

Yersel Lazer Tarayıcı ile Yeraltı Galerisinde Meydana Gelen Deformasyonların Belirlenmesi

Mehmet Volkan ÖZDOĞAN*¹, Ahmet Hamdi DELİORMANLI¹

¹Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, 35390, İzmir. (ORCID: 0000-0001-6985-271X)

²Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, 35390, İzmir. (ORCID: 0000-0001-8064-0689)

(Alınış / Received: 01.02.2018, Kabul / Accepted: 26.03.2018,
Online Yayınlanma / Published Online: 15.05.2018)

Anahtar Kelimeler
Yersel Lazer
Tarayıcı,
Yeraltı kazısı,
Deformasyon
ölçümü,

Özet: Yeraltı kazı çalışmaları esnasında meydana gelen deformasyonların en yüksek doğrulukla belirlenmesi kazı işleminin emniyeti ve ekonomisi için son derece önemlidir. Son yıllarda yersel lazer tarayıcıların yeraltı deformasyon ölçümlerindeki uygulamaları hızlı, yüksek doğrulukla ve büyük alanlarda kısa sürede veri elde edebilmesinden dolayı gittikçe önem kazanmıştır. Öte yandan yersel lazer tarayıcılar ile yeraltından elde edilen verilerin deformasyon amaçlı değerlendirilmesi konusu hala güncel bir çalışma alanıdır. Bu çalışma kapsamında da örnek bir yeraltı ocağından yersel lazer tarayıcı ile alınan ölçüm sonuçlarına göre deformasyon analizleri yapılmıştır. Deformasyon analizleri yapılırken nokta bulutu - nokta bulutu, nokta bulutu-model mesafesi ve kesit analizleri olmak üzere üç yöntem kullanılmış ve bu üç yöntemin sonuçları karşılaştırılmıştır.

Determination of Deformations Occured in Underground Drift by Terrestrial Laser Scanner

Keywords
Terrestrial Laser
Scanner,
Underground
Excavation,
Deformation
measurement,

Abstract:
Determination of the deformations evolved during the excavation is crucial for the economical and safe excavation. The applications of terrestrial laser scanning (TLS) technique in deformation monitoring is getting attention in recent years due to advantages of rapidity, high accuracy and applicability in large areas in a short time. On the other hand the studies involving the evaluation of the data gathering from terrestrial laser scanner for the deformation analysis is still up to date. In this study, deformation of an underground drift was determined by the aid of terrestrial laser scanner measurements. Three different methods; Cloud to cloud, cloud to mesh and cross-section analysis were carried out for the deformation analysis. Then the results of these methods were compared.

*Sorumlu yazar: mehmet.ozdogan@deu.edu.tr

1. Giriş

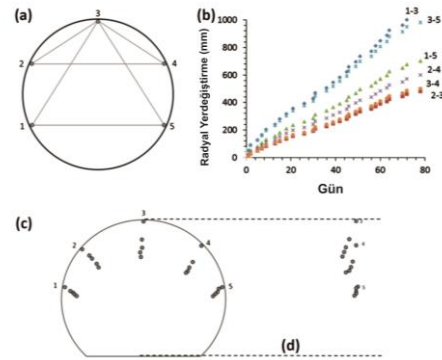
Yeraltı boşluklarında meydana gelen gerilme ve yer değiştirmelerin ölçülmesi yeraltında çalışanların güvenliği açısından oldukça önemlidir [1]. Bu ölçümlerden elde edilen veriler özellikle ikincil tahkimat sistemlerinin geliştirilmesinde kullanılmaktadır [2].

Yeraltı kazı çalışmaları sırasında yeraltı boşlukları çevresinde oluşan gerilmeler, kaya kütlelerinin deforme olmasına neden olur. Boşluk çevresinde oluşan deformasyonların büyüklüğü, boşluk geometrisine, kaya kütlelerinin durumuna; yerinde gerilmenin büyüklüğüne, yönüne, anizotropisine; kazı yöntemi ve hızına ve tahkimat tipine bağlıdır. Bu durumda yeraltı boşluğu etrafında oluşan deformasyonun izlenmesinden elde edilen veriler ile geri analiz yapılarak kaya kütleleri parametreleri ve/veya gerilme durumu ile ilgili veri üretmek mümkün olmaktadır [3].

Yeraltı boşluklarında deformasyon izleme teknikleri son yıllarda önemli gelişmeler göstermiştir. Tünel kazısı sırasındaki mutlak yer değiştirmelerin (boyuna, düşey ve yatay yer değiştirme) jeodetik yöntemlerle belirlenmesi, göreceli yer değiştirme (konverjans) ölçümlerinin yerini almıştır [4]. Yeraltı madenlerinde desandrelere, ana nakliye galerileri, tavan-taban yolları gibi ocak içi ulaşım yollarında hala kullanım kolaylığı nedeniyle şerit ekstansometreler kullanılırken, yeraltı ulaşımı veya yeraltı depoları gibi çok daha uzun süre kullanım süreleri olan ve çok daha sık ve fazla ölçüm gerektiren yapılarda genellikle total-station adı verilen jeodetik ölçüm aletleri kullanılmaktadır. Her iki yöntemde birbirlerine göre avantajları olmasına rağmen, yöntemlerin temel eksikliği ölçümlerin noktasal ölçümler olması ve kullanıcı kaynaklı ölçüm hatalarına açık olmasıdır. Şerit ekstansometre ölçümleri yeraltı boşluğunda belirlenen iki referans nokta arasındaki mesafeyi ölçme prensibine

dayanırken bu ölçümlerde referans noktasının sadece düşey ekseninde hareket ettiği var sayılmaktadır.

Güncel olarak Barla vd. [5] tarafından geliştirilen geleneksel deformasyon ölçüm yönteminde tünel kesitindeki 5 kontrol noktası ara mesafesinin ölçümü üzerinden değerlendirme yapılmıştır (Şekil 1a-1b). Bu yöntemdeki temel eksiklik belirlenen iki mesafe arasındaki düz hattın ölçülmesi ve dolayısıyla kaya kütlelerindeki ötelenme ve ekseninde dönme hareketini göz ardı etmesi olarak görülmektedir [6].



Şekil 1. a) Barla vd. [5] tarafından geliştirilen şerit ekstansometre yöntemiyle deformasyon ölçümü. b) Şerit ekstansometre yönteminin verilerinin değerlendirilmesi. c) Schubert vd., [4] tarafından kullanılan total-station ile deformasyon ölçümü için referans noktaları ve mutlak yer değiştirmeleri gösteren kesit. d) total-station ile deformasyon ölçümü sonucu boyuna kesitte yatay ötelenme

Jeodetik ölçüm yöntemi olan total-station ölçümleri ise üzerinde elektronik mesafe ölçer bulunan elektronik teodeolitin optik reflektörler yardımıyla nokta konumu alma esasına dayanan bir ölçme sistemidir. Farklı tarihlerde total-stationlar ile alınan ölçümlerden oluşturulan modeller karşılaştırılarak deformasyon analizi yapılmaktadır. Şekil 1-c de bir tünel kesitinde meydana gelen deformasyonun Schubert vd., [4] tarafından önerilen total-station ölçümleri ile belirlenmesine yönelik bir

uygulama verilmektedir. Burada rakamlar ile ifade edilenler referans reflektörleri, diğer noktalar ise mutlak yer değiştirme vektörünü göstermektedir. Şekil 1-d'de ise aynı analiz sonucunda boyuna kesitte yatay ötelenme görülmektedir.

Total-station ölçümleri birden fazla noktadan ölçüm alabilme yeteneğine sahip olsa da, alınan nokta sayısının deformasyon analizi için yetersiz kaldığı ve deformasyon analizlerinin yine yetersiz noktasal veriler ile oluşturulan model üzerinden yapıldığı bilinmektedir. Yersel LiDAR (Light Detection and Ranging) veya yersel lazer tarayıcı (YLT) olarak adlandırılan 3 boyutlu lazer tarayıcılar, yüksek konumlama hassasiyetleri sayesinde son yıllarda yer bilimleri alanında kullanılmaya başlamıştır. Bu sistemler optik bir sensör ile bir nesne ya da yüzey arasındaki mesafeyi ölçerek nesne veya yüzeyi 3 boyutlu olarak haritalar. Ölçüm yapılırken lazer ışının ölçüm yüzeyiyle olan yansıma ilişkisinden yararlanır. Gönderilen lazer ışını her ölçüm aldığı yere koordinatlı bir nokta atar ve ölçüm sonunda ölçülen alanın büyüklüğüne ve ölçüm çözünürlüğüne göre birkaç yüzden birkaç milyon hatta on milyonlara kadar varan koordinatlandırılmış bir nokta bulutu oluşur. Bu koordinatlandırma işlemi ölçüm tipine göre doğrudan evrensel koordinata dönüştürülmüş koordinatlar olabildiği gibi sistemin kendi içinde bir koordinatlandırma sistemi de olabilmektedir. Yersel LiDAR sistemleri ile ölçüm sonucu oluşturulan nokta bulutlarından yüksek çözünürlüklü 3 boyutlu haritalar oluşturmak ve bu haritalar üzerinde mühendislik ölçümleri yapmak mümkündür. Yersel LiDAR sistemlerinin m² içerisine 10000'in üzerinde koordinatlı nokta oluşturabilme kabiliyeti sayesinde boşluklarının herhangi bir interpolasyon işlemine gerek kalmadan 3 boyutlu olarak ortaya konması mümkündür. Ayrıca ölçüm yapılacak olan boşlukta herhangi bir

referans noktasına, delik delme ve ölçüm kazığı çakma işlemine ihtiyaç duymaması ve verilerin hızlı bir şekilde değerlendirilmesi bu yöntemin en büyük avantajları arasında görülmektedir. Dolayısıyla yersel LiDAR sisteminin yeraltında deformasyon ölçümünde kullanılması son yıllarda araştırmacıların ilgisini çeken bir konudur.

Bu çalışma kapsamında da metalik bir yeraltı ocağında açılmış galeride iki farklı tarihte ölçüm yapılmış ve galeri yersel lidar sistemi ile modellenerek galeri içerisinde meydana gelen deformasyonlar 3 farklı yöntem ile belirlenmiş ve yöntem sonuçları karşılaştırılmıştır.

2. Yersel Lazer Tarama

2.1. Lazer tarayıcı ölçüm prensibi

Yersel lazer tarayıcılarda kullanılan ölçüm yönteminin temel prensibi, ışık sinyalinin ölçüm cihazı ile ölçülen cisim arasındaki gidiş ve dönüş süresinin ölçülmesi prensibine dayanır. Işık hızı bilindiği için ölçülen obje ile cihaz arasındaki mesafenin hesaplanması denklem 1'de verildiği gibi basitçe yapılabilir.

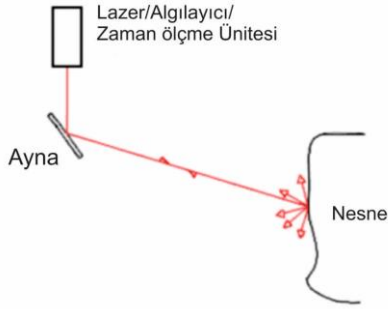
$$d=c \times t/2 \quad [1]$$

d= cihaz ile ölçülen cisim arası mesafe (m)

c= ışığın hızı (299 792 458 m/saniye)

t= ışığın cihazdan cisime gidip yansyarak cihaza dönüş süresi (sn)

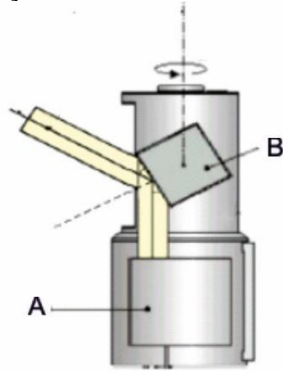
Özellikle uzun mesafeli yersel lazer tarayıcılarda kullanılan bu ölçme prensibi, elektronik takeometrelerin çalışma prensiplerinden dolayı da iyi bilinmektedir. [7]. Bu prensiple çalışan sistemler, uzun mesafelerde ölçme yapabilir ve makul doğruluklar elde etme avantajına sahiptirler [8,9]. Uçuş zamanı sisteminin çalışma prensibi Şekil 2'de kısaca anlatılmıştır.



Şekil 2. Uçuş zamanı sistemi [7]

2.2. Yersel lazer tarayıcı çalışma prensibi

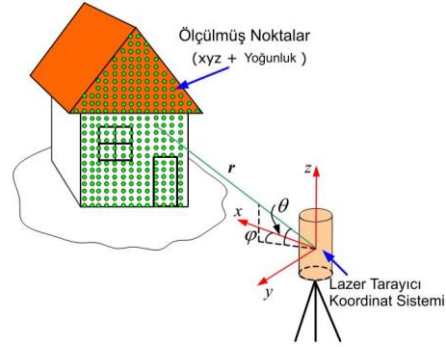
Bir yersel lazer tarayıcı, yatay ve düşey ekseninde lazer ışığını gönderen bir mekanizmaya sahiptir. Tarayıcının elektronik ünitesinden (Şekil 3, A) çıkan ışın, cihazın gövdesindeki hızla dönen optik (aynaya benzer) üniteye (Şekil 3, B) çarpar ve bu yüzeyden yansırarak yatay ile bir açı yapacak şekilde cihazdan çıkar. Tarayıcı cihaz veri aldığı düşey eksen etrafında çok küçük açılarla dönerek taramaya devam eder. Bu işlem tarama işlemi tamamlanana kadar devam eder [10,11].



Şekil 3. Yersel lazer tarayıcı cihazın çalışma prensibi [12]

Yapılan her taramada sonunda veriler nokta bulutu olarak adlandırılan noktalar halinde kullanıcıya sunulur ve bu nokta bulutundaki her bir lazer noktası kutupsal koordinatlarla (r, φ, θ) tarayıcıya kayıt edilir. Bu kutupsal koordinatlarla ifade edilen noktaların

kartezyen koordinatları (x,y,z) tarayıcı yazılımı tarafından hesaplanır ve kullanıcıya kartezyen koordinatlar halinde sunulur. Tarayıcı cihaz tarafından taranan yüzeyde kartezyen koordinatlarının dışında kayıt edilen bir diğer veri de nesneye çarpıp geri yansıyan enerjinin yoğunluğudur (Şekil 4).



Şekil 4. Yersel lazer tarayıcı cihazın ölçüm prensibi [13]

Lazer tarayıcı tarafından ham olarak alınan kutupsal koordinatlar, kartezyen koordinatlara dönüştürülürken kullanılan matris denklem 2'de verilmiştir.

$$x_i = \begin{bmatrix} x_j \\ y_j \\ z_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_j \cos \varphi_j \cos \theta_j \\ r_j \sin \varphi_j \cos \theta_j \\ r_j \sin \theta_j \end{bmatrix} \quad [2]$$

r_j = j. noktanın ölçülen uzaklığı
 φ_j = j. noktanın yatay doğrultusu
 θ_j = j. noktanın düşey açısı

2.3. Yersel lazer tarayıcıların yeraltında deformasyon ölçümü amaçlı kullanımı

Yeraltı boşluklarında deformasyon ölçümünün yersel lazer tarayıcılar ile yapılabilirliğine ait ilk çalışmalardan biri Lindenberg vd, [14] tarafından gerçekleştirilmiştir. Lindenberg yaptığı bu çalışmada Lecia HDS3000 model tarayıcının yeraltı deformasyon ölçümlerinde kullanılabilirliği ve sonuçların doğruluğunu kanıtlamaya yönelik çalışmalarda bulunmuştur.

Herhangi bir metodoloji önerilmeyen çalışmada Lecia HDS3000 model tarayıcının yeraltı ölçümlerindeki doğruluğu üzerine bir çalışma yapılmıştır. Yersel lazer tarayıcı ile deformasyon ölçüm metodolojisine ait ilk çalışma ise Van Gosliga vd, [15] tarafından gerçekleştirilmiştir. Çalışma kesit pürüzlülüğün oldukça düşük olduğu beton segment tahkimat kullanılan bir tünelde 15cm x 15cm nokta yoğunluğu çözünürlüğünde yapılmıştır. Çalışmada tünelden farklı tarihlerde alınan nokta bulutları üzerinde deformasyon analizleri yapılmıştır. Deformasyon analizleri, Matlab programında yazılmış ve nokta bulutundan alınan verileri silindir şekline en küçük kareler düzeltmesi ile oluşturulan, silindir uyum (cylinder fitting) adı verilen model ile kesit modeli üzerinden yapılmıştır.

Lemy vd. [16] Yersel LiDAR ölçümleri ile total-stationdan alınmış referans noktalardan oluşturulmuş ve enterpole edilmiş verileri Van Gosliga vd. [15] tarafından yapılan çalışmaya benzer bir model ile karşılaştırmış ve tünel kesiti üzerinde deformasyon analizi gerçekleştirmiştir.

Lindenberg vd, [17] ise kare şeklinde açılan tüneller için yersel lazer tarayıcı kullanılarak deformasyon analizleri gerçekleştirilmiştir. Lindenberg vd [16] yaptığı çalışmada önceki çalışmalardan farklı olarak tünel içerisinde lazer tarama sonucu oluşturulan nokta bulutu üzerinden alınan bir noktanın oluşturduğu düzlemin normal vektörünün hareketi üzerinden değerlendirme yaparak tünel yüzeyinde meydana gelen yer değiştirmeleri saptamaya çalışmıştır.

Nuttens vd, [18] yaptığı çalışmada tünellerde beton kaplama üzerinde meydana gelen deformasyonları belirlemek için yersel lazer tarama cihazı verilerinden üçgenleme yöntemiyle meshler (TIN Mesh) oluşturmuş ve farklı tarihlerde oluşturulan meshler üzerinden kesitler olarak boşluklarda

meydana gelen deformasyonları belirlemeye çalışmıştır.

Delaloye [19] master tezi kapsamında yapmış olduğu çalışmada yeraltı tünelleri ve kuyuları için yersel lazer tarayıcı ile deformasyon belirlemeye yönelik yapılan çalışmalarda Terzaghi [20] tarafından deformasyon analizleri için önerilen eliptik uyum (elliptical fitting) modelinin oluşturulmasında yersel lazer tarayıcı verilerini kullanmıştır. Bu yöntem ile iki farklı tarihte nokta bulutu verilerinden oluşturulan eliptik modellerin değişimi incelenmiştir.

Han vd, [21] ilk çalışmasında yersel lazer tarayıcı verilerinden oluşturulan 2 boyutlu kesitler üzerinde, araştırmacılar tarafından geliştirilen en küçük mesafe projeksiyonu (MDP) algoritması kullanarak iki farklı tarih arasında alınan nokta bulutları arasındaki mesafeyi ölçerek deformasyon analizi yapılmıştır. Aynı araştırmacılar tarafından yapılan ikinci çalışmada ise MDP algoritması bu sefer kesit üzerinde değil de 3 boyutlu nokta bulutu üzerinde uygulanmış ve herhangi bir noktanın 3 boyutlu uzaydaki yer değiştirmesi belirlenmeye çalışılmıştır [22].

Walton vd, [6] tarafında yapılan güncel çalışmada, Delaloye [19] tarafından yapılan çalışmada kullanılan yersel lazer tarayıcı verilerinden eliptik uyum modeli oluşturma çalışmalarını geliştiren yeni bir algoritma ortaya konmuştur.

3. Yersel lazer tarayıcı ile galeri deformasyonlarının belirlenmesi

Yeraltı galerisinde meydana gelen deformasyonların belirlenmesi amacıyla yapılan bu çalışmada yer yer kavlak dökülmelerinin ve kabarmaların gözlemlendiği (Şekil 5) örnek bir yeraltı galerisinde 4 ay arayla Leica Scanstation 2 model yersel lazer tarayıcı (Şekil 6) ile 2 ölçüm alınarak galeri modeli çıkartılmış ve bu ölçümler üzerinden analizler yapılmıştır. Yapılan ölçüm çalışmalarında tarama işleminin çözünürlüğü 300 m mesafe için 5 cm

olarak belirlenmiştir. Çalışmada kullanılan tarayıcıya ait donanım bilgileri Tablo 1’de verilmiştir.



Şekil 5. Galeri yan duvarında oluşan kabarmaya ait görüntü

Tablo 1 Leica scanstation 2 teknik özellikleri

Parametre	Özellik
Kompansatör tipi	Çift eksenli kompansatör
Kullanıcı arayüzü	Laptop veya tablet PC
Ölçüm yarıçapı	300 m.
Ölçüm hızı	50 000 nokta/sn.
Lazer sınıfı	3R (IEC 60825-1)
Tarama optiği	Tek ayna, panoramik, ön ve üst cam
Nokta aralığı	1 mm
Kamera	Yüksek Çözünürlüklü Entegre Kamera
Görüş açısı	Yatayda 360°, Düşeyde 270°



Şekil 6. Leica Scanstation 2 ile galeri taraması

Ölçümlerin yapıldığı 30 metre uzunluk, 4 metre genişlik ve 4.5 metre yüksekliğine sahip galeride birincil tahkimat olarak tavan civatası kullanılmaktadır. Tavan civatasına destekleyici olarak fiber katkı

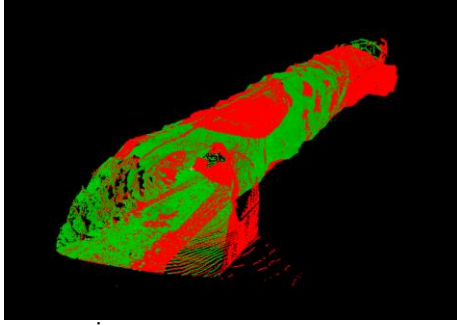
püskürtme beton ikincil tahkimat elemanı olarak galeri yüzeyine uygulanmıştır.

Deformasyon analizi amacıyla nokta bulutlarından galeri modelini oluşturmak için her iki ölçümde de galeri boyunca 4 adet ölçüm istasyonu kurulmuş olup bu 4 istasyon için tek konumda konumlandırılan 3 adet hedef noktasından faydalanmıştır. Bu sayede model oluşturma sırasında nokta bulutlarının birleştirilmesinde hata minimum düzeyde tutulmuştur. Nokta bulutları birleştirilirken gerçekleşen birleştirme hatasına ait veriler ölçüm tarihler ile beraber Tablo 2’de verilmiştir. Nokta bulutların birleştirilmesi, temizlenmesi ve koordinatlandırılması gibi işlemler “Leica Cyclone” 3B nokta bulutu işleme yazılımı ile gerçekleştirilmiştir.

Tablo 2. Nokta bulutu birleştirme hata değerleri

Ölçüm no	Tarih	Birleştirme hata değeri (mm)
1.Ölçüm	11.12.2014	3.2
2.Ölçüm	15.04.2015	2.1

Deformasyon analizi amacıyla 11.12.2014 ve 15.04.2015 tarihlerinde yapılan iki ölçüm sonucunda her iki ölçüm için de ayrı ayrı nokta bulutları oluşturulmuş ve oluşturulan bu nokta bulutları üst üste çakıştırılmıştır (Şekil 7). Nokta bulutlarının çakıştırılması işlemi ise her iki ölçümde de yeraltı röper noktalarından 3 hedef noktasına koordinat taşınması sonucu, nokta bulutlarının evrensel koordinat sistemine çevrilmesi sayesinde gerçekleştirilmiştir.



Şekil 7. İki farklı tarihte alınmış yersel lazer tarayıcı ölçümlerinin karşılaştırılmış hali

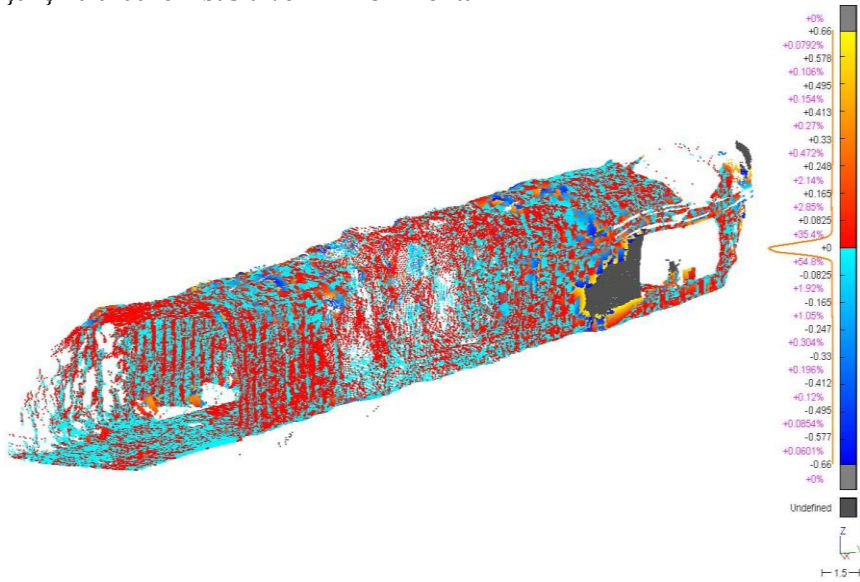
Yersel lazer tarayıcı ile alınan ölçümler sonucu oluşturulan modeller üzerinde, nokta bulutu - nokta bulutu, nokta bulutu - model mesafesi ve kesit analizleri olmak üzere deformasyonların belirlenmesine yönelik 3 farklı analiz "3D Reshaper" yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

3.1. Nokta bulutu - nokta bulutu analizler (C2C)

Nokta bulutları üzerinden yapılan deformasyon belirlemeye yönelik çalışmalarda en basit ve hızlı 3B nokta

bulutu karşılaştırma algoritması olan "Cloud to cloud" (C2C) algoritması kullanılmıştır. Girardeau-Montaut vd. [23] tarafından geliştirilen algoritma herhangi bir girdileme ve meshleme işlemine gerek duymadan doğrudan ilk nokta bulutundaki herhangi bir noktanın 2. nokta bulutunda kendine en yakın olan noktaya olan uzaklığının belirlenmesi esasına dayanmaktadır. Yapılan çalışma sonucu C2C algoritması kullanılarak yapılan analiz sonuçları Şekil 8'de verilmiştir.

Şekil 8'de verilen nokta bulutları üzerinde yapılan deformasyon analizlerinde (-) ile gösterilen deformasyon miktarları boşluk içerisine olan hareketleri yani kabarmaları gösterirken, (+) ile gösterilen değerler, kesit genişlemesini yani dökülmeleri göstermektedir. Galeri cidarında meydana gelen deformasyon miktarlarının dağılımı Tablo 3'de verildiği gibidir.



Şekil 8. Nokta bulutu üzerinde yapılan deformasyon analizleri

Tablo 3. Nokta bulutu üzerinde yapılan deformasyon ölçümleri sonucu bulunan deformasyon miktarlarının dağılımı

Deformasyon Miktarı (m.)	Yüzde Dağılım (%)
(+0.6600) - (+0.0825)	6.07
(+0.0825) - (0.00)	35.40
(0.00) - (-0.0825)	54.80
(-0.0825) - (-0.6600)	3.73

Tablo 3'den edinilen verilere göre nokta bulutu - nokta bulutu analizlerinden elde edilen verilerden galeri cidarında meydana gelen deformasyonların %35.40'ı +0.0825m ile 0.00m arasında değişirken, %54.80'inin 0.00 m ile -0.0825m arasında değiştiği belirlenmiştir.

3.2.Nokta bulutu - model mesafesi yöntemi (C2M)

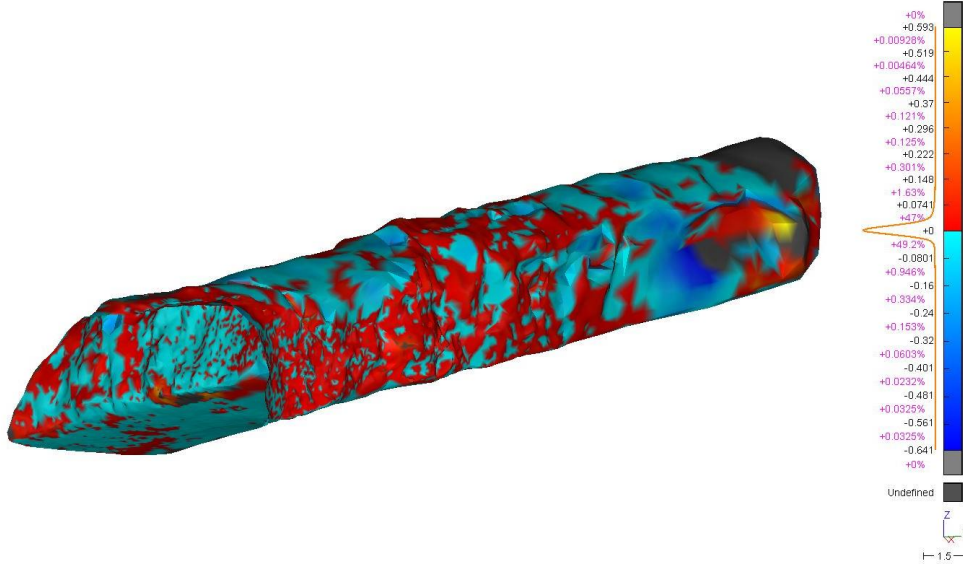
Yersel lazer tarayıcılar ile yapılan yer altı ölçümleri sonucu deformasyon analizlerinde kullanılan algoritmalarından bir diğeri de Cignoni ve Rocchini [24] tarafından geliştirilen nokta bulutu ve üçgenleme yöntemi ile oluşturulan meshler (TIN Mesh) kullanılarak yapılan yer değiştirme analizleridir (C2M). Bu analizlerde deformasyon miktarı ikinci ölçümde elde edilen nokta bulutunun referans (1. ölçüm veya model ölçüm) ölçümden üçgenleme yöntemiyle oluşturulan mesh modelle olan mesafesi olarak hesaplanır. Bu yöntemde referans

modeldeki mesh sayısı arttıkça analiz hassasiyeti artmakta ancak analiz süresi uzamaktadır. Bu çalışma kapsamında deformasyon belirleme amacıyla yapılan analizlerden biri de yüzeyler üzerinden yapılan (C2M) analizlerdir. Çalışılan galeride yüzeyler üzerinden yapılan deformasyon analiz sonuçlarına ait görüntü Şekil 9'da verilmiştir. Galeri cidarında meydana gelen deformasyon miktarlarının dağılımı da Tablo 4'de verilmiştir.

Tablo 4. Mesh modeller üzerinde yapılan deformasyon ölçümleri sonucu bulunan deformasyon miktarlarının dağılımı

Deformasyon Miktarı (m.)	Yüzde Dağılım (%)
(+0.5930) - (+0.0741)	2.25
(+0.0741) - (0.00)	47.00
(0.00) - (-0.0801)	49.20
(-0.0801) - (-0.641)	1.55

Nokta bulutu - model mesafesi yöntemiyle yapılan analiz sonuçları değerlendirildiğinde galeri cidarında meydana gelen deformasyonların %47'sinin +0.0741m ile 0.00m arasında değiştiği, %49.20'sinin ise 0.00m ile -0.0801m arasında değiştiği görülmektedir.

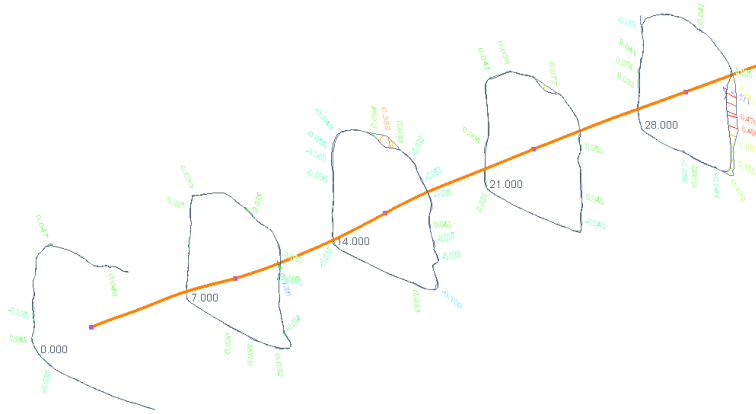


Şekil 9. Yüzeyden yüzeye yapılan deformasyon analiz sonuçları

3.3. Kesit analizleri

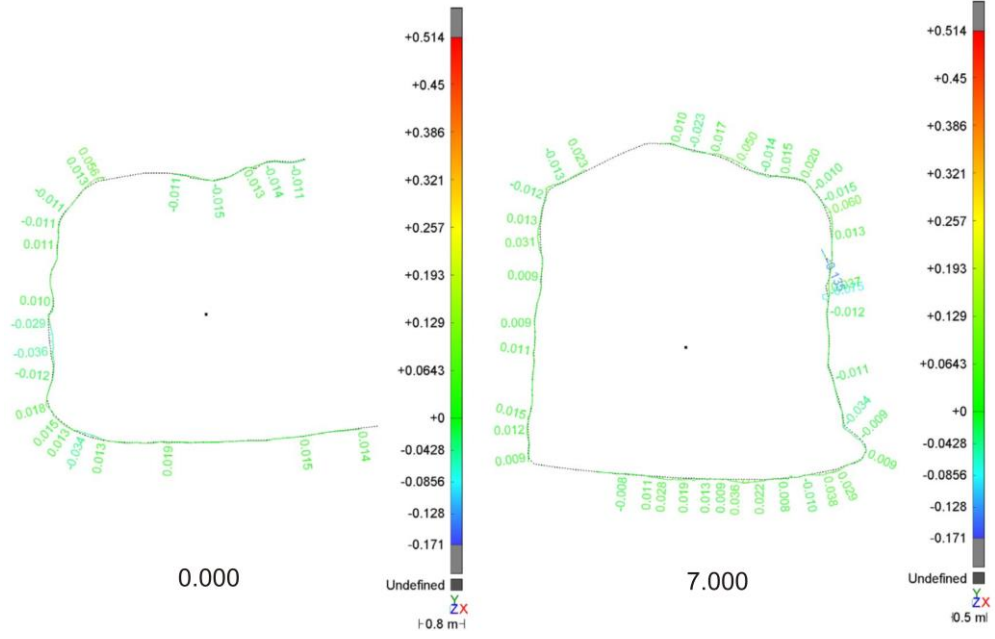
Çalışma kapsamında yersel lazer tarayıcılar yardımıyla deformasyon belirlemeye yönelik çalışmalardan biri de belirli aralıklarla kesitler alıp bu kesitlerde meydana gelen daralma ve genişlemelerin belirlenmesidir. En eski yöntemlerden biri olan kesit analizlerinde önce her iki tarihte alınan ölçümler için üçgenleme yöntemi ile

mesh modeller oluşturulmuş ardından üst üste çakıştırılan bu modeller üzerinden 7 metre aralıklarla 5 adet kesit alınmıştır (Şekil 10). Daha sonra her kesitte iki ölçüm arasındaki galeri cidarında meydana gelen yerdeğişmeler ölçülmüştür (Şekil 11 ve Şekil 12).



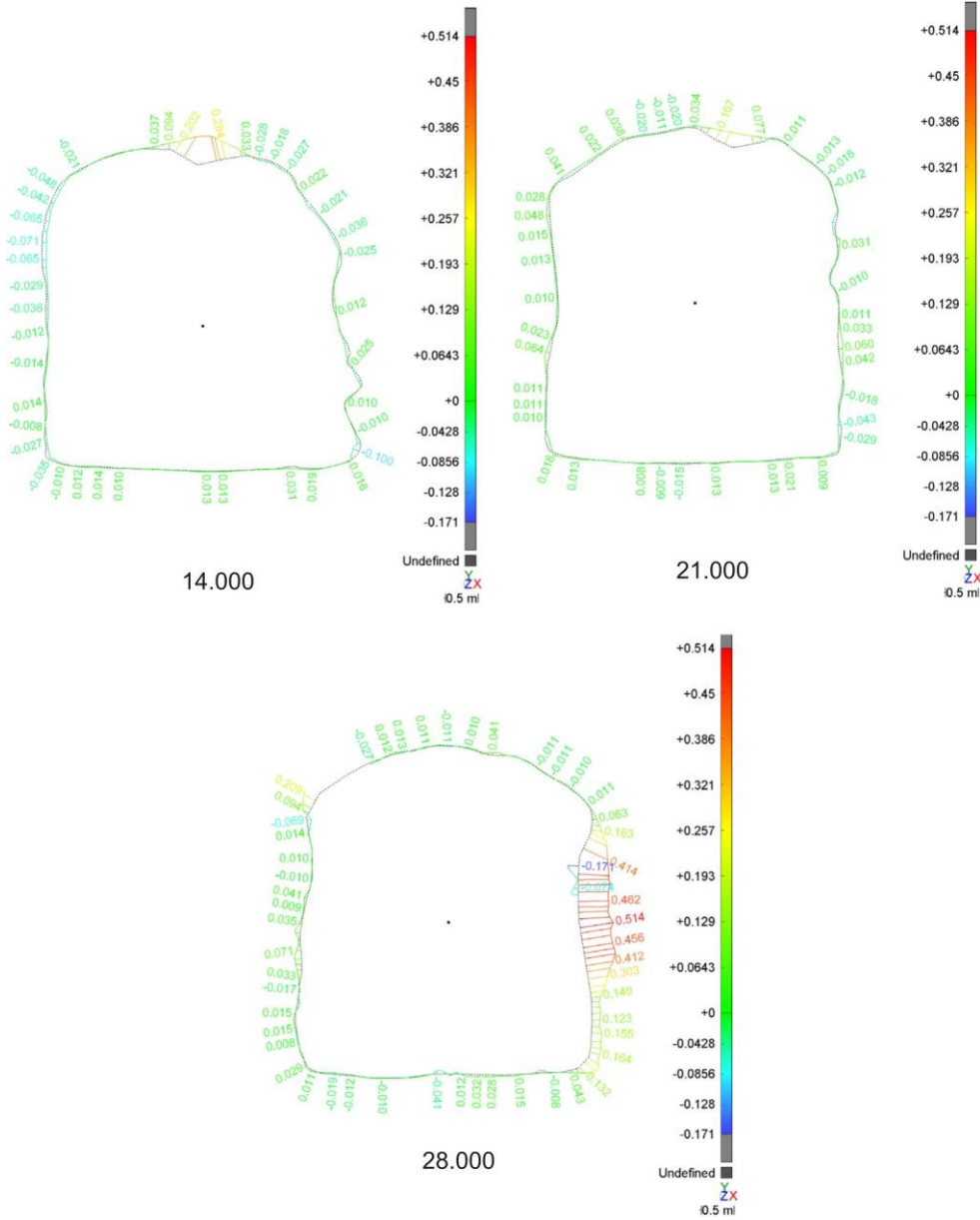
Şekil 10. 30 metre galeri hattı boyunca 7 metre aralıklarla alınan kesitlere ait görüntü.

M.V.Ozdoğan vd. / Yersel Lazer Tarayıcı ile Yeraltı Galerisinde Meydana Gelen Deformasyonların Belirlenmesi



Şekil 11. Nokta bulutu verilerinin başlangıç ve 7. metresinden alınan kesitler üzerinde yapılan analizler

M.V.Ozdoğan vd. / Yersel Lazer Tarayıcı ile Yeraltı Galerisinde Meydana Gelen Deformasyonların Belirlenmesi



Şekil 12. Nokta bulutu verilerinin 14., 21. ve 28. metresinden alınan kesitler üzerinde yapılan analizler

Şekil 11 ve Şekil 12'de verilen kesit analizleri değerlendirildiğinde kesit genişlemesinin en yüksek değerinin +0.514m ile 5. kesitin yan duvarında meydana gelen dökülmeden kaynaklandığı, daralmanın ise -0.100m ile 3. kesitin (14.000m kesitin) tabanında meydana geldiği görülmüştür.

4. Sonuçlar ve Tartışma

Bu çalışma kapsamında yeraltında meydana gelen deformasyonların daha hızlı ve doğru belirlenmesi amacıyla yersel lazer tarayıcı sistemler kullanılmıştır. Çalışmada örnek bir yeraltı galerisi cidarında meydana gelen

deformasyonlar 3 farklı metot kullanılarak incelenmiştir. Sonuçlar incelendiğinde özellikle nokta bulutu-nokta bulutu ve nokta bulutu – model mesafesi yöntemi ile yapılan analiz sonuçlarının birbirine oldukça yakın olduğu görülmektedir. Ancak kesitler üzerinden yapılan analizlerde diğer yöntemler kadar fazla veri elde edilemediği için biraz farklılık görülmektedir. Her ne kadar kesit yönteminde kesit aralıkları sıklaştırılarak hata payı daha aza indirilebilir olsa da galeri cidarı boyunca yapılan analizler kadar hassas olması beklenmemelidir. Dolayısıyla 3 yöntemde yeraltında deformasyonların belirlenmesi amacıyla kullanılabilir. Ancak bu yöntemlerin hesaplama algoritmalarının da hala güncel çalışma konusu olduğu ve iyileştirilmeye açık olduğu unutulmamalıdır.

Kaynaklar

- [1] Prosser L., Marshall T. E. Tadolini S. C., Iannacchione A. T., and Banta C., 2006. Considerations for Using Roof Monitors in Underground Limestone Mines in the USA, <https://www.cdc.gov/niosh/mining/userfiles/works/pdfs/cfurm.pdf> (Erişim tarihi: 25.01.2018)
- [2] Hosca E., Karmis M., and Haycocks C., 1995. Influence of support capacity and geometry on tailgate support. in International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, Cilt. 32, no. 8, s. 395A–395A
- [3] Wittke W, Pierau B, Erichsen C., 2006. New Austrian Tunneling Method (NATM) – Stability Analysis and Design. WBI, Essen
- [4] Schubert, W., Steindorfer, A., and Button, A.E., 2002. Displacement Monitoring in Tunneling-an Overview. Felsbau, Cilt 20 (2), s. 7-15.
- [5] Barla, G., Bonini, M., Debernardi, D., 2008. Time dependent deformations in squeezing tunnels. The 12th International Conference of International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics, Goa, India
- [6] Walton, G., Delaloye, D., Diederichs, M.S. 2014. Development of an Elliptical Fitting Algorithm for Tunnel Deformation Monitoring with Static Terrestrial LiDAR Scanning. Tunn. and Underground Space Tech, Cilt. 43, s. 336-349. DOI: 10.1016/j.tust.2014.05.014
- [7] Boehler, W. ve Marbs, A., 2002. 3d Scanning instruments. Proceeding of the CIPA WG6 International Workshop on Scanning for Cultural Heritage Recording.
- [8] Fröhlich, C. and Mettenleiter, M., 2004: Terrestrial Laser Scanning – New Perspectives in 3D Surveying, In International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Cilt. XXXVI-8/W20
- [9] Karşıdağ, G., (2011). Yersel lazer tarama ölçmelerinde doğruluk analizi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi. İstanbul.
- [10] Kraus, K., 2004. Photogrammetrie Band 1, Geometrische Informationen aus Photographien und Laserscanneraufnahmen. Walter de Gruyter Verlag, Berlin, 7. Auflage.
- [11] Özdoğan M.V. 2015 . Madencilik Faaliyetleri Sonucu Oluşan Yüzey Hareketlerinin Yeni Teknolojiler İle Belirlenmesi.. Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 183s, İzmir.
- [12] Vozikis, G., Haring, A., Vozikis, E. ve Kraus, K., 2004. Laser scanning: A new method for recording and documentation in archaeology. In Proceedings of FIG Working Week
- [13] Staiger, R., 2003. Terrestrial Laser Scanning – Technology, Systems and

- Applications. In: Proceedings of 2nd FIG Regional Conference, December 2 – 5, Marrakech, Morocco,
- [14] Lindenbergh, R., Pfeifer, N. and Rabbani, T., 2005. Accuracy Analysis of the Leica HDS3000 and Feasibility of Tunnel Deformation Monitoring, IAPRS XXXVI(3/W3), Proceedings of Laserscanning, Enschede, The Netherlands.
- [15] Van Gosliga, R., Lindenbergh, R., Pfeifer, N., 2006. Deformation analysis of a bored tunnel by means of terrestrial laser scanning. Image Engineering and Vision Metrology. ISPRS Commission, Cilt. 36, s. 167–172.
- [16] Lemy, F., Yong, S., Schulz, T., 2006. A case study of monitoring tunnel wall displacement using laser scanning technology. The 10th IAEG International Congress, Nottingham.
- [17] Lindenbergh, R., Uchanski, L., Bucksch, A., Van Gosliga, R., 2009. Structural monitoring of tunnels using terrestrial laser scanning. Rep. Geodesy Cilt. 2 (87), s. 231–239.
- [18] Nuttens, T., De Wulf, A., Bral, L., De Wit, B., Carlier, L., De Ryck, M., 2010. High resolution terrestrial laser scanning for tunnel deformation measurements. The FIG Congress 2010 Facing the Challenges – Building the Capacity, Sydney.
- [19] Delaloye D., 2012. Development of a New Methodology For Measuring Deformation in Tunnels And Shafts With Terrestrial Laser Scanning (LiDAR) Using Elliptical Fitting Algorithms. Queen's University Kingston, Master Thesis, Ontario, Canada.
- [20] Terzaghi, K., 1942. Shield tunnels for Chicago subway. Boston Soc. Civ. Eng. Cilt. 29 (3), s.163–210.
- [21] Han, J.Y., Guo, J., Jiang, Y.S., 2013. Monitoring tunnel deformations by means of multi-epoch dispersed 3D LIDAR point clouds: an improved approach. Tunnelling and Underground Space Technology, Cilt. 38 s. 385-389. DOI: 10.1016/j.tust.2013.07.022
- [22] Han, J.Y., Guo, J., Jiang, Y.S., 2013. Monitoring tunnel profile by means of multi-epoch dispersed 3-D LIDAR point clouds. Tunnelling and Underground Space Technology, Cilt. 33 s. 186-192. DOI: 10.1016/j.tust.2012.08.008
- [23] Girardeau-Montaut, D., Roux, M., Marc, R., Thibault, G., 2005. Change detection on points cloud data acquired with a ground laser scanner. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Cilt.36 s. 30–35
- [24] Cignoni, P., Rocchini, C., 1998. Metro: measuring error on simplified surfaces. Computer Graphics Forum 17 Cilt. 2, s. 167–174. DOI: 10.1111/1467-8659.00236