

**Makale  
(Article)**

## **Mağara Ölçümlerinde Yersel Lazer Tarayıcıların Kullanılması (Tozman Mağarası Örneği)**

**Uğur AVDAN\*, Emrah PEKKAN\*, Resul ÇÖMERT\***,

\*Anadolu Üniversite, Yer ve Uzay Bilimleri Enstitüsü, 26555 Eskişehir/TÜRKİYE

[uavdan@anadolu.edu.tr](mailto:uavdan@anadolu.edu.tr), [epekkkan@anadolu.edu.tr](mailto:epekkkan@anadolu.edu.tr), [rcomert@anadolu.edu.tr](mailto:rcomert@anadolu.edu.tr).

### **Özet**

İnsanın girebileceği yeraltı boşluklarına mağara denilmektedir. Mağaraların içerisinde, jeolojik süreçler, su aşındırması, kimyasal süreçler, hidrotermal aktivite ve tektonik süreçler gibi farklı kuvvetlerin etkisi altında, uzun sürede oluşan, eşsiz yapılar bulunmaktadır. Mağaralar, insan etkisine çok açık doğal ve hassas oluşumlar olduğu için gerek turizme açıldıktan sonra, gerekse turizme açılmadan önce, oluşumların gelişmesinde yavaşlamalar, yosunlaşmalar gibi istenmeyen etkiler ortaya çıkmaktadır. Dolayısı ile turistik mağaraların içerisinde, hem ziyaretçilerin hem de mağaraların en az zararı görmesi için birçok mühendislik uygulamalarının yapılması gerekmektedir. Bu uygulamalar için yüksek detay içeren haritalara gereksinim duyulmaktadır. Mağara haritaları, buldukları ortamlarda hüküm süren hidrojeolojik (fiziksel ve kimyasal) süreçlerin aydınlatılması ve yeraltısuyu kirlenme odaklarının tespit edilmesi aşamalarında kullanılmaktadır. Diğer taraftan, Arkeolojik öneme sahip mağaralarda ise ender kalıntıların bulunduğu bölgelerin belgelenmesi evresinde kullanılmasının yanı sıra, ileride yapılacak başka çalışmaların da önünü açabilir. Günümüzde mağara haritalarının üretilmesi için kullanılan yöntemler, mağaraların durumu ve yer altında bulundurulabilecek aletlerin türüne göre farklılık göstermektedir. Gelişen teknoloji ile beraber mağara ölçümlerinde kullanılabilen cihaz ve yöntemlerde değişmektedir. Son yıllarda kendine birçok kullanım alanı bulan yersel lazer tarayıcılar, mağara haritalarının oluşturulması ve modellerinin hazırlanması için de kullanılabilirlerdir. Yersel lazer tarayıcılar kullanılarak taranan nesnelere ait hassas, hızlı, detaylı ve 3 boyutlu veriler

Bu çalışmada, yersel lazer tarayıcıların mağara haritalarının oluşturulması ve modellenmesinde kullanılabilirliğini araştırmak amacıyla, Bilecik sınırları içinde yer alan Tozman mağarasında belgeleme çalışması yapılmıştır. Çalışma kapsamında mağaranın giriş bölümü 5 farklı noktadan er elde etmek mümkündür. Elde edilen verilerin bilgisayar programları ile işlenmesi sonucunda, nesnelere ve alanlara ait 3 boyutlu modellerin ve haritaların üretilmesi mümkündür.

taranmış ve mağaranın giriş bölümüne ait 3 boyutlu nokta bulutu elde edilmiştir. Elde edilen veriler bilgisayar ortamında işlenerek mağaranın giriş bölümüne ait, plan, kesit çizimleri ve 3 boyutlu modeller oluşturulmuştur. Çalışmada elde edilen sonuçlar, yersel lazer tarama yönteminin mağara ölçümlerinde detaylı, hassas ve 3 boyutlu veri elde etmek için uygun bir yöntem olduğunu göstermiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Mağara Ölçümleri, Yersel Lazer Tarama, 3 Boyutlu Modelleme.

## **Using of Terrestrial Laser Scanners at Cave Surveying (A Case Study at Tozman Cave)**

### **Abstract**

Underground cavities that people can embark and explore are called caves. Caves house unique structures that are formed in a long time due to the action of various forces including geologic periods, water erosion, chemical periods, hydrothermal activity and tectonic periods. Since the caves are alive and are in their natural process of formation, presence of visitors cause undesirable effects, such as reduced geological activity and moss formation. Therefore successful cave tourism, several advanced engineering applications should be implemented in order to assure the safety of visitors and the precious geological resources and the cave itself. High resolution three-

*Bu makaleye atf yapmak için*

*Avdan U., Pekkan E., Çömert R. \*, "Mağara Ölçümlerinde Yersel Lazer Tarayıcıların Kullanılması (Tozman Mağarası Örneği)" Harita Teknolojileri Elektronik Dergisi 2013, 5(2) 16-28*

*How to cite this article*

*Avdan U., Pekkan E., Çömert R., " Using of Terrestrial Laser Scanners at Cave Surveying (Tozman Cave Example)" Electronic Journal of Map Technologies, 2013, 5 (2) 16-28*

dimensional maps are required for these engineering applications. Multi-functional cave maps are used for illuminate to hydrogeological (physical and chemical) variation and to identify groundwater pollution sources draining into the caves. Furthermore such detailed documentation and cartography of caves that houses unique ruins are important for archeological investigations. This can lead to an important interdisciplinary research emphasis in the future. Methods used for generating such cave maps can be tailored according to the caves condition and equipment that can be transported underground. Recently significant advances have been made in cave surveying and associated technologies. Particularly, terrestrial laser scanners, have evolved to be an extremely versatile equipment that are used in many cutting-edge research projects. These scanners are used for the producing cave maps and three dimensional cave models. Using the terrestrial laser scanners, and field data it is possible to acquire accurate, rapid, detailed, and 3D geological data about scanned objects. Results of processing of obtained data with computer programs, it is possible to produce computational predictive models and fictional maps for objects and areas.

In this study, Tozman Cave which is boundaries of Bilecik was scanned for the aim of investigation the usability of terrestrial laser scanner at cave surveying and cave modeling. Within the scope of the study, entrance of cave was scanned 5 different scan position and 3D point clouds were obtained for the cave. Processing the obtained data in computer plan, profile drawing and 3D models were produced for the entrance of the cave. Results of study showed that terrestrial laser scanners are ideal tools for acquiring detailed, accurate and 3D data at the cave surveying.

**Keywords:** Cave Surveying, Terrestrial Laser Scanning, 3D Model

## 1. GİRİŞ

Mağara haritaları, genellikle elektronik uzunluk ölçer, çelik şerit metre pusula gibi aletler kullanılarak yapılmaktadır. Günümüzde verilerin toplanması, işlenmesi ve mağara haritalarının üretilmesinde bilgisayar desteği olmasına rağmen, bu görevin yerine getirilmesi için yapılan birçok el çizimi çalışması da mevcuttur. Ancak el çizimi ile elde edilen sonuç haritalar, ağırlıklı bir şekilde ölçümcülerin kartografik yeteneklerine ve deneyimlerine bağlı olmaktadır [1].

Mağaraların uzanımları ve derinlikleri ile buldukların hidrojeolojik sistemdeki, fiziko-kimyasal süreçlerin (kalite ve miktar) açısından belirlenmesi ve bunların belgelendirilmesi ancak bir mağara haritası aracılığı ile daha iyi gerçekleştirilebilir [2].

Mağaralar, içlerinde barındırdıkları damlataşlar ve travertenlerin görsel güzellikler nedeniyle ülke ekonomisine katkı sağlamaktadırlar. Turizme açılacak mağaraların içi düzenlemeler, hem ziyaretçilerin güvenliği hem de mağaranın minimum zararı görmesi için zorunludur. Bu zorunluluk beraberinde mühendislik uygulamalarını (inşaat, elektrik, mimari) getirmektedir. Tüm bu uygulamalar ise ancak hata payı en aza indirgenmiş mağara haritaları üzerinde yapılmaktadır [2].

Mağara bilimi çalışmalarında geniş, orta ve mini düzeyde mağara şekillerinin özelliklerinin belirlenmesi, mağara oluşum sürecinin anlaşılması ve mağara orijinal şifrelerinin çözülmesi çalışmalarında son derece önemlidir. Bu tür küçük ölçekli nesnelere, genel olarak standart mağara haritaları üzerinde gösterilmemektedir. Özel mağara morfojenetik haritalarının oluşturulması için küçük boyutlara sahip nesnelere belgelenebilir, yorumlanmalı ve özel işaret ve semboller ile sonuç haritalar üzerinde gösterilmelidir [1].

Mağara haritalarının üretilmesi aşamasında kullanılan geleneksel yöntemler, mağara nesnelere morfolojisinin ortaya çıkarılması için yeterli değildir. Bu işlem için görüntü tabanlı fotogrametrik ölçmeler de ise mağara içinde homojen dağıtılamayan ışıklandırma nedeniyle küçük nesnelere belirlenmesinde yeterli olmamaktadır. Işıktan bağımsız olarak ölçüm yapabilme kapasitesine sahip olan

yersel tarayıcılar ile mağara haritalarının ve 3 boyutlu modellerinin oluşturulması, mağara içinde bulunan küçük ölçekli nesnelerin özelliklerinin belirlenmesi ve mağara oluşum süreçlerinin ortaya çıkarılması çalışmalarında da kullanılmaya başlanmıştır [1].

Yersel lazer tarayıcıların, taranan nesneye gönderdiği lazer ışını sayesinde milyonlarca noktanın 3 boyutlu koordinatları elde edilebilmektedir. Bu noktalar ayrı yüzey geometrilerinin etkin bir şekilde oluşturulmasına olanak tanımaktadır [3]. Yersel lazer tarama teknolojileri, özellikle mühendislik projeleri, kültürel mirasın kayıt işlemleri ve harita üretimi gibi çalışmalarda uygulama alanı bulmaktadır [4]. Bu sistem, taranan nesneler için yüksek hassasiyetli 3 boyutlu modellerin oluşturulması, nesne ile ilgili yüksek oranda detay içermesi, yüksek çözünürlüklü eşleşme, değişim izleme ve sunum imkânına sahip olduğu için mağara haritalarının üretilmesi çalışmalarında da kullanılabilir.

Bu çalışmada; yersel lazer tarayıcıların mağara ölçüm işlemlerinde kullanılabilirliğinin araştırılması amacıyla, Tozman mağarasının giriş bölümü, uçuş zamanı prensibine göre çalışan yersel lazer tarayıcı kullanılarak taranmıştır. Arazi çalışmaları sonucunda, taranan bu alana yönelik veriler bilgisayar ortamında işlenerek giriş bölüne ait ürünler üretilmiştir. Bu kapsamda çalışma alanına ait enine ve boyuna kesitler ile alanın planı ve bazı bölümlerinin 3 boyutlu modelleri oluşturulmuştur. Çalışma sonucundaki deneyimler, yersel lazer tarayıcıların mağara ölçümlerinde çalışma alanının özelliğine bağlı olarak uygun olduğu görülmüştür.

## 2. YERSEL LAZER TARAMA TEKNOLOJİLERİ VE MAĞARA ÖLÇMELERİ

Yersel lazer tarama yöntemi, objelerin doğrudan, hassas ve otomatik olarak 3 boyutlu koordinatlarının elde edilmesini sağlayan bir teknolojidir [5]. Yersel lazer tarayıcı sistemleri çok kısa bir sürede fiziksel verilerinin hassas ve yoğun bir şekilde ölçülmesine olanak tanımaktadır. Yersel lazer tarayıcılar çalışma ilkelerine göre farklılıklar göstermektedir. Bunlar; üçgenleme, faz karşılaştırma ve lazer ışını uçuş zamanı ölçüm yöntemlerini kullanan cihazlardır [6]. Lazer ışını uçuş zamanı yöntemi ve faz karşılaştırma yöntemine göre çalışan lazer tarayıcılar, birkaç yüz metreye varan mesafe ölçümü ve toplam mesafeye bağlı olarak birkaç milimetreden santimetreye kadar olan hassasiyeti nedeniyle uzun mesafeli ve büyük nesnelerin taranmasında ağırlıklı olarak kullanılmaktadır. Üçgenleme sistemli tarayıcılar daha çok küçük boyutlu nesnelerin hassas tarama işlemleri için kullanışlıdır [7,8].

Yersel lazer tarama teknolojileri, sahip olduğu özelliklerden dolayı kendisine birçok kullanım alanı bulmuştur [4]. Genel olarak lazer tarama teknolojilerinin kullanıldığı alanlar incelendiğinde, tersine mühendislik uygulamaları [9], yapılarıdaki değişimin incelenmesi [10], deformasyon ölçmeleri [11], kültürel mirasın belgelenmesi [3,7,12], jeolojik uygulamalar [13] vb. alanlar karşımıza çıkmaktadır. Son zamanlarda 3 boyutlu veriye olan gereksinim, birçok araştırma alanı gibi, mağaracılık alanında da yersel lazer tarayıcıların kullanılmasını gerekli kılmıştır. Özellikle mağaraların düzgün olmayan geometrisi ve karmaşık yapısından dolayı, bu alanların görselleştirilmesi, 3 boyutlu veri elde edilmesi ve 3 boyutlu modellenmesi gibi uygulamalarda yersel lazer tarayıcıların kullanılması çok büyük avantajlar sağlamaktadır.

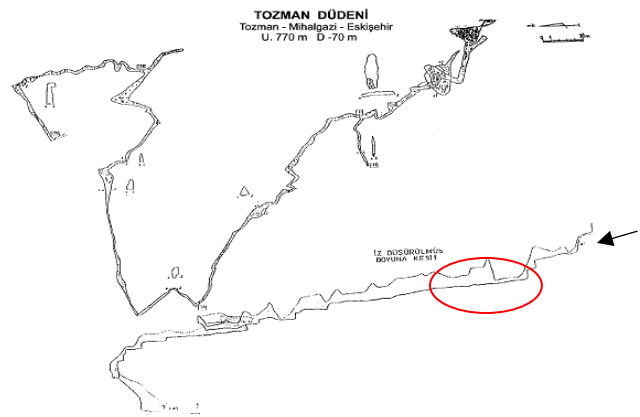
Yersel lazer tarayıcıların mağara ölçmelerinde kullanımı ile ilgili literatür incelendiğinde, Aguilera vd. [8] İspanya'da yontma taş devrinden kalan ve arkeolojik buluntulara sahip olan Peña de Candamo ve Las Caldas mağaraları lazer tarayıcı, total station ve dijital kamera ile elde ettikleri verileri birleştirerek mağaraların 3D modelini oluşturmuşlardır. Çalışmada lazer tarayıcı verilerinden Las Caldas mağarasının vektör ve eş yükselti haritasını üretmişler ve ayrıca mağara içinde iki adet ulaşılamayan galeri tespit etmişlerdir. Kordic vd. [14] Hırvatistan'da bulunan Kuća mağarasını koruma altına alma ve belgeleme amaçlı yaptıkları çalışmada yersel lazer tarayıcıdan elde ettikleri veriler ile mağaranın 3 boyutlu modelini üretmişlerdir. Benzer şekilde Roncat vd [1] Avusturya'da yer alan Märchenhöhle mağarasının 3 boyutlu

modelini üretmişlerdir. Buchroithner M.F vd. [15] görselleştirme amaçlı Avusturya Alplerinde yer alan ve dünyanın en büyük buz mağarası olan Eisriesenwelt mağarasının yersel lazer tarayıcı ile ölçümünü yapmış ve elde ettikleri nokta bulutunu görselleştirme amaçlı kullanmışlardır.

### 3. ÇALIŞMA ALANI

Çalışmanın yapıldığı Tozman mağarası, Sakarya Nehri kenarındaki Mihalgazi İlçesi'nin yaklaşık 15 km kuzeybatısında bulunan Tozman Yaylası'nın Yenipazar'a (Bilecik) bakan kuzey sınırında yer almaktadır. 1085 metre kotunda yer alan mağara, kuzeye doğru (Yenipazar) yatay gelişmiş ve iki girişi olan aktif-yarı aktif bir yapıya sahip olup 770 metre uzunluğa ve 70 metre derinliğe sahiptir (Şekil 1). Sakarya Nehri tarafından derince yarılan yüksek (1200-1300 m) platoluk bölgede bulunan mağaraya; Eskişehir-Sarıcakaya-Mihalgazi-Çayköy-İnhisar veya Eskişehir-Söğüt-İnhisar-Çayköy-Mihalgazi yollarından ulaşılabilir [16].

Tozman mağarası, Sarıcakaya Granatıyodi ile Jura yaşlı Bilecik Kireçtaşları'nın dokanağında, kuzeybatı-güneydoğu doğrultulu belirgin bir fay ve kuzeydoğu-güneybatı kırık-çatlak düzlemlerine bağlı olarak Bilecik Kireçtaşları içinde gelişmiştir. Mağara kafesli bir yapıya sahip olup Yenipazar polyesine (kuzeye) doğru eğimlidir. İçeride kuvvetli su akımını karakterize eden sivri girinti ve çıkıntılar ile yüksekliği 5-10 m arasında değişen çok sayıda iniş bulunmaktadır. Tavan yüksekliği yer yer ~15 m'ye ulaşan mağaranın genişliği ise ortalama 2.5 m'dir. Tabanındaki çakıl ve kumdan oluşan adacık veya setler ile bloklar bulunan mağarada; damlataş oluşumları çok azdır [16]. Tozman mağarasının beslenme alanında yüzeylenen yaklaşık 7.2 km<sup>2</sup>'lik Sarıcakaya Granitoyidinden drene olan yüzey suları, noktasal olarak her iki girişten mağaraya girmekte ve kireçtaşı kütlelerinin yaklaşık 2.5 km kuzeyinde ve 800 m kotunda bulunan Döşkaya Kaynağında açığa çıkmaktadır. Söz konusu noktada yüzeye çıkan sular sırasıyla Yenipazar Havzasını ve Harmanköy Boğazını kat ederek Sakarya Nehrine ulaşmaktadır [17]. Nazik vd. tarafından yapılan çalışmada, Tozman mağarası içinde 5 noktada yapılan mutlak nem ve sıcaklık ölçümleri sırasıyla % 57-94 ve 10.5-18.0 °C arasında değiştiği belirtilmektedir [18].



Şekil 1. Tozman Mağara girişi ve MTA tarafından (Nazik vd., 2001) çizilen mağara haritası

Çalışma kapsamında, Tozman mağarasının iç bölümünde bulunan ve Şekil 1'de kırmızı çember ile gösterilen geniş galerinin taranması planlanmıştır. Ancak lazer tarayıcı ekipmanının boyutlarının büyük olması ve mağara girişinden 12 metre sonra bulunan dar geçitten dolayı bu ekipmanlar mağaranın sonraki bölümlerine geçirilememiştir. Dolayısı ile bu çalışma kapsamında Tozman mağarasının giriş bölümünün taraması yapılmış, tarama sonrası elde edilen verilerin değerlendirilmesi sonucunda mağaraya ait kesitler ve 3 boyutlu modeller elde edilmiştir.

## 4. YÖNTEM, DEĞERLENDİRME VE BULGULAR

Tozman mağarasının giriş bölümüne ait tarama işleminin yapılması ve bu alana ait ürünlerin üretilmesi, 4 iş adımıdan oluşmaktadır. Bu iş adımları Şekil 2’de verilmektedir.



Şekil 2. Mağaranın ölçülmesinde izlenen iş akış planı

### 4.1 Tarama İş Planı

Tarama iş planı aşamasında; tarama işleminin gerçekleştirileceği istasyon konumları, tarama yapılacak istasyon sayıları, taramanın konumsal çözünürlüğü ve taramanın yapılacağı koordinat sistemi belirlenir [10].

Tarama istasyon sayısı ve yerleri taranacak alanın tamamını kapsayacak ve gölgede alan bırakmayacak şekilde seçilmesi gerekir. Ancak bu çalışmada mağaranın mevcut durumu, mağara içinde istenilen alana alet kurma imkanı tanımadığından dolayı, çalışma alanının izin verdiği ölçüde uygun olan iki nokta üzerinde tarama işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu noktalar üzerinde cihaz düşeyde mağaranın üst bölümünü ve zeminini tarayacak şekilde döndürülerek ilk noktada 2, ikinci noktada ise 3 farklı pozisyonda tarama yapılmıştır.

Taramanın konumsal çözünürlüğü, tarayıcının mesafe ölçüm hassasiyeti ile hangi sıklıkta nokta ölçmesini belirten açısal çözünürlüğe bağlıdır [10]. Çalışmada kullanılan lazer tarayıcı 50 metreye kadar 6 mm hassasiyetinde mesafe ölçümü yapabilmektedir [19]. Çalışma alanında tarama istasyonları ile taranan en uzak alan arasında ki mesafe 50 metreden daha küçüktür. Açısal çözünürlük tarayıcı ile taranan obje arasında değişen mesafeye göre belirlenmesi gerekir. Taranan nesne ile tarayıcı arasında mesafe arttıkça daha sık aralıklarla ölçüm yapabilmek için açısal çözünürlüğün artırılması gerekir. Bu çalışma kapsamında, tarayıcı ile taranan nesnelere arasındaki mesafe çok yakın olduğunda taramanın açısal çözünürlüğü genel olarak  $0.12^\circ$  gibi standart bir değer alınması uygun görülmüştür.

Tarama iş planlaması aşamasında taramanın hangi koordinat sisteminden yapılacağı belirlenmelidir. Tarama koordinat sistemi jeodezik veya lokal bir koordinat sistemi olabilir. Bu çalışma kapsamında çalışma alanı jeodezik bir koordinat sisteminin kullanılmasına olanak tanımadığından, ilk tarama istasyonunun alet merkezli koordinat sistemi, proje koordinat sistemi olarak belirlenmiştir.

### 4.2 Tarama İşleminin Yapılması

Mağara giriş bölümünün tarama işleminde, Riegl marka LMS Z-390i model 3 boyutlu lazer tarayıcı

kullanılmıştır. Bu lazer tarayıcı, lazer ışını gidiş—geliş zamanı ilkesine göre çalışmaktadır. Normal ışık ve yansıtma şartları altında 50 metre mesafede 6 mm hassasiyete sahip ve 1.5 – 400 metre arasında ölçüm yapabilmektedir. Tarayıcıdan çıkan lazer ışını yakın kızılötesi ve 0.7  $\mu\text{m}$  – 1.3  $\mu\text{m}$  arasında değişen dalga boyuna sahiptir. Tarayıcı 80° düşey eksen ve 360° yatay eksen yönünde dönme kabiliyetine sahiptir. Cihazın açısız çözünürlüğü 0.001° değerine kadar artırılabilir olup saniyede 8000 — 11000 arası nokta verisi elde edebilme kapasitesine sahiptir [19,20].

Tarayıcı, objelere ait gerçek renk verisini elde etmek için kalibre edilmiş Nikon D200 kamera ile bütünleşik bir şekilde çalışmaktadır. Bu kamera 10.3 megapiksel DX formatlı CCD (Charge Coupled Device) sensore sahiptir. Nikon D200 kamera ile tarama işleminden sonra taranan alanın bindirmeli olarak fotoğrafları çekilmekte ve çekilen fotoğraflar nokta bulutunun renklendirilmesi için kullanılmaktadır. Riegl LMS Z-390i lazer tarayıcı “Riscan Pro” yazılımı tarafından kontrol edilmektedir. Bu yazılım, tarayıcının ve kameranın kontrolü ile verilerin toplanması, görselleştirilmesi, işlenmesi ve arşivlenmesi gibi birçok işlevi yerine getirmektedir [19,20].

Tarama işlemine geçmeden farklı istasyonlardan elde edilen nokta bulutlarının birleştirilmesi işleminde kullanılacak reflektörler uygun yerlere yerleştirilmiştir. Ardından belirlenen her bir tarama istasyonundan 3 farklı tarama işlemi yapılmıştır. Bu tarama işlemleri, tarayıcının bulunduğu konumdan gördüğü tüm alanı gösteren genel alan taraması, genel alan taraması üzerinden seçilen reflektörlerin hassas bir şekilde tarandığı reflektör taraması ve genel alan taraması üzerinden esas olarak taranacak alanın seçildiği ve yüksek açısız çözünürlükte yapılan detaylı alan taramasıdır [20]. Bu çalışmada detaylı alan taraması her bir istasyonda genel alan taramasının gördüğü alan kadar 0°—360° arasında ve daha yüksek açısız çözünürlükte yapılmıştır. Her bir istasyondan elde edilen detaylı alan taraması bilgileri Tablo 1’de gösterilmiştir. Tarama yapılacak alan ile tarayıcı arasındaki mesafe kısa olduğundan taramanın açısız çözünürlüğü 0.12° ve 0.11° olarak belirlenmiştir. Tarayıcı ile taranan nesne arasındaki mesafe 10 metre olduğu düşünülürse, açısız çözünürlük 0.12° seçildiğinde nokta örnekleme aralığı 2.1 cm, 0.11° seçildiğinde ise 1.9 cm olmaktadır. Genel olarak bu çalışmada tarayıcı ile taranan nesne arasındaki ortalama mesafe 10 metreden düşüktür. Ancak istasyonlardan yapılan taramalarda 10 metreden daha uzakta ve yakında olan alanlar taranmıştır. Mesafe 10 metreden fazla olduğunda nokta örnekleme aralığı 2.1 cm ve 1.9 cm daha büyük, mesafe 10 metreden az olduğunda nokta örnekleme aralığı 2.1 cm ve 1.9 cm daha küçük olmaktadır.

**Tablo 1.** Detaylı alan taramasına ilişkin bilgiler

İstasyon	Açısız Çözünürlük (°)	Ortalama Mesafe (m)	Tarama Süresi	Nokta Sayısı
1	0.11	7.70	4' 56"	2 378 744
2	0.12	7.70	4' 08"	1 998 000
3	0.12	5.60	4' 08"	1 998 000
4	0.12	5.60	4' 08"	1 998 000
5	0.12	5.60	4' 08"	1 998 000

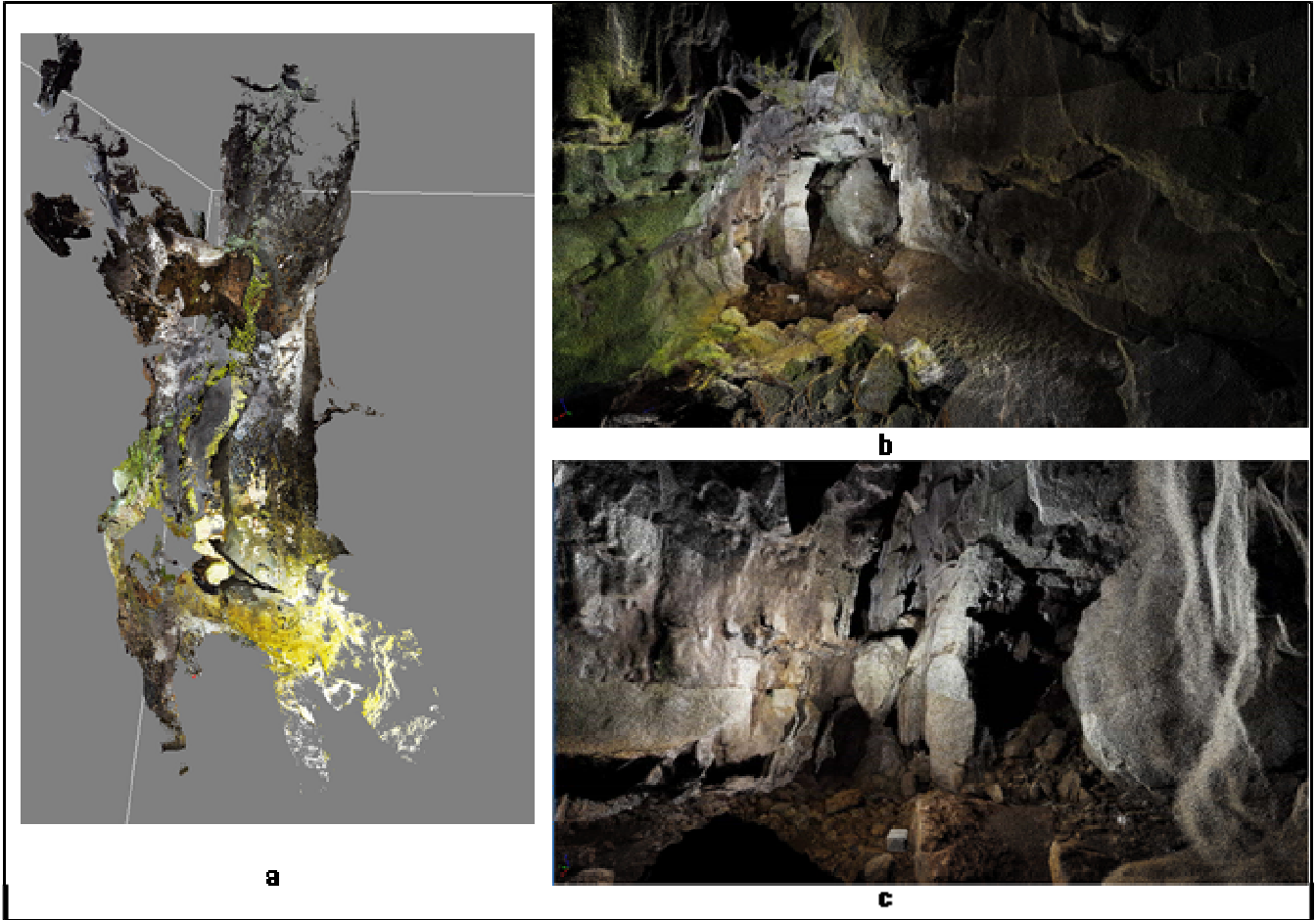
Detaylı alan taraması sonrası, taranan alanı kapsayacak şekilde nokta bulutlarının renklendirilmesinde kullanılacak fotoğraflar çekilmiştir. Mağaranın içi karanlık olduğundan fotoğraf çekimi aşamasında mağaranın içini aydınlatmak için fenerler kullanılmıştır.

### 4.3 Verilerin İşlenmesi

Verilerin işlenmesi farklı istasyonlardan elde edilen nokta bulutlarının birleştirilmesi ve nokta bulutlarının renklendirilmesi işlemini içermektedir. Nokta bulutlarının birleştirilmesi ve renklendirilmesi “Riscan Pro” yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Nokta bulutlarının renklendirilmesi için detaylı alan taraması sonrası

çekilen fotoğraflar kullanılmıştır. Çekilen fotoğraflar kullanılarak her bir istasyondan elde edilen nokta bulutları renklendirilmiştir.

“Riscan Pro” yazılımında, tanımlı olarak üç farklı koordinat sistemi bulunmaktadır. Bu koordinat sistemleri; tarayıcı koordinat sistemi, proje koordinat sistemi ve global koordinat sistemidir. Farklı istasyonlardan elde nokta bulutlarının birleştirilmesi için ortak bir proje koordinat sistemine dönüştürülmesi gerekir. Bu çalışma kapsamında, ilk istasyonun tarayıcı merkezli koordinat sistemi proje koordinat sistemi olarak belirlenmiş ve diğeri istasyonlardan elde edilen nokta bulutları bu koordinat sistemine dönüştürülmüştür. Şekil 3a’da, 5 istasyondan elde edilen birleştirilmiş 3 boyutlu nokta bulutunun tepeden görüntüsü ve Şekil 3b ve 3c’de ise mağaranın iç kısımlarına ait görüntüler yer almaktadır.



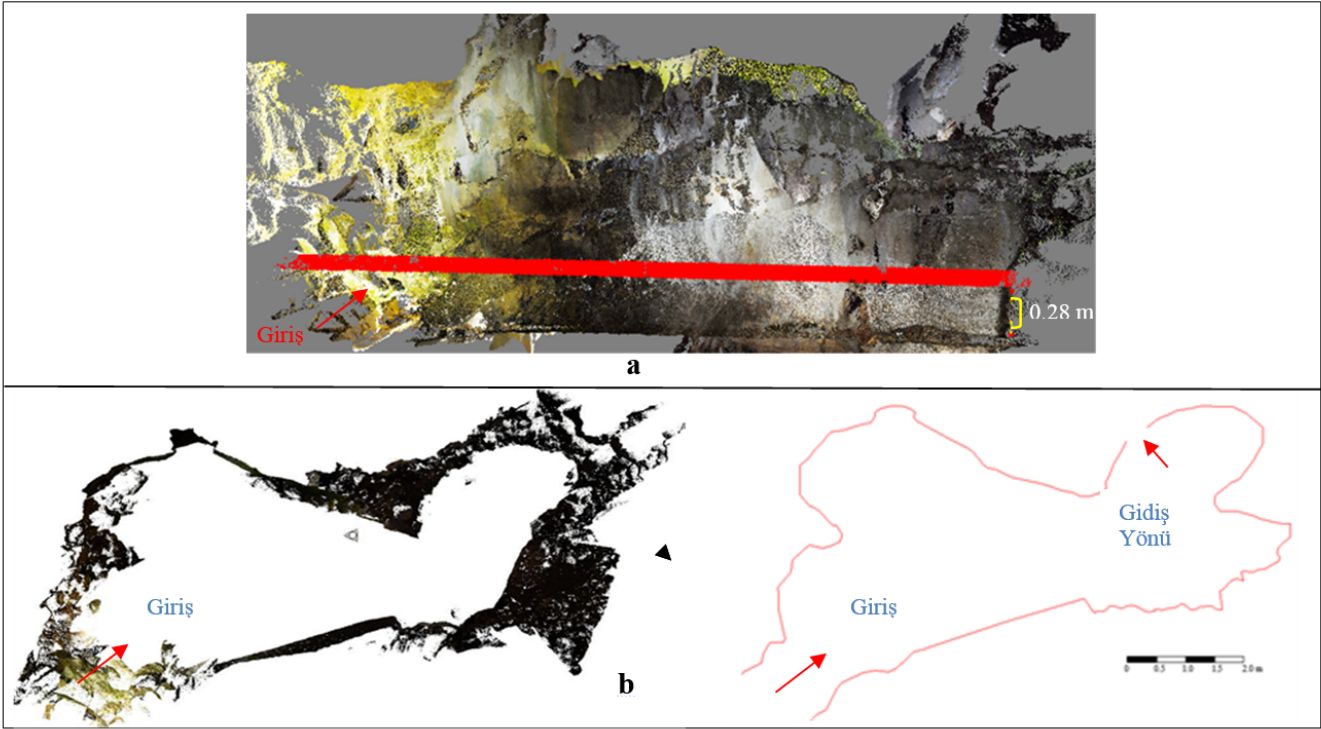
**Şekil 3.** (a) 5 istasyondan elde edilen birleştirilmiş nokta bulutunun tepeden görüntüsü ve (b, c) mağaranın nokta bulutu verisinden alınan iç mekan görüntüleri

#### 4.4 Mağaraya Ait Bulguların Çıkarılması

##### 4.4.1 Plan ve Kesit Çıkarımı

Çalışma kapsamında elde edilen 3 boyutlu nokta bulutu verisi kullanılarak taraması yapılan mağaranın giriş bölümüne ait farklı kesitler ve giriş bölümünün planı üretilmiştir. “Riscan Pro” yazılımında 3 boyutlu nokta bulutu üzerinden alınan kesitler “AutoCAD 2010” yazılımı içinde çalışan “PointCloud” yazılımı ile açılarak çizimler yapılmıştır.

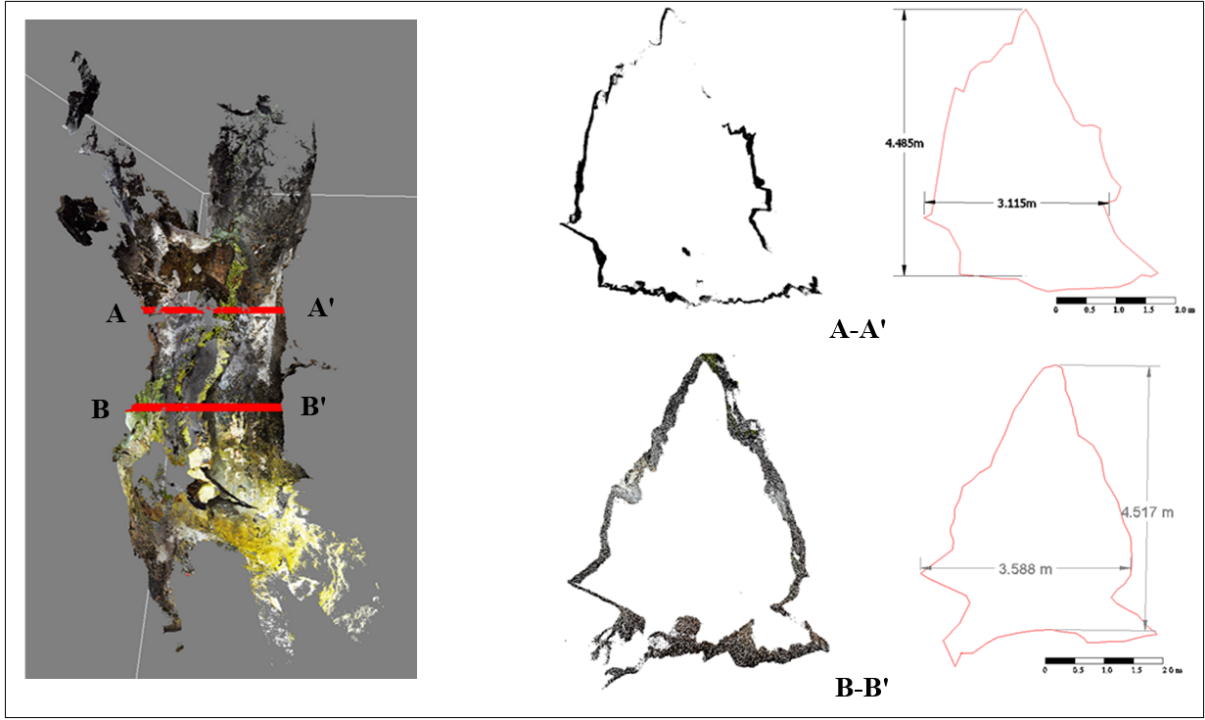
Mağarada elde edilen 3 boyutlu nokta bulutu üzerinden istenilen yükseklikten alınan yatay kesitler kullanılarak, mağaranın farklı yüksekliklerine ait planlar oluşturmak mümkündür. Çalışma kapsamında mağaranın mümkün olduğunca zeminine yakın yükseklikten alınan yatay nokta bulutu kesiti kullanılarak, giriş bölümüne ait plan oluşturulmuştur (Şekil 4). Şekil 4a'da nokta bulutu verisi üzerinden, zeminden 0.28 metre yukarıdan alınan yatay nokta bulutu Şekil 4b ise bu nokta bulutu üzerinden çizilen giriş bölümünün planını göstermektedir.



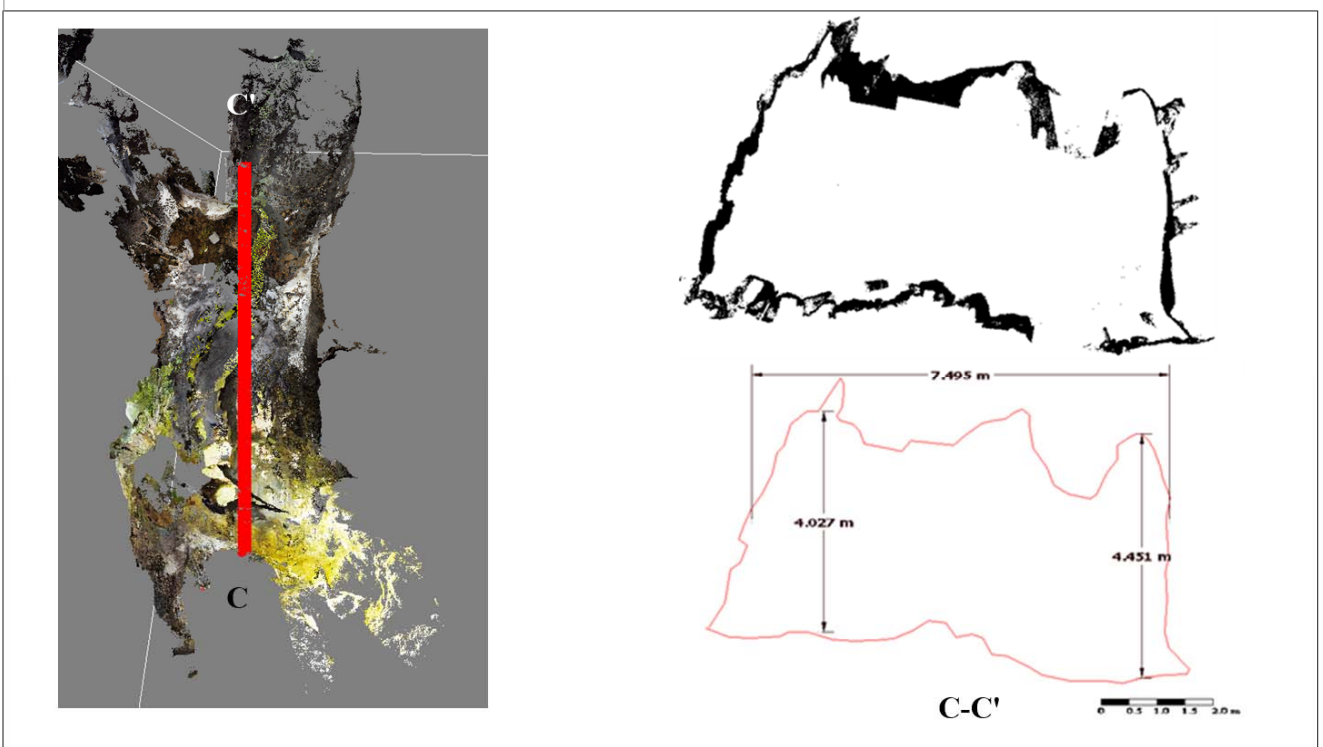
**Şekil 4.** (a) Mağaranın giriş bölümüne ait plan için nokta bulutundan alınan yatay kesit ve (b) yatay kesit üzerinden çizilen giriş bölümüne ait plan.

Çalışma kapsamında 3 boyutlu nokta bulutu üzerinden, boyuna ve enine alınan kesitler kullanılarak mağaranın iç kısmına ait kesit çizimleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 5'te sol tarafta nokta bulutu üzerinde alınan A-A' ve B-B' kesitleri ve sağ tarafta ise bu kesitleri üzerinden yapılan çizimler verilmektedir. Şekil 6'da sol tarafta nokta bulutu üzerinden alınan C-C' kesiti ve sağ tarafta ise bu kesit üzerinden yapılan çizim gösterilmektedir.





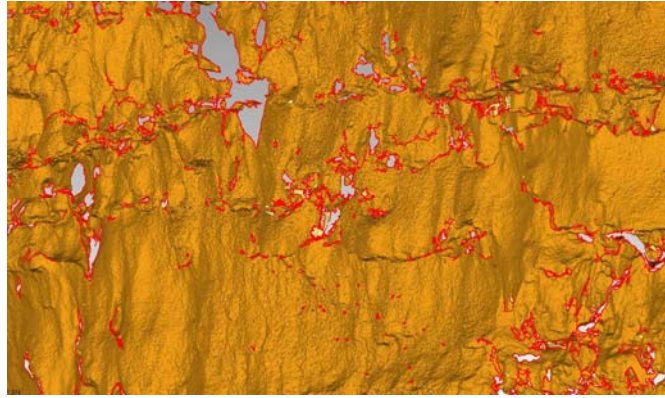
**Şekil 5.** Enine kesit çizimleri (Sol tarafta nokta bulutu üzerinden alınan A-A' ve B-B' kesitlerine ait çizimler)



**Şekil 6.** Boyuna kesit çizimi. (Sol tarafta nokta bulutu üzerinden boyuna alınan C-C' kesiti; sağ tarafta C-C' nokta bulutu kesiti üzerinden yapılan çizim)

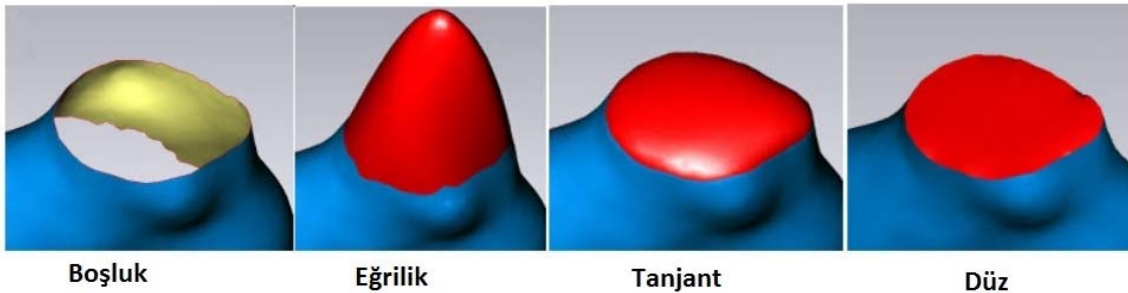
#### 4.4.2 3 Boyutlu Model Üretimi

Yersel lazer tarayıcılardan elde edilen nokta bulutu verisi kullanılarak mağaraların 3 boyutlu modellerinin üretilmesi mümkündür. Bu çalışmada, mağara zemininde, cihaz kurmaya elverişli alanının kısıtlı olmasından dolayı girişi bölümünün tamamına ait 3 boyutlu model üretilmemiştir. Çünkü 3 boyutlu model oluşturma aşamasında kullanılan üçgenleme işleminde veri eksikliğinden dolayı hatalar ortaya çıkmaktadır. Bundan dolayı mağaranın duvarlarından başarılı bir şekilde taranan yüzeyler üzerinden alınan nokta bulutları kullanılarak modelleme işlemi, “Geomagic Studio 2012” yazılımında gerçekleştirilmiş ve mağara duvarlarına ait 3 boyutlu katı model üretilmiştir. 3 boyutlu modeller üretilirken üçgenleme aşamasında, veri eksikliğinden dolayı noktasız alanlarda bozuk üçgenler ve üçgenlenmeyen boş alanlar ortaya çıkmıştır. Şekil 7’de kırmızı olarak görülen alanlar boşluk olarak kalan alanlardır. Bu boşluk alanlar “Geomagic Studio 2012” yazılımında otomatik olarak düzeltilebileceği gibi elle de düzeltilebilmektedir.



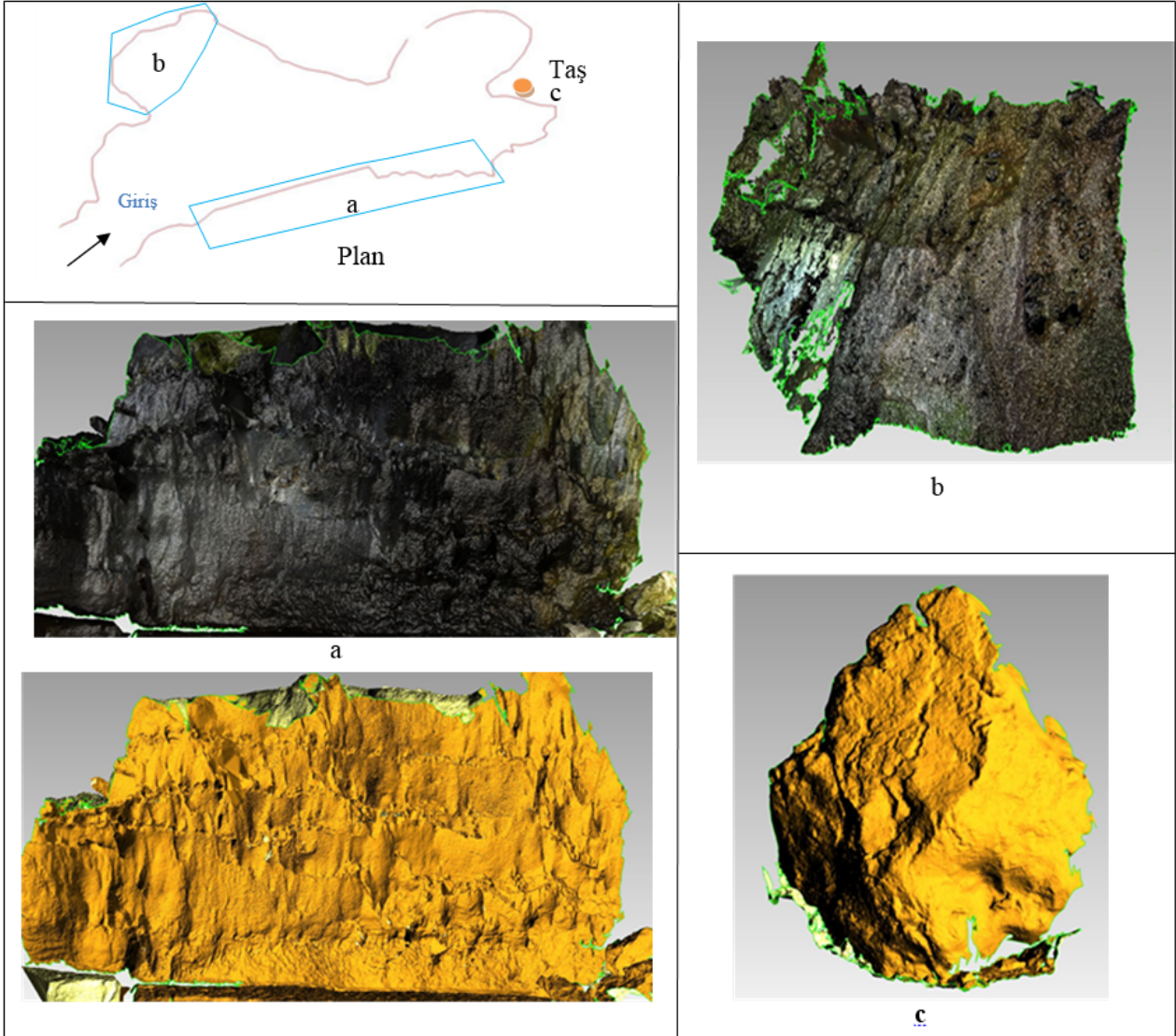
**Şekil 7.** 3 boyutlu model oluşturulurken oluşan boşluk alanlar (kırmızı alanlar).

Geomagic Studio yazılımında boşluk kalan alanların üçgenlenmesinde üç farklı teknik kullanılabilir. Bunlar üçgen oluşturmada kullanılan eğrilik (Curvature), tanjant (tangent) ve düz (flat) üçgenleme teknikleridir. (Şekil 8). Eğrilik tekniğine göre üçgenlemede seçilen boşluk, etrafındaki yüzey ağı modellerinin (mesh) eğriliği ile karşılaştırarak üçgenlenir. Tanjant tekniğine göre üçgenlemede eğrilik tekniğine benzer olarak, üçgenlenecek boşluk etrafındaki yüzey ağı modellerinin eğriliği ile karşılaştırılarak üçgenlenir. Fakat bu teknikte sivrilme eğrilik tekniğine göre daha dar bir açı ile olur. Düz üçgenleme tekniğinde ise seçilen boşluk genel olarak düz bir şekilde üçgenlenerek yüzey ağı modeli elde edilir [21]. Çalışma kapsamında model üzerinde oluşan boşluk alanlar otomatik olarak ve otomatik doldurmada sonucu yanlış doldurulan boşluklar ise elle tek tek seçilerek üçgenleme yapılmıştır. Bu çalışmada yapılan denemeler sonucu otomatik boşluk doldurma işlemi için en uygun tekniğin tanjant tekniği olduğu görülmüştür. Bundan dolayı modeller üzerinde boşluk alanların otomatik doldurulmasında tanjant üçgenleme tekniği kullanılmıştır. Elle yapılan boşluk doldurma işleminde ise yerine göre her üç teknikten de yararlanılmıştır.



**Şekil 8.** Geomagic Studio 2012 yazılımında duvarların modellenmesinde boşluk kalan alanların doldurulmasında kullanılan üçgenleme teknikleri

Modelleme aşamasında mağaranın duvarlarının ayrı ayrı modelleri oluşturulmuştur. Mağara içinde aydınlatma yetersiz olduğundan oluşturulan modellerin görselliği açısından modeller orijinal renginden farklı renklerle gösterilmiştir. Şekil 9'da giriş bölümüne ait plan üzerinde gösterilen alanlara ait 3 boyutlu modeller üretilmiştir. Şekil 9a plan üzerinde gösterilen a duvarına ait 3 boyutlu modelin orijinal ve yapay renklendirilmeli hali gösterilmiştir. Şekil 9b'de plan üzerinde gösterilen b duvarına ait 3 boyutlu model orijinal renginde gösterilmiştir. Şekil 9c'de ise mağara içinde bulunan ve plan üzerinde konumu gösterilen taşın 3 boyutlu modeli gösterilmiştir. Şekiller üzerindeki yeşil çizgiler model sınırlarını göstermektedir.



Şekil 9. Plan üzerinde gösterilen a, b ve c alanlarına ait 3 boyutlu modeller.

## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada Tozman mağarasının giriş bölümü yersel lazer tarayıcı ile taranmıştır. Tarama sonucunda elde edilen veriler bilgisayar ortamında modelleme ve çizim yazılımlarında işlenerek, mağaranın giriş bölümünün planı, bu bölüme ait boyuna kesitler ve enine kesitler elde edilmiştir. Yapılan bu çalışmanın sonuçlarını şu şekilde sıralamak mümkündür.

- ❖ Yersel lazer tarayıcılar mağara ölçümlerinde 3 boyutlu veri toplamada etkin araçlardır. Modellerden çizgisellik analizi yapılarak mağaranın hakim kırık çatlak sistemi belirlenebilir. Özellikle aktif fayların üzerinde oluşmuş mağaralarda bölgenin depremselliği ile ilgili bilgiler üretilebilir.
- ❖ Yersel lazer tarayıcılardan elde edilen 3 boyutlu nokta bulutu verileri kullanılarak mağaralarının haritalarının, kesitlerinin ve planlarının üretilmesi mümkündür.
- ❖ Nokta bulutundan üretilen mağara oluşumlarının 3 boyutlu modelleri yorumlanarak mağaranın oluşumu ile ilgili bilgilerin çıkarılması mümkündür.
- ❖ Yersel lazer tarama yöntemi veri toplama işleminde hızlı ve hassas bir yöntem olmasına karşılık, taranacak alanın taramaya uygun olması son derece önemlidir. Özellikle mağara gibi alanlarda cihazın kurulacağı ve mağaranın tüm detaylarını içine alacak şekilde tarama işlemlerinin gerçekleştirilmesi, mağaraların doğal yapılarından dolayı kolay değildir. Bundan dolayı bir mağaranın tamamının haritasının üretilmesinde birden fazla teknik ve yöntemin birlikte kullanılması gerekebilmektedir.
- ❖ Mağaraların haritalarının veya modellerinin üretilmek istendiği çalışmalarda, ölçüm işlemine geçmeden önce mağaranın fiziki şartlarının neler olduğu, bu alanlarda hangi alet ve ekipmanın kullanılacağı belirlenmesi ve buna göre bir planlama yapılması son derece önemlidir.

## 6. KAYNAKLAR

1. A. Roncat, A., Dublyansky, Y., Spötl, C., Dorninger, P." Full-3D Surveying of Caves: A Case Study of Märchenhöhle (Austria)" Peer-reviewed IAMG 2011 publication doi:10.5242/iamg.2011.0074.
2. Mağaracılıkta Ölçme Bilgisi ve Haritacılık, TMB, Eğitim Yayınları fasikül ÖU 3- 2007.
3. Al-Khedera, S., Al-Shawabkeh, Y., Haala, N.,"Developing a Documentation System for Desert Palaces in Jordan Using 3D Laser Scanning and Digital Photogrammetry", Journal of Archaeological Science 2009, vol: 36, Issue: 2 pages: 537-546
4. Lichti, D. D., Gordon, S. J.,"Error Propagation in Directly Georeferenced Terrestrial Laser Scanner Point Clouds for Cultural Heritage Recording", FIG Working Week, Athens, Greece, May 22-27, 2004.
5. Reshetyuk, Y. "Self-Calibration and Direct Georeferencing in Terrestrial Laser Scanning", Doctoral thesis in Infrastructure, Geodesy, Royal Institute of Technology (KTH), Department of Transport and Economics Division of Geodesy, 2009.
6. Böhler, W., Marbs, A. "3D scanning instruments", ISPRS/CIPA International Workshop on Scanning for Cultural Heritage Recoding , Corfu, Greece, 2002 pages.9-12
7. Yastikli, N. "Documentation of Cultural Heritage Using Digital Photogrammetry and Laser Scanning", Journal of Cultural Heritage, 2007 vol. 8 issue. (4): pages 423-427.
8. Diego González-Aguilera, G. D., Nieto , M. A., Lahoz, G. J., Pascual, H. J. Gabriel Gutierrez-Alonso G. G. "3D Digital Surveying and Modelling of Cave Geometry:Application to Paleolithic Rock Art", Sensors, 2009, vol:9 pages 1108-1127.
9. S. Larsson, J.A.P. Kjellander " Motion control and data capturing for laser scanning with an industrial

- robot" *Robotics and Autonomous Systems* 54 (2006) 453–460.
10. B. Riveiro, P. Morer, P. Arias, I. DE ARTEAGA "Terrestrial Laser Scanning and Limit Analysis of Masonry Arch Bridges", *Construction and Building Materials*, 2011 vol:25 issue (4): pages 1726-1735.
  11. A. Abellán , J. Calvet, J. M. Vilaplana, J. Blanchard "Detection and spatial prediction of rockfalls by means of terrestrial laser scanner monitoring" *Geomorphology* 119 (2010) 162–171.
  12. Erginçan F., Çabuk A., Avdan U., Tun, M., "Advanced technologies for archaeological documentation: Patara case", *Scientific Research and Essays Vol. 5(18)*, pp. 2615-2629, 18 September, 2010.
  13. Dunning S. A., Massey C.I., Rosser N.J., "Structural and geomorphological features of landslides in the Bhutan Himalaya derived from Terrestrial Laser Scanning", *Geomorphology*, 2009, pp.17-29.
  14. B.Kordic, A. Dapo and B. Pribicevic "Application of Terrestrial Laser Scanning in the Preservation of Fortified Caves" FIG Working Week 2012 Knowing to manage the territory, protect the environment, evaluate the cultural heritage Rome, Italy, 6-10 May 2012.
  15. Buchroithner, F. M., Gaisecker, T., Gaisecker, D., Österreich, H., "Terrestrial Laser Scanning for the Visualization of a Complex Dome in an Extreme Alpine Cave System", *Geoinformation*, 4/2009, pp.329-339.
  16. [http://www.tayproject.org/Magara.fm\\$Retrieve?MagaraNo=12033&html=cave\\_detail\\_t.html&layout=web](http://www.tayproject.org/Magara.fm$Retrieve?MagaraNo=12033&html=cave_detail_t.html&layout=web)
  17. Aydın H., "Harmanköy-Beyayla (Bilecik) Karst Sisteminin Morfoloji-Hidrojeoloji İlişkileri Açısından İncelenmesi", Hacettepe Üniversitesi, fen Bilimleri enstitüsü, Doktora Tezi, Ankara, 2005
  18. Nazik,L., Törk, K., Acar, C., Özel, E., Mengi, H., Aksoy, B., Tuncer, K., Güner, İ. N., Ekmekçi, M. ve Başal, A. "Orta Sakarya Havzasının (Eskişehir ve Bilecik doğusu) Doğal Mağaraları", *Jeoloji Etüdler Dairesi, MTA Derleme No: 10420*, Ankara, 179 s, 2001
  19. Riegl Laser Measurement Systems, *Terrestrial Laser Scanner LMS-390i Technical Documentation ad Users Instructions*.
  20. Çömert, R., Avdan, U., Tün, M., Ersoy, M. "Mimari Belgelemede Yersel Lazer Tarama Yönteminin Uygulanması (Seyitgazi Askerlik Şubesi Örneği)", *Harita Teknolojileri Elektronik Dergisi*, Cilt 4, Sayı 1, Sayfa 1-18, 2012
  21. *Geomagic Studio Online Help (v2012)*.