

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YERSEL LAZER TARAYICILAR VE
KONUM DOĞRULUKLARININ ARAŞTIRILMASI**

Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisi Kutalmış GÜMÜŞ

**FBE Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği Anabilim Dalı Geomatik Programında
Hazırlanan**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Halil ERKAYA

İSTANBUL, 2008

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	v
KISALTMA LİSTESİ.....	vii
ŞEKİL LİSTESİ.....	viii
ÇİZELGE LİSTESİ	xii
ÖNSÖZ	xiii
ÖZET	xiv
ABSTRACT	xv
1. GİRİŞ	1
2. YERSEL LASER TARAMA TEKNOLOJİSİ	3
2.1 Yersel Lazer Taramanın Terminolojisi.....	4
2.2 Yersel Lazer Tarayıcıların Tarihi Gelişimi	6
3. YERSEL LASER TARAYICILAR	9
3.1 Yersel Lazer Tarayıcıların Çalışma İlkesi	9
3.1.1 Bir Lazer Işının Gidiş Geliş Zamanıyla İşlem Yapanlar(Uçuş Zamanlı)	9
3.1.2 Faz Karşılaştırma Metoduyla İşlem Yapanlar.....	10
3.1.3 Triangulasyon Metoduyla İşlem Yapanlar.....	10
3.1.3.1 Tek Kamera Çözümü	10
3.1.3.2 İki Kamera Çözümü.....	11
3.2 Tarayıcıların Genel Özellikleri:.....	11
3.3 Yersel Lazer Tarayıcıların Sınıflandırılması.....	14
3.4 Yersel Lazer Tarayıcı Bileşenleri	15
3.4.1 Lazer Telemetre.....	16
3.4.2 Lazer Işını Saptırma Ünitesi.....	19
3.4.2.1 Dönen Çokgen Aynalar.....	19
3.4.2.2 Dalgalı (Galvanometrik) Aynalar.....	20
3.4.2.3 Tarama Konfigürasyonları ve Lazer Işınının Yönlendirilmesi	20
4. YERSEL LASER TARAMADA ÖLÇME PROSEDÜRLERİ	23
4.1 Ölçme Planlaması	23
4.2 Tarama	23
4.3 Çoklu Taramaların Birleştirilmesi ve Konumlandırma (Jeoreferanslandırma).....	24
4.3.1 Doğrudan Konumlandırma.....	25
4.3.2 Dolaylı Konumlandırma	26
4.3.3 Hedefler.....	27
4.3.3.1 Düz Geri Yansıtıcı Hedefler.....	27

4.3.3.2	3 Boyutlu (3B) Biçimi Olan Küre Gibi vb. Hedefler	28
4.3.3.3	Diğer Hedefler.....	28
5.	3B VERİLERİN DEĞERLENDİRİLMESİ İÇİN KULLANILAN YAZILIMLAR	
		29
5.1	Tarama Kontrolü İçin Yazılım	29
5.2	Nokta Bulutunun Düzenlenmesi İçin Yazılım	30
5.3	Basit Geometrik Şekilleri Nokta Bulutuna Sabitlemek İçin Yazılım.....	31
5.4	Karmaşık Yüzey Modellerinin Yaratılması için Yazılım	31
5.5	Doku ve Görüntü Ekleme için Yazılım	32
5.6	Veri ve Proje Yönetimi için Yazılım	33
5.7	Yazılım Ürünleri.....	33
6.	YERSEL LAZER TEKNOLOJİSİNDE HATA KAYNAKLARI.....	34
6.1	Aletsel Hatalar	34
6.1.1	Lazer Telemetresindeki Hatalar	35
6.1.1.1	Düzensiz Hatalar.....	35
6.1.1.2	Düzenli Hatalar.....	37
6.1.2	Işın Saptırma Ünitesindeki Hatalar.....	40
6.1.2.1	Her Tip Işın Saptırma Ünitesindeki Genel Hatalar	40
6.1.3	Yersel Lazer Tarayıcılardaki Eksen Hataları	42
6.2	Çevresel Hatalar	45
6.2.1	Lazer Işınlığının Atmosferde Yayılımı.....	45
6.2.2	Atmosferik Şartlar Nedeniyle Oluşan Hatalar	46
6.2.3	Kötü Hava Koşullarının TLS Ölçümlerine Etkisi	48
6.3	Objeye İlgili Hatalar	49
6.4	Metodolojik Hatalar	51
6.4.1	Dolaylı Konumlandırma (Jeoreferanslandırma) İçin Metodolojik Hatalar	51
6.4.2	Doğrudan Jeoreferanslamada Metotsal Hatalar	55
7.	YERSEL LAZER TARAYICILARIN KULLANIM ALANLARI.....	58
7.1	Ulaşım ve Altyapı Uygulamaları.....	58
7.2	Mimari ve Bina Ölçme Uygulamaları	58
7.3	Kıyı Uygulamaları	59
7.4	Afet İzleme Uygulamaları.....	60
7.5	Kültürel Mirasın Korunması ve Arkeolojik Uygulamaları	61
7.6	Endüstriyel Uygulamalar	62
7.7	Madencilik, Taşocağı ve Kazı Uygulamaları.....	63
7.8	Deformasyon Ölçmeleri Uygulamaları.....	64
8.	UYGULAMALAR.....	65
8.1	Yersel Lazer Tarama Örnekleri.....	65
8.1.1	Optech ILRIS-3D İle Yapılan Uyguma Örneği	66
8.1.2	Trimble MENSİ GS 100 İle Yapılan Uygulama Örneği	69
8.1.2.1	Ölçme Planlanması ve Tarama İşlem Adımları.....	69
8.1.2.2	Otomatik Birleştirme (Registration).....	73
8.1.2.3	Manuel Birleştirme	76
8.1.2.4	Konumlandırma (Jeoreferans).....	77
8.1.2.5	Otomatik ve Manuel (Elle) Birleştirmenin Karşılaştırılması	81

8.2	Yersel Lazer Tarayıcı Verilerinin Değerlendirilmesi ve 3B Modelleme Örneği..	92
8.3	Nokta Bulutu İle Elde Edilen Basit Geometrik Şekilli 3B Modellerin Doğruluklarının İncelenmesi.....	104
8.3.1	Basit Geometrik Şekilli Objelerin Modellenmesi	104
8.3.2	Oluşturulan 3B Modellerden Kesit çıkarma	114
8.3.3	Oluşturulan 3B Modellerin Doğrulukları Üzerine Bir İnceleme.....	120
SONUÇLAR.....		124
KAYNAKLAR.....		127
ÖZGEÇMİŞ.....		134

SİMGE LİSTESİ

P_T	Gönderilen lazer gücü
P_R	Alınan lazer gücü
ρ	Obje yüzeyinin dağılmış yansıtma katsayısı
D	Alıcı lensin çapı
R	Objenin uzaklığı
η_{atm}	Atmosferde yayılan ışın kaybının sebebini gösteren atmosferik verici faktörleri
η_{sys}	Optiklerde yayılan ışın kaybının sebebini gösteren optiklerde verici faktörleri
ΔR	Atımlı lazerlerdeki uzunluk çözünürlüğü
Δt	Zaman ölçümünün çözünürlüğü
Θ	Maksimum tarama açısı
$\eta_{yön}$	Çokgendeki yönlerin sayısı
C	Aktif tarama süresinin toplam süreye oranı
θ_{max}	Maksimum tarama açısı
ω	Aynanın dalgalanma sıklığı
σ_t	Eşit olan zamanlama dakikasının standart sapması
σ_n	Zaman ayırıcının girişindeki gürültü fazlalığının karesel ortalama hatası
U_s	Sinyalinin zayıf değerinin oranı
B	Bant genişliği
I_{SIG}^2	Alınan lazer gücüne orantılı olan sinyal akımının karesel ortalaması
γ	Işın sapması
Δr_{walk}	Zaman hareketi yüzünden oluşan uzunluk hatası
$t_{yükseleş}$	Atım artış süresi
t	Sıcaklık
θ_{tarama}	Tarayıcı tarafından ölçülen düşey açı
$\theta_{düzeltmiş}$	Düzeltilen düşey açı
θ_0	Sıfır (düşey indisi) hatası
$\delta\theta$	Ölçek hatası
n_{prop}	Özel durumlar için kırılma indisi grubu
n_{stand}	Standart şartlar için kırılma indisi grubu

γ	Zayıflatma katsayısı
X_i	Nokta bulutu içindeki nokta koordinatlarının vektörü
X_g	Global sistem içerisindeki, nokta koordinatlarının vektörü
X_e	Dış koordinat sistemi içerisindeki, nokta koordinatlarının vektörü
R_{ig}	Global ve tarayıcı sistem arasındaki dönme matrisleri
R_{ge}	Global ve dış sistem arasındaki dönme matrisleri
R_{ie}	Tarayıcı ve dış sistem arasındaki dönme matrisleri
ΔX_{ig}	Tarayıcı ve global arasındaki öteleme parametrelerinin vektörü
ΔX_{ge}	Global ve dış sistem arasındaki öteleme parametrelerinin vektörü
ΔX_{ie}	Tarayıcı ve dış sistem arasındaki öteleme parametrelerinin vektörü
r_j	Nokta bulutu içerisindeki j. noktanın ölçülen uzunluğu
φ_j	Nokta bulutu içerisindeki j. noktanın ölçülen yatay doğrultusu
θ_j	Nokta bulutu içerisindeki j. noktanın ölçülen düşey açısı
σ_c	Nokta bulutundan çıkarılan hedef merkezinin açısal konum duyarlılığı
Δ	Yatay ve düşey yönler eşit sayılan, tarayıcının açısal örnekleme mesafesi
$X_{tarayıcı}$	Dış sistemindeki tarayıcı koordinat sisteminin merkezinin koordinatları
μ	Ölçek faktörü
$R_{ie}(\alpha_3)$	İki sistemin arasındaki yön matrisi
σ_{hor}	Tarayıcı istasyonu ve hedef istasyonu koordinatlarının duyarlılığı
d_{0-Bs}	Hedef ve tarayıcı arasındaki mesafe
V	Tarayıcı düzey kabarcığının veya ikili-eksen denkleştiricisinin hassaslığı
θ	Ölçülen düşey açı
σ_{oc}	Optik ağırlığının merkezleme duyarlılığı
M	Kamera büyültme gücü

KISALTMA LİSTESİ

TLS	Terrestrial Laser Scannig
ALS	Airbone Laser Scanning
DTM	Dijital Terrain Model
EDM	Electronic distance measurements
3B	3 Boyutlu
TOF	Time Of Flight
FOV	Field Of View
LIDAR	Light Detection and Ranging
LADAR	Laser Detection and Ranging
DDSM	Yoğun Dijital Yüzey Modeli
PRF	Pulse Repetition Frequencies
SNR	Signal Noise Ratio
AGC	Automatic Gain Control

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 3.1 MENSİ GS 100 yersel lazer tarama sistemi (Kertsen, 2004).	9
Şekil 3.2 Uçuş zamanı prensibi.	10
Şekil 3.3 Triangulasyon Prensibi: Tek Kamera Çözümü.....	11
Şekil 3.4 Triangulasyon Prensibi: İki Kamera Çözümü.	11
Şekil.3.5 Çeşitli üretici firmalara ait yersel lazer tarayıcılar.....	15
Şekil 3.5 Bir lazer telemetresinin blok düzeneği (Kostamovaara, 1991; Aman, 2001).....	16
Şekil 4.1 Yersel lazer tarayıcının koordinat sistemi (Reshetyuk, 2006).....	24
Şekil 4.2 Işık dalgası etkisi (Çoklu Dönüşler) (Lichti, 2000).	28
Şekil 6.1 Zaman Hareketi (Amann, 2001)	38
Şekil 6.2 Karışık pikseller problemi ve obje kenarına düşen lazer spotunun etkisi	40
Şekil 6.2 Düşey tarama açısındaki hatalar	41
Şekil 6.3 Mekanik Eksenler ve Lazer Tarayıcısındaki Eksen Hataları.....	43
Şekil 6.4 Çokgen tarayıcıların hataları.....	44
Şekil 6.5 Işın gezinmesi	47
Şekil 6.6 Gelen, kırılan ve yansıyan lazer ışının obje yüzeyindeki yansıması.....	51
Şekil 7.1 Ulaşım ve altyapı uygulama örnekleri.....	58
Şekil 7.2 Mimari ve bina ölçme uygulama örnekleri.....	59
Şekil 7.3 Kıyı uygulama örnekleri.....	60
Şekil 7.4 Afet izleme uygulama örnekleri.....	61
Şekil 7.5 Kültürel mirasın korunması ve arkeolojik uygulama örnekleri	62
Şekil 7.6 Endüstriyel uygulama örnekleri	62
Şekil 7.7 Madencilik, taşocağı ve kazı uygulama örnekleri.....	63
Şekil 7.8 Deformasyon ölçmeleri uygulama (Alba2006)	64
Şekil 8.1 KOSGEB Binasının Sol, Orta, Sağ taraftan görünüşü (Güvercinlik)	65
Şekil 8.2 Optech ILRIS-3D.....	66
Şekil 8.3 Sol taraftan elde edilen nokta bulutu kümesi.....	67
Şekil 8.4 Sağ taraftan elde edilen nokta bulutu kümesi	67
Şekil 8.5 Tarama alanındaki ortak (kesişen) yüzeyler	67
Şekil 8.6 Kesişen bölgedeki ortak noktaların seçimi	68
Şekil 8.7 Birleştirilmiş nokta bulutu kümesi	68
Şekil 8.8 Nokta bulutundan 3 boyutlu nokta detay çizimi	69
Şekil 8.9 Mensi GS 100 Yersel Lazer Tarayıcı.....	69
Şekil 8.10 Küre ve hedefler.....	71

Şekil 8.11 Küre ve hedeflerin bina yüzeyine yerleştirilmiş görünümü	71
Şekil 8.12 Tarama yazılımında açılan İstasyon dosyası	72
Şekil 8.13 Tarama yazılımında açılan KOSGEB dosyası.....	72
Şekil 8.14 Sol taraftan elde edilen nokta bulutu görünümü	72
Şekil 8.15 Sağ taraftan elde edilen nokta bulutu görünümü	73
Şekil 8.16 Aynı koordinat sisteminde nokta bulutlarının görünümü.....	73
Şekil 8.17 Nokta bulutu içerisindeki kürelerin görünümü	74
Şekil 8.18 Target-based registration modülü	74
Şekil 8.19 Otomatik birleştirmede küre eşleştirmesi	75
Şekil 8.20 Ortak bölgede yer alan kürelerin genel görünümü.....	75
Şekil 8.21 Birleştirme sonrası kürelerin nokta bulutu içerisindeki görünümü.....	75
Şekil 8.22 Cloud -based registration modülü	76
Şekil 8.23 Ortak noktaların seçimi	76
Şekil 8.24 Nokta bulutlarının birleştirilmiş görünümü	77
Şekil 8.25 Hedefin gerçek ve nokta bulutu içerisindeki görünümü.....	77
Şekil 8.28 Georeferencig Tool Modülü	79
Şekil 8.29 Hedeflerin genel sistemdeki koordinat girişleri	80
Şekil 8.30 KOSGEB binasının yüzeyinde alınan yerleri belirgin noktalar.....	82
Şekil 8.31 X yönündeki koordinat farkları.....	85
Şekil 8.32 Y yönündeki koordinat farkları.....	85
Şekil 8.33 Z yönündeki koordinat farkları	85
Şekil 8.33 Ağırlıklı 3B Konum doğrulukları(Her noktanın).....	90
Şekil 8.34 Pembe tarama noktalarından görünümü.....	92
Şekil 8.35 Mensi GS 100 Lazer Tarayıcısının Kurulumu.....	93
Şekil 8.36 Referans küre ve hedef noktalarının Pembe köşk üzerine yerleştirilmiş görüntüsü.....	93
Şekil 8.37 Point scape yazılımı.....	94
Şekil 8.38 Point Scape yazılımındaki iş penceresi	95
Şekil 8.39 Pembe köşkün 3 farklı noktadan yapılan nokta bulutu kümesi	95
Şekil 8.40 İstenilen renk tonu atanmış nokta bulutu kümeleri.	96
Şekil 8.41 Gereksiz ve düzensiz nokta bulut kümelerinin önden, soldan ve sağdan görünümü.....	96
Şekil 8.42 Tarama bölgesindeki gereksiz ve düzensiz nokta bulut kümelerinin seçimi.....	97
Şekil 8.43 Gereksiz ve düzensiz noktaları silinmiş nokta bulutu kümesi	97
Şekil 8.44 Tarama bölgelerinin arka ve ön plandaki nokta bulutlarından silinmiş halleri	98
Şekil 8.45 Gürültü giderme, filtreleme ve inceltme işlemi aşaması	99
Şekil 8.46 Düzenlenmiş nokta bulutu kümesi	99

Şekil 8.47 Üçgenlerden yararlanılarak oluşturulmuş yüzey ağı (üçgenler)	100
Şekil 8.48 Nokta ve yüzey ağının(üçgenlerin) birlikte görünümü	100
Şekil 8.49 Oluşturulan 3B Model (mesh)	100
Şekil 8.50 Her Bir Parçanın 3B Modeli	101
Şekil 8.51 Oluşan Boşlukların Doldurulması.....	101
Şekil 8.52 Belirgin noktalar kullanılarak birleştirme işlemi	102
Şekil 8.53 Üç farklı modelin birleştirilmesi	102
Şekil 8.54 Oluşan nokta bulutu görünümü.....	103
Şekil 8.55 Pembe köşk modelin çeşitli açılardan görünümü	103
Şekil 8.56 Oluşan 3B model.....	103
Şekil 8.57 Basit geometrik şekiller	104
Şekil 8.58 Küre ve objelerin görünümü	105
Şekil 8.59 Küre ve objelerin MENSİ GS 100 ile taranması.....	105
Şekil 8.60 Her İstasyon noktası için açılan tarama dosyaları.....	106
Şekil 8.61 Farklı noktalardan elde edilen nokta bulutları	106
Şekil 8.62 Kürelerin gerçek, nokta bulutu ve yazılım içerisindeki görünümleri.....	106
Şekil 8.63 REALWORKS yazılımındaki 2 farklı noktadan taranan nokta bulutlarının görünümü	107
Şekil 8.64 Küreler yardımıyla otomatik birleştirme	107
Şekil 8.65 Obje, arka ve ön plandaki gereksiz ve düzensiz nokta kümeleri	107
Şekil 8.66 Düzensiz noktaları silinen objelerin yandan ve yukarıdan görünümü	108
Şekil 8.67 Objeler yüzeyindeki kısmi yansımaların belirlenmesi	108
Şekil 8.68 Gürültüleri giderilmiş nokta bulutunun önceki ve sonraki görünümleri.....	109
Şekil 8.69 Düzenli ve gürültüsü giderilmiş obje yüzeyinin görünümü	109
Şekil 8.70 Sayısı azaltılmış nokta bulutu kümesi	110
Şekil 8.71 Objelerin yüzey ağı(üçgenler) oluşturulmuş görünümü.....	110
Şekil 8.72 Oluşturulmuş düzensiz 3B Model.....	111
Şekil 8.73 Küpün farklı açılardan görünümü	111
Şekil 8.74 Üçgen Boşluklarının doldurulması	112
Şekil 8.75 3B modelin yumuşatılması (smoth shading)	112
Şekil 8.76 Küpün açık yüzeyinin kapatılması için bir referans yüzeyinin belirlenmesi.....	112
Şekil 8.77 Küpün açık yüzeyinin kapanmış görünümü	113
Şekil 8.78 Küp poligon 3B modelin yumuşatılması	113
Şekil 8.79 Yapılan işlemler sonucu oluşan 3B modelin görünümü	113
Şekil 8.80 Silindirin 3 Boyutlu Modeli	114

Şekil 8.81Dikdörtgen prizmasının 3 Boyutlu Modeli.....	114
Şekil 8.82 Kullanılan iki farklı kumpas	115
Şekil 8.83 Gerçek silindir model için oluşturulan kesitler ve çap uzunluğunun ölçülmesi işlemi.....	115
Şekil 8.84 Silindirin 3B modeli	116
Şekil 8.85 Oluşturulan yatay referans yüzeyleri.....	116
Şekil 8.86 Oluşturulan düşey referans yüzeyleri.....	116
Şekil 8.87 Oluşturulan yatay ve düşey referans yüzeyleri	117
Şekil 8.88 1. Yatay kesitin çıkarılması	117
Şekil 8.89 1. Düşey kesitin çıkarılması.....	117
Şekil 8.90 Oluşturulan yatay ve düşey yöndeki kesitler	118
Şekil 8.91 Oluşturulan birleştirilmiş yatay ve düşey yöndeki kesitler	118
Şekil 8.92 Düşey kesit üzerindeki yatay kesitlerin görünümü	118
Şekil 8.93 Yatay ve düşey kesit arasındaki uzunlukların (çapın) ölçülmesi.....	119
Şekil 8.94 Küpde oluşturulan düşey ve yatay kesitler	119
Şekil 8.95 Dikdörtgen prizmada oluşturulan düşey ve yatay kesitler.....	120

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 3.1. MENSİ GS 100 Yersel lazer tarayıcısının genel özellikleri	13
Çizelge 3.2 Yersel tarama aletlerinin uzunluk ve doğruluk değerleri	15
Çizelge 6.1 Birkaç araştırma sonucu elde edilen lazer tarayıcılarda sıfır hatanın değerleri	39
Çizelge 6.2 Araştırmalar sonucu bulunan kolimasyon (c) ve yatay eksen hataları (i)	44
Çizelge 6.3 Farklı atmosferik türbülans için Cn'nin tipik değerleri	48
Çizelge 8.1 Mensi GS 100 yersel lazer tarayıcısının genel özellikleri	70
Çizelge 8.2 Referans alınan noktaların koordinatları(x, y,z)	78
Çizelge 8.3 Hedef noktalarının yerel sistemdeki koordinatları	78
Çizelge 8.4 Tarayıcı ve genel sistemdeki koordinatlar	81
Çizelge 8.5 Total station, Otomatik ve Manuel Birleştirmeden elde edilen koordinatlar	83
Çizelge 8.6 Her iki yöntemin, Total Stationdan elde edilen koordinatlara göre farkları	84
Çizelge 8.7 Düzeltme değerleri	86
Çizelge 8.8 Total stationdan noktalara olan uzaklıklar ve ağırlıklar	87
Çizelge 8.9 Ağırlıksız (eşit ağırlıklı) bulunan değerler (mm)	88
Çizelge 8.10 Ağırlıklı (farklı duyarlılık) bulunan değerler (mm)	88
Çizelge 8.11 Ağırlıklı olarak bulunan 3B konum doğrulukları (Her nokta için)	89
Çizelge 8.12 t- testi için karşılaştırma büyüklükleri	91
Çizelge 8.13 Tarama Parametreleri	94
Çizelge 8.14 Küp için ölçülen uzunluklar ve hesaplanan değerler (mm)	121
Çizelge 8.15 Küpün bir kenarı için hesaplanan t-testi sonuçları (mm)	121
Çizelge 8.16 Dikdörtgen Prizmanın bir kenarı için hesaplanan t-testi sonuçları (mm)	121
Çizelge 8.17 Dikdörtgen Prizma için hesaplan t-testi değerleri	122
Çizelge 8.18 Silindirin çapı için ölçülen uzunluklar ve hesaplanan değerler	122
Çizelge 8.19 Silindirin çapı için hesaplan t-testi değerleri	123

ÖNSÖZ

Geçmişten günümüze, sosyal yaşamın olduğu alanlarda birçok problemin çözümü ve gerçek bir dünya modelinin yaratılması için, çalışmalar yapılmaktadır. Bu modellerin analizi için doğru, duyarlı ve yeni bilgilerin elde edilmesi gerekmektedir. Bugün Lazer Tarama Sistemleri, bu uygulamalar için dünyada ön plana çıkmaya ve hızla gelişmeye başlamıştır. Bu lazer sistemlerinden elde edilen bilgiler gerçek ile uyumludur. 3 boyutlu geometrik ve görsel bilgiler, hızlı ve düşük maliyetle lazer tarama sistemleri ile elde edilmektedir.

Bu çalışmada, yeni bir ölçme tekniği olan Yersel Lazer Tarama Teknolojisi, ayrıntılı olarak ele alınmıştır. Bu teknolojinin tarihsel gelişiminden, yersel lazer tarayıcılar ve bileşenlerinden, tarama ölçme prosedürlerinden, verilerin değerlendirilmesi ve 3B modelleme işlemlerinden, hata kaynakları ve kullanım alanlarından bahsedilmiştir.

Çeşitli uygulama örnekleri yapılarak, bu teknoloji tanınmaya çalışılmıştır. Farklı noktalardan yapılan taramaların birleştirilmesinde kullanılan iki yöntemin karşılaştırılması, taramalar sonucu elde edilen verilerin değerlendirilmesi ile 3B Modeli oluşturulması ve model üzerinden yatay ve düşey yönde kesitler alınarak ölçülen uzunlukların, obje üzerinden kumpas ile ölçülen uzunluklarla karşılaştırılması şeklinde çalışmalar yapılmıştır.

Hazırladığım bu çalışmada bana her türlü yardım ve desteğini esirgemeyen danışmanım sayın Doç.Dr. Halil ERKAYA'a, çalışmalarına yardımlarından dolayı Yrd. Doç.Dr. Gürsel HOŞBAŞ'a, Yrd. Doç. Dr. Bülent BAYRAM'a, Arş. Gör. Melis UZAR'a, Paksoy Firmasından Erkal BAYGÜL'e; yaptığı bilimsel araştırmalarla bana çalışmamda ışık tutan Yuriy Reshetyuk'e ;

Ölçme Tekniği Anabilim dalında bulunan, hocalarıma dostlarıma;

Tez çalışmalarım boyunca, her zaman yanımda olan, manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen Yrd. Doç.Dr. Metin SOYCAN'a, Arş. Gör. Dr. Arzu SOYCAN'a, oda arkadaşlarım, dostlarım Arş. Gör. Taylan ÖCALAN'a ve Arş. Gör. Nursu TUNALIOĞLU'na teşekkür ederim.

Her türlü koşulda yanımda olan, maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen, babam Orhan GÜMÜŞ'e, annem Gülümser GÜMÜŞ'e ve kardeşim Erhan GÜMÜŞ'e teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Ocak 2008

Arş. Gör. Kutalmış GÜMÜŞ

Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisi

ÖZET

Günümüz teknolojisi, lazer tarayıcıların gelişimi ve kullanım alanlarının zenginliği ile birçok farklı uygulama alanı açısından, teknolojiye yeni bir boyut getirdi. Her geçen gün farklı araştırmalar için yeni umutlar vaat eden bu teknoloji jeodezik uygulamalar ve özelinde mühendislik ölçme uygulamaları açısından da ilave bir teknik haline gelmiştir. 3 boyutlu yersel lazer tarama teknolojisi, taranmış bir obje veya alanın yüzeyinden elde edilen nokta kümeleri yardımıyla, taranmış nesnelerin birebir gerçeğe yakın görüntülerinin oluşturulduğu, modellerinin elde edildiği bir tür kopyalama teknolojisi olarak adlandırılmaktadır. Bu teknoloji ile herhangi bir alanda, büyük ölçekte, karmaşık, düzensiz, standart veya standart olmayan nesnelerin 3B verileri doğrudan toplanabilmektedir.

Lazer teknolojisinde nesne, yansıma yoğunluğu verisi içeren 3 boyutlu nokta bulutu olarak elde edilmektedir. Elde edilen nokta bulutlarının düzenlenmesi, farklı noktalardan yapılan taramaların birleştirilmesi, kayıt, inceltme, nokta boşluklarının doldurulması, filtrelenmesi, yüzey triangulasyonu ve 3 boyutlu model oluşturma işlemleri yapılarak çizgi, yüzey, alan ve hacim gibi bilgiler elde edilmektedir.

Bu tezin genelinde, yersel lazer tarayıcılar üzerine yapılan araştırmalardan, yersel lazer tarama teknolojisinden, yersel lazer taramada ölçme prosedürlerinden, 3 boyutlu verilerin değerlendirilmesi için kullanılan yazılımlardan, yersel lazer teknolojisinde hata kaynaklarından ve yersel lazer tarayıcıların kullanım alanlarından bahsedilmiştir.

Bu çalışmada yapılan uygulamalardan birincisi, YTÜ’ deki KOSGEB Binasının iki noktadan bindirmeli olarak 3 cephesinin taranması işlemi, ayrı olarak Optech İLRİS 3D ve Mensi GS 100 yersel lazer tarayıcıları ile yapılmıştır. Farklı noktalardan yapılan taramaların birleştirilmesinde kullanılan iki yöntemin karşılaştırılması yapılmış ve nokta bulutu üzerinden detay çizimi gerçekleştirilmiştir. İkinci çalışmada, yine YTÜ’de bulunan Pempe Köşkün 3 cephesinin, taramalar sonucu elde edilen verilerin değerlendirilmesi ile 3B Modeli oluşturulmuştur. Üçüncü çalışmada ise, basit geometrik şekillere sahip objeler taranarak, bu objelerin 3B modeli oluşturularak, model üzerinden yatay ve düşey yönde kesitler alınarak ölçülen uzunlukların, obje üzerinden kumpas ile ölçülen uzunluklarla karşılaştırılması yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Lazer Tarama Teknolojisi, Lazer Tarayıcılar, 3B Modelleme, Hatalar, Kullanım Alanları

ABSTRACT

By the development of the laser technology and variety of the usage areas by the aspect of many different application areas, a new technological dimension is supplied. With each passing day, for different investigations, this hopeful technology is to become an additional technic for the geodetic applications especially engineering surveys. The 3D terrestrial laser scanner technology which is called as a type of copying technology is to create nearly one to one of the real object from the scanned one and to model it by the help of the point clouds obtained from the scanned object or any surface. This technology is a solution for 3D model generation, using directly data collected by laser scanner however scanned area or object could be complex, unsystematic, big scale or standard type.

In laser scanner technology, in the first stage of the process, the object is obtained by the 3 dimensional point cloud data which have density of reflection data in it. Secondly, this process have been completed by selecting point clouds and creating fitting patches of them, fill the blank of points, mesh generation registration, filtering, smoothing, surface triangulation surface wrapping, editing and visualization and digitization. All of 3D modeling process of the laser scanned object has been done by using different software. Finally from generated 3D model surface, area, volume, dimension of object's information has known.

Throughout of this thesis, firstly a literature review and technological aspects of the terrestrial laser scanner is investigated. Then, the surveying procedure of the terrestrial laser scanning, the procesing softwares of the 3 dimensional data, the error sources of this technology and finally the usage areas are cited. Detailed studies about this topics are given.

The first case study in this thesis is to apply the scanning procedure for the KOSGEB building in YTÜ, which is scanned 3 sides of the building from two points with colliding the sides. The application is made with the Optech ILRIS 3D and Mensi GS 100 laser scanners. For joining the scanning parts which is scanned in different located points, the automatic registration and manual registration methods are compared in this case study and the detail drawings are made out of point clouds. In the second case study, Pembe Köşk in YTU is scanned within 3 sides. Obtained data from scanning is processed and the 3 dimensional model is formed. In the third case study, the objects which have simple geometric shapes are scanned and 3 dimensional models are formed. The horizontal and vertical sections are taken out of the model. Measured lenghts out of the model are compared with the lenghts which is measured by the stick tool equipment.

Key words: The laser scanning technology, The Laser scanners, 3 dimensional modelling, Error sources, Usage areas

1. GİRİŞ

Lazer teknolojisi alanındaki araştırmalar 1960 yılından beri devam etmektedir. Bu araştırmalar sonucunda ortaya çıkan yersel lazer tarama (Terrestrial laser scanning - TLS) teknolojisinin bir ölçüm aracı olarak araştırma alanı haline gelmesi son 10 yılda olmuştur. Lazer ışını, yüksek genlikli, birbirine paralel, tek renkli, aynı faz ve frekansa sahip dalgalardan oluşmaktadır. Lazer ışınlarının frekansının hassas bir şekilde kontrolü, ışının yayılma düzeni veya ışınların olağanüstü yoğunluğu ve geniş bir uygulama alanına sahip olması büyük avantajlar sağlamaktadır. Lazer ışınının uzunluk ölçme ve görüntüleme özelliği sivil ve askeri alanlarda kullanılmaya başlanmıştır. Jeodezik çalışmalarda ve inşaat mühendisliği işlerinde lazer teknolojisi, üç farklı alanda kullanılmaktadır (Kennie ve Petrie, 1990; Reshutyek, 2006):

- Elektronik uzunluk ölçümleri
- Yapı alanlarında, tünellerde, maden ocaklarında, endüstriyel alanlarda dizi ve yöneltme ölçümleri
- Lazer Nivelmanı

Lazerlerin ışınlarının kullanıldığı ilk jeodezik aletlerin yapımına 1960'lerde başlanmıştır. 1990'lı yıllarda lazer teknolojisi total stationlarda da kullanılmıştır. İlk reflektörsüz total station, 1994'de Almanya'da Ruhr Üniversitesinde geliştirilmiştir. Reflektörsüz total stationlar, bir bakıma modern lazer tarayıcılarının öncüleri sayılmaktadır (Lingua ve Rinaudo, 2001). Bugün kullanılan total stationların birçoğu lazer tarayıcılar gibi tarama yapabilmektedirler. Lazerler askeri sektörde, gözetim, iz sürme, çevreyi tanıma ve hedeflerin doğru görüntülenmesinde alternatif mikro dalga radar sistemleri olarak kullanılmıştır (Hovanessian, 1988). Özel sektörde ise, görüntüleme ve kısa uzunluk ölçmelerinde kullanılmaktadır. Görüntüleme, iki karşılıklı ve düz açılı yönde lazer ışınlarını saptıran ayna içeren optik mekanik tarayıcı ile sağlanır. Bu aletlere görüntüleme lazer radarları denilmektedir (Şefhebert ve Krotkov 1992). Bu alandaki araştırmalar son 20 yılda çok yaygınlaşmıştır. Bilgisayar teknolojisinden yararlanılarak birçok uygulama alanlarında yersel lazer tarayıcılar kullanılmaktadır. Sivil sektördeki uygulamaların en güzel örneklerinden biri, aya lazerle mesafe ölçümüdür. Hava yollu lazer tarama teknolojisi (ALS-Airbone Laser Scanning) 1980'lerde geliştirilmiştir. ALS, sivil sektördeki yapılan uygulamalar arasında yerini almıştır. Örneğin, 1988'de Stuttgart Üniversitesi, Fotogrametri Enstitüsünde ALS Tekniği, sayısal arazi modeli (DTM-Dijital Terrain Model) ve yüzey modelleri

jenerasyonlarında uygulanmaya başlanmıştır. Bu alandaki araştırmaların günümüzde yoğun şekilde devam etmektedir.

Birçok uygulamada kullanılan lazer uzunluk ölçme teknolojisi ile sivil sektör, büyük bir deneyim kazanmıştır. Donanımların geliştirilmesiyle doğruluğu ve duyarlılığı, tarama hızını, maksimum mesafeyi ve ölçülebilen obje hacmini arttırmak mümkün olmuştur. Böylece mühendislik yapıları ve tarihi binalar gibi büyük objelerin ölçülmesi sağlanmaktadır. 3B (3 Boyutlu) veri işleme ve görselleştirmedeki gelişmeler, taramalar sonucu üretilen büyük miktarlardaki noktaları kullanılabilir hale getirmiştir. Uygulamada birçok alanda karşılaşılan problemleri çözmek ve bunların gerçek modellerini oluşturmak için, ölçümler yapmak ve bunları tamamlamak gerekir. Bu ölçümler sonucu elde edilen modelleri analiz ederek, ölçülen objeler hakkında yeni bilgilere ulaşmak mümkün olmaktadır. Modelleme sürecinde elde edilen tematik ve geometrik bilgiler, obje hakkında karar vermemizi sağlar. Bu bilginin gerçeği ile uyumlu olması büyük önem taşır (Reshetyuk, 2006).

Bugün minimum giderle hızlı ve eksiksiz 3B geometrik ve görsel bilgiye sahip olmak önemlidir. Günümüzde birçok mühendislik, mimari ve kültürel mirasın korunması projelerinde, bazı objelerin ve hatta tamamlanmış ortamların mevcut durumunu elde etmek için detaylı 3B bilgiye ihtiyaç vardır (Kern, 2001).

3B bilginin çeşitli amaçlarla kullanılması için, çok büyük miktarlarda verinin hızlı bir şekilde toplanması gerekir. Acilen bütün bir obje (3B model) hakkında bilgiye ulaşmaya çalışırken, geleneksel jeodezik ölçüm yöntemleri, örneğin total station veya gerçek zamanlı RTK GPS ölçümleri bu tür çalışmalar için çok uygun değildir. Bu yöntemlerle tek tek noktalar ölçülebilir. Modern reflektörsüz total stationlar, ölçme işini hızlandırır ve yüzeyleri otomatik olarak ölçebilen tarama seçenekleri sağlar. Ancak yersel lazer sistemleri kadar verimli değildir. Eğer ölçmeler için ayrılan süre kısaysa, jeodezik yöntemle ölçme işlemi oldukça uzun sürebilir. Dijital fotogrametri yöntemleri, bazı eksiklikleri olmasına karşın özellikle kültürel miras kaydında ve mimari ölçümlerde daha etkilidir. Fotogrametrik modelin analiz edilmesinden önce, resim işleme ve yöneltme işlemlerinin yapılması gereklidir. Yani elde edilen veriden yararlı bilgi alma yolu yine uzun sürmektedir. Elverişsiz ortamlar (yetersiz aydınlatma, toz vs.) için bu yöntem uygun değildir. Bu nedenle, obje geometrisinin yüksek doğrulukla 3B ölçümüne doğrudan izin veren başka bir tekniğin kullanılmasına ihtiyaç duyulmaktadır (Reshetyuk, 2006).

2. YERSEL LASER TARAMA TEKNOLOJİSİ

Yersel lazer tarama tekniği ile hava lazer tarama tekniklerinde aynı ölçme prensipleri kullanılmaktadır. Yersel lazer tarayıcı ile taranacak yüzey üzerindeki bir nokta arasındaki uzunluk, lazer sinyalinin yüzeye gönderilmesi ve yüzeyden geri dönen lazer sinyalinin tespiti arasında geçen zamanın yüksek doğrulukla belirlenmesiyle hesaplanır. Obje, optik-mekanik tarayıcılar ile ölçme uzunluğuna bağlı olarak, yatay ve düşey yönlendirmelerle taratılır.

Tarama işlemi sonucunda elde edilen, objenin milyonlarca noktadan oluşan detaylı 3B görüntüsünün çıkarılmasını sağlayan, yoğun lazer sinyallerinin oluşturduğu nokta kümelerine nokta bulutu denir. Her nokta için, tarayıcıya bağlı koordinat sisteminde 3B koordinatları ve çok sayıda yansıtılmış lazer sinyali kayıt edilir. Bu şekilde, taraması yapılan obje yüzeyinin durumu yoğunluk verisi ile tanımlanmaktadır. 50 metrede 1,4 – 15 mm tek nokta doğruluğuyla yüzlerce metre uzaklıktaki objeye, ölçüm yapabilen birçok lazer tarayıcı mevcuttur (Ingensand, 2006). Sabit veya hareketli bir platformdan taramayı gerçekleştirmek mümkündür. 3 boyutlu modeli elde edilmeye çalışılan objelerin geniş ve karışık şekilli olmalarından dolayı, tek seferde tarama yapılarak obje geometrisi elde edilememektedir. Bu yüzden, farklı konumlardan taramalar yapılır. Objenin tamamlanmış gösterimini sağlamak için, bu taramalar birleştirilir ve jeodezik koordinat sistemine dönüştürülür. İkinci olarak TLS verisinin, diğer mekânsal veriyle (örneğin GPS ölçümleri) entegrasyonu çok önemlidir. Birçok CAD yazılım paketi, bu amaçlar için kullanılmaktadır (Reshetyuk, 2006).

Yersel lazer tarayıcıların en önemli avantajı, 3 boyutlu obje geometrisini, doğrudan, hızlı ve detaylı yakalama özelliğidir. Diğer avantajları ise (Reshetyuk, 2006):

- Maliyet açısından giderlerdeki önemli azalma
- Çok daha hızlı proje tamamlama
- Geleneksel tekniklerin başarısız olduğu çok karışık, ulaşılamaz, tehlikeli obje ve alanlarda ölçüm yapabilme
- Tarama işlemlerinin çevre aydınlatmasından bağımsız olması (gece tarama yapabilme özelliği)
- Taramada eksiksizlik ve kapsamlılık (tüm detayları tek seferde elde edebilme)
- Çok amaçlı veri kullanımı

Genellikle TLS kullanımı, bir projenin iş akışını ve kalitesini etkiler. Yersel lazer tarayıcılar gerçeğe yakın model elde etmek, taramalar sonucu karşılaşılan hataları en aza indirmek, ölçme doğruluğu ve duyarlılığını artırmak, veri kalitesini geliştirmek için, bazı ölçme teknikleriyle birlikte çalışabilir. Buna en güzel örneklerden biri, lazer tarayıcılarla dijital fotoğraf makinelerinin entegrasyonudur. Elde edilen yüksek çözünürlüklü görüntü, objenin 3B sunumunda foto gerçekçiliği üretmek için, nokta bulutundan üretilmiş detaylı 3B geometrik modelle eşlenmektedir.

TLS'nin ticari olarak piyasaya ilk çıkışından itibaren geçen zaman içerisinde farklı alanlardaki kullanımı gözle görülür şekilde artmıştır. TLS ölçüm sonuçları, birçok aktiviteye referans olarak yüksek duyarlılıklı işlerde kullanılmaktadır. Her ölçüm tekniği gibi lazer taramanın sonuçları, farklı nedenler yüzünden hata verebilmektedir. Bu hata kaynaklarının belirlenebilmesi veri kalitesini korumak için gereklidir. Yersel lazer taramalar sonucu elde edilen veri kalitesini etkileyen birçok faktör vardır. TLS'nin yeni bir teknik olmasından dolayı tüm bu faktörler bugüne kadar yeterli derecede incelenmemiştir (Baltsavias, 1999 b; Cheok, 2005; Reshetyuk, 2006).

2.1 Yersel Lazer Taramanın Terminolojisi

Yersel Lazer Taramada kullanılan her teknik terim için, farklı kelimeler kullanılmaktadır. TLS için yaygın bir terminoloji henüz oluşmamıştır. Bu konunun önemi, Cheok (2003 ve 2005) tarafından vurgulanmış ve bu doğrultuda bazı çalışmalar yapılmaktadır. İngiltere'de kültürel mirasların korunmasından ve yönetiminden sorumlu bir kurum tarafından, TLS'de karşılaşılan temel terimler sözlüğü derlenmiştir (Mills ve Barber, 2003). Lazer telemetresi ve tarama teknolojisiyle ilgili önerilen terimler listesi, Cheok'da (2005) verilmiştir. TLS için temel prensip, lazer uzunluk ölçümü veya dolaylı uzunluk belirleme yöntemi bugün, iki kısaltma yapılarak kullanılmaktadır (WEHR ve VLOHR, 1999; Cheok, 2005; Reshetyuk, 2006) :

- LIDAR (Işık denetimi ve ölçümü) – Özellikle hava yollu lazer taramasında (ALS-Airbone Laser Scanning) kullanılmaktadır.
- LADAR (Lazer denetimi ve ölçümü) –Kullanılan lazer ışığı belirtilmektedir. Bu terimle anlatılan tarayıcı, üç mekânsal ölçüm sağlar (uzunluk, iki açı ve lazer ışığının yoğunluğu).

Bir ölçüm tekniği olarak TLS'nin tanımı Mills ve Barber (2003) tarafından verilmiştir. Yersel lazer tarama, sistematik bir yapıda çok kısa sürede bir objenin yüzeyini otomatik olarak veren bölgenin 3B koordinatlarını ölçmek için yer bazlı lazer tarayıcıların kullanımınıdır.

Yersel lazer tarama teknolojisi ile yapılmış yayınlarda, tarayıcıyı ve teknolojiyi tanımlayan farklı terimlerle karşılaşmaktadır. Aşağıdaki listenin dışında da kullanılan terimler vardır (Reshetyuk, 2006):

- Yersel lazer tarayıcısı
- Yersel 3B lazer tarayıcısı
- Lazer tarayıcısı
- Yakın menzilli lazer tarayıcısı
- Yer bazlı lazer tarayıcısı
- 3B tarayıcı
- 3B lazer tarayıcı
- LIDAR tarayıcı
- Takometrik lazer tarayıcı

Şu anda en fazla kullanılan terim Yersel Lazer Tarama / Tarayıcısıdır (TLS). Sadece yer bazlı tarama aletleri düşünüldüğü zaman, bazen kısaca lazer tarama / tarayıcı da denilmektedir.

Tarama süresince yüksek yoğunluklu noktalar kümesi genellikle nokta bulutu olarak toplanmaktadır ve nokta bulutu aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır. Nokta bulutu, bir obje veya konumun gerçeğe uygun görüntüsünü yansıtan, mekânsal dağılımdaki genel referans sistemi içerisindeki XYZ koordinatlarının toplamıdır. Bu ayrıca yoğunluk veya RGB (kırmızı, yeşil, mavi) değeri gibi eklenmiş bilgiler içerir. Bir nokta bulutu iki çeşit bilgi içerir (Mettenleiter, 2000) :

- Metrik - Objeye geometrisini açıklar ve ortamdaki objeler arasındaki mekânsal ilişkileri gösterir.
- Görsel veya tematik - Her nokta için uzunluk verisinin güvenilirliğini hesaplamak ve obje yüzeyinin niteliklerini açıklamak için kullanılabilir (Mota 2002).

1999'lı yıllarda bazı araştırmacılar, range image terimi ile hava lazer tarama uygulamaları (ALS) terminolojisinden kaynaklanarak DTM (Digital Arazi Modeli) veya DDSM (Yoğun Dijital Yüzey Modeli) terimlerini, nokta bulutu terimi yerine kullanmışlardır. Günümüzde ise, obje veya nesnelerin detaylı dijital 3B modeli oluşturmalarından dolayı, nokta bulutu terimi kullanılmaktadır (Lingua ve Rinaudo, 2001).

2.2 Yersel Lazer Tarayıcıların Tarihi Gelişimi

2000 yılından sonra jeodezide geniş bir alanda kullanılmaya başlayan bu teknoloji, jeodezik anlamda makul temellere dayandırılabilir. Lazer tarayıcı dizaynında ve veri işlemindeki çok önemli uzmanlaşmalar ve gelişmeler son zamanlarda olmuştur. 2000 yılından önceki lazer uzunluk görüntüleme aletleriyle ilgili çok ilginç araştırmalar vardır. Elde edilen sonuçlar modern lazer tarayıcılarının performansının kavranması açısından önemlidir.

Yeni bir ölçme tekniği olan yersel lazer tarayıcı sistemlerle ilgili gelişmeleri ve kalibrasyonlarına yönelik çalışmaları, 2000 yılından önce ve 2000 yılından sonra yapılan araştırmalar diye iki kısımda inceleyebiliriz (Reshutyek,2006):

a) 2000 Yılından Önce Lazer Tarayıcılarla Yapılan Araştırmalar

Lazer uzunluk ölçme teknolojisinin teorik temelleri, Ready (1978), Hovanessia (1988), Jelalian (1992) ve Marshall'ın (1985) tarafından açıklanmıştır. Uçuş zamanını (TOF-Time Of Flight) içeren, lazer uzunluk ölçme teknikleri üzerine çok iyi ve kapsamlı bir inceleme Bosch ve Lescure'de (1995) verilmiştir.

Son 20 yılda lazerle uzunluk ölçümünde ve tarama teknolojisinde dikkate değer başarılar elde edilmiş ve çeşitli tarayıcılar geliştirilmiştir. Doğal olarak yersel tarayıcılardaki en önemli konu, yüksek doğruluğun elde edilmesi ve bunun için birçok testlerin yapılmasıdır. Dikkate değer bir çalışma da Amerika'daki Carnegie Mellon Üniversitesi Robotics Enstitüsünde yapılmıştır. Lazer tarayıcılar üzerine araştırmalar 1990'lı yılların başlarında başlamıştır (Krotkov, 1990). Kweon(1991), Hebert ve Krotkov (1992) tarayıcıların doğruluk araştırmalarını yapmışlar ve bunlardan bazılarının kalibrasyon sonuçlarını rapor etmişlerdir.

Bu tarayıcılar, bugün kullanılmakta olan tarayıcılarla kıyaslandığı zaman, performans ve dizaynlarına göre (düşük doğruluk ve çözünürlük, kısıtlı görüş alanı) oldukça basitlerdir. Geçmişte ve günümüzde kullanılan lazer tarayıcıların, işletim prensibi ve dizaynı benzer olduğundan dolayı bu araştırmaların sonuçları, şimdiki araştırmalar için oldukça önemlidir. Lazer tarayıcı aletlerinin doğruluğunu etkileyen faktörler hakkındaki bir araştırma Hancock (1999) tarafından yapılmıştır. Lazer tarama doğruluğu üzerine bazı araştırmalar, Portekiz'deki Lizbon şehrinde bulunan Systems ve Robotics Enstitüsü, Mobile Robotics Laboratuvar'ında da yürütülmüştür. Lazer uzunluk ölçme ve tarama teknolojisi, endüstriyel uygulamalarda kullanılmış ve hata kaynakları, Finlandiya'daki Oulu Üniversitesin'deki Elektrik Mühendisliği Departmanı ile Teknik Araştırma Merkezinde araştırılmıştır (Koskinen, 1991; Kostamovaara, 1991; Matta, 1993) .

Wehr ve Lohr (1999) ve Baltsavias (1999), lazer tarama teknolojisi, ALS'deki temel hata kaynakları ve genel prensipleri üzerine kapsamlı bir araştırma yapmışlardır. Temel prensiplerin ALS ve TLS'de aynı olmasından dolayı bu yayınlar çok iyi referans materyalleridir. Yersel lazer tarayıcıların ortaya çıkışı ve tasarımı, başta elektrik mühendisliği alanı ve bilgisayar teknolojisi sektöründe çalışan farklı disiplinlerdeki uzman kişiler ile jeodezi ve fotogrametri mühendislerinin ortak çalışması ile olmuştur.

b) 2000 Yılından Sonra Lazer Tarayıcılarla Yapılan Araştırmalar

Jeodezik ölçüm tekniği olarak, TLS üzerine kapsamlı araştırmalar, 2000 yılından sonra başlamış ve son yedi yılda, TLS alanında ciddi gelişmeler görülmüştür. Birçok ölçme çalışmalarında yersel tarayıcıların kullanılması ve bir sektör haline gelmesi, lazer tarayıcıların önemini vurgulamaktadır. En başından beri doğruluk araştırması konuları ve lazer tarayıcıların kalibrasyonu, ciddi bir şekilde dikkat çekmektedir. Bu araştırmalarda kullanılan yaklaşımlar genellikle şunlardır (Reshetyuk, 2006):

- 1) Koordinat doğruluk duyarlılığının araştırılması ve TLS'nin kalibrasyonu, düz veya küresel kontrol hedeflerinin kullanıldığı referans alanları (2B ve 3B) ile belirlenmektedir. Hedef merkezlerinin dış sistemdeki koordinatları, bir total station kullanılarak belirlenebilir. Bu şekilde, TLS'nin duyarlılığı hakkında karar verilir. Hedefler, bir veya birçok düzenden taranır ve koordinatları dış sisteme dönüştürülür. Dönüştürülmüş ve bilinen koordinatlar arasındaki farklar, tarayıcı duyarlılığı hakkında karar vermek için analiz edilir.
- 2) Tarayıcı uzunluk ölçme duyarlılığı ve doğruluğu, uzunluk işlemleri üzerinden, EDM kalibrasyonuna dayanarak test edilir.
- 3) Tarayıcı performansı ve değişik objelerin boyut ve şekilleri, boyutları yüksek duyarlılıkla belirlenen referans objeleri kullanılarak test edilir.

İlk doğruluk araştırmalarından bazıları Lichti (2000), Gordon (2000, 2001), Balzani (2001), Lichti (2002a,b) ve Tucker (2002)'de açıklanmıştır. Tarayıcı performanslarının karşılaştırıldığı Johansson (2002) tarafından yapılan çalışma ilklerden biridir. Kapsamlı kalibrasyon deneyleri, Uluslararası Standartlar ve Teknoloji Enstitüsü'nde (NIST) yapılmıştır. TLS için standartlaştırılmış performans değerlendirmesi ve prosedürlerinin gelişimi için yapılan önemli araştırmalar, Mainz Üniversitesi Uygulama Bilimleri, Mekânsal Bilgi ve Ölçüm Teknolojisi Enstitüsünde yapılmıştır. Farklı tarayıcıların karşılaştırılabilir doğruluk testleri için, birçok çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalarda uzunluk, açısal doğruluk, çözünürlük, kenar etkileri ve yüzey yansırılığının etkileri araştırılmıştır (Reshetyuk, 2006).

Birçok çalışma, TLS'deki hata yayılmasına yönelik olarak hazırlanmıştır. Keline (2005), TLS'nin hata stoğunun tarayıcıdaki rastgele ve sistematik hataları üzerine çalışmalar yapmıştır. Sistematik hatalar, total stationlardaki gibi aynı olduğu düşünülen alet eksenleri arasındaki hatalar ve dış merkezliktir. Callidus (Rickenbacher, 2003), Imager 5003 (Schulz ve Imgensand, 2004 a, b), MENSİ GS 100/GS 200 (Kertsen, 2004 ve 2005b), ve Riegl LMS 360 (Tauber, 2005) gibi bazı seçilmiş tarayıcıların alet hataları ve doğrulukları, detaylı olarak incelenmiştir. Eriksson (2004), bir total stationun kalibrasyon yöntemini MENSİ GS 100 tarayıcısına uyarlama olabilirliği üzerine çalışma yapmıştır. Bağımsız prosedürlere dayanarak yapılan tarayıcı kalibrasyonları, yukarıda bahsedilen bütün araştırmalara dayanarak düşünülmelidir (Lichti ve Franke, 2005).

Son zamanlarda fotogrametride iyi bilinen, kendi kendini kalibre etme yaklaşımı, lazer tarayıcılarda da kullanılarak birçok girişimci tarafından sistematik hatalar hesaplanmaya çalışılmıştır (Fraser, 1997). Amiri Parian ve Grune (2005) panoramik kameralar için genişletilen sensör modeliyle, Imager 5003 tarayıcısı için bir kalibrasyon modeli geliştirmiştir. Lichti ve Franke (2005), total station hata modeliyle, iQsun 880 tarayıcısının kendi kendini kalibre etme özelliğini uygulamışlar ve birçok ek alet hatasını deneysel olarak modellemişlerdir. Yazarlar, tarayıcı yapısından dolayı, birçok aletsel hatalardaki belirli geçici değişiklikleri de ortaya çıkarmışlardır.

TLS üzerine yapılan, birçok akademik ve bilimsel araştırma, yayın ve bu konu hakkında bilinen birçok kitap vardır. Hava lazer tarama sistemleri (ALS) içeren lazer tarama üzerine bilinen kitap, sadece Kapsar (2004)'ındır. Kitap, TLS ile ilişkili teorik konular hakkında çok kısa tanımlar vermektedir. Genellikle farklı tarama sistemleri ve uygulamalar üzerinde durmaktadır. Yeni bir ölçüm tekniği olarak TLS'nin kısaca genel açıklamasını veren, jeodezi ve fotogrametri alanında yayınlanmış bazı yeni kitaplar da bulunmaktadır (Örneğin Krause (2004) ve Kahmen (2005)). İşletim prensiplerinin uygulamaları, atımlı uçuş zamanlı telemetrelerdeki bileşenler ve hata kaynakları, Kilpela (2004)'de verilmektedir (Reshetuk, 2006).

3. YERSEL LAZER TARAYICILAR

Bu bölümde, lazer tarayıcıların işletim prensiplerini, ana bileşenlerini ve ölçüm prosedürünü içeren Yersel Lazer Tarama (TLS) teknolojisi hakkında, sistematik bir tanım oluşturmak için bilgiler verilecektir.

Bir yersel lazer tarayıcı sistemi (TLSS) şu bileşenlerden oluşur (Barber, 2001):

- 1) Tarama ünitesi (tarayıcı)
- 2) Kontrol ünitesi
- 3) Güç kaynağı
- 4) Tripod ve Sehpa

Böyle bir sistemin örneği Şekil 3.1’de verilmiştir.



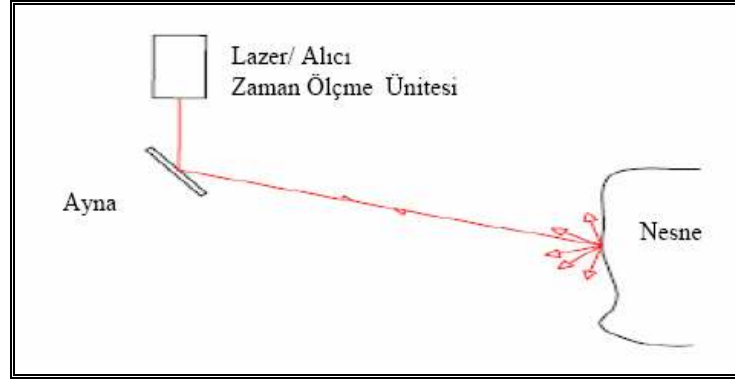
Şekil 3.1 MENSİ GS 100 yersel lazer tarama sistemi (Kertsen, 2004).

3.1 Yersel Lazer Tarayıcıların Çalışma İlkesi

3.1.1 Bir Lazer Işının Gidiş Geliş Zamanıyla İşlem Yapanlar(Uçuş Zamanlı)

Bir lazer ışını nesneye gönderilir. Gönderici ile yüzey arasındaki uzunluk, sinyal iletimi ile alımı arasındaki uçuş zamanıyla ölçülür. Bu prensip, total stationların çalışma prensibinden dolayı da iyi bilinir. Motor bir total station tarama aleti olarak çalışmaya programlanabilir. Ancak aletin kütlesi nedeniyle eksen etrafındaki artan rotasyon basamakları yeterince hızlı değildir. Bununla birlikte sinyal süreci çok vakit alır ve açısal değerler kodlanmış çemberlerden zahmetli bir şekilde okunmaktadır. Bundan dolayı ölçüm oranları çok düşük olmaktadır. Tarayıcılar, lazer ışının açısal sapması için küçük dönüş aletleri ve uzunluk

hesaplaması için basit algoritmalar kullanılır. Uzunluk ölçümlerinin tipik standart sapmaları, birkaç milimetre olmaktadır. 3B doğruluğu aynı zamanda, ışının açısal noktalama doğruluğundan etkilenir (Boehler, 2002).



Şekil 3.2 Uçuş zamanı prensibi.

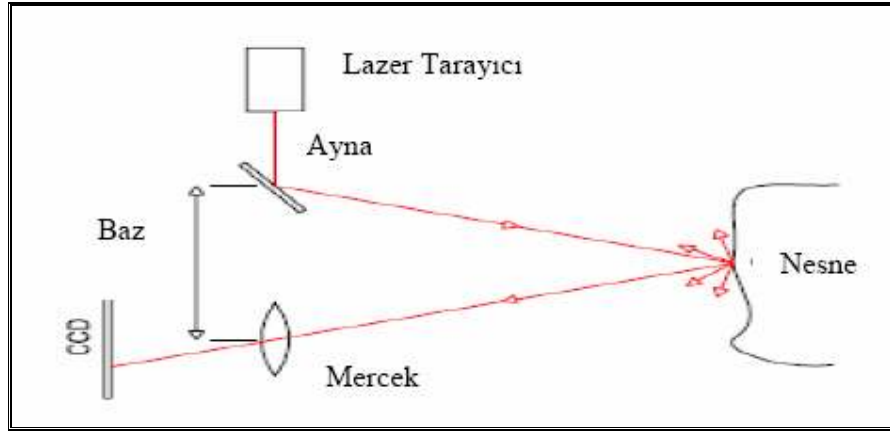
3.1.2 Faz Karşılaştırma Metoduyla İşlem Yapanlar

Bu yöntem de yine total stationlar da bilindiği gibidir. Uzunluk, iletilen ve alınan dalgalar arasındaki faz farkından hesaplanır. Kullanıcıların bakış açısından bu yöntemin, uçuş zamanı yönteminden farkı yoktur. Daha karışık sinyal analizinden dolayı sonuçlar daha doğru olmaktadır. İyi tanımlanmış bir dönüş sinyaline ihtiyaç olduğu için faz karşılaştırma yöntemini kullanan tarayıcılar, kısa uzunluklarda daha etkilidir (Boehler, 2002).

3.1.3 Triangulasyon Metoduyla İşlem Yapanlar

3.1.3.1 Tek Kamera Çözümü

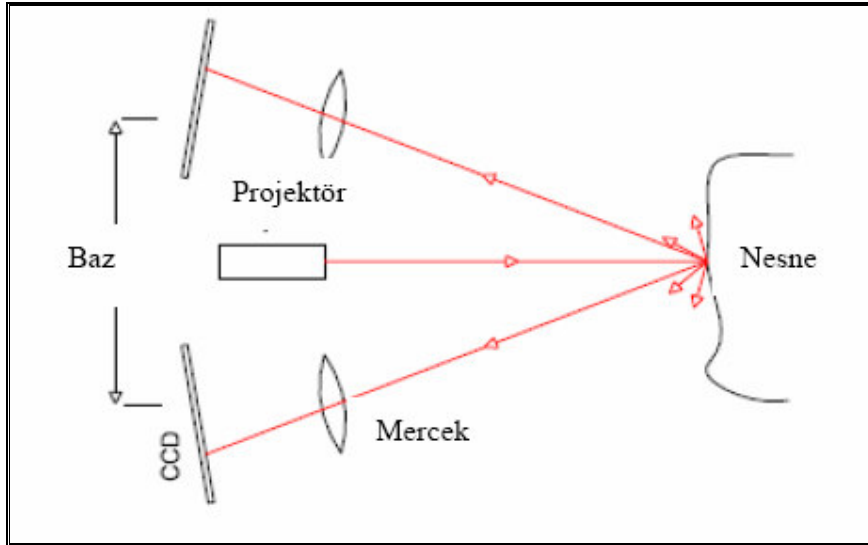
Bu tarayıcı, basit bir ışın yayma düzeneğinden oluşur. Tarayıcıdan nesneye, artan değişen açılarla ve lazer noktalarını sezen bir CCD kamerasıyla lazer ışını gönderir. Yansıtıcı yüzey elementlerinin 3B konumları, sonuç üçgeninden elde edilir. Bu prensip, menzil bulucuların kullanıldığı araştırmada önceliklere sahiptir. Bu açıdan, tarayıcı ve nesne arasındaki uzunluğun doğruluğu, uzunluk alanıyla birlikte ifade edilir. Bu tarayıcılar, doğruluk isteyen daha hassas çalışmalarda kısa mesafeler ve küçük nesneler için önemli bir rol oynar (Boehler, 2002).



Şekil 3.3 Triangulasyon Prensibi: Tek Kamera Çözümü

3.1.3.2 İki Kamera Çözümü

Triangulasyon prensibinin bir değişkeni, iki CCD kamerası kullanımudur. İncelenecek nokta ya da bölge, hiçbir ölçme fonksiyonu olmayan ayrı bir ışık projektörü ile üretilir. Projeksiyon, hareket eden şerit bölümlerinin bir ışık çizgisinden oluşur. Geometrik çözüm, tek kamera prensibiyle aynıdır ve aynı doğrulukta sonuç verir. Bu tarayıcılar, yukarıda belirtilen tarama aletlerine bir alternatif olarak görülebilir (Boehler, 2002).



Şekil 3.4 Triangulasyon Prensibi: İki Kamera Çözümü.

3.2 Tarayıcıların Genel Özellikleri:

Yersel lazer tarama aletlerini karşılaştırırken, araştırmacıların doğruluğu ağır basan faktör olarak görmelerine rağmen, yapılacak işe göre proje sürecinde, doğruluk dışında tarayıcıları değerlendirme aşamasında başka karakteristik özellikler vardır. Bu özellikler, yapılacak işe ve

istenen doğruluğa göre 3B Lazer tarama aletinin uygunluğunu da belirtir. Bu özellikler aşağıdaki gibi açıklanabilir (Boehler, 2002):

Hız: Yüksek veri edinme yeteneğine sahip lazer tarayıcılarla, zamana bağlı olarak nokta taranabilmektedir. Saniyede 100 nokta düşük bir hız olarak görülür. Pek çok çalışmada, 1000 noktalık oran yeterli görülür. Yüksek nesne çözünürlüğü için ihtiyaç duyulan yüksek nokta yoğunlukları bazen vakit kaybettirici olabilir. Bu durum çalışma zamanını etkilediği için, saniyede on binlerce nokta elde etmek, bazen iyi bir gelişim olarak düşünülemez.

Çözünürlük ve Işın Boyutu: Nesne çözünürlüğü, kuramsal olarak açısal artımın bir fonksiyonudur ve lazer ışınının açısal çözünürlüğüne ve yansıyan ışının nesne üzerindeki alanına bağlıdır. Eğer yüksek çözünürlüğün gerekli olduğu durumlarda, lazer ışının iyi odaklanıp odaklanmadığı ve değişik uzunluklar için sağlanan otomatik odaklanma prosedürü, kontrol edilmelidir.

Değer Limitleri ve Karışan Radyasyon Etkisi: Tarayıcıların tanıtım kataloglarında verilen değerlerden her zaman şüphe duyulmalıdır. Olası değerler, materyalin yansıtıcılığına, atmosfere, güneşten gelen ya da yapay nesnelerden yayılan ek radyasyona ve nesnenin kendisi ile etrafındaki diğer sebeplere yüksek oranda bağlıdır.

Görüş Alanı: Rotasyon için motorlu eksenler olmadan sabitlenen tarayıcılar, kısıtlı bir görüş alanına sahiptir. Tipik olarak, yaklaşık $40^\circ \times 40^\circ$ bir alanı tarayabilirler. MENSİ SOISIC gibi tek eksenli tarayıcılar, yaklaşık $45^\circ \times 320''$ lik alanı kapsar. İki eksenli aletler ise, yaklaşık 30° konik alan dışında her alanı kapsar. Geniş görüş alanlı tarayıcılar ile kapalı mekânlarda kişisel bir güç sarf etmeden büyük miktarlarda veri toplanır.

Kayıt Araçları: Farklı tarama istasyonlarından yapılan kısmi taramalar bütünleştirilip genel bir koordinat sistemine dönüştürülmelidir. Bunun için, tarama yazılımının rahatlıkla bulabileceği, nesne alanında özel hedeflerin olması gerekir. Bazı üretici firmalar, donanım ve yazılımlarına uygun olacak şekilde özel hedefler geliştirmişlerdir. Bu hedefler, aynı zamanda jeodezik ve fotogrametrik uygulamalar için kullanılabilir olmalıdır.

Görüntüleme Kameraları: Pek çok uygulama, nesnenin geometrik bilgilerine ek olarak nesnenin doku bilgisine ihtiyaç duyar. Eğer bu dokular 3B modele eklenmişse, gerçekçi bir görünüş elde edilebilir. Bazı tarayıcılar, dönüş sinyalinin yoğunluk değerlerini kaydederler. Genellikle doku haritalaması için, iyi bir doku bilgisi sağlamak yeterli değildir. Aynı şey, triangulasyon yöntemiyle çalışan tarayıcıların nokta edinimi için optimize edilmiş fakat görüntüleme için olmayan kameralarına da uygulanır. Bazı kullanıcılar, tarama aletinin içinde

yüksek kaliteli görüntü sağlamak için yüksek kaliteli kameralar talep ederler. Bu aşamada, tarayıcının ve kameranın rölatif pozisyonu, tarama sonuçları ve görüntülere dayalı olarak ayarlanabilir.

Taşıma Kolaylığı: İdeal olarak tarama aleti küçük ve hafif olmalıdır. Pek çok orta ve uzun menzilli tarayıcılar hala göreceli olarak büyük ve ağırdır. Bu yüzden, örnek olarak, uçuşlarda kabin bagajı olarak taşınmaları mümkün değildir. Özellikle, çeşitli engebeli ve dağlık bölgelerde, ulaşımın zor olduğu yerlerde yapılan çalışmalarda, aletin ve diğer donanımlarının taşınması çok zor olmakta ve zaman kaybına sebep olmaktadır.

Güç Kaynağı: Akü, taşınabilir jeneratör, elektrik hattı, güç kaynağı olarak kullanabilir. Aküyle çalışan tarayıcıların kullanımı, bir elektrik hattına ihtiyaç duyan diğerlerine göre daha uygundur. Taşınabilir jeneratörler, bu aşamada yardımcı olabilir fakat dâhili yerlerde ya da mağaralarda çalışırken uzun elektrik kabloları taşımayı gerektirir. Aynı zamanda, jeneratör ve kablolar taşımada ek sorun çıkarabilir.

Tarama Yazılımı: Yazılım, tarama pencerelerinin ve çözünürlük değerlerinin basit bir arabirimi olmalıdır. Tarama ilerlemesini ve kalan tarama zamanını elde etmek için bir olasılık vardır. Daha karmaşık özelliklere (otomatik hedef sezilmesi gibi) de ihtiyaç duyulabilir. Eğer

Çizelge 3.1. MENSİ GS 100 Yersel lazer tarayıcısının genel özellikleri

Mensi GS-100 Yersel Lazer Tarayıcısının Genel Özellikleri		
Alet Tipi	Uzun Menzilli Lazer Tarayıcı Sistemi	
Kullanıcı Arayüzü	PC, Windows NT/2000	
İdeal Kullanım Menzili	2 – 100 Metre	
En Yüksek Tarama Hızı	5000 nokta / sn	
Standart Sapma	6mm tek atışta	
FOV	360° yatayda, 60° düşeyde	
Nokta Büyüklüğü	50 m mesafede 3mm	
Radiance Dynamic	8bits – 256 gri seviyesi	
Sınıfı	Sınıf II lazer (EN 60825:1994)	
Mesafe Ölçüm Yöntemi	Gidiş – geliş süresi	
Video Kalibrasyonu	768 x 576 renk çözünürlükteEş zamanlı video iletimi	
Kamera Zoom Faktörü	5.5 x'e kadar	

geniş nesneler kaydedildiyse, taramanın tamlığını kontrol etmek için gözlemin farklı noktalarından alınan nokta bulutlarının genel bir kaydının edinilmesi olasıdır.

Okulumuz bünyesinde bulunan Trimble Marka, Mensi GS-100 Yersel Lazer Tarayıcısının genel özellikleri yukarıda Çizelge 3,1’de verilmiştir.

3.3 Yersel Lazer Tarayıcıların Sınıflandırılması

Yersel lazer tarayıcılar, ölçüm kriterlerine ya da teknik özelliklerine göre sınıflandırılabilir. Tüm genel uygulamalarda kullanılabilecek uluslararası standart kabul edilebilecek bir lazer tarayıcı yoktur. Bazı tarayıcılar mekân içerisinde ve orta mesafelerde 100 metreye kadar, bazıları ise açık alanda 100 metreden daha uzak alanlarda daha etkilidir. Bunun yanında yüksek duyarlılığa sahip, sadece 1–2 metre mesafeli hassas cihazlarda bulunmaktadır. Uygulamaya uygun olarak, seçenekler içinden amaca en uygun lazer tarayıcı seçilmelidir. Yersel lazer tarayıcılar mesafe ölçüm sistemlerinin prensiplerine göre sınıflandırılabilirler. Mesafe ölçüm sistemi, uzaklık ve sistemin verdiği sonuçlar ile bire bir ilişkilidir. Lazer tarayıcılar ile birlikte farklı tiplerde mesafe ölçümü yapan aletlerde kullanılır (Fröhlich ve Mettenleiter, 2004).

Günümüzde mesafe ölçüm tekniği olarak, en çok uçuş zamanlı lazer tarayıcılar kullanılmaktadır. Bu teknik, 100’lerce metrelik alanlarda net ölçümler yapmamıza olanak tanır. Uzun mesafelerde makul bir doğruluk sağlar. Mesafe 100 metreye kadar kısıtlanmıştır. Ölçülmüş mesafelerin doğruluğu birkaç milimetrenin içindedir.

Daha hassas sonuçlar elde etmek için, birkaç metre mesafeli yakın mesafe lazer tarayıcıları kullanılmaktadır. Bunlar daha çok endüstriyel ve mühendislik uygulamalarında kullanılırlar. Kullanılan mesafe ölçüm sistemi optik triangulasyondur. Böylece doğruluk ve hassaslığı mikrometreler seviyesine düşürmek olasıdır. Piyasada yaygın olarak bulunan, çeşitli marka, çeşitli menzil ve doğruluğa sahip yersel lazer tarayıcılar vardır (Fröhlich ve Mettenleiter, 2004):



A) Riegl LMS-Z210i B) Optech -ILRIS 3D C) Trimble- (Mensi) GS200 D) IQSun -880



E) Minolta- VIVID 910 F) Callidus -CP 3200 G) Leica -HDS 4500 H) Zoller + Fröhlich

-IMAGER

Şekil.3.5 Çeşitli üretici firmalara ait yersel lazer tarayıcılar

Yukarıda verilen çeşitli marka yersel lazer tarayıcıların ölçme yöntemleri, maksimum uzunlukları, elde edilen doğrulukları Çizelge 3.2’ de gösterilmiştir.

Çizelge 3.2 Yersel tarama aletlerinin uzunluk ve doğruluk değerleri

ÖLÇME YÖNTEMİ	UZUNLUK [m]	DOĞRULUK [mm]	ÜRETİCİ FİRMA
Uçuş Zamanlı	< 100	< 10	Callidus,Leica Mensi,Optech Riegl
	< 1000	< 20	Optech,Riegl
Faz Karşılaştırma	< 100	< 10	IQSun,Leica VisImage, Zoller+Fröhlich
Triangulasyon	< 5	< 1	Mensi, Minolta

3.4 Yersel Lazer Tarayıcı Bileşenleri

Bir yersel lazer tarayıcı sistemi (TLSS)’nin öz bileşeni tarama ünitesidir ve direkt olarak taranan obje veya nesne yüzeyinden, 3 boyutlu (3B) veri elde edilmesini sağlamaktadır. Bir lazer tarayıcının tarama ünitesi şu bileşenlerden oluşur (WEHR ve LOHR 1999; Reshetyuk,):

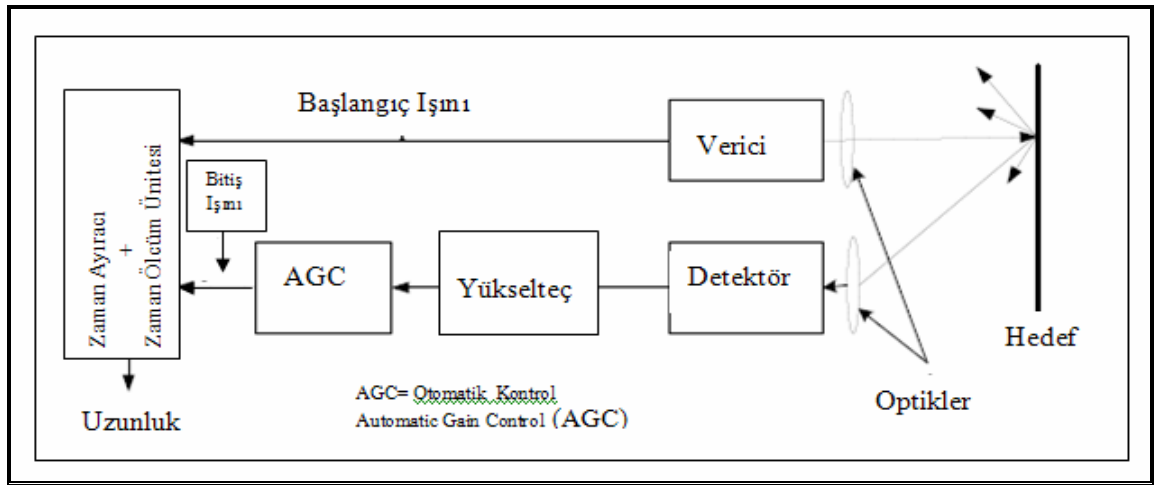
- Lazer telemetresi (Lazer uzaklık ölçer)
- Lazer ışın saptırma ünitesi (Optik mekanik tarayıcı)

3.4.1 Lazer Telemetre

Bir lazer telemetresi şu bileşenlerden oluşur (Wehr ve Lohr, 1999; Baltsavias, 1999b; Lange, 2000; Aman, 2001) :

- Bir verici (transistorlü lazer veya yarı geçirken lazer diyot)
- Alıcı kanal (Otomatik Algılama kontrolü (AGC), detektör, yükselteç)
- Zaman ölçümü elektronikleri (Zaman ayırıcısı ve zaman ölçümü ünitesi (dijital çevirici -TDC)
- Verici ve alıcı optikleri

Tipik bir Lazer telemetresinin blok düzeneği Şekil 3.5’de verilmiştir.



Şekil 3.5 Bir lazer telemetresinin blok düzeneği (Kostamovaara, 1991; Aman, 2001).

Yersel lazer tarayıcılarda kullanılan lazerlerin dalga boyu uzunluğu, 500 ve 1500 nm arasındadır. Lazerin genel atım tekrar sıklığı (Pulse Repetition Frequencies- PRF), 1 ile 10 kHz arasındadır (Kilpela, 2001). Örnek olarak, Leica HDS 2500 ve Leica HDS 3000 lazer tarayıcıları içerisindeki lazer telemetrelerinde kullanılan lazerin atım tekrar sıklığı (PRF), sırasıyla 1 kHz ve 4 Khz'dir (Leica, 2006). Dedektör, obje yüzeyinden geri saçılmış lazer sinyallerin algılanmasında kullanılır. Normalde yüksek enerjili ve yüksek duyarlılıklı PIN veya çığ fotodiyotları, detektör olarak kullanılır (Kilpela, 2004; Ratcliffe, 2005; Matta 1993).

Yersel lazer tarayıcılardaki uzunluk ölçme işlemleri, şu şekilde açıklanmaktadır. Lazer vericisi, biri alıcıya gönderilen ve zaman ölçüm ünitesini başlatan, diğeri objeye gönderilen iki parçaya ayrılmış kısa atımı (başlangıç atımı) yayar. Taranmış objenin yüzeyine ulaşıldığında lazer atımı geri saçılır ve bir kısmı dedektöre geri döner. Atımın parlak gücü elektrik akımına dönüştürülür. Gönderilen (P_T) ve alınan(P_R) lazer gücü arasındaki ilişki, radar uzunluk eşitliği ile açıklanır. Alınan güç miktarı, sinyal görüntü oranını (Signal Noise Ratio- SNR) ve uzunluk ölçme duyarlılığını etkilediği için, bu ilişkiyi analiz etmek önemlidir. Radar uzunluk eşitliği, Jelalian (1992) tarafından açıklanmıştır:

$$P_R = \frac{\pi \rho D^2}{(4R)^2} P_T \eta_{atm} \eta_{sys} \quad (3.1)$$

ρ obje yüzeyinin dağılmış yansıtma katsayısıdır ($0 < \rho < 1$), D alıcı lensin çapıdır, R objenin uzaklığı, η_{atm} ve η_{sys} optiklerde ve atmosferde yayılan ışın kaybı için, bu kaybın sebebini gösteren atmosferik ve sistem verici faktörleridir. Başka bir genel varsayım ise, hedefteki lazer gücünün yarımküre etrafında yayıldığıdır (Hovanessian, 1988). Bu bağlamda Formül (3.1) yeniden düzenlenmiştir.

$$P_R = \frac{\pi \rho D^2}{2.(4R)^2} P_T \eta_{atm} \eta_{sys} \quad (3.2)$$

Yayılmış lazer gücünün bir bölümü, tarayıcıya dönecektir. Alınmış lazer gücü, verilmiş gücün çok küçük bir parçasıdır ve hedef yansımadaki değişikliklere bağlıdır. Bu nedenden dolayı alınmış atımın dinamikleri, otomatik algılama kontrolünün (Automatic Gain Control - AGC) vasıtasıyla zaman ölçümü ayarlanarak, optik veya elektriksel zayıflatıcı tarafından fark edilebilir (Kilpela, 2004).

Lazer atımının geri saçılmış parçasının tespitinden sonra atım genişletilir. Zamanlamayı çalıştıran ve zaman ölçümü ünitesini durduran zaman ayırmıcısına yollanır. Zamanlama, atım üzerindeki belirli değişmez bir noktaya ilişkin olarak yapılmıştır. Normal olarak atımın ana kenarında (artan taraf) ve değişik yollarla fark edilebilir. Zaman ölçüm birimi, sinyal oranı yukarıdaki gibi saptığında ve bu noktada sabitlendiğinde durdurulur (Thiel ve Wehr, 2004).

Atımın yayılımı ve yüksek frekans (örneğin 100 mhz) osilatörü ile sayılan saat atımları numarası tarafından TDC ile ölçülen atımın geri saçılmış parçasının alınması arasındaki zaman aralığı (t), analog enterpolasyon metodu boyunca bir dijital sayım tekniği kullanılarak

belirlenir (Aman, 2001). Lazer tarayıcı ile hedef arasındaki uzunluk, şu şekilde hesaplanır (Reshetyuk, 2006):

$$R = c \cdot \frac{t}{2} \quad (3.3)$$

R mesafe, c havadaki ışık hızıdır. Atımlı lazerlerdeki uzunluk çözünürlüğü olan ΔR , zaman ölçümünün çözünürlüğü olan Δt ile orantılıdır.

$$\Delta R = c \cdot \frac{\Delta t}{2} \quad (3.4)$$

Yersel lazer tarayıcılarda, yukarıda açıklandığı gibi, yüksek doğruluklu zaman aralığı ölçen mekanizmaların olması gerekmektedir. Örneğin $R = 1$ mm uzunluk ölçümüne ulaşmak için kaydedilmesi gereken zaman aralığı:

$$t = \frac{2R}{c} = \frac{2 \cdot 10^{-3}}{3 \cdot 10^8} = 6,67 \cdot 10^{-6} \quad (3.5)$$

Bu nedenle, uzunluk ölçümlerindeki milimetre doğruluğunu elde etmek için, zaman aralık ölçümü doğruluğunun $7 \cdot 10^{-6}$ civarında olması gereklidir. Lazer telemetreleri için belirli maksimum uzunluk (R_{max}) şunlara bağlıdır (Reshutyek, 2006):

- TDC' nin maksimum uzunluğuna (bit sayısı)
- Obje yüzeyi yansırılığı (ne kadar yüksekse, R_{max} o kadar yüksek olur.)
- Lazer gücü
- Atmosferik iletim
- Işın sapması
- Dedektör duyarlılığı

Alınan lazer gücünün yüksek olması durumunda lazerin avantajı, birkaç yüz metreye kadar cm doğruluğunda uzunluk ölçülmesidir. Daha uzun mesafelerde ise, imkân dâhilinde gereken SNR ile uzunluk ölçmeleri yapılabilmektedir. Bu problemin dezavantajı, alıcı yoluna göre geri saçılan lazer atımının varış zamanının tam olarak saptanmasına rağmen, zamanlama noktasının değişebilirliği ve atmosferik zayıflamadır (Thiel ve Wehr, 2004).

Lazer ile uzunluk ölçme prensibi, nesne yüzeyindeki 3 boyutlu (3B) bir nokta ile tarayıcı arasındaki uzaklığın belirlenmesidir. Geri dönen lazer gücünün oranı saptandıktan sonra, uzaklık belirlenebilmektedir. Her nokta için uzaklık yanında, geri dönen sinyalin dönüş genlikleri, yoğunluk ve mekânsal bilgilerde kaydedilmektedir (Gordon, 2001).

3.4.2 Lazer Işını Saptırma Ünitesi

Objeye veya çevrenin mekânsal (3B) ölçümlerini sağlamak için, lazer ışın saptırma ünitesi kullanılır. Bu üniteye temel öğe, düşey yönde ve bazen yatay yönde ışının sapmasını sağlayan tarama aynasıdır. Normalde 3 çeşit ayna kullanılır (Ingensant 2006; Reshetyuk, 2006) :

- Dönen çokgen aynalar
- Dönen düz aynalar
- Dalgalı (Galvanometrik) aynalar

Piyasada kullanılan yersel lazer tarayıcılarda, hangi aynanın kullanıldığı üreticilerinin broşürlerinde her zaman açık değildir ve tarama mekanizmalarında hiçbir teknik açıklama bulunmamaktadır. Literatürde dönen düz aynalar ile ilgili yeterli bilgi olmadığı için bu bölümde bahsedilmeyecektir.

3.4.2.1 Dönen Çokgen Aynalar

Bunlar, üç ya da daha fazla yansıtma yönlü dönen optik öğelerdir. Genellikle prizmatik çokgen tarama aynaları kullanılır. Aynaların yönleri, aynı mesafede birbirine paralel ve ayna yüzlerinin merkezleri yön eksenine terstir. Bu tip çokgen aynalar, üretim için en uygun maliyetli olanlardır. Alüminyum, plastik, cam veya berilyumdan yapılabilirler. Yansıtırlılığını veya dayanıklılığını artırmak için, ince optik örtüler, kaplamalar bazı kısımlarının üzerine yapıştırılabilir. Böyle aynaların avantajları, yüksek hızları, geniş tarama açılarının mevcudluğu ve hız dengeleridir. Birçok ayna, motor ve bağlantı sistemiyle bütünleştğinde buna çoklu tarayıcı denir. Ayna direkt olarak çark miline göre hızlandırılır. En yaygın fırçasız DC motorları kullanılır ve bağlantı sistemi bir top veya hava bağlantısı olarak düşünülebilir. Dönen bir aynayla elde edilebilir maksimum tarama açısı, şu şekilde formüle edilebilir (Marshall, 2004) :

$$\theta = \frac{720^\circ \cdot C}{\eta_{yön}} \quad (3.6)$$

$\eta_{y\ddot{o}n}$, çokgendeki yönlerin sayısıdır ve C aktif tarama süresinin toplam süreye oranıdır. C normalde %30 ve % 90 arasındadır. Maksimum tarama açısı θ , optik tarama açısı olarak da söylenir ve tarayıcı milinin açısal yolculuğu iki seferdir. Bu da bu açığı üretmek için gereklidir. Elde edilebilir tarama oranı f_{sc} , yani saniyedeki tarama çizgilerinin sayısıdır. Aşağıdaki formülle hesaplanabilir (Tauber, 2005) :

$$f_{sc} = \eta_{y\ddot{o}n} \cdot v \quad (3.7)$$

v dönme hızı ve $\eta_{y\ddot{o}n}$ yukarıda bahsedildiği gibi çokgendeki yönlerin sayısıdır.

3.4.2.2 Dalgalı (Galvanometrik) Aynalar

Bu aynalar düzdür ve belli bir sıklıkla iki açısal pozisyon arasında dalgalanırlar. Sinüs dalga dinamosu tarafından kontrol edilen galvanometrik motor ile hareket ettirilirlar (Katzenbeisser, 2003). Dalgalı aynanın anlık tarama açısı, aşağıdaki eşitlikle açıklanabilir (ibid) :

$$\theta(t) = \frac{\theta_{\max}}{2} \sin(\omega t) \quad (3.8)$$

$\theta_{\max}$ maksimum tarama açısıdır, ω aynanın dalgalanma sıklığıdır ve t zamandır. Aynanın duyarlık konumlamasını sağlamak için, tarayıcının miline deformasyon olmadan düzeltilen bir çerçeve yerleştirilmiştir. Aynalar alüminyum, demir alaşımı, titanyum ve berilyumdan yapılabilir. Galvanometrik motor, açısal pozisyon sensörü ve bağlantı sistemi ile tamamlanmış dalgalı aynaya, galvanometrik tarayıcı denir.

3.4.2.3 Tarama Konfigürasyonları ve Lazer Işınının Yönlendirilmesi

Aynanın görüntü lensinin konumuna bağlı olarak, çokgen ve galvanometrik aynalar için, çokça kullanılan tarama konfigürasyonları şunlardır (Marshall, 2004) :

- Ön objektif tarama - Işın ayna tarafından yansıtılır. Lens veya bükülmüş ayna tarafından görüntülenir. Böyle bir tarayıcının odaksal düzlemi düzdür. Böyle sistemler karşılaştırılabilir olarak karışık optikler gerektirir;
- Son objektif tarama - Işın ilk önce görüntüleme optiklerinden geçer ve sonra ayna tarafından yansıtılır. Bu tarayıcının odaksal düzlemi kıvrımlıdır. Böyle sistemler örneğin fotogrametrik tarayıcılarda kullanılabilirler. Basit optikler gerektirirler.

Her iki çoklu ve galvanometrik tarama aynanın anlık açısal pozisyonu, yüksek çözünürlüklü açısal pozisyon sensörü tarafından okunur. Çoklu taramada bu optik kodlayıcıdır. Galvanometrik taramada ise, bu durum dönüştürücüdür Daha sonraları ayna pozisyonu, dijital bir gösterime dönüştürülmüştür. Çoklu taramada kodlayıcının ek fonksiyonu, poligon hızını kontrol eder. Bu da tarama çizgisindeki lazer noktalarının (pikseller) konumlanmasındaki duyarlık için gereklidir. Kodlayıcı, her pikselde bir tane olan çark mili dönüşünün belli bir miktarını karşılayan duyarlık atımları üretir. Kodlayıcı atımlarının sıklığı ve aşaması, sabit referans sinyaliyle karşılaştırılır. Poligon hızını ayarlamak da kullanılan hata sinyali üretilir. Işın saptırma ünitesi, 2 galvanometrik aynayı veya bir dönen aynayı (çoklu veya düz) ya da galvanometrik ayna ve bir servo mekanizmayı içerebilir. Lazer ışınının yatay ve düşey yönlerinin saptırılması şu yollardan biriyle yapılabilir (Kern, 2001; Marshall, 2004; Gordon ve Lichti, 2004, Reshutyek, 2006) :

- Yatay ve düşey saptırmalar, tarayıcılardaki düşey ve yatay eksenlerin tarayıcıda bulunan aynalar ile hareketleri vasıtasıyla yaptırılır. Tarama başı da denilen tarama ünitesi, görüntüleme işlemi süresince durağan, sabit kalır. Böyle tarayıcılar, tarama işlemleri boyunca, limitli bir görüş alanına (Field Of View - FOV) sahiptir. Örneğin Leica HDS 2500 lazer tarayıcısı, $40^\circ \times 40^\circ$ 'lık bir görüş alanına sahiptir.
- Düşey saptırma, dönen veya dalgalı ayna tarafından sağlanır. Yatay saptırma ise tarama başının yani tarama ünitesinin, düşey eksen etrafında aşamalı olarak dönüşüne müsaade ettiği takdirde, servo motor yardımıyla sağlanır. Bir step motor veya analog motor, bir açı kodlayıcılı ile birlikte, tasarımının karışık olmasına rağmen kullanılabilir (Lichti ve Franke, 2005). Bu tarayıcılara, dönen baş veya panoramik tarayıcılarda denir. Bu tarayıcılar yatay da 360 dereceye kadar, görüş alanına (FOV) sahiptir. Modern tarayıcıların çoğu bu tiptedir.

Maksimum ışın saptırma değerleri, bir lazer tarayıcının, yatay /düşey görüş alanını (FOV) belirler. Yeni piyasaya çıkarılan modern lazer tarayıcıların tarama görüş alanları, gittikçe artırılmaktadır. Örneğin, Optech marka ILRIS-36D tarayıcısının görüş alanı (FOV), $360^\circ/360^\circ$ 'ye kadar çıkarılmıştır (Kelly, 1994).

Aslında lazer ışınının saptırılması, açısal ölçümleri sağlar. Kamera ve benzeri tarayıcılarda yatay ve düşey açılar, açısal pozisyon sensörleri tarafından kaydedilen aynaların açısal saptırmalarından üretilir. Panoramik tarayıcılarda yatay açılar, tarama başının mekanik artma miktarından türetilir. Yukarıdaki konularda anlatıldığı gibi, lazer tarayıcılar, reflektörsüz total

stationlarda olduğu gibi benzer yollarla çalışmaktadır. Uzunluk ölçümleri, total stationlarda açıklanan işlemlerle özdeştir ve lazer ışını saptırmaları, yatay çember üzerindeki okumalara uyum sağlar. Temel gözlemler, uzunluk r , yatay yönler (φ) ve düşey açılar (θ) ve ayrıca her nokta için yoğunluk değerleridir. Belki de Staiger (2003) “takometrik lazer tarayıcı” terimini bu nedenle kullanmıştır. Total stationdan tamamıyla farklı olan, çok yüksek veri kazanım oranlarıdır (Reshetyuk, 2006).

Tarama işlemi sırasında, tarama yazılım programının tarama penceresine bakıldığı zaman, taranan obje veya alanın yüzeyini yansıtan düzenli noktalar yani bir nokta bulutu ve noktalar arası düzlemsel yoğun boşluklar elde edilmektedir. Bir nokta bulutu, objenin büyüklüğü ve biçimine göre milyonlarca noktadan oluşabilir. Nokta yoğunluğu (Örnekleme çözünürlüğü) tarama işlemlerinde önemlidir. Taranan obje ya da alan yüzeyinin en küçük detaylarına kadar elde edilebilmesi için, nokta yoğunluğunun artırılması gerekir. Leica HDS 250 yersel lazer tarayıcısında nokta yoğunluğu, 50 metrede 0.25 mm’ye kadar elde edilmiştir. Ulaşılabilir yüksek çözünürlüklerine karşı, obje yüzeyinin lazer spot çapından daha yüksek çözünürlüklerle taranması mantıklı değildir (Boehler, 2001). Nokta yoğunluğunu yani örnekleme çözünürlüğü artırmak özellikle, karışık olmayan düz yüzeylerde, elde edilecek verinin doğruluğunu artırmaz. Aksine tarama süresinin ve elde edilen verinin boyutunun artmasına sebep olur. Veri boyutunun da çok yüksek olması, verinin yazılımlarda işleme süresini uzatır (Iavarone, 2002; Reshetyuk, 2006).

4. YERSEL LAZER TARAMADA ÖLÇME PROSEDÜRLERİ

Bir yersel lazer tarayıcının kurulumuyla elde edilen bir obje veya alanın taranması, bir önceki bölümde açıklanan prensiplere göre gerçekleştirilmektedir. Ölçme prosedürünün temel basamakları şu şekilde açıklanmıştır (Reshetyuk, 2006):

4.1 Ölçme Planlaması

Yersel lazer tarama işlemlerinde ölçüm tasarımı, bu zamana kadar hiçbir standart kural belirlenmemiştir. Yine de herhangi bir çeşit ölçme sistemlerinde olduğu gibi, bir ön planlama gerektiğinden, gerekli bilgilerin türetilmesi gerekir. TLS ölçüm tasarımı ana hatlarıyla şöyledir (Guissani ve Scaioni, 2004):

- 1) Taranacak alanın önceden belirlenmesi
- 2) Tarama sonucu elde edilen nokta bulutunun beklenen çözünürlük ve doğruluğunun tanımı
- 3) Kullanılacak tarayıcının seçimi
- 4) Tarama merkezleri için en uygun mekân, gerekli çözünürlüğü ve doğruluğu sağlayacak yerlerden seçilmesi
- 5) Farklı tarama merkezlerinden elde edilmiş nokta bulutlarının birleştirilmesi, jeoreferans konumları ve geometrik konfigürasyonları için, hedeflerin türlerinin seçimi ve hedeflerin yerlerinin önceden belirlenmesi
- 6) Tarama sürecinde geçen zaman dikkate alınarak toplanacak toplam veri için, işin tamamında geçecek zaman tahmin edilmesi

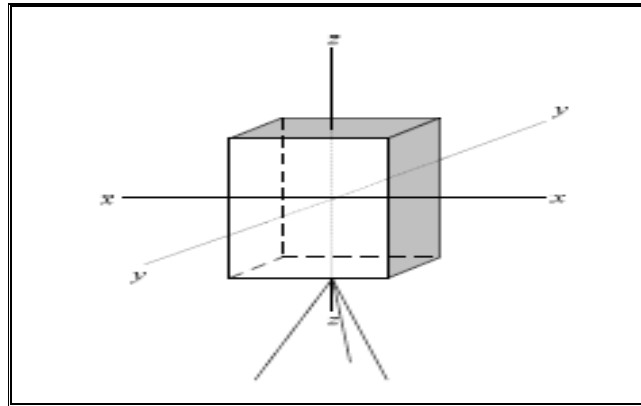
4.2 Tarama

Tarama başlamadan önce taramayı yapacak olan operatör, daha önceden ölçme planlanması yapılmış, yeri belirlenmiş, dolaylı ve doğrudan konumlandırma (jeoreferanslandırma) için uygun olan noktalara tarayıcıyı kurar. Operatör, tarayıcı ve kontrol ünitesinin (dizüstü veya cep bilgisayarı) çalışmasını sağlayan güç kaynağını bağlar. Kontrol ünitesi ile tarayıcı arasında bağlantı, wireless, modem veya kablolar aracılığı ile sağlanır. Daha sonra, bilgisayara daha önceden kurulmuş olan tarama yazılımı çalıştırılır. Piyasada, firmadan firmaya değişen tarama yazılımları vardır. Firmaların birçoğu, farklı özelliklere sahip, tarama ve elde edilen verinin değerlendirilmesi üzerine yazılımlar geliştirmişlerdir. Tarayıcı ile

yazılım arasında bağlantı kurulduktan sonra, taranacak obje ya da alanın bir kısmı veya tamamı, tarayıcının görüş alanına göre, tarama yazılım penceresinden seçilir. Taramaya başlamadan önce, yazılım üzerinden istenen hassasiyete göre tarama parametreleri seçilir. Örneğin nokta yoğunluğu(örnekleme çözünürlüğü), doğruluk modu, tarama sayısı, ilk veya son atım ölçümleri, objeye veya nesneye olan maksimum ve minimum uzaklık, tarama yazılımına, taramaya başlamadan önce girilecek olan parametrelerdir (Lichti, 2002). Tarama başladıktan sonra tarama yazılımı penceresinde, nesne yüzeyini yansıtan noktalar yani taranan kısımlar, eş zamanlı olarak takip edilmektedir. Tarama tamamlandığında, elde edilen veri belirlenmiş proje dosyasına kaydedilir. Belli tarama işlemleri, bir tarayıcı tipinden diğerine değişir.

4.3 Çoklu Taramaların Birleştirilmesi ve Konumlandırma (Jeoreferanslandırma)

Bir lazer tarayıcısıyla taranması düşünülen objeler veya alanlar genellikle geniş, büyük ve karışık şekilde olabilirler. Sadece bir kez tarama yapılarak obje veya alanının tamamı taranamaz. Sadece tarayıcının görüş alanına giren bir kısmı taranabilir. Diğer kısımları taranması ise, tarayıcıların obje veya alanın diğer bölümünü görebilecek bir yere kurulması ve ayrıca ilk tarama alanının bir kısmını da içine alacak bir noktaya kurulması gerekir. Ayrıca her iki tarama bölgesinde, hem farklı noktalardan yapılan taramaların birleştirilmesi, hem de taramalar sonucunda elde edilen nokta bulutlarının genel (ülke) bir koordinat sistemine dönüştürülmesi için, en az 3 tane olacak şekilde kesişen tarama bölgelerine hedef noktaları konulur. Her tarama bölgesinde, bu hedef noktalarının taranması gerekir. Ayrıca her tarayıcının kendine ait bir koordinat sistemi vardır. Taramalar sonucu elde edilen nokta bulutları, bu koordinat sisteminde üretilmektedir. Tarayıcıların koordinat sistemi bileşenleri (Balis, 2004):



Şekil 4.1 Yersel lazer tarayıcının koordinat sistemi (Reshetyuk, 2006).

Orijin – Tarayıcının elektro optik merkezinde;

Z eksenini – Aletin düşey eksenini boyunca;

Y eksenini – İsteğe bağlı yatay açı ile aletin optik eksenini boyunca;

X eksenini – Diğer iki eksene dik açılı, böylece tarayıcının koordinat sistemi şekillenir.

Farklı firmalarca üretilen lazer tarayıcılardaki, tarayıcı tasarımındaki farklılıklar yüzünden, bazı lazer tarayıcıların yukarıda belirtilen tarayıcı koordinat sistemi tanımından, küçük farklılıkları olabilir. Örneğin, Callidus 1,1 tarayıcısının koordinat başlangıcı, yatay ve düşey yön eksenlerinin kesişme noktasıdır (Kern 2001). Leica HDS 2500 tarayıcısında ise, yön eksenlerinin sıfır noktasıdır ve tarayıcı mekanik eksenleri ile kesişmezler (Harvey 2004).

Taranmış obje veya alanın tam sunumunu elde etmek için, nokta bulutları, ilk önce ortak bir koordinat sistemine yani tarayıcının kendi koordinat sistemine dönüştürülmelidir. Bu işleme, ayarlama (registration) denir. Ayarlanan taramalar veri setinde birleştirilir (Barber, 2001; Mills ve Barber 2003). TLS verisini, diğer jeomekansal veriyle birleştirebilmek için, tüm objenin ayarlanmış nokta bulutunun, seçilmiş dış jeodezik yerel veya ulusal koordinat sistemine dönüştürülmesi gerekir. Bu işlemede, konumlandırma (jeoreferanslama) denir

Jeoreferanslandırmada kullanılan yerel koordinat sistemi, ölçüm kontrol yoğunluğu ihtiyacını gidermek için, tarama projesinin amacına göre belirli bir biçimde kurulmalıdır. Alternatif olarak ulusal koordinat sistemi kullanılabilir. Bu dönüşümün yapılabilmesi için tarama bölgesine jeodezik bir ağ kurulması ve bu ağdan, taramada kullanılan hedeflerin ya da kontrol noktalarının ülke koordinatlarının elde edilmesi gerekir. Bu hedefler yardımıyla taranmış alan ya da objenin koordinatları, ulusal koordinat sistemine dönüştürülür

Genel olarak bir projede veri elde etmek istendiğinde, jeoreferanslamanın ilk basamağı olarak ayarlamayı düşünebiliriz. Jeoreferanslama ise, veri işlenmesinin ilk basamağı olarak sayılabilir (Barber, 2001). Tarayıcı tasarımına bağlı olarak jeoreferanslandırma, iki farklı prosedürde açıklanabilir (Gordon ve Lichti, 2004).

4.3.1 Doğrudan Konumlandırma

Bu prosedürde, tarayıcı bilinen nokta üzerine kurulur, yerleştirilir, düzeçlenir ve tarama yapılacak obje veya alan gibi nesne yüzeyi hedeflerine yöneltilir. Konum ve yönelme bilgisi, tarayıcının yerden yüksekliği, taramaya başlamadan önce tarayıcı yazılımına girebilir. Tarayıcılar bu nedenle bir düzeçle donatılır. Taranacak nesnelerin gözlenmesi için, bir kamera veya dürbün, optik merkezleme veya tarayıcı yüksekliği için, donanımlar vardır.

Optik merkezleme düzenciyle donatılan bazı lazer tarayıcılar, eksen denkleştirici eksikliği nedeniyle, tam olarak düzeçlenemezler (Scaioni, 2005). Tarayıcının pozisyonu yani konumu, bir total stationla veya bir GPS alıcısıyla belirlenebilir. Örneğin, Callidus 1,1 tarayıcısına, tarayıcının üstüne ölçme reflektörünün veya GPS alıcısının konabileceği bir adaptör yerleştirilmiştir. Tarayıcının üstüne, GPS alıcısı yerleştirilmesi, Riegl marka tarayıcılarında da görülmektedir. Tarayıcı merkezinin, ulusal koordinat sistemindeki koordinatları, GPS veya Total stationla belirlendikten sonra, bu koordinatlar tarayıcı yazılımına girilir. Bu koordinatlar kullanılarak farklı çözünürlükte, tarama işlemleri gerçekleştirilir. Taranmış obje veya alan yüzeyinden elde edilen nokta bulutunu oluşturan noktalardan her birinin koordinatları, ulusal koordinat sisteminde hesaplanır. Bu şekilde taranmış obje veya alan, gerçek 3 boyutlu (3B) mekânsal bilgilerle ilişkilendirilir (Gordon, 2004; Reshetyuk, 2006).

4.3.2 Dolaylı Konumlandırma

Dolaylı jeoreferanslandırmada, yani taranacak obje veya alanın gerçek modele yakın tam gösteriminin gerçek mekânsal koordinatlarla gösteriminde veya elde edilen nokta bulutlarının istenilen koordinat sistemine dönüştürülmesinde farklı yöntemler kullanılır (Reshetyuk, 2006):

- Her bir tarama bölgesinde elde edilen nokta bulutları, bir sonraki tarama bölgesinin bir kısmını kapsayacak şekilde elde edilmelidir. Yani tarama yapılırken bitişik tarama bölgelerinde, farklı konumlardan yapılan taramaların birleştirilmesi ve jeoreferanslandırma için ortak ve kesişen bir bölgelerin olduğu taramaların yapılması gerekir. Bu ortak bölgelerde bulunan, kolayca fark edilen en az 3 adet bağlantı noktası veya özel hedefler kullanılarak ilk olarak, farklı noktalardan elde edilen nokta bulutları bütünleştirilir yani ayarlanır. Daha sonra bütün bütünleştirilmiş, ayarlanmış nokta bulut kümesi, ulusal koordinatları daha önceden belirlenen ve kolayca fark edilen en az 3 bağlantı noktası veya özel hedefler yardımıyla, ulusal koordinat sistemine dönüştürülürler.
- Her bir tarama sonucu elde edilen nokta bulutları, her tarama bölgesinde bulunan en az 3 tane kontrol noktası yardımıyla ve bu noktaların koordinatlarını kullanılarak farklı bir koordinat sistemine veya ulusal koordinat sistemine direkt olarak dönüştürülebilirler. Her tarama için, en az 3 kontrol noktası gereklidir. Bitişik taramalar arasında kesişen, ortak tarama bölgesi olması bu işlem adımlarında gerekli değildir. Yine de bir önceki konudan daha fazla kontrol noktası gerektiği için ekstra ölçüm gerekir ve sonuç olarak bu proje giderine eklenir.

- Bitişik taramaların yüzey eşleştirmesi, birçok kontrol noktasındaki ayarlanmış, bütünleştirilmiş nokta bulutunun sonradan ortaya çıkan jeoreferanslandırılması ile olur. Bu yaklaşım, fotogrametride kullanılan yöntemle benzerdir.

4.3.3 Hedefler

Tarayıcı ile dış koordinat sistemi arasında Helmert tipi koordinat dönüşümü kullanılır (Reshetyuk, 2006):

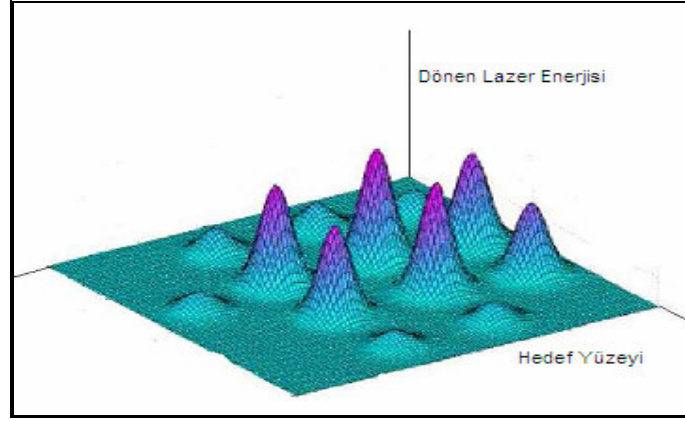
$$X_e = \Delta X + \mu R_i^e X_i \quad (4.1)$$

X_e ve X_i , dış (e) ve tarayıcı (i) koordinat sistemleri içindeki nokta koordinatlarının vektörleridir. ΔX , öteleme vektörü, μ ölçek faktörüdür ve R_i^e üç koordinat sistemi civarındaki (ω, ϕ, κ) veya $(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3)$ doğrultu açıları fonksiyonu olan iki koordinat sistemi arasındaki yön matrisidir. Üç veya daha fazla kontrol noktası var olduğunda yedi Helmert dönüşüm parametreleri ($X_s, Y_s, Z_s, \mu, \omega, \phi, \kappa$) yanında standart sapmaları, en küçük kareler yöntemine göre dengelenerek hesaplanır. X_s, Y_s, Z_s dış koordinat sistemindeki tarayıcının merkez koordinatlarıdır. Hesap edilen parametreler, yukarıdaki formül (4.1)'de verilen fonksiyonel modele göre nokta bulutlarının jeoreferanslaması için kullanılır. Taranacak obje veya alan içerisinde bulunan kontrol noktalarının koordinatları, total station, GPS veya fotogrametrik yöntemlerle, yüksek duyarlılıkla jeoreferanslama ve çok güvenilir veri sağlamak için hesaplanmaktadır. Hedefleri kullanırken en önemli şey, gerekli doğrulukla koordinatların belirlendiği hedef merkezini hesaplamaktır. Farklı tip hedefler kullanılabilir (Barber, 2001; Gordon ve Lichti 2004).

4.3.3.1 Düz Geri Yansıtıcı Hedefler

Bu hedeflerin kullanımlarıyla ilgili problemler aşağıda açıklanmıştır (Reshetyuk, 2006):

- Işık dalgası etkisi - Aşağıdaki Şekil 4.2'de, hedef merkezinin çevresinde lazer enerjisinin çoklu hedef dönüşleri görülmektedir. Bu dönüşler, hedef merkezin de birkaç yol kullanılarak, örneğin her bir dönüşte yoğunluk yüklemesi yapılarak azaltılabilir. Bu geri dönüşlerden hangisinin, hedef merkezinden döndüğü belli değildir. Hedeften kaynaklanan hataların azaltılması, hedefin merkez belirsizliğinin bulunmasına katkı sağlar (Lichti, 2000).



Şekil 4.2 Işık dalgası etkisi (Çoklu Dönüşler) (Lichti, 2000).

- Çok eğilimli tarama çalışmalarında, hedef merkezlerinin doğru otomatik belirlenememesi durumu (Balzani, 2001).

4.3.3.2 3 Boyutlu (3B) Biçimi Olan Küre Gibi vb. Hedefler

3 boyutlu biçimi olan hedef veya kürelerin merkezi, tek bir noktada belirlenebilmektedir. Bu hedeflerin düz hedeflerden farkı, her tarama yönünde ve binaların köşelerinin taranmasında ya da iç ya da dış taramaların birleştirilmesinde, direkt olarak belirlenebilmesidir (Balzani, 2001). Birçok makalede, geri yansıtıcı silindirik hedeflerden de bahsedilmektedir. Riegl lazer tarayıcılarında, silindirik hedefler kullanılmaktadır (Harvey, 2004; Reshetyuk, 2006).

4.3.3.3 Diğer Hedefler

Hedefler yerine, şekil özellikleri bilinen örneğin pencere kenarı, pervazlar ve vb. obje veya alan içerisinde fark edilebilen noktaları, bağlantı veya kontrol noktaları olarak kullanmak mümkündür. Bu noktalar, farklı noktalardan tarama yapılarak elde edilen nokta bulutlarının bütünleştirilmesi, ayarlanması sırasında, kullanılan yazılımların özelliklerine bağlı olarak, kullanıcı tarafından el ile seçilerek tanımlanmaktadır.

5. 3B VERİLERİN DEĞERLENDİRİLMESİ İÇİN KULLANILAN YAZILIMLAR

3 Boyutlu modelleme, tarama sonucu toplanan nokta bulutlarının değerlendirilmesi ve düzenli hale getirilmesi için yazılımlar geliştirilmiştir. Günümüzde, lazer tarayıcı üretici firma ve onlara bağlı kuruluşların geliştirdiği birçok yazılım vardır. Ayrıca piyasada yaygın olarak bulunan CAD ve 3B modelleme yazılım paketleri de bulunmaktadır. Fakat bu yazılımlar, tarama sonucu elde edilen çok miktarlardaki verinin işlenmesinde zorlanmaktadır. Tarayıcı firmalarının geliştirdiği yazılımlar ise performans, içerdikleri modül, işlem adımları ve kullanım kolaylığı açısından farklılıklar göstermektedir. Her yazılımın kendine göre avantaj ve dezavantajları vardır. Kullanıcılar tarama sonucu elde edilen verilerin değerlendirilmesi ve modellenmesi sırasında, farklı yazılımlar arasında geçiş yapmaktadır. Yersel lazer tarama teknolojisindeki tarama yazılımları, veri toplanmasından son ürüne kadar olan tüm işlem adımları göz önüne alınarak aşağıdaki gibi sınıflandırılmaktadır (Boehler, 2002):

- Tarama kontrolü için yazılım
- Nokta bulutunun düzenlenmesi için yazılım
- Basit geometrik şekilleri, nokta bulutuna sabitlemek için yazılım
- Karmaşık yüzey modellerinin yaratılması için yazılım
- Doku ve görüntü eklemek için yazılım
- Veri ve proje yönetimi için yazılım

5.1 Tarama Kontrolü İçin Yazılım

Motorize ekseni olmayan bir tarayıcıdaki tarama kontrolü, ön ayar çözünürlüğünde sabitlenmiş bir pencere kullanılarak sağlanmaktadır. Bu durumda tek kontrol elemanı, bir başlangıç düğmesi olabilir. Tarama yazılımının tek amacı ise, 3B koordinatlarının hesaplanması olacaktır. Motorize eksenli tarayıcıların için kontrolü ise, olası çözünürlük uzunluğunu seçmek ve bir ya da daha fazla tarama penceresini tespit etmek ile sağlanmaktadır. Tarama kontrolü ve tarama parametrelerinin belirlenmesi için olası gelişmeler içinde şunlar vardır:

- Tarama parametrelerinin farklı olasılıklarının seçimi
- Karmaşık, uzun ve eğimli nesneler için hareketli pencereler (borular)

- Hedef noktaları için tarama çözünürlüğünün otomatik ya da yarı otomatik ayarı
- Tarayıcıdan farklı uzaklıktaki nesne detaylarına ulaşmak için, tarama çözünürlüğünün otomatik ayarlaması.

Tarama işlemleri boyunca veya taramanın tamamlanması sırasında, elde edilen veri hakkında güvenilir bir bilgiye sahip olmak istenilir. Tarama işlemleri sonucu elde edilen nokta bulutlarının kayıt edilmesi, gerekli bilgilere ulaşılması ve taranan obje veya nesne yüzeylerini yüzey ağı şeklinde gösterecek pek çok yazılım modülü geliştirilmiştir (Boehler, 2002).

5.2 Nokta Bulutunun Düzenlenmesi İçin Yazılım

Elde edilen nokta bulutunun nesne veya obje yüzeyini yansıtip yansıtmadığının belirlenmesi, eksik tarama bölgelerinin tespiti ve detayları görmek için yazılımlar kullanılmaktadır. Yazılımlar ile istenilen her türlü yönde 3 boyutlu görselleştirme (büyültme, küçültme, kaydırma ve döndürme gibi vb.) işlemleri yapılabilmektedir. Bu şekilde, nokta bulutlarına farklı noktalardan bakış sağlanmaktadır. Taramalar sonucu elde edilen nokta bulutları, nesne veya obje yüzeyini oluşturan gerekli ve gereksiz pek çok noktadan oluşmaktadır. Nesne yüzeyini temsil etmeyen olası nokta kayıtları için, pek çok sebep vardır:

- Arka plandaki nesnelerden yansımalar
- Tarayıcı ve nesne arasındaki boşlukta meydana gelen yansımalar (ağaçlar ve diğer nesneler, hareket eden insanlar ya da trafik, atmosferyel etkiler)
- Kenarlardaki lazer noktasının sadece kısmi yansımaları
- Işının çoklu yansımaları
- Yüzey elementlerinin farklı yansıtımalarından kaynaklanan sistematik uzunluk hatalarının farklılıkları
- Hatalı noktalar, çok parlak nesnelerden kaynaklanır (ışıklar).

Bu yanlış noktaların kayda alınmadan belirlenmesi ve silinmesi gerekir. Çünkü kullanılan hiçbir otomatik yöntem tüm olasılıkları önceden göremediği için, bu işlemler enteraktif olarak yapılmaktadır. Ön plandaki, arka plandaki ve çoklu yansımalarından elde edilen yanlış noktalar, menzil limitlerinin tanıtımıyla kolayca yok edilebilir. Fark edilmesi daha zor olan ise, kenarlardaki yanlış noktalardır. Ayrıca, yüzey materyalinin yansıtabilirliğine bağlı menzil sapmaları yüzünden düzensiz noktalar elde edilmektedir.

Bu silme işlemlerine rağmen, hala mevcut nokta bulutu içerisinde, nesne yüzeyini yaratmayan gereksiz noktalar vardır. Eğer taranan obje karışık bir yapıya sahip değilse, geometrik basit şekillerden oluşuyor ve yüzeyi pürüzsüz ise, filtreleme veya nokta inceltme işlemleri yapılmaktadır. Filtreleme ve nokta inceltme işlerinde amaç, fazla veri boyutunu azaltmak ve daha az nokta ile yüzeyi temsil etmek için nokta sayısının azaltılmasıdır. Bu yukarıda belirtilen işlemler, farklı noktalardan yapılan taramaların birleştirilmesinden sonrada yapılmalıdır. Hala bütünleştirilmiş nokta bulutu içerisinde gereksiz olan noktalar olabilir. Bu gereksiz noktaların belirlenmesi ve silinmesi gerekir. Aynı şekilde filtreleme ve nokta inceltme işlemleri yapılmaktadır. Yazılımlar içerisinde geliştirilen modüller sayesinde bu belirtilen işlem adımları, kullanıcının isteğine bağlı olarak gerçekleştirilmekte ve düzenli nokta bulutları istenilen formatta kayıt edilmektedir (Boehler, 2002).

5.3 Basit Geometrik Şekilleri Nokta Bulutuna Sabitlemek İçin Yazılım

Bu şekilde düzenlenen nokta bulutları, son bir dokümantasyon sonucu olarak yeterli değildir. Nokta bulutları, bir nesnenin geometrisinin arşivlenmesi yoluyla dikkate alınabilir. Eğer taranan obje basit geometrik bir şekle sahipse, yazılımlardan yararlanarak basit geometrik şekiller (silindir, koni, küre), obje bölümlerine ait olan nokta bulutlarına sabitlenebilir. Yani nokta bulutu üzerinden geometrik çizimler yapılabilir. Bu işlemler için mevcut CAD programlarının performansı, 3B tarama tekniklerinden doğan yeni ihtiyaçlara cevap vermek için devamlı geliştirilmekte ve yeni modüller eklenmektedir.

3B tarayıcıları için sağlanan yazılım çözümleri, performansa göre farklılık gösterebilir. Bu geometrik şekillerin, önceden bilinen bir kütüphanesi veya şablonu varsa, otomatik sabitleme metotları kullanılabilir. Eğer çizimi yapılacak nesne veya obje büyük ve karmaşık bir yapıda ise, yazılımla birlikte her şeklin ayrı ayrı bağlantısı sağlanır ve çizimi gerçekleştirilir. Kültürel miras belgelemesinde, nesnelerin sunumu için oluşturulan basit geometrik şekiller yeterli değildir (Boehler, 2002).

5.4 Karmaşık Yüzey Modellerinin Yaratılması için Yazılım

Yüzey ağı oluşturma, düzensiz bir yüzeyin geometrik tanımına ulaşmak için standart bir yöntemdir. Yüzey ağı oluşturma işlemleri, daha çok topoğrafik uygulamalarda ve lazer tarama teknolojisindeki 3B modelleme çalışmalarında kullanılan alternatif bir yöntem haline gelmiştir. Bu yüzey ağı, üçgenlemelerle yazılım üzerinden yapılır. Yüzey ağı oluşturma işlemi, kullanıcı kontrollü gerekli bilgilerin girilmesiyle gerçekleştirilmektedir. Bu üçgenleme

işlemleri otomatik olarak yazılım tarafından yapıldığında, objenin bazı bölümlerde üçgenler oluşmayabilir. Gereksiz üçgenlemeler veya boşluklar oluşabilir ya da oluşan üçgenlerde bazı hatalar olabilir. Bu üçgenlerin düzenli hale getirilmesi, boşlukların doldurulması, kullanıcı tarafından yazılım modüllerini kullanılarak yapılabilir. Yüzey ağı oluşturulmasında özellikle kenarlarda buna benzer hatalar oluşmaktadır. Yazılım, tarama çözünürlüğüne bağlı olarak, kenarları otomatik olarak belirleyebilmektedir. Kullanıcı, özellikle kenarlarda manüel olarak yazılıma müdahale edebilir ve hataları düzeltebilir.

Yüzey ağı oluşturmada üçgenler yerine eğrilerden (NURBS) yararlanılır. Bu, veri depolama alanını büyük ölçüde azaltır. Aynı zamanda, yüzeyin pürüzsüz olduğunun bilindiği durumlarda NURBS modellemesinin kullanılması, taramadan kaynaklanan gürültüleri ortadan kaldırır (Boehler, 2002).

5.5 Doku ve Görüntü Eklemek için Yazılım

Yüzeylerin görselleştirilmesini mümkün kılan tek şey, dokudur. Nokta butlundan elde edilen obje yüzeyine, doku giydirilerek gerçekçi bir görünüm sağlanmaktadır. Örneğin beyaz renkteki doku, nesne veya objeye mermersi bir görünüm verir. Aynı zamanda, materyallerin yansıtma varlıkları tanımlanmalıdır. Bu, daha pütürlü ve daha parlak yüzey görünümüne sebep olur. Daha karmaşık dokular ve daha karmaşık aydınlatma prosedürleri, tarama yazılımıyla elde edilebilir.

Görüntü bilgisi, tarama işlemiyle elde edilebilir. Uçuş zamanlı lazer tarayıcılarda, dönüş sinyalinin kuvvetinin özneteliği ile görüntü sağlanabilir. Bu değer normalleştirilirse, nesnenin gri tonlu görünümünün yaratılmasında kullanılabilir. Triangulasyon tarayıcılarının kameraları ile benzer bilgi sağlanır ve tüm görüş alanının görüntüsü kaydedilebilir. Pek çok durumda, bu basit araçlar belgeleme görevi için beklenen yüksek kaliteyi sağlayamaz.

Yüksek görünüm kalitesi için özellikle de renkli görüntüler için, görüntü bilgisini üretmek amacıyla farklı kameralar kullanılmaktadır. Görüntüler, nesneye göre tekrar tasarlanmalıdır. Özdeş noktalar kullanılarak nesne üzerine görüntü yerleştirme işlemi, fotogrametrik teknikler kullanılarak, daha çabuk ve aynı zamanda daha iyi bir geometrik kaliteyle gerçekleştirilebilir. Topografik uygulamalarda bu işlem adımları, 3B nesneler için daha karmaşıktır. Hangi uygun görüntü bilgilerinin alınması gerektiğine karar vermek için, en küçük yüzey biriminin dahi görüntüsü gerekmektedir (Visnovcova, 2001). Parlaklık, kontrast ve renk balansı göz önüne alınarak, radyometrik düzeltmelerin uygulanması oldukça zor olabilir. Çünkü görüntü alımı

esnasında aydınlatma koşulları, nesnenin her yüzey elementinde aynı olmadığı için ön görülen koşullarla uyuşmayacaktır. Görüntü ekleme işi oldukça zahmetli bir iştir. Yazılımların çözemediği ve kullanıcıların çözüm bulunmasını bekledikleri bu konu ile ilgili, pek çok sorun vardır (Boehler, 2002).

5.6 Veri ve Proje Yönetimi için Yazılım

Birçok işlem basamağı ve son bir 3B sunumuna ulaşmak için elde edilen görüntüler ya da ulaşılan araştırma sonuçları gibi ek veriler, bu aşamada gerekli olabilir. Bu işlem basamakları boyunca mevcut veriler değişmiş, ayarlanmış ya da silinmiştir. Proje boyunca uygulanan tüm hareketler belgeleme yöntemiyle kayıt altına alınmalıdır. Bu süreçler ve işlem adımların yapıldığı her yerde, standart sapma veya vb. istatistiksel değerler sağlanmalıdır. Orijinal nokta bulutu ve son model arasındaki farkları belirlemek için kullanılan yazılımlar, son bir kalite değerlendirmesi açısından önem taşımaktadır.

Her yazılımın farklı tarayıcılardan elde edilen nokta bulutu kümelerini açabilme kabiliyeti olmalıdır. Bu bağımsız yazılım ürünleri için açık bir koşuldur. Üretici firmaların geliştirdiği yazılımlar için de, aynı şeyler söz konusudur. Özellikle de farklı tarayıcılardan alınan veriler birleştirilmek istendiğinde taranan noktaların kartezyen koordinatları, bir veri ara birimi olarak yeterli değildir. Çünkü mesafe ve taranan noktanın yönü hakkında bilgi içermez. Daha ileri işlemler için, CAD ve 3B modelleme yazılımlarına sonuçların aktarılması gerektiğinden dolayı, yaygın olan pek çok sistem için aktarım araçlarının olması gereklidir. Yazılımlar arası veri alışverişlerinde, özellikle CAD modelleri için DXF, yüzey modelleme yazılımları için ASCII ve görselleştirme için VRML formatı kullanılmaktadır (Boehler, 2002).

5.7 Yazılım Ürünleri

Yukarıda bahsedildiği gibi 3B tarama yazılımı, tam olarak farklı amaçlar için geliştirilen modüllerin bütünleşik çalışarak oluşturdukları modüller topluluğudur. Yazılımların bazıları, belirli bir tarayıcıya özgüdür. Bazıları genel olarak 3B verilerin değerlendirilmesi ve düzenlenmesi için, bazıları da 3B Modelleme çalışmaları için üretilmiştir. Her yazılımın kendine göre farklı özellikleri, avantaj ve dezavantajları vardır. Lazer Tarama Teknolojisinin gelişmesi ve modern ölçme teknikleri arasında yer almaya başlamasından itibaren, sırf 3B tarayıcıları için bazı bağımsız yazılım ürünleri geliştirilmiştir. Mevcut CAD ve 3B modelleme yazılımları, ürün aktarım performanslarını ve yüksek boyutlardaki nokta verileri ile çalışabilme özelliklerini geliştirdikleri takdirde, lazer tarama teknolojisinde kullanılabilir.

6. YERSEL LAZER TEKNOLOJİSİNDE HATA KAYNAKLARI

TLS ölçümlerinde hata kaynakları araştırmaları, birbiriyle ilgili olan faktörlerin çok sayıda olmasından dolayı karıştırılmaktadır. Bu karışıklık, lazer tarayıcılarının farklı tasarımda olmaları, farklı dalga boyları ve farklı ışın saptırma üniteleri kullanmaları yüzünden fazlalaşmaktadır. Lazer tarayıcılarının tasarımları, birçok elektriksel ve mekanik parça kullanılması ve her bir parçanın toplam hataya olan etkileri nedeniyle oldukça karışıktır. Ek olarak, farklı ölçüm metotlarının kullanılması, çevreden kaynaklan sebepler, taranan obje veya nesnenin yansıma yüzeylerinin etkileri, operatörden kaynaklanan hatalar, tarama parametrelerinin yanlış belirlenmesi, doğrudan ve dolaylı jeoreferanslamada kaynaklanan durumlar gibi vb. etkiler hata kaynaklarına yol açmaktadır.

TLS ölçümlerindeki hatalar, Staiger (2005)'den temel alınarak aletsel, objesel, çevresel ve metotsal olarak gruplara ayrılabilir. Ayrıca, Lichti ve Gordon (2004) basitçe TLS hatalarını, dâhili (aletsel) ve harici (objeyle ilgili, çevresel ve metotsal) olarak iki gruba ayırmışlardır. Bir başka mümkün sınıflandırma ise, yersel taramalar sırasında göze çarpan hataları dikkate alarak, uzunluk hataları ve açısal hatalar (yatay yönler ve düşey açılar) üzerine yapılabilir. Bu hataların her biri farklı faktörler tarafından ortaya çıkmıştır. TLS teknolojisinin sürekli gelişmesinden dolayı, gözlem ile ilgili hatalar son derece azaltılmıştır (Reshetyuk, 2006).

6.1 Aletsel Hatalar

Bu hatalar, tarayıcı tasarımına ve tarayıcının teknik özelliklerine bağlı olarak değişmektedir. Aletsel hataları şu şekilde ayırabiliriz (Hebert ve Krotkov, 1992):

- 1) Lazer telemetresi ve ışın saptırma ünitesinin fiziki yapısal özelliklerinden kaynaklanan hatalardır. Bu hatalar lazer uzunluk ölçümlerinin ve lazer taramalarının olağan sınırlamalarından dolayı yok edilemez. Kullanıcı veya mühendis çabalarıyla ortadan kaldırılamaz.
- 2) Lazer telemetresi, ışın saptırma ünitesi ve eksen hatalarını da içinde bulunduran tarayıcı donanımındaki belirli hatalardır. Bu hatalar, sistem tasarımının geliştirilmesiyle veya kalibrasyonla yok edilebilir veya küçültülebilir.

Aletsel hatalar, lazer tarama ölçümlerini düzenli veya düzensiz olarak etkiler. Tarayıcılardaki düzenli hatalar, geleneksel ölçüm aletlerindeki farklıdır. Standartlaşmış prosedürlerle kullanıcı tarafından kontrol veya ayar edilemezler. Lazer tarayıcının ölçüm doğruluğu, lazer

telemetresi ve ışın saptırma ünitesi ile sınırlanmıştır (Nyland 1998).

6.1.1 Lazer Telemetresindeki Hatalar

Lazer tarayıcıların uzunluk ölçümlerindeki doğruluk ve duyarlık, bugüne kadar yapılan lazer tarayıcı performanslarının araştırıldığı en önemli inceleme konularındandır. Uzunluk ölçümlerindeki hatalar, diğer hatalardan daha fazla sayıda faktör tarafından etkilenmektedir (Lichti ve Gordon, 2004; Baltsavias, 1999b).

6.1.1.1 Düzensiz Hatalar

Bu hatalar, aşağıdaki formül (6.1) ile tarayıcı lazer telemetresinin duyarlıklı uzunluk ölçümüne karar vermemizi sağlar (Koskinen, 1991; Reshetyuk, 2006) :

$$\sigma_r = \frac{c}{2} \cdot \sigma_t \quad (6.1)$$

c havadaki ışığın hızı ve σ_t eşit olan zamanlama dakikasının standart sapmasıdır.

$$\sigma_t = \frac{\sigma_n}{dU / dt} \quad (6.2)$$

Burada σ_n , zaman ayırıcının girişindeki gürültü fazlalığının karesel ortalama hatasıdır. dU / dt , sinyalinin zayıf değerinin oranı (U_s) ve atımının yükseliş süresi tarafından tahmin edilebilen zamanlama süresindeki ($t_{yükseliş}$) zamanlama atımının eğimidir (Matta, 1993).

$$dU / dt = \frac{U_s}{t_{yükseliş}} \quad (6.3)$$

Bu nedenle uzunluk duyarlığının açıklamasını şu şekilde yazabiliriz (Reshetyuk, 2006):

$$\sigma_r = \frac{c}{2} \cdot \frac{\sigma_n \cdot t_{yükseliş}}{U_s} = \frac{c}{2} \cdot \frac{t_{yükseliş}}{SNR} = \frac{c}{2} \cdot \frac{0.35}{B \cdot SNR} \quad (6.4)$$

$$SNR = \frac{U_s}{\sigma_n} \quad (6.5)$$

SNR, atım bulucusunun gürültü oranı ve B bant genişliğidir. Eğer uzunluk, n bağımsız ölçümleri ortalamasıyla hesaplanırsa, uzunluk duyarlığı şu şekilde hesaplanacaktır:

$$\sigma_r = \frac{c}{2} \cdot \frac{0.35}{B \cdot SNR \sqrt{n}} \quad (6.6)$$

Yukarıdaki formül (6.4)'den hareketle uzunluk duyarlılığı, aşağıda açıklanan faktörler çeşitliliğine bağlı olan SNR'ye bağlıdır. Başlangıç noktası olarak Jelalian (1992)'da verilen SNR açıklaması, atımlı lazer telemetresi için aşağıdaki gibi formüle edilmiştir.

$$SNR = \frac{I_{SIG}^2}{I_{SN}^2 + I_{BK}^2 + I_{TH}^2 + I_{DK}^2} \quad (6.7)$$

I_{SIG}^2 , alınan lazer gücüne orantılı olan sinyal akımının karesel ortalamasıdır ve paydadaki terimler, aşağıdaki kaynaklardan sonuçlanan gürültü akımlarının karesel ortalamasıdır.

- 1) I_{SN}^2 , sinyalin neden olduğu (Kuantum veya Poisson'da denen) gürültüdür. Detektöre gelen alınmış sinyal yüzünden ortaya çıkar.
- 2) I_{BK}^2 , arka plan yüzünden neden olan gürültüdür. Yerden, atmosferden gelen istenmeyen sinyal yansımaları, objenin yakınındaki veya başka bir kaynaktaki etkilerle karışırlar. Eğer taranmış objenin yüzeyi çok sıcaksa (endüstriyel ortamlarda), arka plan gürültüsünün kaynağı kendi olabilir.
- 3) I_{TH}^2 , alıcıdaki termal veya alıcı Johnson gürültüsüdür. Elektronikteki elektronların termal düzensizliğinden dolayı ortaya çıkar.
- 4) I_{DK}^2 , detektördeki koyu gürültü akımıdır. Olay radyasyonunun yokluğunda bulunan sızıntı detektörün iç fiziksel yapısından ötürü ortaya çıkar.

Son iki terim, telemetre elektroniğinden gelen gürültüyü açıklar. SNR'nin bant genişliği alıcısı ve atım yükseliş süresi, uzunluk duyarlılığı karar vermemiz ve lazer telemetrenin etkinliğinin bir göstergesi olması açısından çok önemlidir (Matta, 1993; Reshetyuk, 2006).

SNR'nin yanında uzunluk ölçme duyarlılığı şunlardan etkilenir:

- 1) Atım genişliğinde bağımsız ama ışık dalga genişliği ve detektör yükleme rezistansına bağlı olan atım yükseliş süresi
- 2) Atım genişliği – Daha kısa atımlar daha iyi duyarlık verir.
- 3) Eşik detektörünün duyarlılığı

4) Bağımsız atım ölçümlerinin sayısı (n)

5) Optik karışma

Lazer tarayıcısının uzunluk ölçme duyarlılığını hesaplamak için basit ve güvenilir bir metot, düz bir yüzeyi model alıp tanımlamaktır. Yerleştirilmiş düzlemin standart sapması ve bu düzlemden gelen tekli noktaların sapmaları uzunluk duyarlılığının belirtileri olacaktır.

Sonuç olarak telemetreye mahsus olan ve lazer ışınının sapmasına bağlı olan düzensiz hatalardan bahsedilmelidir. Bu, obje yüzeyindeki lazer izi ile uzunluk ölçümünün açılal konumundaki belirsizliğidir. Lichti ve Gordon (2004)’de gösterildiğı gibi ışın genişliğı belirsizliğı için standart sapma aşağıdaki gibidir:

$$\alpha_{ışın} = \pm \frac{\gamma}{4} \quad (6.8)$$

γ , ışın sapmasıdır. Lazer ışın sapması hatası, ışının iyi odaklanmasıyla tarayıcılar için, önemsiz olacaktır (Reshetyuk, 2006).

6.1.1.2 Düzenli Hatalar

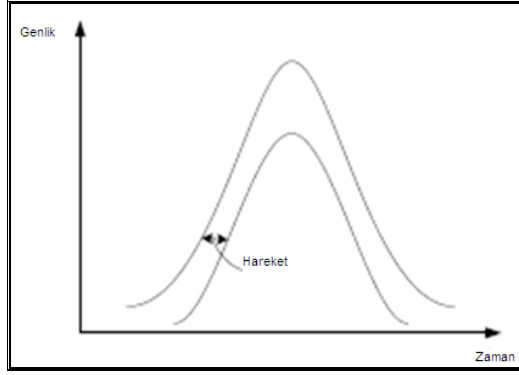
Lazer telemetresiyle yapılan uzunluk doğruluğı, şu düzenli hatalar tarafından kısıtlanmıştır (Koskinen, 1991; Kostamovaara, 1991; Matta, 1993; Aman, 2001; Kilpela, 2004; Reshetyuk, 2006):

1) Doğrusal Olmama

Zaman ölçüm ünitesi, optik sistem ve alıcı aynı mesafedeki tüm verici atımı görmez ve bu zamanlama atım şeklinde değışikliklere yol açmaktadır. Kostamovaara (1991) tarafından deneysel atımlı lazer telemetresi ile araştırmalar yapılmıştır. Araştırmalarda, tüm aletin doğrusal olmaması durumunda, 3–25 m mesafede ± 2 mm daha iyi sonuçlar elde edilmiştir.

2) Zaman Hareketi

Taranmış hedefin şeklindeki farklılıklar ve obje üzerindeki yansımaya bağlı olan zamanlama atım genişliğı, zaman ayırmıcısında hatalara neden olmaktadır. Zaman hareketi için diğler nedenler, zaman ayırmıcısındaki yayılma gecikmesindeki ve sondaki potansiyel yan ses değışiklikleridir.



Şekil 6.1 Zaman Hareketi (Amann, 2001)

Genişlik çeşitleri ve atım artışı süresi yüzünden oluşan zaman hareketi, Kostamovaara (1991)'da gösterildiği gibi $\pm 1,5 \text{ mm}$ 'den daha fazla azaltılabilmektedir. Ayarlanmış eşik ile telemetredeki Δr_{walk} zaman hareketi yüzünden oluşan uzunluk hatası şu şekilde hesaplanabilir (Moring, 1989) :

$$\Delta r_{\text{walk}} = c \cdot t_{\text{yükseliş}} \cdot k \left(1 - \frac{1}{d} \right) \quad (6.9)$$

c ışık hızı, $t_{\text{yükseliş}}$ (artış) atım artış süresi, k her ortalama genişlikteki zamanlama düzeyi ve d her ortalama genişlikteki asıl genişliktir.

3) Sıcaklık Sapması

Zaman ölçüm elektroniğinde, uzunluk sapmasına neden olan sıcaklık sapması aşağıdaki faktörler yüzünden oluşur (Boehler ve Marbs, 2005; Reshetyuk, 2006):

- Ortam sıcaklığındaki değişiklikler (dış faktör)
- Telemetreyi açtıktan bir süre sonra içindeki sıcaklık değişiklikleri (ısı artışı etkisi- iç faktör)

Lazer vericisindeki sıcaklık, sabit atım şeklini üretmek için saptanmalıdır. Ortam sıcaklığından dolayı atım sapması çizgiseldir ve yazılım tarafından telafi edilmelidir. Yarı iletken lazer diyotlarının enerji akımı ve üretilmiş lazer gücü, sıcaklığa bağlıdır. Ortam sıcaklığındaki artış, güç çıkışındaki azalmaya neden olmaktadır (Rueger, 1990).

4) Sıfır Hatası

Tarayıcıdaki sıfır hatası, elektriksel ve mekanik sıfır konumları arasındaki uyumsuzluktur. Bu durum, elektriksel kablolar ve bileşen gecikmelerinden dolayıdır. Sıfır hatasının ek bileşenleri, yüzey yansırılığındaki ölçülmüş uzunluğuna bağlıdır (Kahmen ve Faig, 1988).

Yapılan çeşitli incelemeler sonucu elde edilen yersel lazer tarayıcılarındaki sıfır hatası büyüklüğü hesapları, Çizelge 6,1’de özetlenmiştir (Reshetyuk, 2006) .

Çizelge 6.1 Birkaç araştırma sonucu elde edilen lazer tarayıcılarda sıfır hatanın değerleri

Tarayıcı	Araştırmacı	Sıfır hatası (mm)	Standart sapma (mm)
Leica HDS 3000	Linke(2005)	6.1	—
Imager 5003	Schulz ve Ingensand(2004a)	4	—
Imager 5003	Rietdorf(2005)	0.73	0.36
iQsun 880	Lichti ve Franke(2005)	7.4	0.1

5) Ölçek Hatası

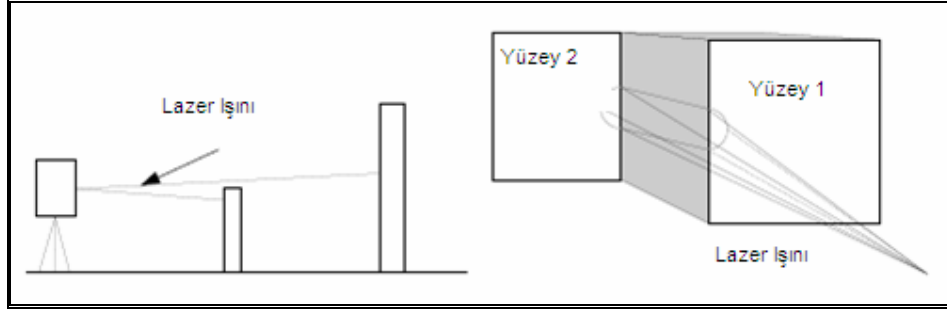
Ölçülen mesafedeki ölçek faktörüdür. Ingensand (2003), Leica HDS 2500 tarayıcısında 400 ppm ölçek hatasını ortaya çıkarmıştır. Riegl LMS-Z201-i tarayıcısının uzunluk doğruluk spesifikasyonları, 20 ppm’den ufak ölçek hatasını içerir. Ölçülen uzunluktaki, sıfır ve ölçek hatalarının etkisi şu şekilde açıklanmaktadır (Reshetyuk, 2006):

$$\Delta r = k_0 + m.r \quad (6.10)$$

Δr , ölçülen r uzunluğundaki hata, k_0 ve m ise sırasıyla sıfır ve ölçek hatalarıdır.

6) Karışık Pikseller

Yersel lazer tarama teknolojisinde görülen çok ciddi bir problemdir. Lazer ışın sapması yüzünden lazer ışını, obje kenarına düşebilir. Lazer ışının bir parçası obje yüzeyinden veya diğer parçası arkasındaki obje yüzeyinden yansıyabilir. Ya da arkasında hiç obje yoksa yansıyamayabilir. (Boehler ve Marbs, 2005; Reshetyuk, 2006).



Şekil 6.2 Karışık pikseller problemi ve obje kenarına düşen lazer spotunun etkisi (Hebert ve Krotkov, 1992; Mills ve Barber, 2003).

Bu nedenle uzunluk, ışın izi içerisinde her iki yüzey üzerindeki noktaların uzunlukları tarafından hesaplanır. Son uzunluk, yüzeyde olmayabilir ama arada bir yerdedir. Beklenen hata milimetreden birkaç desimetrelere değişebilir. Böylece lazer tarayıcılar, kenarlar çevresinde, nokta bulutu modellemesini karıştıran birçok yanlış nokta üretir. Bu durumu çözmek için, iyi odaklanmış yani küçük bir ışın sapması olan bir lazer tarayıcı kullanmaktır. Karışık piksellerden gelen hata, toplu hata olarak görülebilir (Reshetyuk, 2006).

6.1.2 Işın Saptırma Ünitesindeki Hatalar

Yüksek yoğunluklu nokta bulutları elde edilmesi daha önceden bahsedildiği gibi, ışın saptırma ünitesi ile lazer telemetresinin birleşmesi ile gerçekleşmektedir. Işın saptırma ünitesi aletsel hatalara yol açtığı için, bu hatalar açı ölçüm doğruluğunu ve duyarlılığını etkiler. Bu hataların belirlenmesindeki güçlükler nedeniyle, bu konu ile ilgili araştırmalar devam etmektedir. Bu bölümde, lazer ışın saptırma ünitelerinin (çoklu ve galvanometrik) her iki türünde de yaygın olabilen hatalar, açıklanacaktır.

6.1.2.1 Her Tip Işın Saptırma Ünitesindeki Genel Hatalar

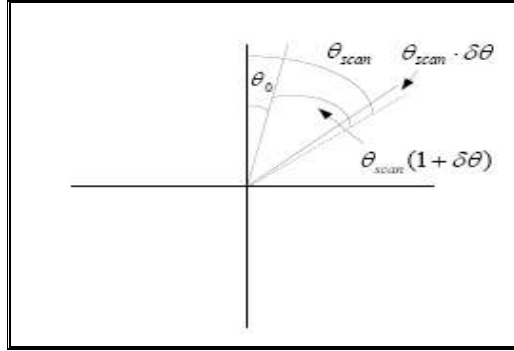
Lazer tarayıcılardaki her iki tip ışın saptırma üniteleri tarafından yapılan açısal doğruluk, yatay yönler ve düşey açılar için açısal pozisyon sensörleri kalitesi ile sınırlandırılmıştır (Wunderlich, 2003). Örnek olarak, galvanometrik tarayıcılarda kullanılan açısal dönüştürücüler için bazı önemli parametreler, aşağıda verilmektedir (Marshall, 1985; Reshetyuk, 2006) :

- Doğruluk
- Isı sabitliği
- Sıfırlama veya referans sabitliği

- Algılama sabitliği
- SNR
- Çözünürlük

Yersel ve hava lazer tarama uygulamalarında kullanılan tarayıcıların, benzer tarama prensiplerini kullanmalarından dolayı, ALS’de kullanılan hata modeli yersel uygulamalar içinde kullanılabilir. Model, dönen ve galvonometrik tarayıcılarda aynı olacaktır. Işın saptırma ünitesinde görülen hatalar aşağıda açıklanmıştır (Katzenbeisser, 2003) :

- 1) **Sıfır Hatası** – Ölçülen düşey açıya sabit katkıdır. Total stationdaki, düşey indeks hatasına karşılık gelir. Bu hata, analogdan dijitale (A/D) dönüştürücü içerisindeki aynanın mekaniksel yanlış dizimi ve kodlayıcı (Dönüştürücü) veya sıfır değişimi tarafından ortaya çıkar.
- 2) **Ölçek Hatası** – Ölçülmüş açıya doğrusal olarak bağımlı olacaktır. Bu hata için sebep, A/D dönüştürücü içerisindeki yanlış algılama kontrolü veya kodlayıcıdaki yanlışlıklar olabilir. Tarama aynasının açısal pozisyonu, kodlayıcı tarafından örneklendirildiğinde düşey açı, bu fazlalıkların toplamı olarak kaydedilir. Eğer böyle bir fazlalığın asıl değeri nominal değerden farklı olursa ölçek hatası belirir.



Şekil 6.2 Düşey tarama açısındaki hatalar(Katzenbeisser 2003).

Düzeltilmiş düşey açı ve hata şu şekilde olacaktır:

$$\begin{aligned} \theta_{düztilmiş} &= \theta_{tarama} (1 - \delta\theta) - \theta_0 \\ \Delta\theta &= \theta_{tarama} - \theta_{düztilmiş} = \theta_{tarama} \cdot \delta\theta + \theta_0 \end{aligned} \quad (6.11)-(6.12)$$

θ_{tarama} tarayıcı tarafından ölçülen ve $\theta_{düztilmiş}$ düzeltilen düşey açı, θ_0 sıfır (düşey indisi) hatası ve $\delta\theta$ ölçek hatasıdır. Yukarıda bahsedilen iki açısal hata, mekanik ve elektriksel niteliklerinden olabilir (Katzenbeisser, 2003).

Poligonal ve galvonametrik taramalarda düz yüzeydeki lazer spotunun boşluğu, kendi açısına değil tarama açısının tanjantına orantılı olur. Tarama aynasının sabit hızda dönmesi veya dalgalanmasından ve sensör düzeyindeki örnekleme en genel şekilde sabit zaman aralığında yapılmasından dolayı, tarama çizgisindeki lazer spotları arasındaki boşluklaşma muntazam olmayacaktır (Burke, 1996). Ön objektif poligonsal tarama konfigürasyonunda, bu problem genel olarak yassı odak düzlüğüne sahip F_Theta lensi tarafından ortadan kaldırılır. Bu, tüm tarama çizgisinde muntazam bir lazer spot çapı ve tarama çizgisine muntazam olarak spot yerleştirmeyi sağlar. F_Theta lensinin bozunumu, lazer spot hızı doğrusalsızlığını %0.01-0.1 arasında olmasına neden olur. Son objektif tarama sisteminde, odaksal yüzeyi bükülen, tarama çizgisi içerisinde spot boyutu ve spot boşluğu değişimleriyle ortaya çıkan problemler düz yüzeyde belirecektir. Bu eksiklik uygun alan ve düzleştiren düzeltme lens sistemi ile optik olarak düzeltilebilir (Marshall, 2004). Usulsüz olarak düzeltilmiş lens yüzünden oluşan lazer spot hızı eksikliği lazer tarama aletlerinde genel bir hatadır (Chang, 1992).

6.1.3 Yersel Lazer Tarayıcılardaki Eksen Hataları

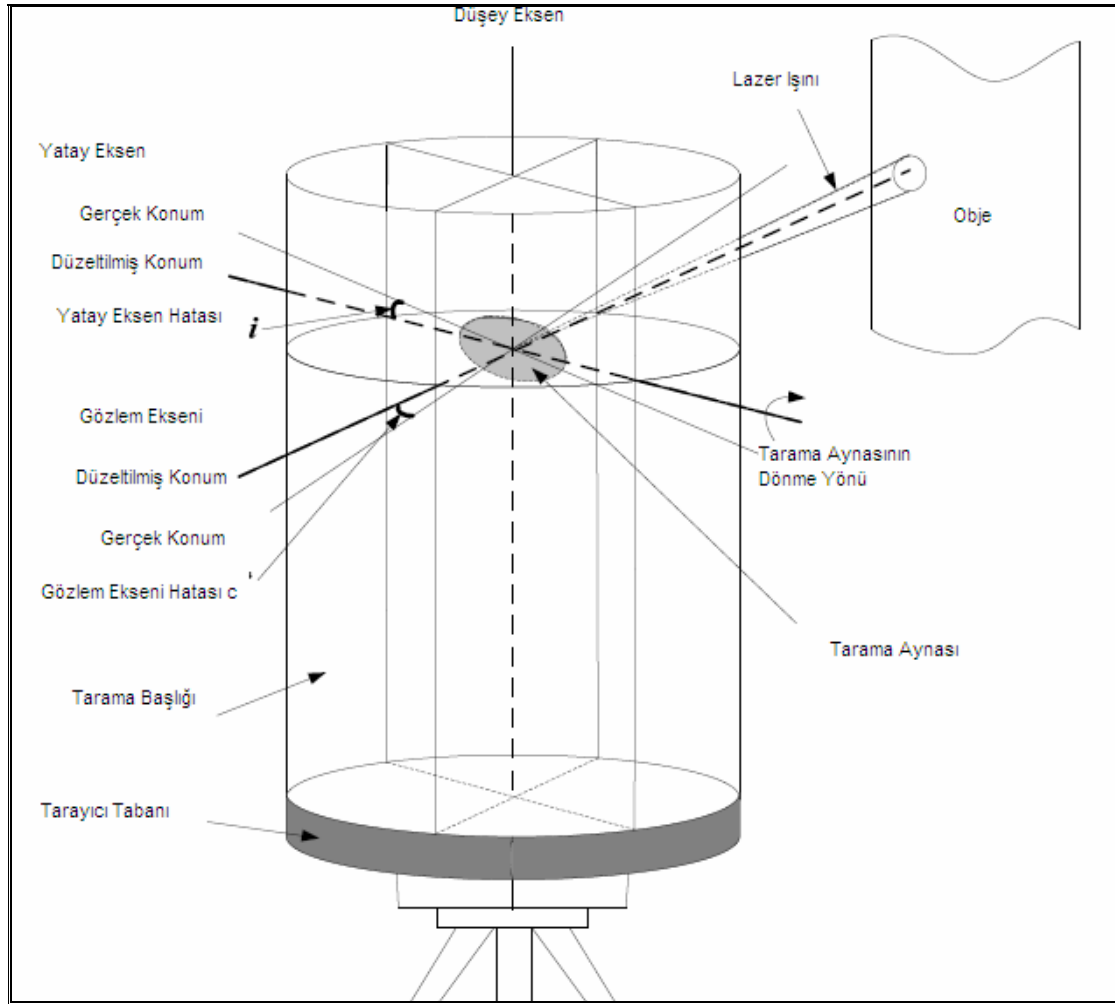
Lazer tarayıcı kalibrasyon prosedürlerinin iyileştirilmesindeki ilk basamak, tarayıcının geometrik bir modelini geliştirmektir. Lazer tarayıcıya en yakın jeodezik alet olan reflektörsüz total station, işlem prensibini elde etmek için kullanılmaktadır. Total stationun geometrik modeli, farklı mekanik tasarımlar yüzünden lazer tarayıcıya tamamiyle uygulanamamasına rağmen, tarayıcı hata modelini geliştirmede ilk adım olabilmektedir. Ticari lazer tarayıcılarla ilgili birçok araştırma, bu varsayımdan yola çıkılarak yapılmıştır. Bu nedenle, tarayıcı için şu eksenler tanımlanmaktadır (Schulz ve Ingensand, 2004b; Eriksson, 2004; Rietdorf vd. 2004; Rietdorf, 2005; Lichti ve Franke, 2005; Abmayr vd. 2005; Amiri Parian ve Gruen, 2005; Reshetyuk, 2006, ibid):

- **Düşey eksen**, panoramik tarayıcı için tarama ünitesinin yön eksenidir. Bu eksenin, düşey yönde hareket eden lazer ışınının düzleminde olması gerekir. Bu eksen Leica HDS 2500 kamera tarayıcısı için, iki karşılıklı dik dalgalı aynanın eksenine dik açılı olan eksen olarak tanımlanabilir.
- **Gözlem ekseni**, ayrılan lazer ışınını koni şeklinde yayıldığını varsayarsak, bu tarama aynasının merkezinden ve obje yüzeyindeki lazer spot merkezinden geçen eksendir. Lazer tarayıcısının yönlendirme ekseni, lazer ışını ile çakışır (Neitzel,2006).
- **Yatay eksen**, tarama aynasının yön eksenidir.

Üretim toleransları yüzünden bu eksenler mükemmel olarak aynı hizada değildirler ve sonuç olarak şu hatalar ortaya çıkar (ibid):

1. **Gözlem eksen hatası** (c) – Gözlem eksenini ile yatay eksenin birbirine dik olmaması durumudur. Gözlem eksenini ve yatay eksenleri içeren düzlemde ölçülür;
2. **Yatay eksen hatası** (i)- Aletin yatay eksen ile düşey eksenin birbirine dik olmaması durumudur. Yatay ve düşey eksenleri içeren düzlemde ölçülür.

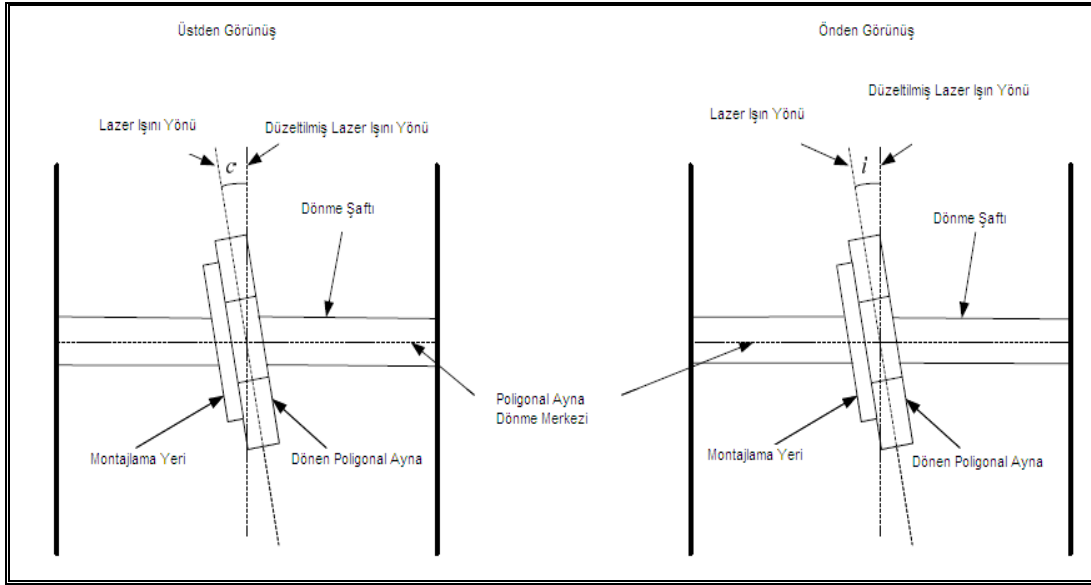
Yukarıda verilen eksenler, galvonametik bir lazer tarayıcı için aşağıdaki Şekil 6.5' de gösterilmiştir. Aynı tanımlar panoramik, poligon sal tarayıcı için geçerlidir. Tarayıcı koordinat sisteminin merkezi, alet eksenlerinin kesiştiği nokta veya tarama aynasının merkezidir (Reshetyuk, 2006).



Şekil 6.3 Mekanik Eksenler ve Lazer Tarayıcısındaki Eksen Hataları (Reshetyuk, 2006).

Gözlem ve yatay eksen hatalarının sebepleri şunlar olabilir(Marshall 2004) :

- 1) Ayna yönü ekseninin, çerçeveleme başlangıç yüzeyine dik açılı olmaması durumudur. Aynanın yön düzlemi, lazer ışını içerir. Bu mekanik yanlışlıklardan gelen hatalar, total station'daki gözlem ve yatay eksen hatalarıyla aynı değildir ama benzerlerdir.
- 2) Galvonametrik tarayıcıdaki ayna çapraz eksenlerinin yanlış dizilimidir.



Şekil 6.4 Çokgen tarayıcıların hataları (Reshetyuk, 2006).

Ticari lazer tarayıcıların gözlem ve yatay eksen hatalarının beklenen büyüklüğü hakkında bir fikre sahip olmak için birçok araştırmadan elde edilen sonuçlar, Çizelge 6.2'de özetlenmiştir.

Çizelge 6.2 Araştırmalar sonucu bulunan kolimasyon (c) ve yatay eksen hataları (i)
Reshetyuk, 2006).

Tarayıcı	Yazar(lar)	c	Std	i	Std
Imager 5003	Schulz ve Ingensand(2004b)	0.003	—	0.027	—
iQsun 880	Lichti ve Franke(2005)	0.028	0.0004	-0.054	0.0008
Imager 5003	Rietdorf(2005)	0	0	0	0
Imager 5003	Neitzel(2006)	-0.013	0.003	-0.032	0.003

Yukarıda Çizelge 6.2'de, farklı tasarıma sahip tarayıcıların yatay eksen hatasının, gözlem eksen hatasından sistemli olarak daha büyük olduğu görülmektedir. Bu demek oluyor ki yatay ve düşey eksenlerin dik açılılığını elde etmek, yatay ve gözlem eksenlerine göre çok daha zordur.

6.2 Çevresel Hatalar

Ortam sıcaklığı, basınç, bağıl nem, aydınlatma, ortamın hareketliliği yani titreme gibi çevresel faktörler lazer tarama teknolojisinde önemlidir. Bu çevresel faktörlerin değişkenliğini kontrol etmek oldukça zordur. Bu bölümde, TLS ölçümlerindeki bu faktörlerin ölçüm hatalarına etkileri açıklanacaktır (Reshetyuk, 2006):

6.2.1 Lazer Işınlарının Atmosferde Yayılımı

Yersel lazer tarama teknolojisinde, özellikle çevresel faktörlerin atmosferdeki lazer ışın yayılımı üzerine önemli etkileri vardır. Işın yayılımının etkileri, geri dönen lazer atımının şekil bozulması ve lazer ışığını zayıflaması yani yoğunluk azalımı şeklinde ortaya çıkmaktadır (Wunderlich, 2003; Ratcliffe, 2005).

Lazer ışının zayıflaması, saçılma ve emme faktörlerin sonucudur. I_R Işının zayıflaması, şu eşitliklerle açıklanır (Rueger, 1990; Reshetyuk, 2006):

$$I_R = \frac{I_0}{R^2} e^{-\gamma R} \quad (6.13)$$

I_0 ve I_R , yayılmış ve iletilmiş lazer parlaklık yoğunluğu, R lazer tarayıcıdan olan uzaklık, γ zayıflatma katsayısıdır. Zayıflatma katsayısı, aşağıdaki şekilde hesaplanır (Weichel, 1990):

$$\gamma = \alpha_m + \beta_m + \alpha_a + \beta_a \quad (6.14)$$

α ve β , emme ve saçılma katsayıları, m ve a ise hava molekülleri ve püskürtü partiküllerini gösterir. Zayıflatma derecesi şunlara dayanır:

- Lazer dalga boyu (λ)
- Objeye uzaklık
- Sıcaklık
- Basınç
- Atmosferin gaz bileşimi
- Hava şartları
- Havadaki değişik boyutlarda mikroskobik partiküllerin duruşu

Günümüzde, lazer tarayıcılarının dalga boyu uzunluğu 500–1500 nm arasındadır. Lazer tarayıcıların atmosferik zayıflama etkileri, total station veya ALS’ göre yakın mesafelerde daha azdır. Ek olarak Lazer ışının yayılımı, lazer ışığının tek renkli olmasından dolayı geleneksel kızılötesi ışığının diyetleri yayılımından daha azdır. Bu şekilde lazer ışını üzerindeki atmosferik etkiler, daha iyi bir şekilde tahmin edilebilir. Yine de atmosferik şartların etkileri, özellikle yüksek duyarlık gerektiren ölçümlerde tamamen yok sayılamaz (Price ve Uren, 1989).

6.2.2 Atmosferik Şartlar Nedeniyle Oluşan Hatalar

Lazer tarama teknolojisinde yayılan lazer ışınının yayılım hızının, doğru olarak bilinmesi gerekmektedir. Bu hız, ısı, basınç, bağıl nem ve CO₂ içeriği olan havanın kırılma indisine bağlıdır. Birçok formül, belirli ortam şartları için havanın kırılma indisi belirtimi üzerine geliştirilmiştir. Aşağıdaki eşitlik, görünen ve yakın kızılötesi bölgesi için verilmiştir (Rueger, 1990):

$$(n_{prop} - 1) = (n_{stand} - 1) \frac{273.15 p}{(273.15 + t) 1013.25} - \frac{11.27 \cdot 10^{-6}}{(273.15 + t)} p_w \quad (6.15)$$

n_{prop} , özel durumlar için kırılma indisi grubudur (t (°C), p (mbar), p_w (mbar)). n_{stand} , standart şartlar için kırılma indisi grubudur ($t = 0^\circ\text{C}$, $p = 1013,25$ mbar ve 300 pw olarak alınmaktadır).

$$10^6 (n_{stand} - 1) = 287.604 + 3.1,6288\sigma^2 + 5.0,0136\sigma^4 \quad (6.16)$$

$\sigma = 1 / \lambda$ dalga numarasıdır ve dalga boyu(λ) mikrometre olarak verilir. n_{prop} , formül (6.15) ile hesaplanmış ve toplam doğruluğu 1 ppm’in içerisinde. Genelde, havanın kırılma indisi doğruluğu, atmosferik şartların belirtilimindeki kesinsizlik yüzünden sınırlıdır. Lazer tarayıcıların uzunluk ölçme işlemleri, genellikle kısa veya birkaç yüz metreye kadar olan mesafeler için geçerlidir. Hava kırılma indisinin hesabı için uygun eşitlik, daha fazla esnekliği veren daha uzun mesafeler için verilmelidir.

n_{prop} , hava kırılma indisi grubuna ve ölçülmüş uzunluk r ’ye göre, ilk hız düzeltmesi aşağıdaki formülle hesaplanır (ibid, Reshetyuk, 2006):

$$\Delta r_{refr.ind} = \frac{n_{ref} - n_{prop}}{n_{prop}} r \quad (6.17)$$

n_{ref} , tarayıcı tarafından kullanılan hava sapma indisi referansıdır. Bu değer, belirli bir tarayıcı için yazılımda kullanılan atmosferik parametrelerin varsayılan değerleri kullanılarak hesaplanabilir. Cyclone yazılımındaki değerler sırasıyla sıcaklık ve basınç için, 20°C ve 1013,25 mbar'dır.

Atmosferik türbülansın etkileri altında değişen hava kırılma indisinden de bahsedilmelidir. Yani rüzgâr hareketleri sonucu ortaya çıkan sıradan ortam ısı dalgalanmalarından hava yoğunluk dalgalanmaları ortaya çıkmaktadır (Weichel, 1990). Kırılma indisi dalgalanmaları şu eşitlikle verilebilir (ibid) :

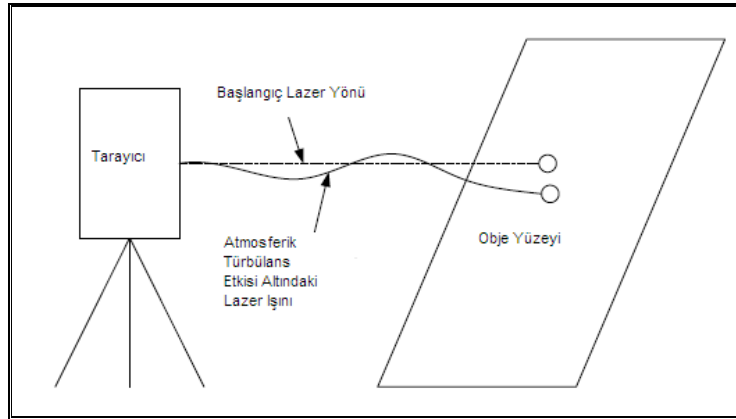
$$\delta_n = \frac{79 \cdot 10^{-6} p}{(\gamma - 1) T^2} \delta T \quad (6.18)$$

$\gamma = 1.4$ hava için, T = Kelvin derecelerindeki ısı, p = milibar cinsinden basınç ve δT = ısı dalgalanmasıdır.

Havada yayılan lazer ışınlarını etkileyen kırılma ve atmosferik türbülans etkilerinden başka, diğer bir etki ise lazer ışının farklı sıcaklıktaki hava içerisinde yayılmasıdır. Bu faktörün etkisi örneğin endüstriyel ortamlarda dikkate alınmalıdır. Atmosferik türbülans 1 km'ye kadar mesafelerde TLS ölçümleri üzerinde şu etkilere sahiptir (Price ve Uren, 1989; Weichel, 1990; Reshetyuk, 2006):

1) Işın Gezinmesi

Başlangıç yayılma yönüne göre, ışın yönünün değişmesidir:



Şekil 6.5 Işın gezinmesi (Weichel 1990).

Lazer ışını, izlemesi gereken yoldan gelişigüzel yönde sapar ve lazer spot çapı sabit olarak

kalır. Lazer ışın geziniminin ırsal değışikliği $\sigma_{r_gezinim}^2$, aşağıdaki formülle ifade edilir.

$$\sigma_{r_gezinim}^2 = 1.83.C_n^2 \lambda^{-1/6} R^{17/6} \quad (6.19)$$

λ lazer dalga boyudur, R objenin uzaklığıdır ve C_n türbölansın büyüklüğüne dayanan kırılma indisinin yapı katsayısıdır

Çizelge 6.3 Farklı atmosferik türbölans için C_n 'nin tipik değeri

Güçlü türbölans	$5 \cdot 10^{-7}$
Orta türbölans	$4 \cdot 10^{-8}$
Zayıf türbölans	$8 \cdot 10^{-9}$

2) Işın Yoğunluk Dalgalanmaları (Işın Parıldaması)

Gaussian (wavefront) bozulumu, dağılma ve kırılma ile ortaya çıkar. Lazer spotun, ufak sıcak spotlara kırılıp ayrılmasıyla sonuçlanır. Parıldama yer yüzeyi tipine ve alet boyuna bağlıdır (Price ve Uren, 1989).

TLS ölçümlerindeki ortam ısısı etkisi üzerine, bazı başka gözlemler yapılabilir. Lazer tarayıcılar, belli sıcaklıklar arasında tarama işlemi gerçekleştirmektedir. Ortamın sıcaklığı, bu sıcaklık değeriinin dışında veya hatta sınıra yakın bir değeri olsa dahi tarayıcının düzgün çalışmasını engellemektedir. Sıcaklığın tarayıcılar üzerine etkilerinin araştırıldığı bir çalışmada, sıcaklığın 0°C'den çok az yüksek olduğu bir ortamda, Leica HDS 2500 tarayıcısının çalışmadığı gözlenmiştir. Ayrıca, sıcak havada tarayıcıyı gölgelemek önemlidir. Böylece direkt gün ışığının tarayıcının sıcaklığını artırması, engellenmiş olur (Leung ve Wan, 2004).

6.2.3 Kötü Hava Koşullarının TLS Ölçümlerine Etkisi

Yukarıdaki bölümde, normal ortam koşulları altında, lazer tarayıcıların çalıştırılması gerektiği belirtilmiştir. Durum kötü ortam koşullarında karşılaşıldığında farklıdır. Kötü hava koşulları, veri kalitesini büyük miktarda azaltır. TLS içeriğinde bu koşullar pus, sis ve yağmurdur. Özellikle soğuk ortam koşulları ve karlı ortamlardan bahsedilmeyecektir. Çünkü birçok lazer tarayıcı, birkaçı haricinde (0)⁰ altında çalışmazlar. Sıfırın altında çalışabilen lazer tarayıcılara

örnek olarak Riegl LMS -210i verilebilir.

Lazer ışınının atmosferde yayılımının sinyal zayıflatıcısındaki sonuçları, formül (6.20)' deki zayıflatma katsayıları tarafından tanımlanan etkidir. Deniz seviyesindeki 100 m uzunluk için, 500–1500 nm dalga boyu mesafesi içerisinde normal atmosferik koşullar için, zayıflatma katsayısı 0.21 den 0.16 ya değişir. Pus, sis ve yağmurda zayıflatmanın ana sebebi dağılımdır. Pus ve sis için havada bulunan partiküller, lazer dalga boyu ile orantılıdır. Pus ve sis mevcudiyeti, zayıflatma katsayısının önemli derecede arttırmaya neden olur. Örneğin orta pusu için zayıflatma katsayısı yukarıda bahsedilen dalga boyu mesafesinde 0.85 ve 0.47 arasında değişir. Zayıflatma, siste daha güçlü olacaktır. Yağmurdaki zayıflatma, yağış miktarının oranına bağlı olacaktır

Taramada kötü ortam koşullarında şu problemler oluşur (Grandham, 1999; Reshetyuk, 2006):

- **Ayrılma pikselleri** – Dönen lazer atımı, alıcıyı tetiklemede çok zayıf olduğunda oluşur. Sıfır veya maksimum uzunluk değeri, bu piksel için kaydedilir. Bu yaklaşım açıkça zayıflatma ile ilgilidir.
- **Yanlış dönüşler** – Lazer ışını havadaki düşen yağmur damlaları, duman veya sis tarafından dağıtıldığında oluşur ve alıcıyı tetikleyecek kadar genişir. İletilen lazer enerjisinin bir kısmı partiküler tarafından ve kalanlar obje yüzeyinden yansıtılır. Bu çoklu dönüş atımlarında sonuçlanır. Şiddetli yağmurda yanlış dönüş miktarı oldukça artar ve veri oldukça kirlenir. Bu yaklaşıma, çoklu alan etkisi de denir. Bu ayrıca toz ve buharın olduğu ortamlarda da ortaya çıkabilir.

6.3 Objeye İlgili Hatalar

Bu hatalar grubu, taranmış objeye alakalıdır. Bu hataların en önemli kaynağı, obje yüzeyinin yansırılığıdır. TLS'nin yansıtmasız ölçüm tekniği olmasından dolayı, uzunluk ölçümlerinin sonuçlarını ve SNR'yi büyük ölçüde etkileyen nedenlerin, yansırılığa dayandığı vurgulanabilir. Yansırılık, yansıtılan ve lazer gücü arasındaki oran olarak tanımlanmıştır ve aşağıdaki faktörlerin fonksiyonudur (Nayar vd. 1989; Jelalian, 1992; Matta, 1993; Lichti ve Harvey, 2002; Ingensand, 2003; Ingensand, 2006; ibid; Reshetyuk, 2006):

- 1) Objenin materyal özellikleri, elektrik geçirgenliği, manyetik geçerliliği ve iletkenliği
- 2) Yüzey rengi
- 3) Lazerin dalga boyu

- 4) Lazer ışınının geliş açısı. Ölçülen uzunluk standart sapması, geliş açısının artımında azalmaktadır
- 5) Yüzey pürüzlülüğü (Dalga boyu ve geliş açısına bağlıdır)
- 6) Yüzeyin sıcaklığı. Tarama, örnek olarak endüstriyel ortamdaki sıcaklığı yüksek objeler üzerinde yapıldığı zaman, ortamdaki radyasyon, SNR'yi ve uzunluk ölçme duyarlılığını azaltmaktadır.
- 7) Yüzeyin nemi.

Yansıtılmış lazer yoğunluğu ve yüzey yansırılığı arasındaki ilişki, formül (6.20)'deki Lambertian yansırılık modeli ile tanımlanmaktadır.

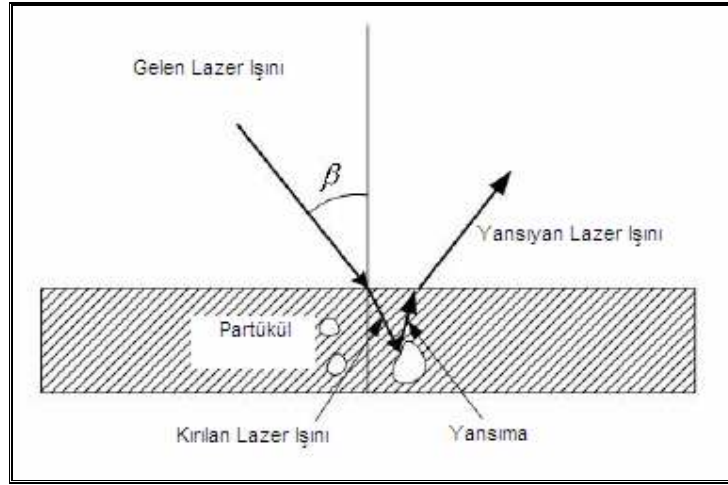
$$I_{\infty} \frac{\rho \cos \beta}{R^2} \quad (6.20)$$

I yansıtılan lazer ışınının yoğunluğu, ρ yüzeyin yayılmış yansıma katsayısı, β ışın geliş açısı ve R objenin uzunluğudur. Lambertian modeli, yayılım yansırılıklarını tanımlamak için uygundur. Farklı yansırılıktaki yüzeyler ölçülen uzunluktaki ofsetlerle tanıtılırlar. Yüzey yansırılığı üzerindeki lazer telemetresi tarafından ölçülen uzunluğun bu bağımlılığına uzunluk/yansırılık karışması denir (Hebert ve Krotkov 1992). Yüksek yansırılıklı yüzeyler (parlak), lazer enerjisinin daha geniş bir parçasını yansıttığı için, düşük yansırılıklı yüzeylerden daha güvenilir ve duyarlı uzunluk ölçümleri verirler. Yüksek yansırılıkla ölçülmüş yüzeylerin uzunluk duyarlılığı, yüzeye mesafesi ile çok fazla değişmez. Eğer obje yansırılığı çok yüksekse (metal yüzeyler, uyarıcı renkler, yüksek yansırılıklı bantlar vb.) veya çok düşükse, uzunluk tamamıyla kaydedilmeyebilir veya kabul edilemez bir doğrulukla kaydedilir. Yüzey yansırılığı, lazer dalga boyuyla ilgilidir. Farklı dalga boylarında taranmış farklı materyallerin yüzey yansırılığı farklı olacaktır (Reshetyuk, 2006).

Yüzeyin yansırılık özellikleri, sadece ölçülmüş uzunluğun güvenilirliği değil aynı zamanda maksimum uzunluk ölçütlerini de belirler. Maksimum uzunluk ölçümleri, üretici firmalar tarafından, tarayıcıların genel özelliklerinde belirtilmektedir. Yansıtmanın yanında, bir lazer ışını taranacak objenin materyaline bağlı olarak değişik yol izleyebilir. Lazer ışını, bazı materyallere işleyebilir (örneğin tahta, mermer) ya da materyalin kendi içinde yansıyabilir veya materyal lazer ışığını kırabilir (Ingensant, 2003). Bu gibi faktörlerin çeşitli etkileri, sistematik hatalara neden olacaktır. Yersel lazer taramayla elde edilen uzunluk doğruluğuna yüzey yansımasının etkisi, birkaç mm civarındadır (ibid; Reshetyuk, 2006).

TLS 'deki ölçümleri etkileyen objeyle ilgili ek faktörler şunlardır (Staiger, 2005; Ingensand, 2006):

- Boyut
- Eğim
- Yönlendirme



Şekil 6.6 Gelen, kırılan ve yansıyan lazer ışının obje yüzeyindeki yansıması (Ingensand, 2003).

6.4 Metodolojik Hatalar

Bu hatalar metodolojik araştırmalara rağmen, görünen hataları kapsamaktadır. Bu bölümde, doğrudan ve dolaylı nokta bulutlarının konumlandırılması (jeoreferanslanması) ile ilgili çeşitli araştırmalardan elde edilmiş hatalar açıklanacaktır.

6.4.1 Dolaylı Konumlandırma (Jeoreferanslandırma) İçin Metodolojik Hatalar

Kontrol ve bağlantı noktalarını temel alan açıklamalar, daha önceki bölümlerde tanımlanmıştır. Bu bölümde, ilk iki dolaylı jeoreferanslandırma yaklaşımı için hata yayılımından bahsedilmiştir. Konu ile ilgili tanımlanan benzer eşitlikler ve eşitliklerde kullanılan bilinmeyenler aşağıda açıklanmıştır (Balis, 2004; Reshetyuk, 2006):

X_i — Belirli her bir tarama için, tarayıcının koordinat sistemindeki nokta bulutu içerisindeki nokta koordinatlarının vektörü,

X_g — Global sistem içerisindeki nokta koordinatlarının vektörü,

X_e — Dış koordinat sistemi içerisindeki nokta koordinatlarının vektörü,

R_{ig}, R_{ge}, R_{ie} dönme matrisleri yani, sırasıyla, global ve tarayıcı arasındaki, global ve dış, tarayıcı ve dış sistemdeki x,y,z koordinat eksenin $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ dönme açılarının fonksiyonları,

$\Delta X_{ig}, \Delta X_{ge}, \Delta X_{ie}$ sırasıyla, tarayıcı ve global arasındaki, global ve dış sistem arasındaki, tarayıcı ve dış sistem arasındaki öteleme parametrelerinin vektörü,

μ , tarayıcı ve dış sistem arasındaki ölçek faktörüdür.

Tarayıcı sistemi içerisindeki i. noktanın, X_i koordinat vektörü ve varyans-kovaryans matrisi C_{Xi} , aşağıdaki eşitlikte verilmiştir (Gordon ve Lichti, 2004; Reshetyuk, 2006):

$$X_i = \begin{bmatrix} x_j \\ y_j \\ z_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_j \cos \varphi_j \cos \theta_j \\ r_j \sin \varphi_j \cos \theta_j \\ r_j \sin \theta_j \end{bmatrix} \quad (6.21)$$

$$C_{Xi} = JC_{inst}J^T = \begin{bmatrix} \frac{\partial x_j}{\partial r_j} & \frac{\partial x_j}{\partial \varphi_j} & \frac{\partial x_j}{\partial \theta_j} \\ \frac{\partial y_j}{\partial r_j} & \frac{\partial y_j}{\partial \varphi_j} & \frac{\partial y_j}{\partial \theta_j} \\ \frac{\partial z_j}{\partial r_j} & \frac{\partial z_j}{\partial \varphi_j} & \frac{\partial z_j}{\partial \theta_j} \end{bmatrix} \left[\sigma_r^2 + \sigma_{ışın}^2 \right] \begin{bmatrix} \frac{\partial x_j}{\partial r_j} & \frac{\partial x_j}{\partial \varphi_j} & \frac{\partial x_j}{\partial \theta_j} \\ \frac{\partial y_j}{\partial r_j} & \frac{\partial y_j}{\partial \varphi_j} & \frac{\partial y_j}{\partial \theta_j} \\ \frac{\partial z_j}{\partial r_j} & \frac{\partial z_j}{\partial \varphi_j} & \frac{\partial z_j}{\partial \theta_j} \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} \sigma_x^2 & \sigma_{x_j y_j} & \sigma_{x_j z_j} \\ \sigma_{y_j x_j} & \sigma_{y_j}^2 & \sigma_{y_j z_j} \\ \sigma_{z_j x_j} & \sigma_{z_j y_j} & \sigma_{z_j}^2 \end{bmatrix} \quad (6.22)$$

Yukarıda bahsedilen eşitlikler r_j, φ_j, θ_j sırasıyla nokta bulutu içerisindeki i. noktanın ölçülen uzunluğu, yatay doğrultusu ve düşey açısıdır. $\sigma_r^2, \sigma_\varphi^2, \sigma_\theta^2$ örnek olarak üretici firmalarca hesaplanan değerlerden ve $\sigma_{ışın}$ ise, ışın genişliğindeki belirsizliğe rağmen formül (6.8) 'e göre hesaplanmıştır.

- Dönüşüm $X_i \rightarrow X_g$:

$$X_g = \Delta X_{ig} + R_{ig} X_i \quad (6.23)$$

- X_g koordinatlarının varyans-kovaryans matrisleri aşağıdaki eşitlik (6.34)'deki gibidir.

$$C_{X_g} = J_p^{ig} C_p^g (J_p^{ig})^T + R_{ig} C_{Xi} R_{ig}^T \quad (6.24)$$

C_p^g , tarayıcı ve global sistem arasındaki $P_{ig} = [\Delta X_{ig}^T \quad \alpha_1 \quad \alpha_2 \quad \alpha_3]^T$ Helmert dönüşüm parametrelerinin varyans-kovaryans matrisi ve J_p^{ig} ise, aşağıdaki eşitlikteki gibidir.

$$J_p^{ig} = \frac{\partial X_g}{\partial p_{ig}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial X_g}{\partial \Delta X_{ig}} & \frac{\partial X_g}{\partial \Delta Y_{ig}} & \frac{\partial X_g}{\partial \Delta Z_{ig}} & \frac{\partial X_g}{\partial \alpha_1} & \frac{\partial X_g}{\partial \alpha_2} & \frac{\partial X_g}{\partial \alpha_3} \\ \frac{\partial Y_g}{\partial \Delta X_{ig}} & \frac{\partial Y_g}{\partial \Delta Y_{ig}} & \frac{\partial Y_g}{\partial \Delta Z_{ig}} & \frac{\partial Y_g}{\partial \alpha_1} & \frac{\partial Y_g}{\partial \alpha_2} & \frac{\partial Y_g}{\partial \alpha_3} \\ \frac{\partial Z_g}{\partial \Delta X_{ig}} & \frac{\partial Z_g}{\partial \Delta Y_{ig}} & \frac{\partial Z_g}{\partial \Delta Z_{ig}} & \frac{\partial Z_g}{\partial \alpha_1} & \frac{\partial Z_g}{\partial \alpha_2} & \frac{\partial Z_g}{\partial \alpha_3} \end{bmatrix} \quad (6.25)$$

• Dönüşüm $X_g \rightarrow X_e$:

$$X_e = \Delta X_{ge} + \mu R_{ge} X_g \quad (6.26)$$

Formül(6.26) ve Formül (6.23) birleşimi aşağıdaki gibidir.

$$X_e = \Delta X_{ge} + \mu R_{ge} (\Delta X_{ig} + R_{ig} X_i) \quad (6.27)$$

X_e koordinatlarının varyans-kovaryans matrisi, aşağıdaki gibi ifade edilmiştir.

$$\begin{aligned} C_{X_e} &= J_p^{ge} C_p^e (J_p^{ge})^T + \mu^2 R_{ge} C_{X_g} R_{ge}^T = \\ &= J_p^{ge} C_p^e (J_p^{ge})^T + \mu^2 R_{ge} (J_p^{ig} C_p^g (J_p^{ig})^T + R_{ig} C_{Xi} R_{ig}^T) R_{ge}^T \end{aligned} \quad (6.28)$$

J_p^{ge} ise,

$$J_p^{ge} = \frac{\partial X_e}{\partial p_{ge}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial X_e}{\partial \Delta X_{ge}} & \frac{\partial X_e}{\partial \Delta Y_{ge}} & \frac{\partial X_e}{\partial \Delta Z_{ge}} & \frac{\partial X_e}{\partial \alpha'_1} & \frac{\partial X_e}{\partial \alpha'_2} & \frac{\partial X_e}{\partial \alpha'_3} \\ \frac{\partial Y_e}{\partial \Delta X_{ge}} & \frac{\partial Y_e}{\partial \Delta Y_{ge}} & \frac{\partial Y_e}{\partial \Delta Z_{ge}} & \frac{\partial Y_e}{\partial \alpha'_1} & \frac{\partial Y_e}{\partial \alpha'_2} & \frac{\partial Y_e}{\partial \alpha'_3} \\ \frac{\partial Z_e}{\partial \Delta X_{ge}} & \frac{\partial Z_e}{\partial \Delta Y_{ge}} & \frac{\partial Z_e}{\partial \Delta Z_{ge}} & \frac{\partial Z_e}{\partial \alpha'_1} & \frac{\partial Z_e}{\partial \alpha'_2} & \frac{\partial Z_e}{\partial \alpha'_3} \end{bmatrix}, \quad (6.29)$$

yukarıdaki (6.29) eşitliğindeki gibidir. C_p^e dış ve global sistem arasındaki

$p_{ge} = [\Delta X_{ge}^T \quad \mu \quad \alpha'_1 \quad \alpha'_2 \quad \alpha'_3]^T$ dönüşüm parametrelerinin varyans-kovaryans matrisidir

(Gordon ve Licht, 2004; Reshetyuk, 2006).

İkinci dolaylı jeoreferans yaklaşımı, ara registration adıdır. Bütün nokta bulutlarının doğrudan dış koordinat sistemine dönüşümü aşağıdaki gibidir.

$$X_e = \Delta X_{ie} + \mu R_{ie} X_i \quad (6.30)$$

X_e koordinatlarının varyans-kovaryans matrisi;

$$C_{X_e} = J_p^{ie} C_p^{ie} (J_p^{ie})^T + \mu^2 R_{ie} C_{X_i} R_{ie}^T \quad (6.31)$$

J_p^{ie} ise

$$J_p^{ie} = \frac{\partial X_e}{\partial p_{ie}} \begin{bmatrix} \frac{\partial X_e}{\partial \Delta X_{ie}} & \frac{\partial X_e}{\partial \Delta Y_{ie}} & \frac{\partial X_e}{\partial \Delta Z_{ie}} & \frac{\partial X_e}{\partial \alpha''_1} & \frac{\partial X_e}{\partial \alpha''_2} & \frac{\partial X_e}{\partial \alpha''_3} \\ \frac{\partial Y_e}{\partial \Delta X_{ie}} & \frac{\partial Y_e}{\partial \Delta Y_{ie}} & \frac{\partial Y_e}{\partial \Delta Z_{ie}} & \frac{\partial Y_e}{\partial \alpha''_1} & \frac{\partial Y_e}{\partial \alpha''_2} & \frac{\partial Y_e}{\partial \alpha''_3} \\ \frac{\partial Z_e}{\partial \Delta X_{ie}} & \frac{\partial Z_e}{\partial \Delta Y_{ie}} & \frac{\partial Z_e}{\partial \Delta Z_{ie}} & \frac{\partial Z_e}{\partial \alpha''_1} & \frac{\partial Z_e}{\partial \alpha''_2} & \frac{\partial Z_e}{\partial \alpha''_3} \end{bmatrix} \quad (6.32)$$

yukarıdaki (6.32) eşitliğindeki gibidir. Burada C_p^{ie} , tarayıcı ve dış sistemler arasındaki

$p_{ie} = [\Delta X_{ie}^T \quad \mu \quad \alpha''_1 \quad \alpha''_2 \quad \alpha''_3]^T$ dönüşüm parametrelerinin varyans-kovaryans matrisidir.

Konumlandırma (jeoreferanslama) için dönüştürülmüş 3B nokta koordinatları duyarlılığı, kullanılan kontrol noktaları geometrisine bağlı olan koordinat sistemleri arasındaki Helmert dönüşüm parametreleri duyarlılıklarına bağlıdır (Gordon ve Lichti, 2004; Harvey, 2004; Reshetyuk, 2006);

Dönüşümün duyarlılığı, kontrol noktaları aynı doğrultuda oldukları zaman veya tarayıcıdan uzağa konumlandırıldıklarında zayıflar. Aynı doğrultuda olan konfigürasyonlarda, hedefler tarafından formlanan çizgilerin ışın yönüne paralel olmasının etkileri, dik açılı olmasından daha büyüktür. Yani hedeflerin tarayıcı görüş alanı üzerinden veya kesişen tarama bölgesi içerisinden dağıtılamaması, sonuçları olumsuz yönde etkiler. Düşey hedef dağıtımı jeoreferanslama kalitesi üzerinde ufak bir etkiye sahiptir. Sabit olarak hedefler, tarayıcı görüş alanı içerisinde, tamamını kapsayacak şekilde dağıtılmalıdır (Tait, 2004). Gereken 3 minimum hedef sayısı üzerindeki artış, dördüncü hedefi ekledikten sonra önemli olmamasına rağmen jeoreferanslama kalitesini artırır. Daha fazla hedeflerin kullanılması, bunların koordinatlandırılması için daha fazla ölçüm işi gerektirir. Yine de ekstra hedefler, kontrol

noktası olarak jeoreferanslamanın bağımsız kalite kontrolü için kullanılabilir (ibid; Reshetyuk, 2006).

Dolaylı jeoreferanslamada hedefin tespit merkezi, hedefin kaplanan yüzeyinden dönen lazer ışınlarının sayısından hesaplanır. Bu tespit işinde karşılan problemler, hedef azaltma hatasını ortaya çıkaracaktır. Bu hata, örnekleme çözünürlüğüne ters orantılıdır. Günümüzde yaygın olarak çeşitli uygulamalar için düz ve küresel hedefler kullanılmaktadır (Gordon ve Lichti, 2004; Reshetyuk, 2006).

6.4.2 Doğrudan Jeoreferanslamada Metotsal Hatalar

Doğrudan jeoreferanslama girişiminde tarayıcı pozisyonu ve yönelimi, bağımsız olarak tespit edilir. Nokta bulutundaki tüm noktaların koordinatları, dış sistemde hemen elde edilir. Tarayıcı, duyarlılıkla düzeçlenebilir, bilinen bir kontrol noktasına yerleştirilebilir ve yüksekliği ölçülebilir. Alternatif olarak tarayıcı konumu (önceden duyarlılıkla düzeçlenmiş olan), bir total istasyon veya GPS alıcısıyla tespit edilebilir. Tarayıcının yönelimi, şu şekillerde tespit edilebilir (Lichti ve Gordon, 2004):

1. Eğer tarayıcı bir optik çekülle donatılmışsa, koordinatları bilinen bir kontrol noktasının üzerine kurulabilir.
2. Tarama işlemi sırasında, yüksek çözünürlükte koordinatları dış sistemde belirlenmiş olan hedeflerin otomatik olarak kullanılmasıyla, tarayıcının konumu belirlenir

Nokta bulutunun bir noktasının dış sistemdeki koordinatları, şu şekilde elde edilir:

$$X_e = X_{tarayıcı} \mu R_{ie}(\alpha_3) X_i \quad (6.33)$$

$X_{tarayıcı}$, dış koordinat sistemindeki tarayıcı koordinat sistem merkezinin koordinatları, μ ölçek faktörü ve $R_{ie}(\alpha_3)$ iki sistem arasındaki yön matrisidir. Aşağıda, doğrudan jeoreferanslama için veri kalitesini etkileyen hata stokunun açıklaması verilmiştir (Reshetyuk, 2006; ibid):

1) Tarayıcının Konumunun ve Kullanılan Hedeflerin Koordinatlarının Tespit Duyarlılığı

Bu değişim, kovaryans matrisleri ($C_{tarayıcı}$) ile açıklanabilir. $C_{tarayıcı}$ matrisi, tarayıcı konumun nasıl tespit edildiğine dayanarak, iki farklı yolla hesaplanabilir. Eğer tarayıcı bilinen bir noktaya merkezlenmişse ve boyu çelik metre ile ölçülmüşse, $C_{tarayıcı}$ matrisi şu şekilde elde edilir (Scaioni, 2005) :

$$C_{tarayıcı} = C_O + C_H \quad (6.34)$$

C_O , tarayıcının merkezlendiği yer üzerindeki, nokta merkezi koordinatlarının değişim-kovaryans matrisidir. C_H , istasyon noktasına göre tarayıcı düşey pozisyonunun değişim-kovaryans matrisidir:

$$C_H = diag(0, 0, \sigma_H^2). \quad (6.35)$$

Burada σ_H , aletin boyunun çelik metre ile tespitindeki hatadır. Eğer tarayıcı konumu total istasyonla tespit edilmişse $C_{tarayıcı}$ matrisi, total istasyonla ölçülmüş eğik uzunluklar, düşey açılar ve yatay doğrultu hatalarının dağıtılmasıyla elde edilebilir.

2) Tarayıcı İstasyonundan Hedeflere Göre Olan Azimut(α_3) Duyarlılığı

$$\sigma_{\alpha_3} = \pm \frac{\sqrt{2\sigma_{hor}}}{d_{0-Bs}} [rad] \quad (6.36)$$

σ_{hor} , tarayıcı istasyonunun koordinatlarının ve arka kısım hedef istasyonu koordinatlarının duyarlılığıdır. d_{0-Bs} , hedef ve tarayıcı arasındaki mesafedir. Tarayıcı ve arka kısım hedef istasyonunun karşılıklı ilişkisi olmadığı varsayılır.

3) Kurulum Hataları

• Tarayıcı Düzeyleme:

$$\sigma_{lv} = \pm 0.2v \quad \text{düşey açıdaki hata} \quad (6.37)$$

$$\sigma_{lh} = \pm \sigma_{lv} \tan \theta \quad \text{yatay açıdaki hata} \quad (6.38)$$

v , tarayıcı düzey kabarcığının veya ikili-eksen denkleştiricisinin hassaslığıdır ve θ , ölçülmüş düşey açıdır.

• Tarayıcı ve Hedefinin Optik Merkezlenmesi

$$\sigma_{cent} = \pm \frac{\sqrt{2\sigma_{oc}}}{d_{0-Bs}} [rad] \quad (6.39)$$

σ_{oc} , optik ağırlığın merkezleme duyarlılığıdır. Hedef merkezlenmemişse, örneğin düz bir hedef yüzeye konumlandırıldığında, hata hedef için ortaya çıkmayacaktır.

- **Hedefe Yöneltilme:**

$$\sigma_{nokta} = \pm \frac{60''}{M} \quad (6.40)$$

M, kamera büyültme gücüdür. Doğrudan konumlandırmada yöneltilme hatası, sadece yatay yöne etki eder.

7. YERSEL LAZER TARAYICILARIN KULLANIM ALANLARI

7.1 Ulaşım ve Altyapı Uygulamaları

Ulaşım ve altyapı sektöründe yersel lazer tarayıcıların kullanılması ve ölçme verilerinin toplanması, sağlık, güvenlik ve zaman kısıtlamaları konuları ile ilgilidir. Ulaşım ağında yaygın olarak karşılaşılan sorunları çözmek için ihtiyaç duyulmaktadır. Yersel haritalama ve onun uygulamalarında, ilgili veriler direkt olarak toplanamamakta ve çalışmalar uzun zaman gerektirmektedir. Lazer tarama sistemleri demiryolu ve karayolu yapılarının nitelikli yönetiminde ve ölçme işlemlerinde etkili bir şekilde kullanılmaktadır. Lazer tarama da kullanılan aletler, hava lazer ölçmeleri ile birleştirilerek taranacak bölgenin tüm detayları elde edilmektedir. Kullanılan özel yazılımlar, taramalar sonucu elde edilen çeşitli verilerin çeşitli şekilde gösterimi, görselleştirme, modelleme, nokta bulutu verisinden direkt ölçme işlemi ya da kesit çıkarılmasına izin verir (www.3dlasermapping.com).



Şekil 7.1 Ulaşım ve altyapı uygulama örnekleri

7.2 Mimari ve Bina Ölçme Uygulamaları

Mimarlar tarafından, lazer taramalar sonucu elde edilen 3 boyutlu veriler yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Yersel lazer tarayıcılar geniş görüş alanı, yüksek doğruluklu lazer verisi ile yüksek çözünürlüklü sayısal renkli fotoğrafların birleştirilmesi imkânının olması sayesinde mimari ve bina ölçme uygulamaları için ideal yöntemlerden biridir. Elde edilen veri, gerçeğe yakın, 3 boyutlu bir veridir. Lazer verilerin nokta bulutlarından CAD ortamına transferi, sanal modeller, düzeltilmiş ortofotolar, yakın geçmişe göre, hızlı gelişme göstermektedir. Taramalar sonucu elde edilen gerçeğe yakın 3 boyutlu veri ve geliştirilen yazılımların kullanıcılara

sunduğu çeşitli çözümler, mimari uygulamalar için yeni verilerin üretilmesi imkânını sağlar. Devamlı gelişen yazılımlar, taranan obje veya alanın, yatay ve düşey kesit bilgileri, alan ve hacim hesapları, konum bilgileri (x,y,z) sorgulama vb. gibi bilgiye ulaşmamıza imkân verir. Bu bilgilerden yararlanılarak, mevcut durumun çıkartılması, projeye uygunluğunun kontrol edilmesi gibi pek çok olanak sağlar (www.3dlasermapping.com).



Şekil 7.2 Mimari ve bina ölçme uygulama örnekleri

7.3 Kıyı Uygulamaları

Son birkaç yıldır kıyı bölgelerin izlenmesi, yeni bir ölçme teknolojisi olan, yersel lazer tarama teknolojisi kullanılarak yapılmaktadır. Bu teknolojiye kullanılan yersel lazer tarayıcılar, çeşitli özelliklere sahiptir. Doğruluk ve duyarlılığı tarayıcıdan tarayıcıya değişmektedir. Elde edilen tarama verilerin doğruluğu ve yapılan işler için, kullanılan tarayıcıların özellikleri önemlidir. Kıyı uygulamalarında özellikle, erozyon, sahil yüzeyi izlenmesi, sel tahminleri, detaylı sel bölgesi haritalama, geo-teknik çalışmalar, erişilemeyen bölgelerin ölçme işlemleri, yüksek riskli heyelan bölgelerinde sürekli şev izlenmesi, kıyı planlanması, 3 boyutlu görselleştirme, kazı ve dolgu uygulamalarında hacim hesaplamaları gibi birçok alanda yersel lazer tarama teknolojisinden yararlanılmaktadır. Bu uygulamalarda, elde edilen verinin kontrolü, yerel ve ulusal koordinat sistemine göre olmaktadır. Ayrıca, bu teknolojiden elde edilen veriler, GPS ve diğer ölçme yöntemlerinden elde edilen veriler ile karşılaştırılarak, verilerin doğruluk ve duyarlılığı hakkında fikir edinmemizi de sağlamaktadır (www.3dlasermapping.com).



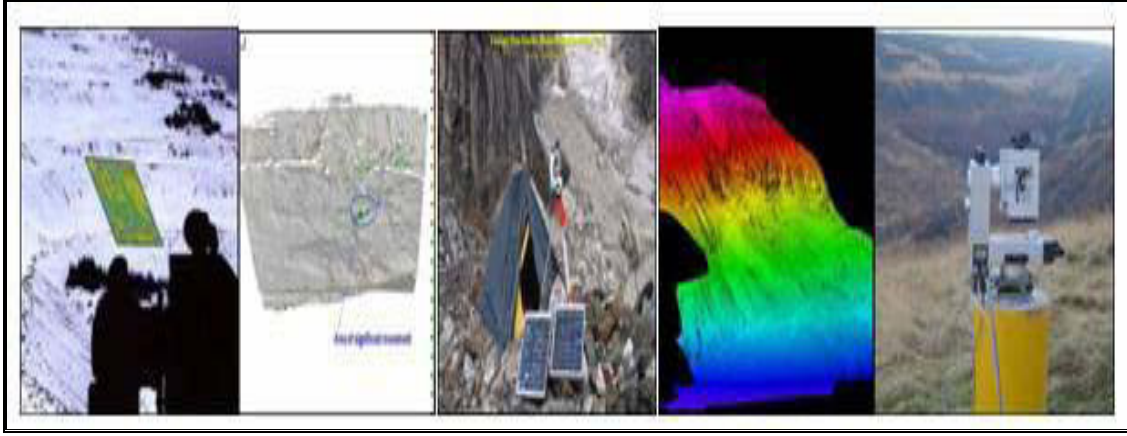
Şekil 7.3 Kıyı uygulama örnekleri

7.4 Afet İzleme Uygulamaları

Lazer tarama sonucu elde edilen verilerin hızlı ve doğru bir şekilde elde edilmesi, kullanılan tarayıcıların diğer ölçme aletlerine göre teknik açıdan üstün özelliklerinin olması, kullanılan yazılımlardan elde edilen veri çözümlerinin doğruluğu ve kullanabilirliği, bu teknolojinin jeolojik, coğrafi vb. özellikler açısından afet izleme uygulamalarında kullanabilirliğini göstermektedir. Tarama sonucu elde edilen verilerin yazılımlarla işlenmesi ve yapılan analizler neticesinde tehlike yaratabilecek doğal afet, çığ, toprak kayması, taş ocağı ve maden işletmelerinde karşılaşılabilecek problemler çözülebilmektedir. En önemli özelliği gerçeğe yakın 3 boyutlu verinin, hızlı ve ekonomik bir şekilde elde edilmesidir. Ayrıca olay anı ve sonrasındaki mevcut durumun değerlendirilmesi, karşılaştırılması, gereken en doğru bilgiye ulaşılması, lazer tarama teknolojisi ile kısa zamanda olabilmektedir. Dünyada lazer tarayıcı ile yapılmış pek çok örnek teşkil edecek uygulama vardır. Bunlardan bazıları aşağıda yer almaktadır:

- Nchanga Madeni, Zambia (Ekim 2000)
- Livox Taşocağı, UK (Kaya Düşme Analizi- Haziran 2001)
- Pen Yrorsedd Taşocağı, UK (Geoteknik Analiz – Ekim 2001)
- Dünya Kayak Şampiyonası (Çığ Tahmini ve Kar Yüksekliğinin İzlenmesi- 2001)
- Blaencwm Toprak Kayması, UK (Toprak Hareketlerinin İzlenmesi- Şubat 2003)

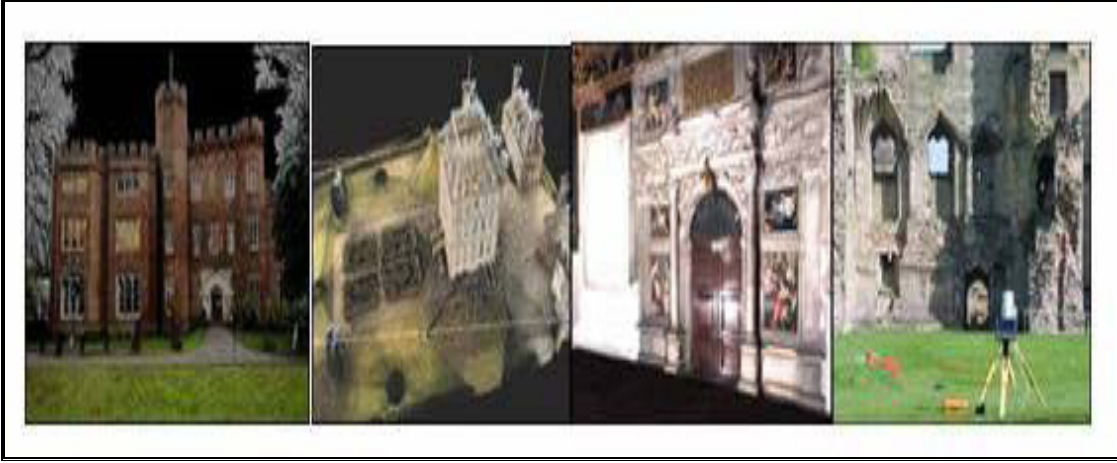
Sürekli tehlike yaratan alan veya bölgelerin kontrolü ve güvenliği, otomatik olarak gözlem yapan yersel lazer tarayıcılar ile sağlanabilmektedir. Bu bölgelere, konumu bilinen yansıtıcı hedefler konularak, devamlı bu hedef noktaları tarayıcılar ile taranarak, bölgede herhangi bir deformasyonun olup olmadığı, geliştirilen yazılımlar ile belirlenebilmektedir.



Şekil 7.4 Afet izleme uygulama örnekleri

7.5 Kültürel Mirasın Korunması ve Arkeolojik Uygulamaları

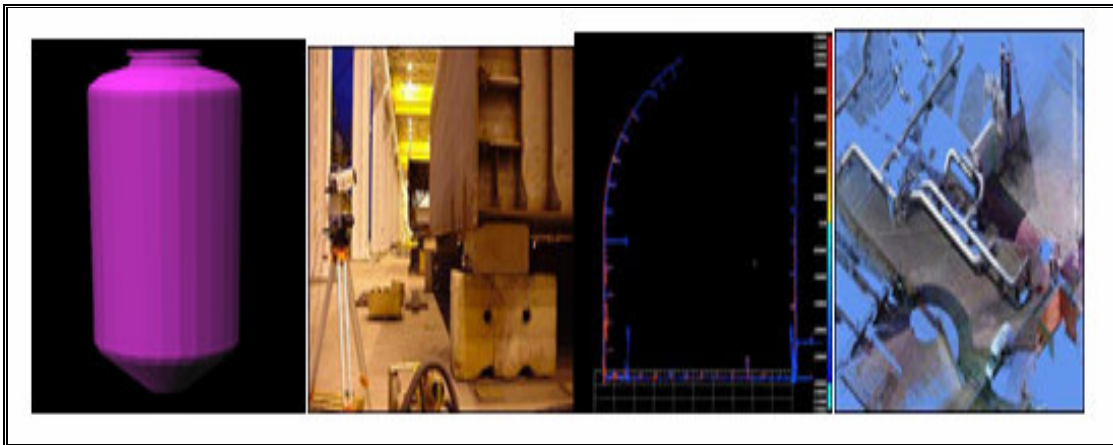
Lazer tarama, tarihi ve kültürel mirasın korunması, gerçeğe uygun yaşatılması, 3 boyutlu modelleme çalışmalarında, dünyada yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Lazer tarama teknolojisinin kullanım amacı tarihi ve kültürel bilgilerin arşivlenmesi, 3 boyutlu gösteriminin sağlanması, yıllara göre deformasyonlarının belirlenmesi, elde edilen verilerden yeni bilgilere ulaşılması, tahrip olan ya da yıkılan eserlerin aslına uygun olarak tekrar yapılmasıdır. Özellikle, restorasyon ve rölöve çalışmalarında en çok kullanılan modern ölçme aletleridir. Diğer klasik ölçme aletleri ile kıyaslandığında, gerek hızlı veri elde edilmesi, gerekse maliyet açısından büyük avantajları vardır. Dünyada yersel lazer tarama teknolojisi ile yapılan birçok çalışma vardır. Gelişen teknolojinin paralelinde geliştirilen tarayıcı ve yazılımlar bize başka çözüm yolları sunmaktadır. Elde edilen verilerden görselleştirme, yapıların sayısal ortamda bir arşivinin oluşturulması, binalar ve bina elemanlarının tarihi ve kültürel ilişkilerinin gösterimi, bilgilerin gelecek kuşaklara iletilmesi, bilgi sistemlerinin oluşturulması, rölöve ve restorasyon çalışmalarına altlık hazırlanması, tahrip durumda olan binaların aslına uygun yapılması gibi çalışmalar, lazer tarayıcılarla yapılan uygulama alanları arasındadır (www.3dlasermapping.com).



Şekil 7.5 Kültürel mirasın korunması ve arkeolojik uygulama örnekleri

7.6 Endüstriyel Uygulamalar

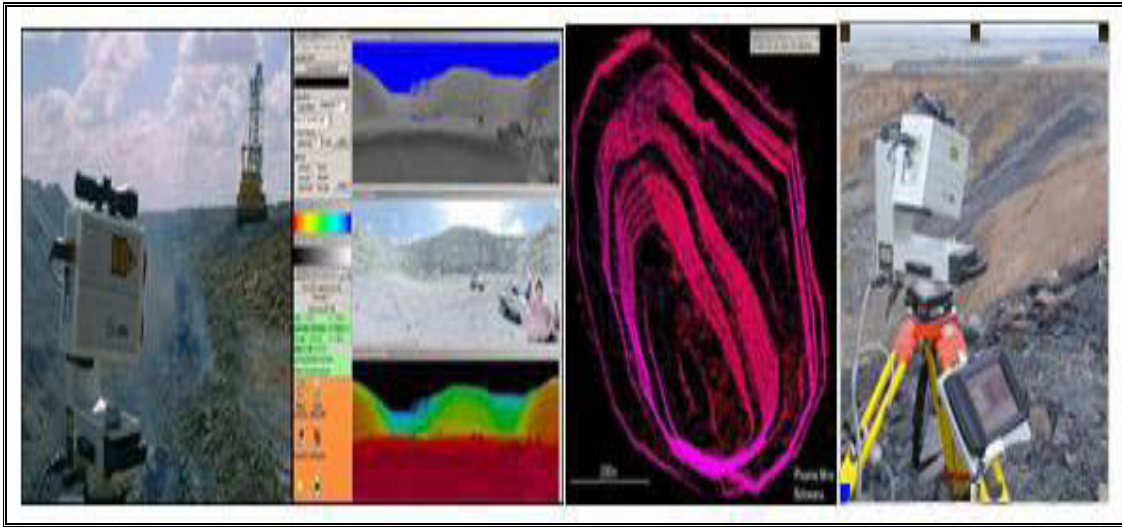
Lazer tarayıcılar, günümüzde endüstriyel uygulamalarda kullanılan en önemli ölçme aletleri arasında yerini almıştır. Diğer klasik ölçme ve fotogrametrik yöntemlerle kıyaslandığında, veri elde edilmesi ve değerlendirilmesinde hız ve maliyet açısından üstünlükleri vardır. Lazer taramalar sonucu elde edilen, taranan objeye ait gerçeğe yakın gösterimini sunan 3 boyutlu nokta bulutlarından CAD yazılımlarında, 3 boyutlu modeller elde edilmektedir. Bu modeller üzerinden istenen bilgilere anında ulaşılabilmekte, böylece üretim sırasında ortaya çıkacak hatalara müdahale edilerek hatalar yok edilebilmektedir. Geliştirilen yazılımlarla çeşitli analizler ve değerlendirmeler yapılabilmektedir. Gemi inşaatı, otomotiv sanayi, fabrikasyon üretim uygulamaları, giyim sektörü, proje kontrol ve üretimi vb. alanlarda lazer tarama teknolojisinden yararlanılmaktadır.



Şekil 7.6 Endüstriyel uygulama örnekleri

7.7 Madencilik, Taşocağı ve Kazı Uygulamaları

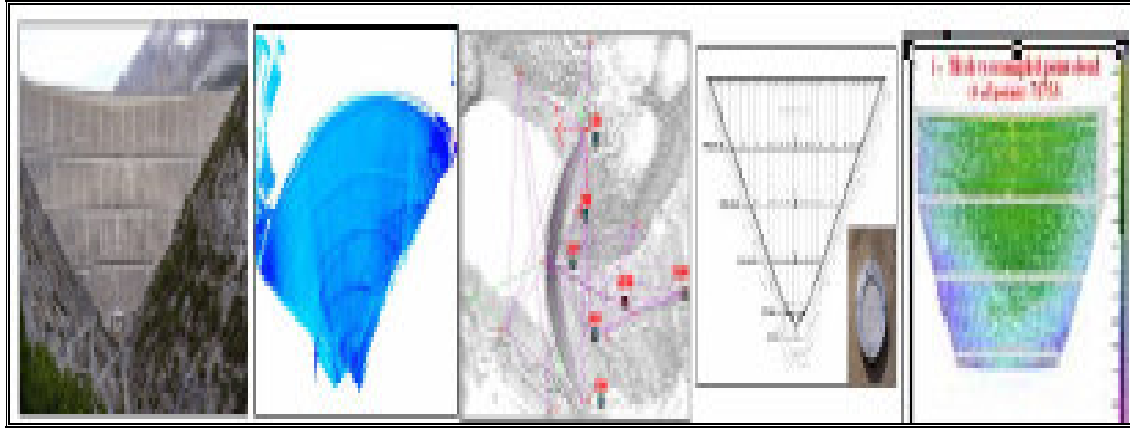
Bu uygulama alanlarında lazer tarama teknolojisi, gerek zaman, gerek maliyet açısından önemli avantajlar sağlamaktadır. Madencilikte, taş ocağı veya hafriyat işlerinde çıkarılan malzemenin bir yerden başka bir yere taşınmasında hacim hesaplarının hızlı ve otomatik bir şekilde yapılması sırasında yersel lazer tarayıcılar kullanılmaktadır. Geleneksel ölçme yöntemleri, ölçmeciler için zaman kaybına neden olmaktadır. Ayrıca mevcut durum koşullarında, her yüksekliğin değiştiği noktanın ölçülmesi, arazinin engebeli ve tehlikeli olması durumlarında her yere ulaşılama durumu vardır. Bu durum ölçme işlerini zorlaştırdığı gibi, verilerin değerlendirme süresini ve işin bitim süresini uzatmaktadır. Fakat lazer tarama da tarayıcı sabit yere kurularak tarama sonucu elde edilen veriden, yazılımlar kullanılarak istenilen bilgiler hızlı bir şekilde elde edilmektedir. Ayrıca çalışma bölgesinin otomatik olarak izlenilmesi sağlanmaktadır. Özellikle madencilik uygulamalarında; ulaşılması güç olan yüksek duvar, tepe, yeraltı kazı bölgeleri gibi bölgelerin detaylı hacimsel hesaplamaları yapılabilir. Geoteknik ölçümler, patlama öncesi ve sonrası ölçümler, jeolojik ve yapısal özellikler için hızlı haritalama, maden cevheri derinlik geçiş ölçmeleri, kazı ölçmeleri, eğimlerin izlenmesi, deformasyon ölçmeleri, otomatik stok hacim ölçmeleri, yersel lazer tarayıcılardan elde edilen verilerin yazılımlarda değerlendirilmesi ile elde edilmektedir (www.3dlasermapping.com).



Şekil 7.7 Madencilik, taşocağı ve kazı uygulama örnekleri

7.8 Deformasyon Ölçmeleri Uygulamaları

Büyük mühendislik yapılarının, özellikle büyük barajların deformasyonlarının belirlenmesi için, günümüzde yersel lazer tarama teknikleri de kullanılmaktadır. Büyük barajların statik davranışlarını gözlemek, her zaman büyük önem taşımıştır. Bu yapılar inşa edildikleri alanlarda çeşitli etkiler yaratmaktadırlar. Bu vb. yapıların deformasyonlarının izlenmesinde seçilen obje noktalarının sayısı klasik ölçme yöntemlerinde kısıtlı iken yersel lazer tarayıcılarının kullanımında böyle bir sorun kalmamaktadır. Kontrol noktalarının sayısı ise otomatik bir ölçüm sistemi uygulandığında daha az olmaktadır.



Sekil 7.8 Deformasyon ölçmeleri uygulama (Alba2006)

8. UYGULAMALAR

8.1 Yersel Lazer Tarama Örnekleri

Yersel lazer tarama uygulaması, Yıldız Teknik Üniversitesi, Yıldız Kampüsünde bulunan, KOSGEB Teknoloji Geliştirme Merkez Müdürlüğü tarafından şu an kullanılmakta olan, Yıldız Sarayının bir parçası olan Güvercinlik olarak anılan tarihi bir binada gerçekleştirilmiştir. Bu Bina, Optech İLRİS 3D ve Trimble MENSİ GS 100 yersel lazer tarayıcıları ile taranmıştır.



Şekil 8.1 KOSGEB Binasının Sol, Orta, Sağ taraftan görünüşü (Güvercinlik)

Bu çalışmada, bu iki farklı tarayıcı ile yapılan tarama işlemleri, veri kaydı, ölçme planlanması, çoklu taramaların birleştirilmesi ve konumlandırma (jeoreferanslandırma) konularıyla ilgili uygulamalar yapılmıştır. Çoklu taramaların birleştirilmesi sırasında otomatik ve manüel yöntem kullanılarak KOSGEB Binasının karakteristik noktalarındaki konum değişimleri belirlenmeye çalışılmıştır.

8.1.1 Optech ILRIS-3D İle Yapılan Uyguma Örneği

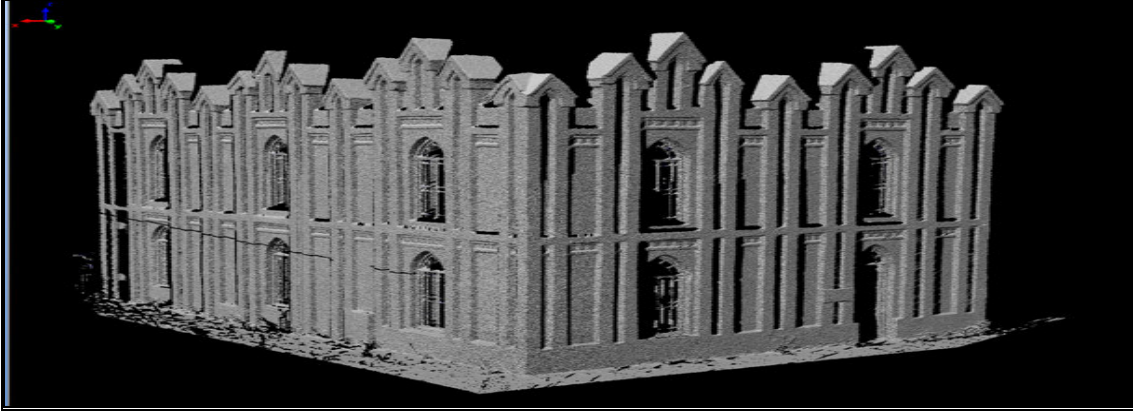
Uygulamada OPTECH Firmasının ürettiği ILRIS-3D yersel lazer tarayıcısı kullanılmıştır. Bu lazer tarayıcı, saniye de 2000 nokta atımı, 1500 m ye kadar tarama menzili, 0.0015 derece açı hassasiyeti, bilgisayar ya da el bilgisayarı ile kolay kullanım, wireless (kablosuz) veya ethernet bağlantı ile cihaza bağlantı yapabilme, 100'm de 7mm hassasiyet, $360^0 \times 360^0$ tarama alanı, 1. sınıf lazer kullanımı ile tamamen insan sağlığına zararsız olması, dahili 6.6 mega piksel dijital kamera desteği, hafif kompakt dizayn gibi teknik özelliklere sahiptir.



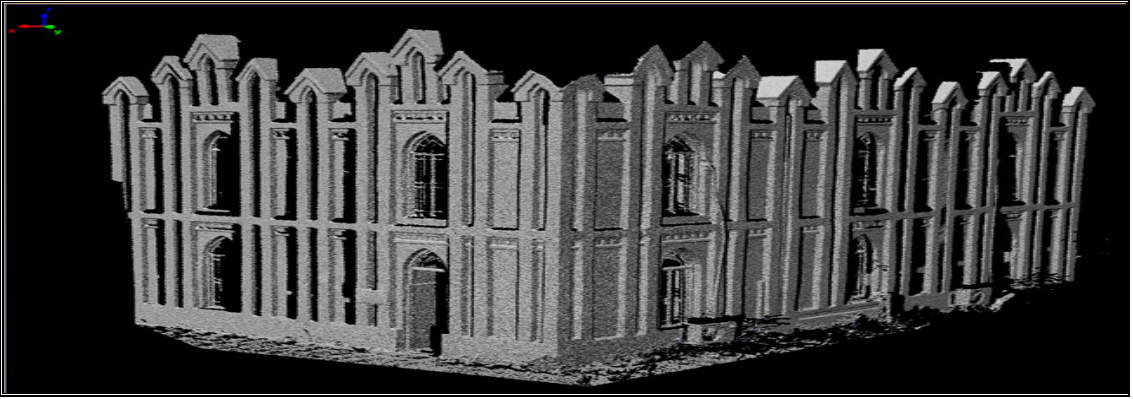
Şekil 8.2 Optech ILRIS-3D

Tarayıcının görüş alanı dikkate alınarak, KOSGEB Binasının giriş yönüne göre sağ ve sol cephelerinin taranmasına kararlaştırılmış ve tarayıcı kurulacak noktalar belirlenmiştir. Taramalar yapılmadan önce, tarama yazılımına tarama çözünürlükleri, tarama mesafesi değerleri girilmiştir. Yapılan işin hassasiyetine göre yazılıma girilen değerler değişmektedir. Belirlenen bu iki noktadan tarama yapılarak, nesne yüzeyini yansıtan nokta bulutları elde edilmiştir.

Bu işlemler POLWORKS yazılımında yapılmıştır. Farklı noktalardan taramalar yapıldıktan sonra, nokta bulutları PARSEER programında PİF formatına dönüştürülerek POLYWORKS yazılımında açılmıştır. Aşağıdaki şekillerde, her iki noktadan elde edilen nokta bulutu kümeleri görülmektedir.



Şekil 8.3 Sol taraftan elde edilen nokta bulutu kümesi

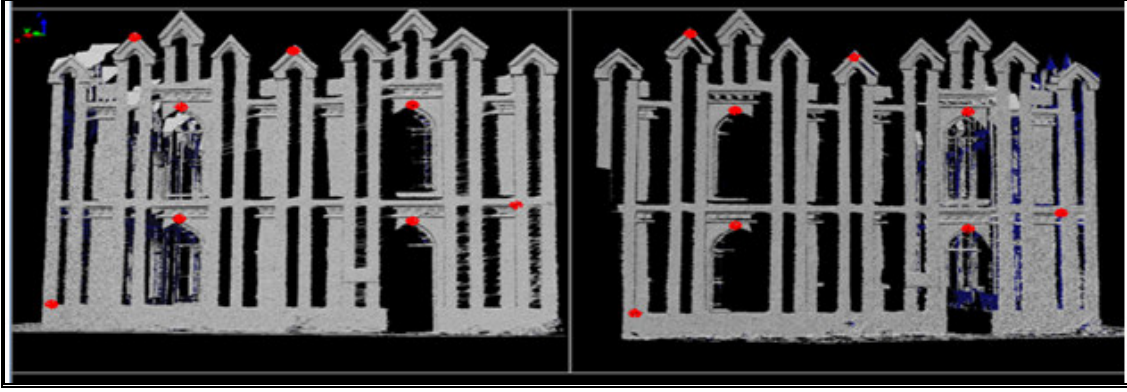


Şekil 8.4 Sağ taraftan elde edilen nokta bulutu kümesi

Bu iki cephe taramalarının birleştirilmesi, iki tarama alanını kapsayan, tarama bölgelerinde ortak bulunan belirgin noktalar yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Tarayıcının, taranacak bölgenin resmini çekme ve kullandığı yazılımdaki bazı özelliklerden dolayı hedef noktaları kullanılmamıştır. Her iki tarama bölgesinde ortak alan (kesişen) içerisinde, kolayca belirlenebilen ortak noktalar seçilmiştir.

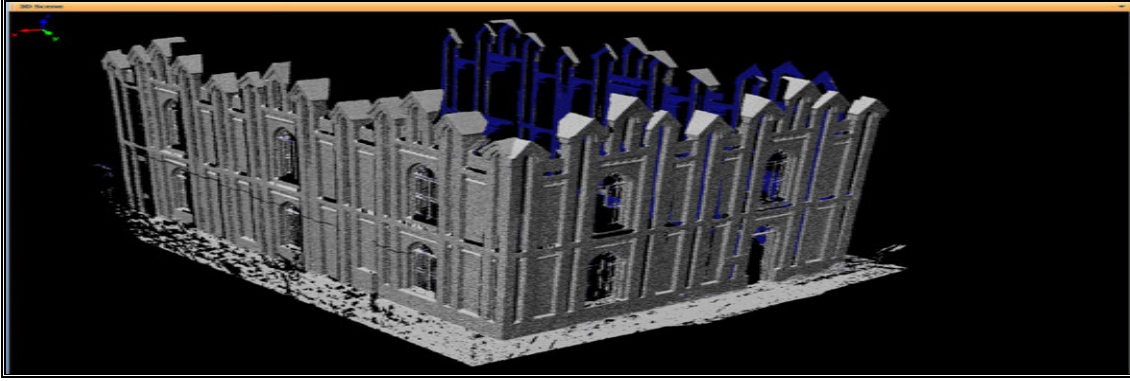


Şekil 8.5 Tarama alanındaki ortak (kesişen) yüzeyler



Şekil 8.6 Kesişen bölgedeki ortak noktaların seçimi

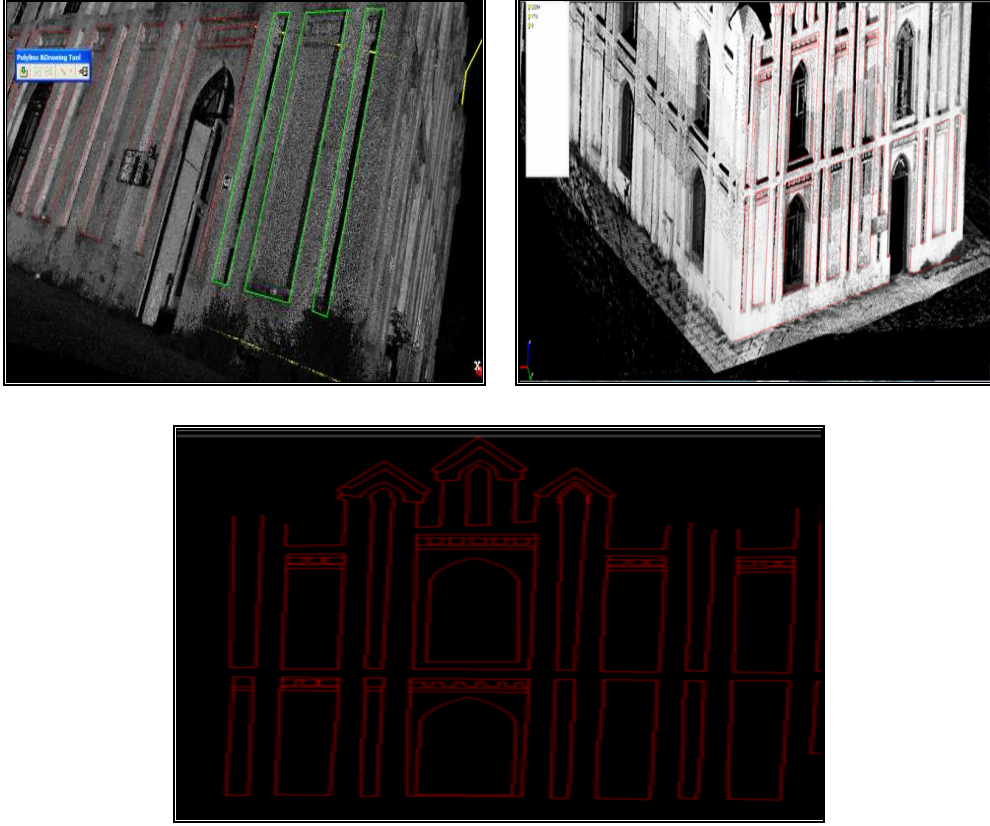
Ortak noktalar yardımıyla farklı noktalardan yapılan taramalar sonucu elde edilen nokta bulutları birleştirilmiştir.



Şekil 8.7 Birleştirilmiş nokta bulutu kümesi

Taramalar yapıldıktan sonra, tarama sonucunda elde edilen nokta bulutları düzenli değildir. Bu nokta bulutlarının düzenli hale getirilmesi için, arka ve ön plandan gereksiz yere taranan nokta bulutlarının silinmesi, inceltme ve filtreleme işlemleri yapılmıştır. Bu işlemler, her bir tarama için yapıldığı gibi birleştirmeden sonra da yapılır. Taramalardan elde edilen nokta bulutları önce düzenli hale getirilmiş sonra da birleştirilerek bir bütün haline getirilmiştir.

Bu şekilde, KOSGEB Binasının tarama sonucunda gerçek modeline yakın 3 boyutlu nokta bulut kümesi elde edilmiştir. Taranmış obje, basit geometrik şekillerden oluşuyorsa, CAD yazılımları ile nokta bulutu üzerinden basit çizimler gerçekleştirilmektedir. Eğer objenin yüzeyi çok karmaşık ve basit geometrik şekillerle çizim gerçekleştirilemiyorsa, yüzey ağı modelleri oluşturulur. Bu oluşan bulut kümesinden Z-MAP yazılımıyla, binanın detay çizimleri yapılmaya çalışılmıştır. Bu çalışmada jeoreferanslama yapılmamış, taramadan elde edilen koordinatlar tarayıcının kendi koordinat sistemindedir.



Şekil 8.8 Nokta bulutundan 3 boyutlu nokta detay çizimi

8.1.2 Trimble MENSİ GS 100 İle Yapılan Uygulama Örneği

8.1.2.1 Ölçme Planlanması ve Tarama İşlem Adımları

Yersel lazer tarama uygulaması, Trimble firmasının ürettiği Mensi GS 100 Yersel lazer tarayıcı ile bir önceki çalışmada uygulama yaptığımız Yıldız Teknik Üniversitesi, Yıldız kampüsünde bulunan, KOSGEB Teknoloji Geliştirme Merkez Müdürlüğü binasında gerçekleştirilmiştir.



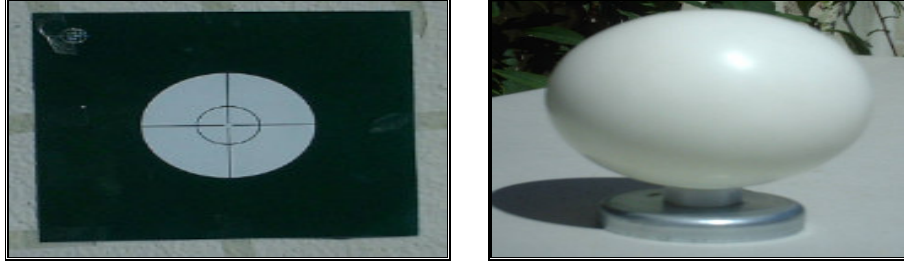
Şekil 8.9 Mensi GS 100 Yersel Lazer Tarayıcı

Çizelge 8.1 Mensi GS 100 yersel lazer tarayıcısının genel özellikleri

Mensi GS-100 Yersel Lazer Tarayıcısının Genel Özellikleri		
Alet Tipi	Uzun Menzilli Lazer Tarayıcı Sistemi	
Kullanıcı Arayüzü	PC, Windows NT/2000	
İdeal Kullanım Menzili	2 – 100 Metre	
En Yüksek Tarama Hızı	5000 nokta / sn	
Standart Sapma	6mm tek atışta	
FOV	360° yatayda, 60° düşeyde	
Nokta Büyüklüğü	50 m mesafede 3mm	
Radiance Dynamic	8bits – 256 gri seviyesi	
Sınıfı	Sınıf II lazer (EN 60825:1994)	
Mesafe Ölçüm Yöntemi	Gidiş – geliş süresi	
Video Kalibrasyonu	768 x 576 renk çözünürlükteEş zamanlı video iletimi	
Kamera Zoom Faktörü	5.5 x'e kadar	

Bir lazer tarayıcısıyla taranması düşünülen objeler veya alanlar genellikle geniş, büyük ve karışık şekilde olabilirler. Bir kez tarama işlemi yapılarak obje veya alanının tamamı taranamaz. Sadece tarayıcının görüş alanına giren bir kısmı taranabilir. Diğer kısımları taranması için, tarayıcıların objenin diğer bölümünü görebilecek bir istasyon noktasına kurulması ve ilk tarama alanının bir kısmını da içine alacak şekilde tarama noktasının seçilmesi gerekir. Onun için tarama işlemine başlamadan önce, bir ölçme tasarımı yapılmıştır. Binaya giriş yönüne göre sağdan ve soldan olmak üzere 2 noktadan tarama yapılmasına karar verilmiştir. Tarama alanları, birbirine kesecek ve ortak yüzeyler oluşacak şekilde ayarlanmıştır.

Ayrıca her iki tarama bölgesinde, hem farklı noktalardan yapılan taramaların birleştirilmesi, hem de taramalar sonucunda elde edilen nokta bulutlarının genel (ülke) bir koordinat sistemine dönüştürülmesi için, en az 3 tane olacak şekilde kesişen tarama bölgelerine hedeflerin konulması ve her tarama bölgesinde hedeflerin taranması gerekir. Her tarayıcının kendine ait bir koordinat sistemi vardır. Tarama yapılacak noktalar belirlendikten sonra bina yüzeyine, konumlandırma (jeoreferans), otomatik ve manüel birleştirme (registration) için, referans küresi ve hedefler yerleştirilmiştir. Bu referans küre ve hedeflerin, özellikle kesişen bölgede en az 3 tane olacak şekilde yerleştirilmesine dikkat edilmiştir.



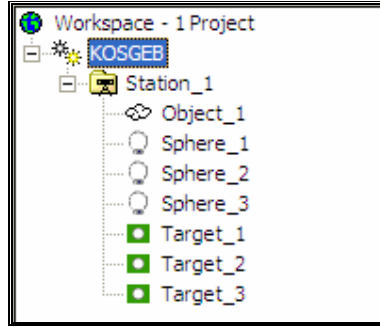
Şekil 8.10 Küre ve hedefler



Şekil 8.11 Küre ve hedeflerin bina yüzeyine yerleştirilmiş görünümü

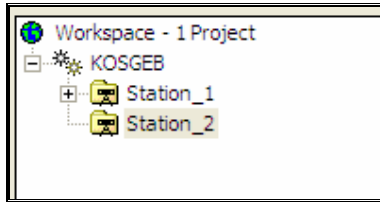
Hedef ve küreler bina yüzeyine yerleştirildikten sonra, her tarama noktasından taramaya başlamadan önce tarama parametrelerinin belirlenmesi gerekir. Bu çalışmada, tarama yazılımı olarak Trimble firmasının geliştirdiği, POINT SCAPE tarama yazılımı kullanılmıştır. Hedef ve kürelerde tarama parametreleri otomatik olarak yazılım tarafından belirlenmektedir. Taranacak obje veya alanda ise, istenilen hassasiyete göre tarama parametreleri kullanıcı tarafından belirlenmektedir.

Tarama parametreleri yazılıma girildikten sonra, tarama yazılımı penceresinden her iki tarama bölgesinin ortak ve diğer yüzeylerini kapsayacak şekilde, tarama pencereleri yardımıyla, tarama yapılacak yüzeyler seçilmiştir. Ve her iki tarama noktasından, nesne yüzeyini yansıtan nokta bulutları kümesi elde edilmeye çalışılmıştır. Tarama yapılırken obje yüzeyinin yanı sıra, hedef ve kürelerde oluşturulan her istasyon noktasında taranmış ve yazılımda açılan iş dosyasında tanımlanmıştır.



Şekil 8.12 Tarama yazılımında açılan İstasyon dosyası

Bu şekilde, her istasyon noktasında obje, küre ve hedef noktaları ayrı olarak taranarak KOSGEB işi altında 2 farklı istasyondan tarama işlemi gerçekleştirilmiştir.

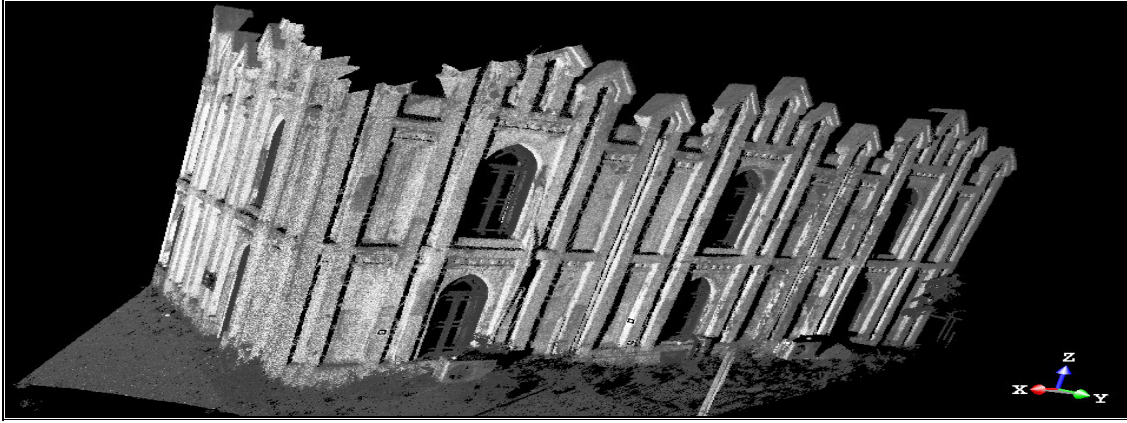


Şekil 8.13 Tarama yazılımında açılan KOSGEB dosyası

Taramalar sonucu, KOSGEB binasının sağını ve solunu alacak, ön tarafı ortak yüzey olacak şekilde, 2 farklı noktadan yapılan taramalar ile bina yüzeyini yansıtan nokta bulutu kümeleri elde edilmiştir.

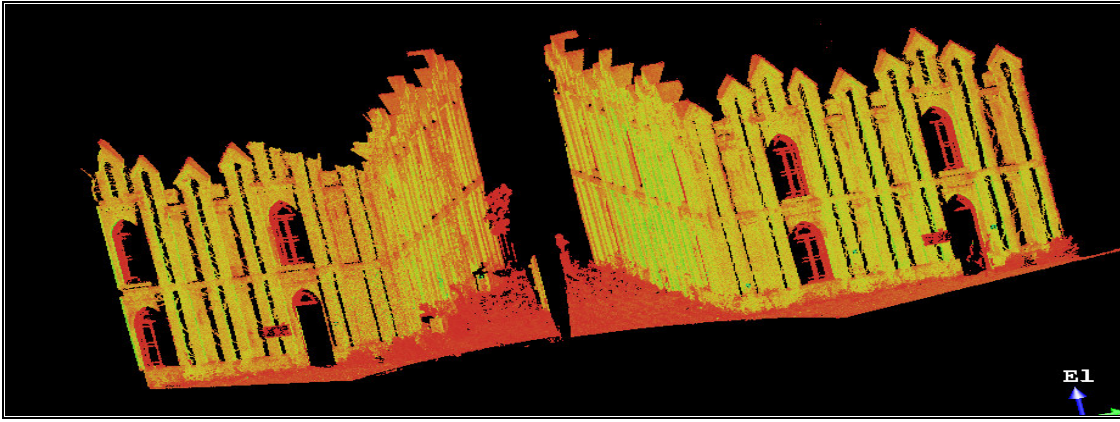


Şekil 8.14 Sol taraftan elde edilen nokta bulutu görünümü



Şekil 8.15 Sağ taraftan elde edilen nokta bulutu görünümü

Bu farklı taramalardan elde edilen nokta bulutları, tarayıcının kurulduğu noktaya bağlı olarak farklı koordinat sistemindedir.

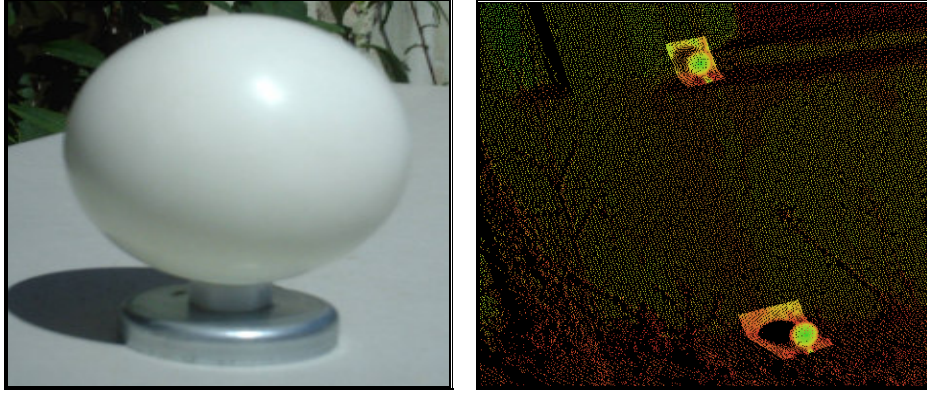


Şekil 8.16 Aynı koordinat sisteminde nokta bulutlarının görünümü

Farklı noktalardan yapılan taramaların birleştirilmesi küreler ya da kolayca belirlenebilen pencere köşesi vb. detaylara bağlı olarak yapılmaktadır. Çoklu taramaların birleştirilmesi Trimble şirketinin ürettiği REALWORKS yazılımı ile otomatik ve manuel (elle) olarak gerçekleştirilmiştir.

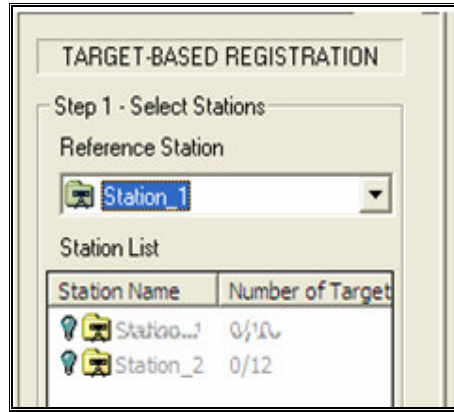
8.1.2.2 Otomatik Birleştirme (Registration)

Bu birleştirme işleminde her istasyonda daha önceden yapılan obje taraması işleminden başka, otomatik birleştirmeyi sağlayan kürelerinde ayrı olarak taraması yapılmıştır. Her tarama bölgesinde ortak (kesişen) yüzey üzerinde, en az 3 tane olmak şartıyla aynı kürelerin taranmasına dikkat edilmiştir. Bu şekilde farklı noktalardan elde edilen nokta bulutlarının bu küreler yardımıyla birleştirilmesi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 8.17 Nokta bulutu içerisindeki kürelerin görünümü

Birleştirme (registration) amacı ile Realworks yazılımında otomatik birleştirme (Target-based registration) modülü kullanılmıştır. İstasyonlardan biri temel alınarak, bu iki istasyon arasında ortak tarama bölgesinde mevcut olan aynı küreler belirlenmeye çalışılmıştır.

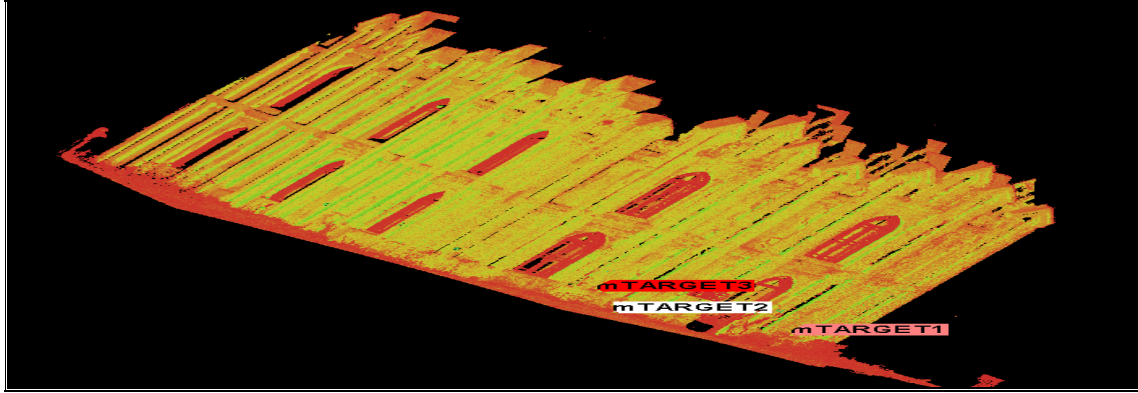


Şekil 8.18 Target-based registration modülü

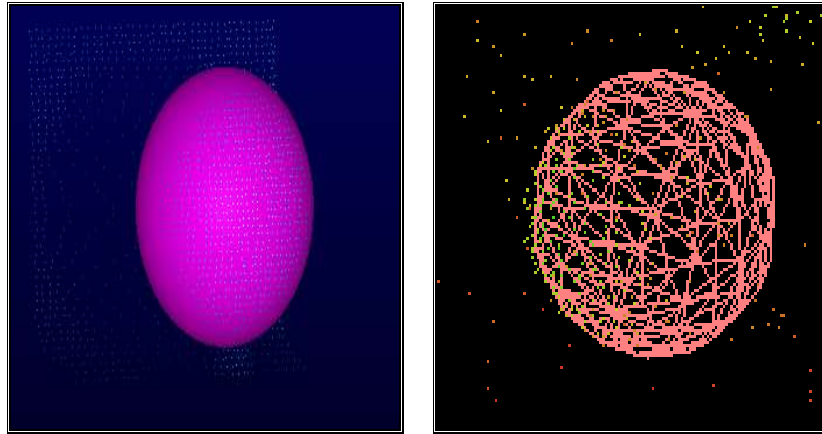
Her iki tarama bölgesindeki ortak kürelerin eşleştirilmesi yapılarak, kendi içerisinde oluşan mm hassasiyetindeki sapmalar belirlenmiştir. Elde edilen değerler göz önüne alınarak, bu küreler yardımıyla otomatik birleştirme yapılmıştır.

Control tool				
Station View				
Unmatch				
Matched Station				
Name	Scan Per Station	Corresponding Target	Scan Per Target	Residual Error
☒ Station_1	10	--	--	2.699 mm
☐ Sphere_1		--	--	--
☐ Sphere_2		--	--	--
☐ Sphere_3		--	--	--
☒ Sphere_4		mTARGET1	2	1.427 mm
☒ Sphere_5		mTARGET2	2	1.797 mm
☒ Sphere_6		mTARGET3	2	2.349 mm
☐ Sphere_7		--	--	--
☒ Target_1		mTARGET4	2	5.221 mm
☒ Target_2		--	--	--
☐ Target_3		--	--	--
☒ Station_2	12	--	--	2.699 mm
☐ Sphere_1		mTARGET1	2	1.427 mm
☒ Sphere_2		mTARGET2	2	1.797 mm
☒ Sphere_3		mTARGET3	2	2.349 mm
☐ Sphere_4		--	--	--
☐ Sphere_5		--	--	--

Şekil 8.19 Otomatik birleştirmede küre eşleştirmesi



Şekil 8.20 Ortak bölgede yer alan kürelerin genel görünümü

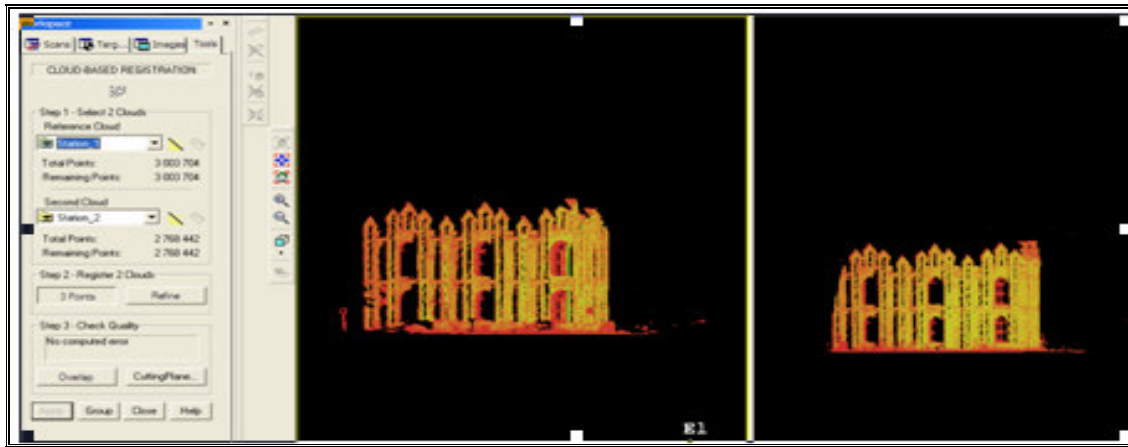


Şekil 8.21 Birleştirme sonrası kürelerin nokta bulutu içerisindeki görünümü

8.1.2.3 Manuel Birleştirme

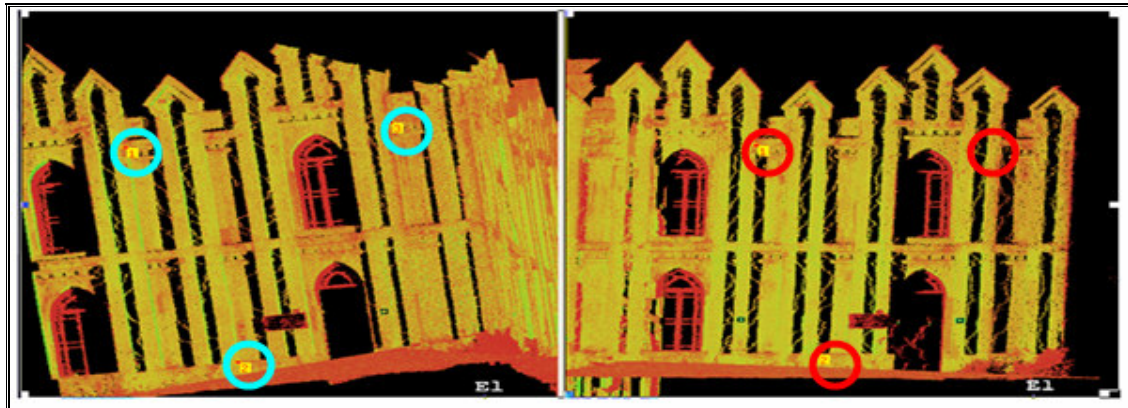
Farklı noktalardan yapılan taramaların birleştirilmesi, her iki tarama bölgesinde ortak (kesişen) yüzeyde bulunan ve yerleri kolayca belirlenebilen pencere köşesi gibi vb. detaylara bağlı olarak yapılmaktadır. Birleştirmenin yapılabilmesi için, her iki tarama bölgesinde yerleri belirgin en az 3 tane ortak noktanın olması gerekir.

Birleştirme (registration) amacı ile Realworks yazılımında otomatik birleştirme (Cloud-based registration) modülü kullanılmıştır. İstasyonlardan biri temel alınarak, bu iki istasyon arasında ortak tarama bölgesinde mevcut olan özdeş noktalar belirlenmeye çalışılmıştır.



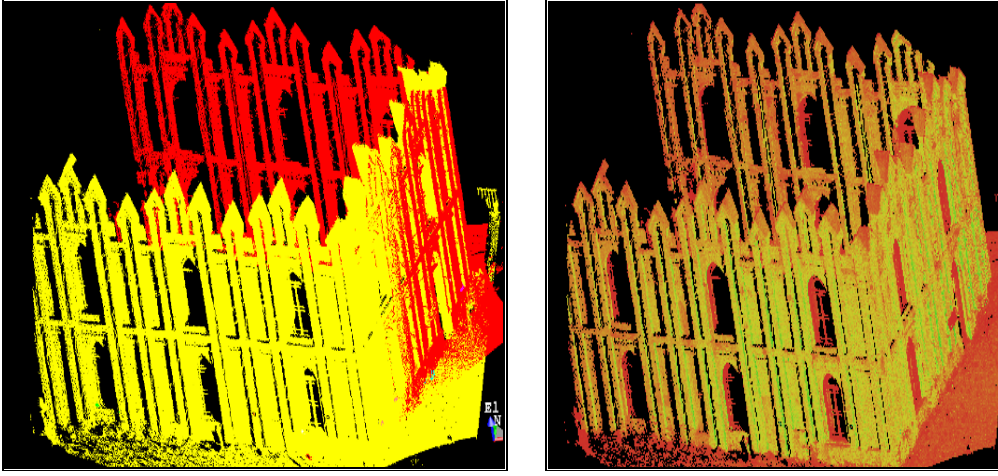
Şekil 8.22 Cloud -based registration modülü

Bu özdeş noktalar her iki farklı tarama içerisindeki ortak bölgede, hassas bir şekilde işaretlenmiştir.



Şekil 8.23 Ortak noktaların seçimi

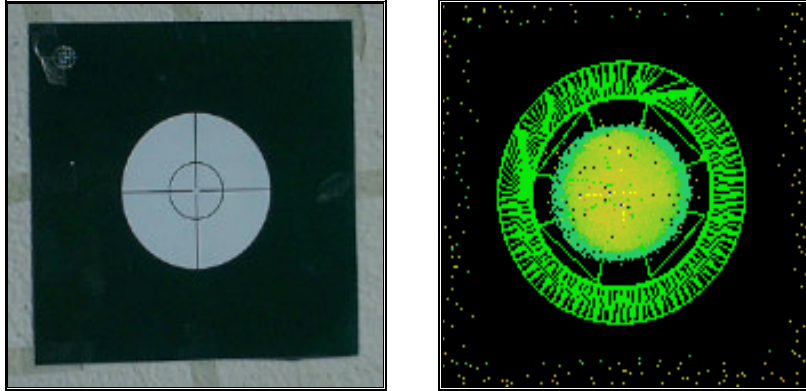
Objeye ortak yüzeyi üzerinde, 3 tane ortak noktanın yeri belirlendikten sonra hata miktarlarına bakarak birleştirme işlemi yapılmıştır.



Şekil 8.24 Nokta bulutlarının birleştirilmiş görünümü

8.1.2.4 Konumlandırma (Jeoreferans)

Taranmış obje veya alanın tam sunumunu elde etmek için, farklı noktalardan taramalar sonucu elde edilen nokta bulutlarının tarayıcıların kendi koordinat sisteminde birleştirilmesi, daha sonra birleştirilen bu noktaların genel (ülke) koordinat sistemine dönüştürülmesi gerekir. Bu dönüşümün yapılabilmesi için tarama bölgesine jeodezik bir ağ kurulması ve bu ağdan, taramada kullanılan hedeflerin ya da kontrol noktalarının genel (ülke) koordinatlarının elde edilmesi gerekir.



Şekil 8.25 Hedefin gerçek ve nokta bulutu içerisindeki görünümü

Uygulamamız da farklı noktalardan elde edilen nokta bulutları birleştirilerek bir bütün haline getirilmiştir. Mevcut koordinatlar, tarayıcının kendi koordinat sistemindeki koordinatlarıdır. Bu koordinatların genel bir koordinat sistemine dönüştürülmesi gerekmektedir. Bunun için en az 3 tane hedef noktasının genel bir sistemde koordinatlarına ihtiyaç vardır.

Bu amaçla, KOSGEB Binasının ön, sol ve sağ cephelerini görebilecek şekilde, bina çevresinde iki tane nokta tesis edilmiştir. Bu iki nokta, kendi arasında yerel bir sistemde, Leica TPS 1201 ile koordinatlandırılmıştır. İki nokta arasındaki yükseklik farkı, sayısal nivo ile hassas bir şekilde ölçülmüş ve total stationdan elde edilen yükseklik farkı ile kontrol edilmiştir.

Çizelge 8.2 Referans alınan noktaların koordinatları(x, y,z)

Nokta No	X	Y	Z
1000	1000.000	1000.000	100.000
1001	1021.321	1000.000	99.591

Bu noktalar referans alınarak, KOSGEB Binası yüzeyine yerleştirilen ve mevcut tarama sonrası elde edilen nokta bulutu içerisinde yer alan hedeflerin, bu sistemdeki koordinatları belirlenmeye çalışılmıştır.



Şekil 8.26 Hedeflerin görünümü

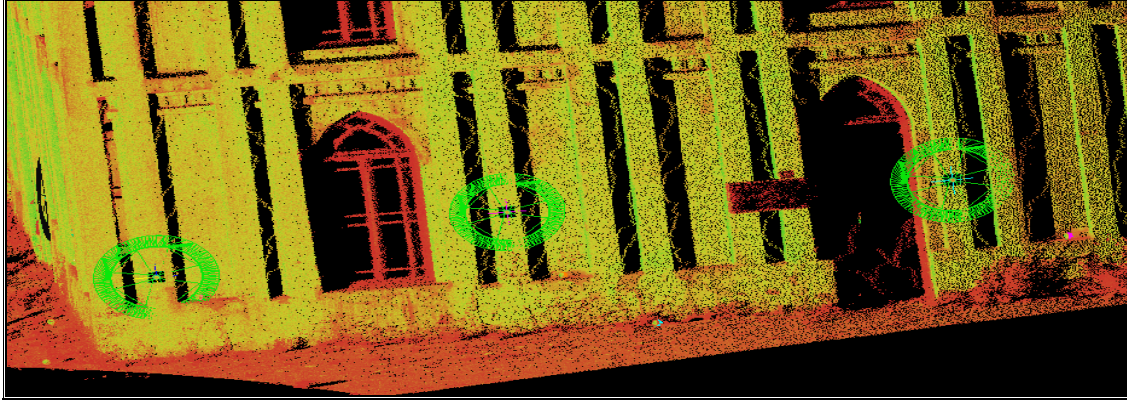
Leica TPS 1201 Total Station kullanılarak hedef noktalarının koordinatları elde edilmiştir.

Çizelge 8.3 Hedef noktalarının yerel sistemdeki koordinatları

Nokta No	X	Y	Z
TARGET_1	988.824	1005.816	101.49
TARGET_2	992.355	1006.004	101.655
TARGET_3	994.373	1006.708	101.319

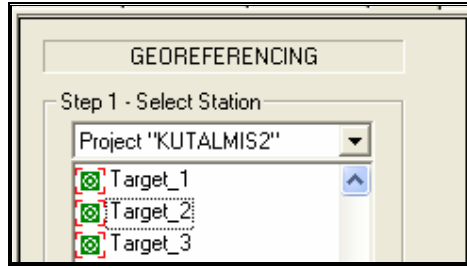
Bu hedefler yardımıyla taranmış alan ya da objenin koordinatları, genel bir koordinat sistemine dönüştürülmeye çalışılmaktadır. Nokta bulutu içerisinde konumlandırmada kullanılacak hedefler kolayca ayırt edilebilmektedir. Hedeflerin taranması için gerekli

parametreler, POINT SCAPE yazılımı tarafından otomatik olarak belirlenmektedir. Buradaki amaç, nokta bulutu kümesi içerisindeki hedeflerin, yazılım tarafından otomatik seçilmesinin sağlanmasıdır.



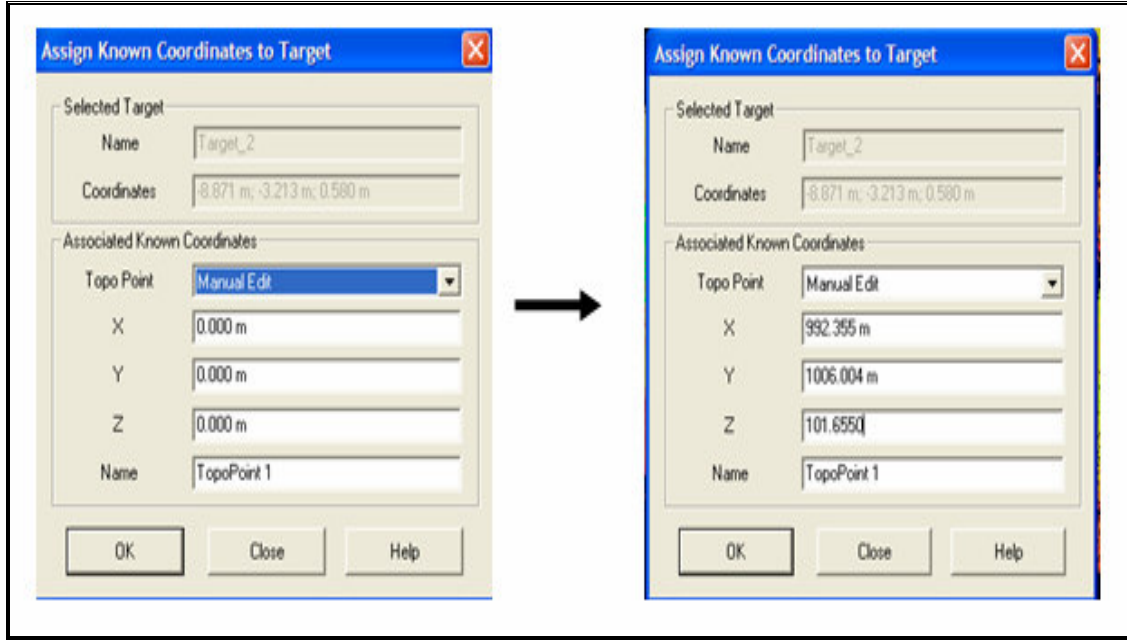
Şekil 8.27 Nokta bulutu içerisindeki hedeflerin görünümü

Bu amaçla konumlandırma (jeoreferans) için, REALWORKS yazılımının Georeferencig Tool Modülü kullanılmıştır.



Şekil 8.28 Georeferencig Tool Modülü

Bu modül üzerinden, hedefler direkt yazılım menüsünden seçilerek ya da nokta bulutu üzerinden hedef noktasının tam merkezi işaretlenerek, gerçek sistemdeki koordinatları yazılıma girilmiştir.



Şekil 8.29 Hedeflerin genel sistemdeki koordinat girişleri

Tarayıcı koordinat sisteminden, bir genel koordinat sistemine 3B dönüşüm için gerekli parametrelerinin belirlenmesi, her iki sistemde konumu bilinen en az 3 özdeş noktanın olması durumunda olanaklıdır. Bu şekilde, taramalar sonucu elde edilen noktaların (5.772.146 adet) tarayıcı koordinat sistemindeki koordinatları, genel bir koordinat sistemine dönüştürülmüştür. Bu şekilde elde edilmiş belirgin 20 noktanın tarayıcı ve genel koordinat sistemlerindeki koordinatları Çizelge 8.4’de verilmiştir.

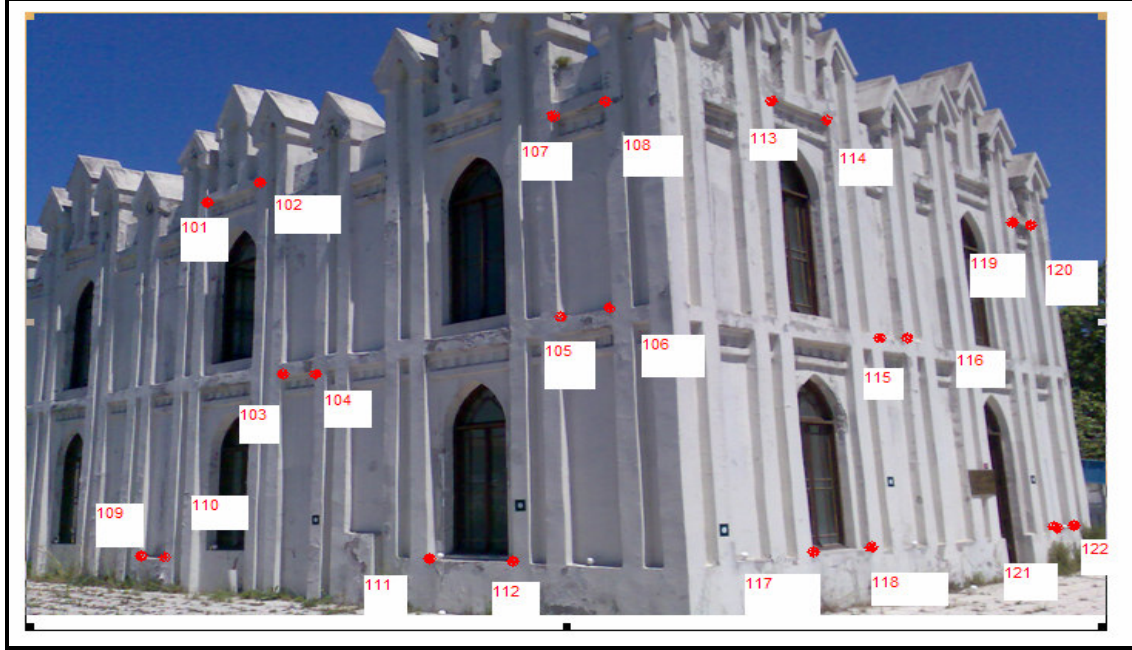
Çizelge 8.4 Tarayıcı ve genel sistemdeki koordinatlar

Nokta No	Tarayıcı Koordinat Sistemi			Genel Koordinat Sistemi		
	X	Y	Z	X	Y	Z
1	-18.407	-10.732	6.356	985.918	1005.64	107.556
2	-17.106	-11.134	6.311	987.263	1005.69	107.579
3	-16.434	-11.34	2.672	987.964	1005.7	103.914
4	-15.715	-11.555	2.655	988.725	1005.8	103.909
5	-11.652	-12.795	2.871	992.974	1006.03	104.132
6	-10.946	-13.001	2.899	993.679	1006.08	104.123
7	-11.638	-12.798	7.752	992.992	1006.01	106.967
8	-10.944	-13.012	5.733	993.696	1006.07	106.949
9	-19.751	-10.322	-0.465	984.496	1005.56	100.807
10	-19.057	-10.534	-0.472	985.208	1005.61	100.822
11	-13.619	-12.814	-0.0329	990.89	1005.94	100.929
12	-12.334	-12.588	-0.316	992.232	1006	100.932
13	-9.652	-11.228	6.258	994.259	1008.22	107.43
14	-9.29	-10.087	6.284	994.225	1009.38	107.497
15	-9.081	-9.388	2.864	994.191	1010.12	104.102
16	-8.99	-8.814	2.842	994.161	1010.71	104.107
17	-9.644	-11.238	-0.308	994.272	1008.2	100.942
18	-9.305	-10.098	-0.315	994.213	1009.39	100.93
19	-7.738	-4.922	5.752	993.923	1014.75	107.023
20	-7.556	-4.367	5.481	993.88	1015.33	106.949

8.1.2.5 Otomatik ve Manüel (Elle) Birleştirmenin Karşılaştırılması

KOSGEB Binasının üç yüzeyi iki noktadan taranmıştır. Bu iki noktanın her birinden ikişer yüzey taranmış dolayısıyla bir yüzey her iki noktadan bindirmeli olarak taranmış olup yüzeylerin birleştirilmesi, hem otomatik hem de manüel yapılmıştır. Her iki birleştirme sonucunda bina yüzeyinin üç cephesinin tam bir gösterimi elde edilmiştir. Mevcut birleştirilmiş noktaların koordinatları, tarayıcının kendi koordinat sistemindedir. Bu koordinat sisteminin, bir genel sisteme dönüştürülmesini sağlamak amacıyla hedef noktalarından yararlanılmıştır (Şekil 8.29). Daha önce konumlandırmada bahsedildiği gibi hedef noktalarının koordinatları Leica TPS 1201 total station ile ölçülerek belirlenmiştir. Bu koordinatlardan yararlanılarak, her iki birleştirme yönteminden elde edilen KOSGEB

binasının bütünleştirilmiş nokta bulut kümeleri, aynı koordinat sistemine dönüştürülmüştür. Her iki birleştirme yönteminin birbirine göre doğruluğunu belirlemek için, KOSGEB binasının yüzeyinde yerleri belirgin pencere, kapı gibi köşe noktalarından yararlanılmıştır.



Şekil 8.30 KOSGEB binasının yüzeyinde alınan yerleri belirgin noktalar

Bu bina yüzeyindeki noktalar, LEICA TPS 1201 total station aleti ile ölçülmüş ve genel sistemdeki koordinatları elde edilmiştir. Hem otomatik hem de manüel birleştirme sonucu elde edilen nokta bulut kümeleri içerisinde konumlandırılmış (jeoreferanslanmış aynı noktaların koordinatları belirlenerek özdeş noktalar kümesi oluşturulmuştur. Otomatik olarak ve manuel belirlenen özdeş nokta koordinatları ile bunların total stationla belirlenen koordinatları karşılaştırma yapılmak üzere Çizelge 8,5’ de sunulmuştur.

Çizelge 8.5 Total station, Otomatik ve Manuel Birleştirmeden elde edilen koordinatlar

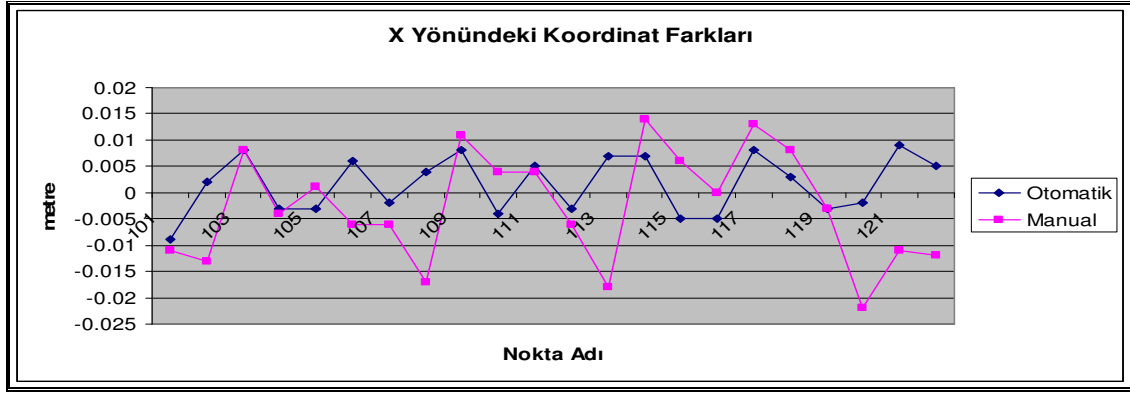
Nokta	Total Station (Yerel)			Otomatik Yöntem			Manüel Yöntem		
No	Koordinatları (m)			Koordinatları (m)			Koordinatları (m)		
101	985.909	1005.630	107.557	985.918	1005.640	107.562	985.920	1005.610	107.568
102	987.265	1005.700	107.557	987.263	1005.690	107.570	987.278	1005.680	107.567
103	987.972	1005.750	103.908	987.964	1005.740	103.914	987.964	1005.770	103.915
104	988.722	1005.800	103.902	988.725	1005.800	103.909	988.726	1005.790	103.908
105	992.971	1006.030	104.133	992.974	1006.030	104.136	992.970	1006.040	104.116
106	993.685	1006.080	104.116	993.679	1006.080	104.123	993.691	1006.090	104.100
107	992.990	1006.020	106.965	992.992	1006.010	106.967	992.996	1006.030	106.974
108	993.700	1006.060	106.947	993.696	1006.070	106.949	993.717	1006.070	106.962
109	984.504	1005.570	100.800	984.496	1005.560	100.807	984.493	1005.580	100.812
110	985.208	1005.610	100.798	985.212	1005.620	100.808	985.204	1005.590	100.812
111	990.895	1005.940	100.911	990.890	1005.950	100.920	990.891	1005.950	100.917
112	992.232	1006.000	100.930	992.235	1006.010	100.938	992.238	1006.010	100.912
113	994.266	1008.220	107.432	994.259	1008.220	107.430	994.284	1008.210	107.424
114	994.236	1009.380	107.494	994.229	1009.380	107.497	994.222	1009.390	107.513
115	994.186	1010.120	104.108	994.191	1010.120	104.102	994.180	1010.130	104.098
116	994.156	1010.710	104.101	994.161	1010.710	104.107	994.156	1010.720	104.096
117	994.286	1008.200	100.939	994.278	1008.200	100.942	994.273	1008.220	100.931
118	994.216	1009.390	100.941	994.213	1009.390	100.930	994.208	1009.400	100.941
119	993.920	1014.740	107.017	993.923	1014.750	107.023	993.923	1014.730	107.034
120	993.878	1015.320	106.958	993.880	1015.330	106.949	993.900	1015.340	106.990
121	993.912	1014.740	100.963	993.903	1014.740	100.967	993.923	1014.750	100.951
122	993.877	1015.330	100.957	993.872	1015.320	100.954	993.889	1015.340	100.963

Total station aletinin uzunluk ölçme doğruluğu 3mm + 2 ppm olarak, kullanılan tarayıcının ölçme doğruluğu ise 100 m'ye kadar olan uzaklıklarda 6 mm olarak verilmektedir. Total stationun ölçme doğruluğunun tarayıcının ölçme doğruluğundan daha iyi olması nedeniyle, total stationdan belirlenen koordinatlar temel alınmıştır. Her iki birleştirme yönteminin kullanılması sonucu elde edilen koordinatlar arasında bir karşılaştırma yapılmış ve farklar Çizelge 8.6'da verilmiştir.

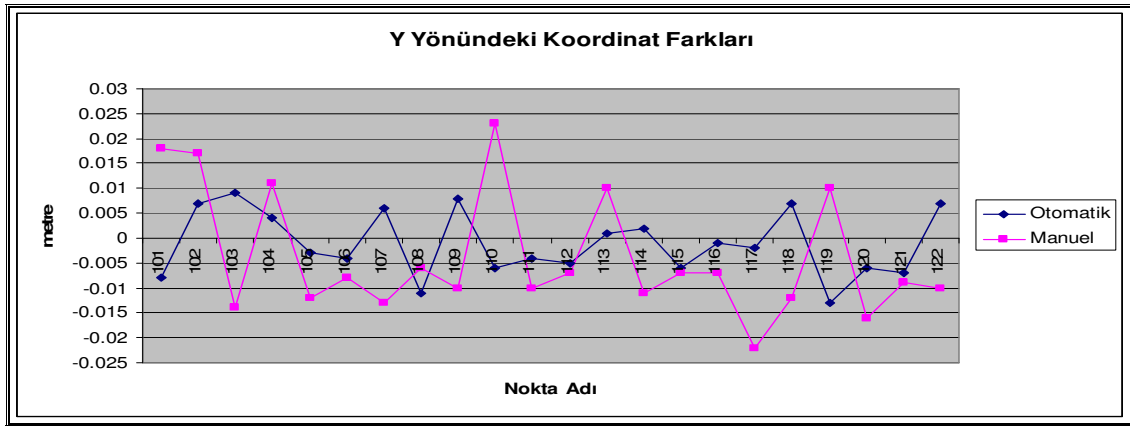
Çizelge 8.6 Her iki yöntemin, Total Stationdan elde edilen koordinatlara göre farkları

Nokta	Total -Otomatik			Total -Manüel		
	Koor. Farkları (mm)			Koor. Farkları (mm)		
No	dX	dY	dZ	dX	dY	dZ
101	-9	-8	-5	-11	18	-11
102	2	7	-13	-13	17	-10
103	8	9	-6	8	-14	-7
104	-3	4	-7	-4	11	-6
105	-3	-3	-3	1	-12	17
106	6	-4	-7	-6	-8	16
107	-2	6	-2	-6	-13	-9
108	4	-11	-2	-17	-6	-15
109	8	8	-7	11	-10	-12
110	-4	-6	-10	4	23	-14
111	5	-4	-9	4	-10	-6
112	-3	-5	-8	-6	-7	18
113	7	1	2	-18	10	8
114	7	2	-3	14	-11	-19
115	-5	-6	6	6	-7	10
116	-5	-1	-6	0	-7	5
117	8	-2	-3	13	-22	8
118	3	7	11	8	-12	0
119	-3	-13	-6	-3	10	-17
120	-2	-6	9	-22	-16	-32
121	9	-7	-4	-11	-9	12
122	5	7	3	-12	-10	-6

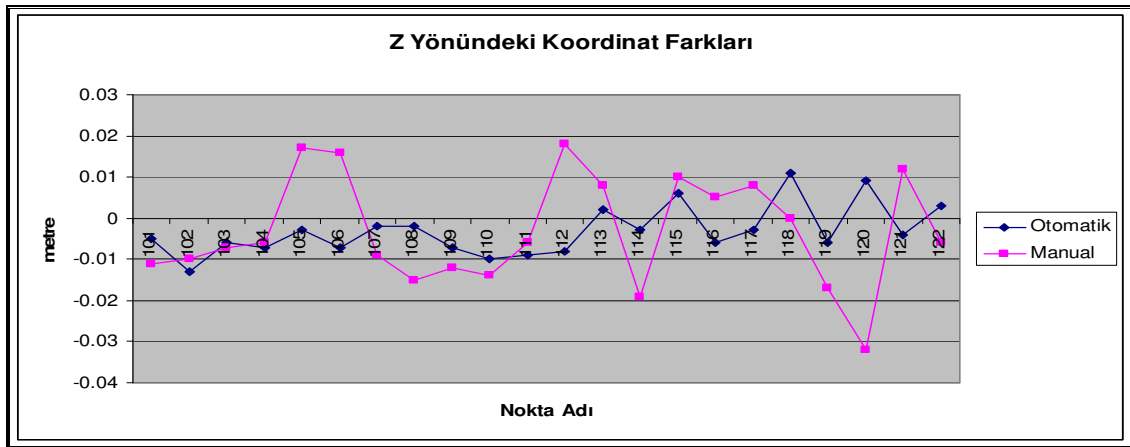
Her iki yöntemden elde edilen değerlerin total station sonuçlarına yakın olması beklenmektedir. Total station koordinatları temel alınarak otomatik olarak ve manüel (elle) belirlenen nokta koordinatlarının, total station koordinatlarından olan farkları hesaplanmıştır. Bu koordinat farklarından yararlanılarak karşılaştırmalarının yapılabilmesi için, her iki yöntemin x,y,z yönündeki farklarının grafikleri çizilmiştir. Bu grafikler, yöntemlerin karşılaştırılabilmesi hususunda fikir vermesi açısından görsel bir işlev taşımaktadır.



Şekil 8.31 X yönündeki koordinat farkları



Şekil 8.32 Y yönündeki koordinat farkları



Şekil 8.33 Z yönündeki koordinat farkları

Bu grafikler incelendiğinde otomatik birleştirme yönteminin, elle birleştirme yöntemine göre daha küçük sapmalar gösterdiği görülmektedir.

Binadaki bu karakteristik noktaların koordinat farklarından yararlanılarak (Çizelge 8.7), her bir koordinat bileşeni için duyarlık ölçütleri belirlenmiştir. Bu aşamada, yöntemlerin kıyaslanmasında, duyarlık ölçütleri, ağırlıksız ve ağırlıklı olarak hesaplanmıştır. Total station ve obje noktaları arasındaki ortalama uzaklık $s_o = 10$ m birim uzunluk seçilerek her nokta için ağırlık $p_i = 10/s_i$ eşitliği ile belirlenmiştir (Çizelge 8.8).

Çizelge 8.7 Düzeltme değerleri (V= Kesin Değer- Ölçü Değeri)

Nokta	Total -Otomatik			Total -Manüel		
	(mm)			(mm)		
No	V _x	V _y	V _z	V _x	V _y	V _z
101	-9	-8	-5	-11	18	-11
102	2	7	-13	-13	17	-10
103	8	9	-6	8	-14	-7
104	-3	4	-7	-4	11	-6
105	-3	-3	-3	1	-12	17
106	6	-4	-7	-6	-8	16
107	-2	6	-2	-6	-13	-9
108	4	-11	-2	-17	-6	-15
109	8	8	-7	11	-10	-12
110	-4	-6	-10	4	23	-14
111	5	-4	-9	4	-10	-6
112	-3	-5	-8	-6	-7	18
113	7	1	2	-18	10	8
114	7	2	-3	14	-11	-19
115	-5	-6	6	6	-7	10
116	-5	-1	-6	0	-7	5
117	8	-2	-3	13	-22	8
118	3	7	11	8	-12	0
119	-3	-13	-6	-3	10	-17
120	-2	-6	9	-22	-16	-32
121	9	-7	-4	-11	-9	12
122	5	7	3	-12	-10	-6

Çizelge 8.8 Total stationdan noktalara olan uzaklıklar ve ağırlıklar

Nokta	Mesafe	Ağırlık
		(so =10 m)
No	Si (m)	Pi =10 / Si
101	16.30	0.613
102	15.17	0.659
103	13.53	0.739
104	12.89	0.776
105	9.60	1.042
106	9.12	1.096
107	10.68	0.936
108	10.25	0.976
109	16.49	0.607
110	15.84	0.631
111	10.89	0.918
112	9.84	1.016
113	11.62	0.861
114	12.49	0.801
115	11.94	0.838
116	12.46	0.803
117	10.02	0.998
118	11.05	0.905
119	16.85	0.594
120	17.39	0.575
121	15.96	0.626
122	16.52	0.605

Ağırlıklı ve ağırlıksız olarak bulunan sonuçlardan yararlanılarak, her iki yöntemde nokta konum değişimleri belirlenmeye çalışılmıştır. Her iki yöntemdeki 3B konum doğrulukları formül (9,3)'deki gibi hesaplanmıştır (Aydın, 1984; Erkaya ve Hoşbaş, 2006)

$$\text{Ağırlıksız} \quad S_{x_0} = \sqrt{\frac{[V_x V_x]}{n-1}} \quad S_{y_0} = \sqrt{\frac{[V_y V_y]}{n-1}} \quad S_{z_0} = \sqrt{\frac{[V_z V_z]}{n-1}} \quad (9.1)$$

$$\text{Ağırlıklı} \quad S_{x_0} = \sqrt{\frac{[PV_x V_x]}{n-1}} \quad S_{y_0} = \sqrt{\frac{[PV_y V_y]}{n-1}} \quad S_{z_0} = \sqrt{\frac{[PV_z V_z]}{n-1}} \quad (9.2)$$

$$\text{3B Konum Doğruluğu} \quad S_{3B} = \sqrt{S_{x_0}^2 + S_{y_0}^2 + S_{z_0}^2} \quad (9.3)$$

Çizelge 8.9 Ağırlıksız (eşit ağırlıklı) bulunan değerler (mm)

Ağırlıksız Bulunan	Total Station-Otomatik (mm)			Total Station-Manuel (mm)		
Değerler	Sx	Sy	Sz	Sx	Sy	Sz
Standart Sapma	5.678	6.658	6.887	10.841	13.102	13.739
Nokta Konum Doğruluğu	11.136			21.862		

Çizelge 8.10 Ağırlıklı (farklı duyarlılık) bulunan değerler (mm)

Ağırlıklı Bulunan	Total Station-Otomatik (mm)			Total Station-Manuel (mm)		
Değerler	Sx	Sy	Sz	Sx	Sy	Sz
Standart Sapma	4.994	5.728	6.039	9.45	11.49	12.03

Ağırlıksız değerlendirme sonucunda hesaplanan nokta konum doğruluğu her noktada aynı olmaktadır. Ağırlıklı değerlendirme sonucunda her nokta için hesaplanan konum doğrulukları formül(9.5)' e göre hesaplanmış ve sonuçları Çizelge 8.11'de verilmiştir. Ağırlıklı ve ağırlıksız olarak bulunan sonuçların karşılaştırılması neticesinde, ağırlıklı değerlerin ağırlıksızlara göre konum duyarlıklarını daha uygun yansıttığı gözlenmiştir. Bu nedenle irdeleme ağırlıklı çözüme göre yapılmıştır.

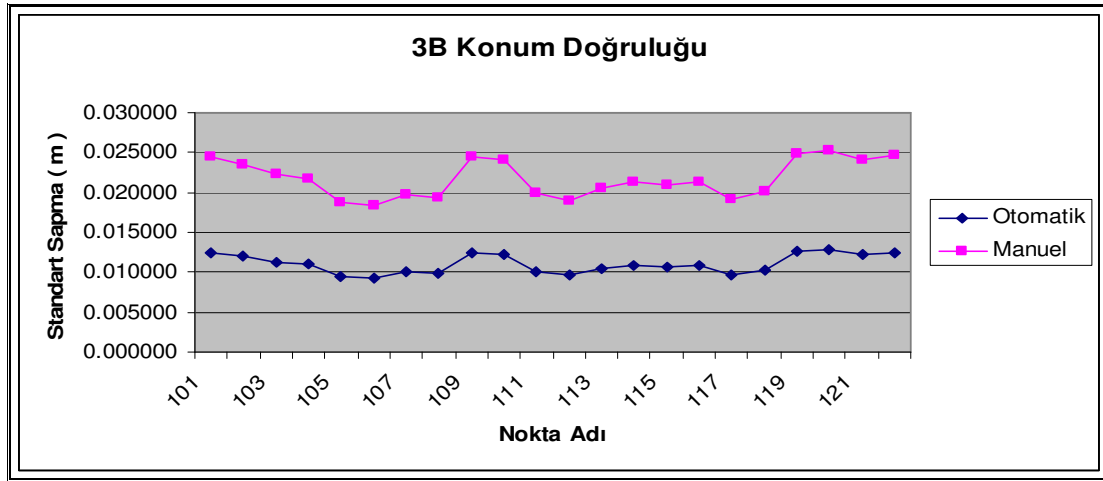
Her iki hesap sonucunda bulunan birim ağırlıklı ölçünün standart sapma değerleri ile her nokta için 3B konum doğrulukları formül (9,4 ve 9.5)'den elde edilmiştir (Aydın, 1984; Erkaya ve Hoşbaş, 2006).

$$Sx_i = \frac{Sx_0}{\sqrt{Pi}} \quad Sy_i = \frac{Sy_0}{\sqrt{Pi}} \quad Sz_i = \frac{Sz_0}{\sqrt{Pi}} \quad (9.4)$$

$$3B \text{ Konum Doğruluğu} \quad S_{3B_i} = \sqrt{Sx_i^2 + Sy_i^2 + Sz_i^2} \quad (9.5)$$

Çizelge 8.11 Ağırlıklı olarak bulunan 3B konum doğrulukları (Her nokta için)

AĞIRLIKLİ (değerler mm biriminde)								
Nokta	Total Station-Otomatik				Total Station-Manüel			
No	Sx (i)	Sy (i)	Sz (i)	3B-S(i)	Sx (i)	Sy (i)	Sz (i)	3B-S(i)
101	6.377	7.313	7.711	12.394	12.066	14.670	15.360	24.428
102	6.152	7.055	7.439	11.956	11.641	14.153	14.818	23.566
103	5.810	6.663	7.026	11.292	10.993	13.366	13.994	22.256
104	5.670	6.503	6.857	11.021	10.729	13.045	13.658	21.722
105	4.893	5.612	5.917	9.511	9.259	11.258	11.787	18.746
106	4.769	5.470	5.768	9.270	9.025	10.973	11.489	18.271
107	5.162	5.920	6.243	10.033	9.768	11.876	12.435	19.776
108	5.056	5.798	6.114	9.827	9.567	11.632	12.179	19.369
109	6.412	7.354	7.755	12.463	12.134	14.753	15.446	24.566
110	6.286	7.209	7.601	12.217	11.894	14.461	15.141	24.080
111	5.212	5.978	6.303	10.131	9.863	11.992	12.556	19.968
112	4.954	5.682	5.991	9.629	9.375	11.398	11.934	18.980
113	5.384	6.174	6.511	10.464	10.188	12.386	12.968	20.625
114	5.581	6.401	6.750	10.848	10.562	12.841	13.445	21.382
115	5.456	6.257	6.598	10.604	10.324	12.552	13.142	20.902
116	5.574	6.392	6.740	10.833	10.547	12.823	13.426	21.353
117	4.998	5.732	6.045	9.715	9.458	11.500	12.040	19.149
118	5.250	6.020	6.348	10.203	9.934	12.077	12.645	20.111
119	6.482	7.434	7.839	12.599	12.266	14.913	15.614	24.832
120	6.585	7.552	7.963	12.799	12.461	15.150	15.862	25.226
121	6.310	7.237	7.631	12.264	11.941	14.517	15.200	24.174
122	6.419	7.361	7.762	12.475	12.146	14.767	15.461	24.589



Şekil 8.33 Ağırlıklı 3B Konum doğrulukları(Her noktanın)

Ağırlıklı olarak her iki yöntemde bulunan 3B konum doğruluklarının karşılaştırılması sonucunda, otomatik yöntemin manüel yöntemle göre konum duyarlıklarını daha gerçekçi olarak yansıttığı gözlenmiştir.

Koordinat farkları ve bunların standart sapmalarının bilindiği dikkate alınarak, total station ve bu iki yöntemden elde edilen koordinat farklarının anlamlı olup olmadığının irdelenmesinde t-testi uygulanmıştır.

t-testi için test büyüklüğü

$$t = \frac{\bar{X} - \mu}{\frac{S}{\sqrt{n}}} \quad (9.6)$$

eşitliği ile verilmektedir (Demirel, 2005). Bu ifadeyi, çalışmamıza uyarladığımızda;

$$t_{xi} = \frac{v_i}{Sx_i}, \quad (9.7)$$

$$t_{yi} = \frac{v_i}{Sy_i}, \quad (9.8)$$

$$t_{zi} = \frac{v_i}{Sz_i}, \quad (9.9)$$

eşitlikleri geçerlidir.

Hesaplanan test büyüklükleri Çizelge 8.12’ de verilmiştir. Bu değerler, serbestlik derecesi ($f=n-1$) ve $\alpha=0.05$ yanılma olasılığı ile t tablosundaki sınır değeri ile karşılaştırılmıştır. t-testi sınır değeri, ($f=22-1=21$ serbestlik derecesi ve $\alpha=0.05$ yanılma olasılığı için) 2.080’dir. Bu değerden küçük olan değerlerin uyumlu, büyük olan değerlerin uyumsuz olduğuna karar verilir. Çizelge 8.12 incelendiğinde bütün test değerlerinin sınır değerini altında kaldığı görülmektedir

Çizelge 8.12 t- testi için karşılaştırma büyüklükleri

t- testi değerleri						
Nokta	Total Station-Otomatik			Total Station-Manuel		
Adı	Tx	Ty	Tz	Tx	Ty	Tz
101	1.4114	1.0940	0.6484	0.9116	1.2270	0.7162
102	0.3251	0.9922	1.7475	1.1168	1.2012	0.6749
103	1.3770	1.3508	0.8540	0.7277	1.0475	0.5002
104	0.5291	0.6151	1.0209	0.3728	0.8432	0.4393
105	0.6131	0.5346	0.5070	0.1080	1.0659	1.4423
106	1.2580	0.7313	1.2137	0.6648	0.7291	1.3927
107	0.3874	1.0135	0.3204	0.6142	1.0946	0.7238
108	0.7911	1.8971	0.3271	1.7769	0.5158	1.2316
109	1.2476	1.0878	0.9027	0.9065	0.6778	0.7769
110	0.6364	0.8323	1.3156	0.3363	1.5905	0.9246
111	0.9592	0.6691	1.4278	0.4055	0.8339	0.4779
112	0.6055	0.8800	1.3353	0.6400	0.6141	1.5083
113	1.3002	0.1620	0.3072	1.7668	0.8074	0.6169
114	1.2541	0.3125	0.4445	1.3255	0.8566	1.4132
115	0.9164	0.9589	0.9094	0.5812	0.5577	0.7609
116	0.8970	0.1564	0.8902	0.0000	0.5459	0.3724
117	1.6005	0.3489	0.4963	1.3744	1.9131	0.6644
118	0.5715	1.1627	1.7327	0.8053	0.9936	0.0000
119	0.4628	1.7487	0.7654	0.2446	0.6706	1.0888
120	0.3037	0.7945	1.1302	1.7656	1.0561	2.0174
121	1.4263	0.9673	0.5242	0.9212	0.6200	0.7895
122	0.7790	0.9509	0.3865	0.9880	0.6772	0.3881

Uygulamada kullandığımız aletlerin üretici firma tarafından verilen ölçme doğrulukları dikkate alındığında, ister otomatik ister elle birleştirme sonucunda belirlenen koordinat farklarının ölçme doğruluğu sınırları içinde kaldığı görülmektedir. Diğer bir ifade ile her iki

yöntemin uygulanması ile elde edilen koordinatlar arasında uyumsuzluk yoktur. Otomatik birleştirmeden elde edilen özdeş noktaların koordinatlarının, elle birleştirmeden elde edilenlere göre kesin değer olarak kabul ettiğimiz total station koordinatlarına daha yakın olduğu belirlenmiştir.

8.2 Yersel Lazer Tarayıcı Verilerinin Değerlendirilmesi ve 3B Modelleme Örneği

Bu çalışmada, Yıldız Teknik Üniversitesi, Merkez Kampusünde bulunan, tarihi öneme sahip olan Pembe Köşk'ün 2 cephesi, Trimble marka Mensi GS 100 yersel lazer tarayıcı taranmış ve elde edilen verilerden 3 boyutlu bir model oluşturulmaya çalışılmıştır.



Şekil 8.34 Pembe tarama noktalarından görünümü

Tüm tarama işlemlerini kontrol etmek ve elde edilen veriyi kaydetmek için, tarama yazılımı yüklü bir dizüstü veya cep bilgisayarı kontrol ünitesi olarak kullanılır. Bu kontrol ünitesi, tarama işlemi süresince toplanan veri miktarının büyüklüğü yüzünden yeterli veri işleme ve depolama kapasitesine sahip olmalıdır. Tarama işlemi için, Mensi firması tarafından üretilen

POINT SCAPE yazılımı kullanılmıştır. Tarayıcılar, genellikle yer üzerinde toprak veya diğer uygun yüzeylere bir sehpa ya da tripot vasıtasıyla kurulabilir. Bazı tarayıcılar, bilinen bir nokta üzerine yerleştirilebilir ve düzeçlenebilir. Tarayıcımız konumu bilinmeyen herhangi bir nokta üzerine tripot yardımıyla kurulmuştur. Tarayıcı için güç kaynağı olarak şehir elektriğinden yararlanılmış ve güç kablosu şehir akımına, akım düzenleyici aracılığıyla bağlanmıştır.



Şekil 8.35 Mensi GS 100 Lazer Tarayıcısının Kurulumu

Tarama işlemine başlamadan önce, ölçüm tasarım planı yapılmıştır. Bu plana göre 3 farklı noktadan olacak şekilde, referans kürelerini ve hedef noktalarını tarama alanı içerisine alacak şekilde, tarayıcının kurulacağı noktaların yerleri belirlenmiştir.



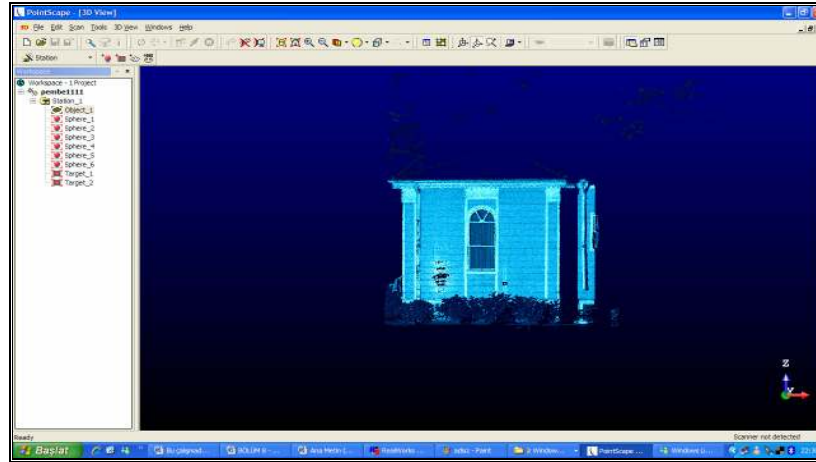
Şekil 8.36 Referans küre ve hedef noktalarının Pembe köşk üzerine yerleştirilmiş görüntüsü

Bu tarayıcının kurulacağı noktalar, görüş alanı olarak birbirini kesecek şekilde ayarlanmıştır. Lazer tarayıcı, bu noktalara bina yüzeyini görebilecek yükseklikte kurulduktan ve kabaca düzeçlendikten sonra güç ve bilgisayar bağlantıları yapılarak çalıştırılmıştır. Bilgisayarın tarayıcıyı tanımasından sonra çalışma işlemi için, yeni bir istasyon dosyası oluşturulmuştur. Tarama işlemini başlatmadan önce istenilen hassasiyete göre tarama parametrelerinin yazılıma girilmesi gerilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada tarama yazılımına aşağıdaki parametreler girilmiştir.

Çizelge 8.13 Tarama Parametreleri

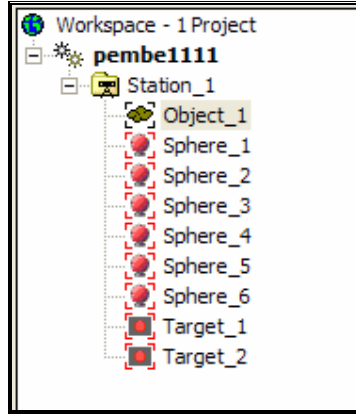
Scan parameters	
Angular Resolution	0.64 mRad
Linear Resolution	6.42 mm at 10.00 m
Number of shots	1
Minimum Distance	0.00 m
Scanner Options	Parasite point reducer:
Comment	

Görüş alanına ve tarama planına bağlı olarak taranacak olan kısım, POINT SCAPE yazılımında çerçeve içerisine alınmış yani taranılması istenilen kısım yazılıma tanıtılmıştır. Tarama işlemi başladıktan sonra, nesne yüzeyini yansıtan nokta bulutları eş zamanlı olarak bilgisayar ekranında görülmeye başlamıştır.



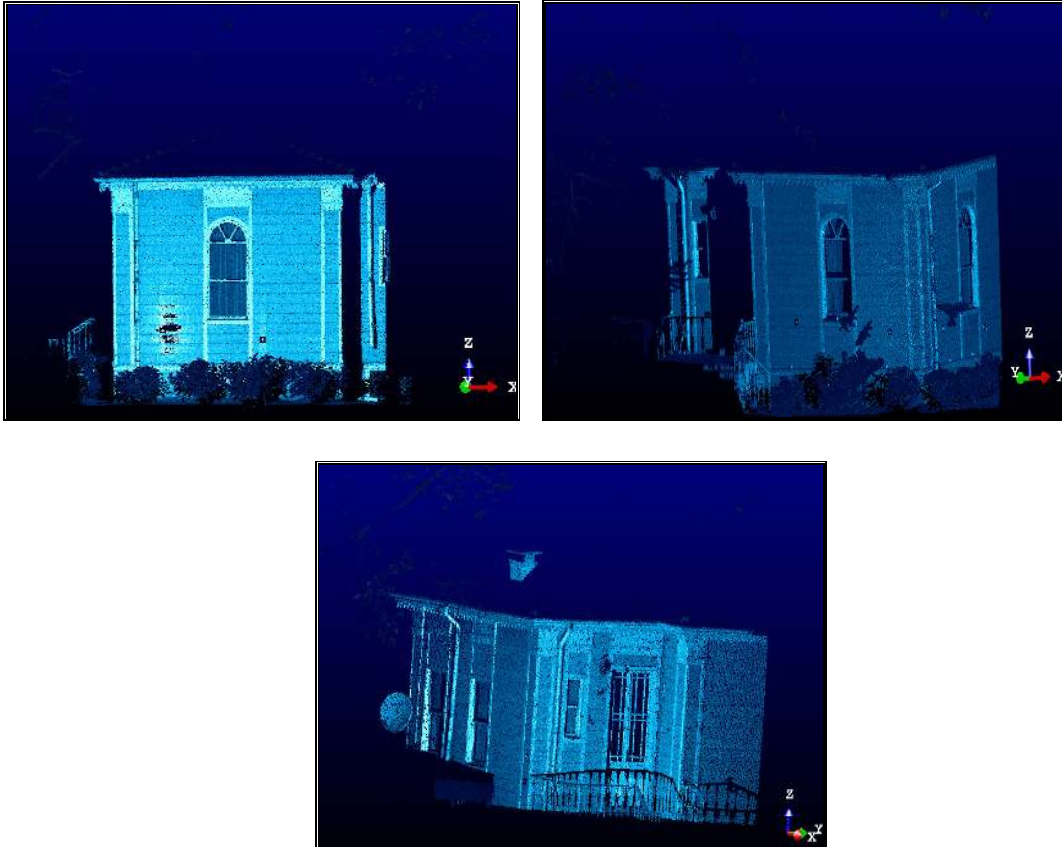
Şekil 8.37 Point scape yazılımı

Point Scape yazılımında her istasyon noktası için taranacak obje, küre ve hedef noktaları ayrı olarak yazılım içerisinde taranmaktadır.



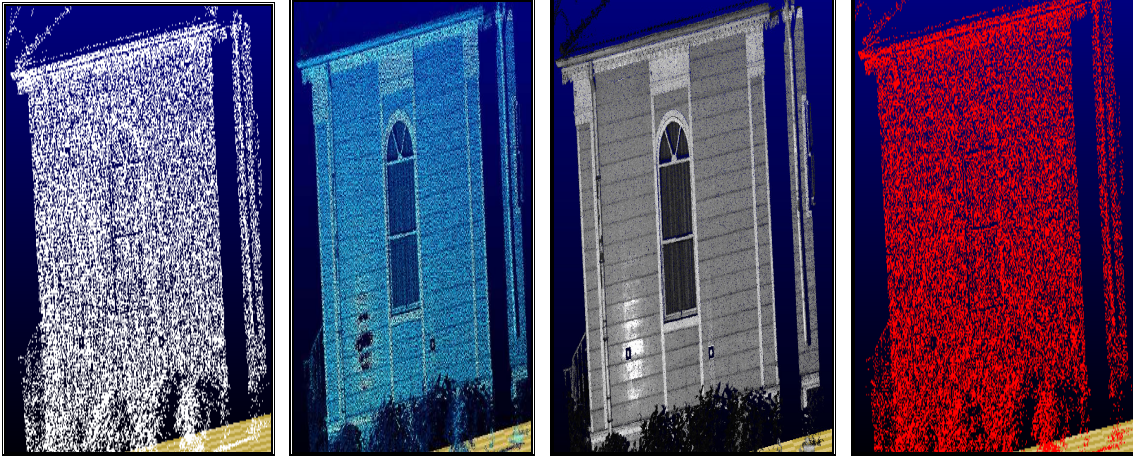
Şekil 8.38 Point Scape yazılımındaki iş penceresi

Bu şekilde tarayıcı kurulan her noktada aynı işlemler yapılmaktadır. Taramalar sonucu elde edilen nokta bulutları uygun formatlarda kayıt edilmektedir. Bu işlemler sonucu, elde edilen nokta bulutları belirli bir amaç için direkt olarak kullanılamaz.



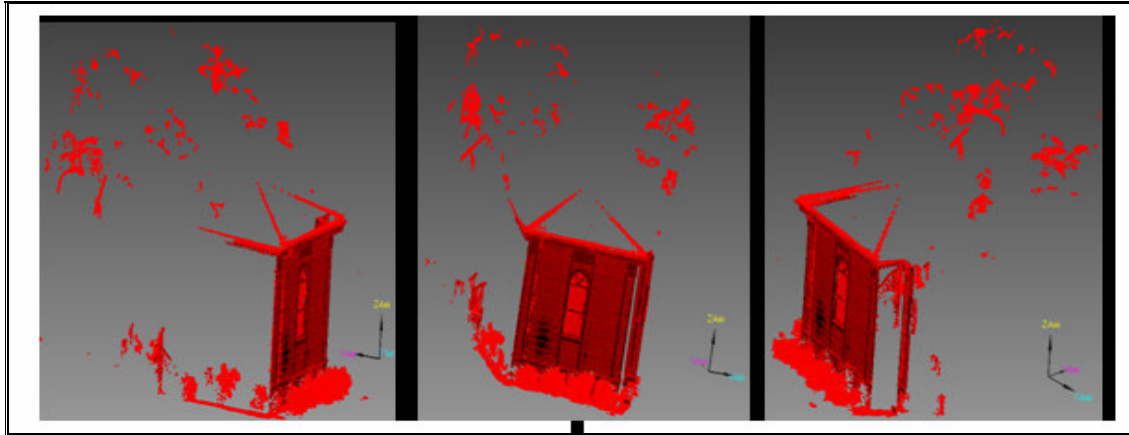
Şekil 8.39 Pembe köşkün 3 farklı noktadan yapılan nokta bulutu kümesi

Bazı lazer tarayıcılar, nokta koordinatları (x, y, z) yanında yoğunluk ve RGB değerlerini de kaydetmektedir. Bu değerler sayesinde, nokta bulutu üzerinde daha rahat çalışmak amacıyla noktalara istenilen renk tonu atanabilir. Böylece nokta bulutuna ait detaylar daha belirgin hale gelir ve üzerinde çalışmak kolaylaşır. Düzensiz ve gereksiz noktalar bu şekilde tespit edilebilir.

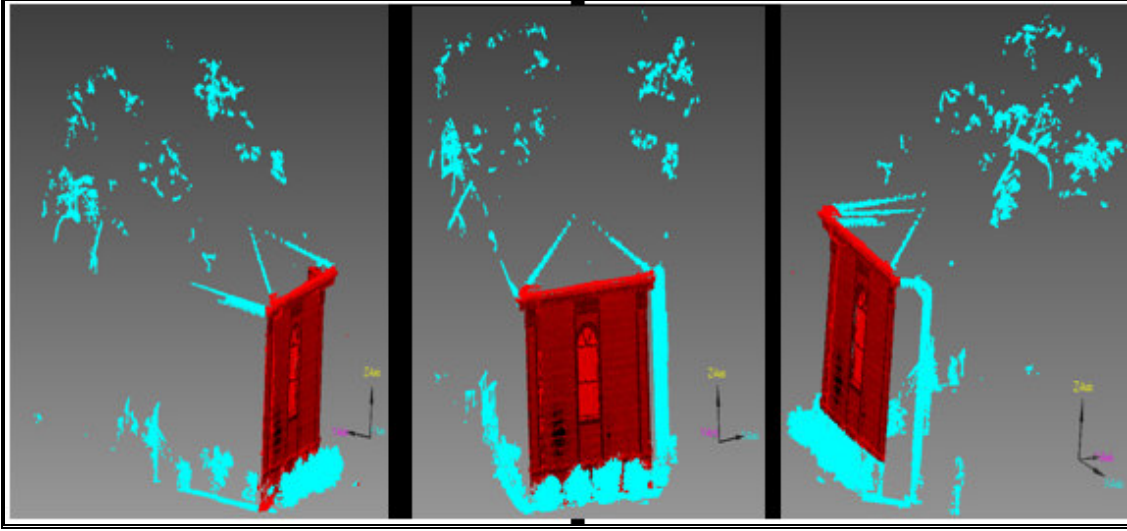


Şekil 8.40 İstenilen renk tonu atanmış nokta bulutu kümeleri.

Proje dosyasına kaydedilen nokta bulutlarının düzenli hale getirilmesi gerekir. Çünkü olası nesne yüzeyini temsil etmeyen noktalar da kaydedilmektedir. Bunlar, taranan nesnenin arka planından kaynaklanan yansımalar, tarayıcı ile taranan nesne arasında bulunan ağaç, insan, taşıtlar vb. nesnelerden kaynaklanan yansımalar, nesnenin kenarlarından kaynaklanan kısmi yansımalar, ısının çoklu yansımaları, taranan nesnelerin farklı yansıtırlığından kaynaklanan yansımalar şeklinde nesne yüzeyine temsil etmeyen hatalı noktalarda kayıt edilmektedir. Bu hatalı nokta kümelerinin silinmesi gerekir.

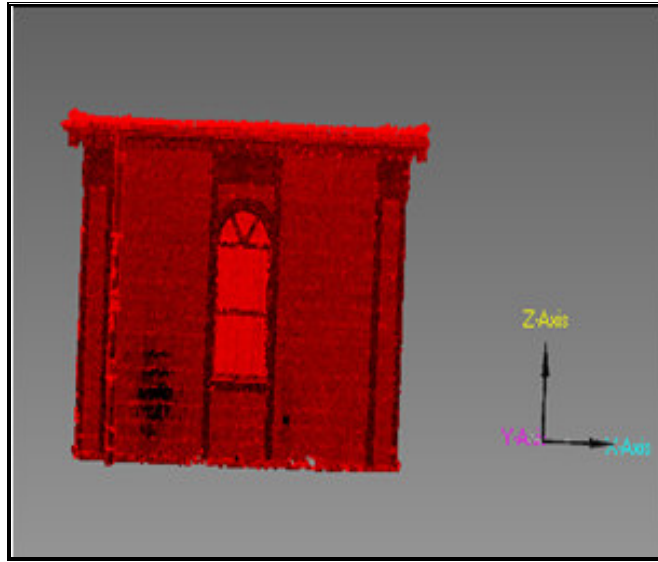


Şekil 8.41 Gereksiz ve düzensiz nokta bulut kümelerinin önden, soldan ve sağdan görünümü

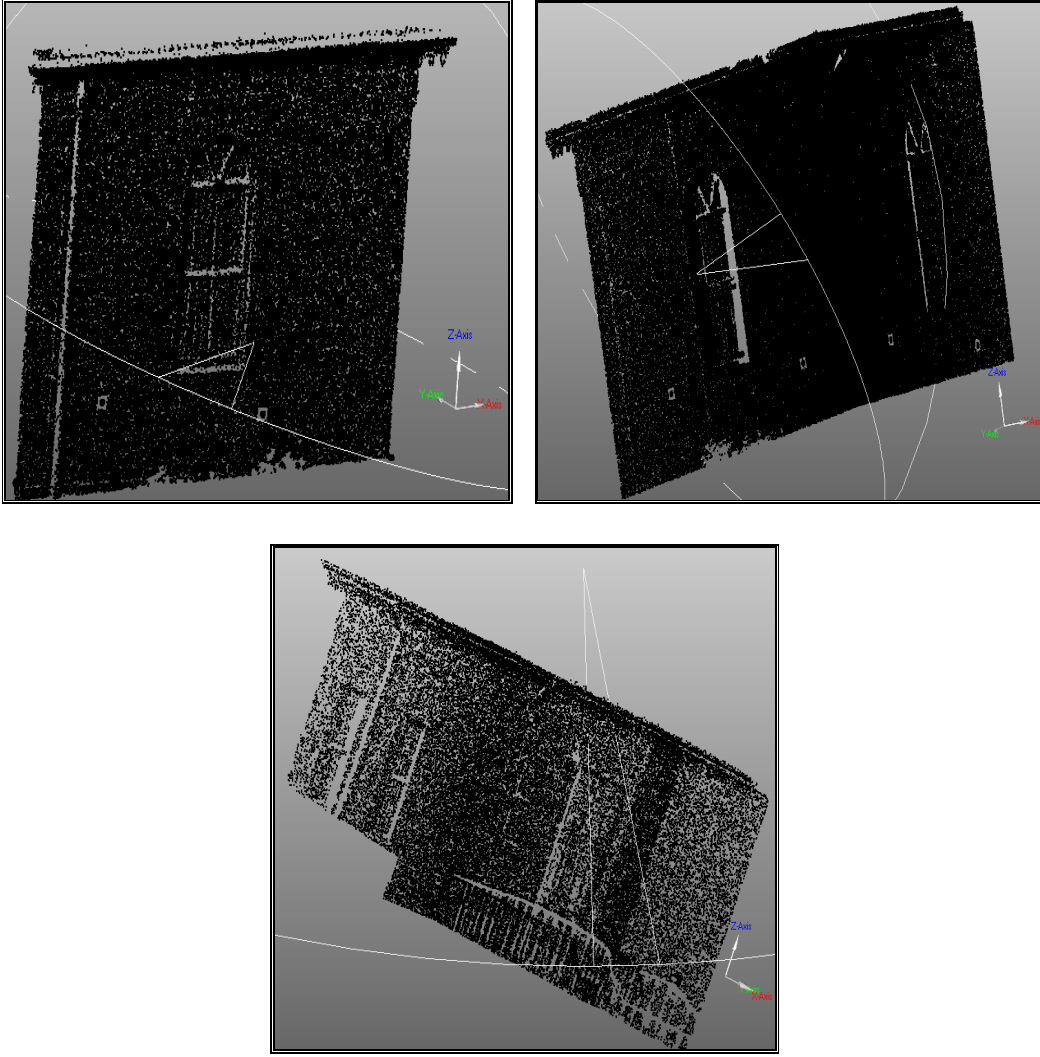


Şekil 8.42 Tarama bölgesindeki gereksiz ve düzensiz nokta bulut kümelerinin seçimi

Bu gereksiz ve düzensiz noktaların kaydı, tarama yazılımlarına ön ve arka plandaki nesneleri yansıtan nokta kümelerinin kaydının yapılmaması için mesafe limitleri girilerek önlenebilir. Kullanılan yazılımla, nokta bulutları üzerinde görselleştirme yapılarak gereksiz noktalar tespit edilip silinebilir.

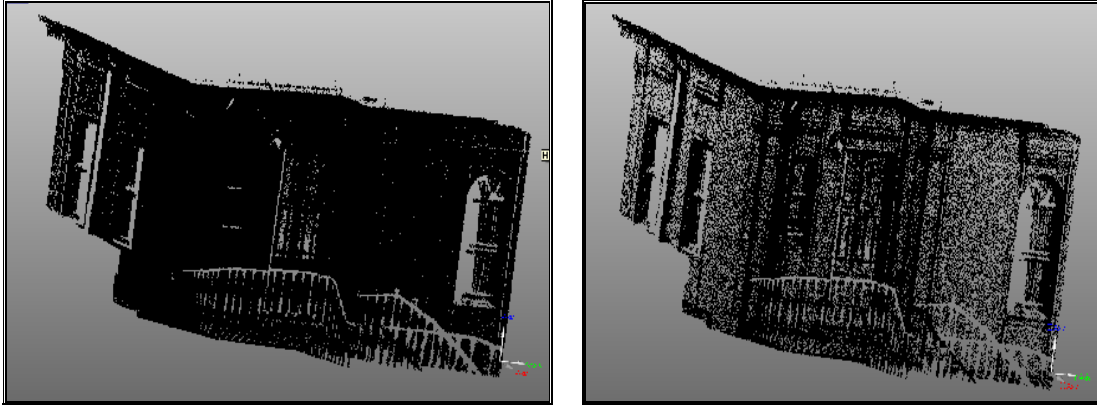


Şekil 8.43 Gereksiz ve düzensiz noktaları silinmiş nokta bulutu kümesi



Şekil 8.44 Tarama bölgelerinin arka ve ön plandaki nokta bulutlarından silinmiş halleri

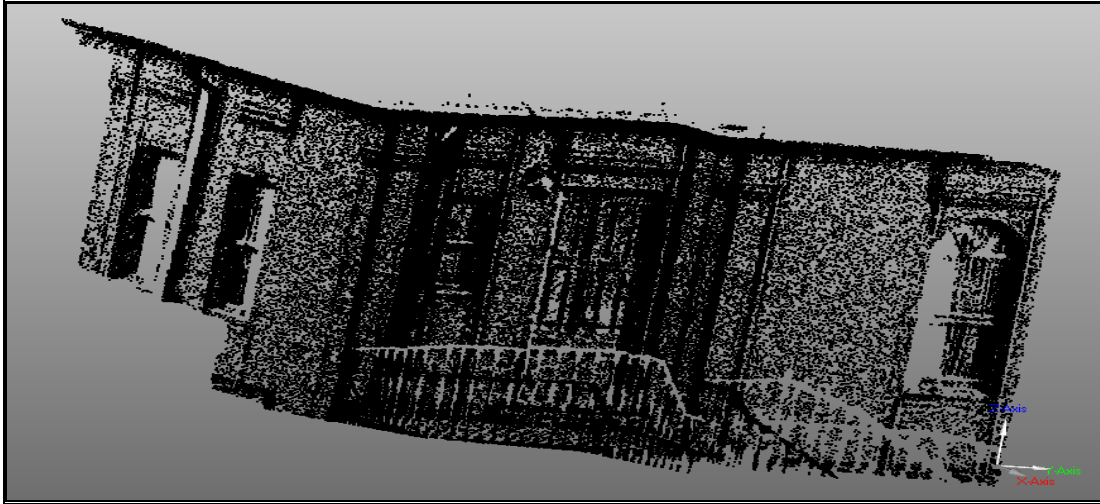
Silme işlemleri gerçekleştirilmesine rağmen elde mevcut olan noktalar düzensizdir. Bu düzensiz noktalara filtreleme işlemleri yapılarak düzenli hale getirilmeye çalışılır. Nesne yüzeyinin düzgün ve pürüzsüz olması durumunda, nesne yüzeyini yansıtan yoğun nokta bulutu kümesine gerek yoktur. Çünkü bu gereğinden fazla nokta bulutu, yoğun veri boyutuna ve yazılımların yavaş çalışmasına yol açmaktadır. Bunları önlemek için nokta azaltması işlemi yapılmaktadır. Düzgün geometrik şekle sahip olan nesnenin gösteriminde yoğun nokta bulutu yerine daha az nokta bulutu kullanılmasını sağlamaktadır.



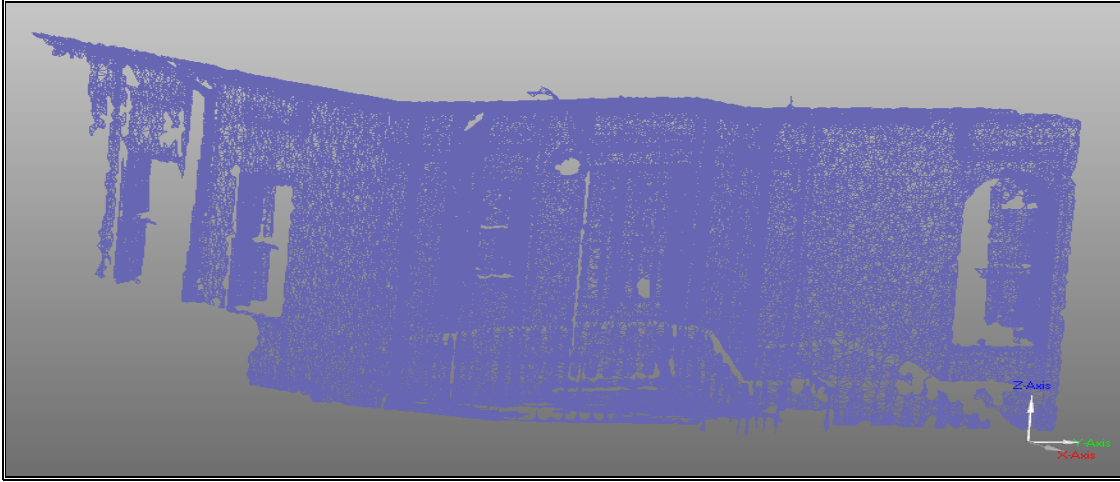
Şekil 8.45 Gürültü giderme, filtreleme ve inceltme işlemi aşaması

Düzensiz noktaların silinmesi, filtreleme, nokta azaltması işlemleri hem birleştirme öncesi, hem de birleştirme sonrası yapılabilir.

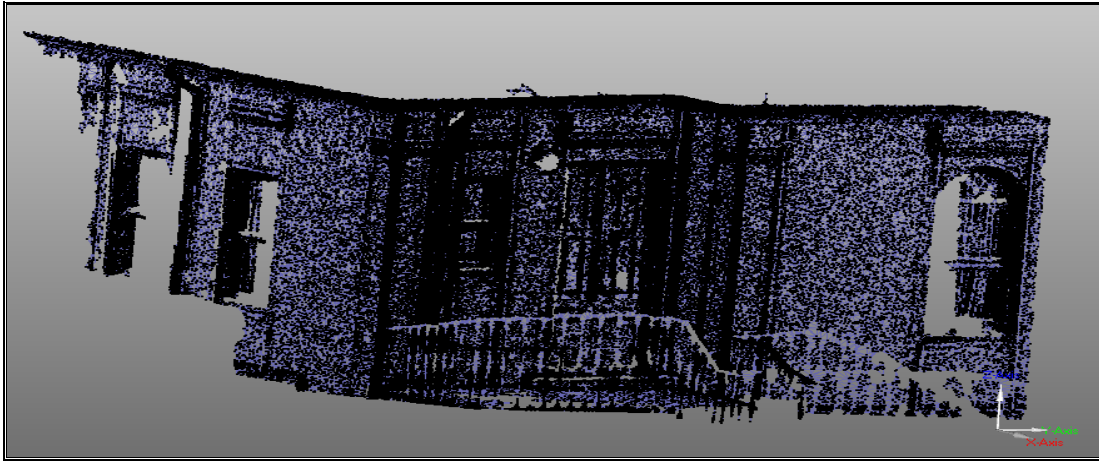
Tarama işlemleri sonucu oluşan nokta bulutları düzenli hale getirildikten sonra asıl önemli olan kısım, bu düzenlenmiş taranan obje veya alanı yansıtan yüzeyden, geometrik olarak 3 boyutlu modelin oluşturulmasıdır. Taranmış obje, basit geometrik şekillerden oluşuyorsa CAD yazılımları ile nokta bulutu üzerinden basit çizimler gerçekleştirilmektedir. Eğer objenin yüzeyi çok karmaşık ve basit geometrik şekillerle çizim gerçekleştirilemiyorsa yüzey ağı modelleri oluşturulur.



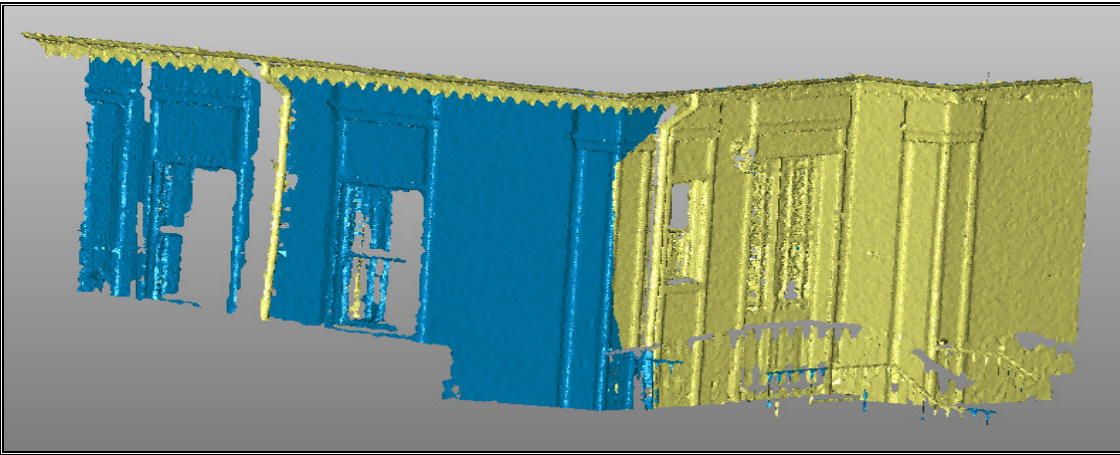
Şekil 8.46 Düzenlenmiş nokta bulutu kümesi



Şekil 8.47 Üçgenlerden yararlanılarak oluşturulmuş yüzey ağı (üçgenler)

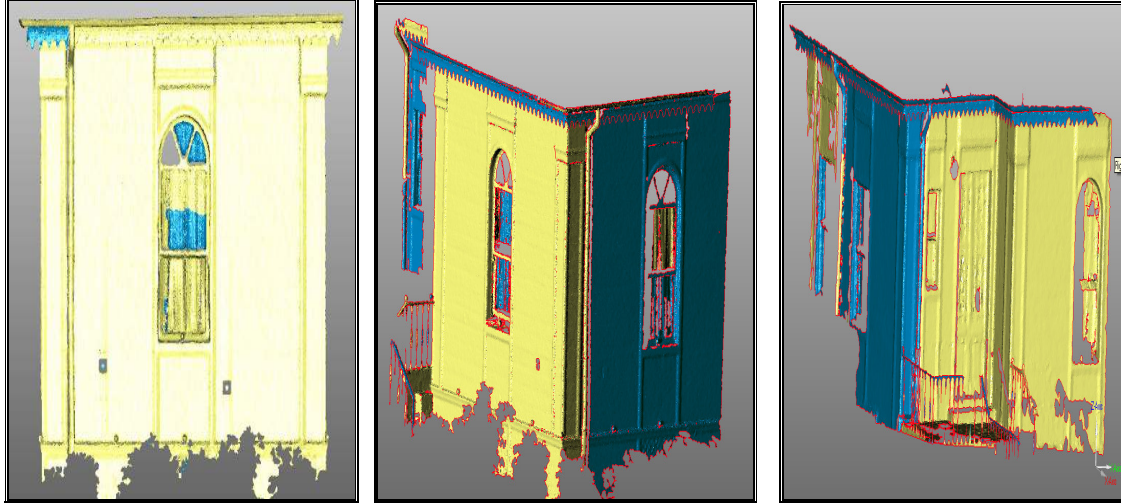


Şekil 8.48 Nokta ve yüzey ağının(üçgenlerin) birlikte görünümü



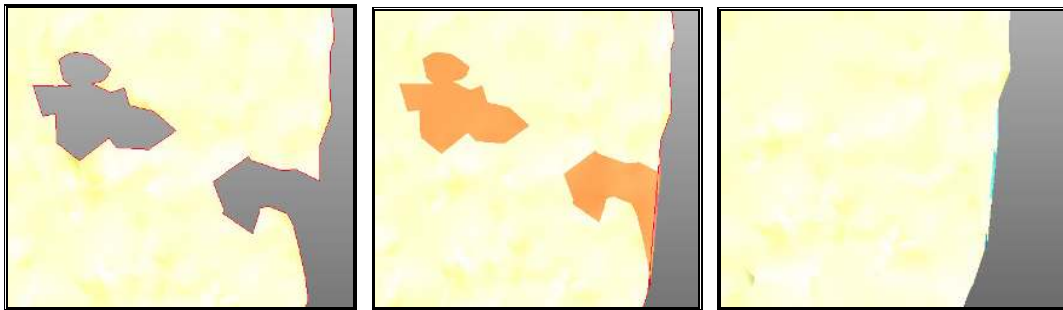
Şekil 8.49 Oluşturulan 3B Model (mesh)

Bu yüzey ağı, üçgenlemelerle yazılım üzerinden yapılır. 3 farklı tarama noktasından elde edilen nokta bulutu kümeleri düzenli halde getirildikten sonra, her tarama bölgesi için 3B Model oluşturulmuştur.



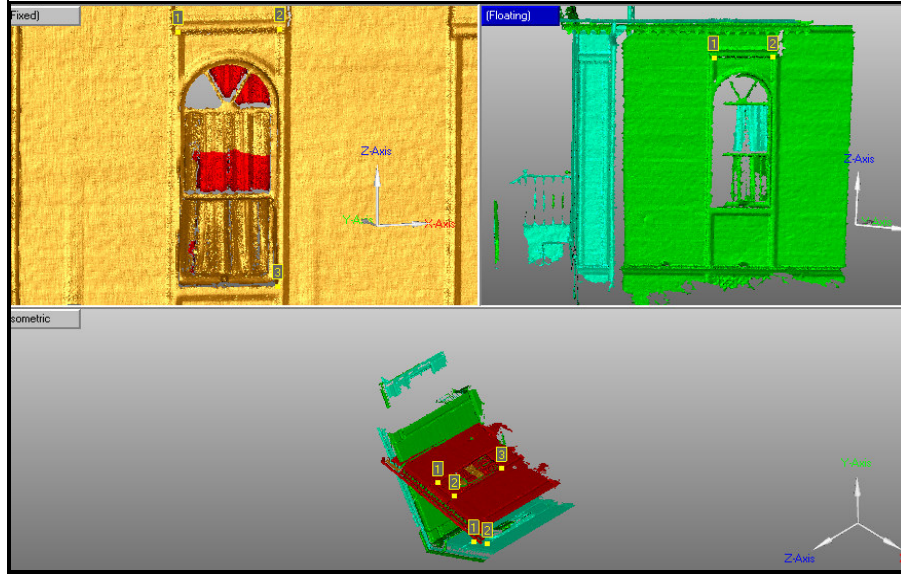
Şekil 8.50 Her Bir Parçanın 3B Modeli

Bu üçgenleme, otomatik olarak yazılım tarafından yapıldığında, objenin bazı bölümlerde üçgenler oluşmayabilir, gereksiz üçgenlemeler veya boşluklar oluşabilir ya da oluşan üçgenlerde bazı hatalar olabilir. Bu üçgenlerin düzenli hale getirilmesi, boşlukların doldurulması, kullanıcı tarafından yazılım modülleri kullanılarak yapılabilir.

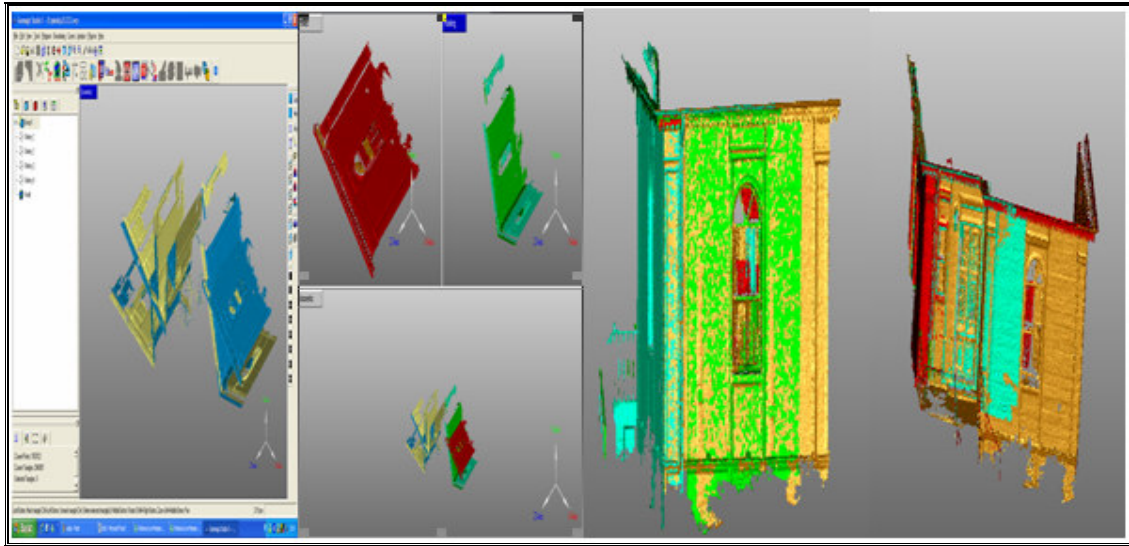


Şekil 8.51 Oluşan Boşlukların Doldurulması

Taramalar, taranacak objenin konumuna, büyüklüğüne bağlı olarak tek noktadan yapılabilirdiği gibi farklı noktalardan da yapılabilir. Taranacak nesnenin bir bütün halinde gösterilmesi için, farklı noktalardan yapılan taramaların birleştirilmesi gerekir. Bu birleştirme işlemi bağlantı, kontrol noktaları veya nesne üzerinde belirgin pencere kösesi gibi vb. işaretler kullanılarak yapılmaktadır.



Şekil 8.52 Belirgin noktalar kullanılarak birleştirme işlemi

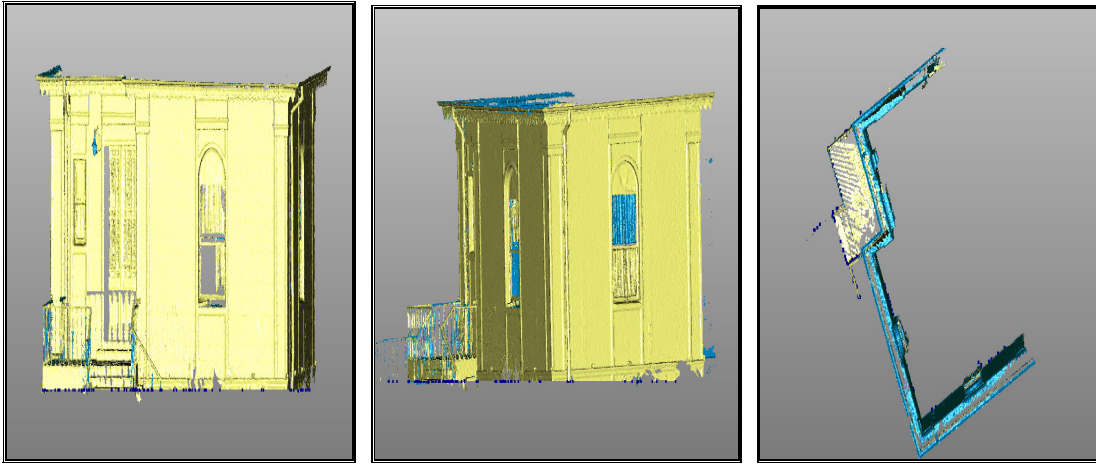


Şekil 8.53 Üç farklı modelin birleştirilmesi

Farklı istasyonlardan taranan nokta bulutları, GEOMAGIC STUDIO 5 yazılımı kullanılarak, bindirmeli alanlarda (kesişen) kolayca belirlenen 3 noktadan çakıştırılma işlemi ile birleştirme işlemi tamamlanmıştır. Birleştirme işlemi tamamlandıktan sonra Pembe köşk dosyası tek bir dosya haline getirilmiştir. 3Boyutlu modelleme adımlarımız bu dosya üzerinden gerçekleştirilmiştir. Filtreleme işlemi uygulandıktan sonra birleştirme (merge) işlemine geçilmiştir. Bu şekilde, Pembe köşkün üç farklı taramadan elde edilen 3B modelleri bütünleştirilmiştir.

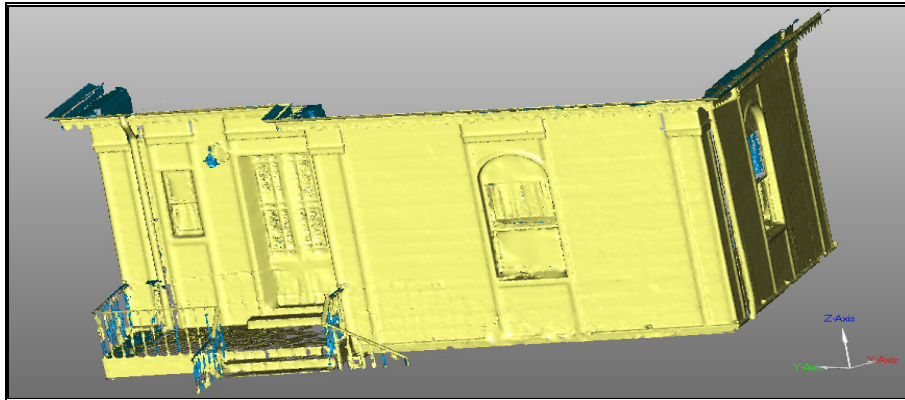


Şekil 8.54 Oluşan nokta bulutu görünümü



Şekil 8.55 Pembe köşk modelin çeşitli açılardan görünümü

Bir sonraki adımda ise üçgenler ile tamamlanmış 3B modelde boşlukların olduğu tespit edilmiştir. Bu boşluklar büyüklük ve konumlarına göre otomatik veya manüel olarak doldurulmuştur. Son aşamada ise yumuşatma işlemi yapılmıştır. Böylece Pembe köşkün dış cephesinin 3 boyutlu modeli oluşturulmuş olur.



Şekil 8.56 Oluşan 3B model

8.3 Nokta Bulutu İle Elde Edilen Basit Geometrik Şekilli 3B Modellerin Doğruluklarının İncelenmesi

8.3.1 Basit Geometrik Şekilli Objelerin Modellenmesi

Bu çalışma için, basit geometrik şekillere sahip yaklaşık 15x15x15 cm boyutunda küp, 4x4x15 cm boyutunda dikdörtgen prizma ve 10 cm çapında, 20 cm yüksekliğinde silindir kullanılmıştır. Bu geometrik şekiller, YTÜ İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Malzemesi Laboratuvarında, standart kalıplara dökülmüş betondan elde edilmiştir.



Şekil 8.57 Basit geometrik şekiller

Bu basit geometrik şekilli objelerin yersel lazer tarayıcılarla taranması, YTÜ- Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği Bölümü, Kalibrasyon Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Tarama işlemi için MENSİ GS 100 lazer tarayıcısı, tarama yazılımı olarak POINT SCAPE yazılımı, nokta bulutlarının küreler yardımıyla daha hassas birleştirilmesinin yapılması için REALWORKS yazılımı, elde edilen nokta bulutu kümelerinin düzenlenmesi, 3B modelin oluşturulması ve oluşturulan modelden kesitlerin çıkarılması için GEOMAGIC STUDIO.5 yazılımı kullanılmıştır. Elde edilen bu model veya nokta bulutlarının farklı yazılımlarda açılması, farklı formatlarda kayıt edilmesi ile olanaklıdır. Ayrıca yazılımlardan tarama sonucu oluşan nokta bulutların koordinatları, mesafe ve açı değerleri, RGB değerleri de elde edilebilir. Elde edilen modeller CAD modelleri için DXF, yüzey modelleme için ASCII, görselleştirme için VRML formatında diğer yazılımlarda açılabilir. Çalışmamızda bu objeler, uygun bir yüzey üzerine yerleştirilmiştir. Bir ölçme tasarımı yapılarak bu objelerin 2 farklı noktadan taranması kararlaştırılmıştır. Bu tarama noktaları dikkate alınarak, her tarama içinde en az 3 tane küre olacak şekilde küreler uygun yerlere konulmuştur.



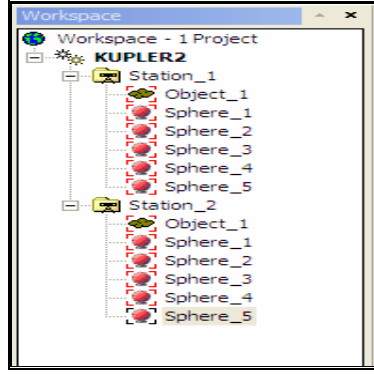
Şekil 8.58 Küre ve objelerin görünümü

Daha sonra yersel lazer tarayıcı, önceden belirlediğimiz noktalara kurulmuştur. Her bölgeden taramaya başlamadan önce tarama parametreleri POİNT SCAPE yazılımına girilmiştir. Bu parametreler, taranan obje detaylarının en iyi çözünürlüğünü elde edecek şekilde belirlenmiştir. Bu şekilde 2 farklı noktadan obje ve kürelerin taramaları yapılmıştır.



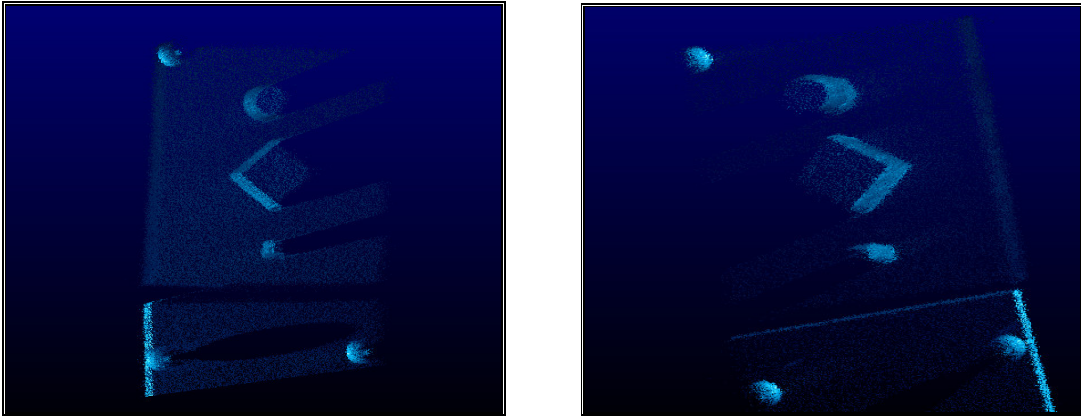
Şekil 8.59 Küre ve objelerin MENSİ GS 100 ile taranması

Tarama yapılırken her istasyon noktasında obje ve kürelerin taranması, yazılım içerisinde her taranan nesne için işin altına yeni tarama dosyası açılmasıyla yapılır.

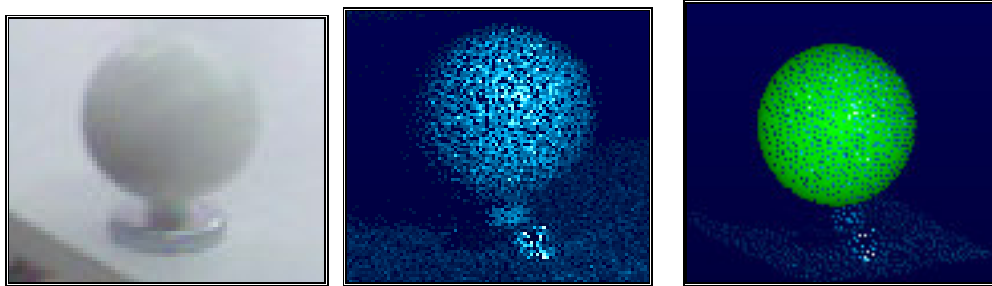


Şekil 8.60 Her İstasyon noktası için açılan tarama dosyaları

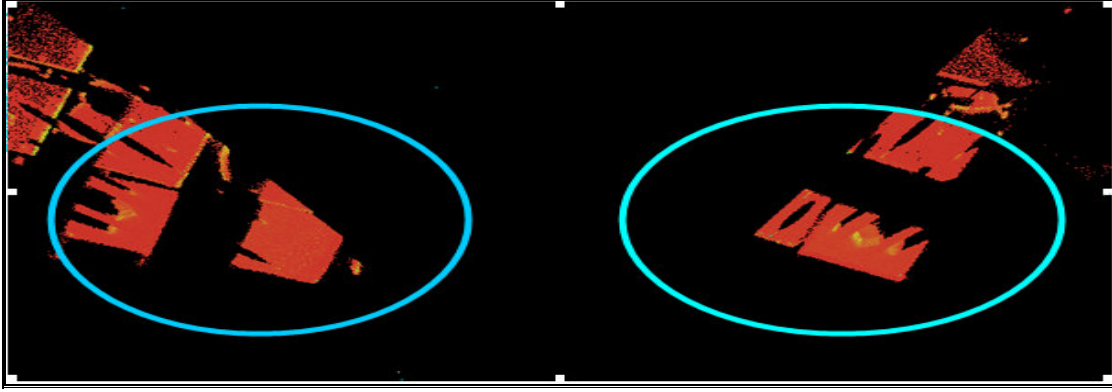
Bu şekilde her iki tarama noktası için, yazılım penceresi içerisinde taranacak obje yüzeyleri için tarama pencereleri açılır. Taranacak bölge yazılıma tanıtıldıktan sonra, tanıtılan tarama alanına göre tarayıcı, yatayda ve düşeyde konumunu alır. Tarama parametreleri girilerek tarama işlemi başlatılır.



Şekil 8.61 Farklı noktalardan elde edilen nokta bulutları

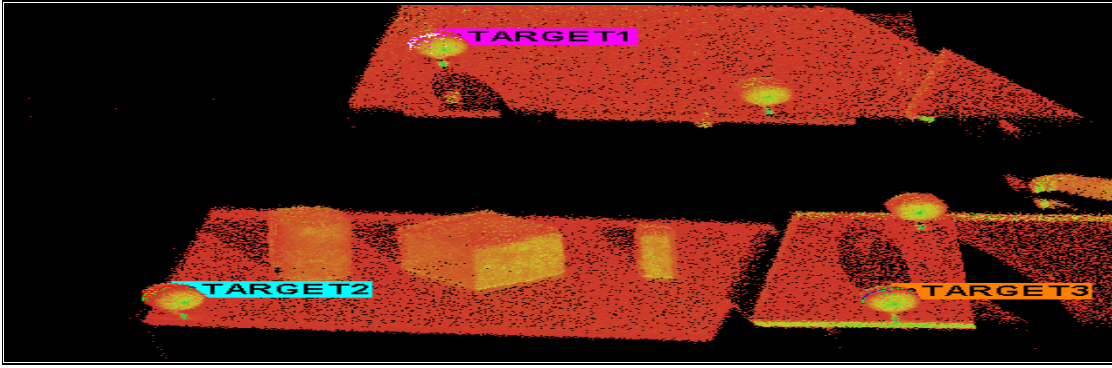


Şekil 8.62 Kürelerin gerçek, nokta bulutu ve yazılım içerisindeki görüntüleri



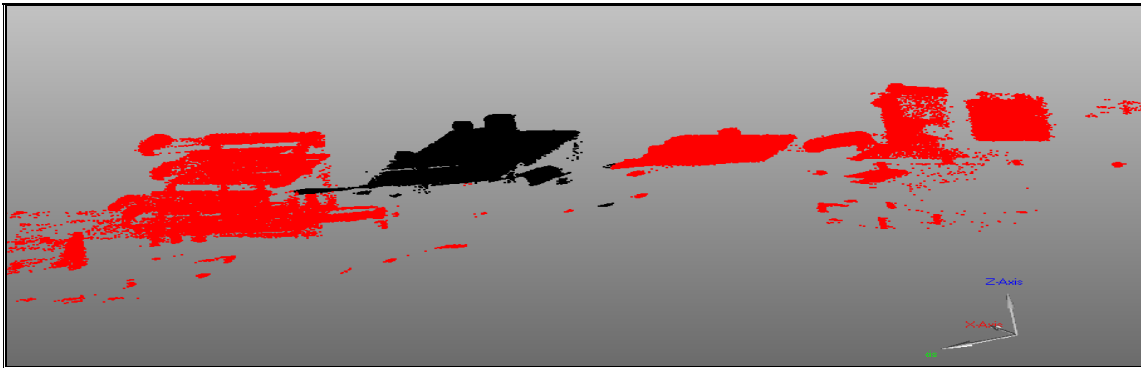
Şekil 8.63 REALWORKS yazılımındaki 2 farklı noktadan taranan nokta bulutlarının görünümü

Bu farklı noktalardan elde edilen taramalar, her tarama bölgesinde ortak bulunan en az 3 tane küre yardımıyla otomatik birleştirme yapılarak bir bütün haline getirilmiştir.



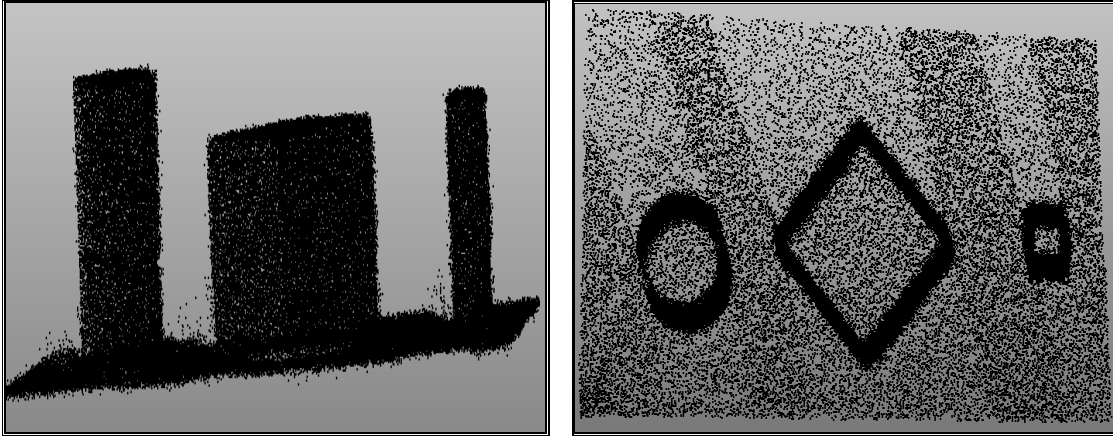
Şekil 8.64 Küreler yardımıyla otomatik birleştirme

Farklı noktalardan yapılan taramalarda taranacak objelerin yanı sıra arka ve ön planda gereksiz ve düzensiz nokta bulutları da elde edilmiştir. Birleştirilen nokta kümelerindeki bu istenmeyen noktaların silinmesi gerekmektedir.



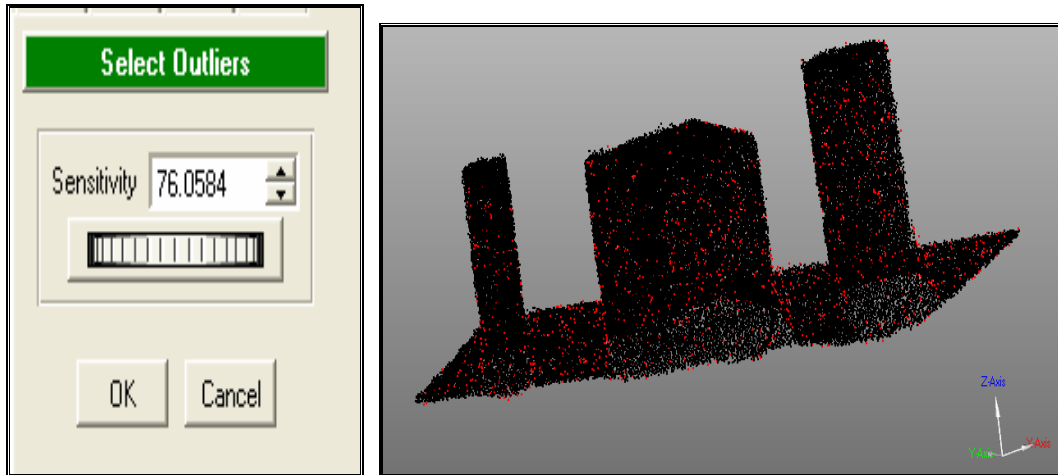
Şekil 8.65 Obje, arka ve ön plandaki gereksiz ve düzensiz nokta kümeleri

Bu noktaların silinmesi, GEOMAGİC STUDIO.5 yazılımının görselleştirme özelliğindeki büyültme, küçültme, döndürme ve kaydırma özelliklerinden yararlanılarak yapılmıştır.



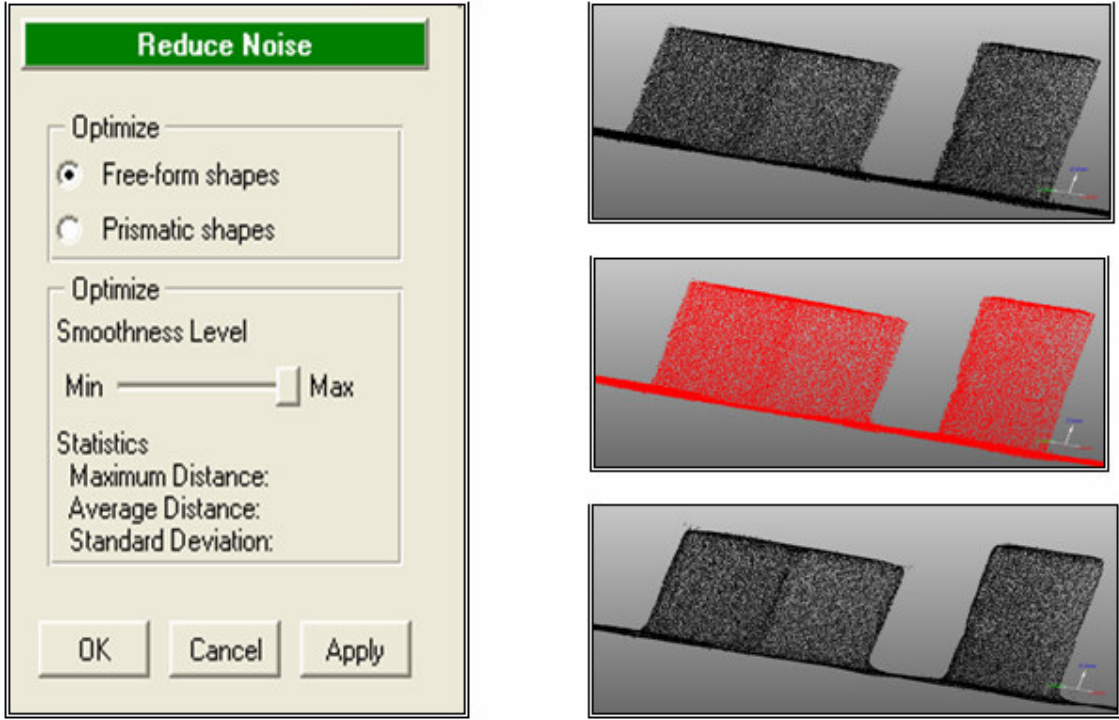
Şekil 8.66 Düzensiz noktaları silinen objelerin yandan ve yukarıdan görünümü

Düzensiz ve gereksiz noktaların silinmesine rağmen yine de obje yüzeylerinde kısmı yansılardan, kenarlardan kaynaklanan gereksiz noktalar vardır. Bu noktaların belirlenip silinerek, obje yüzeylerinin düzenli hale getirilmesi gerekmektedir. Bu yazılım tarafından istenilen hassasiyete göre kullanıcıya bağlı olarak gerçekleşmektedir.

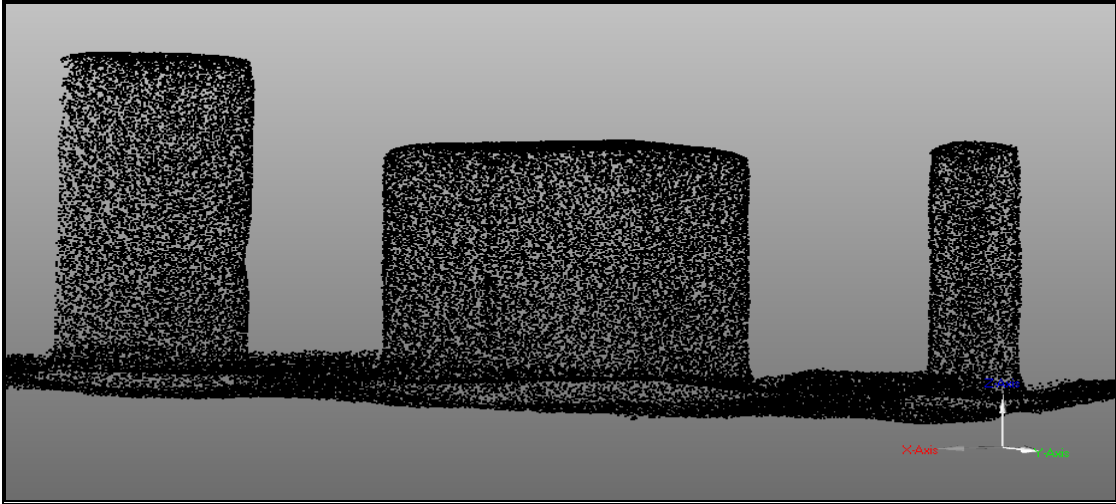


Şekil 8.67 Objeler yüzeyindeki kısmi yansımaların belirlenmesi

Kısmi ve kenarlardan yansıyan noktalar silindikten sonra, obje yüzeyini oluşturan noktalardaki gürültülerin giderilmesi gerekmektedir. Yapılan bütün işlemlerde amaç, obje yüzeylerini gerçeğe yakın halde yansıtacak, nokta bulutlarını düzenli duruma getirmektir.

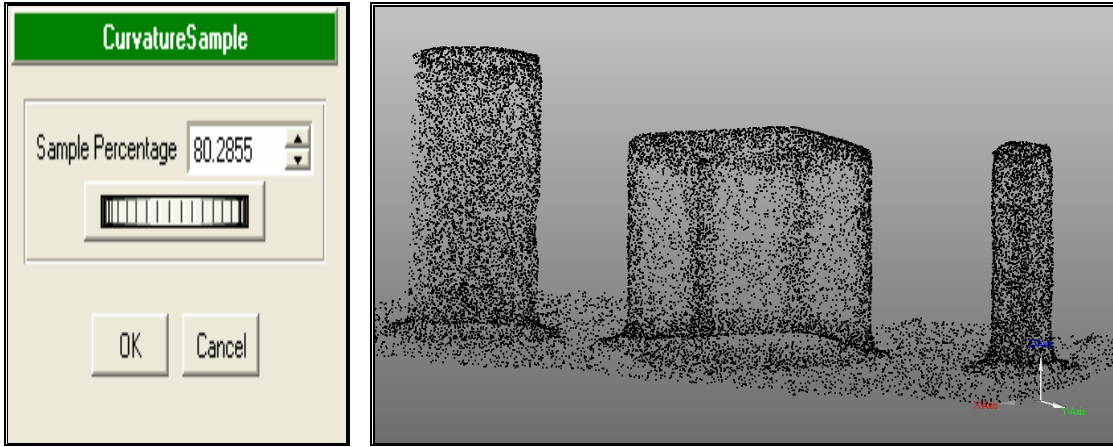


Şekil 8.68 Gürültüleri giderilmiş nokta bulutunun önceki ve sonraki görünümü



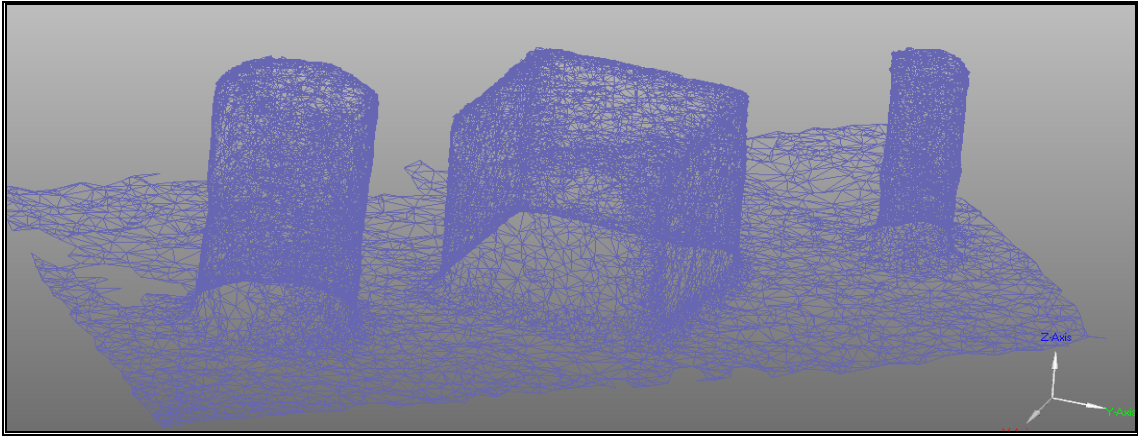
Şekil 8.69 Düzenli ve gürültüsü giderilmiş obje yüzeyinin görünümü

Basit geometrik şekillere sahip objelerde, obje yüzeyini yansıtan çok fazla sayıda noktaya gerek yoktur. Daha az nokta bulutu da yüzeyin gösterimi için yeterlidir. Çok fazla sayıda nokta bulutu hem veri boyutu olarak fazla yer kaplamakta, hem de nokta bulutlarının değerlendirilmesi için kullanılan yazılımları yavaşlatmaktadır. Bu yüzden, düzgün ve pürüzsüz yüzeylere sahip obje yüzeylerini yansıtan nokta bulutlarının sayısı azaltılmaktadır.



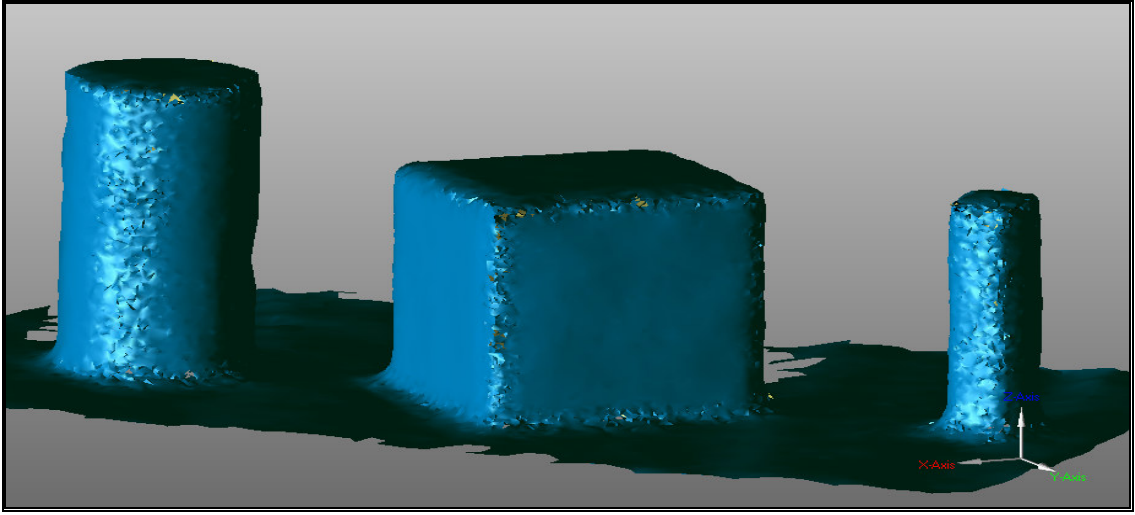
Şekil 8.70 Sayısı azaltılmış nokta bulutu kümesi

Nokta bulutları ile ilgili düzenlemeler yapıldıktan sonra, yüzey modellerinden yararlanarak taranmış obje ya da alanın katı modelleri yaratılabilir. Bu modeller, nokta bulutları üzerinden yüzey ağı modelleri oluşturularak gerçekleştirilir. Bu ağ, noktalar arasındaki üçgenlerin oluşturulmasıyla yazılım tarafından gerçekleştirir.



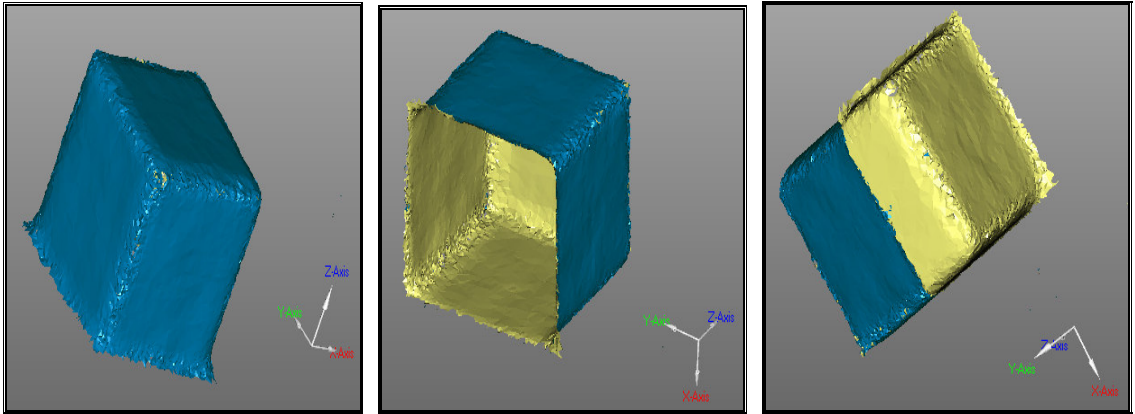
Şekil 8.71 Objelerin yüzey ağı(üçgenler) oluşturulmuş görünümü

Yüzey ağı üzerine, nesne yüzeyi gösterimi için doku, görüntü vb. bilgiler eklenebilir. Yapılan bu işlemlerle, taranmış objelerin gerçeğe yakın 3 boyutlu modeli elde edilmiştir.

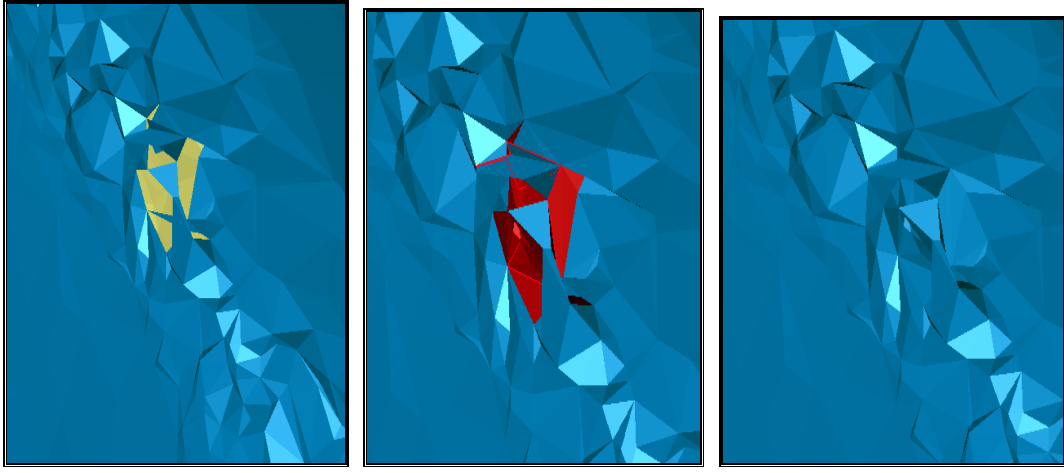


Şekil 8.72 Oluşturulmuş düzensiz 3B Model

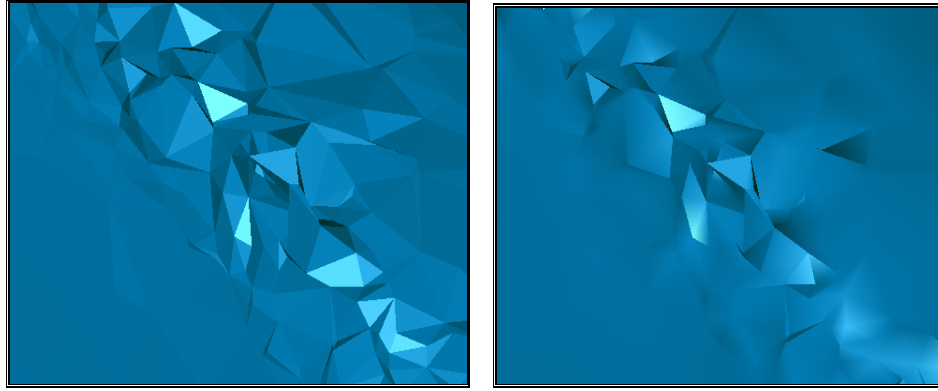
Bu model, nokta bulutları üzerinden oluşturulan yüzey ağındaki üçgenleme boşlukları, üçgenlerden kaynaklanan hatalar gibi sebeplerden dolayı, düzensiz olarak meydana gelmiştir. Bu düzensiz 3B modelin düzenli hale getirilmesi, üçgen boşluklarının doldurulması, modelin gürültülerinin giderilmesi için, her objede (silindir, küp, dikdörtgen prizma) ayrı olarak düzeltmeler yapılmıştır. Son ürün olarak elde edilen modeller üzerinden, gerçeğe oldukça yakın veriler elde edilmektedir. Oluşturulan model üzerinden nokta konum bilgilerine, objenin boyut bilgilerine, yüzey, alan ve hacim bilgilerine ulaşılabilir. Oluşturulan her bir objenin 3B modeli düzenli hale getirilmeye çalışılmıştır. Küp için yapılan işlemler görsel olarak aşağıdaki şekillerde verilmiştir.



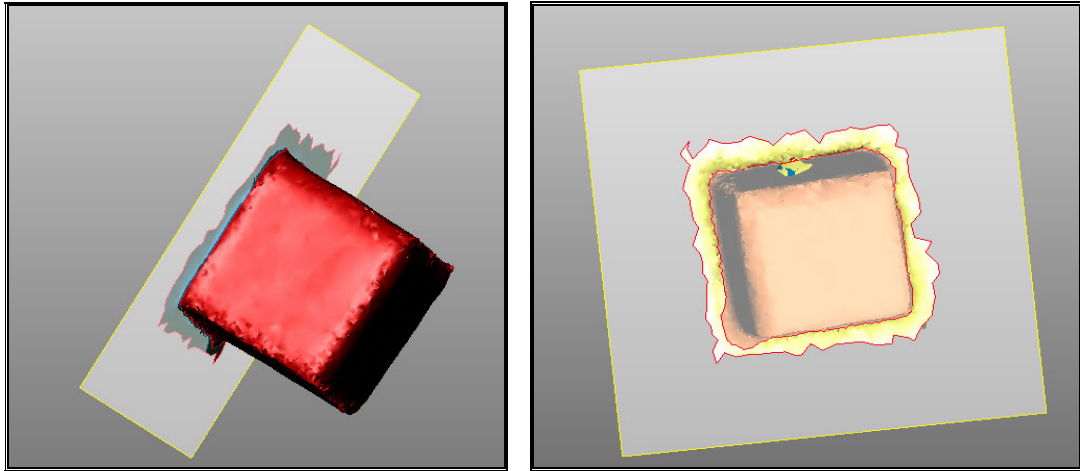
Şekil 8.73 Küpün farklı açılardan görünümü



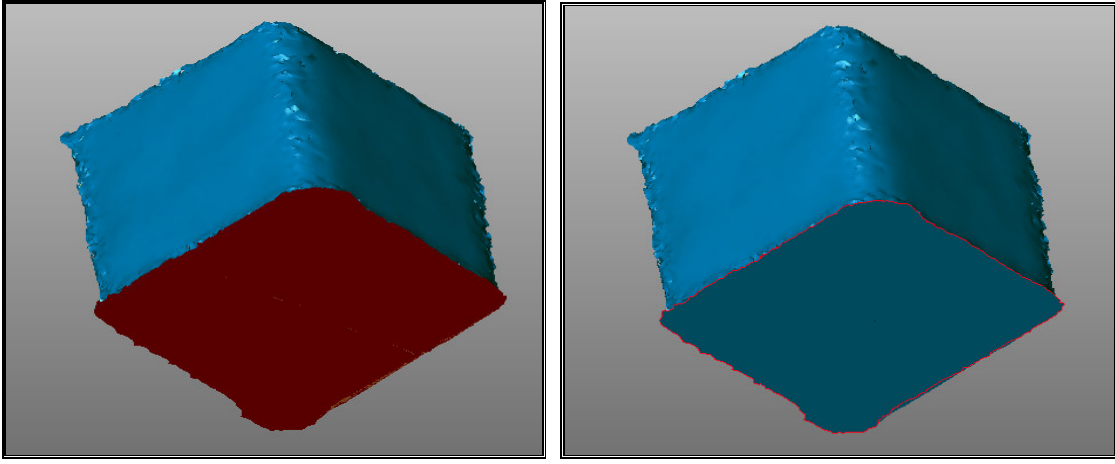
Şekil 8.74 Üçgen Boşluklarının doldurulması



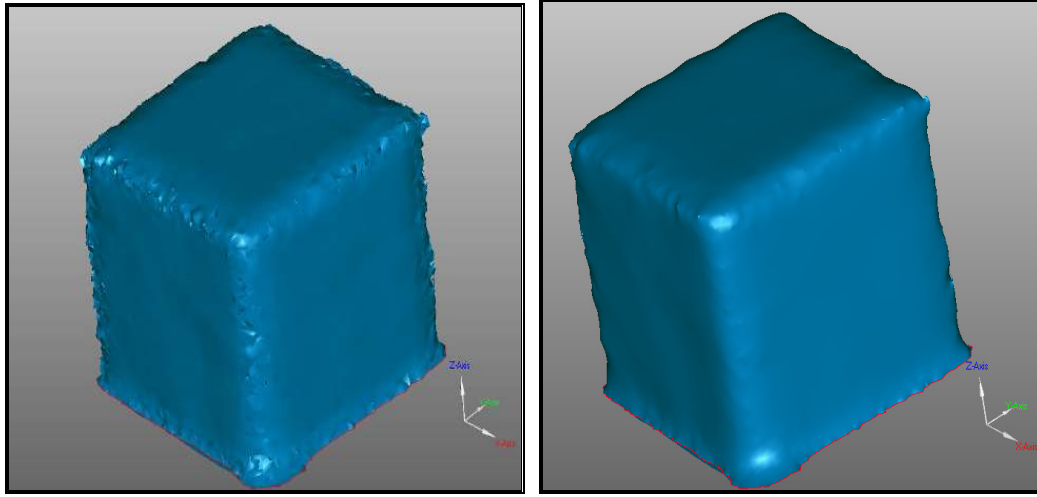
Şekil 8.75 3B modelin yumuşatılması (smoth shading)



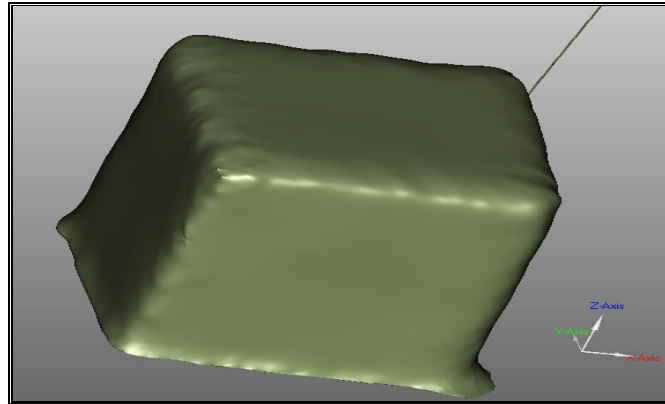
Şekil 8.76 Küpün açık yüzeyinin kapatılması için bir referans yüzeyinin belirlenmesi



Şekil 8.77 Küpün açık yüzeyinin kapanmış görünümü

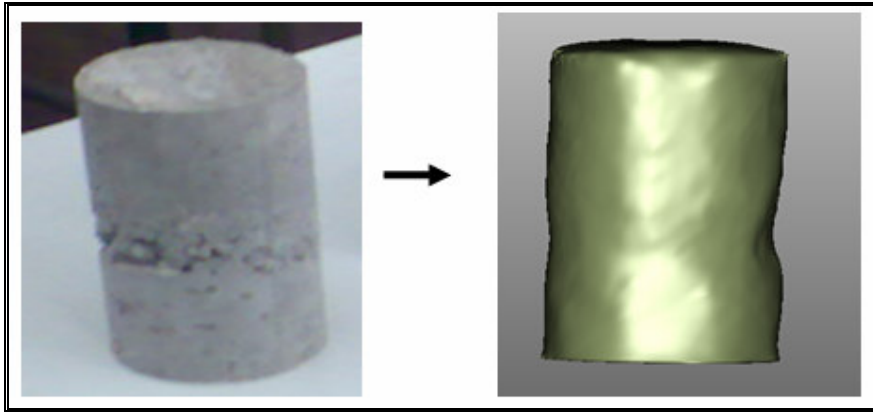


Şekil 8.78 Küp poligon 3B modelin yumuşatılması

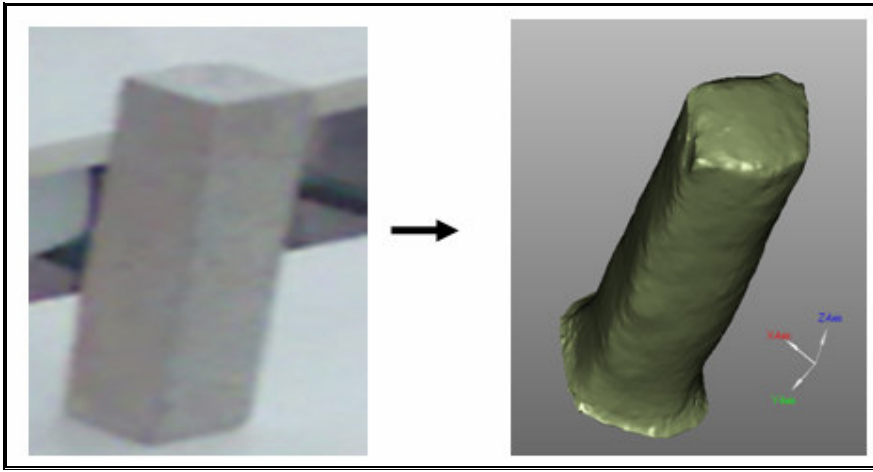


Şekil 8.79 Yapılan işlemler sonucu oluşan 3B modelin görünümü

Aynı işlem adımları, dikdörtgen prizma ve silindir için gerçekleştirilmiş ve aşağıda verilen 3 boyutlu modeller oluşturulmuştur.



Şekil 8.80 Silindirin 3 Boyutlu Modeli



Şekil 8.81 Dikdörtgen prizmasının 3 Boyutlu Modeli

8.3.2 Oluşturulan 3B Modellerden Kesit çıkarma

Objelerin yüzeylerini yansıtan nokta bulutlarının düzenli hale getirilmesi ve çeşitli işlem adımlarından sonra her bir objenin gerçeğe yakın 3 boyutlu modelleri oluşturulmuştur. Oluşan bu modellerin gerçeğe ne kadar yakın olduğunun belirlenmesi için, taramalar sırasında meydana gelen kenarlardan veya kısmi yansılardan kaynaklanan hataların, oluşturulan modele ne kadar etki ettiği belirlenmeye çalışılmıştır. Bunun için, gerçek objeler ve oluşturulan 3B modellerde yatay ve düşey yönlerde kesitler çıkarılmıştır.

Objelerin geometrik şekilleri dikkate alınarak, gerçek modeller üzerindeki uzunluklar, 0.1 mm ölçme doğruluğuna sahip hassas uzunluk ölçme aleti kumpas ile her kesitte ölçülmüştür. Çalışmada objelerin boyutlarına göre iki farklı kumpas kullanılmıştır.



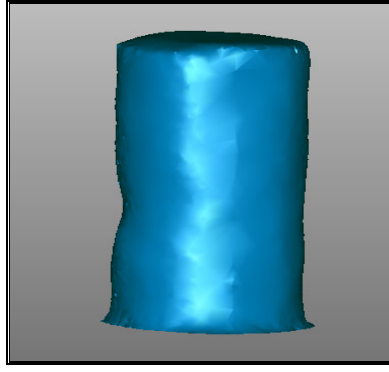
Şekil 8.82 Kullanılan iki farklı kumpas

Gerçek silindir objesi ile oluşturulan 3B modelde, obje yüzeyinde oluşturulan yatay düzlemden itibaren 3 cm aralıklarla 6 yatay kesit, düşeyde ise obje merkezinden geçecek ve yüzeyi 8 eş parçaya bölecek şekilde 8 düşey kesit oluşturulmaya çalışılmıştır. Yatay ve düşey kesitlerin çakıştığı her yatay kesitte uzunluk ölçümleri, silindir için çap ölçümleri yapılmıştır.

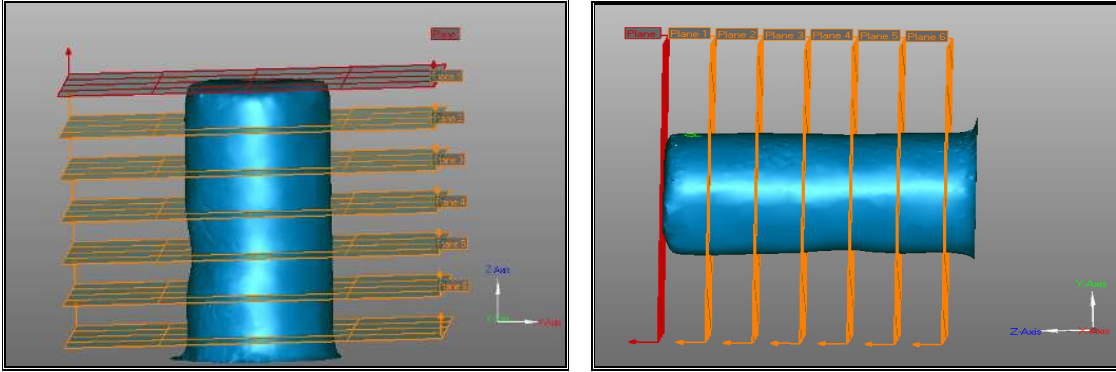


Şekil 8.83 Gerçek silindir model için oluşturulan kesitler ve çap uzunluğunun ölçülmesi işlemi

3B silindir modeli için, kesit çıkarma işlemi için GEOMAGIC STUDIO.5 yazılımı kullanılmıştır. 3B modelin en üst obje yüzeyini kesecek şekilde referans yatay bir yüzey alınmıştır. Bu yüzeyin, 3 cm aralıklarla düşey yönde ötelenmesi ile yatayda 6 tane yatay yüzey oluşturulmuştur.

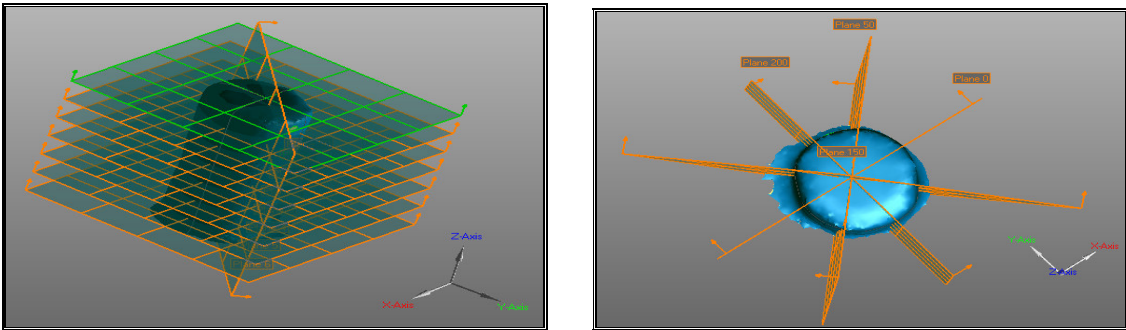


Şekil 8.84 Silindirin 3B modeli

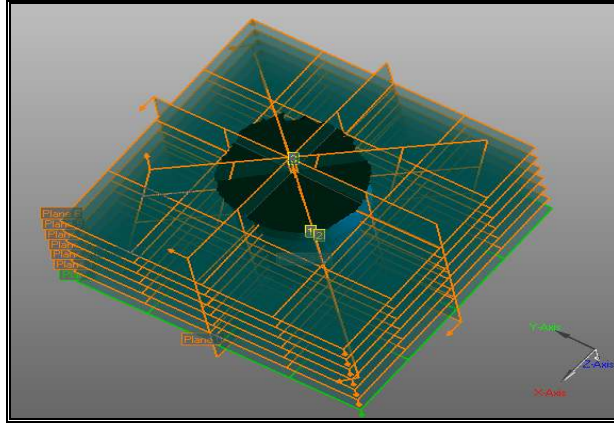


Şekil 8.85 Oluşturulan yatay referans yüzeyleri

Objenin koordinat sistemi x ve y yönü dikkate alınarak ve objenin merkezinden geçecek şekilde ilk önce iki düşey yüzey oluşturulmuştur. Bu yüzeylerden yararlanılarak, merkezi aynı açıda kesen diğer yüzeyler oluşturulmuştur.

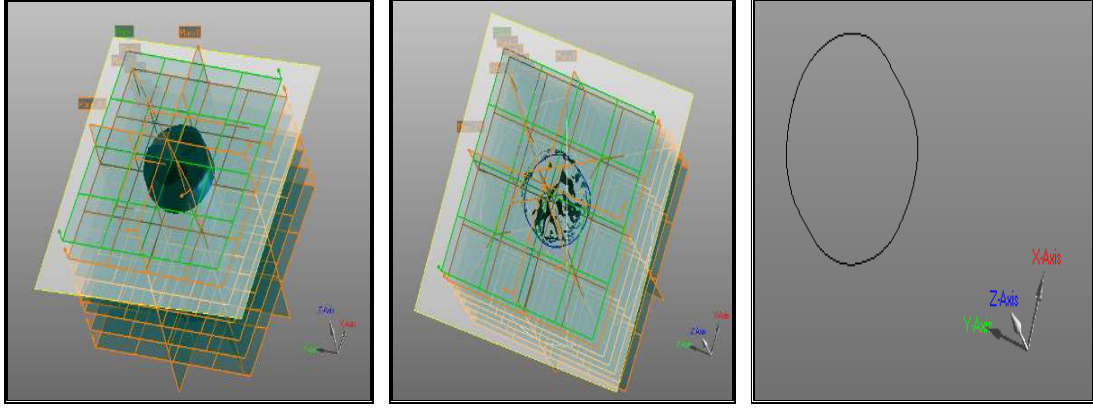


Şekil 8.86 Oluşturulan düşey referans yüzeyleri

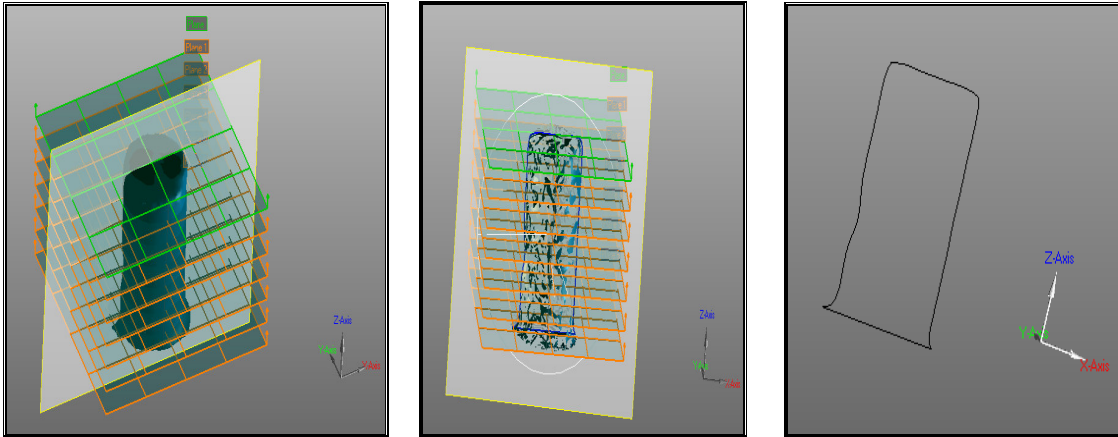


Şekil 8.87 Oluşturulan yatay ve düşey referans yüzeyleri

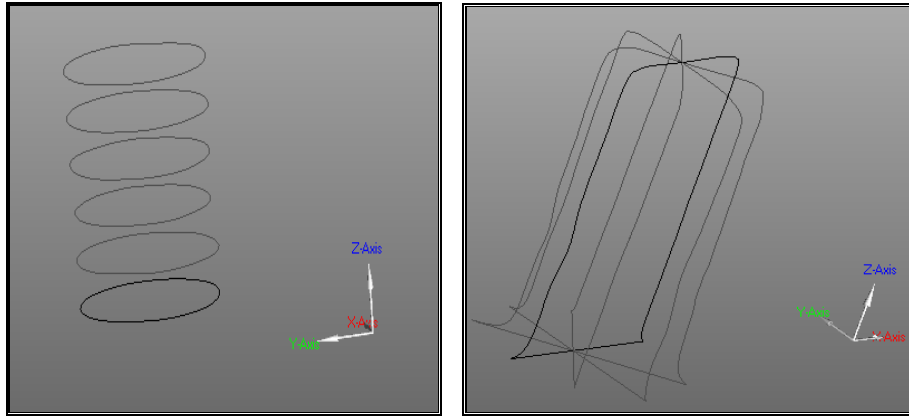
3B modelde oluşturulan bu yüzeyler yardımıyla yatay ve düşey yönde kesitler çıkarılmaya çalışılmıştır.



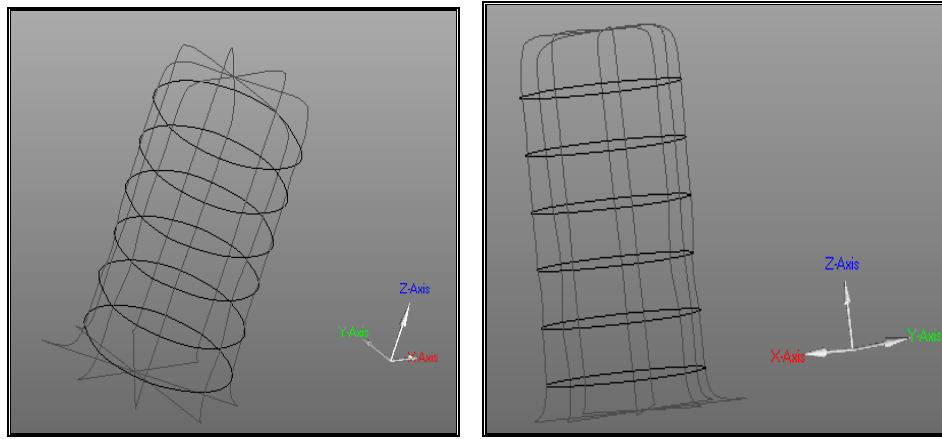
Şekil 8.88 1. Yatay kesitin çıkarılması



Şekil 8.89 1. Düşey kesitin çıkarılması

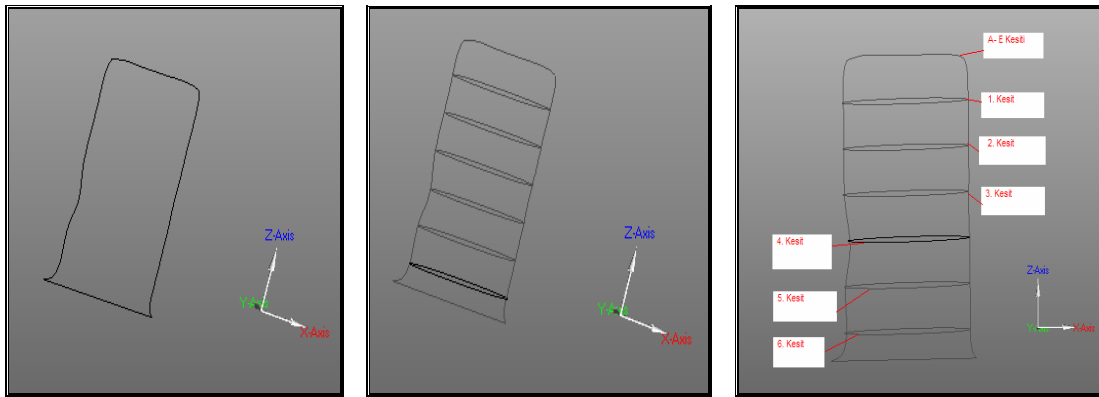


Şekil 8.90 Oluşturulan yatay ve düşey yöndeki kesitler

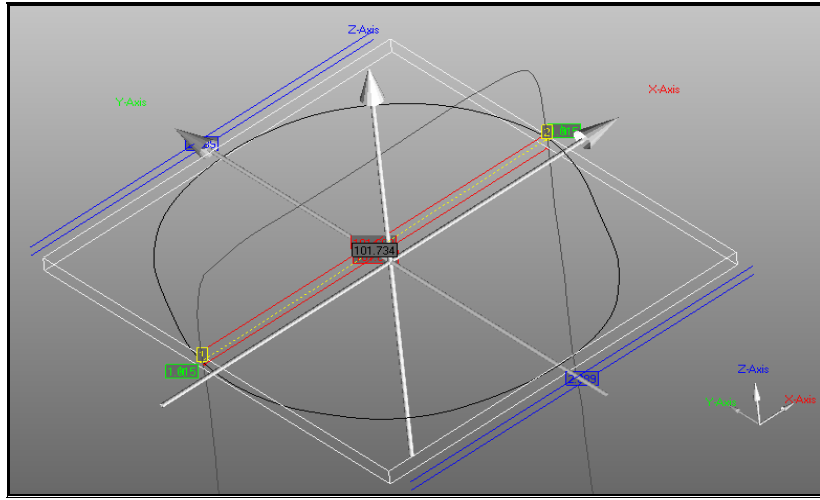


Şekil 8.91 Oluşturulan birleştirilmiş yatay ve düşey yöndeki kesitler

Bu, yatay ve düşey kesitlerden yararlanılarak, her düşey kesit üzerinde, düşey kesiti kesen her yatay eksen ile bu düşey kesit arasındaki silindirin çap uzunluğunun değerleri, yazılımın uzunluk ölçme modülü (measure distance) ile belirlenmiştir.



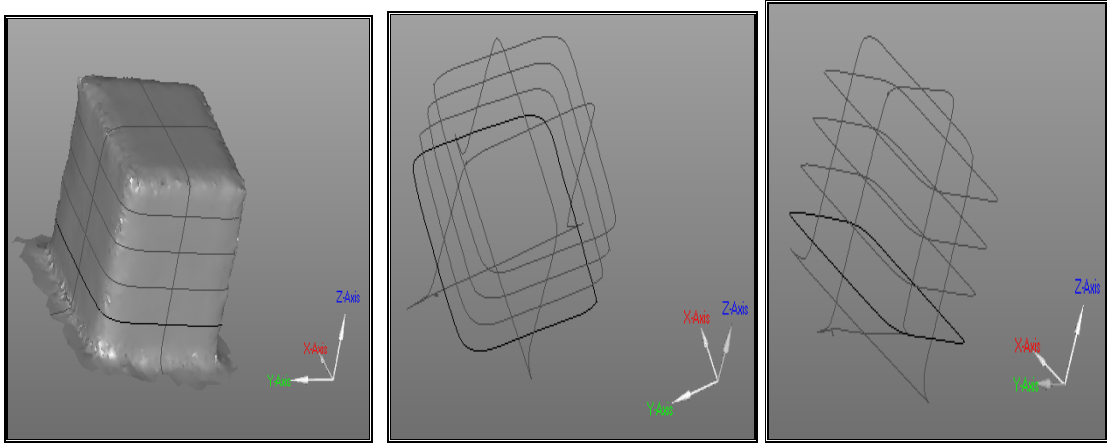
Şekil 8.92 Düşey kesit üzerindeki yatay kesitlerin görünümü



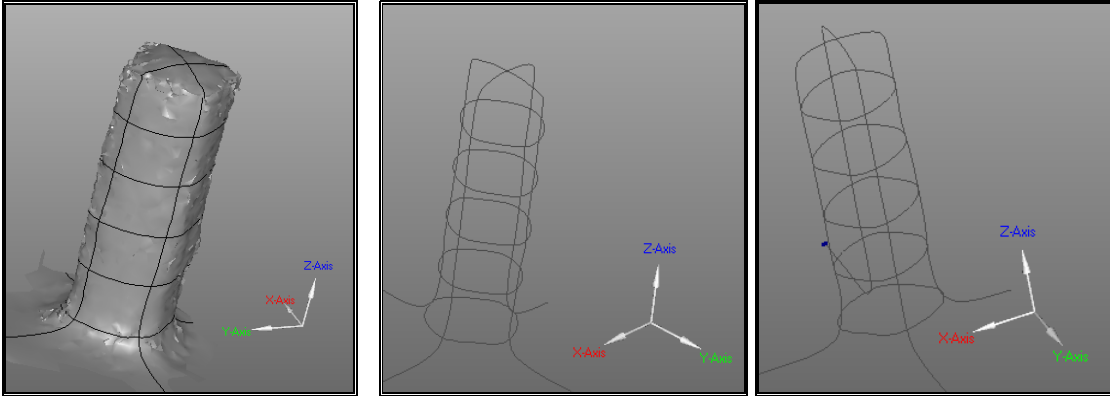
Şekil 8.93 Yatay ve düşey kesit arasındaki uzunlukların (çapın) ölçülmesi

Bu şekilde hem obje üzerinden hem de oluşturulan 3B model üzerinden kesitlerden yararlanılarak, silindirin her yatay kesitinde 8 farklı silindir çap uzunluğu elde edilmiştir. Böylece taranan obje ile oluşturulan modelin karşılaştırması açısından veri elde edilmiş olmuştur.

Yukarıda silindir için yapılan bütün kesit çıkarma işlemleri, küp ve dikdörtgenler prizması içinde uygulanmıştır. Küp ve prizma için 2 düşey ve 4 yatay kesit çıkarılmıştır. Obje ve model üzerinden, kesitler arasındaki uzunluklar ölçülmüştür.



Şekil 8.94 Küpde oluşturulan düşey ve yatay kesitler



Şekil 8.95 Dikdörtgen prizmada oluşturulan düşey ve yatay kesitler

8.3.3 Oluşturulan 3B Modellerin Doğrulukları Üzerine Bir İnceleme

Test amaçlı olarak silindir, küp ve dikdörtgen prizması şeklinde temel geometrik şekilleri olan üç obje seçilerek taranmıştır. Objeler ve taranarak oluşturulan 3B modelleri yatayda ve düşeyde kesitlere ayrıldıktan sonra, hem obje hem de model üzerinden uzunluklar her kesitte ölçülmüştür. Ölçülen uzunlukların, obje ve model için ortalamaları alınmıştır. Bu ortalama değerler, kesin değer olarak kabul edilerek her yatay kesitte ölçülen uzunlukların standart sapmaları bulunmuştur (Formül 9.1). Objeye ile modelden elde edilen büyüklükler için, farkları ve bu farkların standart sapmaları ölçü değerlerinden belirlenebilmektedir. Dolayısıyla farkların anlamlı olup olmadığının belirlenmesi için t-testi yapılması olanaklıdır. Test büyüklükleri aşağıdaki eşitlikler ile hesaplanmıştır.

$$f = d_{obje} - d_{model} \quad (9.8)$$

$$s_f^2 = s_{do}^2 + s_{dm}^2 \quad (9.9)$$

$$t = \frac{f}{s_f} \quad (9.10)$$

Burada 9.8 eşitliği ile verilen farkın standart sapmasının hesabında varyans yayılma yasası uygulanarak 9.9 eşitliği elde edilmiştir. t test değeri, serbestlik derecesi ($f=n-1$) ve $\alpha=0.05$ yanılma olasılığı için t-testi tablosundaki sınır değeri ile kıyaslanır. Elde edilen t değerinin tablo değerinden büyük olması durumunda, obje ve modelden ölçülen uzunlukların birbirine uyumsuz olduğu, küçükse uyumlu olduğu yargısına varılır.

Çizelge 8.14 Küp için ölçülen uzunluklar ve hesaplanan değerler (mm)

Yatay Düşey	1. Kesit		2. Kesit		3. Kesit		4. Kesit	
	Obje	Model	Obje	Model	Obje	Model	Obje	Model
1. Kesit	149.8	150.447	149.6	150.214	149.2	151.121	149	151.468
2. Kesit	149.7	154.892	149.4	154.761	149.3	155.399	149.2	155.238
ORT	149.75	152.67	149.5	152.488	149.25	153.26	149.1	153.353
FARK (f)	-2.9195		-2.9875		-4.01		-4.253	
Sdo Sdm	0.071	3.143	0.141	3.215	0.112	3.025	0.224	2.666
Sf	3.144		3.218		3.027		2.675	

Çizelge 8.15 Küpün bir kenarı için hesaplanan t-testi sonuçları (mm)

Kesitler	Ortalamalar Farkı (f)	Obje Sdo	Model Sdm	Sf	t Testi	Sınır Değeri f=1,α=5%	Karar
1.Kesit	-2.920	0.071	3.143	3.144	0.929	12.710	uyuşumlu
2.Kesit	-2.988	0.141	3.215	3.218	0.928	12.710	uyuşumlu
3.Kesit	-4.010	0.112	3.025	3.027	1.325	12.710	uyuşumlu
4.kesit	-4.253	0.224	2.666	2.675	1.590	12.710	uyuşumlu

Çizelge 8.16 Dikdörtgen Prizmanın bir kenarı için hesaplanan t-testi sonuçları (mm)

Yatay Düşey	1. Kesit		2. Kesit		3. Kesit		4. Kesit	
	Obje	Model	Obje	Model	Obje	Model	Obje	Model
1. Kesit	40.3	40.98	40.2	40.378	40.2	40.546	40.7	40.567
2. Kesit	41.4	44.442	42.2	44.381	42.4	44.702	41.6	44.702
ORT	40.85	42.711	41.2	42.38	41.3	42.624	41.15	42.635
FARK (f)	-1.861		-1.1795		-1.324		-1.4845	
Sdo Sdm	0.778	2.448	1.414	2.831	1.556	2.939	0.636	2.924
Sf	2.569		3.164		3.325		2.992	

Çizelge 8.17 Dikdörtgen Prizma için hesaplan t-testi değerleri

Kesitler	Ortalamalar	Obje	Model	Sf	t	Sınır Değeri	Karar
	Farkı (f)	Sdo	Sdm		Testi	f=1,α=5 %	
1.Kesit	-1.861	0.778	2.448	2.569	0.725	12.710	uyuşumlu
2.Kesit	-1.180	1.414	2.831	3.164	0.373	12.710	uyuşumlu
3.Kesit	-1.324	1.556	2.939	3.325	0.398	12.710	uyuşumlu
4.kesit	-1.485	0.636	2.924	2.992	0.496	12.710	uyuşumlu

Çizelge 8.18 Silindirin çapı için ölçülen uzunluklar ve hesaplanan değerler

Yatay Düşey	1. Kesit		2. Kesit		3. Kesit	
	Obje	Model	Obje	Model	Obje	Model
1. Kesit	100.100	101.691	100.100	101.389	100.000	101.309
2. Kesit	100.200	100.947	100.300	100.562	100.400	100.618
3.kesit	100.100	103.915	100.100	103.323	99.800	105.315
4.kesit	99.700	104.060	99.800	104.720	99.600	103.786
5.kesit	100.200	101.988	100.100	101.432	100.400	101.254
6.kesit	100.200	100.933	100.300	100.567	100.400	100.623
7.kesit	100.000	103.890	100.100	103.348	99.700	102.428
8. kesit	99.800	104.046	99.300	104.667	99.200	103.629
ORT	100.038	102.684	100.013	102.501	99.938	102.370
FARK (f)	-2.646		-2.489		-2.433	
Sdo Sdm	0.192	1.428	0.327	1.727	0.444	1.722
Sf	1.441		1.758		1.778	
Yatay Düşey	4. Kesit		5. Kesit		6. Kesit	
	Obje	Model	Obje	Model	Obje	Model
1. Kesit	100.100	97.739	100.100	101.627	100.200	101.012
2. Kesit	100.300	98.666	100.200	99.362	100.000	101.185
3.kesit	99.200	102.610	99.700	103.330	99.500	102.641
4.kesit	99.500	100.652	99.900	103.283	99.900	103.106
5.kesit	100.200	97.605	100.200	101.618	100.100	100.976
6.kesit	100.300	98.563	100.000	99.302	100.000	100.961
7.kesit	99.600	102.623	99.600	103.348	99.800	102.564
8. kesit	99.200	100.701	99.100	103.326	99.000	103.001
ORT	99.800	99.895	99.850	101.900	99.813	101.931
FARK (f)	-0.095		-2.049		-2.118	
Sdo Sdm	0.478	2.043	0.374	1.750	0.391	0.977
Sf	2.098		1.789		1.052	

Çizelge 8.19 Silindirin çapı için hesaplan t-testi değerleri

Kesitler	Ortalamalar Farkı (f)	Obje Sdo	Model Sdm	Sf	t Testi	Sınır Değeri f=7,α=5 %	Karar
1.Kesit	-2.646	0.192	1.428	1.441	1.837	2.365	uyuşumlu
2.Kesit	-2.489	0.327	1.727	1.758	1.415	2.365	uyuşumlu
3.Kesit	-2.433	0.444	1.722	1.778	1.368	2.365	uyuşumlu
4.kesit	-0.095	0.478	2.043	2.098	0.045	2.365	uyuşumlu
5.Kesit	-2.049	0.374	1.750	1.789	1.145	2.365	uyuşumlu
6..Kesit	-2.118	0.391	0.977	1.052	2.013	2.365	uyuşumlu

Küp ve dikdörtgenler prizması şeklindeki objeler için, her yatay kesitteki uzunlukların belirlenmesi için 2 ölçüm yapıldığından ortalama değer in serbestlik derecesi düşüktür. Silindirde ise her yatay kesitte 8 ölçü yapılmış olup diğer iki objeye göre kesin değer in serbestlik derecesi daha yüksektir. Ölçü sayılarındaki farklılıklara karşın, her üç obje için yapılan incelemeler sonucunda, obje ve model üzerinde yapılan uzunluk ölçülerinden elde edilen büyüklüklerin karşılaştırılması neticesinde çizelge (8.15, 8.17, 8.19)’lere göre ölçme aletlerinin ölçü doğruluklarının sınırları içerisinde uyumlu oldukları görülmektedir.

SONUÇLAR

Yersel lazer tarama teknolojisinin bir ölçüm aracı olarak yaygın kullanımı son yıllarda artmıştır. Ölçümler için kullanılan lazer ışını, önce uzunluk ölçümü daha sonra görüntüleme için kullanılmaya başlanmıştır. Günümüzde minimum giderle hızlı ve eksiksiz 3B geometrik model ve görsel bilgiye sahip olmak önemlidir. 3B bilginin çeşitli amaçlarda kullanılması için, çok büyük miktarlarda verinin hızlı bir şekilde toplanması gerekir. Bir obje (3B model) hakkında acilen bilgiye ulaşılması gereken durumlarda geleneksel jeodezik ölçüm ve sayısal fotogrametrik yöntemler yetersiz kalmaktadır. Böyle durumlarda obje geometrisinin yüksek doğrulukla ve hızlı bir şekilde 3B ölçümüne izin veren yersel lazer tarama teknolojisi kullanılabilir.

Yersel lazer tarayıcıların doğruluğunu etkileyen birçok faktör vardır. Bu etkenler yapılan değerlendirme, analiz ve tarama işlemi sırasında hatayı önleyici işlemlerle giderilebilir. Ayrıca, ölçüm hızı, menzil limitleri, görüş alanı, lazer çeşidi, taşıma ağırlığı ve kolaylığı, güç kaynağı, kötü havalarda çalışıldığında gösterdiği performans, kullanılabilirlik ve yazılımın kalitesi tarayıcıdan tarayıcıya değişmektedir. Özellikle mühendislik ölçmeleri alanında da önemli bir yer edinmeye başlayan bu sistemin kullanımı giderek yaygınlaşarak, kullanıcılar için zaman, maliyet ve emek açısından önemli avantajlar sağlamaktadır.

İlk uygulamada, otomatik ve manüel yöntem kullanılarak çoklu taramaların birleştirilmesi şeklinde KOSGEB Binasının karakteristik noktalarındaki konum değişimleri belirlenmiştir. Bu bina yüzeyindeki noktalar LEICA TPS 1201 total station aleti ile ölçülmüş ve genel sistemdeki koordinatları elde edilmiştir. Hem otomatik hem de manüel (elle) birleştirme sonucu elde edilen konumlandırılmış (jeoreferanslanmış) nokta bulut kümeleri içerisinde, aynı noktaların koordinatları belirlenerek özdeş noktalar kümesi oluşturulmuştur. Otomatik ve manüel belirlenen özdeş nokta koordinatları ile bunların total stationla belirlenen koordinatları arasında karşılaştırma yapılmıştır. Bu sonuçlar incelendiğinde, otomatik birleştirme yönteminin, elle birleştirme yöntemine göre daha küçük sapmalar gösterdiği görülmüştür. Total stationdan elde edilen koordinatlar ile otomatik yöntemde -13 mm ile 9mm arasında, manüel yöntemde ise -32 mm ile 18mm arasında farklar bulunmuştur.

Binadaki bu karakteristik noktaların total station ve lazer tarayıcı ile elde edilen koordinatlarının farklarından yararlanılarak, her bir koordinat bileşeni için duyarlık ölçütleri belirlenmiştir. Ağırlıklı ve ağırlıksız olarak bulunan sonuçlardan yararlanılarak, her iki yöntemde nokta konum değişimleri belirlenmiştir. Ağırlıksız olarak otomatik yöntemde nokta

konum doğruluğu ± 11.1 mm, manüel yöntemde nokta konum doğruluğu ± 21.9 mm bulunmuştur. Ağırlıklı olarak her nokta için konum doğrulukları, otomatik yöntemde ± 9.3 mm ile ± 12.8 mm arasında, manüel yöntemde ise ± 18.3 mm ile ± 24.8 mm arasında bulunmuştur. Ağırlıklı ve ağırlıksız olarak bulunan sonuçların karşılaştırılması neticesinde, ağırlıklı değerlerin konum doğruluklarını, ağırlıksız değerlere göre daha gerçekçi olarak yansıttığı gözlenmiştir. Bu nedenle irdeme, ağırlıklı çözüme göre yapılmıştır. Ağırlıklı olarak her iki yöntemde bulunan 3B konum doğruluklarının karşılaştırılması sonucunda otomatik yöntemin manüel yöntemle göre, nokta konum doğruluklarının daha iyi olduğu görülmüştür. Koordinat farkları ve bunların standart sapmalarının hesaplandığı dikkate alınarak, total station ve lazer tarayıcıdan iki yöntemle elde edilen koordinat farklarının anlamlı olup olmadığının irdelenmesinde t-testi uygulanmıştır. t-testi sonuçları incelendiğinde, bütün test değerlerinin sınır değerinin altında kaldığı görülmektedir.

Uygulamada kullanılan aletlerin üretici firma tarafından verilen ölçü doğrulukları dikkate alındığında, ister otomatik ister elle birleştirme sonucunda belirlenen koordinat farklarının ölçü doğruluğu sınırları içinde kaldığı görülmektedir. Diğer bir ifade ile her iki yöntemin uygulanması ile elde edilen koordinatlar arasında uyumsuzluk yoktur. Otomatik birleştirmeden elde edilen özdeş noktaların koordinatlarının, elle birleştirmeden elde edilenlere göre kesin değer olarak kabul ettiğimiz total station koordinatlarına daha yakın olduğu belirlenmiştir.

İkinci çalışmada, Yıldız Teknik Üniversitesi, Merkez Kampüsünde bulunan, tarihi öneme sahip Pembe Köşk'ün 2 cephesi, Trimble marka Mensi GS 100 yersel lazer tarayıcı ile taranmıştır. Elde edilen düzensiz nokta bulut kümeleri düzenli hale getirilmiş ve 3 boyutlu model oluşturulmuştur.

Üçüncü çalışmada, basit geometrik şekilli yaklaşık $15 \times 15 \times 15$ cm boyutunda küp, $4 \times 4 \times 15$ cm boyutunda dikdörtgen prizma ve 10 cm çapında, 20 cm yüksekliğinde silindir kullanılmıştır. Bu geometrik şekiller, YTÜ İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yapı Malzemesi Laboratuvarında standart kalıplara dökülmüş betondan elde edilmiştir. Bu objelerin taranması, MENSİ GS 100 lazer tarayıcısı ile YTÜ Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği Bölümü Kalibrasyon Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Objelerin yüzeylerini yansıtan nokta bulutlarının düzenli hale getirilmesi ve çeşitli işlem adımlarından sonra, her bir objenin gerçeğe yakın 3 boyutlu modelleri oluşturulmuştur.

Gerçek objeler ve oluşturulan 3B modellerde yatay ve düşey yönlerde kesitler çıkarılmıştır. Objelerin geometrik şekilleri dikkate alınarak, gerçek modeller üzerindeki uzunluklar hassas uzunluk ölçme aleti kumpas ile her kesitte ölçülmüştür. Modeldeki uzunluklar ise, yazılımın uzunluk ölçme modülü (measure distance) ile her kesitte belirlenmiştir.

Ölçülen uzunlukların, obje ve model için ortalamaları alınmıştır. Bu ortalama değerler kesin değer kabul edilerek, her yatay kesitte ölçülen uzunlukların standart sapmaları, küpün gerçek modeli için ± 0.07 mm ile ± 0.22 mm arasında ve oluşturulan model için ± 2.66 mm ile ± 3.02 mm arasında, dikdörtgen prizmanın gerçek modeli için ± 0.64 mm ile ± 1.56 mm arasında ve oluşturulan model için ± 2.44 mm ile ± 2.94 mm arasında, silindirin gerçek modeli için ± 0.19 mm ile ± 0.391 mm arasında ve oluşturulan model için ± 0.98 mm ile ± 2.04 mm arasında bulunmuştur. Her üç obje için yapılan incelemeler sonucunda, obje ve model üzerinde yapılan uzunluk ölçülerinden elde edilen büyüklüklerin karşılaştırılması neticesinde t-testi yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre ölçme aletlerinin ölçü doğrulukları içerisinde obje ve modelden elde edilen uzunlukların uyumlu oldukları görülmüştür.

KAYNAKLAR

M. Alba(*), L. Fregonese(*), F. Prandi(*), M. Scaioni(*), P. Valgoi (2006) Structural Monitoring Of A Large Dam By Terrestrial Laser Dresden, Germany 25-27 September 2006 ISSN 1682-1750 VolumeXXXVI, Part 5

Abmayr, T., Dalton, G., Härtl, F., Hines, D., Liu, R., Hirzinger, G. and Fröhlich, C., (2005).Standardization and visualization of 2.5D scanning data and color information by inverse mapping. In Optical 3-D Measurement Techniques VII, A. Grün / H. Kahmen (Eds)

Amiri Parian, J. and Gruen, A., (2005), Integrated laser scanner and intensity image calibrationand accuracy assessment. In Proceedings of ISPRS WG III/3, III/4, V/3 Workshop Enschede, the Netherlands, September, 12 – 14

Aydın Ö. (1984), Ölçme Bilgisi 1, İstanbul

Balis, V., Karamistos, S., Kotsis, I., Liapakis, C. and Simpas, N., (2004), 3D-Laser Scanning Integration of Point Cloud and CCD Camera Video Data for the Production of High Resolutionand Precision RGB Textured Models: Archaeological Monuments Surveying Application inAncient Ilida. In Proceedings of FIG Working Week, Athens, Greece,

Baltsavias, E. P., (1999a), A comparison between photogrammetry and laser scanning. ISPRSJournal of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 54, pp. 83 – 94.

Baltsavias, E. P., (1999b) Aiborne laser scanning: basic relations and formulas. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 54, pp. 199 – 214.

Barber, D., Mills, J. and Bryan, P. G., (2001), Laser Scanning and Photogrammetry: 21st centurymetrology. Proceedings of 18th International Symposium CIPA 2001. Potsdam, Germany, September 18 – 21, pp. 360 – 366.

Blais, F., Picard, M. and Godin, G., (2004), Accurate 3D Acquisition of Freely Moving Objects. InProceedings of the 2nd International Symposium on 3D Data Processing, Visualization and Transmission. Thessaloniki, Greece, September, 6 – 9.

Boehler, W. and Marbs, A., (2002), 3D Scanning Instruments. In Proceedings of InternationalWorkshop on Scanning for Cultural Heritage Recording – Complementing or ReplacingPhotogrammetry. Corfu, Greece, September, 1 – 2.

Boehler, W., Heinz, G., Marbs, A., Siebold, M.(2002), “ 3D Scanning Software: An Introduction”, University of Applied Sciences, Mainz, Germany

- Boehler, W., Bordas Vicent, M. and Marbs, A., (2004) Investigating laser scanner accuracy. Originally presented at the XIXth CIPA Symposium at Antalya, Turkey, 30 Sept. – 4 Oct.
- Boehler, W., Heinz, G. and Marbs, A., (2001), The potential of non-contact close-range laserscanners for cultural heritage recording. In Proceedings of 18th International Symposium CIPA2001. Potsdam, Germany, September 18 – 21, pp. 430 – 436.
- Burke, M., (1996) Image Acquisition. Handbook of Machine Vision Engineering. Volume I. Chapman & Hall, London – Weinheim – New York – Tokyo – Melbourne – Madras.
- Chang, K.-S., Lu, S.-T., Wu, Y.-P. and Chou, C., (1992), Correction algorithms in a laser scanningdimension measurement system. In: IEE Proceedings, Vol. 139, No. 2, pp. 57 – 60.
- Cheok, G. S. (Ed.), (2005) Proceedings of the 2nd NIST LADAR Performance EvaluationWorkshop, March 15 – 16. NISTIR 7266, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, October.
- Demirel. H. (2005), Dengeleme Hesabı, YTÜ Basın Yayın Merkezi, İstanbul
- Erkaya H. ve Hosbaş G. (2006), Konum Ölçmeleri Ders Notları, İstanbul
- Eriksson, Å., (2004), Adapting the calibration method of a total station to laser scanner GS 100, Master of Science Thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm.
- Fröhlich, C. , Mettenleiter, M., (2004) Terrestrial Laser Scanning –New Perspectives In 3d Surveying International Archives of Photogrammetry, Vol. XXXVI - 8/W2 3-6
- Gordon, S. J. and Lichti, D. D., (2004), Terrestrial laser scanners with a narrow field of view: theeffect on 3D resection solutions. Survey Review, No. 37, 292, pp. 448 – 468.
- Gordon, S., Lichti, D., Stewart, M. and Tsakiri, M., (2000), Metric performance of a highresolutionlaser scanner. SPIE Proceedings, Vol. 4309, pp. 174 – 184.
- Gordon, S., Lichti, D. and Stewart, M., (2001), Application of a high-resolution, ground-basedlaser scanner for deformation measurements. In Proceedings of the 10th FIG InternationalSymposium on Deformation Measurements, 19 – 22 March, Orange, California,
- Gordon, S., Lichti, D., Stewart, M. and Franke, J., (2003), Structural deformation measurementusing terrestrial laser scanner. In Proceedings of the 11th FIG Symposium on DeformationMeasurements, Santorini, Greece.
- Guissani, A. and Scaioni, M., (2004), Application of TLS to support landslides study:

survey planning, operational issues and data processing. Proceedings of the ISPRS working group VIII/2 "Laser-Scanners for Forest and Landscape Assessment". Freiburg, Germany,

Harvey, B. R., (2004), Registration and transformation of multiple site terrestrial laser scanning. *Geomatics Research Australasia*, No. 80, pp. 33 – 50.

Hebert, M. and Krotkov, E., (1992) 3D measurements from imaging laser radars: how good are They? *Image and Vision Computing*, Vol. 10, No. 3, pp. 170 – 178.

Iavarone, A., (2002), Laser Scanning Fundamentals. *Professional Surveyor Magazine*, September.

Ingensand, H., Ryf, A. and Schulz, T., (2003), Performances and experiences in terrestrial laser scanning. In *Optical 3-D Measurement Techniques VI*, A. Grün / H. Kahmen

Ingensand, H., (2006), Methodological aspects in terrestrial laser-scanning technology. In *Proceedings of the 3rd IAG Symposium of Geodesy for Geotechnical and Structural Engineering and 12th FIG Symposium on Deformation Measurements*.

Jelalian, A. V., (1992), *Laser Radar Systems*. Artech House, MA. 292 pages.

Kahmen, H. and Faig, W., (1988), *Surveying*. Walter de Gruyter, Berlin/New York. 578 pages.

Katzenbeisser, R., (2003), About the calibration of LIDAR sensors. In: *Proceedings of ISPRS Workshop "3D Reconstruction from Airborne Laser-Scanner and InSAR data"*. Dresden, Germany, October 8 – 10.

Kern, F., (2001), Supplementing laser scanner geometric data with photogrammetric images for modelling. In *Proceedings of 18th International Symposium CIPA 2001*. Potsdam, Germany, September 18 – 21, pp. 454 – 461.

Kilpelä, A., Pennala, R. and Kostamovaara, J., (2001), Precise pulsed time-of-flight laser rangefinder for industrial distance measurements. *Review of Scientific Instruments*,

Kilpelä, A., (2004), Pulsed time-of-flight laser range finder techniques for fast, high precision measurement applications. *Academic Dissertation*, Department of Electrical and Information Engineering, University of Oulu, Finland. 96 pages

Koskinen, M., Kostamovaara, J. and Myllylä, R., (1991), Comparison of the continuous wave and pulsed time-of-flight laser ranging techniques. *SPIE Proceedings*, Vol. 1614,

- Kostamovaara, J., Määttä, K., and Myllylä, R., (1991), Pulsed time-of-flight laser range-finding techniques for industrial applications. SPIE Proceedings, Vol. 1614, pp. 283 – 295.
- Krotkov, E., (1990), Laser Rangefinder Calibration for a Walking Robot. Technical Report CMURI-TR-90-30, The Robotics Institute, Carnegie Mellon University.
- Lange, R., (2000), 3D Time-of-Flight Distance Measurement with Custom Solid-State Image Sensors in CMOS-CCD Technology. A dissertation submitted to the Department of Electrical Engineering and Computer Science at University of Siegen (Germany) for the degree of Doctor of Technical Sciences.
- Leica, (2006) E-mail communication with Lennart Krantz, salesman, Leica Geosystems AB.
- Leung, G. and Wan, F., (2004), Modern technology in land surveying: 3D laser scanning.
- Lichti, D. D. and Franke, J., (2005), Self-calibration of the iQsun 880 laser scanner. In Optical 3-D Measurement Techniques VII, A. Grün / H. Kahmen (Eds.), Vol. I, pp. 112 – 122.
- Lichti, D. D. and Gordon, S. J., (2004), Error Propagation in Directly Georeferenced Terrestrial Laser Scanner Point Clouds for Cultural Heritage Recording. In Proceedings of FIG Working Week. Athens, Greece, May 22 – 27.
- Lichti, D. D. and Harvey, B. R., (2002), An investigation into the effects of reflecting surface material properties on terrestrial laser scanner measurements. Geomatics Research Australasia, No. 76, pp. 1 – 21.
- Lichti, D. D., Gordon, S. J., Stewart, M. P., Franke, J. and Tsakiri, M., (2002a), Comparison of Digital Photogrammetry and Laser Scanning. In Proceedings of International Workshop on Scanning for Cultural Heritage Recording – Complementing or Replacing Photogrammetry. Corfu, Greece.
- Lichti, D. D., Gordon, S. J. and Stewart, M. P., (2002b), Ground-based laser scanners: operation, systems and applications. Geomatica, Vol. 56, No. 1, pp. 21 – 33.
- Lichti, D., Stewart, M., Tsakiri, M. and Snow, A. J., (2000), Benchmark Tests on a Three-Dimensional Laser Scanning System. Geomatics Research Australasia, No. 72, pp. 1 – 24.
- Lingua, A. and Rinaudo, F., (2001), The statue of Ramsete II – integration of digital photogrammetry and laser scanning technique for 3D modelling. Proceedings of 18th International Symposium CIPA 2001. Potsdam, Germany, September 18 – 21,

Linke, A., (2005), Calibration of Terrestrial Laser Scanners. Summary of Master of Science Thesis, School of Surveying and Spatial Information Systems, the University of New South

Määttä, K., Kostamovaara, J. and Myllylä, R., (1993), Profiling of hot surfaces by pulsed time-of-flight laser range finder techniques. *Applied Optics*, Vol. 32, No. 27, pp. 5324 – 5347.

Marshall, G. F. (Ed.), (1985), *Laser beam scanning: opto-mechanical devices, systems, and data storage optics*. Marcel Dekker, New York.

Marshall, G. F. (Ed.), (2004), *Handbook of Optical and Laser Scanning*. Marcel Dekker, Inc., New York. 792 pages.

Mills, J. and Barber, D., (2003), An Addendum to the Metric Survey Specifications for English Heritage – the collection and archiving of point cloud data obtained by terrestrial laser scanning or other methods. Version 11.12.2003.

Moring, I., Heikkinen, T., Myllylä, R. and Kilpelä, A., (1989), Acquisition of three-dimensional image data by a scanning laser rangefinder. *Optical Engineering*, Vol. 28, No. 8,

Mota, J. G., (2002), Localisation of Mobile Robots using Scanned Laser and Reconstructed 3D Models. MSc Thesis, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Portugal.

Nayar, S. K., Ikeuchi, K. and Kanade, T., (1989), Surface Reflection: Physical and Geometrical Perspectives. Technical Report CMU-RI-TR-89-7, The Robotics Institute, Carnegie Mellon University.

Neitzel, F., (2006), Bestimmung von Ziel- und Kippachsenfehler polarer Messsysteme aus Minimalanordnungen und überbestimmten Konfigurationen. *ZfV (Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement)*, Vol. 131, No 3, pp. 132 – 140.

Nyland, L. S., (1998), Capturing Dense Environmental Range Information with a Panning Scanning Laser Rangefinder. In *IEEE Proceedings*.

Ratcliffe, S., (2005), A digital signal processing technique for time-of-flight laser ranging. In *Optical 3-D Measurement Techniques VII*, A. Grün / H. Kahmen (Eds.), Vol. II, pp. 359 – 364.

Reshetyuk, Y., Horemuz, M. and Sjöberg, L. E., (2005), Determination of the optimal

diameter for spherical targets used in 3D laser scanning. *Survey Review*, 38, 297,

Reshetyuk, Y., (2006), Calibration of terrestrial laser scanners Callidus 1.1, Leica HDS 3000 and Leica HDS 2500. Accepted for publication in *Survey Review*.

Reshetyuk Y. (2006) Investigation and calibration of pulsed time-of-flight terrestrial laser scanners Licentiate thesis in Geodesy Royal Institute of Technology (KTH) Department of Transport and Economics Division of Geodesy.

Reshetyuk, Y. (2006), Calibration of terrestrial laser scanners for the purposes of geodetic engineering. In *Proceedings of the 3rd IAG Symposium of Geodesy for Geotechnical and Structural Engineering and 12th FIG Symposium on Deformation Measurements*.

Reshetyuk, Y., (2006) Investigation of the Influence of Surface Reflectance on the Measurements with the Terrestrial Laser Scanner Leica HDS 3000. *ZfV (Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement)*, Vol. 131, No 2, pp. 96 – 103.

Rietdorf, A., Gielsdorf, F. and Gruendig, L., (2004) A Concept for the Calibration of Terrestrial Laser Scanners. In *Proceedings of FIG Working Week*. Athens, Greece,

Rietdorf, A., (2005), Automatisierte Auswertung und Kalibrierung von scannenden Messsystemen mit tachymetrischem Messprinzip. *Dissertationen*, Technische Universität Berlin.

Rueger, J. M., (1990), Electronic distance measurement. An Introduction. 3rd totally revised edition, Springer Verlag, Berlin – Heidelberg – New York – London – Paris – Tokyo – Hong-Kong. 266 pages.

Schulz, (2004), Terrestrial Laser Scanning – Investigations and Applications for High Precision Scanning. Handouts of the presentation at *FIG Working Week*. Athens, Greece,

Schulz, T. and Ingensand, H., (2004a), Terrestrial Laser Scanning – Investigations and Applications for High Precision Scanning. In *Proceedings of FIG Working Week*. Athens, Greece, May 22 – 27.

Schulz, T. and Ingensand, H., (2004b), Influencing variables, precision and accuracy of terrestrial laser scanners. In *Proceedings of INGEO 2004 and FIG Regional Central and Eastern European Conference on Engineering Surveying*, Bratislava, Slovakia,

Singh, S. and West, J., (1991), Cyclone: A Laser Scanner for Mobile Robot Navigation.

Technical Report CMU-RI-TR-91-18, The Robotics Institute, Carnegie Mellon University.

Staiger, R., (2005), The Geometrical Quality of Laser Scanner (TLS). In Proceedings of FIG Working Week 2005 and GSDI-8. Cairo, Egypt, April 16 – 21.

Tauber, S., (2005), Untersuchung zur Mess- und Registrierengenauigkeit des Laserscanners Riegl LMS Z360. Diplomarbeit, Universität Hannover.

Thiel, K.-H. and Wehr, A., (2004), Performance capabilities of laser scanners – an overview and measurement principle analysis. Proceedings of the ISPRS working group VIII/2 “Laser-Scanners for Forest and Landscape Assessment”. Freiburg, Germany, October 3 – 6

Wehr, A. and Lohr, U., (1999), Airborne laser scanning – an introduction and overview. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 54, pp. 68 – 82.

Weichel, H., (1990), Laser beam propagation in the atmosphere. SPIE Optical Engineering Press. 98 pages.

Wunderlich, T. A., (2003), Terrestrial Laser Scanners – an Important Step towards Construction Information. In Proceedings of FIG Working Week. Paris, France, April 13 – 17.

İNTERNET KAYNAKLARI

www.3dlasermapping.com

www.google.com.tr

www.isprs.org/commission5/proceedings06/pages/start.html

www.leica.com

<http://portal.isiknowledge.com>

www.optech.ca

www.trimble.com

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi	25.01.1981	
Doğum yeri	Bor / NİĞDE	
Lise	1996–1999	Bor Şehit Nuri Pamir Süper Lisesi
Lisans	1999–2003	Selçuk Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fak. Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği Bölümü
Yüksek Lisans	2005–	Yıldız Teknik Üniversitesi- Fen Bilimleri Ens. Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği Bölümü Geomatik (Ölçme Tekniği) Anabilim Dalı

Çalıştığı kurum(lar)

2003–2004	Sismik Yapı Denetim Hizmetleri A.Ş.
2004–2005	Kuzey Mühendislik İnşaat Harita L.t.d
2005– Devam ediyor	YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Araştırma Görevlisi