerilen yöntemden elde edilen 8.611 noktalık poligonal model, yaklaşık %18,9 daha az veri içermektedir.

7.4.3 Tersine Mühendislikten Gelen Düzensiz Yüzey Verileri Kullanılarak Yapılan Uygulamalar

7.4.3.1 Birinci Model Üzerinde İnce İşlemeye Ait Uygulama

Birinci model üzerinde optik tarayıcı ile alınan nokta bulutu Şekil 7.42’de gösterilmiştir. Nokta bulutu 198.093 adet noktası içermektedir.



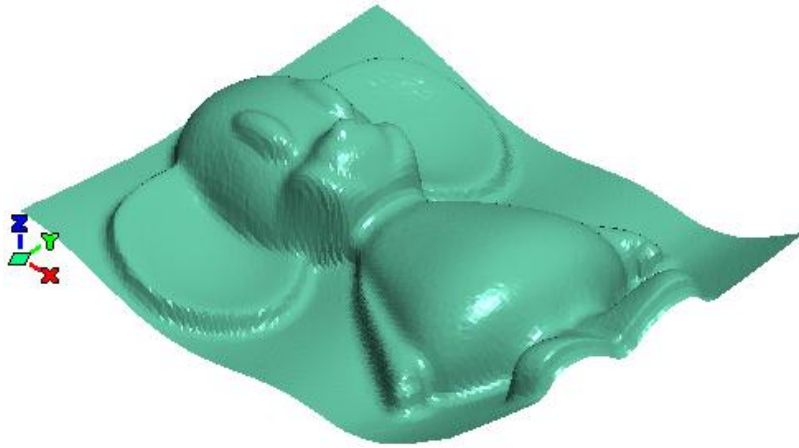
Şekil 7.42 Orijinal tersine mühendislik noktaları

Örnekteki model için ince işlemede istenilen iç ve dış tolerans değeri 0,05 mm olarak kabul edilmiştir. İşlemede kullanılacak olan Ø6 mm küre uçlu kesici takım ve 0,05 mm iç ve dış tolerans değeri göz önüne alındığında, önerilen nokta aralığı 0,773 mm olarak hesaplanır. Tersine mühendislikten gelen nokta bulutundan XY’ye bağlı Z-map modeli kurulabilmesi için, referans ağ adımı düzenli verilerde yapılan örnekteki benzer şekilde 0,5 mm olarak seçilmiştir. Bu verilere göre oluşturulan XY’ye bağlı Z-map modeli, bir doğrultuda 241, diğer doğrultuda 201 nokta olmak üzere toplam 48.441 nokta içermektedir. Model 0,773 mm nokta aralığına sahip olacak şekilde basitleştirildiğinde, bir doğrultuda 156, diğer doğrultuda 130 nokta, toplamda 20.280 nokta içerir. Bu durumda modelin toplam nokta sayısında %58,1’lik bir azalma sağlanmaktadır.

Program çalıştırıldığında gerekli toleransın sağlanması için 50 tekil değer ve bunlara karşılık gelen tekil vektörlerin kullanılması gerektiği sonucu alınmakta ve nokta azaltma işlemi 3,47 sn sürmektedir. Uygulanan tekil değerlere ayrıştırma işleminin sonucunda, 50 tekil değer ve vektörün modeli ifade edebilmesi sayesinde hesaplamalar basitleşmiş ve toplam 22.150

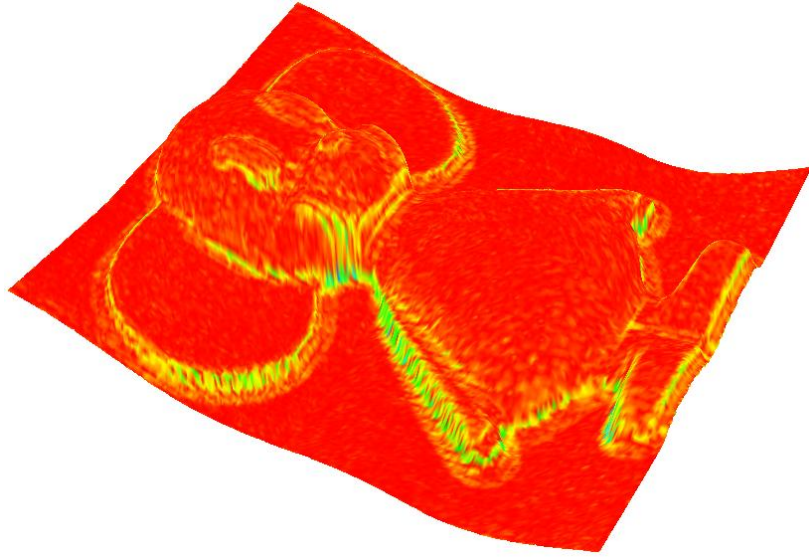
elemandan oluşan matrisler üzerinde yapılabilmektedir. Bu da %54,3 daha az veri içeren matrisler üzerinde hesaplama yapabilme imkânı sağlamıştır.

Azaltılmış model, programdan poligonal model olarak raw formatında alınmaktadır (Şekil 7.43). Orijinal model ile veri azaltılmış model Metro yazılımı ile bilgisayar ortamında karşılaştırıldığında maksimum hata miktarı 0,545 mm, ortalama mutlak hata miktarı 0,028 mm olarak hesaplanmıştır. Noktaların yaklaşık %87,2'si hedeflenen 0,05 mm toleransın içerisinde kalmıştır. Hata dağılım grafiği Şekil 7.44'te gösterilmiştir. Veri azaltılmış model, programdan alınan verileri azaltılmamış XY'ye bağlı Z-map modeli ile karşılaştırıldığında ise maksimum hata miktarı 0,394 mm, ortalama mutlak hata miktarı 0,018 mm olarak hesaplanmıştır. Noktaların yaklaşık %94,4'ü hedeflenen 0,05 mm toleransın içerisinde kalmıştır. Sonuç ortalama hata bazında incelendiğinde, hatanın %64,3'ü veri azaltmadan, %35,7'si ise model oluşturmadan kaynaklanmaktadır.



Şekil 7.43 Basitleştirilmiş poligonal model

Programdan alınan basitleştirilmiş poligonal model üzerinde Hypermill yazılımı kullanılarak takım yolları oluşturulmuştur. Son işleme için Ø6 mm küre uçlu takım, 0,15 mm yanıl adım ve optimize edilmiş paralel takım yolu yöntemi kullanılmıştır. CNC frezede işlenen model Şekil 7.45'te görülmektedir. Hypermill ile yöntemden elde edilen yüzey verileri azaltılmış model üzerinde takım yolu hesabı 18 sn sürmüştür. Tersine mühendislikten gelen noktaların tamamı kullanılarak oluşturulan poligonal model üzerinde ince işlemeye ait takım yolu hesaplama süresi ise 115 sn'dir.

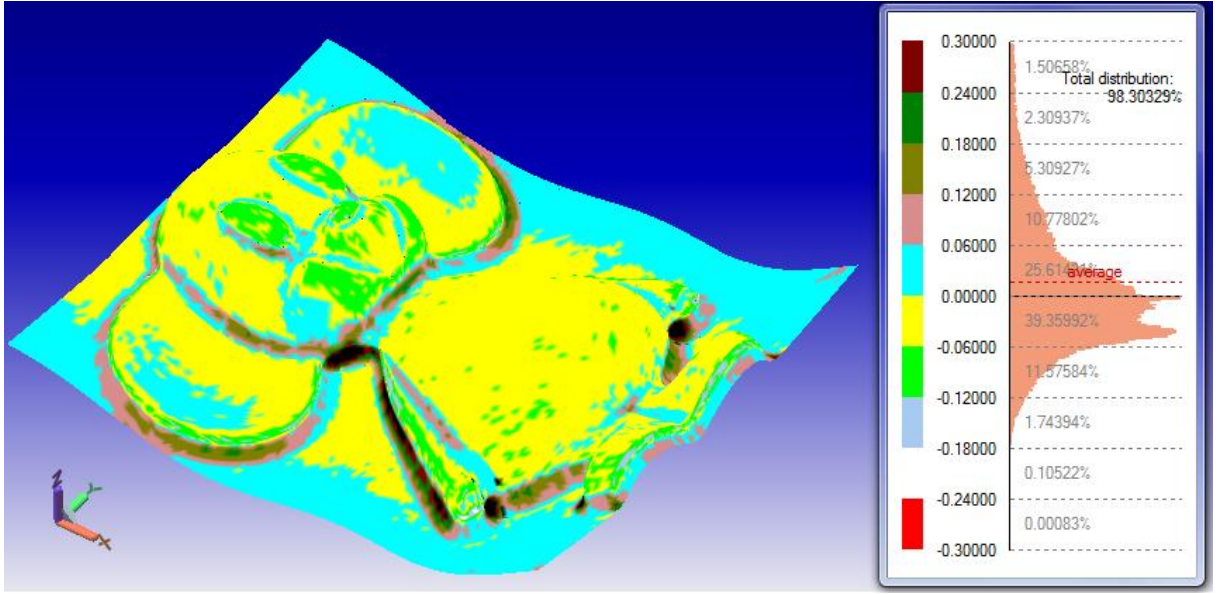


Şekil 7.44 Bilgisayar ortamında hata grafiği

İşlemesi yapılan model üç boyutlu optik ölçüm cihazı ile ölçülmüştür. Ölçüm sonucunda hata miktarını gösteren grafik Şekil 7.46'da görülmektedir. Ölçüm sonucunda maksimum pozitif hata miktarı 0,410 mm, maksimum negatif hata miktarı 0,181 mm, standart sapma 0,098 olarak bulunmuştur. Noktaların %98,3'ü 0,3 mm toleransın içerisinde kalmış, %58,58'i ise hedeflenen 0,05 mm toleransın içerisinde kalmıştır.



Şekil 7.45 İşlenen model



Şekil 7.46 İşlenen modelin ölçüm sonuçları

Birinci modelin, Hypermill yazılımı ile 0,05 tolerans değeriyle poligonal yapıya dönüştürülmesi ile elde edilen orijinal model 23.399 noktadan oluşmaktadır. Önerilen yöntemden elde edilen 20.280 noktalık poligonal model, yaklaşık %13,3 daha az veri içermektedir.

Yöntemin tersine mühendislikten gelen çok yoğun nokta bulutlarını başarıyla azaltabildiği görülmektedir.

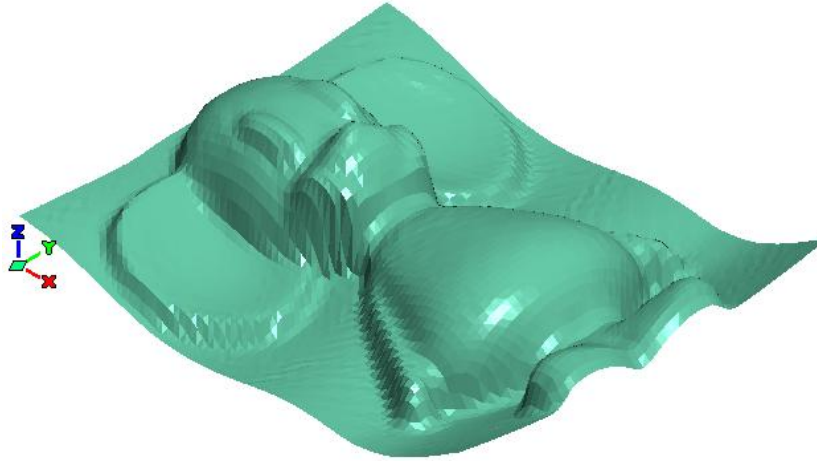
7.4.3.2 Birinci Model Üzerinde Kaba İşlemeye Ait Uygulama

Birinci modele ait, ince işlemede de kullanılan tersine mühendislikten gelen nokta bulutu üzerinde, kaba işleme parametreleri kullanılarak veri azaltma işlemi yapılmıştır. Örnekteki model için kaba işlemede istenilen iç ve dış tolerans değeri 0,2 mm olarak kabul edilmiştir. İşlemede kullanılacak olan Ø6 mm küre uçlu kesici takım ve 0,2 mm iç ve dış tolerans değeri göz önüne alındığında, önerilen nokta aralığı 1,536 mm olarak hesaplanır. Orijinal XY'ye bağlı Z-map modeli, bir doğrultuda 241, diğer doğrultuda 201 nokta olmak üzere toplam 48.441 nokta içermektedir. Model 1,536 mm nokta aralığına sahip olacak şekilde basitleştirildiğinde, bir doğrultuda 79, diğer doğrultuda 66 nokta, toplamda 5.214 nokta içerir. Bu durumda modelin toplam nokta sayısında %89,2'lik bir azalma sağlanmaktadır.

Program çalıştırıldığında gerekli toleransın sağlanması için 23 tekil değer ve bunlara karşılık gelen tekil vektörlerin kullanılması gerektiği sonucu alınmakta ve nokta azaltma işlemi 3,41

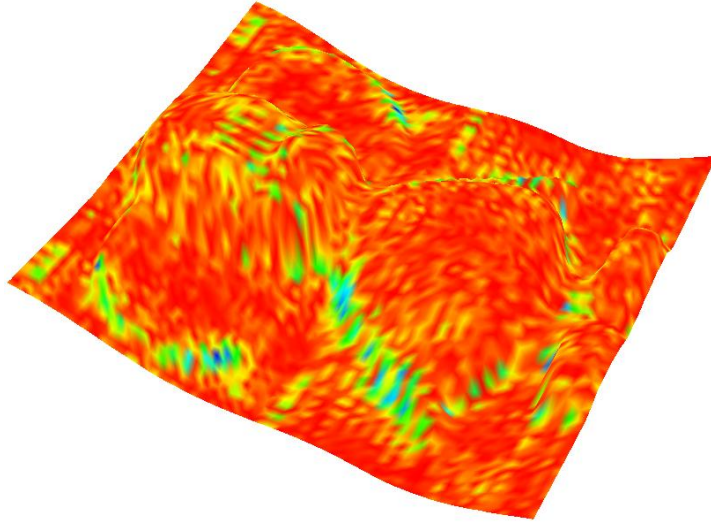
sn sürmektedir. Uygulanan tekil değerlere ayrıştırma işleminin sonucunda, 23 tekil değer ve vektörün modeli ifade edebilmesi sayesinde hesaplamalar basitleşmiş ve toplam 10.189 elemandan oluşan matrisler üzerinde yapılabilmektedir. Bu da %78,9 daha az veri içeren matrisler üzerinde hesaplama yapabilme imkânı sağlamıştır.

Azaltılmış model, programdan poligonal model olarak raw formatında alınmaktadır (Şekil 7.47). Orijinal model ile veri azaltılmış model Metro yazılımı ile bilgisayar ortamında karşılaştırıldığında maksimum hata miktarı 1,117 mm, ortalama mutlak hata miktarı 0,071 mm olarak hesaplanmıştır. Noktaların yaklaşık %91'i hedeflenen 0,2 mm toleransın içerisinde kalmıştır. Hata dağılım grafiği Şekil 7.48'de gösterilmiştir. Veri azaltılmış model, programdan alınan verileri azaltılmamış XY'ye bağlı Z-map modeli ile karşılaştırıldığında ise maksimum hata miktarı 0,96 mm, ortalama mutlak hata miktarı 0,06 mm olarak hesaplanmıştır. Sonuç ortalama hata bazında incelendiğinde, hatanın %84,5'i veri azaltmadan, %15,5'i ise model oluşturmada kaynaklanmaktadır.



Şekil 7.47 Basitleştirilmiş poligonal model

Programdan alınan basitleştirilmiş poligonal model üzerinde Hypermill yazılımı kullanılarak takım yolları oluşturulmuştur. Son işleme için Ø6 mm küre uçlu takım, 0,15 mm yanıl adım ve optimize edilmiş paralel takım yolu yöntemi kullanılmıştır. CNC frezede işlenen model Şekil 7.49'da görülmektedir. Hypermill ile yöntemden elde edilen yüzey verileri azaltılmış model üzerinde takım yolu hesabı 10 sn sürmüştür. Tersine mühendislikten gelen noktaların tamamı kullanılarak oluşturulan poligonal model üzerinde kaba işlemeye ait takım yolu hesaplama süresi ise 60 sn'dir.

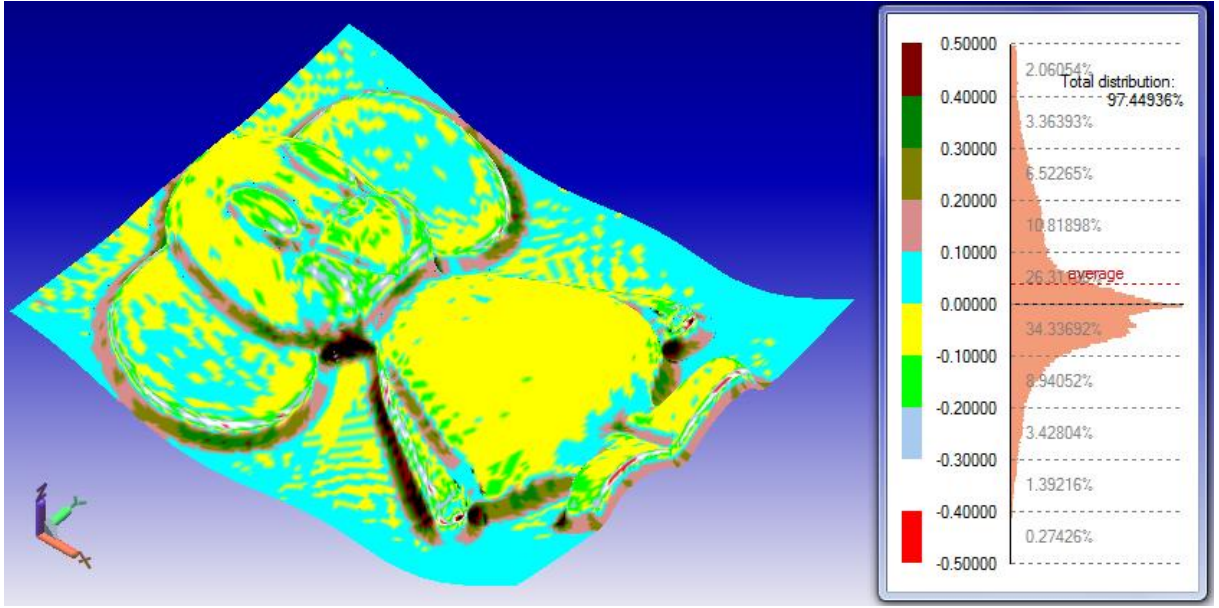


Şekil 7.48 Bilgisayar ortamında hata grafiği

İşlemesi yapılan model üç boyutlu optik ölçüm cihazı ile ölçülmüştür. Ölçüm sonucunda hata miktarını gösteren grafik Şekil 7.50’de görülmektedir. Ölçüm sonucunda maksimum pozitif hata miktarı 0,777 mm, maksimum negatif hata miktarı 0,457 mm, standart sapma 0,181 olarak bulunmuştur. Noktaların %97,45’i 0,5 mm toleransın içerisinde kalmış, %80,16’sı ise hedeflenen 0,2 mm toleransın içerisinde kalmıştır.



Şekil 7.49 İşlenen model

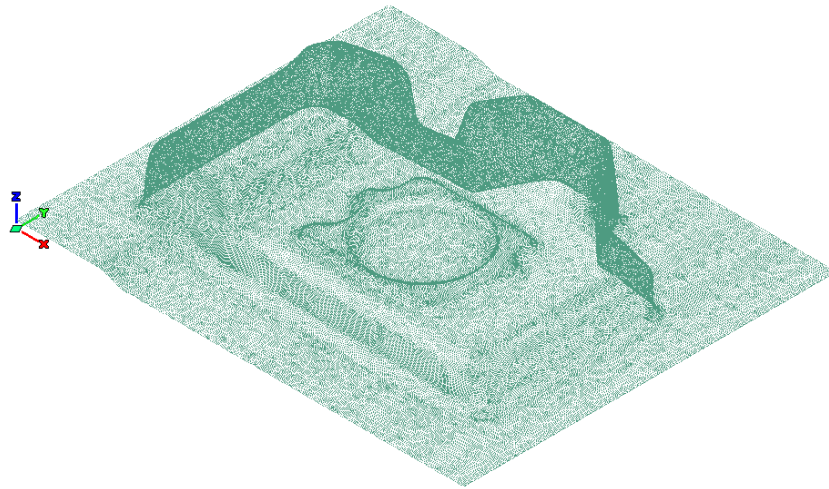


Şekil 7.50 İşlenen modelin ölçüm sonuçları

Birinci modelin, Hypermill yazılımı ile 0,2 tolerans değeriyle poligonal yapıya dönüştürülmesi ile elde edilen orijinal model 6.785 noktadan oluşmaktadır. Önerilen yöntemden elde edilen 5.214 noktalık poligonal model, yaklaşık %23,2 daha az veri içermektedir.

7.4.3.3 İkinci Model Üzerinde İnce İşlemeye Ait Uygulama

İkinci model üzerinde optik tarayıcı ile alınan nokta bulutu Şekil 7.51’de gösterilmiştir. Nokta bulutu 154.356 adet noktası içermektedir.

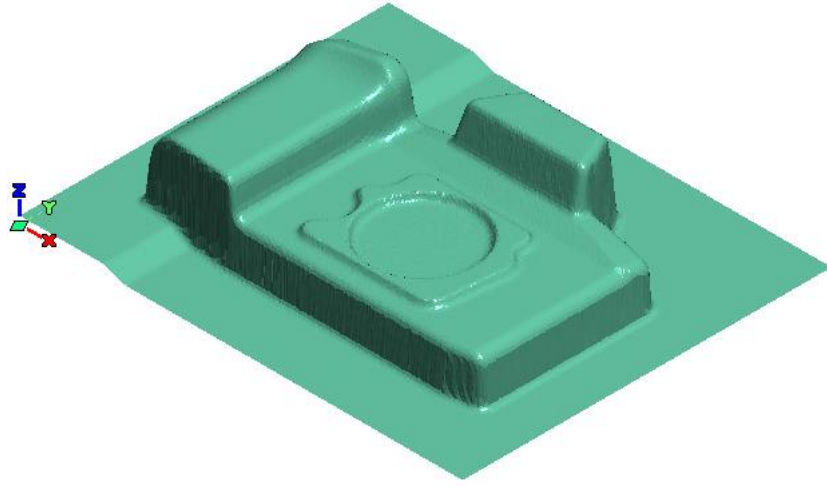


Şekil 7.51 Orijinal tersine mühendislik noktaları

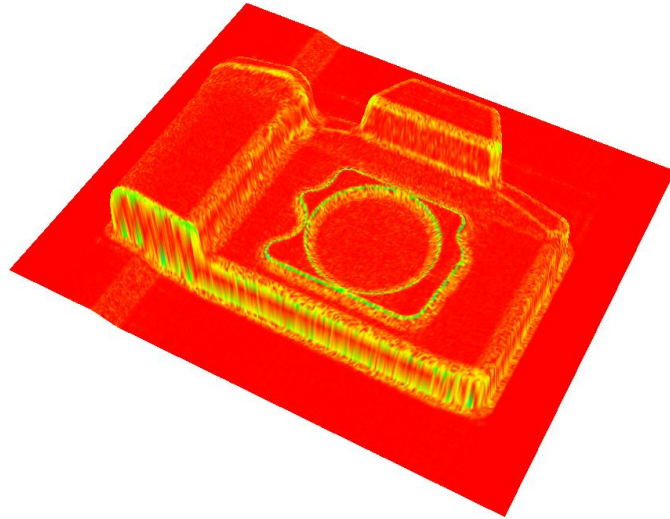
Örnekteki model için ince işlemede istenilen iç ve dış tolerans değeri 0,02 mm olarak kabul edilmiştir. İşlemede kullanılacak olan Ø4 mm küre uçlu kesici takım ve 0,02 mm iç ve dış tolerans değeri göz önüne alındığında, önerilen nokta aralığı 0,399 mm olarak hesaplanır. Tersine mühendislikten gelen nokta bulutundan XY'ye bağlı Z-map modeli kurulabilmesi için, referans ağ adımı düzenli verilerde yapılan örnekteki benzer şekilde 0,25 mm olarak seçilmiştir. Bu verilere göre oluşturulan XY'ye bağlı Z-map modeli, modelin formu değişmeyen bölgelerindeki fazla satır ve sütunlarının kaldırılması ile bir doğrultuda 389, diğer doğrultuda 401 nokta olmak üzere toplam 155.989 nokta içermektedir. Model 0,339 mm nokta aralığına sahip olacak şekilde basitleştirildiğinde, bir doğrultuda 242, diğer doğrultuda 250 nokta, toplamda 60.500 nokta içerir. Bu durumda modelin toplam nokta sayısında %61,2'lik bir azalma sağlanmaktadır.

Program çalıştırıldığında gerekli toleransın sağlanması için 143 tekil değer ve bunlara karşılık gelen tekil vektörlerin kullanılması gerektiği sonucu alınmakta ve nokta azaltma işlemi 6,59 sn sürmektedir. Uygulanan tekil değerlere ayrıştırma işleminin sonucunda, 143 tekil değer ve vektörün modeli ifade edebilmesi sayesinde hesaplamalar basitleşmiş ve toplam 113.113 elemandan oluşan matrisler üzerinde yapılabilmektedir. Bu da %27,5 daha az veri içeren matrisler üzerinde hesaplama yapabilme imkânı sağlamıştır.

Azaltılmış model, programdan poligonal model olarak raw formatında alınmaktadır (Şekil 7.52). Orijinal model ile veri azaltılmış model Metro yazılımı ile bilgisayar ortamında karşılaştırıldığında maksimum hata miktarı 0,391 mm, ortalama mutlak hata miktarı 0,022 mm olarak hesaplanmıştır. Noktaların yaklaşık %75,5'i hedeflenen 0,02 mm toleransın içerisinde kalmıştır. Hata dağılım grafiği Şekil 7.53'te gösterilmiştir. Veri azaltılmış model, programdan alınan verileri azaltılmamış XY'ye bağlı Z-map modeli ile karşılaştırıldığında ise maksimum hata miktarı 0,263 mm, ortalama mutlak hata miktarı 0,011 mm olarak hesaplanmıştır. Noktaların yaklaşık %87,8'i hedeflenen 0,02 mm toleransın içerisinde kalmıştır. Sonuç ortalama hata bazında incelendiğinde, hatanın %50'si veri azaltmadan, %50'si ise model oluşturmada kaynaklanmaktadır.



Şekil 7.52 Basitleştirilmiş poligonal model



Şekil 7.53 Bilgisayar ortamında hata grafiği

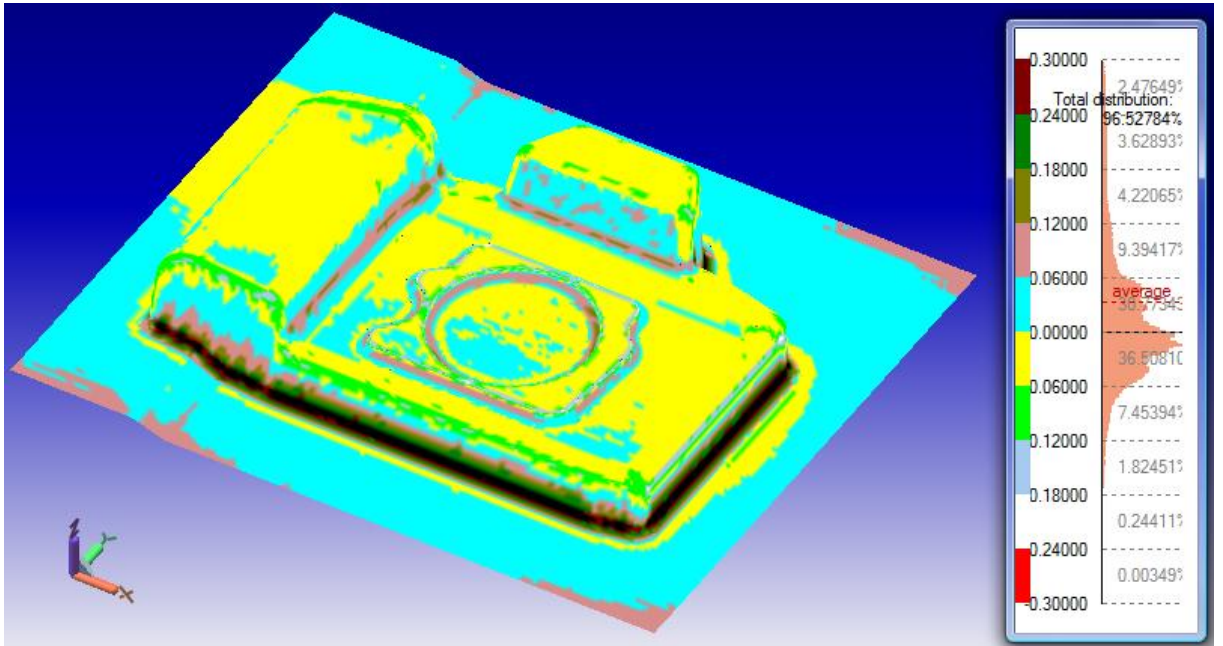
Programdan alınan basitleştirilmiş poligonal model üzerinde Hypermill yazılımı kullanılarak takım yolları oluşturulmuştur. Son işleme için Ø4 mm küre uçlu takım, 0,15 mm yanıl adım ve optimize edilmiş paralel takım yolu yöntemi kullanılmıştır. CNC frezede işlenen model Şekil 7.54'te görülmektedir. Hypermill ile yöntemden elde edilen yüzey verileri azaltılmış model üzerinde takım yolu hesabı 29 sn sürmüştür. Tersine mühendislikten gelen noktaların tamamı kullanılarak oluşturulan poligonal model üzerinde ince işlemeye ait takım yolu hesaplama süresi ise 86 sn'dir.

İşlemesi yapılan model üç boyutlu optik ölçüm cihazı ile ölçülmüştür. Ölçüm sonucunda hata miktarını gösteren grafik Şekil 7.55'te görülmektedir. Ölçüm sonucunda maksimum pozitif

hata miktarı 0,406 mm, maksimum negatif hata miktarı 0,177 mm, standart sapma 0,101 olarak bulunmuştur. Noktaların %96,53'ü 0,3 mm toleransın içerisinde kalmış, %29,21'i ise hedeflenen 0,02 mm toleransın içerisinde kalmıştır.



Şekil 7.54 İşlenen model



Şekil 7.55 İşlenen modelin ölçüm sonuçları

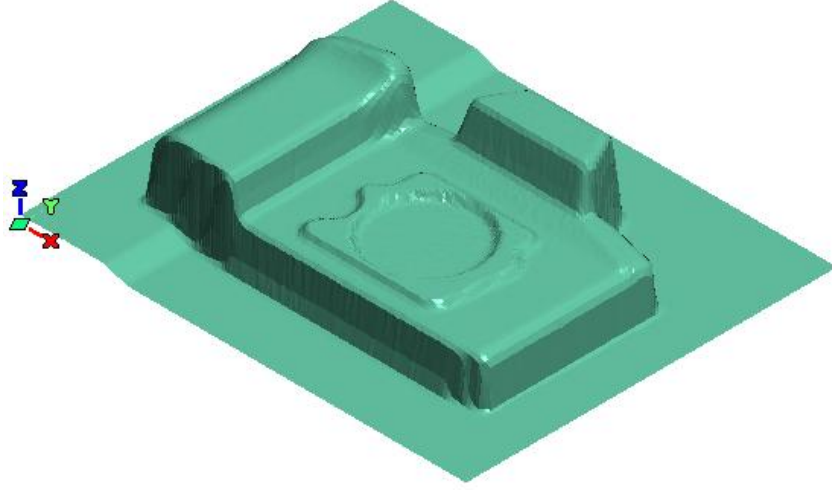
İkinci modelin, Hypermill yazılımı ile 0,02 tolerans değeriyle poligonal yapıya dönüştürülmesi ile elde edilen orijinal model 44.596 noktadan oluşmaktadır. Önerilen yöntemden elde edilen 60.500 noktalık poligonal model, yaklaşık %35,6 daha fazla veri içermektedir.

7.4.3.4 İkinci Model Üzerinde Kaba İşlemeye Ait Uygulama

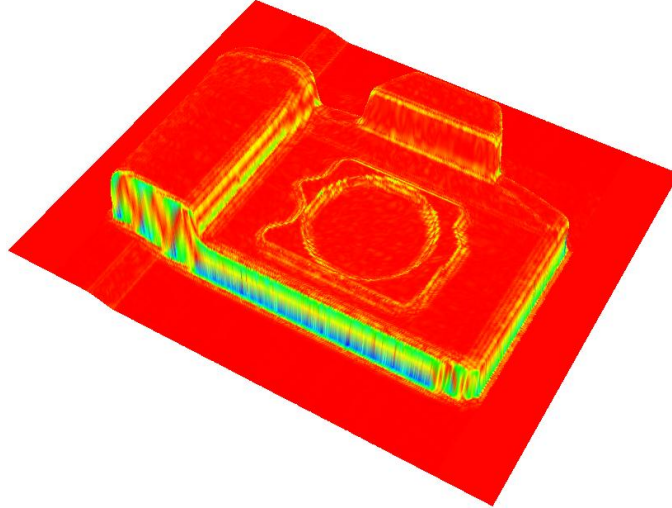
İkinci modele ait, ince işlemede de kullanılan tersine mühendislikten gelen nokta bulutu üzerinde, kaba işleme parametreleri kullanılarak veri azaltma işlemi yapılmıştır. Örnekteki model için kaba işlemede istenilen iç ve dış tolerans değeri 0,1 mm olarak kabul edilmiştir. İşlemede kullanılacak olan Ø4 mm küre uçlu kesici takım ve 0,1 mm iç ve dış tolerans değeri göz önüne alındığında, önerilen nokta aralığı 0,888 mm olarak hesaplanır. Orijinal XY'ye bağlı Z-map modeli, bir doğrultuda 385, diğer doğrultuda 401 nokta olmak üzere toplam 154.385 nokta içermektedir. Model 0,888 mm nokta aralığına sahip olacak şekilde basitleştirildiğinde, bir doğrultuda 108, diğer doğrultuda 112 nokta, toplamda 12.096 nokta içerir. Bu durumda modelin toplam nokta sayısında %92,2'lik bir azalma sağlanmaktadır.

Program çalıştırıldığında gerekli toleransın sağlanması için 77 tekil değer ve bunlara karşılık gelen tekil vektörlerin kullanılması gerektiği sonucu alınmakta ve nokta azaltma işlemi 6,15 sn sürmektedir. Uygulanan tekil değerlere ayrıştırma işleminin sonucunda, 77 tekil değer ve vektörün modeli ifade edebilmesi sayesinde hesaplamalar basitleşmiş ve toplam 60.599 elemandan oluşan matrisler üzerinde yapılabilmektedir. Bu da %60,7 daha az veri içeren matrisler üzerinde hesaplama yapabilme imkânı sağlamıştır.

Azaltılmış model, programdan poligonal model olarak raw formatında alınmaktadır (Şekil 7.56). Orijinal model ile veri azaltılmış model Metro yazılımı ile bilgisayar ortamında karşılaştırıldığında maksimum hata miktarı 0,801 mm, ortalama mutlak hata miktarı 0,055 mm olarak hesaplanmıştır. Noktaların yaklaşık %80,1'i hedeflenen 0,1 mm toleransın içerisinde kalmıştır. Hata dağılım grafiği Şekil 7.57'de gösterilmiştir. Veri azaltılmış model, programdan alınan verileri azaltılmamış XY'ye bağlı Z-map modeli ile karşılaştırıldığında ise maksimum hata miktarı 0,642 mm, ortalama mutlak hata miktarı 0,044 mm olarak hesaplanmıştır. Noktaların yaklaşık %86,3'ü hedeflenen 0,1 mm toleransın içerisinde kalmıştır. Sonuç ortalama hata bazında incelendiğinde, hatanın %80'i veri azaltmadan, %20'si ise model oluşturmada kaynaklanmaktadır.



Şekil 7.56 Basitleştirilmiş poligonal model



Şekil 7.57 Bilgisayar ortamında hata grafiği

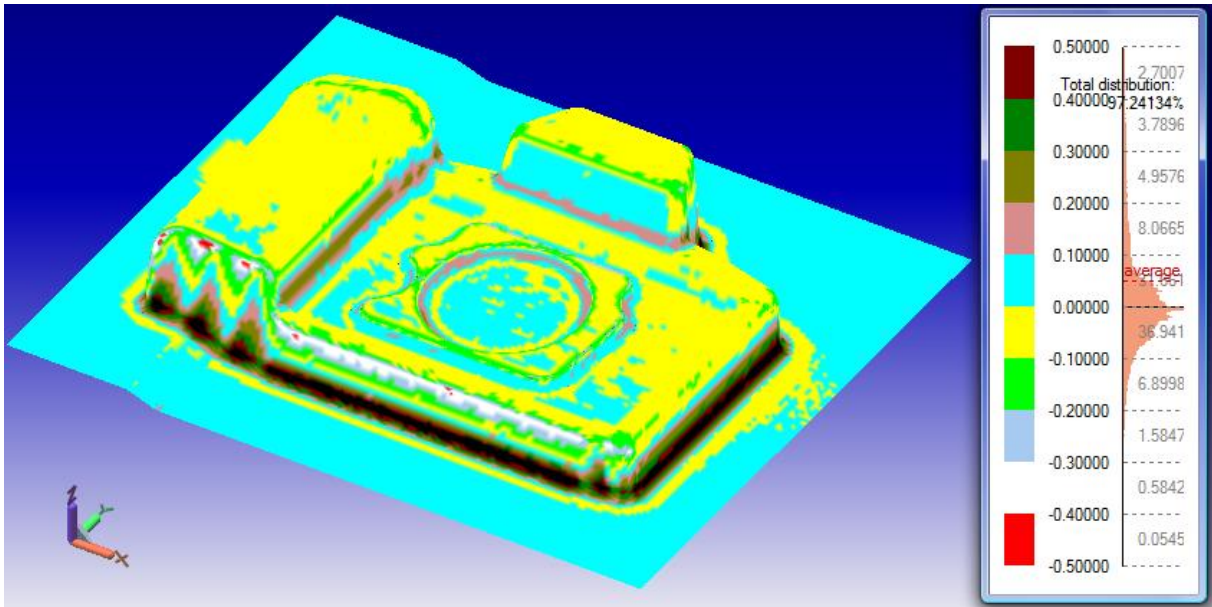
Programdan alınan basitleştirilmiş poligonal model üzerinde Hypermill yazılımı kullanılarak takım yolları oluşturulmuştur. Son işleme için Ø4 mm küre uçlu takım, 0,15 mm yanıl adım ve optimize edilmiş paralel takım yolu yöntemi kullanılmıştır. CNC frezede işlenen model Şekil 7.58’de görölmektedir. Hypermill ile yöntemden elde edilen yüzey verileri azaltılmış model üzerinde takım yolu hesabı 10 sn sürmüştür. Tersine mühendislikten gelen noktaların tamamı kullanılarak oluşturulan poligonal model üzerinde kaba işlemeye ait takım yolu hesaplama süresi ise 45 sn’dir.

İşlemesi yapılan model üç boyutlu optik ölçüm cihazı ile ölçölmüştür. Ölçüm sonucunda hata miktarını gösteren grafik Şekil 7.59’da görölmektedir. Ölçüm sonucunda maksimum pozitif

hata miktarı 0,645 mm, maksimum negatif hata miktarı 0,364 mm, standart sapma 0,163 olarak bulunmuştur. Noktaların yaklaşık %97,24'ü 0,5 mm toleransın içerisinde kalmış, %68,92'si ise hedeflenen 0,2 mm toleransın içerisinde kalmıştır.



Şekil 7.58 İşlenen model



Şekil 7.59 İşlenen modelin ölçüm sonuçları

Birinci modelin, Hypermill yazılımı ile 0,1 tolerans değeriyle poligonal yapıya dönüştürülmesi ile elde edilen orijinal model 10.621 noktadan oluşmaktadır. Önerilen yöntemden elde edilen 12.096 noktalık poligonal model, yaklaşık %12,2 daha fazla veri

içermektedir.

7.4.4 Düzenli Ve Düzensiz Yüzey Verileri Kullanılarak Yapılan Uygulamaların Sonuçlarının Karşılaştırılması

İki farklı örnek model üzerinde yapılan toplam 12 farklı uygulamanın tüm sonuçları ve açıklamaları Bölüm 7.4.1, 7.4.2 ve 7.4.3'te verilmiştir. Ayrıca karşılaştırma amaçlı olarak uygulamaların önemli sonuçları aşağıda çizelgelerde belirtilmiştir. Çizelgelere alınan önemli verilere ait başlıklar şunlardır;

Programa alınan nokta sayısı, düzenli yüzey verilerinin kullanıldığı uygulamada, oluşturulan sabit adımlı düzenli ağıın nokta sayısıdır. Düzensiz yüzey verilerinin kullanıldığı uygulamalarda ise, orijinal parametrik yüzeylerin belirlenen hassasiyette poligonal modele çevrilmesi ile elde edilen noktaların veya tersine mühendislikten gelen noktaların sayısıdır. Yazılım bu noktaları kullanarak veri azaltma işlemlerini yapmaktadır.

Oluşturulan Z-map modeli nokta sayısı, düzenli yüzey verilerinde programa alınan noktaların Z-map matrisine birebir yerleştirilmesi sonucunda oluşan matrisin eleman sayısıdır. Bu nedenle programa alınan nokta sayısı ile aynıdır. Düzensiz yüzey verilerinde ise model kurulurken, hücre içine birden fazla nokta düşmesi durumunda programa alınan noktaların bir bölümü kullanılmamakta, boş kalan hücre merkezlerine ise yeni noktalar yerleştirilmektedir. Oluşturulan XY'ye bağlı Z-map modeli nokta sayısı, kullanılmayan veya yeni yerleştirilen noktalar sonucunda, veri azaltma işlemi öncesi modelin sahip olduğu nokta sayısını ifade etmektedir.

Azaltılmış model nokta sayısı, veri azaltma işleminden sonra modelin içerdiği nokta sayısıdır.

Hypermill yazılımı ile poligonal yapıya dönüştürülen orijinal modelin nokta sayısı ise, modele ait parametrik yüzeyler mevcut olduğunda, bu yüzeylerin belirlenen hassasiyette poligonal modele çevrilmesi ile elde edilen nokta sayısıdır.

Hypermill yazılımı ile poligonal yapıya dönüştürülen orijinal modele göre azaltma oranı, Hypermill yazılımı ile poligonal yapıya dönüştürülen orijinal modelin nokta sayısından azaltılmış model nokta sayısının çıkarılması ve bu değerın Hypermill yazılımı ile poligonal yapıya dönüştürülen orijinal modelin nokta sayısına bölünmesi ile elde edilir. Bu değer veri azaltmanın etkinliğinin değerlendirilebilmesi açısından önemlidir.

Programa alınan nokta sayısına göre azaltma oranı, programa alınan nokta sayısından

azaltılmış model nokta sayısının çıkarılması ve bu değerin programa alınan nokta sayısına bölünmesi ile elde edilir. Bu değer veri azaltma işleminin etkinliğini göstermeyip, veri azaltmadaki işlem yükünü belirtmektedir.

Metro yazılımı ile ölçülen maksimum mutlak hata, verileri azaltılmış modelin orijinal model ile kıyaslanması sonucunda Metro yazılımının tespit ettiği en büyük mutlak hata değeridir. Metro yazılımı ile ölçülen ortalama mutlak hata ise, aynı kıyaslamadan vermiş olduğu ortalama mutlak hatayı tanımlar.

İşlenen modelden ölçülen maksimum pozitif hata, işleme sonucunda elde edilen modelin ölçüm sonuçlarının, orijinal model ile Rapidform yazılımı kullanılarak kıyaslanması ile bulunan maksimum pozitif hatadır. İşlenen modelin ölçümüne ait standart sapma ise aynı kıyaslamadan elde edilen standart sapma değeridir.

Çizelge 7.1 Birinci model üzerinde ince işlemeye ait uygulamaların sonuçları

	Düzenli Yüzey Verileri	Düzensiz Yüzey Verileri Poligonal Model	Düzensiz Yüzey Verileri Tersine Mühendislik
Programa alınan nokta sayısı	48.441	23.399	198.093
Oluşturulan Z-map modeli nokta sayısı	48.441	-	-
Oluşturulan XY'ye bağlı Z-map modeli nokta sayısı	-	48.441	48.441
Azaltılmış model nokta sayısı	20.280	20.280	20.280
Hypermill yazılımı ile poligonal yapıya dönüştürülen orijinal modelin nokta sayısı	23.399	23.399	23.399
Hypermill yazılımı ile poligonal yapıya dönüştürülen orijinal modele göre azaltma oranı	%13,3	%13,3	%13,3
Programa alınan nokta sayısına göre azaltma oranı	%58,1	%13,3	%89,8
Metro yazılımı ile ölçülen maksimum mutlak hata	0,564	0,586	0,545
Metro yazılımı ile ölçülen ortalama mutlak hata	0,030	0,026	0,028
İşlenen modelden ölçülen maksimum pozitif hata	0,307	0,431	0,410
İşlenen modelin ölçümüne ait standart sapma	0,074	0,098	0,098

Çizelge 7.2 İkinci model üzerinde ince işlemeye ait uygulamaların sonuçları

	Düzenli YüzeyVerileri	Düzensiz Yüzey Verileri Poligonal Model	Düzensiz Yüzey Verileri Tersine Mühendislik
Programa alınan nokta sayısı	192.881	44.596	154.356
Oluşturulan Z-map modeli nokta sayısı	192.881	-	-
Oluşturulan XY'ye bağlı Z-map modeli nokta sayısı	-	110.370	155.989
Azaltılmış model nokta sayısı	75.551	42.768	60.500
Hypermill yazılımı ile poligonal yapıya dönüştürülen orijinal modelin nokta sayısı	44.596	44.596	44.596
Hypermill yazılımı ile poligonal yapıya dönüştürülen orijinal modele göre azaltma oranı	-%69,4	%4,1	-%35,6
Programa alınan nokta sayısına göre azaltma oranı	%60,8	%4,1	%60,8
Metro yazılımı ile ölçülen maksimum mutlak hata	0,491	0,411	0,391
Metro yazılımı ile ölçülen ortalama mutlak hata	0,020	0,013	0,022
İşlenen modelden ölçülen maksimum pozitif hata	0,330	0,350	0,406
İşlenen modelin ölçümüne ait standart sapma	0,074	0,085	0,101

Çizelge 7.3 Birinci model üzerinde kaba işlemeye ait uygulamaların sonuçları

	Düzenli YüzeyVerileri	Düzensiz Yüzey Verileri Poligonal Model	Düzensiz Yüzey Verileri Tersine Mühendislik
Programa alınan nokta sayısı	48.441	23.399	198.093
Oluşturulan Z-map modeli nokta sayısı	48.441	-	-
Oluşturulan XY'ye bağlı Z-map modeli nokta sayısı	-	48.441	48.441
Azaltılmış model nokta sayısı	5.214	5.214	5.214
Hypermill yazılımı ile poligonal yapıya dönüştürülen orijinal modelin nokta sayısı	6.785	6.785	6.785

Hypermill yazılımı ile poligonal yapıya dönüştürülen orijinal modele göre azaltma oranı	%23,2	%23,2	%23,2
Programa alınan nokta sayısına göre azaltma oranı	%89,2	%77,7	%97,4
Metro yazılımı ile ölçülen maksimum mutlak hata	1,078	1,063	1,117
Metro yazılımı ile ölçülen ortalama mutlak hata	0,088	0,066	0,071
İşlenen modelden ölçülen maksimum pozitif hata	0,649	0,738	0,777
İşlenen modelin ölçümüne ait standart sapma	0,147	0,192	0,181

Çizelge 7.4 İkinci model üzerinde kaba işlemeye ait uygulamaların sonuçları

	Düzenli Yüzey Verileri	Düzensiz Yüzey Verileri Poligonal Model	Düzensiz Yüzey Verileri Tersine Mühendislik
Programa alınan nokta sayısı	192.881	44.596	154.356
Oluşturulan Z-map modeli nokta sayısı	192.881	-	-
Oluşturulan XY'ye bağlı Z-map modeli nokta sayısı	-	110.370	154.385
Azaltılmış model nokta sayısı	15.368	8.611	12.096
Hypermill yazılımı ile poligonal yapıya dönüştürülen orijinal modelin nokta sayısı	10.621	10.621	10.621
Hypermill yazılımı ile poligonal yapıya dönüştürülen orijinal modele göre azaltma oranı	-%44,7	%18,9	-%12,2
Programa alınan nokta sayısına göre azaltma oranı	%92	%80,7	%92,2
Metro yazılımı ile ölçülen maksimum mutlak hata	0,620	0,818	0,801
Metro yazılımı ile ölçülen ortalama mutlak hata	0,038	0,049	0,055
İşlenen modelden ölçülen maksimum pozitif hata	0,551	0,652	0,645
İşlenen modelin ölçümüne ait standart sapma	0,021	0,165	0,163

Geliştirilen yöntemlerin test edilmesi için yapılan uygulamalar, farklı özellikler barındıran iki ayrı model üzerinde kaba ve ince işlemeye yönelik olarak yapılmıştır. Karmaşık formlu yüzeyler ve yumuşak geçişlere sahip ilk model üzerinde düzenli yüzey verileri kullanılarak yapılan uygulamada başarılı sonuçlar alınmış ve model %58,1 daha az veri ile tanımlanabilmiştir. İşleme ve ölçüm sonuçlarından elde edilen tolerans, iç köşelerde ve yüzey eğiminin fazla olduğu bölgelerde bir miktar hedeflenenin dışına çıkmış ancak parça genelinde hedeflenen tolerans değerleri büyük ölçüde sağlanmıştır. İşlenen parçada yüzey kalitesi, hafif eğimli bölgelerde iyi olmakla birlikte, form kenarlarında eğimi fazla olan bölgelerde bir miktar bozulma göstermiştir. Birinci model üzerinde düzenli yüzey verileri kullanılarak yapılan kaba işleme uygulamasında ise model %89,2 daha az veri ile tanımlanabilmiştir. Ayrıca kaba işlemede, hedeflenen hassasiyeti sağlanma başarısının ince işlemeye göre daha iyi olduğu görülmüştür.

Birinci modelde, poligonal modelden gelen düzensiz yüzey verileri kullanılarak yapılan uygulamada azaltılmış modelin nokta sayısı, düzenli yüzey verileri ile yapılan uygulamada azaltılmış modelin nokta sayısı ile aynı olmuştur. Ancak yüzey toleransı ve kalitesi bakımından, poligonal modelden gelen düzensiz yüzey verileri kullanılarak yapılan uygulamaların sonuçları, düzenli yüzey verileri ile yapılan uygulamaların sonuçlarına göre daha başarılı olmuştur. Özellikle eğimin fazla olduğu bölgelerde yüzey kalitesinde artış gözlenmiştir. Model, XY'ye bağlı Z-map yöntemi ile aynı nokta sayısında daha hassas tanımlanabilmiştir. Poligonal modelden gelen düzensiz yüzey verileri üzerinde veri azaltma işleminde de, kaba işlemede hedeflenen hassasiyeti sağlanma başarısının ince işlemeye göre daha iyi olduğu görülmüştür.

Birinci modelde, tersine mühendislikten gelen düzensiz yüzey verileri kullanılarak yapılan uygulamada azaltılmış modelin nokta sayısı, düzenli yüzey verileri ile yapılan uygulamada azaltılmış modelin nokta sayısı ile aynı olmuştur. Yüzey hassasiyeti ve kalitesi bakımından sonuçlar, düzenli yüzey verileri ile yapılan uygulamaların sonuçlarına yakındır. Ancak poligonal modelden gelen düzensiz yüzey verileri ile yapılan uygulamaların sonuçlarına göre hataların bir miktar arttığı gözlenmiştir. Bunun nedeni poligonal modelden gelen noktaların, modeli tanımlamak için en ideal noktalar olması ancak tersine mühendislik noktalarının böyle bir özellik taşımasıdır. Buna rağmen model, XY'ye bağlı Z-map yöntemi ile aynı nokta sayısında düzenli veriler içeren Z-map yöntemine göre daha hassas tanımlanabilmiştir. Diğer uygulamalardakine benzer şekilde, kaba işlemede hedeflenen hassasiyeti sağlanma başarısının ince işlemeye göre daha iyi olduğu görülmüştür.

İkinci model ise ilk modelden farklı olarak, yapısında formlu yüzeylerle birlikte keskin kenarlar ve dik duvarlar içeren aynı zamanda üzerinde düz bölgeler de barındıran bir modeldir. İkinci model üzerinde düzenli yüzey verileri kullanılarak yapılan uygulamada model %60,8 daha az veri ile tanımlanabilmiştir. İşleme ve ölçüm sonuçlarında elde edilen tolerans, yüzey eğiminin fazla olduğu bölgelerde bir miktar hedeflenenin dışına çıkmış ve bu bölgelerde yüzey kalitesinde bir miktar bozulma görülmüştür. Düzenli ağ yöntemi ve Z-map modeli yüksek hassasiyet gerektiren durumlarda, dik duvar ve keskin köşelere sahip parçaları tanımlamakta yetersiz kalabilmektedir. İkinci model üzerinde düzenli yüzey verileri kullanılarak yapılan kaba işleme uygulamasında ise model %92 daha az veri ile tanımlanabilmiştir. İşleme ve ölçüm sonuçları ince işlemedekine benzer özellikler göstermektedir. Ancak kaba işlemede, veri azaltma miktarının ve buna bağlı olarak hedeflenen hassasiyeti sağlama başarısının ince işlemeye göre daha iyi olduğu görülmüştür.

İkinci modelde, poligonal modelden gelen düzensiz yüzey verileri kullanılarak yapılan uygulamada verileri azaltılmış modelin nokta sayısı, düzenli yüzey verileri ile yapılan uygulamada verileri azaltılmış modelin nokta sayısından daha az olmuştur. Bunun nedeni, yöntemin modelin düz bölümlerindeki noktaların tamamen atılabilmesine imkân vermesidir. Ayrıca düzensiz verilerle modelin tanımlanması hassasiyeti arttırmış, özellikle eğimin fazla olduğu bölgelerde yüzey kalitesinde artış gözlenmiştir. Model, XY'ye bağlı Z-map yöntemi ile aynı nokta sayısında daha hassas tanımlanabilmiştir. Poligonal modelden gelen düzensiz yüzey verileri üzerinde veri azaltma işleminde de, kaba işlemede hedeflenen hassasiyeti sağlama başarısının ince işlemeye göre daha iyi olduğu görülmüştür.

İkinci modelde, tersine mühendislikten ve poligonal modelden gelen düzensiz yüzey verileri kullanılarak yapılan uygulamalar kıyaslandığında, tersine mühendislik uygulamasında azaltma miktarının bir miktar az olduğu görülmektedir. Bunun nedeni, eğimli geçişe sahip ancak diğer yönde sabit formu olan bölgede matris satır veya sütunlarının birbirinden farklı olması ve bu nedenle bu satır ve sütunların tamamının kaldırılamamasıdır. Yüzey hassasiyeti ve kalitesi bakımından sonuçlar, düzenli yüzey verileri ile yapılan uygulamaların sonuçlarına göre daha başarılı olmuş ancak poligonal modelden gelen düzensiz yüzey verileri ile yapılan uygulamaların sonuçlarına göre hataların bir miktar arttığı gözlenmiştir. Bunun nedeni poligonal modelden gelen noktaların, modeli tanımlamak için en ideal noktalar olması ancak tersine mühendislik noktalarının böyle bir özellik taşınamamasıdır. Buna rağmen model, XY'ye bağlı Z-map yöntemi ile aynı nokta sayısında düzenli veriler içeren Z-map yöntemine göre daha hassas tanımlanabilmiştir. Diğer uygulamalardakine benzer şekilde, kaba işlemede

hedeflenen hassasiyeti sağlanma başarısının ince işlemeye göre daha iyi olduğu görülmüştür.

Genel olarak tüm uygulamalarda kaba işlemenin hedeflenen toleransı yakalama başarısının ince işlemeye göre daha yüksek olduğu görülmüştür. Verileri azaltılmış model üzerindeki hatalar temel olarak iki farklı nedenden kaynaklanmaktadır. Bunlardan biri Z-map veya XY'ye bağlı Z-map modelinin kurulumundan gelen hatadır. Diğer hata ise veri azaltmadan gelen hatadır. Kaba toleransların hedeflendiği ve verilerin yüksek oranda azaltıldığı durumda, model kurulumundan gelen hata, veri azaltmadan kaynaklanan hataya göre daha az olmaktadır. İnce işlemlerde ise model kurulumundan gelen hata, toplam hata üzerinde çok daha fazla ekili olmaktadır.

Veri azaltmanın, takım yolu hesabının süresi üzerine etkileri de incelenmiştir. Poligonal modellerde takım yolu hesap süresi, modelin nokta sayısından etkilendiği gibi aynı zamanda komşu üçgenlerin birbirlerine göre açisal değişiminden de etkilenmektedir. Bu nedenle alınan ölçümlerde, nokta sayısının azalmasından kaynaklanacağı düşünülen takım yolu hesap süresindeki kısalma, tüm uygulamalarda gözlenmemiştir. Tersine mühendislik uygulamalarında ise, modeller üzerine uygulanan veri azaltma işlemi sonucunda takım yolu hesaplama sürelerinde de önemli ölçüde azalma olmuştur. Bu sonuç, tersine mühendislik uygulamalarında yöntemin başarı ile kullanılabileceğini ve önemli getirileri olabileceğini göstermektedir.

7.5 Düzensiz Yüzey Verilerini Azaltan Yöntemin Literatür İle Karşılaştırılması

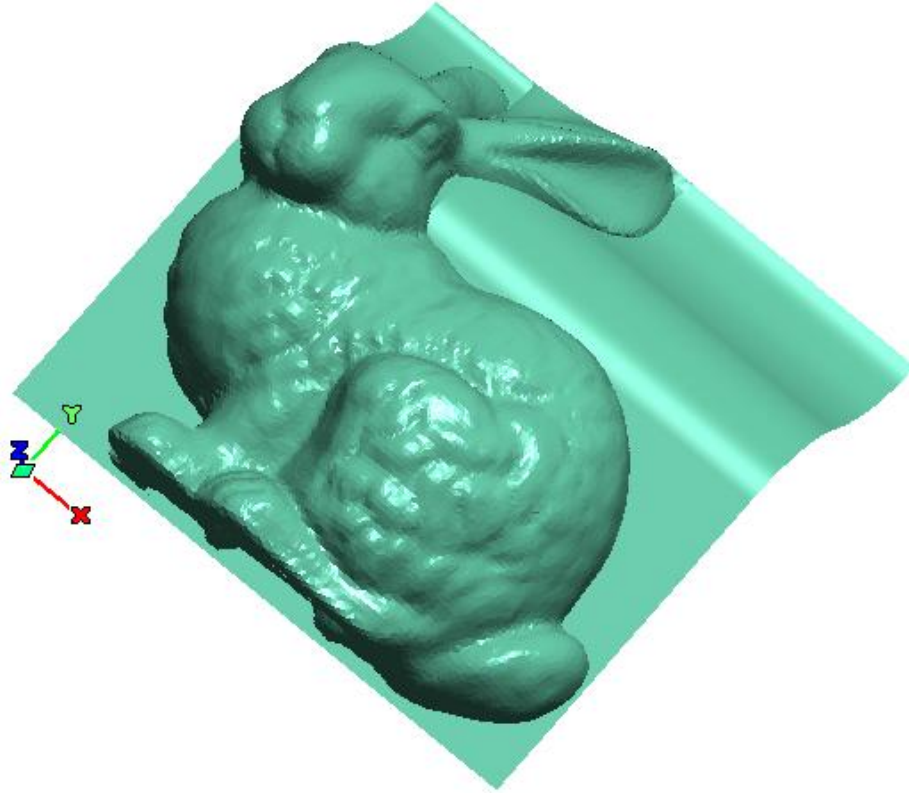
Son yıllarda özellikle çokgen modellerde veri azaltılmasına yönelik birçok araştırma yapılmış ve çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Bu konuda geliştirilen önemli yöntemlerin teorik incelemesi Bölüm 2'de yapılmıştır. Ancak yöntemlerin birbirleri ile objektif bir şekilde karşılaştırılabilmeleri ancak yöntemlerin aynı model üzerine uygulanmaları ile yapılabilir. Buna yönelik bir çalışma Cignoni vd. (1997) tarafından yapılmıştır. Cignoni vd., altı farklı yöntemi üç ayrı model üzerinde test etmişler ve sonuçlarını karşılaştırmışlardır. Bu çalışmada geliştirilen yöntemin literatür ile objektif bir karşılaştırılmasının yapılabilmesi için, Cignoni vd.'nin uygulama yaptığı örneklerle ve parametrelere mümkün olduğunda sadık kalınmaya çalışılarak karşılaştırmalar yapılmıştır. Ancak literatürdeki bu yöntemlerin CAD ve bilgisayar grafiğine yönelik olmasından dolayı, tez çalışmasında geliştirilen CAM odaklı yöntem ile bire bir aynı parametreler ile karşılaştırılması mümkün olmamıştır. Karşılaştırmanın yapılabilmesi için en uygun iki model seçilmiş ve her uygulamada yapılan değişiklikler veya uygulama farklılıkları belirtilmiştir. Karşılaştırma poligonal modeller üzerinde yapıldığından, örnek

modeller üzerinde sadece düzensiz yüzey verilerini azaltan yöntem uygulanabilmiştir. Cignoni vd.'nin karşılaştırdığı altı yöntem; Schroeder vd. (1992), Cohen vd. (1996), Ciampalini vd. (1997), Hoppe vd. (1993), Hoppe (1996) ve Garland ve Heckbert (1997a) yöntemleridir. Bu yöntemler Bölüm 2’de incelenmiştir.

Literatürdeki uygulamada, elde edilen sonuçların parça ebatlarından bağımsız hale getirilmesi için hata miktarları parçanın çevrel sınırının köşegen uzunluğuna bölümü olarak verilmiştir. Yöntemler, çeşitli nokta azaltma oranlarındaki hata miktarlarına göre kıyaslanmışlardır.

7.5.1.1 “Bunny” Modeli

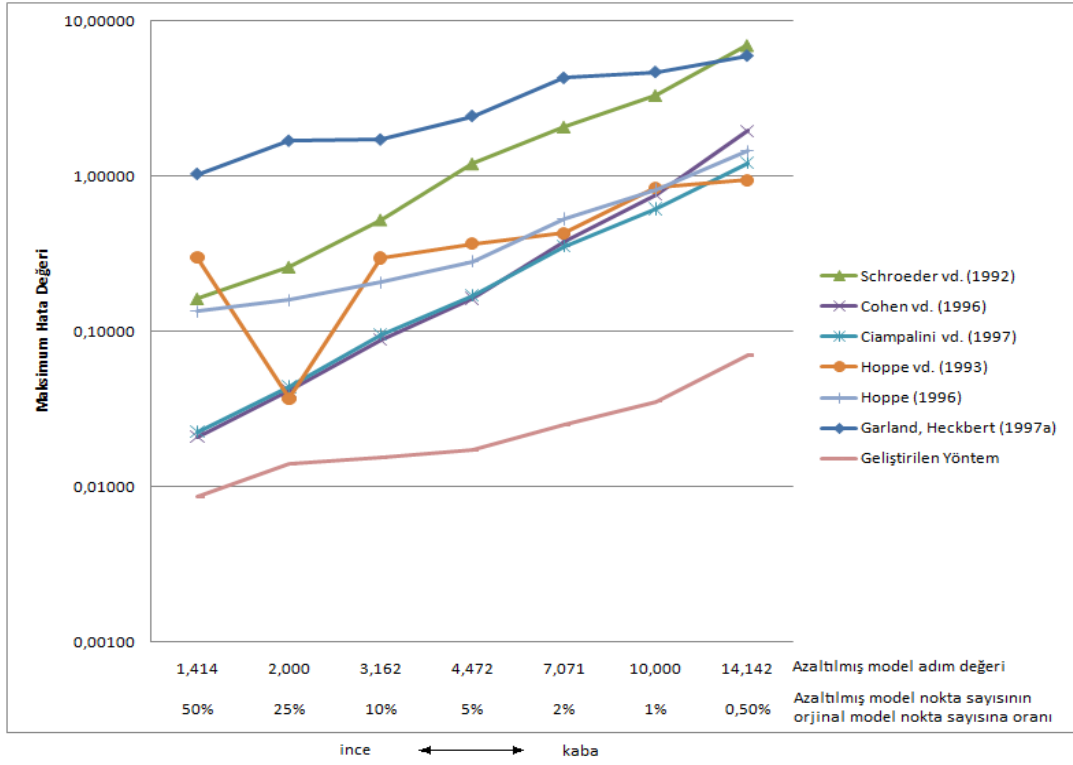
Orjinal model, 34.834 nokta ve 69.451 üçgenden oluşan ve çevrel sınırı 156x154x212 birim ölçülerinde olan açık bir poligonal modeldir [3]. Model yüzeyleri, karmaşık formlu ve desenli yüzeylerdir. Geliştirilen yöntemin modele uygulanabilmesi için, modelin Z eksenine göre altta kalan ve ters açığa düşen bölümlerinin kaldırılması gerekir. Bunun için modelin Z eksen doğrultusuna göre en dış hattından bir ayırma yüzeyi oluşturulmuş ve modelin üst yarısı kullanılmıştır (Şekil 7.60). Azaltma işlemi, oluşturulan yüzey ile birlikte yapılmış ancak hata ölçümleri bu yüzey kesilip atılarak ana model üzerinden yapılmıştır. XY’ye bağlı Z-map modelinin oluşturulabilmesi için model üzerinde referans adım değerine göre noktaların matris formunda bir yapıya sokulması gerekmektedir. Orijinal poligonal model incelendiğinde modelin köşe noktalarının birbirlerine göre olan ortalama mesafesi yaklaşık 1 birim olarak bulunmuştur. Bu nedenle referans adım değeri 1 birim kabul edilmiş ve istenilen azaltılmış nokta yüzdesi sağlanacak şekilde azaltılmış model adım değerleri tespit edilmiştir. Azaltılmış modelin nokta sayısının, orjinal modelin nokta sayısına oranının değişimi ile maksimum hata değerleri Çizelge 7.5’te ve grafiği Şekil 7.61’de ayrıca azaltılmış modelin nokta sayısının, orjinal modelin nokta sayısına oranının değişimi ile ortalama hata değerleri Çizelge 7.6’da ve grafiği Şekil 7.62’de verilmiştir.



Şekil 7.60 “Bunny” modeli ve eklenen yüzey

Çizelge 7.5 Azaltılmış nokta sayısı oranı – maksimum hata değerleri

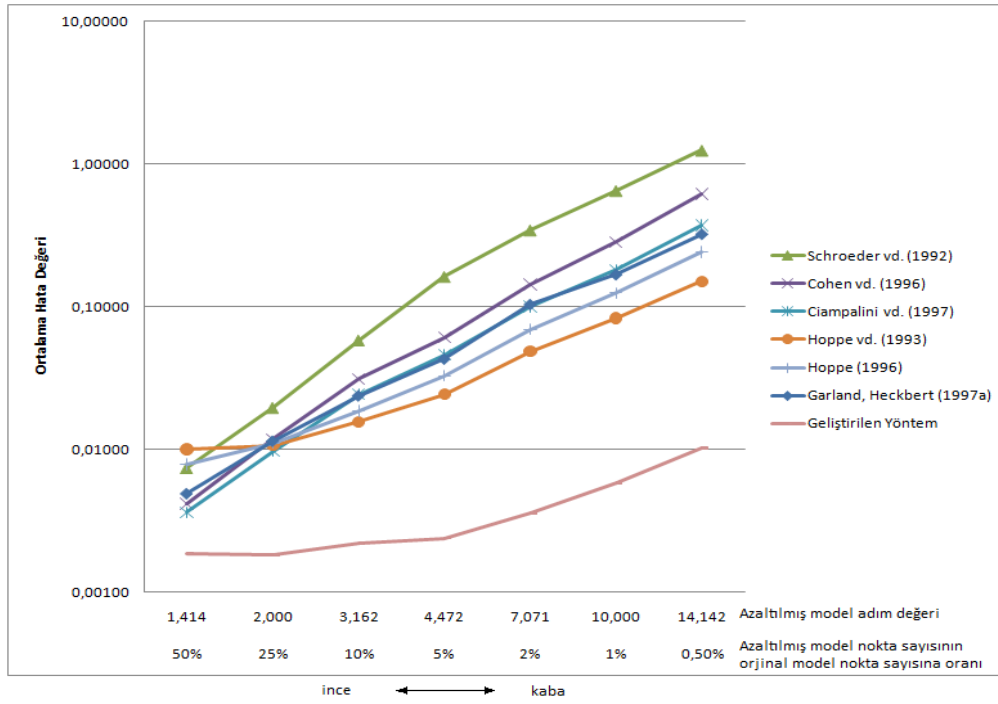
Azaltılmış model nokta sayısının orijinal model nokta sayısına oranı	Azaltılmış model adım değeri	Schroeder vd. (1992)	Cohen vd. (1996)	Ciampalini vd. (1997)	Hoppe vd. (1993)	Hoppe (1996)	Garland, Heckbert (1997a)	Geliştirilen Yöntem
50%	1,414	0,16140	0,02089	0,02240	0,29680	0,13390	1,02400	0,00861
25%	2,000	0,25860	0,04154	0,04380	0,03668	0,15850	1,67690	0,01386
10%	3,162	0,52120	0,08813	0,09480	0,29640	0,20650	1,70700	0,01535
5%	4,472	1,20000	0,16290	0,16970	0,36660	0,28170	2,42560	0,01709
2%	7,071	2,07210	0,38020	0,35190	0,42620	0,52900	4,27000	0,02513
1%	10,000	3,31170	0,75990	0,61410	0,84070	0,81220	4,66140	0,03530
0,50%	14,142	6,95960	1,94720	1,21470	0,93970	1,44090	5,93820	0,06947



Şekil 7.61 Azaltılmış nokta sayısı oranı – maksimum hata değerleri grafiği

Çizelge 7.6 Azaltılmış nokta sayısı oranı – ortalama hata değerleri

Azaltılmış model nokta sayısının orijinal model nokta sayısına oranı	Azaltılmış model adım değeri	Schroeder vd. (1992)	Cohen vd. (1996)	Ciampalini vd. (1997)	Hoppe vd. (1993)	Hoppe (1996)	Garland, Heckbert (1997a)	Geliştirilen Yöntem
50%	1,414	0,00735	0,00414	0,00360	0,00996	0,00781	0,00486	0,00186
25%	2,000	0,01947	0,01174	0,00970	0,01064	0,01100	0,01135	0,00181
10%	3,162	0,05791	0,03117	0,02420	0,01554	0,01851	0,02363	0,00220
5%	4,472	0,16120	0,06066	0,04590	0,02415	0,03273	0,04279	0,00238
2%	7,071	0,34230	0,14230	0,09970	0,04846	0,06897	0,10310	0,00357
1%	10,000	0,64630	0,28380	0,18100	0,08265	0,12460	0,16720	0,00579
0,50%	14,142	1,23980	0,61530	0,36970	0,14970	0,24140	0,32140	0,01024



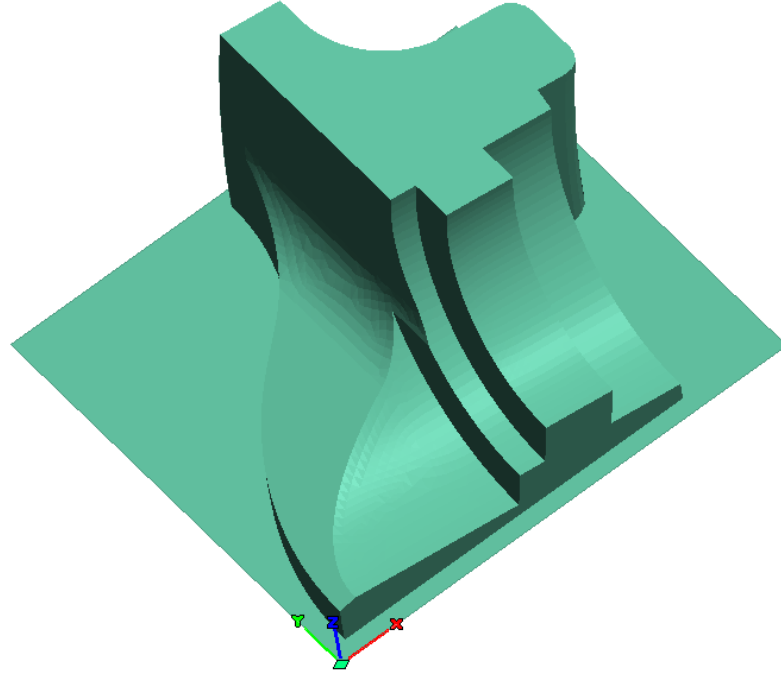
Şekil 7.62 Azaltılmış nokta sayısı oranı – ortalama hata değerleri grafiği

Sonuçlar değerlendirildiğinde, bu çalışmada geliştirilen yöntemin, “bunny” modeli gibi formu ve yumuşak geçişli modellerde, diğer çalışmalara göre çok başarılı sonuçlar verdiği görülmektedir. Geliştirilen yöntem, düşük nokta azaltma oranlarında yaklaşık 3 kat daha hassas sonuç verebilirken, artan nokta azaltma oranıyla 12 kata varan hassas sonuçlar alınmıştır. Kaba işleme toleranslarına ve yüksek veri azaltma miktarlarına gidildikçe, geliştirilen yöntemin sonuçları çok daha başarılı olmaktadır.

7.5.1.2 “Fandisk” Modeli

Orjinal model, 36.475 nokta ve 12.946 üçgenden oluşan ve çevrel sınırı 48x56x27 birim ölçülerinde olan bir poligonal modeldir [4]. Model yüzeyleri karmaşık formu olmayıp, model keskin kenarlar ve dik duvarlar içermektedir. Geliştirilen yöntemin modele uygulanabilmesi için, modelin Z eksenine göre altta kalan ve ters açığa düşen bölümlerinin kaldırılmış ve taban düzleminde düzlemsel bir yüzey oluşturulmuştur (Şekil 7.63). Azaltma işlemi, oluşturulan yüzey ile birlikte yapılmış ancak hata ölçümleri bu yüzey kesilip atılarak ana model üzerinden yapılmıştır. XY’ye bağlı Z-map modelinin oluşturulabilmesi için model üzerinde referans adım değerine göre noktaların matris formunda bir yapıya sokulması gerekmektedir. Orjinal poligonal model incelendiğinde modelin köşe noktalarının birbirlerine göre olan ortalama mesafesi yaklaşık 0,9 birim olarak bulunmuştur. Bu nedenle referans adım değeri 0,9 birim

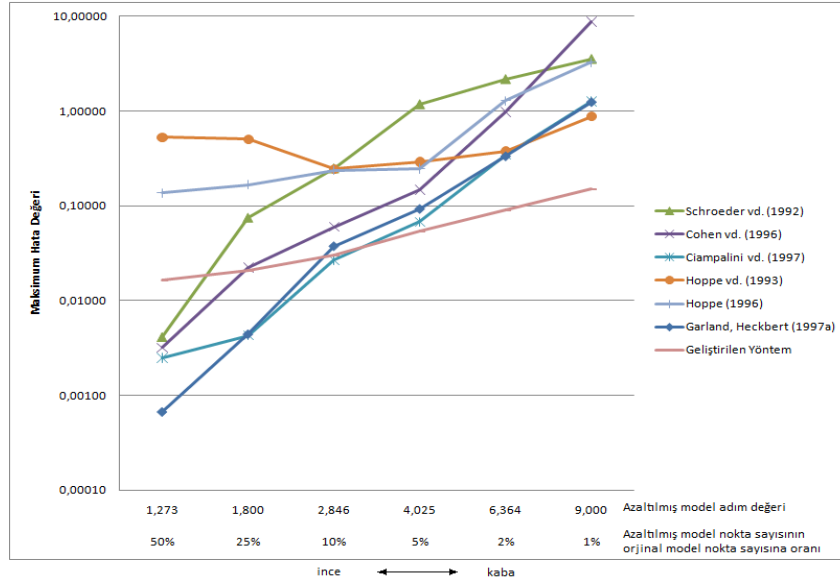
kabul edilmiş ve istenilen nokta azaltma oranı sağlanacak şekilde azaltılmış model adım değerleri tespit edilmiştir. Azaltılmış modelin nokta sayısının, orjinal modelin nokta sayısına oranının değişimi ile maksimum hata değerleri Çizelge 7.7’de ve grafiği Şekil 7.64’te ayrıca azaltılmış modelin nokta sayısının, orjinal modelin nokta sayısına oranının değişimi ile ortalama hata değerleri Çizelge 7.8’de ve grafiği Şekil 7.65’te verilmiştir.



Şekil 7.63 “Fandisk” modeli ve eklenen yüzey

Çizelge 7.7 Azaltılmış nokta sayısı oranı – maksimum hata değerleri

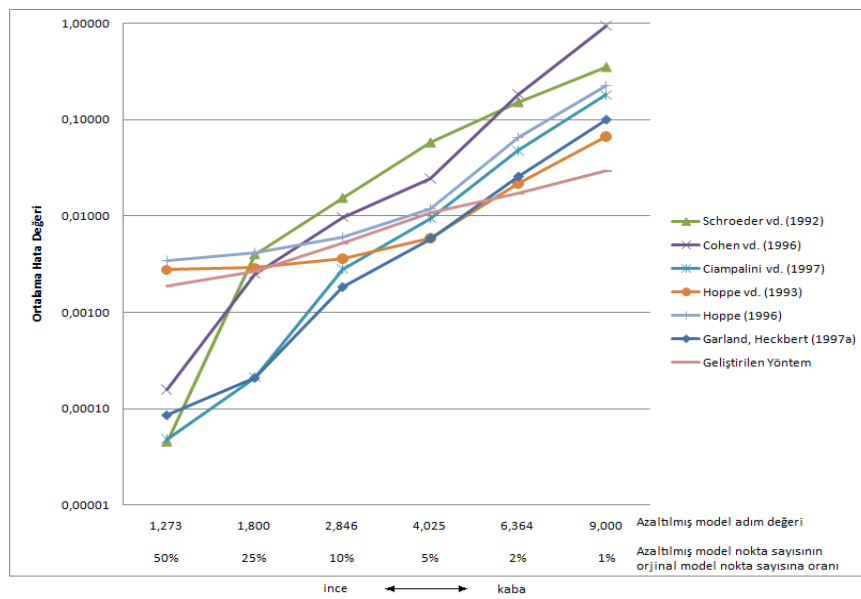
Azaltılmış model nokta sayısının orijinal model nokta sayısına oranı	Azaltılmış model adım değeri	Schroeder vd. (1992)	Cohen vd. (1996)	Ciampalini vd. (1997)	Hoppe vd. (1993)	Hoppe (1996)	Garland, Heckbert (1997a)	Geliştirilen Yöntem
50%	1,273	0,00412	0,00317	0,00248	0,52970	0,13660	0,00067	0,01644
25%	1,800	0,07452	0,02227	0,00427	0,50210	0,16740	0,00442	0,02081
10%	2,846	0,24710	0,05958	0,02657	0,24520	0,23770	0,03746	0,03026
5%	4,025	1,17080	0,14680	0,06778	0,29100	0,24700	0,09253	0,05438
2%	6,364	2,15660	0,97260	0,34370	0,37590	1,27770	0,33210	0,08941
1%	9,000	3,51280	8,73700	1,25980	0,87340	3,26100	1,23730	0,14909



Şekil 7.64 Azaltılmış nokta sayısı oranı – maksimum hata değerleri grafiği

Çizelge 7.8 Azaltılmış nokta sayısı oranı – ortalama hata değerleri

Azaltılmış model nokta sayısının orijinal model nokta sayısına oranı	Azaltılmış model adım değeri	Schroeder vd. (1992)	Cohen vd. (1996)	Ciampalini vd. (1997)	Hoppe vd. (1993)	Hoppe (1996)	Garland, Heckbert (1997a)	Geliştirilen Yöntem
50%	1,273	0,00005	0,00016	0,00005	0,00278	0,00345	0,00009	0,00186
25%	1,800	0,00398	0,00251	0,00021	0,00290	0,00414	0,00021	0,00268
10%	2,846	0,01539	0,00965	0,00280	0,00361	0,00608	0,00183	0,00522
5%	4,025	0,05800	0,02452	0,00944	0,00588	0,01186	0,00581	0,01089
2%	6,364	0,15230	0,18270	0,04767	0,02180	0,06576	0,02552	0,01735
1%	9,000	0,35270	0,94060	0,18060	0,06680	0,22590	0,09879	0,02912



Şekil 7.65 Azaltılmış nokta sayısı oranı – ortalama hata değerleri grafiği

Sonuçlar değerlendirildiğinde, keskin kenarlar ve dik duvarlara sahip “fandisk” modelinde, düşük veri azaltma oranlarında diğer çalışmalara göre kısmi bir başarı sağlanmıştır. Bunun nedeni, geliştirilen XY’ye bağlı Z-map yönteminin keskin kenarları tanımlayabilmesi ancak azaltma işleminde keskin kenarların korunmasına yönelik bir özelliğin bulunmamasıdır. Keskin kenarları koruyabilen yöntemlerin, düşük veri azaltma miktarında daha hassas sonuçlar verdiği görülmüştür. Veri azaltma miktarı arttıkça, geliştirilen yöntemin sonuçları daha başarılı olmakta ve en yüksek veri azaltma miktarında diğer yöntemlerden daha iyi toleranslarda veri azaltma yapılabilmektedir.

8. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Geliştirilen tekil değerlere ayrıştırma yöntemine dayalı yüzeylerde veri azaltma yöntemi, yapılan uygulamalar ile önce bilgisayar ortamında kontrol edilmiş, daha sonra da gerçek imalat ortamında denenmiştir. Yüzey verilerinin tekil değerlerine ayrıştırılarak, tekil değerler ve vektörlerin bir kısmı ile tanımlanabilmesi yüzeyler üzerinde yapılan veri azaltma işlemini önemli ölçüde kolaylaştırmıştır. Literatürdeki yaklaşımlar, veri azaltma sürecinde modele ait noktaların tamamının işleminden geçirilmesini gerektirir. Çalışmada farklı olarak, tekil değerlere ayrıştırma ve tekil değerlerin modeli ifade etmeye yetecek bir bölümü üzerinde işlemlerin yapılması veri azaltma sürecini hızlandırmıştır. Aynı zamanda üç boyutlu model üzerinde yapılan bu işlemlerin, tekil vektörler üzerinde iki boyuta indirgenerek yapılabilmesi de çalışma kolaylığı sağlamıştır.

Çalışmada, tekil değerlere ayrıştırmaya dayalı veri azaltma, Z-map ve XY'ye bağlı Z-map olmak üzere iki farklı modelleme yöntemi kullanılarak uygulanmıştır. İlk çalışmalar düzenli yüzey verileri ile tanımlanan Z-map modeli üzerinde yapılmıştır. Düzenli adımlı ağ ile kurulan Z-map modeli, geometrinin tanımlanmasını çok basitleştirmekte ve yüzeye ait noktaların sadece Z koordinatlarının saklanması yeterli olmaktadır. Ayrıca sadece Z koordinatlarını içeren Z-map matrisinin tekil değerlere ayrıştırılıp bir bölümünün kullanılması yöntemin diğer yöntemlere göre daha hızlı çalışmasını sağlamaktadır.

Elde edilen veriler, veri azaltma yönteminin Z-map modeli üzerinde başarılı bir şekilde çalıştığını ve Z-map modelinin sık ve formlu yüzeyleri yeterli hassasiyette tanımlayabildiğini göstermiştir. Ancak dik duvar ve keskin köşeler içeren geometrileri Z-map modeli ile tanımlamakta güçlükler olduğu görülmüştür. Aynı zamanda model üzerinde küçük bir bölgede karmaşık formların olması, diğer geniş bölgelerin düz veya hafif formlu yüzeylerden oluşması da tüm modelin sık nokta ile tanımlanmasına neden olabilmektedir.

Tanımlanması güç geometrileri daha iyi ifade edebilmek için Z-map modeli iyileştirilerek, yeni bir yaklaşım olan XY'ye bağlı Z-map modeli geliştirilmiştir. XY'ye bağlı Z-map modeli farklı olarak düzensiz noktalar ile çalışabilmektedir. XY'ye bağlı Z-map yöntemi ile bir poligonal modelin köşe noktaları veya tersine mühendislikten gelen noktalar gibi düzensiz yapıdaki noktalardan model kurabilmek ve üzerinde veri azaltabilmek mümkündür. Özellikle noktaların keskin kenarlar ve dik duvarlar formunda matrise yerleştirilebilmeleri, modellerin daha dar toleranslarda tanımlanmasına imkân sağlamıştır. Aynı zamanda model üzerinde formu değişmeyen bölgeler bulunduğu, Z-map yönteminden farklı olarak bu bölgelerdeki

noktalar kaldırılabilmekte ve daha verimli bir model kurulabilmektedir. Bunun sonucunda, basitleştirilmiş geometrik modelin daha az veri içermesi ve benzer uygulamalara göre daha başarılı sonuçlar alınması mümkün olmaktadır.

Düzensiz noktalardan oluşan poligonal modeller, Z-map ile tanımlanması güç geometrilerde başlangıçta fazla nokta kullanımının önüne geçer. Aynı zamanda, dik duvarlar ve keskin kenarların daha doğru tanımlanabilmeleri mümkün olur. Aşırı yoğun bir poligonal model yerine, modeli daha verimli ifade eden bir başlangıç poligonu, nokta azaltma işleminin daha verimli olmasını sağlar.

Tersine mühendislikte karşılaşılan problemlerden biri, özellikle günümüzde oldukça yaygınlaşan optik veya lazerli tarayıcıların verdiği çok yoğun ve düzensiz nokta bulutlarının hafifletilmesi ve bir diğeri de bu noktalardan bir model oluşturulmasıdır. Geliştirilen XY'ye bağlı Z-map modeli ve buna bağlı tekil değerlere ayırtırmaya dayalı veri azaltma yöntemi ile tersine mühendislik verilerinin kolaylıkla azaltılması mümkün olmuştur Aynı zamanda XY'ye bağlı Z-map modelinin noktalar arasındaki ilişkiyi de kurması nedeniyle, sonuç doğrudan poligonal model olarak alınabilmektedir. Böylece tersine mühendislik verileri poligonal model kurmak gibi bir ön işleme gerek duyulmadan azaltılabilmekte ve doğrudan model olarak alınabilmektedir.

Parçaların CNC tezgâhta işlenmesi ve ölçülmesi sonucunda elde edilen verilerin, bilgisayar ortamında yapılan değerlendirmelerden sayısal olarak bir miktar farklı olduğu görülmüştür. Sayısal farklılığın temel nedenleri ise poligonal yüzeyde üçgenler arasında açisal farkın fazla olduğu bölümlerde kesici takımın iki üçgen arasına ulaşamayarak talaş bırakması, talaşlı imalat şartlarından gelen hatalar (ortam sıcaklığı, takım ve tutucunun hassasiyeti, parçanın bağlama sistemi, CNC tezgâhın hassasiyeti gibi) ve ölçüm hataları (optik tarayıcı hassasiyeti, ölçüm için model üzerine kaplanan toz) olarak sayılabilir. Ayrıca işlenmiş parçanın ölçüm verilerinin kontrolü için kullanılan yazılımın kullandığı yöntemin getirmiş olduğu farklılıklar da mevcuttur. Sayısal farklılığa rağmen sonuçlar, hatanın olduğu bölgeler ve yöntemlerin kıyaslanması bakımından bilgisayar ortamında yapılan değerlendirmelere paralellik göstermektedir. Yüzey verilerini azaltma yönteminin CAM'e yönelik olarak geliştirilmesinin, bu sonuçta etkisi olduğu düşünülmektedir.

Yapılan uygulamalardan, model üzerinde keskin kenarların ve dik duvarların bulunmaması ile yöntemin verimliliğinin önemli ölçüde arttığı ve başarılı sonuçlar verdiği görülmektedir. Modelde, keskin kenarların ve dik duvarların artması ile birlikte yöntemin veri azaltma

etkinliği bir miktar azalmaktadır. Geliştirilen XY'ye bağlı Z-map modeli ile veri azaltma yöntemi, bu dezavantajı büyük ölçüde ortadan kaldırmıştır.

Geliştirilen yöntem literatürdeki çalışmalar ile karşılaştırıldığında, formlu ve sığ yüzeylere sahip modellerde, dik ve keskin kenarlara sahip modellere göre aynı veri azaltma miktarlarında hem ince hem de kaba işleme toleranslarında sonuçların çok daha iyi olduğu görölmüştür. Özellikle yöntemin kaba toleranslara doğru gidildikçe başarısı daha da artmaktadır. Dik yüzeyler ve keskin kenarlar içeren modellerde ise, ince işleme toleranslarında diğer yöntemlere göre ortalama bir sonuç alınmış, kaba toleranslara geçildiğinde ise diğer yöntemlerden daha başarılı sonuçlar alınmıştır.

Sonuç olarak bu çalışmayla geliştirilen yöntemin, güncel yöntemlerle kıyaslandığında, formlu ve sığ yüzeylerde başarılı sonuçlar vermiş olduğu ve özellikle bilgisayar destekli üretime yönelik uygulamalarda başarı ile kullanılabileceği görölmüştür. Yöntemin başarısı kaba işlemeye yönelik uygulamalarda artmaktadır. Ayrıca yeni bir yaklaşım olan XY'ye bağlı Z-map yönteminin, Z-map yöntemini iyileştirdiği ve modeli daha iyi tanımlayabildiği görölmüştür. XY'ye bağlı Z-map yönteminin düzensiz verilerden model kurabilmesi ile tersine mühendislik alanında da yöntem kullanılabilmektedir. Tersine mühendislikten gelen veriler üzerinde yapılan uygulamalarda, yöntemin hızlı ve başarılı bir şekilde veri azaltabildiği görölmüştür. Elde edilen sonuçlarının, poligonal modelden gelen veriler ile yapılan uygulama sonuçlarına tolerans ve nokta sayısı bakımından yakın olması, yöntemin tersine mühendislik alanında başarı ile kullanılabileceğini göstermektedir.

KAYNAKLAR

- Ballard, D.H., Brown, C.M., (1982), "Computer Vision", Prentice-Hall, ISBN 0-13-165316-4
- Choi, B.K., Jerard, R.B., (1998), "Sculptured Surface Machining", Kluwer Academic Publishers, ISBN 0-412-78020-8
- Ciampalini, A., Cignoni, P., Montani, C., Scopigno, R., (1997), "Multiresolution Decimation based on Global Error", *The Visual Computer*, 13(5): 228-246
- Cignoni, P., Montani, C., Scopigno, R., (1998a), "A Comparison of Mesh Simplification Algorithms", *Computers & Graphics*, Vol.22 Issue 1: 37-54
- Cignoni, P., Rocchini C., Scopigno, R., (1998b), "Metro: Measuring Error on Simplified Surfaces", *Computer Graphics Forum*, Vol.17 Issue 2: 167-174
- Cohen, J., Varshney, A., Manocha, D., Turk, G., Weber, H., Agarwal, P., Brooks, F., Wright, W., (1996), "Simplification Envelopes", *SIGGRAPH'96 Proc.*:119-128
- DeHaemer, M.J., Zyda, M.J., (1991), "Simplification of Objects Rendered by Polygonal Approximations", *Computer and Graphics*, Vol. 15 No. 2: 175-184
- Douglas, D.H., Peucker, T.K., (1973), "Algorithms For The Reduction Of The Number Of Points Required To Represent A Digitized Line Or Its Caricature", *The Canadian Cartographer*, Vol 10 No 2: 112-122
- Eck, M., DeRose, T., Duchamp, T., Hoppe, H., Lounsbery, M., Stuetzle, W., (1995), "Multiresolution Analysis of Arbitrary Meshes", *SIGGRAPH'95 Proc.*: 173-182
- Erikson, C., (1996), "Polygonal Simplification: An Overview", UNC Chapel Hill Computer Science Technical Report
- Feng, H.Y, Teng, Z., (2005), "Iso-Planar Piecewise Linear NC Tool Path Generation from Discrete Measured Data Points", *Computer-Aided Design* 37: 55-64
- Garland, M., Heckbert, P.S., (1997a), "Surface Simplification Using Quadric Error Metrics", *SIGGRAPH'97 Proc.*
- Garland, M., Heckbert, P.S., (1997b), "Survey of Polygonal Surface Simplification Algorithms", *SIGGRAPH'97*
- Golub, G.H., Van Loan, C.F., (1996), "Matrix Computations", Johns Hopkins University Press, ISBN 0-8018-5414-8
- Gueziec, A., (1995), "Surface simplification with variable tolerance", *Second Annual Intl. Symp. on Medical Robotics and Computer Assisted Surgery (MRCAS '95)*, p132-139
- Hamann, B., (1994), "A Data Reduction Scheme for Triangulated Surfaces", *Computer-Aided Geometric Design*, 11:197-214
- Hershberger, J., Snoeyink, J., (1992), "Speeding Up the Douglas-Peucker Line-Simplification Algorithm", *Proc. 5th Intl. Symp. on Spatial Data Handling*
- Hinker, P., Hansen, C., (1993), "Geometric Optimization", *Proc. Visualization'93*: 189-195
- Hoppe, H., DeRose, T., Duchamp, T., Mc-Donald J., Stuetzle, W., (1993), "Mesh Optimization", *SIGGRAPH'93 Proc.*: 19-26

- Hoppe, H., (1996), "Progressive Meshes", SIGGRAPH'96 Proc.: 99–108
- Horn, R.A., Johnson, C.R, (1991), "Topics in Matrix Analysis", Cambridge University Press, ISBN 0-521-46713-6
- İnan, A., (2004), "Matlab ve Programlama"; Papatya Yayıncılık; ISBN 9756797479
- Jang, D., Kim, K., Jeong, J., (1999), "Adaptive Gregory Patch Approximation to Z-Map Data", Int. J. Adv. Manuf. Tech., Vol.15, p.210–216
- Kalvin, A.D., Russell, H.T., (1996), "Surfaces: Polygonal Mesh Simplification with Bounded Error", IEEE Computer Graphics and Appl., 16(3)
- Klema, V.C., Laub, A.J., (1980), "The Singular Value Decomposition: Its Computation and Some Applications", IEEE Transactions On Automatic Control, Vol.25, No.2, p164-176
- Lin, A.C., Liut, H.T., (1998), "Automatic Generation Of NC Cutter Path From Massive Data Points", Computer-Aided Design, Vol.30, No.1, pp.77-90
- Low, K.L., Tan, T.S., (1997), "Model simplification using vertex-clustering", In 1997 Symposium on Interactive 3D Graphics
- Olling, G., Choi, B.K., Jerard, R.B., (1998), "Machining Impossible Shapes", Kluwer Academic Publishers, ISBN 0412846802
- Park, S.C., (2004), "Sculptured Surface Machining Using Triangular Mesh Slicing", Computer-Aided Design, 36: 279–288
- Park, S.C., (2003), "Tool-path Generation for Z-Constant Contour Machining", Computer-Aided Design 35 27-36
- Park, J.W., Chung Y.C., Choi B.K., (2002), "Precision Shape Modeling By Z-Map Model", International Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 3 No. 1
- Park, S.C., Chung Y.C., (2003), "Tool-path Generation from Measured Data", Computer-Aided Design 35, p467-475
- Rossignac, J., Borrel, P., (1993), "Multi-resolution 3D approximations for rendering complex scenes", Modeling in Computer Graphics: Methods and Applications, p455–465
- Saito, T., Takahashi, T., (1991), "NC Machining with G-buffer Method", Computer Graphics, Vol. 25 No. 4
- Schmitt, F.J.M., Barsky, B.A., Du, W.H., (1986), "An adaptive subdivision method for surface-fitting from sampled data", Computer Graphics, SIGGRAPH 86 Proc., 20(4):179–188
- Schroeder, W.J., Zarge, J.A., Lorensen, W.E., (1992) "Decimation of Triangle Meshes", Computer Graphics, 26(2): 65–70, SIGGRAPH'92 Proc.
- Soucy, M., Laurendeau, D., (1996), "Multiresolution surface modeling based on hierarchical triangulation", Computer Vision and Image Understanding, 63(1):1–14
- Stewart, G.W., (1998), "Matrix Algorithms: Basic Decompositions", SIAM, ISBN 0898714141
- Strang, G., (1998), "Introduction to Linear Algebra", Wellesley-Cambridge Pres, ISBN 0-9614088-5-5

Turk, G., (1992), "Re-tiling Polygonal Surfaces", Computer Graphics, Vol. 26 No. 2: 55–64, SIGGRAPH'92 Proc.

Varshney, A., (1994), "Hierarchical Geometric Approximations", PhD thesis, Dept. of CS, U. of North Carolina

Wu, P., Suzuki, H., Kase, K., (2005), "Three-Axis NC Cutter Path Generation for Subdivision Surface with Z-Map", JSME International Journal, Vol.48, No.4, p.757-762

Wu, S.T., Marquez, M.R.G., (2003), "A non-self-intersection Douglas-Peucker Algorithm", Computer Graphics and Image Processing, SIBGRAPI, XVI. Brazilian Symposium on Computer Graphics and Image Processing

Zeid I., (1991), "Cad/Cam Theory and Practice", McGraw-Hill, ISBN 0071129014

Zeid I., (2005), "Mastering CAD/CAM", McGraw-Hill, ISBN 0072868457

INTERNET KAYNAKLARI

[1] http://en.wikipedia.org/wiki/Polygon_mesh

[2] <http://vcg.isti.cnr.it/activities/surfacegrevis/simplification/metro.html>

[3] <http://www.graphics.stanford.edu/data/>

[4] <http://research.microsoft.com/en-us/um/people/hoppe/>

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi 01.11.1977

Doğum yeri Ankara

Lise 1987-1994 Terakki Vakfı Özel Şisli Terakki Lisesi

Lisans 1994-1998 İstanbul Üniversitesi Mühendislik Fakültesi
Makine Mühendisliği Bölümü

Yüksek Lisans 1998-2002 İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Müh. Anabilim Dalı,
Makine Müh. Programı

Doktora 2003- Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Müh. Anabilim Dalı, İmal Usulleri Programı

Çalıştığı kurumlar

2000-2002 3D CAD/CAM Technology Ltd.
2002- Nümerik Kontrol Grup Ltd. Şti.