T.C.

SELÇUK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YERSEL LAZER TARAYICILARIN DEFORMASYON ÖLÇMELERİNDE KULLANILABİLİRLİĞİ ÜZERİNE BİR ÇALIŞMA

Mustafa GÜMÜŞ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HARİTA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

KONYA 2010

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

YERSEL LAZER TARAYICILARIN DEFORMASYON ÖLÇMELERİNDE KULLANILABİLİRLİĞİ ÜZERİNE BİR ÇALIŞMA

Mustafa GÜMÜŞ

Selçuk Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Harita Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Ayhan CEYLAN

2010, 84 Sayfa

Juri : Yrd. Doç. Dr. Ayhan CEYLAN

Prof.Dr. Cevat İNAL

Yrd. Doç. Dr. Atilla ÖZÜTOK

Lazer sistemlerinden elde edilen bilgiler gerçek ile uyumludur. 3 boyutlu geometrik ve görsel bilgiler, hızlı ve düşük maliyetle lazer tarama sistemleri ile elde edilmektedir. Lazer teknolojisinde nesne, yansıma yoğunluğu verisi içeren 3 boyutlu nokta verisi olarak elde edilmektedir. Nokta bulutlarının kaydedilmesi, birleştirilmesi, inceltilmesi, nokta boşluklarının doldurulması, filtrelenmesi ile nesnelerin 3 boyutlu modelleri oluşturulmaktadır. Oluşturulan bu modeller üzerinden, mühendislik uygulamaları için gerekli her türlü veriye ulaşılabilmektedir.

Bu çalışmanın amacı köprü, baraj vb. büyük yapılardaki deformasyon izlemelerinde Yersel Lazer Tarama teknikleri kullanılabilirliğinin araştırılmasıdır. Bu tür büyük yapıların davranışlarını izlemek ve deformasyon miktarlarını tespit etmek amacıyla çeşitli klasik yöntemler uygulanmaktadır. Bu yöntemler statik, dinamik ve fiziksel yöntemler olarak sınıflandırılmaktadır. Deformasyon ölçme yöntemleri ortak özelliği deformasyon izlemesi yapılacak olan yapı üzerinde tesis edilen yeterli sayıdaki referans ve obje noktalarının konumlarının çeşitli ölçme araçları yardımıyla yeterli doğrulukta ölçülmesidir. Doğal olarak bu noktaların sayısı artığında ölçmeler için harcanacak olan sürede artmaktadır. Deformasyonlarının izlenmesinde seçilen referans ve obje noktalarının sayısı klasik ölçme yöntemlerinde kısıtlı iken lazer tarayıcıların kullanımında böyle bir sorun söz konusu değildir. Çünkü yersel lazer tarayıcılar oldukça çok sayıda noktaya sanal ortamda ulaşmaya imkân sağlamaktadır. Deformasyon analizinde kullanılan sınırlı nokta sayısı yerine tüm yapıya daha çok sayıda noktalardan yararlanma imkânı ortaya çıkmaktadır.

Uygulama da yersel lazer tarayıcı ve klasik yöntemle 2'şer periyot ölçü yapılmış ve yapılan ölçümlerle her periyot arasında 3 boyutlu koordinat dönüşümleri yapılmış ve bu dönüşümlerde sonra ölçüler tekrar değerlendirilip uyuşumlu ve uyuşumsuz ölçüler ayıklanıp deformasyon olan noktaların deformasyon miktarları, yönleri tespit edilmiş ve her iki ölçme yönteminde de birbirlerine yakın değerler elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: *Yersel Lazer Tarama Teknolojisi, Nokta Bulutları, Deformasyon ölçmeleri, Deformasyon analizi*

ABSTRACT

Master Thesis

A STUDY ON USABILITY OF TERRESTRIAL LASER SCANNING FOR DEFORMATION MONITORING

Mustafa GÜMÜŞ

Selcuk University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Geomatic Engineering

Advisor: Yrd.Doç.Dr. Ayhan CEYLAN

2010, 84 Page

Jury :Yrd. Doç. Dr. Ayhan CEYLAN

Prof.Dr. Cevat İNAL

Yrd. Doç. Dr. Atilla ÖZÜTOK

The information obtained from this laser system is compatible with real. Three-dimensional geometric and visual informations are obtained faster and lower costs with laser scanning systems. Objects in laser technology obtain three dimensional point data include the intensity of reflection data. Three-dimensional models are created with the save the point cloud, merging, thinning, gap filling out points and the filtering. Can be reached any kind of data required for engineering applications with these models.

The aim of this study is deformation monitoring of large structures as bridge, dams etc. Terrestrial Laser Scanning techniques to evaluate the usability. To monitor the behavior of such large structures and in order to determine the amount of

deformation is applied to several classical methods. These methods are classified as static, dynamic and physical methods. As a common characteristic of the deformation measurements is measure the location of sufficient number of reference and object points established on the monitoring structure. Naturally, if the points are increase, the number of measurements is going to increase. At the deformation monitoring with classical method the number of the selected reference and object points are limited but in the use of laser scanner that is not such a problem. Because terrestrial laser scanners provide opportunities to reach quite a large number of virtual points. Limited number of points used in the analysis of deformation instead of the entire structure benefits from a greater number of points arise.

In practice terrestrial laser scanner and traditional methodical two periods extent done and the measurements at each period between the three-dimensional coordinate transformations were made and these conversions after the measurements re-evaluated and conformity, and conformity-free measurements extract is deformed to the point of deformation quantity, directions have been identified and each measure in each close values were obtained.

Keywords: *Terrestrial laser Scanning Technology, Point Clouds, Deformation measurements, Deformation analysis*

ÖNSÖZ

Tez çalışması boyunca yardım eden, yol gösteren değerli danışmanım Yrd. Doç.Dr. Ayhan CEYLAN'a, yaptığım çalışmalarda yardımlarını esirgemeyen Doç.Dr. Murat YAKAR'a, Doç.Dr. Hakan KARABÖRK', Doç.Dr. H.Hüsnü KORKMAZ'a, Doç.Dr. Ş.Hakan KUTOĞLU'na, Araş. Gör. Kutalmış GÜMÜŞ'e ve Paksoy Teknik Hizmetler ve Tic. Ltd. Şti. Lazer Scanner departman müdürü Erkan BAYGÜL'e, ayrıca bugüne kadar olduğu gibi bu çalışmada da hep yanımda olan sevgili aileme, çalışmama katkı sağlayan diğer tüm arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunuyorum.

Mustafa GÜMÜŞ

Konya, 2010

İÇİNDEKİLER

1 GİRİŞ 1

2 KAYNAK ARAŞTIRMASI 3

3 YERSEL LAZER TARAYICILAR 6

3.1 Yersel Lazer Tarayıcıların Çalışma Prensibi 7

3.1.1 Bir lazer ışının gidiş geliş zamanıyla işlem yapanlar 9

3.1.2 Faz karşılaştırma metoduyla işlem yapanlar 10

3.1.3 Triangulasyon metoduyla işlem yapanlar 10

3.1.3.1 Tek kamera çözümü 10

3.1.3.2 İki kamera çözümü 11

3.2 Lazer Tarayıcı Sisteminde Kullanılan Tarayıcı Çeşitleri 11

3.2.1 Kamera tarayıcılar 11

3.2.2 Panoramik tarayıcılar 11

3.2.3 Hibrid tarayıcılar 12

3.3 Yersel Lazer Tarayıcıların Sınıflandırılması 12

3.4 Tarayıcıların Genel Özellikleri 13

3.4.1 Genel 13

3.4.2 Hız 14

3.4.3 Çözünürlük ve ışın boyutu 14

3.4.4 Alım uzaklığı sınırlamaları ve radyasyon etkisi 14

3.4.5 Görüş alanı 14

3.4.6 Kayıt araçları 15

3.4.7 Kameralar 15

3.4.8 Taşıma kolaylığı 15

3.4.9 Güç desteği 15

3.4.10 Tarama yazılımı 16

3.5 3B Verilerin Değerlendirilmesi İçin Kullanılan Yazılımlar 17

3.6 Yersel Lazer Taramada Ölçme Prosedürleri 18

3.6.1 Ölçüm tasarımı 18

3.6.2 Tarama 19

3.6.3 Yerleştirme (Registration) 19
3.6.4 Ülke koordinat sistemine dönüştürme (Jeoreferanslandırma) 20
3.6.4.1 Doğrudan ülke koordinat sistemine dönüştürme 20
3.6.4.2 Dolaylı ülke koordinat sistemine dönüştürme 20
3.6.5 Nokta bulutların düzenlenmesi 21
3.6.5.1 Nokta temizleme 21
3.6.5.2 Veri filtreleme ve nokta inceltme 22
3.7 Yersel Lazer Tarayıcıların Kullanım Alanları 23
3.7.1 Ulaşım ve altyapı uygulamaları 23
3.7.2 Mimari ve bina ölçme uygulamaları 23
3.7.3 Kıyı uygulamaları 24
3.7.4 Afet izleme uygulamaları 25
3.7.5 Kültürel mirasın korunması ve arkeolojik uygulamaları 26
3.7.6 Endüstriyel uygulamalar 27
3.7.7 Madencilik, taşocağı ve kazı uygulamaları 28
3.7.8 Deformasyon ölçmeleri uygulamaları 29
3.8 Yersel Lazer Tarama Teknolojisinin Avantaj ve Dezavantajları 31
4 DEFORMASYON İLE İLGİLİ GENEL BİLGİLER 33
4.1 Deformasyon 33
4.1.1 Deformasyon ölçmelerinin uygulama alanları 34
4.1.2 Deformasyon ölçmelerinin amacı 34
4.1.3 Deformasyon nedenleri 35
4.1.4 Deformasyon ölçme yönteminin seçiminde dikkat edilecek hususlar 35
4.2 Deformasyon Modelleri ve Sınıflandırılması 35
4.2.1 Statik deformasyon modeli 36
4.2.2 Dinamik deformasyon modeli 36
4.2.3 Kinematik deformasyon modeli 37
4.3 Uyuşumsuz Ölçülerin Belirlenmesi 37
5 ÜÇ BOYUTLU BENZERLİK DÖNÜŞÜMÜ 40
5.1 Bursa-Wolf modeli 40

5.2 Molodensky-Badekas Modeli 43

6 UYGULAMA 46

6.1 Uygulama Alanı Tanıtımı 46
6.2 Uygulamada Kullanılan Donanımlar 48
6.3 Ölçme Çalışmaları ve Ölçülerin Değerlendirilmesi 51
6.4 Koordinat Dönüşümleri 60
6.5 Deformasyon Analizi 65
6.6 Sonuçlar 70

7 SONUÇ VE ÖNERİLER 77

8 KAYNAKLAR 82

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 3.1 Mensi GS100 lazer tarama sistemi 7

Şekil 3.2 Uçuş süresi yöntemi 9

Şekil 3.3 Triangulasyon yöntemi ; tek kamera çözümü 10

Şekil 3.4 Triangulasyon yöntemi ; iki kamera çözümü 11

Şekil 3.5 Lazer tarayıcı sisteminde kullanılan tarayıcı çeşitleri 12

Şekil 3.6 Ulaşım ve altyapı uygulama örnekleri 23

Şekil 3.7 Mimari ve bina ölçme uygulama örnekleri 24

Şekil 3.8 Kıyı uygulama örnekleri 25

Şekil 3.9 Afet izleme uygulama örnekleri 26

Şekil 3.10 Kültürel mirasın korunması ve arkeolojik uygulama örnekleri 27

Şekil 3.11 Endüstriyel uygulama örnekleri 28

Şekil 3.12 Madencilik, taşocağı ve kazı uygulama örnekleri 29

Şekil 3.13 Deformasyon ölçmeleri uygulamaları 29

ŞEKİL 5.1 Bursa-Wolf modelinin geometrik gösterimi 43

ŞEKİL 5.2 Molodensky-Badekas modelinin geometrik gösterimi 45

ŞEKİL 6.1 Numune I (1. periyod) 46

ŞEKİL 6.2 Numune I (2. periyod) 47

ŞEKİL 6.3 Numune II (1. periyod) 47

ŞEKİL 6.4 Numune II (2. periyod) 48

ŞEKİL 6.5 Topcon GPT 3007 49

ŞEKİL 6.6 Optech ILRIS-3D 50

ŞEKİL 6.7 Hedef levhası 51

ŞEKİL 6.8 Koordinat eksenleri 52

ŞEKİL 6.9 Ölçüm esnasından bir görüntü 53

ŞEKİL 6.10 Yazılıma ait görüntüler 54

ŞEKİL 6.11 Nokta bulutlarının temizlenmesi 55

ŞEKİL 6.12 Noktaların koordinatlandırılması 56

ŞEKİL 6.13 Yyönündeki koordinat farkları (Numune I) 70

ŞEKİL 6.14 X yönündeki koordinat farkları (Numune I) 71

ŞEKİL 6.15 Z yönündeki koordinat farkları (Numune I) 71

ŞEKİL 6.16 Klasik ve Lazer Tarayıcı ile Numune I üzerindeki noktalar ve deformasyonların yönü 72

ŞEKİL 6.17 Y yönündeki koordinat farkları (Numune II) 73

ŞEKİL 6.18 X yönündeki koordinat farkları (Numune II) 74

ŞEKİL 6.19 Z yönündeki koordinat farkları (Numune II) 74

ŞEKİL 6.20 Klasik ve Lazer Tarayıcı ile Numune II üzerindeki noktalar ve deformasyonların yönü 75

TABLO LİSTESİ

Tablo 3.1 Yersel tarama aletlerinin uzunluk doğruluk değerleri 13

Tablo 3.2 Çeşitli lazer tarayıcı sistemleri..... 16

Tablo 4.1 Deformasyon çeşitleri..... 33

Tablo 4.2 Deformasyon modellerinin sınıflandırılması..... 36

Tablo 4.3 Geleneksel uyuşumsuz ölçüler analiz yöntemleri..... 39

Tablo 6.1 Topcon GPT 3007..... 49

Tablo 6.2 Optech ILRIS-3D..... 50

Tablo 6.3 Elektronik Takeometre ile elde edilen koordinatlar (Numune I)..... 56

Tablo 6.4 Yersel lazer tarayıcı ile elde edilen koordinatlar (Numune I) 57

Tablo 6.5 Elektronik Takeometre ile elde edilen koordinatlar (Numune II) 58

Tablo 6.6 Yersel lazer tarayıcı ile elde edilen koordinatlar (Numune II) 59

Tablo6.7 Elektronik Takeometre ile elde edilen dönüştürülmüş koordinatlar (Numune I)..... 60

Tablo 6.8 Yersel lazer tarayıcı ile elde edilen dönüştürülmüş koordinatlar (Numune I)..... 61

Tablo6.9 Elektronik Takeometre ile elde edilen dönüştürülmüş koordinatlar (Numune II)..... 62

Tablo.6.10Yersel lazer tarayıcı ile elde edilen dönüştürülmüş koordinatlar (Numune II)..... 64

Tablo 6.11 Elektronik Takeometre ölçümündeki koordinat farkları (Numune I)..... 66

Tablo 6.12 Yersel lazer tarayıcı ölçümündeki koordinat farkları (Numune I) 67

Tablo 6.13 Elektronik Takeometre ölçümündeki koordinat farkları (Numune II) 68

Tablo 6.14 Yersel lazer tarayıcı ölçümündeki koordinat farkları (Numune II) 69

KISALTMALAR

CAD **:** Computer Aided Design

CCD **:** Charge-Couple Device

GPS **:** Global Positioning System

EKKY **:** En Küçük Kareler Yöntemi

IXF **:** IMPORT DATA(OPTECH)

TLS **:** Terrestrial Laser Scanner

3B **:** 3 Boyutlu

3D **:** 3 Boyutlu

1 GİRİŞ

Birçok farklı disiplin tarafından değişik nitelikteki uygulamalarda kullanılan lazer teknolojisi alanındaki araştırmalar uzun bir geçmişe sahiptir. Günümüzde gelişen teknolojiye paralel olarak konum belirleme yöntemlerinin giderek farklılaştığı bir süreçte lazer tarayıcılar, jeodezi bilimi ve mühendislik ölçmeleri alanına da yeni bir boyut getirmiştir. Özellikle yersel uygulamalar için ek bir yöntem haline gelen bu teknoloji, yersel lazer tarayıcılarındaki son gelişmelerle Harita Mühendisliği uygulama alanlarında yaygın bir biçimde kullanılmaya başlanmıştır.

Nesnelerin 3 Boyutlu (3B) modellenmesi teknolojik gelişmelerin eşliğinde günümüzde çok daha hızlı ve doğru olarak yapılmaktadır. Jeodezi, klasik takeometreler yerine günümüzde elektronik takeometreler ve GPS kullanarak, Fotogrametri ise uzun yıllar kullandığı analog ve analitik sistemler yerine son yıllarda geliştirilen sayısal değerlendirme sistemleri yardımıyla nesnelerin üç boyutlu modellerini oluşturmaktadırlar. Bu yöntemler arasına yeni katılan Lazer Tarama Teknolojisi ise 3B modelleme konusuna yepyeni bir boyut kazandırmıştır. Havadan veya yersel olarak nesnelere ait oldukça büyük miktarlarda üç boyut verisi, çok hızlı elde edilmekte ve nesne görüntüleriyle bütünleştirilerek bir gösterim sağlanmaktadır. Bu yöntemin diğer bir önemli avantajı da, mekânsal nesnelerin diğer görüntüleme tekniklerine göre daha gerçeğe yakın bir gösteriminin elde edilmesidir. Bu sebeplerden dolayı lazer, kültürel mirasın belgelendirilmesinde, mimari çalışmalarda ve mühendislik uygulamalarında her geçen gün daha da fazla kullanılmaktadır.

Bu çalışmada, obje ve yüzeylere ait 3B modellerin elde edilmesinde uygulanan klasik jeodezik ölçme yöntemlerin uygulama güçlüğü, maliyet ve düşük üretim hızı gibi bazı dezavantajları nedeniyle, alternatif yöntem arayışı noktasında yersel lazer tarayıcılarının deformasyon ölçmelerinde kullanılabilirliğinin araştırılması amaç edinilmiştir.

Bu amaçla Selçuk Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Deprem Laboratuarındaki Yükleme Duvarı'na yerleştirilen iki adet İki Boyutlu Betonarme çerçeve üzerinde, elektronik takeometre (jeodezik yöntem) ve yersel lazer tarayıcı ile ikişer periyot ölçü yapılmıştır. Bu ölçümlerin değerlendirilmesi sonucunda numuneler üzerindeki obje noktalarında oluşan deformasyon büyüklükleri ve deformasyona uğrayan noktalar karşılaştırılmıştır.

2 KAYNAK ARAŞTIRMASI

Deformasyon belirlenmesinde yersel lazer tarayıcıların kullanılması ile ilgili olarak daha önceden yapılmış olan çalışmalar aşağıda verilmiştir.

Thomas ve ark. (2004) tarafından yapılan çalışmada Slovakya'nın başkenti Bratislava'nın 40 km güneydoğusunda bulunan hidroelektrik santralinde yersel lazer tarayıcı ile deformasyon ölçümlerini araştırmışlardır. Bu çalışmada, deformasyonların belirlenmesi için, deformasyon alanında obje noktaları, deformasyon alanı dışında da ise referans noktalarından oluşan yersel bir ağ kurulmuştur. Deformasyonun yönü suyun geldiği yön "y" ekseni olarak tanımlanmıştır. Farklı su seviyelerinde yapılan taramalarla her obje noktası için yeni bir (y`) değeri belirlenmiştir. Bu farklı "y" koordinatları farkı deformasyon miktarını belirtmiştir. Sonuç olarak 4 farklı su seviyedeki deformasyonlar, su seviyesi 4.4 m olduğu durumda deformasyonun olmadığı, su seviyesinin 9.4 m olduğunda 1.5-2.5 cm arası değişen deformasyonların olduğu, su seviyesinin 13.0 m olduğunda 1.5-3.0 cm arası değişen deformasyonların olduğu, su seviyesinin 19.4 m olduğunda ise 3.0-3.7cm arası değişen deformasyonların olduğu tespit edilmiştir.

Bir diğer çalışma olarak Alba ve ark. (2006)'da İtalya da bulunan Cancano baraj gölünde deformasyon ölçümleri yapmıştır. Bu amaçla barajın üstüne bir test ağı kurulmuştur. Çok miktarda retro yansıtıcılı hedefler baraj gövdesine yerleştirilmiş ve bu hedefler Elektronik takeometre ve yersel lazer tarayıcılar ile ölçülmüştür. Bu çalışmada uzun menzilli Riegl LMS-Z420i ve orta menzilli Leica HDS 3000 marka iki adet yersel lazer tarayıcı kullanılmıştır. Elektronik takeometre ile elde edilen sonuçlar ile yersel lazer tarayıcılar ile elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Çalışmanın sonucunda, beklendiği gibi en büyük deformasyonların akıntı yönünde olduğu tespit edilmiştir. Bu sonuçlar, renk haritalarında da gösterilmiştir.

Bayram ve ark. (2009)'da İstanbul da trafik kazası yapmış bir araç üzerinde oluşan hasarın miktarını yani araçta oluşan deformasyonu ölçmek amacıyla yersel lazer tarayıcı ile ölçümler gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada kaza yapan aracın hasarlı olan ön kısmına hedef levhaları yapıştırılmış ve optoTOP-HE optik lazer tarama sistemi ve AICON 3B modelleme yazılımı kullanılarak hasar görmüş bir araç 3B modellenerek hasar miktarı belirlenmiştir. Hasar miktarı, aracın hasarlı kısmının yapılmadan önceki haliyle, hasarlı kısmının onarıldıktan sonraki kısımları ölçüldükten sonra deformasyon haritası da çıkartılarak bu renk haritalarından da hangi kısımda ne kadar deforme olduğu gösterilmiştir.

Lindenbergh ve ark. (2005)'de Hollanda'nın Rotterdam kentinde iki amaç için ölçümler yapmıştır. 1. Amaç kaliteli bir nokta bulutu nasıl elde edebiliriz. 2. Amaç ise deformasyonun lazer tarama teknolojisi ile belirlenebilirliği ve yapay deformasyonların nokta bulutlarında nasıl göründüğüdür. Bunlar için ilk olarak ölçme prosedürleri belirlenmiştir. Yersel lazer tarayıcının nerelere kurulması gerektiği ortak koordinat sistemine çevirmek için hangi bölgelere hedeflerin yerleştirilmesi gerektiği gibi çalışmalar yapılmıştır. Yersel lazer tarayıcı olarak Leica HDS 4500 marka tarayıcı kullanılmıştır. Yapılan taramalarla en iyi nokta bulutları elde edildikten sonra yapay deformasyonlar için tünel içinde belirli yerlerde duvarlara farklı tipte hedef levhaları yerleştirilmiştir. Bu ölçümlerden sonra tünelin modeli ve renk haritası çıkarılarak yerleştirilmiş hedef levhalarının nasıl göründüğü ve deformasyon miktarlarının bu renk haritasında göründüğü araştırılmıştır. Yapılan taramalarda ortalama hata ±7.6 mm olarak hesaplanmıştır.

Gordon ve ark. (2003)' te yaptıkları bir çalışmada, üç farklı deney seti üzerinde farklı yüklemelerde oluşan deformasyonların belirlenmesinde yersel lazer tarayıcı kullanılmıştır. I. Deney setinde ahşap kiriş, II. Deney setinde beton kiriş, III. Deney setinde ise ahşap köprü üzerinde çalışılmıştır. Bu çalışmanın amacı yüklü yapıların düşey deformasyonlarının ölçümü için yersel lazer tarayıcıların doğruluğunu belirlenmesidir. Bu çalışmada Riegl LMS-Z210 yersel lazer tarayıcısı kullanılmıştır. Her bir deney setinde, kullanılan kiriş üzerine yapılan farklı ağırlıklı yüklemeler sonucu oluşan düşey sapmalar lazer tarayıcı ile tespit edilmiştir.

Çalışma sonucunda her bir deney setine ait ölçmelerden elde edilen ortalama hatalar verilmiştir. I. Deney setinde elde edilen ortalama hata Cyrax 2500 için ±0.29mm, LMS-Z210 için ±3.6mm, II. Deney setinde ise LMS-Z210 için ±2.4mm, III. Deney setinde ise 4 farklı durum için ±4.2mm ile ±9.5mm arası değişen ortalama hatalar elde edilmiştir.

3 YERSEL LAZER TARAYICILAR

Bilgisayar teknolojisindeki son gelişmeler 3B model oluşturmada sürekli yenilikler getirmektedir. Yersel lazer tarayıcılar 3B modelleme için etkili bir ölçme teknolojisi olarak mevcut sistemlere rakip veya alternatif olarak hızla gelişmektedir. Yersel lazer tarayıcılar çok kısa bir zaman periyodunda milyonlarca noktanın 3B koordinatlarını elde edebilmektedirler. Bu sistemler lazerin taradığı yüzeydeki nokta kümelerinin doğrudan ölçümlerini elde etmektedirler (Yakar ve Yılmaz 2006).

Yersel lazer tarama yüksek çözünürlüklü 3B model oluşturmak için gerekli nokta kümelerini kısa sürede ve düşük maliyette elde edebilen bir teknolojidir. Bu sistem kompleks yapıdaki bir objenin 3B koordinatlarını otomatik olarak elde edebilmektedir (Yakar ve Yılmaz 2006).

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 sistemi içerisindeki 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 obje alanından yüzlerce metreye ölçüm yapabilen birçok lazer tarayıcı mevcuttur (Ingensand 2006). Sabit veya hareketli bir platformdan taramayı gerçekleştirmek mümkündür. 3B modeli elde edilmeye çalışılan objelerin geniş ve karışık şekilli olmalarından dolayı, tek seferde tarama yapılarak obje geometrisi yakalanamamaktadır. Bu yüzden, farklı konumlardan taramalar yapılmalıdır. Objenin tamamlanmış gösterimini sağlamak için, bu taramalar birleştirilmeli ve jeodezik koordinat sistemine dönüştürülmelidir. İkinci olarak yersel lazer tarayıcı verisinin, diğer mekânsal veriyle (GPS ölçümleri vb.) entegrasyonu çok önemlidir. Birçok CAD yazılım paketi, bu amaçlar için kullanılmaktadır (Reshetyuk 2006).

3B lazer tarayıcı objeyi görülebilir bir lazer ışınıyla seçilebilir bir grid yoğunluğuna göre taramaktadır. Hedef noktasıyla eğik mesafeyle beraber yatay ve düşey açı da kaydedilmektedir. Çok kısa sürede binlerce 3B vektör yaratılmaktadır, taranan obje 3B koordinat uzayında büyük bir grid formunda gösterilmektedir. Bu yüzden 3B lazer tarayıcıya 1:1 sayısallaştırıcı da denilmektedir.

30 yıldan daha uzun süredir yersel ölçme yöntemlerine katkıda bulunan lazer; gelişen bilgisayar teknolojisi ile objelerin 3B modellemesinde kullanılan bir teknoloji halini almıştır. Günümüzde birbirinden faklı birçok lazer tarayıcı ve bu tarayıcıların kullandıkları birbirinden faklı ölçme tekniği vardır. Yersel lazer tarayıcının seçimi, yapılan işin amacına ve istenilen hassasiyete bağlı olarak değişir.

3.1 Yersel Lazer Tarayıcıların Çalışma Prensibi

Yersel lazer tarayıcılar 4 birimden oluşur.

1) Tarayıcı Ünitesi: Taramanın gerçekleştirildiği lazer ve optik sistem
2) Kontrol Ünitesi: Tarama sonucu elde edilen verinin Dizüstü bilgisayarlara aktarılıp işlenmesi.
3) Güç Kaynağı: Batarya veya jeneratörler
4) Tripod ve Sehpa: Tarama sistemin yerleştirildiği üçayak



Şekil 3.1 MENSİ GS100 lazer tarama sistemi (Kertsen 2004)

Yersel lazer tarayıcılar birkaç saniyede binlerce noktayı elde edebilen motorize bir elektronik takeometre olarak düşünülebilinir. Lazer tarayıcı çalıştırıldığında ölçülen noktalar dahili bir koordinat sisteminde koordinatlandırılır (Bornaz 2004). Ölçülen her noktadaki açı ve mesafeler; noktaların lazer lokal referans sistemine konumlandırılması için kullanılır. Yersel lazer tarayıcı tarafından toplanan ham data genellikle küresel (kutupsal) bir koordinat çerçevesi içerisinde parametrize edilir ve "r" lazer tarafından ölçülen mesafeyi, "ϕ" lazer tarayıcının optik birimindeki aynanın dönüş açısını, "φ" tarama esnasında lazer tarayıcının konum açısını gösterir. Lazer kutupsal koordinat sisteminden lazer kartezyen koordinat sistemine dönüşüm aşağıdaki eşitlikle yapılır.

$$x = r.Sin\phi.Cos\varphi$$

$$y = r.Sin\phi.Sin\varphi \qquad (3.1)$$

$$z = r.Cos\phi$$

Lazer eksenleri imalattan dolayı tam olarak aynı hizada değildir ve ayna dönüş ekseni (ϕ açısı) ile lazer tarama ekseni (φ açısı) kesişmez. Bu nedenle ilk olarak; lazer kutupsal koordinatlarının, lokal lazer kartezyen koordinat sistemine dönüştürmek için bu farkın düzeltilmesi gerekir. Lazer kartezyen koordinat sisteminin orijininin ayna dönüş ekseni (ϕ açısı) üzerinde olduğu, r_0'ın mesafe ölçümündeki, φ_d' nin tarayıcının dönme eksenindeki kayıklık olduğu varsayılırsa; dönüşüm için gerekli bağıntı aşağıda belirtilmiştir.

$$x_e = r_0.Cos\varphi_d$$

$$y_e = r_0.Sin\varphi_d$$

$$x_1 = r.Sin\phi.Cos\varphi + x_e Cos\varphi + y_e Sin\varphi \qquad (3.2)$$

$$y_1 = r.Sin\phi.Sin\varphi + x_e.Sin\varphi - y_e.Cos\varphi$$

$$z_1 = r.Cos\phi$$

Lazer tarama yapılan ortamda kontrol noktaları (koordinatları jeodezik yöntemlerle belirlenmiş noktalar) yardımı ile bir harita koordinat sistemine dönüşüm yapılabilir. Taranan her nokta (X_l, Y_l, Z_l) bir küresel dönüşüm matrisi (X_T, Y_T, Z_T) ve bir rotasyon matrisi M_l^m ile harita koordinat sistemine dönüştürülebilir (Talaya 2004).

$$\begin{bmatrix} X_m \\ Y_m \\ Z_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_T \\ Y_T \\ Z_T \end{bmatrix} + M_l^m \begin{bmatrix} X_l \\ Y_l \\ Z_l \end{bmatrix} \qquad (3.3)$$

3.1.1 Bir lazer ışının gidiş geliş zamanıyla işlem yapanlar (uçuş zamanlı)

Tarayıcı nesneye lazer ışınını gönderir ve yayılan ve yansıyan lazer ışınlarının gidiş dönüş zamanları yardımıyla aradaki mesafe hesaplanabilmektedir. Bu prensip aynı zamanda elektronik takeometrelerden de bilinmektedir. Tarayıcılar lazer ışınının açısal yön sapmasını engellemek için küçük dönme araçlarına sahiptirler. Bu tip tarayıcıların tipik standart sapmaları bir kaç mm olmaktadır. Alım uzaklığı kısaldıkça bu değer bütün nesne yüzeyi için aynı olmaktadır. 3 boyutlu doğruluk derecesi de lazer ışınının açısal çözünürlüğüne bağlıdır (Boehler 2002).



Şekil 3.2 Uçuş süresi yöntemi (Boehler 2002)

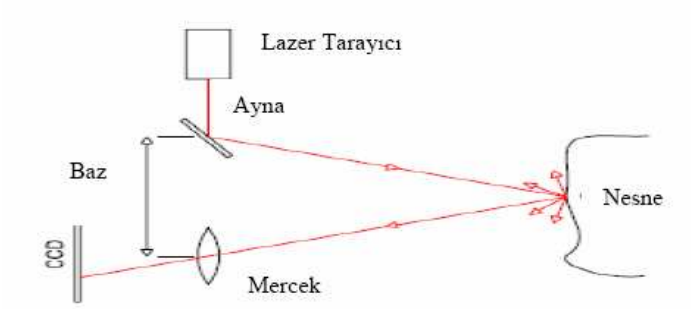
3.1.2 Faz karşılaştırma metoduyla işlem yapanlar

Bu metod da elektronik tarayıcılardan iyi bilinmektedir. Bu yöntemde lazer ışını harmonik hareketle oluşturulmaktadır ve mesafe giden ve geri gelen dalgaların faz farkından hesaplanmaktadır. Kullanıcı açısından tarayıcıların bu yöntemle çalışması önemli değildir. Daha karmaşık sinyal yapısı kullandığı için doğruluk derecesi daha iyi olabilir (Boehler 2002).

3.1.3 Triangulasyon metoduyla işlem yapanlar

3.1.3.1 Tek kamera çözümü

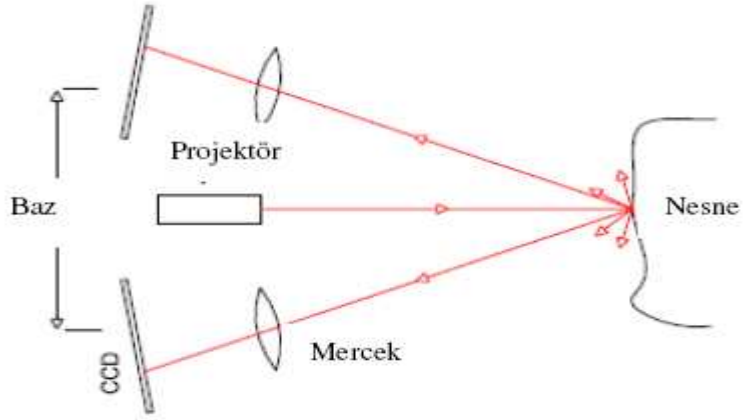
Bu tarayıcı basit bir ışın yayma düzeneği içerir ve nesne üzerinde belirlenmiş baz sonunda aniden yayılma açısı değişmektedir ve diğer yandan CCD kamera bu baz üzerindeki lazer ışınını saptamaktadır. Yansıyan yüzeyin 3 boyutlu konumu bu CCD kamera tarayıcı ve nesne arasında oluşturulan üçgen problemi ile çözülmektedir. Nesne ve tarayıcı arasındaki mesafenin doğruluk derecesi mesafenin karesiyle orantılıdır. Baz uzunluğu değişemeyeceği için bu tip tarayıcılar kısa mesafe ve küçük nesneler için iyi sonuç sağlamakta ve lazer ışınının gidiş dönüş prensibiyle ölçüm yapan tarayıcılardan daha doğru işlem sağlamaktadırlar(Boehler 2002).



Şekil 3.3 Triangulasyon yöntemi: tek kamera çözümü (Boehler 2002)

3.1.3.2 İki kamera çözümü

Bu tip tarayıcılar iki CCD kamerası kullanırlar ve her biri bir başka baz uzunluğu sonuyla işlem yapmaktadır. Işın veya doku bir ölçüm işlevi içermeyen ayrı bir ışın düzeneğiyle elde edilir. Geometrik bağıntılar tek kameralı sistemle aynıdır. Aynı doğruluk derecesi elde edilir (Boehler 2002).



Şekil 3.4 Triangulasyon yöntemi: iki kamera çözümü (Boehler 2002)

3.2 Lazer Tarayıcı Sisteminde Kullanılan Tarayıcı Çeşitleri

3.2.1 Kamera tarayıcılar

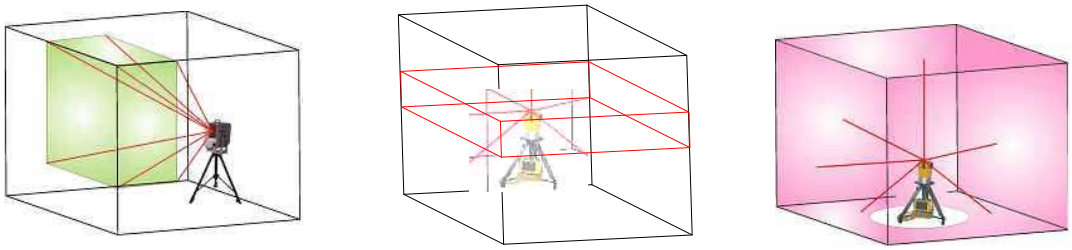
Sınırlı görüş alanına (FOV- Field Of View) sahip tarayıcılardır. Örneğin 40x40°. Objelerin dış yüzeylerinin taramasında ideal, uzun mesafe ölçümleri için kullanışlıdırlar. (Cyra 2500 – LEICA ve Ilris 3D – OPTECH)

3.2.2 Panoramik tarayıcılar

Görüş alanının sınırını yalnızca aletin konumu belirler. Bu tarz tarayıcılar iç kısımlar için; özellikle odaların, tesislerin v.b. sayısallaştırılması maksadıyla kullanılırlar. (Imager 5003 - ZOLLER & FRÖHLICH ve Callidus - CALIDUS RECISION)

3.2.3 Hibrid tarayıcılar

Dönme eksenlerinde biri (genellikle yatay hareket ekseni) serbest, diğeri aynaların kullanışına bağlı olarak (örneğin 60°'ye kadar) sınırlı olan tarayıcılardır. GS 200 - MENSI ve LMS Z 360 - RIEGL)



Kamera Tarayıcı Hibrid Tarayıcı Panoramik Tarayıcı

Şekil 3.5 Lazer tarayıcı sisteminde kullanılan tarayıcı çeşitleri

3.3 Yersel Lazer Tarayıcıların Sınıflandırılması

Yersel lazer tarayıcıları sınıflandırmak zordur. Lazer tarayıcılar ya ölçme prensibine ya da teknik özelliklerine göre sınıflandırılabilir. Bütün uygulamalarda kullanılabilen bir yersel lazer tarayıcı tanımlamak oldukça zordur. Bazı yersel lazer tarayıcılar kapalı mekânlar ve orta mesafelerde (100m ye kadar) uygun olurken bazı yersel lazer tarayıcılar açık mekânlarda ve daha uzun mesafelerde daha uygundur. Bu nedenle uygulamaya bağlı olarak en uygun yersel lazer tarayıcının seçilmesi gerekir. Yersel lazer tarayıcılar mesafe ölçümü için üç farklı teknoloji kullanır (Fröhlich ve Mettenleiter 2004).

Bugün yersel lazer tarayıcılar için en popüler mesafe ölçme tekniği uçuş zamanlı prensibidir. Bu teknik bir kaç 100 m ye kadar olan belirli mesafelerin

ölçülmesini sağlar. Bunun yanında faz ölçme prensibi orta mesafeler için başka bir ortak tekniktir. Bu teknikte mesafe 100 m ile sınırlıdır. Ölçülen mesafe doğruluğu birkaç milimetredir. Bazı yersel lazer tarayıcılar birkaç metreye kadar ölçü yapabilirler. Bunlar daha çok endüstriyel uygulamalarda kullanılırlar. Bu tip yersel lazer tarayıcılar da kullanılan mesafe ölçme prensibi optik üçgenlemedir. Bu ölçmedeki doğruluklar birkaç mikron seviyesindedir. Yersel lazer tarayıcılar teknik özelliklerine göre sınıflandırılırsa bu özellikler aşağıdaki gibi sıralanabilir (Fröhlich ve Mettenleiter 2004).

Tablo 3.1 Yersel lazer tarayıcılar (Fröclich ve Mettenleiter 2004)

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

3.4 Tarayıcıların Genel Özellikleri

3.4.1 Genel

Kullanıcıların tarayıcıları kıyaslarken genelde doğruluk derecesine bakmalarına rağmen uygulama için diğer özelliklerin ve kültürel varlıkları tarama kabiliyetini göz önüne almaları gerekmektedir (Boehler 2002).

3.4.2 Hız

Yüksek çözünürlük için zamana bağlı olarak nokta taranabilmektedir. 100 nokta/saniye ile 1000 nokta/saniye kabul edilebilir normal hız sayılmaktadır (Boehler 2002).

3.4.3 Çözünürlük ve ışın boyutu

Nesne çözünürlüğü teorik olarak lazer ışınının açısal çözünürlüğüne ve yansıyan ışının nesne üzerindeki alanına bağlıdır. Yüksek çözünürlüğün istendiği durumlarla lazer ışınının sağlayabildiği en iyi odaklama kabiliyeti dikkatlice saptanmalıdır (Boehler 2002).

3.4.4 Alım uzaklığı sınırlamaları ve radyasyon etkisi

Lazer tarayıcılar için verilen alım uzaklığı özelliklerinin pek çok parametreye bağlı olduğu gözden kaçırılmamalıdır. Bunlar; nesne yüzeyinin yansıma özelliğine, doğrudan güneş ışını almalarına ve ek olarak yansıyan güneş ışınına, nesne üzerindeki yapay radyasyona, nesne yakınındaki radyasyon kaynaklarına bağlıdır. Genel olarak faz farkı prensibini kullanan tarayıcılarda CCD üzerinde sinyal saptanması ve faz farkı ölçümleri daha duyarlı olmasına karşın ışın zamanı prensibini kullanan tarayıcılar nispeten daha kuvvetlidir ve gecede ölçüme olanak sağlamaktadırlar (Boehler 2002).

3.4.5 Görüş alanı

Rotasyon için motorlu eksenler olmadan sabitlenen tarayıcılar, kısıtlı bir görüş alanına sahiptir. Tipik olarak, yaklaşık 40° x 40° bir alanı tarayabilirler. MENSI SOISIC gibi tek eksenli tarayıcılar, yaklaşık 45° x 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 (Boehler 2002).

3.4.6 Kayıt araçları

Her tarama işlemi farklı bir konumdan gerçekleştirilmişse bunların tek bir koordinat sisteminde kaydı yapılarak bütünleştirilmesi gerekmektedir. Nesne üzerinde bazı hedef noktaları tarama yazılımlarında kolayca saptanıp bu işlem uygulanabilmektedir. Bazı sistemler kendi özel hedef noktalarını kullanmaktadırlar. Bu hedef noktaları aynı zamanda takeometrik ve fotogrametrık hedef noktaları olarak da uygundur (Boehler 2002).

3.4.7 Kameralar

Çoğu uygulama nesne üzerinde doku bilgisini içermektedir. Görüntülerin model üzerine uygulanmasıyla gerçekçi modeller sağlanabilmektedir. Bazı tarayıcılar geri dönen yansıma yoğunluğunu da ölçmektedirler. Bazıları ise doku haritalaması için yeterli kameraya sahip değillerdir. Üçgenleme prensibiyle çalışan tarayıcılarda kameranın ışın konumunu bulup belirlemek için doku eklemek uygun olmamaktadır. Yüksek kaliteli görüntü sağlamak için bugün için bir kamerayı tarayıcıya bağlamak uygun çözüm olarak görünmektedir. Bu durumda kamera ve tarayıcının ilgili konumları tarama sonuçları ve görüntülere dayalı olarak kalibre edilmektedir (Boehler 2002).

3.4.8 Taşıma kolaylığı

İdeal olarak tarama sistemi taşınabilir ve küçük olmalıdır. Fakat günümüzde çoğu sistem oldukça ağırdır. Özellikle yerleşim yerlerinden uzakta kültürel nesne uygulamalarında güç birimlerinin de birlikte taşınması önemli bir sorun olmaktadır (Boehler 2002).

3.4.9 Güç desteği

Batarya ile çalışan tarayıcılar güce bağlı çalışanlara göre daha kullanışlıdırlar. Taşınabilir jeneratörler güce bağlı çalışan tarayıcılara yardımcı olabilir, fakat iç

mekân veya mağara çalışmalarında uzun kablolara gereksinim duyulur. Ayrıca bu jeneratör ve kablolar da her yere taşınacağından, ekipman yükünü arttırır (Boehler 2002).

3.4.10 Tarama yazılımı

Yazılım, tarama pencereleri ve çözünürlük değerlerini tanımlamak için basit ve hızlı ara yüzler sunmalıdır. Tarama işlemini gözlemlemeye olanak sağlamalı ve ne kadar sürede tarama yapılacağına dair kestirimlerde bulunmalıdır. Sanal bağlantı yapmak ve kontrol noktaları için otomatik hedef tanıma, çözünürlüğü dinamik olarak ayarlama gibi birkaç spesifik özellik de yazılımlardan istenebilir. Geniş objelerin kaydı söz konusu olduğu durumlarda, taramanın tam olarak tamamlanıp tamamlanmadığını kontrol edebilmek için değişik noktalardan yapılan gözlemlerden en azından bir tanesinde alınan nokta bulutunun ham birleştirme bitirilmesine olanak sağlamalıdır (Boehler 2002).

Tablo 3.2 Çeşitli lazer tarayıcı sistemleri(URL6-7-8)

Üretici	**LazerTarayıcı Sistemi**
3rd Tech Inc	DeltaSphere
CyraTechnologies	HDS 2500
CyraTechnologies	HDS 3000
CyraTechnologies	HDS 4500
CyraTechnologies	HDS 450
IQSun 880	IQVoution
I-SITE Ply Ltd	I-SITE 4400
MENSI	GS100
MENSI	GS200
Optech Inc.	ALTM 30/70
Optech Inc.	ILRIS 3D
Riegl USA	LPM 800 HA
Riegl USA	LMS Z210i
Riegl USA	LMS Z360
Riegl USA	LMS Z420
Visi Image Inc.	3Dguru

3.5 3B Verilerin Değerlendirilmesi İçin Kullanılan Yazılımlar

3B 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, arama 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

3.6 Yersel Lazer Taramada Ölçme Prosedürleri

3.6.1 Ölçüm tasarımı

Yersel lazer tarama işlemlerinde ölçüm tasarımı, hala açık bir sorudur ve bu zamana kadar hiçbir standart kural saptanmamıştır. Yine de herhangi bir ölçme sisteminde olduğu gibi bir ön planlama gerektiğinden gerekli bilgilerin türetilmesi gerekir (Guissani ve Scaioni 2004). Yersel lazer tarama ölçüm tasarımı ana basamaklarıyla şöyledir:

1. Taranacak alanın önceden belirlenmesi: Geniş alanlar taranırken tarayıcı taranacak obje ya da alanı düşük çözünürlükte taramalıdır ki, bu da diğer tasarım işlemlerinde kullanılacak alanın haritasının çıkartılmasını mümkün kılar. Büyük ölçekli haritalar bu hususta kullanışlı olabilir.

2. Kullanılacak tarayıcıyı seçme: Birçok şirketin ürettiği, değişik fiyatlarda, farklı konum doğruluklarına ve tarama mesafelerine sahip çok çeşitli tarayıcılar mevcuttur. Önemli olan yapılacak uygulama için en uygun olanını seçmektir.

3. Tarama noktaları için en uygun yer: Gerekli çözünürlüğü ve doğruluğu sağlayacak şekilde seçilmelidir.

4. Hedefler türlerinin seçimi ve hedeflerin yerlerinin önceden belirlenmesi: Farklı tarama merkezlerinden elde edilmiş nokta bulutlarının birleştirilmesi, jeoreferans konumları yapmak için uygun hedefler seçilmelidir.

5. Tarama sonucu elde edilen nokta bulutunun beklenen çözünürlük ve doğruluğunun tanımı: Bunlar taramanın ölçeğine veya nokta bulutundaki minimum nitelik boyutunun görülebilir olmasına bağlı olarak tanımlanabilirler. Daha küçük objeler daha iyi doğruluk ve çözünürlük gerektirirler.

6. Son olarak yukarıda bahsedilen basamakların her biri yapıldıktan sonra, taranacak alan ya da objenin bir kısmı taranarak, kabaca bir veri elde edilir. Bu tarama sürecinde geçen zaman dikkate alınarak toplanacak toplam veri için işin tamamında geçecek zaman tahmin edilebilir.

3.6.2 Tarama

Tarama işlemine başlamadan önce operatör belirlenmiş konumda aleti kurar ve tarama yazılımı içindeki gerekli düzenlemeleri; tarama çözünürlüğü, tarayıcının objeye olan mesafesi, doğruluk modu, tarama sayısı, ilk veya son atım ölçümleri vb. bilgileri girer (Lichti 2002). Tarama başladıktan sonra operatör, dizüstü bilgisayarın ekranındaki işlemleri takip edebilir. Tarama tamamlandığında veri belirlenmiş proje dosyasına kaydedilir. Belirli tarama fonksiyonları, bir tarayıcı tipinden diğerine değişir.

3.6.3 Yerleştirme (Registration)

Yerleştirme'ye iki amaç için ihtiyaç vardır:

1. Değişik gözlem noktalarından alınan nokta bulutlarının birleştirilmesi.

2. Nesneyi belirli bir koordinat sistemine oturtma. (Jeoreferanslandırma)

Yerleştirmeyi gerçekleştirmek için bağlantı ya da kontrol noktalarına gereksinim vardır. Bu noktalar özenle seçilmiş, objenin fark edilebilir bir noktası (örneğin; köşeleri) ya da özel hedefler (yüksek yansıtıcılı küreler ya da levhalar) olabilir. Küresel koordinatlandırma durumunda bu hedefler jeodezik ya da yersel fotogrametrik yöntemlerle ölçülmüş olmalıdır. Her iki amaç için de, nokta bulutu içerisinde alınacak yeterli sayıda belirli nokta (üç ya da dört) ile bağlantı yapmak yalnızca bağlama noktaları ile nokta bulutlarını birbirine bağlanmaktan daha iyi sonuç verir. Diğer taraftan, eğer yeteri kadar bindirme sağlanırsa, yüzeydeki birçok nokta çözüm için gerekli olan yeterli geometrik olanağı verir. Yüzey alanı geniş; objeler, iç ya da dış mekânlar için yapılan çok sayıda tekli taramaların bu yüzeylerde

olumsuz hatalar oluşturabileceğine dikkat edilmelidir. Objeler, koşullar ve doğruluk talepleri durumdan duruma değişebilir, ideal bir yerleştirme yazılımı her ikisini de; özel hedeflerle yerleştirme ya da bindirmeli nokta bulutları ile (ya da her ikisinin kombinasyonunu) yerleştirme olanağını sağlamalıdır. En küçük kareler yöntemi ile dengeleme her ikisinde de olmalıdır (Boehler 2002).

3.6.4 Ülke Koordinat Sistemine Dönüştürme (Jeoreferanslandırma)

Taramalar sonucu elde edilen ve tarayıcının kendi koordinat sisteminde birleştirilen nokta bulutlarının belirli bir koordinat sistemine (ülke) oturtulmasıdır. Bu işlemin yapılabilmesi için tarama bölgesinde jeodezik bir ağ kurulması ve bu ağdan, taramada kullanılan hedeflerin ya da kontrol noktaların ülke koordinatlarının elde edilmesi gerekir. Bu hedefler yardımıyla taranmış alan ya da objenin koordinatları ülke koordinat sistemine dönüştürülür. Jeoreferanslandırma tarayıcı tasarımına bağlı olarak iki şekilde yapılabilir (Gordon ve Lichti 2004).

3.6.4.1 Doğrudan ülke koordinat sistemine dönüştürme

Tarayıcı koordinatı bilinen bir nokta üzerine kurulur; noktanın konum bilgileri (x,y,z), alet yüksekliği gibi değerler tarayıcı yazılımına girilir. Bazı lazer tarama sistemleri GPS entegreli olarak çalışmakta ve lazer tarayıcının kurulu olduğu noktanın ulusal sistemdeki koordinatları elde edilebilmektedir (Örneğin; Riegl, Leica HDS 3000). Tarama işlemleri sonucu elde edilen nokta bulutlarının koordinatları hiçbir koordinat dönüşümü yapılmadan doğrudan elde edilmekte ve bu nokta bulutları birleştirilerek taranan obje ya da alanın gerçeğe yakın 3B tam sunumu elde edilmektedir.

3.6.4.2 Dolaylı ülke koordinat sistemine dönüştürme

Her tarama bir sonraki tarama alanının bir kısmını kapsayacak şekilde yapılmalı, kesişen bölgelere, kullanılan tarayıcının özelliğine göre özel hedefler yerleştirilmelidir. Ayrıca tarama alanında kolayca fark edilebilen ve jeodezik

anlamda koordinatı bilinen en az 3 tane kontrol noktasının daha olması gerekir. Bu kontrol noktaları ve hedefler yardımıyla farklı noktalardan yapılan taramalar sonucu elde edilen nokta bulutları birleştirilmektedir. Jeodezik koordinatı bilinen kontrol noktaları yardımıyla birleştirilmiş noktalar ülke koordinat sistemine dönüştürülmektedir. Kontrol noktaları bazı ağ noktalarıyla çakışabilirler veya onlardan farklı olabilirler.

3.6.5 Nokta Bulutların Düzenlenmesi

3.6.5.1 Nokta temizleme

Tarama işlemi sırasında çeşitli sebeplerden ötürü ölçülen noktalar tek tek denetlenemediği için seçilen nesne yüzeyinin yanı sıra farklı noktalar da kayıt edilir. Bu sebeplerden bazıları:

- Objenin arkasında bulunan diğer nesnelerden gelen yansımalar
- Tarayıcı ile obje arasında bulunan nesnelerden gelen yansımalar (ön planda bulunan ağaç vb nesnelerden kaynaklanan; hareket eden insanlardan ya da trafikten ya da toz veya yağmur gibi atmosferik koşullardan kaynaklanan yansımalar)
- Lazer demetinin çoklu yansımaları
- Yüzey elemanlarının farklı yansıtma özelliklerinin sebep olduğu sistematik mesafe hatalarından kaynaklanan mesafe farklılıkları
- Çok açık renkli objelerin (ya da ışığın) neden olduğu hatalı noktalar.

Bu noktaların çoğu, birkaç nokta bulutu birleştirilmeden önce silinebilir. Yazılımlar tüm öngörüleri gerçekleştiremeyecekleri için silme işleminin enteraktif olarak yapılması daha iyi sonuçlar sunar. Akıllı yazılım özellikleri silme işlemine yardımcı olur ve nokta silme işlemini hızlandırır.

Arka veya ön taraftaki noktalar mesafe limitleri tanıtılarak kolayca silinebilinir. Çoklu yansımadan kaynaklanan hatalı noktalar da genellikle bu yöntemle yakalanır.

Zor olan kısım kenarlardaki hatalı noktaları bulmaktır. Kenarlardaki lazer nokta yansıma yüzdesine bağlı olarak hata fazla ya da az olabilir. Eğer hata sistematik ise (örneğin; triangulasyon tarayıcılarda hatalı nokta daima, tarayıcıdan kenara kadar olan lazer demetinin uzantısında bulunur. Yazılım bu tarzdaki noktaları aramalı, onları belirtmeli ve onları saklanmasını ya da silinmesini operatöre bırakmalıdır.

Bazı denemeler gösteriyor ki, yüzey materyalinin yansıtma özelliğine bağlı mesafe sapmalarını kimi tarayıcılar göstermektedir. Fakat bu sapmaların (hataların), otomatik düzeltme işlemini mümkün kılabilecek kadar doğru modellenebildiği tecrübe edilmelidir (Boehler 2002).

3.6.5.2 Veri filtreleme ve nokta inceltme

Tarama sonuçları, ölçüm elemanlarının sınırlı doğruluğundan dolayı birtakım gürültü değerleri gösterecektir. Eğer nesne yüzeyinin düz olduğu biliniyorsa, düşük geçiş veya orta filtre istenilen durum (düzlük) için oldukça yeterlidir. Yalnız dikkat edilmelidir ki filtreleme nesnenin tüm yüzeylerine aynı şekilde etki eder. Fakat nesne; kenarların yanında düz yüzeylerden oluşuyorsa; bu noktada filtreleme uygun olmaz.

Nokta inceltme ile orta yüzeyden büyük ölçüde sapma gösteren hatalı noktalar seçilip silinerek filtreleme ile benzer etki sağlanabilir. Eğer faklı gözlem noktalarından birkaç tarama yapılmışsa, yerleştirme işleminde tüm ölçümler birleştirilene kadar nokta inceltmeyi ertelemek uygun olur (Boehler 2002).

3.7 Yersel Lazer Tarayıcıların Kullanım Alanları

3.7.1 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).

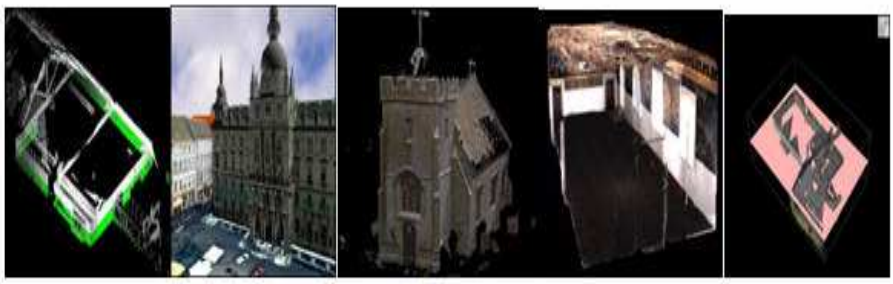


Şekil 3.6 Ulaşım ve altyapı uygulama örnekleri(URL1)

3.7.2 Mimari ve Bina Ölçme Uygulamaları

Mimarlar tarafından, lazer taramalar sonucu elde edilen 3B 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, 3B 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 3B 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 3.7 Mimari ve bina ölçme uygulama örnekleri(URL1)

3.7.3 Kıyı Uygulamaları

Son birkaç yıldır kıyı bölgelerin izlenmesi, yeni bir ölçme teknolojisi olan, yersel lazer tarama teknolojisi kullanılarak yapılmaktadır. Bu teknolojide 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 sev izlenmesi, kıyı planlanması, 3B 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 3.8 Kıyı uygulama örnekleri(URL1)

3.7.4 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, tas ocağı ve maden işletmelerinde karşılaşılacak problemler çözülebilmektedir. En önemli özelliği gerçeğe yakın 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)

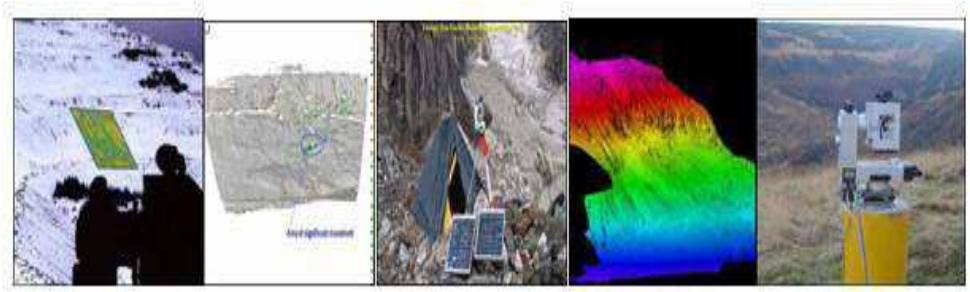
- Livox Taşocağı, UK (Kaya Düşme Analizi- Haziran 2001)

- 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 (www.3dlasermapping.com).



Şekil 3.9 Afet izleme uygulama örnekleri(URL1)

3.7.5 Kültürel Mirasın Korunması ve Arkeolojik Uygulamaları

Lazer tarama, tarihi ve kültürel mirasın korunması, gerçeğe uygun yaşatılması, 3B modelleme çalışmalarında, dünyada yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Lazer tarama teknolojisinin kullanım amacı tarihi ve kültürel bilgilerin arşivlenmesi, 3B 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 3.10 Kültürel mirasın korunması ve arkeolojik uygulama örnekleri(URL1)

3.7.6 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 3B nokta bulutlarından CAD yazılımlarında, 3B 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 (www.3dlasermapping.com).

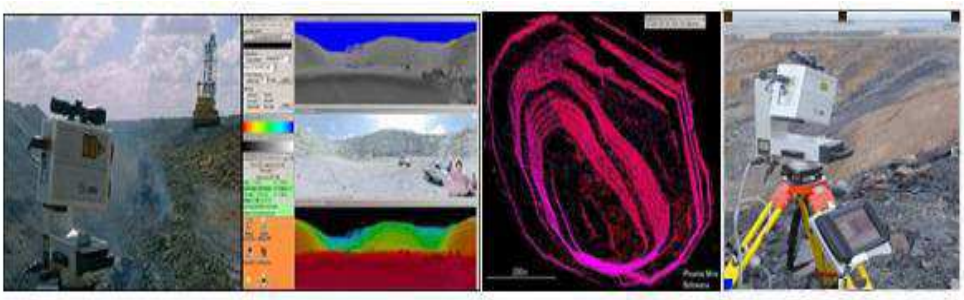


Şekil 3.11 Endüstriyel uygulama örnekleri(URL1)

3.7.7 Madencilik, Taşocağı ve Kazı Uygulamaları

Bu uygulama alanlarında lazer tarama teknolojisi, gerek zaman, gerek maliyet açısından önemli avantajlar sağlamaktadır. Madencilikte, taşocağı veya hafriyat islerinde 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 ulaşılamama durumu vardır. Bu durum ölçme islerini zorlaştırdığı gibi, verilerin değerlendirme süresini ve isin 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

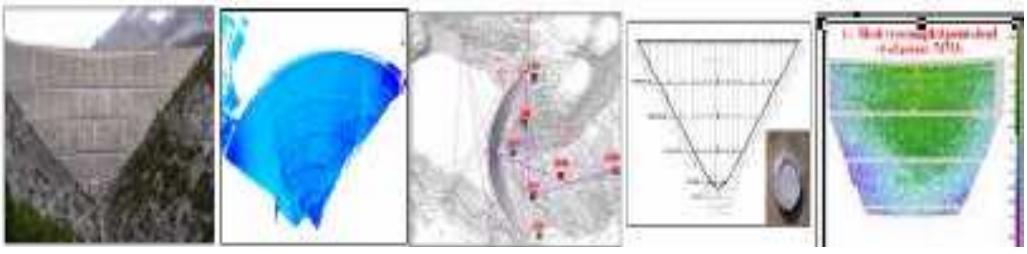
verilerin yazılımlarda değerlendirilmesi ile elde edilmektedir (www.3dlasermapping.com).



Şekil 3.12 Madencilik, taşocağı ve kazı uygulama örnekleri(URL1)

3.7.8 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 (www.3dlasermapping.com).



Şekil 3.13 Deformasyon ölçmeleri uygulamaları (Alba2006)

Sonuç olarak lazer tarayıcıların kullanım alanları:

1. Projelerin sahaya uygunluğunun kontrolü, planlarla yapı ilerleyişinin karşılaştırılması ve kalite kontrolün sağlanması

2. Sanal planlama ve mevcut arazi ilişkilerini içeren mekânsal durumun analiz edilmesi (birleşik yapılar, çok katlı ulaşım merkezleri, alışveriş merkezleri, vb.)

3. Binaların, yapıların uygun bakımını sağlamak için, enteraktif yapı incelemeleri, risk keşifleri ve çürüme kontrollerini amaç edinen yapı bilgi sistemleri kurulması (Wunderlich 2003).

4. Görsel 3B fabrika yaratmak için endüstriyel ortamların belgelenmesi, yani mevcut fabrika veya tesisin tam dijital modelinin elde edilmesi. Bir görsel 3B kurulumuyla, yeni ürünler programlanabilir. 3B model yardımıyla, değişiklikler nedeniyle eskiyen mevcut çizimleri, gerçeğe uygun olarak sağlamak mümkündür.

5. Bir ülkenin altyapı tesislerinin belgelenmesi. Demiryolu, yol şebekesi, tüneller, köprüler, enerji hatları gibi hasar görmüş alanların teşhisi için olağan araştırma gerektiren değerlendirme yöntemleri için bir temel sağlar. Bu şekilde gerekli onarımlar gecikmesiz tamamlanabilir.

6. Taranacak obje ya da alanın deformasyon kontrolü sadece ayrık noktalar olmaksızın yersel lazer tarayıcılarla sıklıkla analiz edilebilir. Böylece yerel deformasyonlar ortaya çıkabilir.

7. Kültürel mirasın (kiliseler, kaleler, saraylar, vb.) detaylı durumu ve hasar değerlendirilmesi, bunların muhafazası için gerekli belgelendirmelerin yapılması, hasar ve yıkım durumunda gelecekte verilen herhangi bir zaman için restorasyonun sağlanması. Bu durumlarda, en narin yapılar ve detayları dokümanlaştırılmalıdır. Bu, ulusal anlamda kültürel miras bilgi sisteminin kurulması için daha fazla temel sağlayabilir. Doğru, gerçek, görsel 3B modeller sayesinde, internet aracılığıyla dünyadaki tüm insanlara tarihi miraslar sanal (Sanal Turizm) olarak ziyaret ettirilebilir (Reshetyuk 2005).

3.8 Yersel Lazer Tarama Teknolojisinin Avantaj ve Dezavantajları

Son yıllarda lazer tarama teknolojisi, modelleme işleminde daha da kullanışlı hale geldi. Lazer tarama sistemlerinde modellemeler, ölçeksiz ve karmaşıklık (düzensiz yapıdaki objeler) faktörü olmaksızın yapılabilmektedir. Karmaşık yapılı objelerin modellenmesi, nokta bulutları ile yapılmakta ve tüm noktalar 3B koordinatlara sahiptirler. Lazer taramanın diğer bir ayrıcalığı da bir dosya formatında çok fazla veriyi dışarıya vermesidir (Barber 2001).

Yersel lazer tarayıcılar sadece birkaç dakika içerisinde, bir objeye ait binlerce 3Boyutlu nokta üretebilirler (Gordon 2001).

Yersel fotogrametri yıllarca 3B modelleme üzerine söz sahibi iken lazer tarama tekniği 3B modelleme işlemine yeni bir boyut kazandırdı. Aşağıda her iki metodun kendine has avantaj ve dezavantajları yer almaktadır. Fakat asıl amaç her iki yönteminde pozitif yönlerini ele alarak hangisinin yapılacak uygulama için daha uygun olduğunu saptamaktır (Vozikis 2004).

Yersel lazer tarama teknolojisinin fotogrametriye göre avantajları:

- Üç boyutlu noktaların doğrudan elde edilebilmesi
- Bir yüzeyi çok fazla sayıda üç boyutlu nokta olarak gösterebilmesi
- Düzensiz yüzeyler (kabartmalar, heykeller, sütun başları…) için uygun olması
- Çok kısa zamanda sonuçlanması
- Fotogrametrinin yersel lazer tarama teknolojisine göre avantajları:
- Mesafe sınırlamasının olmaması
- Maliyet azlığı

- Yüksek çözünürlük
- Eski görüntüleri kullanarak modelleme özelliği
- Uygulama sırasında daha kısa zamanda nesne verisi (görüntü) elde etme (Wehr 1999)

Jeodezik ölçüm metotları, objenin hızlı bir şekilde geometrik ve görsel bilgilerine ulaşmak için uygun değildir. Sadece tek tek nokta ölçümüne izin verirler. Bu nedenle bu metotlar genellikle yavaştır. Modern reflektörsüz “totalstation”lar ve diğer gelişen teknolojilerde de nokta bazlı tarama fonksiyonları vardır. Fakat tarama süresinin fazlalığı, elde edilen nokta sayısının azlığı ve taranan objenin gerçek modeline uygun nokta kümelerinin elde edilemeyişi, yersel lazer tarama teknolojisinin kullanımını da etkin hale getirmiştir.

4 DEFORMASYON İLE İLGİLİ GENEL BİLGİLER

4.1 Deformasyon

Yapılarda, makine tesislerinde veya yer kabuğunda kalıcı yada geçici etkiler altında oluşan şekil değişimlerine "Deformasyon" adı verilir. Deformasyonlar, zamana ve koşullara bağlı olarak oluşur. Bu değişimlerin belirlenmesi için yapılan ölçmelere "Deformasyon Ölçmeleri", bu ölçülerin değerlendirilip, yorumlanması işlemine de "Deformasyon Ölçülerinin Analizi" denilmektedir.

Deformasyonlar, sekil değişimlerinin yapısına ve cinsine göre kalıcı ve elastiki olmak üzere ikiye ayrılırlar.

Tablo 4.1 Deformasyon Çeşitleri(Doğanalp 2005)



4.1.1 Deformasyon ölçmelerinin uygulama alanları

Deformasyonlar farklı meslek gruplarında değişik biçimlerde karşımıza çıkmaktadır.

Bunlardan bazıları;

• İnşaat Mühendisliğinde örneğin yüklemeler altında yapı değişimlerinin araştırılması,

• Makine yapılarında, ayar durumunun kontrolünde,

• Yer ve kaya mekaniğinin temel problemlerinde,

• Jeoloji ve jeomorfolojide yerkabuğu hareketlerinin izlenmesinde, şeklinde sıralanabilir.

4.1.2 Deformasyon ölçmelerinin amacı

Deformasyon ölçmelerinin amacı; ya gerçek bir sorunun belirlenmesi yada bir tehlikenin ortaya çıkarılması amacıyla yapılır. Bu sorun veya tehlike zamanında belirlenip gerekli önlemler alınırsa deformasyon ölçmeleri amacına ulaşmış olacaktır. Deformasyonların tam olarak belirlenip yorumlanması için zamana bağlı olarak objenin sürekli gözlenmesi gereklidir. Deformasyonlara ilişkin yorum yapmak için bir periyottan fazla ölçüye gereksinim vardır. Burada ilk yapılan ölçmeler sıfır ölçmesi veya referans ölçmesi (t_0), ikinci olarak yapılan ölçmeler yineleme veya tekrar ölçüsü (t_1, t_2) olarak adlandırılır. Bu iki periyot arasındaki hıza göre ölçülerin yinelenme sıklığı değişir.

Biraz önce de belirtildiği gibi deformasyonların belirlenmesi için ölçülerin zamana bağlı durumları gözlenmelidir. Peki bu periyot ölçüleri ne kadar sıklıkta yinelenmelidir? Bu ölçülerin yinelenme aralığı, objedeki değişimin hızına bağlıdır. Yani hız düşük ise, ölçmeler klasik jeodezik yöntemlerle yapılabilir. Hız fazla ise, ölçmeler özel ölçme yöntemleri ile yapılması yerinde olacaktır. Ayrıca bu zaman

aralığı deformasyon hızının yanında, deformasyonun büyüklüğüne ve yapıyı etkileyen faktörlerin değişimine bağlıdır.

4.1.3 Deformasyon nedenleri

Deformasyon nedenleri;

• Tabandaki değişimler,

• Yapı temelindeki gevşemeler,

• Nem, sıcaklık, basınç değişimleri,

• Ani değişimler

olarak sıralanabilir (İnal 2000).

4.1.4 Deformasyon ölçme yönteminin seçiminde dikkat edilecek hususlar

Ölçme yöntemi seçilirken öncelikle deformasyonu belirlenecek objenin yanına varılıp varılamadığı, üzerinden geçilip geçilemediği yada sadece gözlenebilir olup olmadığı ve ölçme programının ne kadar bir süreyi gerektirdiği belirlenmelidir (İnal 2000).

Ölçmeler genellikle uzun zaman aralığında şekilleri yavaş yavaş değişen objeleri içerir.

4.2 Deformasyon Modelleri ve Sınıflandırılması

Kuhlmann ve Pelzer'e göre; deformasyonlar kuvvetlerin etkimesi sonucunda oluşur ve genellikle zamana bağlı olarak değişir. Deformasyonları belirlemek için oluşturulan matematiksel modeller fiziksel gerçeğin basitleştirilmiş biçimleridir, genellikle kuvvet yada zamana bağlı olarak tanımlanır (Doğan 2002).

Deformasyonlar, probleme uygulanan ölçme planına ve yöntemine göre statik, kinematik ve dinamik olmak üzere baslıca üç model ile incelenir (Ayan 1982).

Tablo 4.2 Deformasyon modellerinin sınıflandırılması (Doğan 2002)

MODEL	Fonksiyon	Zamana bağlı	Kuvvete bağlı
Statik	$x_{t_k} = x_{t_{k-1}} + \Phi_{sta}(x)$	-----	-----
Kinematik	$x_{t_k} = x_{t_{k-1}} + \Phi_{kin}(x, t_k - t_{k-1})$	Evet	-----
Dinamik	$x_{t_k} = x_{t_{k-1}} + \Phi_{din}(x, f_k - f_{k-1})$	-----	Evet

4.2.1 Statik deformasyon modeli

Statik model en basit deformasyon modelidir. Deformasyon incelenmesine konu bölge veya yapının karakteristik noktalarını, deformasyon vektörlerinin zamandan ve etkiyen kuvvetlerden bağımsız olarak belirlenmesini sağlar. Bu modelde tüm ağın bir kez ölçülmesi sırasında noktaların sabit kaldığı varsayılır (Öztürk ve Ünver 1992). Bu modelde bir periyoda ilişkin ölçme süresince objede bir hareket olmadığı varsayılır (Ayan 1982 , Doğan 2002).

4.2.2 Dinamik deformasyon modeli

Bir dinamik deformasyon modeli, objenin geçici davranışları yanında deformasyona neden olan kuvvetlerin zamana ve dış etkenlere bağlı olarak değişimini ve bu kuvvetler arasındaki fonksiyonel ilişkiyi tanımlar (Ayan 1982).

Dinamik sistemler, dış kuvvetlerin etkisi altında bulunur ve zaman içinde sistem hareketlerini, bunlara neden olan kuvvetlerin ya da bu kuvvetler ile orantılı büyüklüklerin fonksiyonu olarak belirler (Demirel 1993). Modelde doğru bir yorumlama yapılabilmesi için her etki yapan kuvvetin çok iyi bilinmesi gereklidir.

4.2.3 Kinematik deformasyon modeli

Kinematik deformasyon modelinde dayanak ve obje noktalarının koordinatları zamanın fonksiyonları biçiminde tanımlanır (Doğan 2002).

Buna göre X koordinat parametreleri vektörü zamana bağlı bir değişkendir ve aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$X(t) = X(t_k) + (t - t_k)V(t_k) + \frac{1}{2}a(t_k)(t - t_k)^2 \qquad (4.1)$$

X (t) : t zamanına ilişkin durum vektörü

X (t_k) : t_k zamanına ilişkin durum vektörü

V (t_k) : Hız vektörü

a (t_k) : İvme vektörü

anlamındadır.

4.3 Uyuşumsuz Ölçülerin Belirlenmesi

İstatistikte parametrik modellerin kullanımı oldukça basittir. Bunun nedeni nitelik bilgileri ve oldukça az sayıda gözlemle veri grubunun tamamının yaklaşık tarifinin sağlanabilmesidir. Ayrıca parametre değerleri ile birlikte gözlenen verilerin genelleştirilmesi ve diğer gözlemlerin stokastik modelini kolayca tarif edebilmeyi ve tamamlamayı sağlar. Veri yoğunlaştırılması yada azaltılması olarak adlandırılan istatistiğin ana amaçlarından birini yerine getirir ve tüm veri grubunun tamamen tarifinde muhtemel teori metotlarının uygulanmasına izin verir (Aktaş 1993)

Yalnızca gerçeğe bir yaklaşım olan parametrik model, normal dağılımdaki verilerin analizi için belirlenecek sınırlar hakkında bilgi verir fakat verilerin bu sınırlara ne kadar uzak olunduğu ya da tahminlerin başarısı konusunda bilgi vermez. Jeodezik çalışmalar için yapılan ölçülerin değerlendirilmesinde kaba hataların ve

uyuşumsuz ölçülerin tespiti güvenirlik ve kalite açısından önemlidir. Ölçüler ne kadar dikkatli yapılırsa yapılsın uyuşumsuzluklar içermesi kaçınılmazdır. Jeodezik çalışmalarda uzun yıllardır EKKY ile çözüme dayalı Uyuşumsuz ölçüler testi kullanılmaktadır. Geleneksel çözüm yöntemlerinde uyuşumsuz ölçülerin belirlenmesi işleminde her işlem adımında sadece bir uyuşumsuz (düzeltmesi en büyük) ölçü belirlenebilir. Ölçü kümesinden bu ölçü çıkarılır ve dengeleme işlemi tekrarlanır. Dengeleme hesabı sonucu ölçülerde kaba hata olup olmadığının analizi için,

$$H_0 : E\{\nabla li\} = 0 \quad ; \quad H_S : E\{\nabla\ li\} = \nabla\ li \neq 0 \tag{4.2}$$

şeklinde sıfır ve seçenek hipotezi kurulur. Hipotez testi analizi için ölçülerin düzeltme değerleri $\underline{v}$ kullanılarak her ölçü için test değeri hesaplanır. Bu değer ölçülerin dağılımının uyduğu tablodan serbestlik derecesi f = n-u ‘ya göre belirlenen sınır değer ile karşılaştırılır. Sınır değerin üstünde test değerleri varsa bu değerlerin en büyüğüne sahip olan ölçü uyuşumsuz olarak kabul edilir ve ölçü grubundan çıkarılır. Yeni ölçü grubu ile dengeleme hesabı ve uyuşumsuz ölçü analizi işlemleri tekrarlanır. Bu işleme test değerlerinin tümü sınır değerin altında kalıncaya kadar devam edilir.

Tablo 4.3’de; α_0 anlamlılık, f serbestlik seviyesi N, τ, t ise normal, tau ve student dağılımlarını göstermektedir. Geleneksel çözüm yöntemlerinde üç farklı yaklaşım kullanılmaktadır. Bu yaklaşımlar DataSnooping(Baarda), Tau ve t(student) testidir. Bu yöntemlerin üçü de aynı ilkelere göre çözüm yapmaktadır, farklılıkları ise çözümde kullandıkları varyans değerleri ve bu değerlere bağlı olarak ölçülerin dağılım tablolarıdır (Öztürk ve Şerbetçi 1992).

Tablo 4.3 Geleneksel uyuşumsuz ölçüler analizi yöntemleri

Yöntem	Data - Snopping	Tau – Testi	T – Testi
Test Değeri	$W_i = \frac{\lvert v_i \rvert}{\sigma_0 \sqrt{Q_{v_i v_i}}}$	$T_i = \frac{\lvert v_i \rvert}{m_0 \sqrt{Q_{v_i v_i}}}$	$t_i = \frac{\lvert v_i \rvert}{m_{01} \sqrt{Q_{v_i v_i}}}$
Test Dağılımı	$\sim N(0,1)$	$\sim T_{f,(1-\alpha_0/2)}$	$\sim t_{f-1,(1-\alpha_0/2)}$
Sınır Değeri	$N_{(1-\alpha_0/2)}$	$T_{f,(1-\alpha_0/2)}$	$t_{f-1,(1-\alpha_0/2)}$

Yapmış olduğumuz uygulamada t Testi (student) kullandığımız için bu yöntem hakkında bilgi vermek gerekirse;

Herhangi bir l_i ölçüsü, uyuşumsuz olmasına neden olan kaba hata içeriyorsa bu ölçü değeri kullanılarak hesaplanan m_0^2 soncul varyansı da bu hatayı içerir. Bu uyuşumsuz ölçülerin çıkartılarak hesaplanan soncul varyans değeri kaba hatalardan daha az etkilenmiş olacaktır. Bu yüzdende bu yöntem istatistiksel açıdan daha güvenilir sonuçlar vermektedir. " f " serbestlik derecesi, m_0 soncul varyans, v düzeltme değeri, Q_{vivi} düzeltmelerin ağırlık katsayıları matrisi olmak üzere test büyüklüğü ve tablo değeri hesaplanır.

$$t_i = \frac{\lvert v_i \rvert}{m_{01} \sqrt{Q_{v_i v_i}}} \qquad q = t_{f-1,(1-\alpha_0/2)} \tag{4.3}$$

t_i test büyüklüğü ve q tablo değeri karşılaştırılarak diğer geleneksel çözüm yöntemlerinde olduğu gibi q sınır değerini aşan t_i değerlerinin en büyüğü uyuşumsuz ölçü olarak kabul edilir ve işlemler aynı şekilde tekrarlanır.

5 ÜÇ BOYUTLU BENZERLİK DÖNÜŞÜMÜ

Üç boyutlu benzerlik dönüşümü eşitliğinde t_X, t_Y, t_Z eksenler boyunca ötelemeler, ε_X, ε_Y, ε_Z eksenler etrafındaki dönüklükler ve k ölçek faktörü olmak üzere yedi adet parametre bulunur. Bu parametreler her iki koordinat sistemindeki özdeş noktalardan yararlanarak en küçük kareler yöntemiyle hesaplanırlar. Problemin çözümü için çok sayıda yaklaşım vardır. Bursa-Wolf, Molodensky-Badekas, Veis, Krakiwsky-Thompson modelleri bunlardan bazılarıdır. Bu modellerden en yaygın olarak kullanılanlar, çözüm doğrulukları ve diğerlerine göre daha basit matematik yapıları nedeniyle, Bursa-Wolf ve Molodensky-Badekas modelleridir(Harvey 1986).

5.1 Bursa-Wolf modeli

Bursa-Wolf modelinin genel eşitliği, (5.1)'deki gibidir (Bursa 1966, Wolf 1963, DEHA, 1998, AUSLIG, 2000, POSCE, 2000). Burada küçük dönüklükler için verilen R dönme matrisi iki kısma ayrılarak;

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_2 = \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix} + R(1+k) \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_1 \tag{5.1}$$

$$R = I + U = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & \varepsilon_Z & -\varepsilon_Y \\ -\varepsilon_Z & 0 & \varepsilon_X \\ \varepsilon_Y & -\varepsilon_X & 0 \end{bmatrix} \tag{5.2}$$

şeklinde yazılır (Kutoğlu 2001). Her iki sistemdeki koordinat değerleri x_1 ve x_2 ve bunların düzeltmeleri olarak düşünülecek inkonsistent parametreleri v_1 ve v_2 ile;

$$x_2 + v_2 = t + (1+k) + (I+U)(x_1 + v_1) \tag{5.3}$$

yazılır. Burada bilinmeyen parametrelerin hesabında uygulanacak en küçük kareler yönteminde, özdeş noktaların iki sistemde de verilen koordinatları, Gauss-Markof modelinin ölçülerinin yerini tutmaktadır. (5.3) eşitliğinin sağ tarafındaki çarpımın gerçekleştirilmesiyle ortaya çıkacak olan kUx_1, kIv_1, kUv_1ve Uv_1 çok küçük terimler içerdiklerinden ihmal edilirler. Böylece (5.3) ifadesi;

$$x_2 + v_2 = t + x_1 + v_1 + (U - kI)x_1 \tag{5.4}$$

olur.

$$x_2 + v_2 = t + x_1 + v_1 + \begin{bmatrix} k & \varepsilon_Z & -\varepsilon_Y \\ -\varepsilon_Z & k & \varepsilon_X \\ \varepsilon_Y & -\varepsilon_X & k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{bmatrix} \tag{5.5}$$

yazılarak, bir özdeş nokta için

$$\begin{bmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{X2} \\ v_{Y2} \\ v_{Z2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_X \\ t_Y \\ t_Z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{X1} \\ v_{Y1} \\ v_{Z1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_1k + Y_1\varepsilon_Z - Z_1\varepsilon_Y \\ -X_1\varepsilon_Z + Y_1k + Z_1\varepsilon_X \\ X_1\varepsilon_Y - Y_1\varepsilon_X + Z_1k \end{bmatrix} \tag{5.6}$$

elde edilir. Bu matris gösterimi tek bir nokta için denklem sistemi şeklinde ifade edilir ve uygun biçimde düzenlenirse;

$$\begin{aligned} &v_{x_1} + 0 + 0 - v_{x_2} + 0 + 0 + t_X + 0 + 0 + 0 - Z_1\varepsilon_Y + Y_1\varepsilon_Z + X_1k + X_1 - X_2 = 0 \\ &0 + v_{y_1} + 0 + 0 - v_{y_2} + 0 + 0 + t_Y + 0 + Z_1\varepsilon_X + 0 - X_1\varepsilon_Z + Y_1k + Y_1 - Y_2 = 0 \\ &0 + 0 + v_{z_1} + 0 + 0 - v_{z_2} + 0 + 0 + t_Z - Y_1\varepsilon_X + X_1\varepsilon_Y + 0 + Z_1k + Z_1 - Z_2 = 0 \end{aligned} \tag{5.7}$$

doğrusal denklemleri ortaya çıkar. Bu ifade bir özdeş nokta için **v** düzeltmeleri ve dönüşüm parametreleri bilinmeyenleri ve bilinmeyenleri içeren üç koşul denklemini göstermektedir. Özdeş noktaların koordinat farkları ise bu denklemlerin mutlak terimleridir. Tüm özdeş noktalar için bu şekilde oluşturulacak denklemlerin genel gösterimi ;

$$Av + Bx - l = 0 \tag{5.8}$$

şeklindedir. x dönüşümün bilinmeyen parametreleri olmak üzere, buradaki kısa gösterimlerin açık ifadesi aşağıdaki gibidir (Şimşek 1995).

$$v^T = \left[v_{x_1}\ v_{y_1}\ v_{z_1}\ v_{x_2}\ v_{y_2}\ v_{z_2}\right] \tag{5.9}$$

$$x^T = \left[t_X\ t_Y\ t_Z\ \varepsilon_X\ \varepsilon_Y\ \varepsilon_Z\ k\right] \tag{5.10}$$

$$-l^T = \left[(X_1 - X_2)(Y_1 - Y_2)(Z_1 - Z_2)\right] \tag{5.11}$$

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \tag{5.12}$$

$$B = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & -Z_1 & Y_1 & X_1 \\ 0 & 1 & 0 & Z_1 & 0 & -X_1 & Y_1 \\ 0 & 0 & 1 & -Y_1 & X_1 & 0 & Z_1 \end{bmatrix} \tag{5.13}$$

Ayrıca bu matris ve vektörlerin satır sayısı, her yeni bir özdeş nokta için katlanacaktır. Eğer sistemlerden birinin hatasız olduğu varsayılırsa (Örneğin ikinci sistem koordinatları) $v_{x_2} = v_{y_2} = v_{z_2} = 0$ ile;

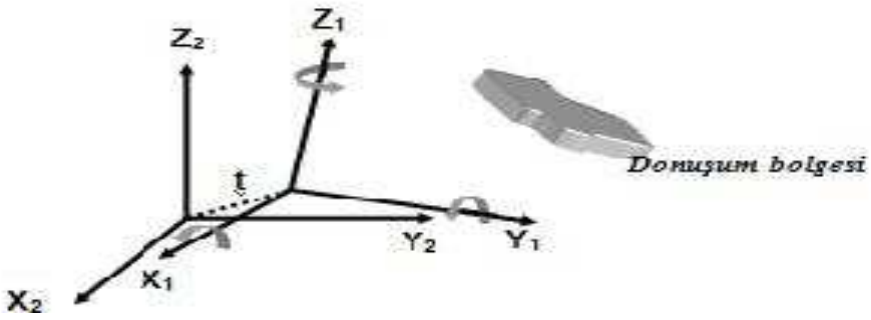
$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{5.14}$$

olur ve model;

$$v = Bx - l \tag{5.15}$$

dolaylı ölçüler dengelemesinin fonksiyonel modeli haline gelir.

Bursa-Wolf modelinin geometrik gösterimi Şekil 5.1'de görülmektedir.



Şekil 5.1 Bursa-Wolf modelinin geometrik gösterimi (Kutoğlu 2001)

5.2 Molodensky-Badekas Modeli

Bu modelde dönüşüm parametrelerinin hesabında kullanılacak özdeş noktaların, dönüştürülecek sistemdeki koordinatlarının ağırlık merkezinde olan, bir P_o noktası alınır ve tüm noktaların konum vektörleri P_0 noktasına göre yeniden belirlenir (x_1 - x_0). Bu yeni konum vektörü bir (U, V, W) koordinat sisteminde tanımlanır. Bu sistem P_0 noktasında döndürüldükten sonra, önce x_0 konum vektörü kadar, sonra da dönüşüme konu, iki koordinat sistemi arasındaki t öteleme vektörü kadar ötelenir. Model genel olarak ;

$$x_2 = t + x_0 + (1+k)(R)(x_1 - x_0) \tag{5.16}$$

bağıntısıyla ifade edilir (Kutoğlu 1997). Burada, x_0 bir P_0 noktasının (Çoğunlukla özdeş noktaların koordinatlarının ağırlık merkezi) birinci sistemdeki koordinatlarıdır.

R dönme matrisi, I+U bileşenlerine ayrılır. Her iki sistemdeki koordinatların ve $\mathbf{x}_0$ vektörünün hatalı olduğu düşünülür ve (1+k)(I + U) çarpımı yapılır. Bu durumda genel bağıntı ;

$$x_2 + v_2 = t + x_0 + v_0 + (I + U + kI + kU)((x_1 - x_0) + (v_1 - v_0)) \tag{5.17}$$

haline gelir. Burada oluşacak kU, kI(v_1 - v_0) ve U(v_1 - v_0) matris çarpımları çok küçük terimler içermeleri nedeniyle gözardı edilirler. Böylece;

$$x_2 + v_2 = t + x_0 + v_0 + I(x_1 - x_0) + U(x_1 - x_0) + kI(x_1 - x_0) + I(v_1 - v_0) \quad (5.18)$$

olur. Burada ;

$$x_1 - x_0 = s = \begin{bmatrix} U \\ V \\ W \end{bmatrix} \quad (5.19)$$

değişimiyle ;

$$x_2 + v_2 = t + x_0 + v_0 + (x_1 - x_0) + Us + kIs + v_1 - v_0 \quad (5.20)$$

ve ;

$$x_2 + v_2 = t + x_1 + v_1 + (U - kI)s \quad (5.21)$$

elde edilir. Bu eşitlik görüldüğü üzere Bursa-Wolf modelindeki (5.4) eşitliğine özdeştir. Oradaki yol izlenerek;

$$x_2 + v_2 = t + x_1 + v_1 + \begin{bmatrix} Uk + V\varepsilon_Z - W\varepsilon_Y \\ -U\varepsilon_Z + Vk + W\varepsilon_X \\ U\varepsilon_Y - V\varepsilon_X + Wk \end{bmatrix} \quad (5.22)$$

elde edilir. Bu matris gösterimini bir nokta için açıp, denklem sistemi halinde düzenleyecek olursak;

$$\begin{aligned} &v_{x_1} + 0 + 0 - v_{x_2} + 0 + 0 + t_X + 0 + 0 + 0 - W\varepsilon_Y + V\varepsilon_Z + Uk + X_1 - X_2 = 0 \\ &0 + v_{y_1} + 0 + 0 - v_{y_2} + 0 + 0 + t_Y + 0 + W\varepsilon_X + 0 - U\varepsilon_Z + Vk + Y_1 - Y_2 = 0 \\ &0 + 0 + V_{z_1} + 0 + 0 - v_{z_2} + 0 + 0 + t_Z - V\varepsilon_X + U\varepsilon_Y + 0 + Wk + Z_1 - Z_2 = 0 \end{aligned} \quad (5.23)$$

doğrusal denklem sistemi elde edilir. Bu denklem sisteminin genel gösterimi;

$$Av + Bx - l = 0 \quad (5.24)$$

bilinmeyenli koşullu ölçüler dengelemesinin fonksiyonel modelidir.

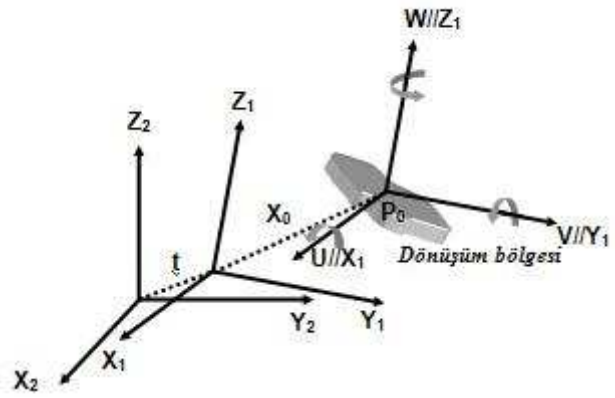
$$B=\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & -W & V & U \\ 0 & 1 & 0 & W & 0 & -U & V \\ 0 & 0 & 1 & -V & U & 0 & W \end{bmatrix} \tag{5.25}$$

şeklindedir.

Bu modelde sistemlerden birinin hatasız varsayılması durumunda, yine;

$$v = Bx - l \tag{5.26}$$

şeklinde dolaylı ölçüler dengelemesinin fonksiyonel modeli ile karşılaşılır (Şimşek 1995). Modelin geometrik ifadesi Şekil 5.2'deki gibidir.



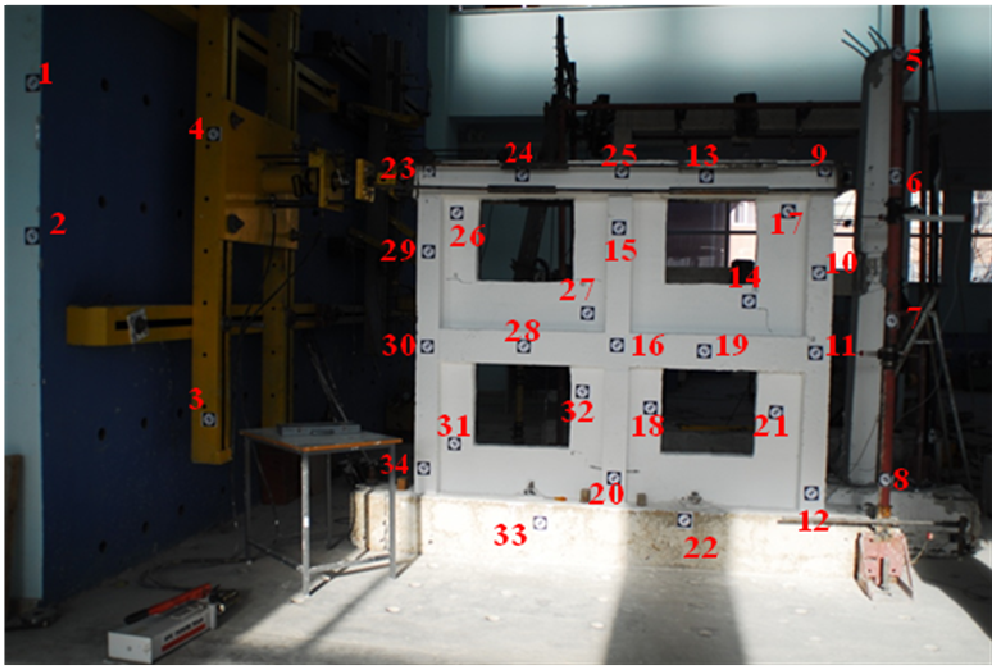
Şekil 5.2 Molodensky-Badekas modelinin geometrik gösterimi (Kutoğlu 2001)

6 UYGULAMA

6.1 Uygulama Alanı Tanıtımı

Yersel lazer tarayıcılarının deformasyon ölçmelerinde kullanılabilirliğinin araştırılmasında, Selçuk Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Deprem Laboratuarında bulunan yükleme duvarı üzerine yerleştirilen farklı tipteki 2 adet "iki boyutlu betonarme çerçeve numune" (Numune I ve Numune II) üzerinde yapılan 1. periyod ve 2. periyod'a ait klasik yöntemle ve yersel lazer tarayıcılar ile yapılan ölçüler kullanılmıştır.

Numune I için yükleme duvarı üzerinde ve betonarme çerçeve dışında olmak üzere 8 adet referans noktası, betonarme çerçeve üzerinde 34 adet obje noktası işaretlenmiştir (Şekil 6.1, Şekil 6.2).

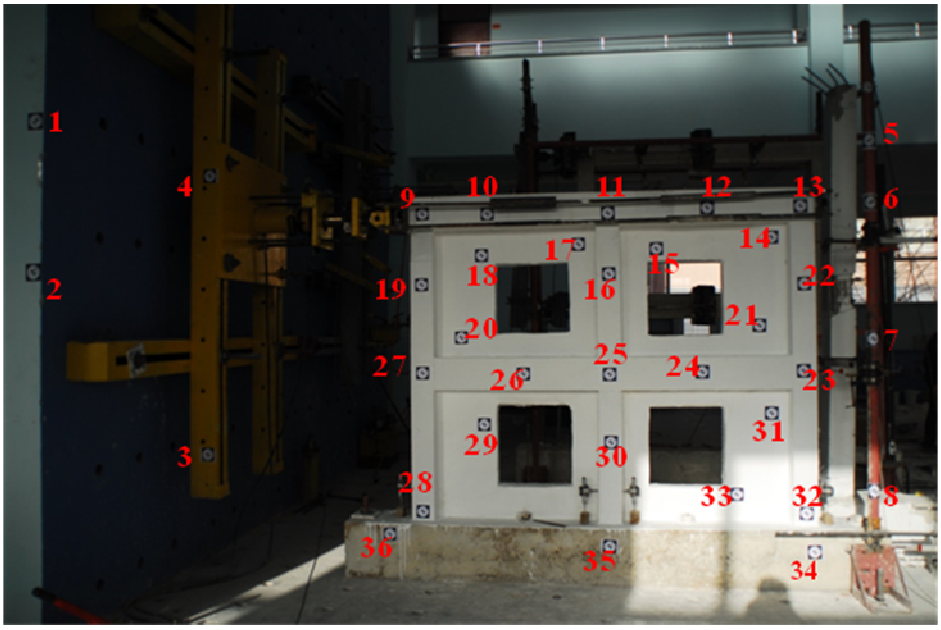


Şekil 6.1. Numune I (1. periyod)



Şekil 6.2 Numune I (2. periyod)

Numune II için yükleme duvarı üzerinde ve betonarme çerçeve dışında olmak üzere 8 adet referans noktası, betonarme çerçeve üzerinde 36 adet obje noktası işaretlenmiştir (Şekil 6.3, Şekil 6.4).



Şekil 6.3 Numune II (1. periyod)



Şekil 6.4 Numune II (2. periyod)

6.2 Uygulamada Kullanılan Donanımlar

Bu çalışmada, yükleme duvarı ve numune üzerindeki referans ve obje noktalarının üç boyutlu koordinatlarının klasik yöntemle belirlenmesinde reflektörsüz ölçüm yapabilen Topcon GPT 3007 elektronik takeometre aleti kullanılmıştır (Şekil 6.5). Benzer şekilde, referans ve obje noktalarının üç boyutlu koordinatlarının yersel lazer tekniği ile belirlemesinde OPTECH Firmasının ürettiği ILRIS-3D yersel lazer tarayıcısı kullanılmıştır.



Şekil 6.5 Topcon GPT 3007(URL 5)

Tablo 6.1 Topcon GPT 3007 teknik özellikleri(URL 5)

Dürbün	
Uzunluk	150mm
Objektif Merceği	45mm(EDM 50mm)
Büyütme	30x
Görüş Alanı	$1^{0}30'$
Ayırma Gücü	2.8”
Minimum Odak	1.3m
Prizmasız mesafe ölçmesi	
Ölçü Uzunluğu	Standart mod: 3-120m / Long mode : 30-1200m
Ölçü Doğruluğu	Standart mod: 3-25m ±(10mm) m.s.e
Standart mod >25m	±(3mm+2ppm)m.s.e/
Uzun mod:	±(10mm+10ppm)

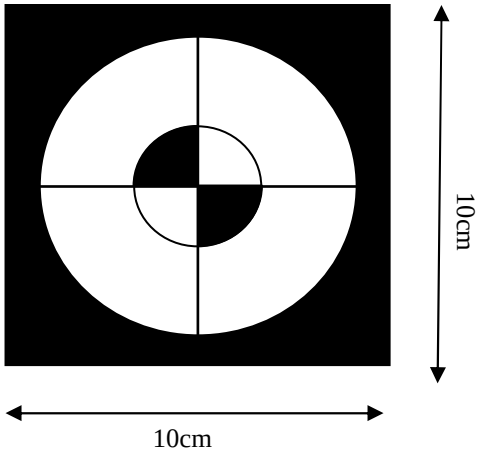
Tablo 6.2 Optech ILRIS-3D teknik özellikleri (Karabörk ve ark. 2009)

Tarama Hızı (nokta / saniye)	2500
Işın Açıklığı	0.00974^{o}
Minimum nokta aralığı (X ve Y yönünde)	0.00115^{o}
Uzunluk Doğruluğu	7mm@ 100m
Konum Doğruluğu	8mm@ 100m
Lazer Dalga Boyu	1500 nanometre
Digital Kamera	Bütünleşik yüksek çözünürlüklü kamera Opsiyonel dış kamera
Görüş Alanı	40^{0} x 40^{0}



Şekil 6.6 Optech ILRIS-3D

Bu çalışmada, referans ve obje noktalarının işaretlenmesinde 10x10cm boyutlu bir kağıt üzerine çizilmiş 9cm çaplı daire kesitli hedef levhaları kullanılmıştır(Şekil 6.7).

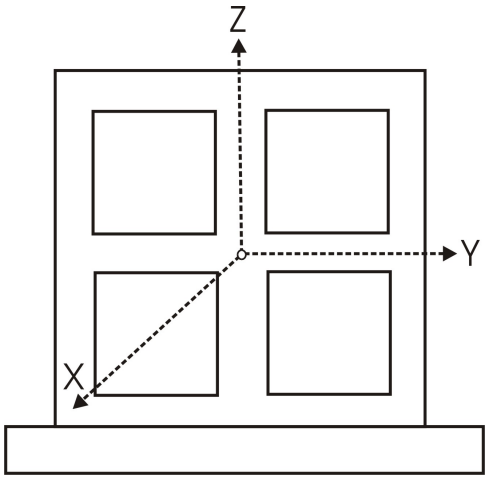


Şekil 6.7 Hedef levhası

6.3 Ölçme Çalışmaları ve Ölçülerin Değerlendirilmesi

Ölçme yapılacak alanda öncelikle ölçme aletlerinin üzerine kurulacağı istasyon noktasının yerinin seçimi, farklı zamanlarda yapmış olduğumuz ölçümlerin aynı koordinat sistemine dönüştürülmesi için oldukça önemlidir. Bu amaçla, referans ve obje noktalarının tamamını görecek ve numuneyi ortalayacak şekilde yaklaşık 8.0m uzaklıkta bir istasyon noktası belirlenmiştir.

Yapılan ölçümlerde koordinat eksenleri olarak, gözleme doğrultusu “X”ekseni, buna yatayda dik olan doğrultu “Y” ekseni ve bu eksenlere düşeyde dik olan doğrultu ise “Z” ekseni seçilmiştir (Şekil 6.8).



Şekil 6.8 Koordinat eksenleri

1. Periyod ölçmelerinde, ilk olarak, elektronik takeometre aleti istasyon noktasına kurularak, tüm referans ve obje noktalarının üç boyutlu koordinatları, elektronik takeometre ile belirlenmiş ve kayıt ünitesinde depolanmıştır (Tablo 6.3). Daha sonra, aynı istasyon noktasına ILRIS-3D yersel lazer tarayıcısı kurulmuştur. Yersel lazer tarayıcı ile tarama yapılmadan önce tarama tarayıcının el ünitesi yardımıyla tarama çözünürlüğü, tarama mesafesi değerleri girilmiş ve tarama alanı seçilmiştir. Bu çalışmada, tarama çözünürlüğü 2mm olarak seçilmiştir. İstasyon noktasına kurulan yersel lazer tarayıcı ile numuneler taranarak, nesne yüzeyini yansıtan nokta bulutları elde edilmiştir. Daha sonra, numune üzerine düşey ve yatay yönde kuvvet uygulanarak numune kırılmıştır. Numune kırıldığında, doğal olarak numune üzerindeki obje noktalarında da deformasyonlar oluşmuştur. Deformasyona uğrayan numune üzerinde II. Periyod ölçmelerine geçilmiştir.

2. Periyod ölçmelerinde ise, 1. Periyod ölçmelerinde olduğu gibi önce tüm referans ve obje noktalarının üç boyutlu koordinatları elektronik takeometre aleti daha sonra da yersel lazer tarayıcı ile nesne yüzeyini yansıtan nokta bulutları elde edilmiştir.



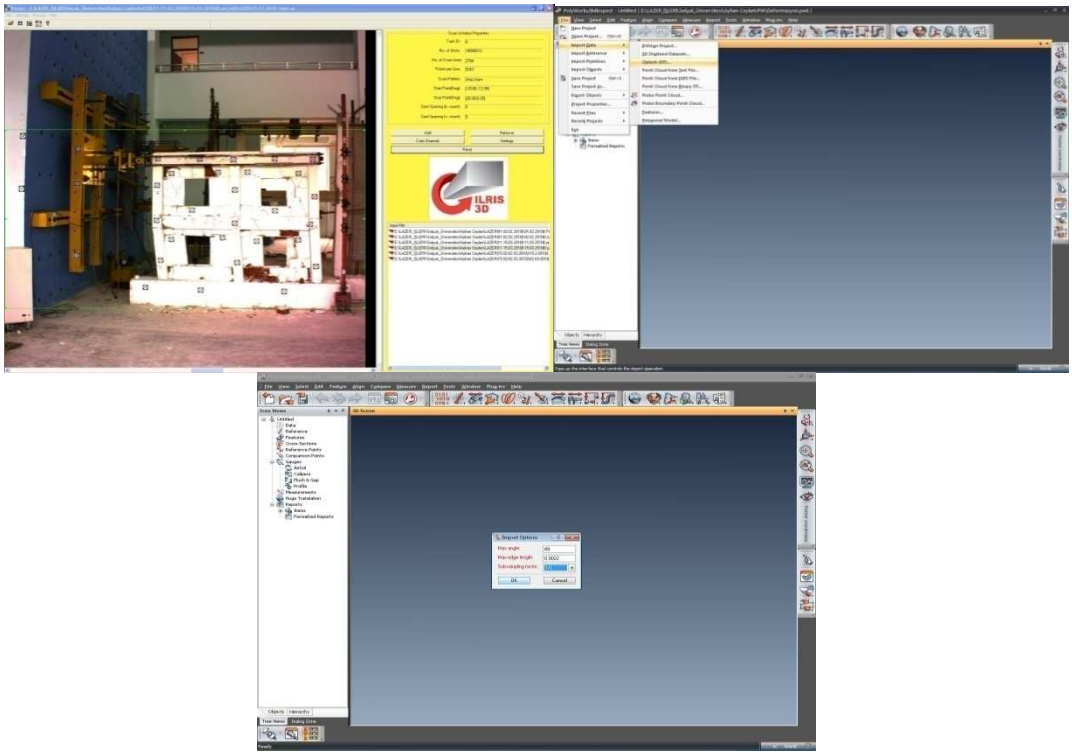
Şekil 6.9 Ölçüm esnasından bir görüntü

Elektronik takeometre ile 1. ve 2. Periyod ölçmeleri sonucunda elde edilen referans ve obje noktalarına ait üç boyutlu koordinatlar, aletin hafıza kartından bilgisayara aktarılmıştır.

ILRIS-3D yersel lazer tarayıcısı ile 1. ve 2 Periyod ölçmeleri sonucunda elde edilen nokta bulutlarının değerlendirilmesi Polyworks yazılımında yapılmıştır. Değerlendirme işlemleri aşağıdaki sırada yapılmıştır.

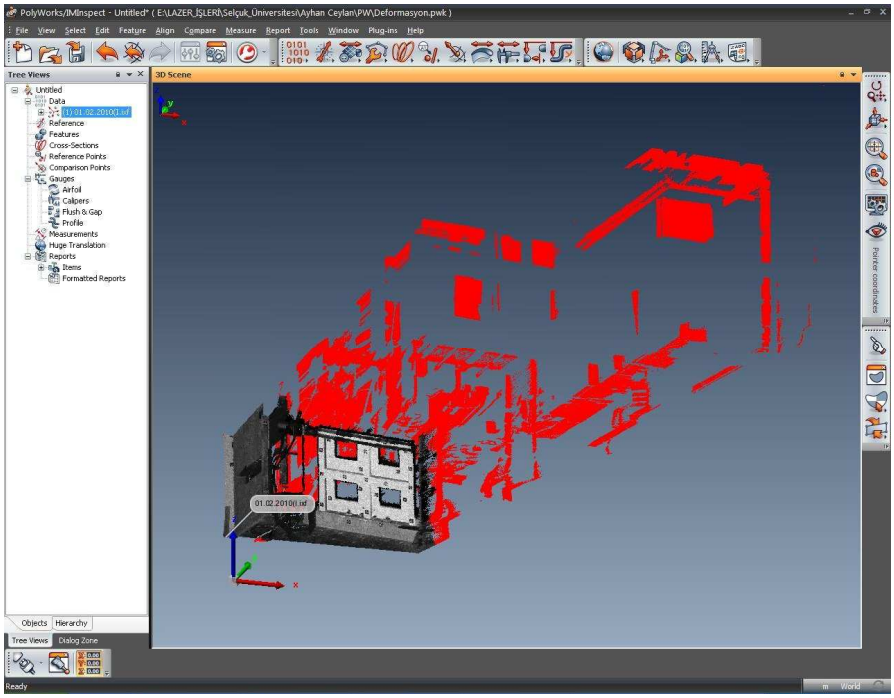
1. Tarama ile elde edilen nokta bulutları Parser programında IXF formatına dönüştürülerek polyworks yazılımında açılmıştır(Şekil 6.10).

2. Parser programında IXF formatına dönüştürülen taramaların özellikleri bir klasör içine atılır. Buradan taramanın ne zaman yapıldığı, kaç nokta tarandığı, x ve y yönündeki doğruluklar görülebilir(Şekil 6.10).



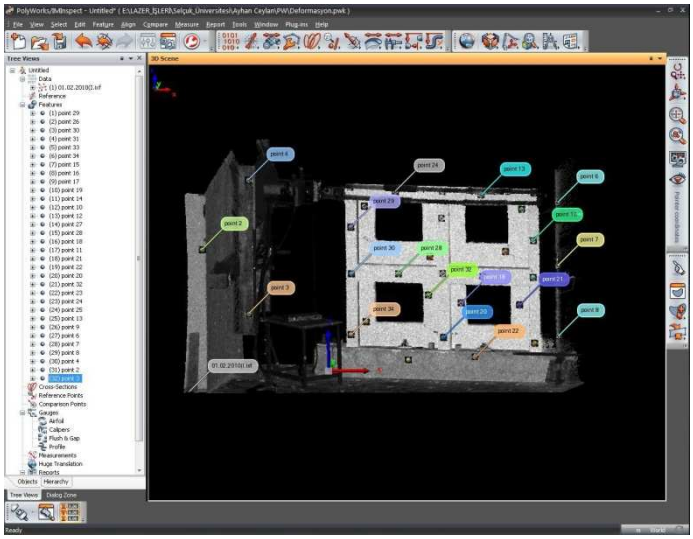
Şekil 6.10 Yazılıma ait görüntüler

3. Dosyaya kaydedilen nokta bulutlarının düzenli hale getirilmesi gerekir. Çünkü olası nesne yüzeyini temsil etmeyen noktalarda kaydedilmektedir. Bunlar taranan nesnenin arka planından kaynaklanan yansımalar, nesnenin kenarlarından kaynaklanan yansımalar, ışının çoklu yansımaları, taranan nesnenin farklı yansıtmasından kaynaklanan yansımalar şeklinde nesne yüzeyini temsil etmeyen hatalı noktalarda kayıt edilmektedir. Bu hatalı nokta kümelerinin silinmesi gerekir. 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 silinmiştir (Şekil 6.11).



Şekil 6.11 Nokta bulutlarının temizlenmesi

4. Daha sonra temizlenmiş görüntü üzerindeki hedefler elle tek tek seçilerek üç boyutlu koordinatlar elde edilmiştir. Yazdırılan bu koordinatlar txt olarak dosya içine saklanmıştır (Şekil 6.12).



Şekil 6.12 Noktaların koordinatlandırılması

Tablo 6.3 Elektronik Takeometre ile elde edilen koordinatlar (Numune I)

NOKTA	**1.Periyod**			**2.Periyod**		
NO	**Y**	**X**	**Z**	**Y**	**X**	**Z**
1	**997.280**	**1005.111**	**102.525**	**997.556**	**1003.450**	**102.507**
2	**997.276**	**1005.112**	**101.818**	**997.555**	**1003.446**	**101.799**
3	**997.665**	**1006.150**	**100.839**	**997.747**	**1004.537**	**100.821**
4	**997.682**	**1006.155**	**102.482**	**997.760**	**1004.545**	**102.464**
5	**1001.471**	**1006.247**	**102.915**	**1001.473**	**1005.337**	**102.896**
6	**1001.472**	**1006.244**	**102.253**	**1001.472**	**1005.332**	**102.233**
7	**1001.470**	**1006.237**	**101.479**	**1001.472**	**1005.327**	**101.459**
8	**1001.472**	**1006.229**	**100.615**	**1001.474**	**1005.316**	**100.595**
9	1001.154	1006.488	102.325	1001.225	1005.516	102.309
10	1001.135	1006.484	101.739	1001.172	1005.507	101.719
11	1001.130	1006.484	101.283	1001.132	1005.507	101.264
12	1001.139	1006.488	100.471	1001.103	1005.511	100.452
13	1000.491	1006.514	102.286	1000.569	1005.423	102.272
14	1000.768	1006.617	101.572	1000.764	1005.572	101.555
15	999.997	1006.533	101.984	1000.058	1005.346	101.968
16	1000.000	1006.543	101.300	1000.000	1005.356	101.282
18	1000.209	1006.637	100.925	1000.179	1005.486	100.905
19	1000.502	1006.512	101.278	1000.499	1005.415	101.260
20	1000.001	1006.547	100.511	999.975	1005.355	100.492
21	1000.939	1006.591	100.923	1000.902	1005.573	100.904
22	1000.410	1006.425	100.303	1000.395	1005.319	100.282
23	998.854	1006.607	102.330	998.941	1005.211	102.317
24	999.425	1006.568	102.297	999.510	1005.281	102.285
25	1000.009	1006.542	102.314	1000.089	1005.364	102.303
27	999.823	1006.671	101.483	999.809	1005.432	101.473
28	999.450	1006.567	101.282	999.455	1005.278	101.263
29	998.861	1006.600	101.840	998.914	1005.209	101.823
30	998.861	1006.605	101.266	998.864	1005.205	101.247
31	999.018	1006.699	100.661	998.980	1005.327	100.641
32	999.801	1006.646	101.012	999.776	1005.418	100.991
33	999.574	1006.471	100.242	999.565	1005.206	100.222
34	998.845	1006.604	100.517	998.825	1005.199	100.499

Tablo 6.4 Yersel lazer tarayıcı ile elde edilen koordinatlar (Numune I)

NOKTA	**1. Periyod**			**2. Periyod**		
NO	**Y**	**X**	**Z**	**Y**	**X**	**Z**
2	**-2.009**	**5.989**	**0.522**	**-1.991**	**5.605**	**0.505**
3	**-1.526**	**7.019**	**-0.433**	**-1.599**	**6.652**	**-0.452**
4	**-1.516**	**6.987**	**1.219**	**-1.592**	**6.638**	**1.193**
6	**2.273**	**6.749**	**0.994**	**2.203**	**6.720**	**0.978**
7	**2.270**	**6.753**	**0.215**	**2.204**	**6.747**	**0.198**
8	**2.267**	**6.752**	**-0.653**	**2.208**	**6.743**	**-0.666**
9	**1.971**	**6.995**	**1.071**	**1.993**	**6.955**	**1.055**
10	1.952	7.011	0.482	1.940	6.964	0.463
11	1.948	7.020	0.025	1.900	6.972	0.011
12	1.957	7.032	-0.789	1.875	6.999	-0.805
13	1.315	7.079	1.031	1.330	6.982	1.014
14	1.600	7.176	0.318	1.551	7.103	0.304
15	0.824	7.158	0.730	0.814	6.992	0.708
16	0.830	7.186	0.043	0.763	7.046	0.025
18	1.048	7.264	-0.332	0.961	7.134	-0.349
19	1.330	7.117	0.022	1.263	7.008	0.003
20	0.831	7.185	-0.750	0.739	7.049	-0.768
21	1.767	7.140	-0.333	1.688	7.084	-0.347
22	1.230	7.050	-0.962	1.142	6.929	-0.977
23	-0.307	7.327	1.078	-0.304	7.084	1.058
24	0.258	7.243	1.044	0.260	7.041	1.025
25	0.837	7.170	1.062	0.849	6.993	1.046
27	0.665	7.312	0.229	0.587	7.153	0.219
28	0.286	7.258	0.025	0.211	7.044	0.007
29	-0.299	7.327	0.587	-0.333	7.077	0.559
30	-0.298	7.340	0.009	-0.382	7.099	-0.011
31	-0.131	7.430	-0.595	-0.244	7.203	-0.619
32	0.644	7.311	-0.246	0.554	7.153	-0.263
33	0.402	7.148	-1.021	0.309	6.982	-1.040
34	-0.311	7.359	-0.743	-0.419	7.112	-0.762

Tablo 6.5 Elektronik Takeometre ile elde edilen koordinatlar (Numune II)

NOKTA	**1. Periyod**			**2. Periyod**		
NO	**Y**	**X**	**Z**	**Y**	**X**	**Z**
1	**997.268**	**1005.860**	**102.571**	**997.400**	**1005.015**	**102.535**
2	**997.266**	**1005.857**	**101.864**	**997.398**	**1005.010**	**101.827**
3	**997.648**	**1006.945**	**100.865**	**997.731**	**1006.114**	**100.827**
4	**997.664**	**1006.945**	**102.508**	**997.746**	**1006.117**	**102.471**
5	**1001.453**	**1007.021**	**102.653**	**1001.523**	**1006.367**	**102.617**
6	**1001.453**	**1007.019**	**102.298**	**1001.524**	**1006.365**	**102.262**
7	**1001.454**	**1007.012**	**101.523**	**1001.526**	**1006.353**	**101.487**
8	**1001.454**	**1007.003**	**100.665**	**1001.527**	**1006.347**	**100.629**
9	998.862	1007.382	102.317	998.834	1006.615	102.285
10	999.268	1007.352	102.305	999.241	1006.603	102.274
11	999.998	1007.310	102.294	999.972	1006.592	102.264
12	1000.585	1007.276	102.315	1000.560	1006.579	102.282
13	1001.130	1007.249	102.315	1001.107	1006.575	102.280
14	1000.986	1007.357	102.143	1000.962	1006.676	102.108
15	1000.299	1007.410	102.084	1000.274	1006.704	102.052
16	999.999	1007.299	101.923	999.983	1006.582	101.890
18	999.224	1007.457	102.060	999.200	1006.689	102.026
19	998.857	1007.368	101.874	998.839	1006.606	101.840
20	999.094	1007.469	101.543	999.079	1006.708	101.514
21	1000.911	1007.373	101.606	1000.901	1006.688	101.566
22	1001.143	1007.238	101.852	1001.134	1006.573	101.813
23	1001.136	1007.242	101.335	1001.147	1006.580	101.296
24	1000.545	1007.273	101.330	1000.547	1006.585	101.294
25	1000.000	1007.311	101.317	1000.000	1006.601	101.283
26	999.482	1007.334	101.320	999.482	1006.601	101.286
27	998.861	1007.370	101.325	998.854	1006.607	101.291
28	998.856	1007.374	100.459	998.892	1006.611	100.424
29	999.234	1007.464	100.995	999.240	1006.709	100.958
30	1000.006	1007.301	100.905	1000.021	1006.596	100.870
31	1000.981	1007.369	101.072	1000.993	1006.689	101.036
32	1001.150	1007.239	100.487	1001.191	1006.587	100.449
33	1000.776	1007.384	100.573	1000.807	1006.722	100.528
34	1001.166	1007.137	100.283	1001.212	1006.482	100.245
35	999.989	1007.201	100.297	1000.035	1006.493	100.259
36	998.666	1007.276	100.336	998.708	1006.508	100.299

Tablo 6.6 Yersel lazer tarayıcı ile elde edilen koordinatlar (Numune II)

NOKTA	**1.Periyod**			**2. Periyod**		
NO	**Y**	**X**	**Z**	**Y**	**X**	**Z**
1	**-2.041**	**5.952**	**0.923**	**-2.067**	**6.050**	**1.197**
2	**-2.039**	**5.943**	**0.221**	**-2.068**	**6.065**	**0.492**
3	**-1.600**	**6.980**	**-0.797**	**-1.588**	**7.108**	**-0.495**
4	**-1.591**	**7.012**	**0.850**	**-1.575**	**7.092**	**1.153**
5	**2.189**	**6.895**	**1.006**	**2.198**	**6.837**	**1.293**
6	**2.192**	**6.896**	**0.651**	**2.198**	**6.833**	**0.940**
7	**2.192**	**6.859**	**-0.124**	**2.198**	**6.839**	**0.163**
8	**2.193**	**6.835**	**-0.984**	**2.199**	**6.833**	**-0.696**
9	-0.376	7.394	0.655	-0.431	7.443	0.971
10	0.030	7.324	0.644	-0.031	7.378	0.959
11	0.754	7.252	0.637	0.692	7.264	0.947
12	1.337	7.188	0.660	1.272	7.178	0.966
13	1.879	7.133	0.661	1.811	7.088	0.961
14	1.741	7.239	0.487	1.681	7.219	0.792
15	1.061	7.323	0.425	1.005	7.336	0.737
16	0.755	7.232	0.264	0.701	7.263	0.569
18	-0.010	7.431	0.395	-0.059	7.463	0.711
19	-0.377	7.356	0.211	-0.427	7.433	0.523
20	-0.129	7.416	-0.121	-0.175	7.509	0.199
21	1.667	7.231	-0.051	1.624	7.239	0.251
22	1.891	7.109	0.199	1.838	7.098	0.492
23	1.883	7.096	-0.318	1.851	7.108	-0.024
24	1.299	7.161	-0.329	1.259	7.192	-0.024
25	0.758	7.230	-0.343	0.722	7.277	-0.034
26	0.244	7.278	-0.340	0.208	7.346	-0.030
27	-0.374	7.343	-0.339	-0.412	7.437	-0.024
28	-0.375	7.339	-1.209	-0.370	7.429	-0.893
29	0.005	7.403	-0.669	-0.015	7.497	-0.356
30	0.765	7.218	-0.755	0.743	7.286	-0.448
31	1.737	7.219	-0.585	1.711	7.226	-0.283
32	1.903	7.069	-1.167	1.894	7.105	-0.872
33	1.537	7.246	-1.088	1.530	7.304	-0.792
34	1.915	6.975	-1.370	1.902	6.997	-1.078
35	0.744	7.099	-1.363	0.741	7.181	-1.063
36	-0.569	7.241	-1.329	-0.567	7.364	-1.020

6.4 Koordinat Dönüşümleri

Elektronik Takeometre ve yersel lazer tarayıcılar ile yapılan ölçme ve değerlendirmeler sonucunda elde edilen üç boyutlu koordinatlar Molodensky–Badekas yöntemiyle referans noktalarından yararlanılarak üç boyutlu benzerlik dönüşümü yapılarak referans ve obje noktalarına ait koordinatlar elde edilmiştir.

Üç boyutlu koordinat dönüşümü sonucu elde edilen dönüşmüş koordinatlar ve dönüşümün ortalama hatası (m_o) verilmiştir.

Tablo 6.7 Elektronik Takeometre ile elde edilen dönüştürülmüş koordinatlar (Numune I)

Nokta	**1.Periyod**			**2.Periyod**			**DÖNÜŞMÜŞ KOORDİNATLAR**		
No	**Y**	**X**	**Z**	**Y**	**X**	**Z**	**Y**	**X**	**Z**
1	997.280	1005.111	102.525	997.556	1003.450	102.507	**997.274**	**1005.113**	**102.516**
2	997.276	1005.112	101.818	997.555	1003.446	101.799	**997.273**	**1005.109**	**101.819**
3	997.665	1006.150	100.839	997.747	1004.537	100.821	**997.662**	**1006.147**	**100.856**
4	997.682	1006.155	102.482	997.760	1004.545	102.464	**997.676**	**1006.153**	**102.473**
5	1001.471	1006.247	102.915	1001.473	1005.337	102.896	**1001.477**	**1006.250**	**102.898**
6	1001.472	1006.244	102.253	1001.472	1005.332	102.233	**1001.476**	**1006.245**	**102.246**
7	1001.470	1006.237	101.479	1001.472	1005.327	101.459	**1001.475**	**1006.240**	**101.484**
8	1001.472	1006.229	100.615	1001.474	1005.316	100.595	**1001.475**	**1006.228**	**100.633**
9	1001.154	1006.488	102.325	1001.225	1005.516	102.309	1001.266	1006.472	102.321
10	1001.135	1006.484	101.739	1001.172	1005.507	101.719	1001.213	1006.472	101.740
11	1001.130	1006.484	101.283	1001.132	1005.507	101.264	1001.173	1006.479	101.292
12	1001.139	1006.488	100.471	1001.103	1005.511	100.452	1001.145	1006.488	100.492
13	1000.491	1006.514	102.286	1000.569	1005.423	102.272	1000.603	1006.501	102.284
14	1000.768	1006.617	101.572	1000.764	1005.572	101.555	1000.823	1006.611	101.578
15	999.997	1006.533	101.984	1000.058	1005.346	101.968	1000.086	1006.519	101.985
16	1000.000	1006.543	101.300	1000.000	1005.356	101.282	1000.031	1006.539	101.309
18	1000.209	1006.637	100.925	1000.179	1005.486	100.905	1000.231	1006.634	100.938
19	1000.502	1006.512	101.278	1000.499	1005.415	101.260	1000.533	1006.505	101.288

20	1000.001	1006.547	100.511	999.975	1005.355	100.492	1000.006	1006.542	100.532
21	1000.939	1006.591	100.923	1000.902	1005.573	100.904	1000.959	1006.586	100.937
22	1000.410	1006.425	100.303	1000.395	1005.319	100.282	1000.413	1006.429	100.325
23	998.854	1006.607	102.330	998.941	1005.211	102.317	998.962	1006.591	102.328
24	999.425	1006.568	102.297	999.510	1005.281	102.285	999.535	1006.556	102.297
25	1000.009	1006.542	102.314	1000.089	1005.364	102.303	1000.120	1006.531	102.315
27	999.823	1006.671	101.483	999.809	1005.432	101.473	999.857	1006.649	101.497
28	999.450	1006.567	101.282	999.455	1005.278	101.263	999.480	1006.562	101.291
29	998.861	1006.600	101.840	998.914	1005.209	101.823	998.935	1006.594	101.842
30	998.861	1006.605	101.266	998.864	1005.205	101.247	998.885	1006.599	101.275
31	999.018	1006.699	100.661	998.980	1005.327	100.641	999.022	1006.698	100.678
32	999.801	1006.646	101.012	999.776	1005.418	100.991	999.822	1006.641	101.023
33	999.574	1006.471	100.242	999.565	1005.206	100.222	999.575	1006.471	100.266
34	998.845	1006.604	100.517	998.825	1005.199	100.499	998.845	1006.600	100.539
mo=±0.885 cm									
Serbestlik derecesi (24-7)=17									

Tablo 6.8 Yersel lazer tarayıcı ile elde edilen dönüştürülmüş koordinatlar (Numune I)

NOKTA	**1.Periyod**			**2.Periyod**			**DÖNÜŞMÜŞ KOORDİNATLAR**		
NO	**Y**	**X**	**Z**	**Y**	**X**	**Z**	**Y**	**X**	**Z**
2	**-2.009**	**5.989**	**0.522**	**-1.991**	**5.605**	**0.505**	**-2.010**	**5.997**	**0.526**
3	**-1.526**	**7.019**	**-0.433**	**-1.599**	**6.652**	**-0.452**	**-1.528**	**7.006**	**-0.428**
4	**-1.516**	**6.987**	**1.219**	**-1.592**	**6.638**	**1.193**	**-1.519**	**6.991**	**1.212**
6	**2.273**	**6.749**	**0.994**	**2.203**	**6.720**	**0.978**	**2.270**	**6.735**	**0.990**
7	**2.270**	**6.753**	**0.215**	**2.204**	**6.747**	**0.198**	**2.272**	**6.762**	**0.213**
8	**2.267**	**6.752**	**-0.653**	**2.208**	**6.743**	**-0.666**	**2.274**	**6.759**	**-0.649**
9	**1.971**	**6.995**	**1.071**	**1.993**	**6.955**	**1.055**	2.083	6.988	1.068
10	1.952	7.011	0.482	1.940	6.964	0.463	2.029	7.002	0.477
11	1.948	7.020	0.025	1.900	6.972	0.011	1.989	7.014	0.026
12	1.957	7.032	-0.789	1.875	6.999	-0.805	1.964	7.044	-0.787
13	1.315	7.079	1.031	1.330	6.982	1.014	1.424	7.074	1.027
14	1.600	7.176	0.318	1.551	7.103	0.304	1.653	7.175	0.320
15	0.824	7.158	0.730	0.814	6.992	0.708	0.909	7.130	0.723

16	0.830	7.186	0.043	0.763	7.046	0.025	0.862	7.189	0.043
18	1.048	7.264	-0.332	0.961	7.134	-0.349	1.067	7.259	-0.330
19	1.330	7.117	0.022	1.263	7.008	0.003	1.358	7.106	0.020
20	0.831	7.185	-0.750	0.739	7.049	-0.768	0.837	7.195	-0.747
21	1.767	7.140	-0.333	1.688	7.084	-0.347	1.787	7.145	-0.329
22	1.230	7.050	-0.962	1.142	6.929	-0.977	1.227	7.039	-0.957
23	-0.307	7.327	1.078	-0.304	7.084	1.058	-0.196	7.320	1.075
24	0.258	7.243	1.044	0.260	7.041	1.025	0.363	7.227	1.041
25	0.837	7.170	1.062	0.849	6.993	1.046	0.946	7.127	1.060
27	0.665	7.312	0.229	0.587	7.153	0.219	0.697	7.311	0.237
28	0.286	7.258	0.025	0.211	7.044	0.007	0.311	7.235	0.027
29	-0.299	7.327	0.587	-0.333	7.077	0.559	-0.227	7.316	0.578
30	-0.298	7.340	0.009	-0.382	7.099	-0.011	-0.275	7.343	0.009
31	-0.131	7.430	-0.595	-0.244	7.203	-0.619	-0.129	7.435	-0.596
32	0.644	7.311	-0.246	0.554	7.153	-0.263	0.663	7.314	-0.244
33	0.402	7.148	-1.021	0.309	6.982	-1.040	0.402	7.166	-1.018
34	-0.311	7.359	-0.743	-0.419	7.112	-0.762	-0.311	7.360	-0.739
mo=±0.839 cm									
Serbestlik derecesi (18-7)=11									

Tablo 6.9 Elektronik takeometre ile elde edilen dönüştürülmüş koordinatlar (Numune II)

NOKTA	**1.Periyod**			**2.Periyod**			**DÖNÜŞMÜŞ KOORDİNATLAR**		
NO	**Y**	**X**	**Z**	**Y**	**X**	**Z**	**Y**	**X**	**Z**
1	**997.268**	**1005.860**	**102.571**	**997.400**	**1005.015**	**102.535**	**997.268**	**1005.860**	**102.571**
2	**997.266**	**1005.857**	**101.864**	**997.398**	**1005.010**	**101.827**	**997.265**	**1005.856**	**101.863**
3	**997.648**	**1006.945**	**100.865**	**997.731**	**1006.114**	**100.827**	**997.649**	**1006.946**	**100.865**
4	**997.664**	**1006.945**	**102.508**	**997.746**	**1006.117**	**102.471**	**997.665**	**1006.946**	**102.509**
5	**1001.453**	**1007.021**	**102.653**	**1001.523**	**1006.367**	**102.617**	**1001.452**	**1007.022**	**102.653**
6	**1001.453**	**1007.019**	**102.298**	**1001.524**	**1006.365**	**102.262**	**1001.453**	**1007.020**	**102.298**
7	**1001.454**	**1007.012**	**101.523**	**1001.526**	**1006.353**	**101.487**	**1001.454**	**1007.009**	**101.523**
8	**1001.454**	**1007.003**	**100.665**	**1001.527**	**1006.347**	**100.629**	**1001.454**	**1007.004**	**100.665**
9	998.862	1007.382	102.317	998.834	1006.615	102.285	998.775	1007.394	102.323

10	999.268	1007.352	102.305	999.241	1006.603	102.274	999.182	1007.363	102.311
11	999.998	1007.310	102.294	999.972	1006.592	102.264	999.912	1007.318	102.301
12	1000.585	1007.276	102.315	1000.560	1006.579	102.282	1000.499	1007.278	102.319
13	1001.130	1007.249	102.315	1001.107	1006.575	102.280	1001.046	1007.249	102.316
14	1000.986	1007.357	102.143	1000.962	1006.676	102.108	1000.905	1007.357	102.145
15	1000.299	1007.410	102.084	1000.274	1006.704	102.052	1000.219	1007.417	102.089
16	999.999	1007.299	101.923	999.983	1006.582	101.890	999.922	1007.308	101.927
18	999.224	1007.457	102.060	999.200	1006.689	102.026	999.144	1007.451	102.064
19	998.857	1007.368	101.874	998.839	1006.606	101.840	998.780	1007.385	101.878
20	999.094	1007.469	101.543	999.079	1006.708	101.514	999.024	1007.476	101.552
21	1000.911	1007.373	101.606	1000.901	1006.688	101.566	1000.845	1007.373	101.603
22	1001.143	1007.238	101.852	1001.134	1006.573	101.813	1001.073	1007.246	101.849
23	1001.136	1007.242	101.335	1001.147	1006.580	101.296	1001.086	1007.254	101.333
24	1000.545	1007.273	101.330	1000.547	1006.585	101.294	1000.486	1007.286	101.331
25	1000.000	1007.311	101.317	1000.000	1006.601	101.283	999.940	1007.327	101.320
26	999.482	1007.334	101.320	999.482	1006.601	101.286	999.422	1007.351	101.324
27	998.861	1007.370	101.325	998.854	1006.607	101.291	998.794	1007.386	101.329
28	998.856	1007.374	100.459	998.892	1006.611	100.424	998.832	1007.390	100.462
29	999.234	1007.464	100.995	999.240	1006.709	100.958	999.185	1007.471	100.996
30	1000.006	1007.301	100.905	1000.021	1006.596	100.870	999.960	1007.322	100.907
31	1000.981	1007.369	101.072	1000.993	1006.689	101.036	1000.936	1007.370	101.073
32	1001.150	1007.239	100.487	1001.191	1006.587	100.449	1001.129	1007.260	100.486
33	1000.776	1007.384	100.573	1000.807	1006.722	100.528	1000.752	1007.412	100.565
34	1001.166	1007.137	100.283	1001.212	1006.482	100.245	1001.145	1007.154	100.282
35	999.989	1007.201	100.297	1000.035	1006.493	100.259	999.969	1007.219	100.296
36	998.666	1007.276	100.336	998.708	1006.508	100.299	998.643	1007.295	100.337
mo=±0.098 cm									
Serbestlik derecesi (24-7)=17									

Tablo 6.10 Yersel lazer tarayıcı ile elde edilen dönüştürülmüş koordinatlar (Numune II)

NOKTA	**1.Periyod**			**2.Periyod**			**DÖNÜŞMÜŞ KOORDİNATLAR**		
NO	**Y**	**X**	**Z**	**Y**	**X**	**Z**	**Y**	**X**	**Z**
1	**-2.041**	**5.952**	**0.923**	**-2.067**	**6.050**	**1.197**	**-2.042**	**5.953**	**0.925**
2	**-2.039**	**5.943**	**0.221**	**-2.068**	**6.065**	**0.492**	**-2.042**	**5.946**	**0.219**
3	**-1.600**	**6.980**	**-0.797**	**-1.588**	**7.108**	**-0.495**	**-1.599**	**6.976**	**-0.797**
4	**-1.591**	**7.012**	**0.850**	**-1.575**	**7.092**	**1.153**	**-1.588**	**7.011**	**0.849**
5	**2.189**	**6.895**	**1.006**	**2.198**	**6.837**	**1.293**	**2.189**	**6.899**	**1.004**
6	**2.192**	**6.896**	**0.651**	**2.198**	**6.833**	**0.940**	**2.191**	**6.885**	**0.652**
7	**2.192**	**6.859**	**-0.124**	**2.198**	**6.839**	**0.163**	**2.192**	**6.867**	**-0.125**
8	**2.193**	**6.835**	**-0.984**	**2.199**	**6.833**	**-0.696**	**2.194**	**6.835**	**-0.982**
9	-0.376	7.394	0.655	-0.431	7.443	0.971	-0.458	7.398	0.658
10	0.030	7.324	0.644	-0.031	7.378	0.959	-0.056	7.347	0.649
11	0.754	7.252	0.637	0.692	7.264	0.947	0.669	7.260	0.642
12	1.337	7.188	0.660	1.272	7.178	0.966	1.252	7.196	0.665
13	1.879	7.133	0.661	1.811	7.088	0.961	1.794	7.126	0.664
14	1.741	7.239	0.487	1.681	7.219	0.792	1.660	7.246	0.490
15	1.061	7.323	0.425	1.005	7.336	0.737	0.980	7.337	0.431
16	0.755	7.232	0.264	0.701	7.263	0.569	0.680	7.247	0.265
18	-0.010	7.431	0.395	-0.059	7.463	0.711	-0.087	7.424	0.399
19	-0.377	7.356	0.211	-0.427	7.433	0.523	-0.453	7.374	0.211
20	-0.129	7.416	-0.121	-0.175	7.509	0.199	-0.204	7.450	-0.113
21	1.667	7.231	-0.051	1.624	7.239	0.251	1.603	7.248	-0.051
22	1.891	7.109	0.199	1.838	7.098	0.492	1.822	7.122	0.195
23	1.883	7.096	-0.318	1.851	7.108	-0.024	1.835	7.116	-0.320
24	1.299	7.161	-0.329	1.259	7.192	-0.024	1.241	7.179	-0.323
25	0.758	7.230	-0.343	0.722	7.277	-0.034	0.701	7.244	-0.337
26	0.244	7.278	-0.340	0.208	7.346	-0.030	0.185	7.294	-0.336
27	-0.374	7.343	-0.339	-0.412	7.437	-0.024	-0.437	7.362	-0.335
28	-0.375	7.339	-1.209	-0.370	7.429	-0.893	-0.393	7.32	-1.202
29	0.005	7.403	-0.669	-0.015	7.497	-0.356	-0.042	7.427	-0.667
30	0.765	7.218	-0.755	0.743	7.286	-0.448	0.722	7.241	-0.751
31	1.737	7.219	-0.585	1.711	7.226	-0.283	1.691	7.222	-0.583

32	1.903	7.069	-1.167	1.894	7.105	-0.872	1.879	7.090	-1.167
33	1.537	7.246	-1.088	1.530	7.304	-0.792	1.509	7.277	-1.094
34	1.915	6.975	-1.370	1.902	6.997	-1.078	1.892	6.975	-1.369
35	0.744	7.099	-1.363	0.741	7.181	-1.063	0.725	7.117	-1.362
36	-0.569	7.241	-1.329	-0.567	7.364	-1.020	-0.587	7.253	-1.328
mo=±0.389 cm									
Serbestlik derecesi (24-7)=17									

6.5 Deformasyon Analizi

Geleneksel çözüm yöntemlerinde üç farklı yaklaşım kullanılmaktadır. Bu yaklaşımlar Baarda, Tau ve t (student) testidir. Bu yöntemlerin üçü de aynı ilkelere göre çözüm yapmaktadır, farklılıkları ise çözümde kullandıkları varyans değerleri ve bu değerlere bağlı olarak ölçülerin dağılım tablolarıdır. Bu çözüm yöntemlerinin içinde istatistiksel olarak en güvenilir olanı t (student) testidir.

2. Periyod ölçmelerinden elde edilen koordinatlar (Y_2, X_2, Z_2) , 1. Periyod ölçmelerinden elde edilen koordinatlar (Y_1, X_1, Z_1) ve iki periyod ölçmeleri sonucu elde edilen koordinatların farkları (ΔY, ΔX, ΔZ), üç boyutlu koordinat dönüşümüne ait ortalama hata (m_0) kullanılarak, t-testi (student) uygulanmıştır.

Test sonucu bulunan "t_{test}" değeri, serbestlik derecesine göre (f= n-u) "t" tablo değerinden bulunan değerden büyük ise bu noktalar uyuşumsuz ölçü kabul edilir ve bu noktalarda "deformasyon olmuştur" diyebiliriz.

Deformasyon tespit edilen noktalar tablolar üzerinde koyu renkle (bold) belirtilmiştir (Tablo 6.11, Tablo 6.12, Tablo 6.13, Tablo 6.14).

Tablo 6.11 Elektronik takeometre ölçümündeki koordinat farkları (Numune I)

NOKTA	**Koordinat Farkları**			**Koordinat Farkları / m_0**			**ΔS(cm)**	**(α)**
NO	**ΔY**	**ΔX**	**ΔZ**	**ΔY / m_0**	**ΔX / m_0**	**ΔZ / m_0**		
9	**0.112**	-0.016	-0.004	**12.699**	-1.852	-0.507	**11.32**	**102^{g}5419**
10	**0.078**	-0.012	0.001	**8.767**	-1.333	0.075	**7.89**	**99^{g}4503**
11	**0.043**	-0.005	0.009	**4.886**	-0.527	0.987	**4.42**	**87^{g}3032**
12	0.006	0.000	**0.021**	0.731	0.021	**2.412**	**2.18**	**18^{g}7323**
13	**0.112**	-0.013	-0.002	**12.709**	-1.503	-0.216	**11.28**	**101^{g}0809**
14	**0.055**	-0.006	0.006	**6.203**	-0.661	0.696	**5.57**	**92^{g}8866**
15	**0.089**	-0.014	0.001	**10.087**	-1.612	0.093	**9.01**	**99^{g}4152**
16	**0.031**	-0.004	0.009	**3.508**	-0.463	1.070	**3.25**	**81^{g}1541**
18	**0.022**	-0.003	0.013	**2.508**	-0.366	1.499	**2.57**	**65^{g}7013**
19	**0.031**	-0.007	0.010	**3.519**	-0.769	1.108	**3.33**	**80^{g}5770**
20	0.005	-0.005	**0.021**	0.598	-0.552	**2.343**	**2.22**	**15^{g}9276**
21	**0.020**	-0.005	0.014	**2.256**	-0.516	1.614	**2.49**	**60^{g}4594**
22	0.003	0.004	**0.022**	0.358	0.487	**2.492**	**2.26**	**9^{g}0903**
23	**0.108**	-0.016	-0.002	**12.177**	-1.756	-0.181	**10.92**	**100^{g}9450**
24	**0.110**	-0.012	0.000	**12.407**	-1.389	-0.012	**11.07**	**100^{g}0637**
25	**0.111**	-0.011	0.001	**12.551**	-1.252	0.068	**11.15**	**99^{g}6504**
27	**0.034**	**-0.022**	0.014	**3.841**	**-2.492**	1.633	**4.28**	**74^{g}4093**
28	**0.030**	-0.005	0.009	**3.409**	-0.525	0.991	**3.17**	**81^{g}9906**
29	**0.074**	-0.006	0.002	**8.344**	-0.654	0.234	**7.43**	**98^{g}2160**
30	**0.024**	-0.006	0.009	**2.704**	-0.657	1.019	**2.63**	**77^{g}0521**
31	0.004	-0.001	0.017	0.406	-0.154	1.964	**1.75**	**13^{g}0027**
32	**0.021**	-0.005	0.011	**2.367**	-0.566	1.236	**2.42**	**69^{g}3629**
33	0.001	0.000	**0.024**	0.144	-0.032	**2.711**	**2.40**	**3^{g}3935**
34	0.000	-0.004	**0.022**	0.053	-0.444	**2.445**	**2.24**	**1^{g}3824**
	mo = ±0. 885 cm							
	Serbestlik derecesi (f) = 17							
	t test değeri = 2.11 (%95)							

Tablo 6.12 Yersel lazer tarayıcı ölçümündeki koordinat farkları (Numune I)

NOKTA	**Koordinat Farkları**			**Koordinat Farkları / m_0**			**ΔS (cm)**	**(α)**
NO	**ΔY**	**ΔX**	**ΔZ**	**ΔY / m_0**	**ΔX / m_0**	**ΔZ / m_0**		
9	**0.112**	-0.007	-0.003	**13.361**	-0.821	-0.413	**11.23**	**101^{g}7048**
10	**0.077**	-0.009	-0.005	**9.236**	-1.059	-0.574	**7.78**	**104^{g}1281**
11	**0.041**	-0.006	0.001	**4.853**	-0.712	0.175	**4.14**	**98^{g}4475**
12	0.008	0.012	0.002	0.915	1.431	0.208	**1.46**	**82^{g}2828**
13	**0.109**	-0.005	-0.003	**13.028**	-0.624	-0.412	**10.92**	**102^{g}3351**
14	**0.053**	-0.001	0.002	**6.339**	-0.139	0.192	**5.30**	**97^{g}5988**
15	**0.085**	**-0.028**	-0.006	**10.128**	**-3.319**	-0.738	**8.97**	**105^{g}2309**
16	**0.032**	0.003	-0.001	**3.783**	0.355	-0.076	**3.22**	**100^{g}0001**
18	**0.019**	-0.006	0.001	**2.255**	-0.658	0.137	**1.99**	**93^{g}3233**
19	**0.027**	-0.010	-0.002	**3.235**	-1.246	-0.204	**2.89**	**104^{g}5395**
20	0.006	0.010	0.003	0.695	1.132	0.307	**1.20**	**70^{g}4832**
21	**0.020**	0.004	0.004	**2.349**	0.486	0.424	**2.08**	**87^{g}4334**
22	-0.003	-0.011	0.005	-0.351	-1.325	0.627	**1.24**	**365^{g}5958**
23	**0.111**	-0.007	-0.003	**13.276**	-0.784	-0.348	**11.13**	**101^{g}7201**
24	**0.105**	-0.016	-0.003	**12.470**	-1.895	-0.347	**10.63**	**101^{g}8184**
25	**0.109**	**-0.043**	-0.002	**12.973**	**-5.065**	-0.199	**11.72**	**101^{g}1679**
27	**0.032**	-0.001	0.008	**3.761**	-0.087	0.995	**3.30**	**84^{g}4041**
28	**0.025**	**-0.022**	0.001	**3.003**	**-2.651**	0.162	**3.33**	**94^{g}9178**
29	**0.072**	-0.011	-0.009	**8.639**	-1.312	-1.089	**7.34**	**107^{g}9166**
30	**0.023**	0.003	0.000	**2.737**	0.354	0.058	**2.32**	**100^{g}0001**
31	0.002	0.005	-0.001	0.231	0.590	-0.156	**0.55**	**129^{g}5167**
32	**0.019**	0.003	0.002	**2.320**	0.321	0.221	**1.93**	**93^{g}3233**
33	0.000	0.018	0.003	0.039	2.124	0.362	**1.82**	**0^{g}0001**
34	0.000	0.000	0.003	-0.053	0.053	0.414	**0.30**	**0^{g}0001**

mo = ±0.839cm
Serbestlik derecesi (f) =11
t test değeri = 2.20 (%95)

Tablo 6.13 Elektronik takeometre ölçümündeki koordinat farkları (Numune II)

NOKTA	**Koordinat Farkları**			**Koordinat Farkları / m_0**			**ΔS (cm)**	**(α)**
NO	**ΔY**	**ΔX**	**ΔZ**	**ΔY / m_0**	**ΔX / m_0**	**ΔZ / m_0**		
9	**-0.086**	**0.011**	**0.006**	**-88.206**	**11.496**	**5.826**	**8.69**	**304^{g}1852**
10	**-0.086**	**0.011**	**0.006**	**-87.885**	**11.186**	**6.592**	**8.69**	**304^{g}7511**
11	**-0.086**	**0.008**	**0.007**	**-87.678**	**8.507**	**7.173**	**8.67**	**305^{g}1882**
12	**-0.086**	0.002	**0.004**	**-87.741**	1.877	**3.755**	**8.61**	**302^{g}7291**
13	**-0.084**	0.000	0.001	**-85.867**	-0.398	1.387	**8.40**	**301^{g}0292**
14	-0.080	0.000	0.002	**-81.915**	0.240	1.653	**8.00**	**301^{g}2806**
15	**-0.080**	**0.007**	**0.005**	**-82.109**	**6.666**	**5.163**	**8.05**	**304^{g}0162**
16	**-0.077**	**0.010**	**0.004**	**-78.162**	**9.903**	**4.183**	**7.77**	**303^{g}3980**
18	**-0.079**	**-0.006**	**0.004**	**-80.911**	**-6.430**	**3.734**	**7.93**	**302^{g}9265**
19	**-0.077**	**0.017**	**0.004**	**-79.068**	**17.403**	**3.877**	**7.90**	**303^{g}1230**
20	**-0.070**	**0.008**	**0.009**	**-71.034**	**7.898**	**9.061**	**7.10**	**308^{g}0387**
21	**-0.067**	-0.001	**-0.003**	**-68.123**	-0.642	**-3.265**	**6.71**	**296^{g}9283**
22	**-0.071**	**0.009**	**-0.003**	**-72.121**	**8.698**	**-2.602**	**7.16**	**297^{g}6973**
23	**-0.050**	**0.011**	**-0.002**	**-51.343**	**11.484**	**-2.479**	**5.12**	**296^{g}9359**
24	**-0.059**	**0.013**	0.001	**-60.327**	**12.972**	0.938	**6.04**	**300^{g}9912**
25	**-0.060**	**0.017**	**0.003**	**-61.449**	**17.099**	**3.326**	**6.04**	**303^{g}4429**
26	**-0.060**	**0.017**	**0.004**	**-61.230**	**17.802**	**3.632**	**6.25**	**303^{g}7665**
27	**-0.066**	**0.016**	**0.004**	**-67.592**	**16.004**	**4,000**	**6.80**	**303^{g}7388**
28	**-0.024**	**0.015**	**0.003**	**-24.664**	**15.587**	**3.173**	**2.85**	**308^{g}2072**
29	**-0.049**	**0.007**	0.001	**-50.273**	**7.172**	0.938	**4.95**	**301^{g}1888**
30	**-0.046**	**0.021**	**0.002**	**-47.088**	**21.059**	**2.387**	**5.06**	**303^{g}2575**
31	**-0.044**	0.001	0.001	**-45.262**	1.224	0.887	**4.40**	**301^{g}2433**
32	**-0.021**	**0.021**	-0.001	**-21.502**	**21.454**	-1.265	**2.97**	**296^{g}1762**
33	**-0.025**	**0.028**	**-0.008**	**-25.095**	**28.552**	**-8.020**	**3.84**	**280^{g}0612**
34	**-0.020**	**0.017**	-0.001	**-20.733**	**17.007**	-1.377	**2.63**	**295^{g}8278**
35	**-0.020**	**0.018**	-0.001	**-20.564**	**18.798**	-0.683	**2.69**	**297^{g}8444**
36	**-0.023**	**0.019**	0.001	**-23.063**	**19.149**	1.122	**2.98**	**303^{g}0744**
	mo =± 0.098 cm							
	Serbestlik derecesi (f) =17							
	t test değeri = 2.11 (%95)							

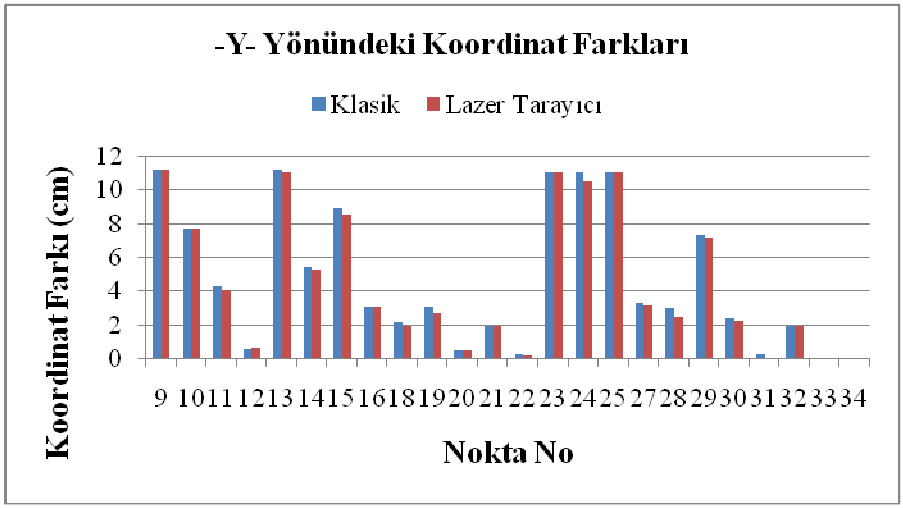
Tablo 6.14 Yersel lazer tarayıcı ölçümündeki koordinat farkları (Numune II)

NOKTA	**Koordinat Farkları**			**Koordinat Farkları / m_0**			**ΔS (cm)**	**(α)**
NO	**ΔY**	**ΔX**	**ΔZ**	**ΔY / m_0**	**ΔX / m_0**	**ΔZ / m_0**		
9	**-0.082**	0.004	0.003	**-21.190**	1.027	0.838	**8.22**	**303^{g}1030**
10	**0.086**	**0.023**	0.005	**-22.222**	**6.018**	1.301	**8.92**	**304^{g}4343**
11	**-0.084**	**0.009**	0.006	**-21.602**	**2.265**	1.513	**8.47**	**304^{g}5395**
12	**-0.085**	0.007	0.005	**-21.738**	1.895	1.290	**8.54**	**303^{g}7405**
13	**-0.085**	-0.006	0.003	**-21.876**	-1.631	0.706	**8.53**	**302^{g}2459**
14	**-0.080**	0.008	0.004	**-20.650**	1.977	0.963	**8.05**	**302^{g}3567**
15	**-0.080**	**0.014**	0.006	**-20.613**	**3.727**	1.632	**8.14**	**304^{g}7657**
16	**-0.075**	**0.015**	0.001	**-19.302**	**3.866**	0.278	**7.65**	**300^{g}8487**
18	**-0.077**	-0.007	0.004	**-19.898**	-1.879	1.116	**7.74**	**303^{g}3041**
19	**-0.077**	**0.018**	0.001	**-19.725**	**4.731**	0.160	**7.91**	**300^{g}0001**
20	**-0.075**	**0.034**	0.007	**-19.212**	**8.856**	1.788	**8.26**	**305^{g}9246**
21	**-0.064**	**0.018**	0.001	**-16.575**	**4.568**	0.196	**6.65**	**300^{g}0001**
22	**-0.069**	**0.014**	-0.004	**-17.736**	**3.478**	-1.074	**7.05**	**296^{g}3135**
23	**-0.048**	**0.021**	-0.002	**-12.358**	**5.497**	-0.526	**5.24**	**297^{g}3489**
24	**-0.058**	**0.018**	0.005	**-14.940**	**4.726**	1.215	**6.09**	**305^{g}4745**
25	**-0.056**	**0.014**	0.006	**-14.490**	**3.503**	1.415	**5.80**	**305^{g}6690**
26	**-0.059**	**0.016**	0.004	**-15.135**	**4.158**	0.899	**6.13**	**303^{g}2342**
27	**-0.064**	**0.019**	0.004	**-16.378**	**4.819**	0.985	**6.69**	**304^{g}0366**
28	**-0.018**	**-0.009**	0.006	**-4.703**	**-2.326**	1.540	**2.10**	**323^{g}6116**
29	**-0.047**	**0.024**	0.002	**-12.116**	**6.235**	0.445	**5.28**	**302^{g}6510**
30	**0.043**	**0.024**	0.003	**-11.047**	**6.124**	0.869	**4.93**	**306^{g}0448**
31	**-0.045**	0.003	0.002	**-11.607**	0.809	0.533	**4.51**	**302^{g}8275**
32	**-0.023**	**0.021**	-0.001	**-5.846**	**5.452**	-0.147	**3.12**	**300^{g}0001**
33	**-0.028**	**0.032**	-0.005	**-7.152**	**8.109**	-1.371	**4.28**	**286^{g}5613**
34	**-0.022**	0.001	0.000	**-5.687**	0.221	0.124	**2.20**	**300^{g}0001**
35	**-0.018**	**0.019**	0.000	**-4.636**	**4.764**	0.095	**2.62**	**303^{g}5331**
36	**-0.018**	**0.013**	0.001	**-4.712**	**3.353**	0.176	**2.22**	**303^{g}3475**
	mo =± 0.389c m							
	Serbestlik derecesi (f) = 17							
	t test değeri = 2.11 (%95)							

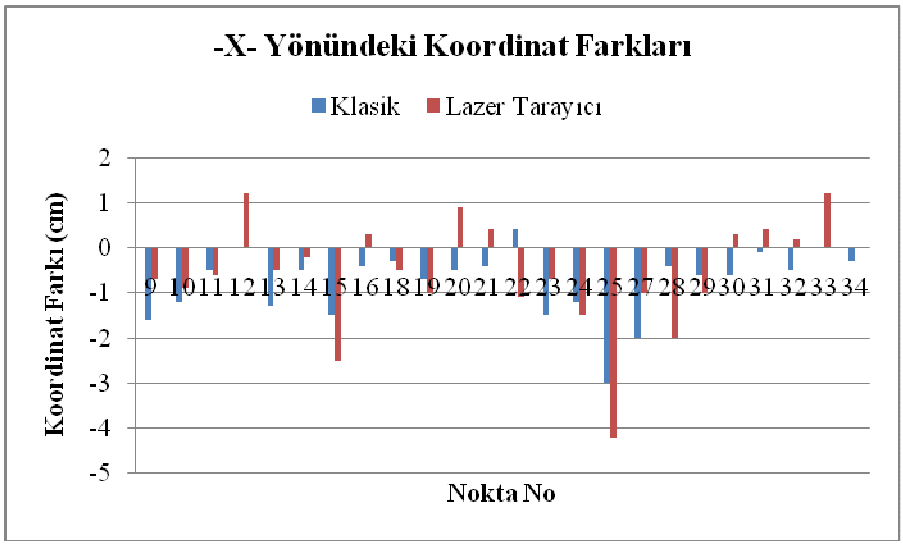
6.6 Sonuçlar

Bu projenin amacı yersel lazer tarayıcıları ile deformasyon ölçmelerinin yapılabilirliğinin araştırılmasıdır. Bu amaçla, iki farklı numune üzerinde iki periyod şeklinde yapılan elektronik takeometre ve yersel lazer tarayıcı ile elde edilen koordinatlar farkları (ΔY, ΔX ve ΔZ) karşılaştırılarak, deformasyon analizi sonucunda deformasyona uğrayan noktalar ve deformasyonun yönü ve büyüklüğü belirlenmiştir.

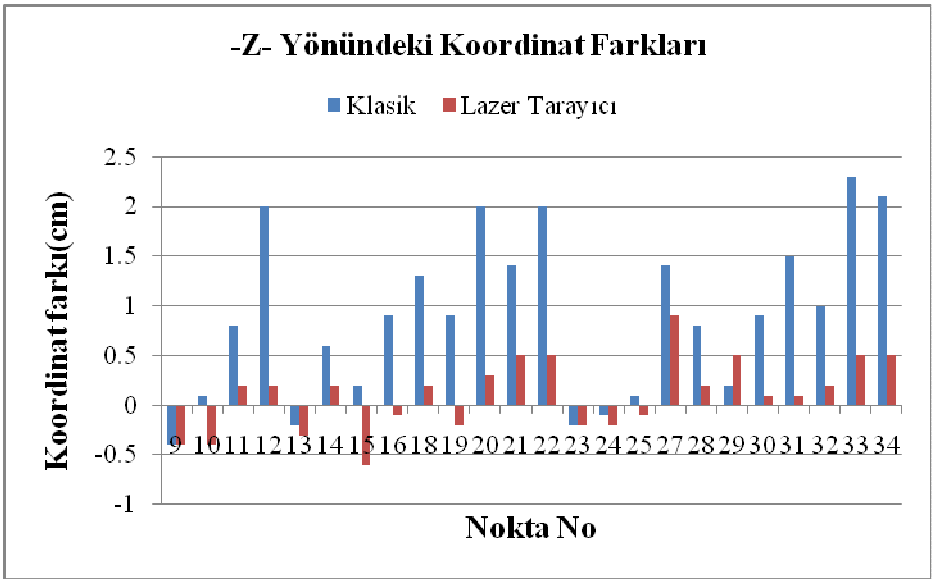
Numune I üzerindeki obje noktalarına ait Y, X ve Z yönündeki koordinat farkları ayrı ayrı ele alınmıştır ve Şekil 6.13, Şekil 6.14 ve Şekil 6.15'de gösterilmiştir.



Şekil 6.13.Y Yönündeki koordinat farkları (Numune I)



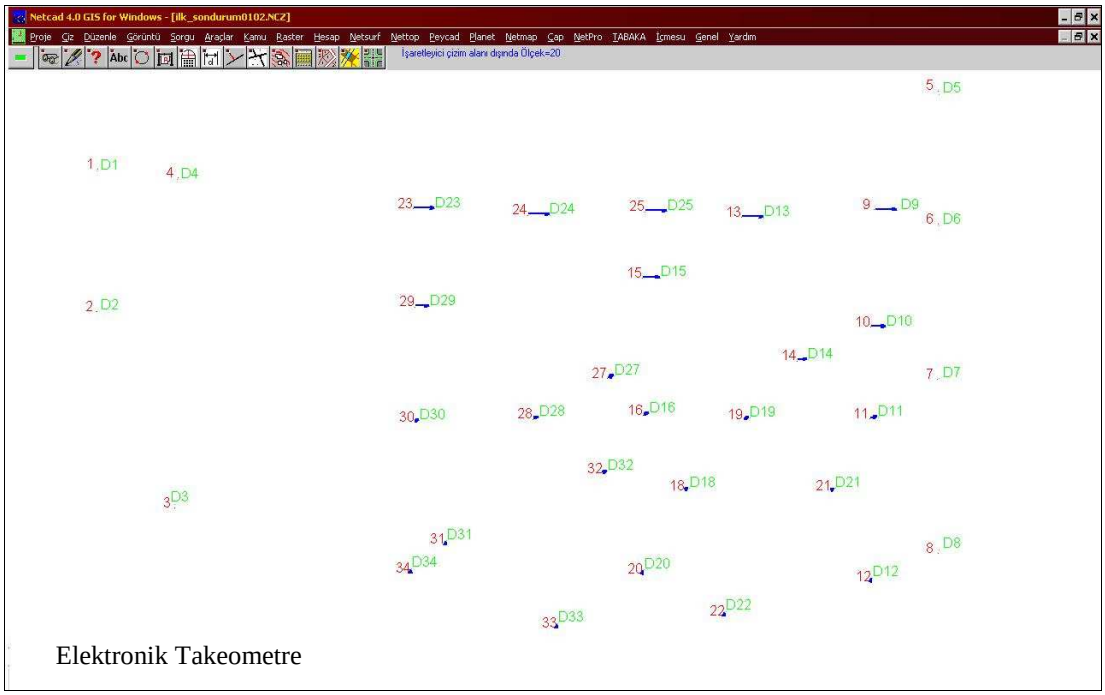
Şekil 6.14 X Yönündeki koordinat farkları (Numune I)

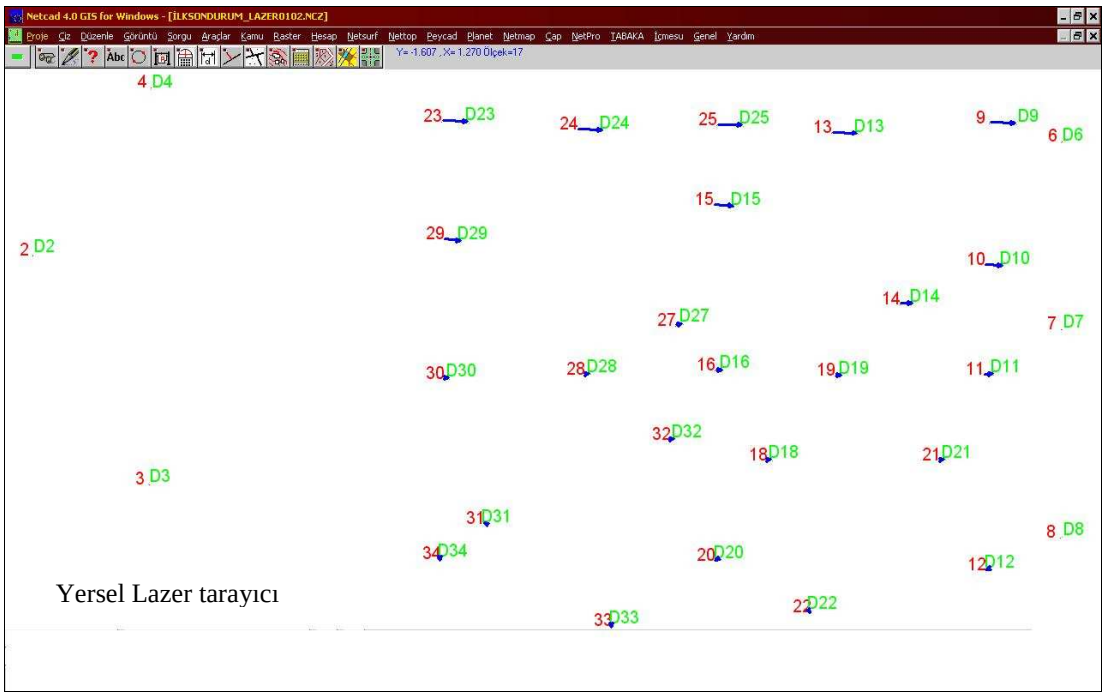


Şekil 6.15 Z Yönündeki koordinat farkları (Numune I)

Yukarıdaki şekiller incelendiğinde, özellikle büyük deformasyonların olması beklenen Y yönündeki koordinat farklarının oldukça büyük ve birbirine yakın olduğu, diğer yönlerdeki koordinat farklarının ise küçük, büyüklük olarak tam olmasa da yön olarak aynı olduğu görülmektedir. Genel olarak, betonarme

çerçeve'nin üst bölümündeki noktaların daha fazla deformasyona uğradığı söylenebilir (Şekil 6.16).

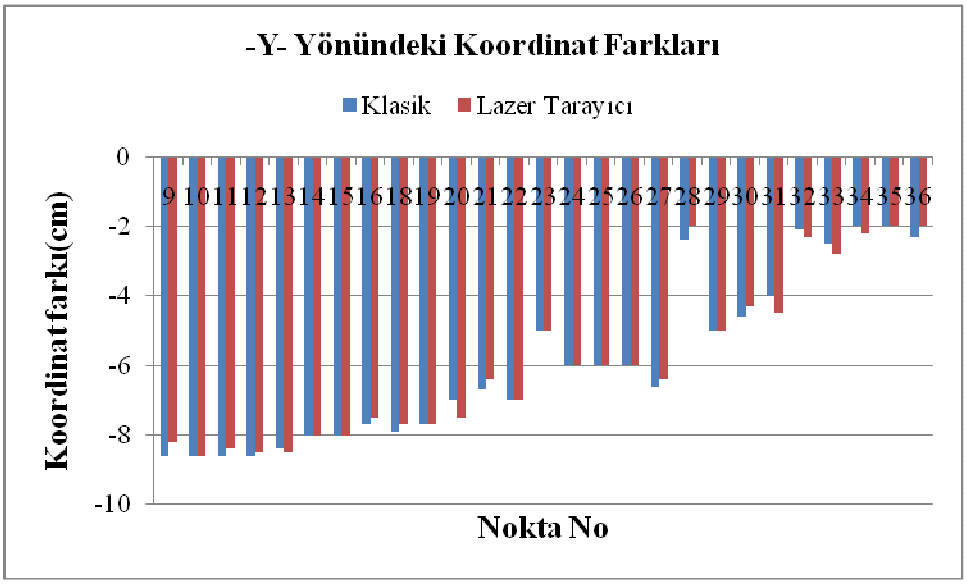




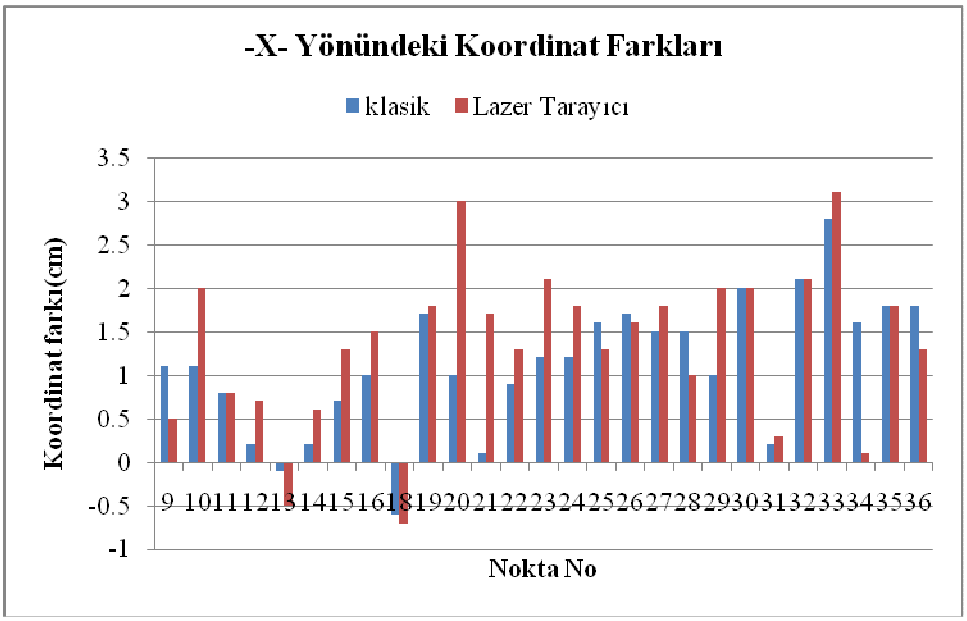
Şekil 6.16 Noktalar ve deformasyonların yönleri

Numune I için, Tablo 6.11 incelendiğinde, elektronik takeometre ile yapılan ölçmeler ile Y yönünde 9, 10, 11, 13, 14, 15, 16, 18, 19, 21, 23, 24, 25, 27, 28, 29, 30 ve 32 nolu noktalardaki deformasyonun anlamlı olduğu, X yönünde ise 27 nolu noktadaki deformasyonun anlamlı olduğu, Z yönünde ise 12- 20, 22, 33 ve 34 nolu noktalardaki deformasyonun anlamlı olduğu görülmektedir. Tablo 6.12 incelendiğinde ise, yersel lazer tekniği ile yapılan ölçmeler ile Y yönünde 9, 10, 11, 13, 14, 15, 16, 18, 19, 21, 23, 24, 25, 27, 28, 29, 30 ve 32 nolu noktalardaki deformasyonun anlamlı olduğu, X yönünde ise 15, 25 ve 28 nolu noktalardaki deformasyonun anlamlı olduğu, Z yönünde ise tüm noktalardaki deformasyonun anlamlı olmadığı görülmektedir. Elektronik takeometre ile elde edilen sonuçların, yersel lazer tekniği ile elde edilen sonuçların oldukça birbirleriyle uyumlu olduğu söylenebilir.

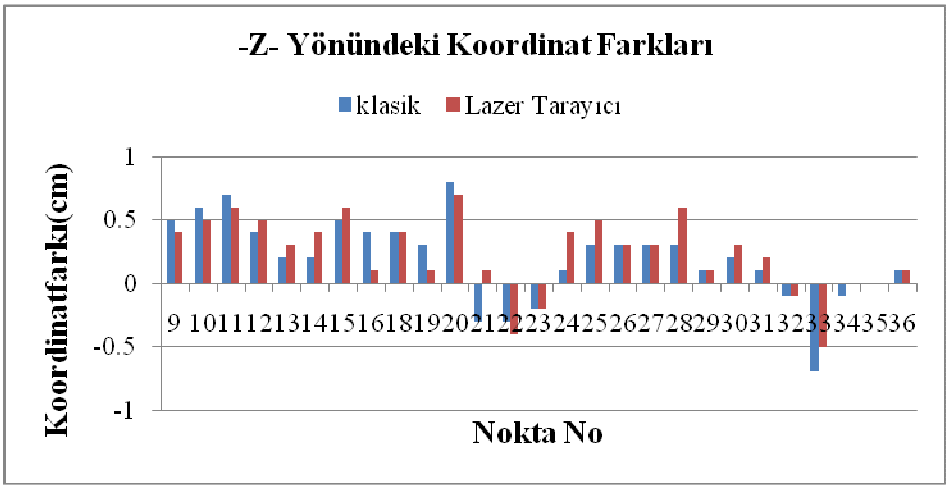
Numune II üzerindeki obje noktalarına ait Y, X ve Z yönündeki koordinat farkları ayrı ayrı ele alınmıştır ve Şekil 6.17, Şekil 6.18 ve Şekil 6.19'da gösterilmiştir.



Şekil 6.17 Y Yönündeki koordinat farkları (Numune II)

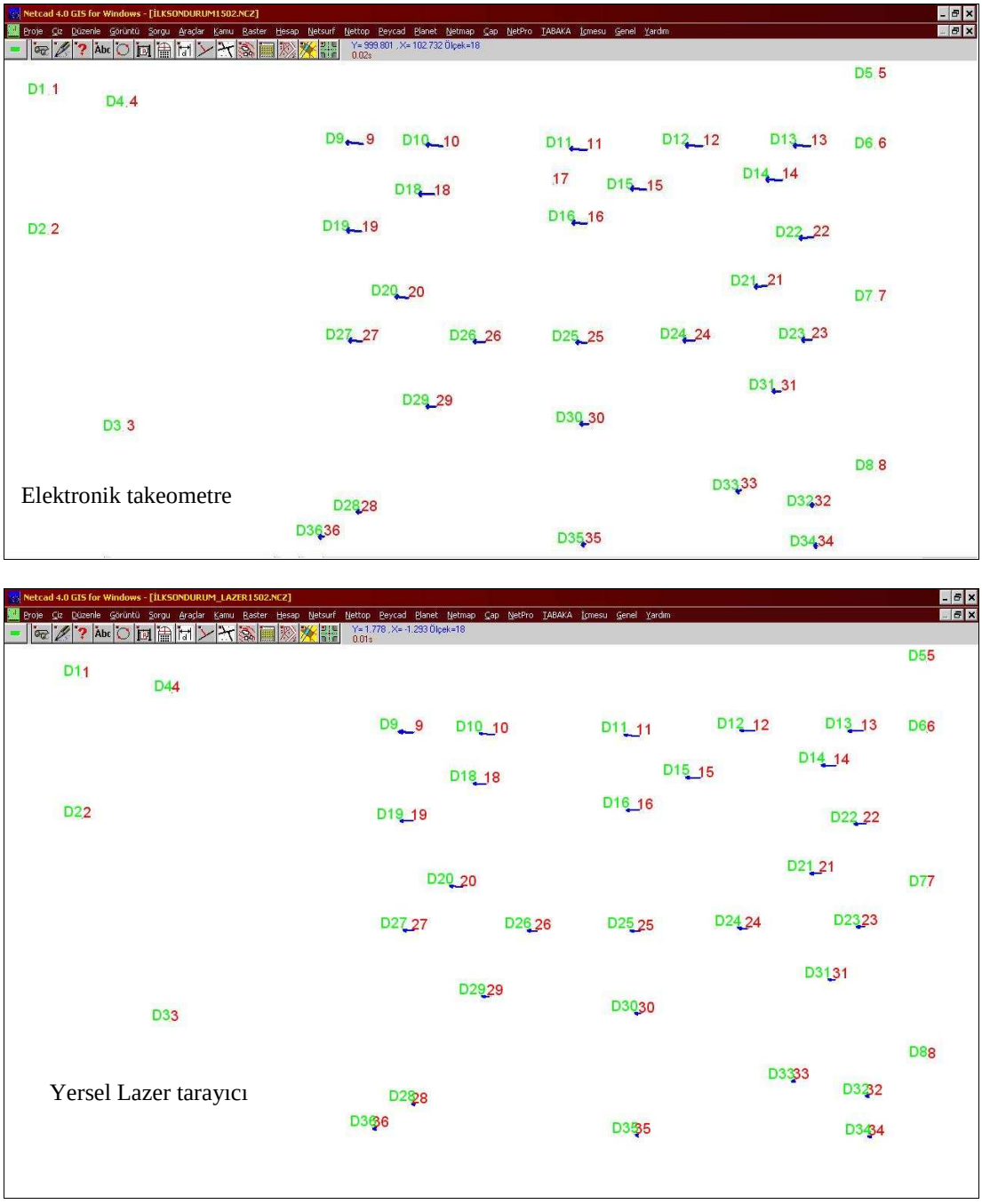


Şekil 6.18 X Yönündeki koordinat farkları (Numune II)



Şekil 6.19 Z Yönündeki koordinat farkları (Numune II)

Yukarıdaki şekiller incelendiğinde, özellikle büyük deformasyonların olması beklenen Y yönündeki koordinat farklarının oldukça büyük diğer yönlerde ise daha küçük olduğu ve birbirleri ile oldukça yakın değerlerde olduğu görülmektedir. Genel olarak, betonarme çerçeve'nin üst bölümündeki noktaların daha fazla deformasyona uğradığı söylenebilir (Şekil 6.20).



Şekil 6.20 Noktalar ve deformasyonların yönleri

Numune II için, Tablo 6.13 incelendiğinde, elektronik takeometre ile yapılan ölçmeler ile Y yönünde, tüm noktalardaki deformasyonun anlamlı olduğu, X yönünde ise 9, 10, 11, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 22, 23, 24, 25, 26, 27,28, 29, 30, 31 ve 32 nolu noktadaki deformasyonun anlamlı olduğu, Z yönünde ise 9, 10, 11, 12, 15,

16, 17, 18, 19, 20, 23, 25, 26, 27, 28, 30 ve 33 nolu noktalardaki deformasyonun anlamlı olduğu görülmektedir. Tablo 6.14 incelendiğinde ise, yersel lazer tekniği ile yapılan ölçmeler ile Y yönünde, tüm noktalardaki deformasyonun anlamlı olduğu, X yönünde ise 10, 11, 12, 15, 16, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27,28, 29, 30, 32,33, 35 ve 36 nolu noktadaki deformasyonun anlamlı olduğu, Z yönünde ise tüm noktalardaki deformasyonun anlamlı olmadığı görülmektedir. Elektronik takeometre ile elde edilen sonuçların, yersel lazer tekniği ile elde edilen sonuçların oldukça birbirleriyle uyumlu olduğu söylenebilir.

7 SONUÇ VE ÖNERİLER

Yersel lazer tarama teknolojisi hızla gelişen bir teknolojidir. En önemli özelliği çok kısa sürede, ekonomik olarak objenin gerçeğine yakın 3B modelinin elde edebilmesi için nokta bulutları üretmesidir. Diğer 3B modelleme teknikleri ile karşılaştırıldığında avantajları görülmektedir. Tabiî ki bu sisteminde çözemediği sorunlar, elde edilen ürünler de hatalar vardır. Bu sorunlar diğer modelleme teknikleri yardımıyla ve gelişen lazer teknolojisi ile çözülmeye başlanmıştır. Tarayıcıların konum doğruluklarını iyileştirmek, hata kaynaklarını yok etmek üzere çalışmalar yapılmaktadır. Kültürel ve tarihi mirasın kullanılmasında, inşaat sektöründe, Mimarlık alanında, endüstriyel çalışmalarda, deformasyon ölçmelerinde vb. birçok alanda kullanılmaya başlanmıştır.

Yersel lazer tarama teknolojileri, yeni bir ölçme tekniği anlamında bir devir açmıştır. Anlık olarak taranan obje veya nesne yüzeyini yansıtan, saniyede binlerce nokta elde edilmektedir. Bu noktalar yardımıyla, bu verilerin düzgün bir şekilde değerlendirilmesi ile gerçeğe yakın 3B modeller elde edilmektedir. Oluşturulan model üzerinden nokta konum bilgilerine, objenin boyut bilgilerine, yüzey, alan ve hacim bilgilerine ulaşılabilmektedir. Taramaya başlamadan önce bir ölçü tasarımının yapılması, istenilen doğruluğa göre tarama parametrelerin belirlenmesi gerekir. Diğer ölçme yöntemleri ile karşılaştırıldığında ekonomik, hızlı bir tekniktir.

Deformasyon ölçmeleri, mühendislik ölçmeleri içinde önemli bir yere ve konuma sahiptir. Gerek üzerinde yaşadığımız doğal ortamda gerekse insan eliyle inşa edilmiş mühendislik yapılarında zamanla ortaya çıkabilecek geometrik değişimlerin (deformasyon) sonuçları insan hayatını ve onun güvenliğini yakından ilgilendirmektedir. Bu sebeple, mühendislik yapıları ve çevresindeki geometrik değişimlerin izlenmesi, belirlenmesi ve tanımlanması son derece önem taşımaktadır. Klasik ölçme yöntemleriyle yapılan baraj, köprü, bina vb. deformasyon ölçmeleri zaman açısından oldukça uzun sürdüğünden ve insan hayatı ve maddi kayıplar açısından büyük sonuçlar doğuracağı için, yersel lazer tarayıcılar bu ölçümler için

hem hızlı hem maliyet açısından oldukça kolaylık sağlamaktadır. Bu yüzden yersel lazer tarayıcılar deformasyon ölçümlerine yeni bir yöntem olarak ele alınabilir.

Özellikle barajlarda deformasyon izlenmesi yapılacak olan yapı üzerinde tesis edilen referans ve obje noktalarının sayısının yeterli ve deformasyon ölçümü yapılacak olan yapıya güzel dağıtılması, yeterli doğrulukta ölçülmesi için önemlidir. Doğal olarak bu noktaların sayısı artığında ölçmeler için harcanacak olan sürede artmaktadır. Deformasyonlarının izlenmesinde seçilen referans ve obje noktalarının sayısı klasik ölçme yöntemlerinde kısıtlı iken lazer tarayıcıların kullanımında böyle bir sorun söz konusu değildir. Çünkü yersel lazer tarayıcılar oldukça çok sayıda noktaya sanal ortamda ulaşmaya imkân sağlamaktadır. Deformasyon analizinde kullanılan sınırlı nokta sayısı yerine tüm yapıya daha çok sayıda noktalardan yararlanma imkânı ortaya çıkmaktadır.

Yapmış olduğumuz uygulama da, Numune I 'in 1. periyodu ve 2. periyodu için klasik ölçmelerle ve yersel lazer tarayıcılar ile elde ettiğimiz koordinat değerleri üç boyutlu koordinat dönüşümü yapılarak aynı koordinat sistemine dönüştürülmüş ve uyuşumsuz ölçüler testi yapılmıştır. Dönüşümün ortalama hatası, elektronik takeometre ölçmeleri için $\mathbf{m_0 = \pm 0.885cm}$ olarak elde edilmiştir. 1. ve 2. periyod ölçmeleri sonucunda elde edilen koordinat farkları **ΔY** için minimum **0.1cm,** maksimum **11.2cm**, **ΔX** için minimum **0.1cm,** maksimum **2.2cm, ΔZ** için ise **0.1cm** ve **2.4cm** olarak elde edilmiştir. Yersel lazer tarayıcı için yapılan üç boyutlu koordinat dönüşümü sonucunda dönüşümün ortalama hatası $\mathbf{m_0 = \pm 0.839cm}$ olarak elde edilmiştir. 1. ve 2. periyod ölçmeleri sonucunda elde edilen koordinat farkları minimum ve maksimum değerleri, **ΔY** için **0.2cm** ve **11.2cm**, **ΔX** için **0.1cm** ve **4.3cm, ΔZ** için ise **0.1cm** ve **0.9cm** olarak elde edilmiştir.

Yapmış olduğumuz uygulama da, Numune II 'in 1. periyodu ve 2. periyodu için klasik ölçmelerle ve yersel lazer tarayıcılar ile elde ettiğimiz koordinat değerleri üç boyutlu koordinat dönüşümü yapılarak aynı koordinat sistemine dönüştürülmüş ve uyuşumsuz ölçüler testi yapılmıştır. Dönüşümün ortalama hatası, elektronik takeometre ölçmeleri için $\mathbf{m_0 = \pm 0.098cm}$ olarak elde edilmiştir. 1. ve 2. periyod

ölçmeleri sonucunda elde edilen koordinat farkları **ΔY** için minimum **2.0cm,** maksimum **8.6cm**, **ΔX** için minimum **0.1cm,** maksimum **2.8cm, ΔZ** için ise **0.1cm** ve **0.9cm** olarak elde edilmiştir. Yersel lazer tarayıcı için yapılan üç boyutlu koordinat dönüşümü sonucunda dönüşümün ortalama hatası $\mathbf{m_0 = \pm 0.389cm}$ olarak elde edilmiştir. 1. ve 2. periyod ölçmeleri sonucunda elde edilen koordinat farkları minimum ve maksimum değerleri, **ΔY** için **1.8cm** ve **8.6cm**, **ΔX** için **0.1cm** ve **3.4cm, ΔZ** için ise **0.1cm** ve **0.7cm** olarak elde edilmiştir.

Deformasyon analizi sonucunda deformasyona uğrayan noktalar, deformasyon miktarları ve deformasyonların yönleri belirlenmiştir. Elektronik takeometre ve yersel lazer tarayıcıları ile elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında deformasyona uğrayan noktaların, deformasyonun miktarlarının ve yönlerinin büyük oranda aynı olduğu belirlenmiştir. Bu da bize lazer tarayıcılarında deformasyon uygulamalarında daha çabuk daha az maliyetli ve daha doğru sonuçlara ulaşmamızda yeni bir yöntem olarak kabul edilebileceğini göstermektedir.

8 KAYNAKLAR

Aktaş, O. A., 1993, Robust Kestirim ve Nirengi Ağlarına Uyarlanması, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ FBE, İstanbul.

Alba, M., Fregonese, L., Prandi, F., Scaioni, M., Valgoi, P., 2006, Structural monitoring of a large dam by terrestrial laser scanning. In Proceedings of of the ISPRS Commission V Symposium, VOLUME XXXVI, PART 5, 25-27 September Dresden, Germany.

Auslig**,** 2000, http://www.auslig. gov.au/geodesy/datums/smil.htm.

Ayan, T., 1982, Jeodezik Ağlarla Deformasyon Analizine Genel Bakış, İTÜ Dergisi, 40/1, İstanbul.

Barber, D., 2001, "Laser Scanning and Photogrammetry: 21st Century Metrology" Department of Geomatics University of New Castle upon Tyne, UK.

Bayram, B., Poyraz, F., Hastaoğlu, K.Ö., Acar, U., Çetin, İ., 2009, "Optik Lazer Tarayıcılarla Hasarlı Otomobil Örneğinde Objelerin Modellenmesi", Harita Teknolojileri Elektronik Dergisi Cilt: 1, No: 1, 2009 (49-58)

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

Boehler, W., Marbs, A., 2002, "3d Scanning Instruments" University of Applied Sciences, Mainz, Germany.

Bornaz, L., 2002, "Engineering And Environmental Applications of Laser Scanner Techniques" Politecnico di Torino – Dipartimento di Georisorse e Territorio, C.so Duca degli Abruzzi, Torino, Italy.

Bursa, M., 1966, Fundamentals of the Theory of Geometric Satellite Geodesy, Travaux de l'institut Geophsique de l'academie Tehecoslovaque des Sciences, Czechoslovakia.

Deha, 1998, http:// www.walis.wa.gov.au/ current_walis_projects/gda/home/ geobas14.htm.

Demirel, H., 1987, S Transformasyonu ve Deformasyon Analizi, Türkiye 1. Bilimsel ve Teknik Kurultayı, 593-608, Ankara.

Demirel, H., 1993, Deformasyon Ölçülerinin Analizi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Lisansüstü Ders Notu, İstanbul.

Doğan, U., 2002, 17 Ağustos 1999 İzmit Depreminden Kaynaklanan Deformasyonların Kinematik Modellerle Araştırılması, Doktora Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Doğanalp, S., 2005, Kinematik Modelde Kalman Filtreleme Yöntemi ile Deformasyon Analizi, Yüksek Lisans Tezi, SÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.

Fröhlich, C. , Mettenleiter, M., 2004, "Terrestrial Laser Scanning –New Perspectives In 3d Surveying International Archives of Photogrammetry", İnternational Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial İnformation Sciences, Vol. XXXVI - 8/W2 3-6, Germany.

Guissani, A., Scaioni, M., 2004, "Application of TLS to support landslides study: survey planning, operational issues and data processing" In: Proceedings of the ISPRS working group 8/2 'Laser-Scanners for Forest and Landscape Assessment', Freiburg, Germany.

Gümüş, K., Erkaya, H., 2007, "Mühendislik Uygulamalarında Kullanılan Yersel Lazer Tarayıcı Sistemler" TMMOB Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası 11. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı, 2-6 Nisan Ankara, Türkiye.

Gümüş, K., Erkaya, H., Bayram, B., Uzar, M., 2007, "Yersel Lazer Tarayıcı Verilerinin Değerlendirilmesi ve 3 Boyutlu Modelleme", 3. Mühendislik Ölçmeleri Sempozyumu, 24-26 Ekim, sayfa: 374-386, Konya, Türkiye.

Gümüş, K., Erkaya, H., Öcalan, T., 2007, " Yersel Lazer Tarayıcıların Doğruluğu ve Uygulama Alanları", 3. Mühendislik Ölçmeleri Sempozyumu, 24-26 Ekim, sayfa: 428-440, Konya, Türkiye.

Gümüş, K., 2008, "Yersel Lazer Tarayıcılar ve Konum doğruluklarının Araştırılması", Yüksek Lisans Tezi, YTÜ İnşaat Fakültesi Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği, İstanbul, Türkiye.

Gordon, S., 2001, "Metric performance of a high-resolution laser scanner" Proceedings of SPIE, pp. 174-184, San Jose, USA.

Gordon, S., Lichti, D., Franke, J., Stewart, M., 2003, Measurement of Structural Deformation using Terrestrial Laser Scanners, Australia.

Gordon, S. and Lichti, D., 2004, Terrestrial laser scanners with a narrow field of view: theeffect on 3D resection solutions. Survey Review, No. 37, 292, pp. 448 – 468.

Harvey, B. R., 1986, Transformation of 3D Coordinates, The Australian Surveyor, 33, 105-125.

Ingensand, H., 2006, Methodological aspects in terrestrial laser-scanning technology. InProceedings of the 3rd IAG Symposium of Geodesy for Geotechnical and Structural Engineeringand 12th FIG Symposium on Deformation Measurements.

İnal, C., 2000, Lisans ve Yüksek Lisans Ders Notları, SÜ, Konya.

İnal, C., Ceylan, A., 2002, S Transformasyonu Uygulama Alanları, Selçuk Teknik Online Dergisi, ISSN 1302-6178.

Karabörk, H.,Göktepe, A., Yılmaz, H.M., Mutluoğlu Ö., Yıldız, F., Yaka, M., 2009, Tarihi ve kültürel varlıkların lazer tarama ve lazer nokta ölçme teknolojileri ile 3B modellenmesinde duyarlılık araştırması ve uygulama modelinin belirlenmesi TMMOB Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası 12. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı 11-15 Mayıs, Ankara

Kutoğlu, H., 1997, WGS84 Koordinat Sisteminden Ülke Koordinat Sistemine Dönüşümler, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Kutoğlu, H., 2001, GPS Ağlarının Ülke Nirengi Ağlarına Entegrasyonu, Doktora Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Lichti, D.D. and Gordon, S.J. and Stewart, M.P., 2002, “Ground-based Laser Scanners: Operation, systems and Applications” Geomatica.

Öztürk, E., Şerbetçi, M., 1992, Dengeleme Hesabı Cilt III, Karadeniz Teknik Üniversitesi Basımevi, Trabzon.

POSCE, 2000. http:// www. posc. org/ Epicentre.2_2/ DataModel/ Examplesof Usage/ eu_cs35.html.

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.

Lindenbergh, R., Uchanski, L., Bucksch, A., Gosliga, R. V., 2005, “Structural Monitoring Of Tunnels Using Terrestrial Laser Scanning”

Şimşek, M., 1995, Uydu Tekniklerinin Ağ Sıklaştırmasında Kullanılabilirliği Üzerine Bir Araştırma, Doktora Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Talaya, J., Alamus, R., Bosch, E., Serra, A., Kormus, W., Baron, A., 2004, ”Integration of A Terrestrial Laser Scanner with GPS/IMU Orientation Sensors”, ISPRS xx. Symposium, Com. V., WG V/4, 12-23 July, İstanbul.

Vozikis, G., 2004, “Laser Scanning: A new method for Recording and Documentation in Archaeology” Athens, Greece.

Wehr, A., 1999, ” Fusion of Photogrammetric and Laser Scanner Data” CIPA Int. Symposium Brazil.

Wolf, H., 1963, Geometric Connection and Re-orientation of Three Dimensional Triangulation Nets, *Bulletin Geodesy*, 68, 165-169.

Wunderlich, T., 2003, “Terrestrial Laser Scanners-An Important Step towards Contruction Information”, FIG Working Week, Paris, France.

Yılmaz, H.M, Yakar, M., 2006, Yersel Lazer Tarama Teknolojisi, Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi, Cilt 2, Sayı 1, Temmuz.

Zamecnikova, M., Kopacik A., 2004, “Terrestrial Laser Scanning” INGEO 2004 and FIG Regional Central and Eastern European Conference on Engineering Surveying, November 11-13, Bratislava, Slovakia.

İNTERNET KAYNAKLARI

URL1: www.3dlasermapping.com

URL2: www.isprs.org

URL3: www.optech.ca

URL4: www.sciencedirect.com

URL5: www.topcon.com.sg

URL6: www.riegl.com

URL7: www.cyra.com

URL8: www.mensi.free.fr