

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HARİTA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**AYDINTEPE YERALTI ŞEHRİNİN YERSEL LAZER TARAMA İLE 3B
MODELLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ramazan PEKER

EKİM 2024

TRABZON



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HARİTA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**AYDINTEPE YERALTI ŞEHRİNİN YERSEL LAZER TARAMA İLE 3B
MODELLENMESİ**

Ramazan PEKER

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
"HARİTA YÜKSEK MÜHENDİSİ"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 19 / 09 / 2024

Tezin Savunma Tarihi : 15 / 10 / 2024

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Faruk YILDIRIM

Trabzon 2024

ÖNSÖZ

“Aydıntepe Yeraltı Şehrinin Yersel Lazer Tarama ile 3B Modellenmesi” isimli bu tez Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Harita Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Programı’nda hazırlanmıştır.

Hocam Sayın Prof. Dr. Faruk YILDIRIM’a teşekkür eder, minnettarlığımı sunarım.

Bu tez çalışmasının bundan sonraki çalışmalara katkı sağlamasını temenni ederim.

Ramazan PEKER
Trabzon 2024

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Aydıntepe Yeraltı Şehrinin Yersel Lazer Tarama İle 3B Modellenmesi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Faruk YILDIRIM’ın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 15/10/2024

Ramazan PEKER

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VII
SUMMARY	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ	IX
TABLolar DİZİNİ.....	XI
SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ	XII
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Problemin Tanımı.....	5
1.2. Tezin Amacı	6
1.3. Metodoloji	7
1.4. Yeraltı Yapıları.....	7
1.4.1. Mağaralar	7
1.4.2. Kapalı Maden Ocakları	8
1.4.3. Yeraltı Şehirleri.....	8
1.5. Yeraltı Yapılarının Haritalanmasının Önemi	9
1.6. Yeraltı Haritalama Teknikleri	10
1.6.1. Yeraltı Yapılarının Kroki Niteliğinde Haritalanması.....	11
1.6.2. Klasik Haritacılık Yöntemleri ile Yeraltı Yapılarının Haritalanması	14
1.6.3. Yersel LİDAR	20
1.6.4. Yersel LİDAR Teknolojilerinin Yeraltında Yeraltı Haritalamasında Kullanımı	24
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	26
2.1. Saha ve Ofis Çalışmaları	27
2.1.1. Yer Kontrol Noktalarının Tesisi ve Ölçümü.....	28
2.1.2. Lazer Tarama İşlemi	28
2.1.3. Nokta Bulutu Verilerinin Dengelenmesi.....	30
2.2. 3B Modele Ait Teknik Bilgiler	31
2.3. Yeraltı Şehrine Ait Elde Edilen Bilgiler.....	32

2.4. 3B Modelden 2B Harita Üretimi	34
3. BULGULAR VE TARTIŞMA	36
3.1. 3B Modellemenin Doğruluğu ve Hassasiyetinin Belirlenmesi	36
3.2. 2B Haritanın Kadastro Haritası ile Çakıştırılıp İrdelenmesi	39
3.3. 2B Haritanın Halihazır Harita ile Çakıştırılıp İrdelenmesi	41
3.4. 2B Haritanın İmar Planı ile Çakıştırılıp İrdelenmesi.....	42
3.5. 3B Modellemenin Mühendislik ve Restorasyon Çalışmalarında Kullanılması	43
4. SONUÇLAR.....	45
5. ÖNERİLER.....	47
6. KAYNAKLAR	48
ÖZGEÇMİŞ	

Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

AYDINTEPE YERALTI ŞEHRİNİN YERSEL LAZER TARAMA İLE 3B MODELLENMESİ

Ramazan PEKER

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Harita Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Faruk YILDIRIM
2024, 52 Sayfa

Yeraltı yapıları kapalı ve çalışılması zor olan yerlerdir. Yeraltı yapıları haritalama çalışmalarında, yerüstü haritalama yöntemleri ve klasik ölçme aletlerinin kullanılmasında güçlükler yaşanmaktadır. Bu yüzden, yeraltı haritalama çalışmalarına özgü teknikler geliştirilmiş ve klasik ölçme cihazlarında bazı modifikasyonlar yapılmıştır. Son zamanlarda teknolojiyle gelişen ve kendisine geniş kullanım alanı bulan lazer tarama cihazları kapalı ortam ve yeraltı yapılarının haritalama çalışmalarında kullanılmaya başlanmıştır. Lazer tarama cihazları, birçok yeraltı yapısında farklı amaçlar doğrultusunda kullanılmış olsa da yeraltı şehir haritalama çalışmalarında pek kullanılmadığı gözlemlenmiştir. Bu tez kapsamında, uygulama alanı olarak daha önce kapsamlı bir haritalama ve restorasyon çalışması yapılmamış olan Aydıntepe Yeraltı Şehri seçilmiştir. Aydıntepe Yeraltı Şehri gezici lazer tarama cihazı ile 3B taranmış ve yeraltı şehrine ait 3B model oluşturulmuştur. Yapılan kontrol ölçüleri ile 3B modelin doğruluğu test edilmiş olup hassasiyeti 16.9 mm olarak belirlenmiştir. Yeraltı şehrine ait 3B modelden 2B harita üretilerek mevcut haritalarla karşılaştırma yapılmıştır. Yapılan karşılaştırma sonucunda yeraltı şehrinin üstündeki mülkiyet yapısı ve yapılaşma durumu tespit edilmiştir. Ayrıca yapılan 3B modelin mühendislik ve restorasyon projelerine sağlayacağı katkılar irdelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Yeraltı Haritalama Teknikleri, Aydıntepe Yeraltı Şehri, Yersel Lazer Tarama, 3B Yeraltı Modellemesi, SLAM.

PhD. Thesis

SUMMARY

3D MODELING OF AYDINTEPE UNDERGROUND CITY USING TERRESTRIAL LASER SCANNING

Ramazan PEKER

Karadeniz Technical University
Geomatic Engineering Graduate Program
Supervisor: Prof. Dr. Faruk YILDIRIM
2024, 52 Pages

Underground structures are closed and difficult to work in. There are difficulties in using surface mapping methods and conventional surveying instruments for mapping underground structures. Therefore, techniques specific to subsurface mapping have been developed and some modifications have been made to conventional surveying instruments. Recently, laser scanning devices, which have developed with technology and have found a wide range of applications, have started to be used in the mapping of closed environment and underground structures. Although laser scanning devices have been used in many underground structures for different purposes, it has been observed that they have not been used much in underground city mapping studies. Within the scope of this thesis, Aydıntepe Underground City, where a comprehensive mapping and restoration study has not been carried out before, was selected as the application area. Aydıntepe Underground City was 3D scanned with a mobile laser scanning device and a 3D model of the underground city was created. The accuracy of the 3D model was tested with control measurements and the accuracy was determined as 16.9 mm. A 2D map was produced from the 3D model of the underground city and compared with the existing maps. As a result of the comparison, the property structure and construction status above the underground city were determined. In addition, the contributions of the 3D model to engineering and restoration projects were examined.

Key Words: Underground Mapping Techniques, Aydıntepe Underground City, Terrestrial Laser Scanning, 3D Underground Modeling, SLAM.

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1.	Mağara içerisinde kullanılan temel haritalama ekipmanları (a) Klinometre (b) Şeritmetre (c) Ölçüm karnesi ve not defteri (d) Pusula (Pekkan, 2018).....	12
Şekil 2.	Mağara haritalamasında uygulanan ölçüm teknikleri: a) Duvardan duvara b) Orta hat takibi c) Poligon oluşturma (Pekkan, 2018).....	12
Şekil 3.	Yeraltı (mağara) haritalarından örnekler (Pekkan, 2018).....	13
Şekil 4.	Not defteri kullanılmadan yapılan haritalamaya bir örnek (Pekkan, 2018).....	14
Şekil 5.	Yeraltı poligon geçkilerine örnek (Aydın, 2000)	15
Şekil 6.	Kavşak noktasında istasyon noktası seçme (Aydın, 2000).....	16
Şekil 7.	Düzgün bir galeride noktaların aynı doğrultu üzerinde alınması (Aydın, 2000).....	17
Şekil 8.	Detay gözlemleri için nokta yeri seçimi (Aydın, 2000)	17
Şekil 9.	Yeraltı ölçümleri için geliştirilen ölçme aletleri: (a) Asma teodolit, (b) Asma daire, (c) Asma (madenci) pusulası (Aydın, 2000)	18
Şekil 10.	Hassasiyetlerine göre gösterilen yeraltı poligonları (Aydın, 2000).....	19
Şekil 11.	Yersel lazer tarama cihazları: (a) sabit noktaya kurulan (Motif, 2024), (b) el ile taşınan (Geomatics, 2024), (c) insansız kara aracına monte edilen (Leica, 2024), (d) insansız hara aracına (İHA) monte edilen lazer tarayıcı (Skydata, 2024).....	21
Şekil 12.	Uçuş zamanı sistemi (Boehler & Marbs, 2002)	22
Şekil 13.	Yersel lazer tarayıcı cihazın çalışma prensibi (Vozikis vd., 2004)	23
Şekil 14.	Yersel lazer tarayıcı cihazın ölçüm prensibi (Staiger, 2003).....	23
Şekil 15.	Yeraltında lazer tarayıcıların kullanımlarına örnekler (BBC, Business Insider – Webtekno, 2024); (a) sabit noktaya kurulan, (b) el ile taşınan, (c) insansız hava aracına (İHA) monte edilen lazer tarayıcılar	25
Şekil 16.	Bayburt ilinin komşu şehirlere göre konumu (Coğrafya Hocası, 2021), b) Bayburt ili ve ilçeleri, c) yeraltı şehri tahmini sınırlarının gösterildiği uydu görüntüsü	26
Şekil 17.	Aydıntepe Yeraltı Şehri'nden görseller (Aydıntepe, 2021).....	27
Şekil 18.	Saha çalışması kapsamında kullanılan GNSS alıcısı (Geosystems, 2024).....	28
Şekil 19.	Saha çalışması kapsamında kullanılan yersel lazer tarama cihazı (Paksoytekniik, 2022)	29

Şekil 20.	Gexcel Heron Lite Color LİDAR tarama cihazının teknik özellikleri (Paksoyteknik, 2022)	29
Şekil 21.	Yeraltı Şehrine ait 3B modelin yandan görünümü	30
Şekil 22.	Yeraltı şehrine ait oluşturulan 3B haritanın üstten görünümü.....	31
Şekil 23.	3B modele ait küçük bir kesitin ekran görüntüsü	31
Şekil 24.	Yeraltı şehrinde aydınlatmanın yetersiz veya hiç olmadığı yerlere ait nokta bulutu verisinden görüntüler	32
Şekil 25.	Odaların ve bağlandıkları hollere ait ekran görüntüsü	33
Şekil 26.	(a) Yeraltı şehrinin giriş tarafındaki sahanlık alan, (b) yeraltı şehrinin çıkış tarafındaki sahanlık alan	34
Şekil 27.	Yeraltı şehrine ait oluşturulan 3B haritanın üstten görünümü.....	35
Şekil 28.	Yeraltı Şehrine ait 3B haritanın uydu görüntüsü ile karşılaştırılmış hali	35
Şekil 29.	3Dserver programının ara yüz ekran görüntüsü	37
Şekil 30.	(a) yeraltı şehrinden alınan kontrol ölçüsü, (b) 3B modelden sorgulanan mesafe ölçüsü.....	37
Şekil 31.	(a) yeraltı şehrinden alınan kontrol ölçüsü, (b) 3B modelden sorgulanan mesafe	38
Şekil 32.	Aydıntepe Yeraltı Şehri'nin 2B haritası ile Aydıntepe ilçesinin kadastro haritasının karşılaştırılmış hali.....	39
Şekil 33.	Aydıntepe Yeraltı Şehri'nin 2B haritası ile Aydıntepe ilçesi hâlihazır haritasının karşılaştırılmış hali.....	41
Şekil 34.	(a) kale kısmında meydana gelen göçükler, (b) mezarlık kısmında meydana gelen göçük	42
Şekil 35.	Aydıntepe Yeraltı Şehri'nin 2B haritası ile Aydıntepe ilçe merkezi imar planının karşılaştırılmış hali	43

TABLolar DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. 3B modelin kontrolü için yerinden alınan ölçüler ile modelden sorgulanan ölçüler.....	38
Tablo 2. Yeraltı şehrinin üstünde bulunan kadastral parsel listesi	40



SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ

2B/2D	: 2 Boyutlu
3B/3D	: 3 Boyutlu
GNSS	: Küresel Konum Belirleme Sistemi (Global Navigation Satellite Systems)
GML	: Giyilebilir Mobil LİDAR
GPS	: Küresel Konumlama Sistemi (Global Positioning System)
LİDAR	: Light Detection and Ranging
SLAM	: Simultaneous Localization and Mapping

1. GENEL BİLGİLER

Yeraltı yapıları, doğal süreçlerle oluşmuş mağaralar, maden galerileri, tüneller ve eski çağlardan kalan yeraltı şehirleri gibi çeşitli yapıları içerir. Bu yapılar, karanlık, nemli, tozlu, sıcak, girintili çıkıntılı ve düzensiz şekilli olduklarından, haritalama ve ölçüm çalışmaları için zorlu ortamlardır. Sıcaklık değişimleri, dar geçitler ve düzensiz duvarlar, klasik ölçüm aletleri ve yöntemlerinin etkin kullanılmasını zorlaştırmaktadır. Yeraltı yapılarının haritalanması; doğal ve kültürel mirasın korunması, restore edilmesi, turizme açılması, kapalı maden ocaklarında üretimin artırılması ve üretim miktarının hesaplanması, bir tehlike durumunda bu yeraltı yapılarının içerisinde bulunan canlıları arama ve kurtarma çalışmaları, bu alanlardaki deformasyonların incelenmesi gibi birçok sebepten dolayı önemlidir.

Klasik ölçme aletleri ve yöntemleri yer üstünde etkin bir şekilde uygulanabilse de yeraltı yapılarında aynı başarıyı sağlayamamaktadır. Bu sebeple, yeraltı yapılarının haritalanması için özel ölçme teknikleri ve cihazlar geliştirilmiştir. Son yıllarda teknoloji ile gelişen lazer tarama sistemleri, mağaralar ve yeraltı şehirleri gibi kapalı ortamların haritalanmasında önemli yenilikler sunmakta ve son derece ayrıntılı 3B haritalar üretme olanağı sağlamaktadır. Lazer tarama cihazları, yoğun 3B nokta bulutu verisi üreterek, dar, karanlık ve karmaşık yapılar için yüksek doğrulukta modeller oluşturur. Yüksek hassasiyetli ve detaylı veri toplama kapasitesi sayesinde, lazer tarama cihazları yeraltı yapılarında haritalama çalışmalarını çok daha etkin bir hale getirmektedir. Bu sistemler, özellikle girintili çıkıntılı ortamlarda klasik yöntemlere kıyasla daha fazla bilgi sunarak, mühendislik ve restorasyon projelerine yüksek doğrulukta 3B modeller oluşturulmasına olanak vermektedir (Karşıdağ, 2011a; Lichti & Gordon, 2004).

Mevcut nesne ve yapıların durumlarını tespit etmek için geniş bir üç boyutlu konum verisi setine ihtiyaç duyulmaktadır. Lazer tarayıcılar aracılığıyla oluşturulan nokta bulutları, bu verilerin binlercesini içerir ve üç boyutlu modellerin kolayca oluşturulmasını sağlamaktadır. Bu noktalar; ölçüm verileri, ortofoto görüntüler, çizimler, animasyonlar, katı yüzey ve doku kaplanmış modeller oluşturmak için kullanılabilir. Lazer tarayıcılar, hızlı, temassız ve güvenli veri toplama imkânı sunarak ölçüm süreçlerini büyük ölçüde kolaylaştırmaktadır. Ayrıca, farklı ölçüm türleriyle entegrasyon ve gerçek renkli görüntü üretimi de lazer taramanın avantajlarından (Altuntaş & Yıldız, 2008).

Bina, baraj, tünel ve köprü gibi mühendislik yapılarının yanı sıra yeraltı Şehirlerinin geometrisi, zamanla çeşitli nedenlerden dolayı deęiŐebilir. Bu nedenler arasında yapısal ya da projelendirme hataları, tektonik hareketler, iklimsel faktörler, çevredeki kazı çalışmaları ve çarpık kentleŐme yer alabilir. Bu yapılardaki değişimlerin bakım ve güvenlik açısından belirlenmesi önemlidir. Geometrik değişiklikler denildiğinde, akla genellikle üç boyutlu koordinatlar gelir. Harita Mühendisliği çerçevesinde, bu tür farklılıkları tespit etmek için ilgili objenin ya da yapının en az iki farklı zamanda koordinatları ölçülür ve karŐılaŐtırmalar yapılır. Günümüzde, GPS lmleri ve noktasal ölçümler yerine lazer tarama ve fotogrametri ile elde edilen nokta bulutlarının karşılaştırılması daha fazla tercih edilmektedir (Li vd., 2022).

Kültürel ve doğal miraslar, çeşitli doğal ve insan kaynaklı etkenler nedeniyle yok olma tehlikesiyle karşı karşıyadır. Tarihi eserlerin korunması, öncelikle onların görsel ve sayısal verilerinin toplanmasıyla mümkündür. Bu bağlamda, gelişen teknoloji sayesinde tarihi yapıların belgelenmesinde farklı yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemlerden biri de modern teknolojinin önemli unsurlarından biri olan lazer iŐını teknolojisidir. Bu yöntem ile tarihi yapıların detaylı verileri yüksek hassasiyetle toplanabilmekte ve uygun yazılımlar aracılığıyla, yapıların sayısal verileri ile üç boyutlu modelleri elde edilebilmektedir (Ulvi vd., 2019).

2000'li yılların baŐlarında, teknoloji ve fizik bilimlerindeki gelişmeler, yersel lazer tarama sistemlerinin daha geniş bir alanda kullanılmasına olanak sağlamıştır. Ancak, bu ölçüm teknikleri genellikle birden fazla oturumda uygulanmıŐ olup, hala ölçüm uzmanları için bazı kısıtlar barındırmaktadır. Bu kısıtlamalar, yeni çözüm arayıŐlarını beraberinde getirmiŐ ve mobil lazer tarama sistemlerinin geliŐtirilmesine yol açmıŐtır. Bu sistemler, özellikle ölçüm alanlarının karmaşık, eriŐimin zor olduğu ya da yersel lazer tarama yöntemlerinin kısıtlı bir Şekilde uygulanabildiği bölgelerde, ölçüm ve belgeleme süreçlerine önemli çözümler sunmuştur (Yadav & Singh, 2018; Zeybek, 2021).

Son yıllarda, mobil lazer tarama veya mobil LiDAR (MLS) sistemleri, araçlara monte edilerek topoğrafik ve koridor haritalama amacıyla kullanılmıştır. Ancak, bu sistemlerin boyutları kapalı alanların haritalanması için uygun olmamıŐtır. El tipi ve giyilebilir lazer tarama sistemlerinin geliştirilmesi, bu tür kısıtlamaları ortadan kaldırmıŐtır. Bu taşınabilir sistemler, karmaşık ve dar alanlar için detaylı ve geometrik bilgi sağlayarak 2D/3D veri toplama yöntemlerine uyumlu hale getirilmiŐ, çeşitli ortamlarda farklı amaçlara yönelik

ölçüm ve haritalama süreçlerinde önemli avantajlar sunmuştur (Karasaka, 2012; Zeybek, 2021).

Günümüzde kadastro haritaları, yersel ölçüm ve fotogrametri yöntemleri ile üretilmektedir. Ancak, Giyilebilir Mobil LiDAR (GML) teknolojisinin kadastro haritalarında kullanımına dair yapılan çalışmalar oldukça sınırlıdır. Bununla birlikte, son yıllarda kadastro haritalarının üretiminde GML teknolojisinin etkin bir şekilde kullanılabilceği ortaya koyan çalışmalar yapılmaya başlanmıştır (Karabacak & Yakar, 2023; Kaya & Bıyık, 2024).

Mağara haritalarının oluşturulmasında kullanılan geleneksel yöntemler, mağara içindeki nesnelerin morfolojisini yeterince ortaya koymakta yetersiz kalmaktadır. Görüntü tabanlı fotogrametrik ölçümler, mağara içinde homojen bir aydınlatma sağlanamadığı için küçük nesnelerin yerel tarayıcılarla haritalanması ve üç boyutlu modellerinin üretilmesi konusunda zorluklar yaşatmaktadır. Bu durum, mağaralarda bulunan küçük ölçekli nesnelerin özelliklerinin belirlenmesi ve mağara oluşum süreçlerinin incelenmesi gibi araştırmalarda geleneksel yöntemlerin yetersiz kaldığını göstermektedir (Avdan vd., 2013; Roncat vd., 2011). Bu noktada, yersel lazer tarama sistemleri, karmaşık yeraltı ortamlarının haritalanmasında eşsiz bir doğruluk ve konumsal ayrıntı sağlamaktadır (Fabbri vd., 2017; Gallay vd., 2015). Örneğin, Slovakya'daki Domicca Mağarası'nda lazer tarama sistemleri, 11,9 milyardan fazla nokta yakalayarak sadece 2,24 mm'lik hata payıyla ayrıntılı bir 3D model oluşturmuştur (Gallay vd., 2015). Yersel lazer tarayıcıların ışıklandırma gerektirmeden çalışabilmesi, mağara ortamlarında bu cihazları vazgeçilmez bir çözüm haline getirmektedir. Ayrıca, İtalya'daki Grotta A Mağarası'nda bu sistemler, morfometrik ölçümler ve hacim hesaplamaları için de kullanılmıştır (Fabbri vd., 2017).

Yersel lazer tarayıcılar, mağara ölçümlerinde üç boyutlu veri toplamada kritik bir öneme sahiptir. Bu cihazlar sayesinde, mağaraların kırık ve çatlak sistemleri çizgisellik analiziyle tespit edilebilmekte, özellikle aktif fay hatları üzerinde yer alan mağaralar bölgedeki deprensellik hakkında önemli bilgiler sunabilmektedir. Elde edilen üç boyutlu nokta bulutları ile mağaraların haritaları, kesitleri ve planları detaylı olarak oluşturulabilmektedir (Avdan vd., 2013; Özdemir vd., 2022). Bu veriler ayrıca terk edilmiş kömür madenlerinde yapısal izleme, tehlike değerlendirmesi ve malzeme ayrımı çalışmalarında da kullanılmıştır (Johnston vd., 2018; Spadaro vd., 2024). Örneğin, terk edilmiş kömür madenlerinde yersel lazer tarama verileri, çıkarma işleminin kapsamını ve dolgu iyileştirmelerinin uygulanabilirliğini değerlendirmek için kullanılmıştır (Johnston vd.,

2018). Karmaşık yeraltı ortamlarında, cihazın kurulumu ve detaylı tarama işlemlerinin zorluğu sebebiyle, kapsamlı bir harita oluşturmak için birden fazla yöntemin entegre edilmesi gerekebilir. Bu zorluklara rağmen, yersel lazer tarama verileri yeraltı yapılarının oluşum süreçlerini inceleme ve analiz etmede benzersiz bir avantaj sağlamaktadır (Avdan vd., 2013; Özdemir vd., 2022). Ancak, su varlığı gibi koşulların yoğunluk değerlerinde sapmalara neden olabileceği ve mobil haritalama sistemlerinin süreçleri hızlandırmasına rağmen renk bilgisinden yoksun olabileceği de gözlemlenmiştir (Di Stefano vd., 2021, s. 2022; Nováková vd., 2022). Bu sistemlerin dijital fotogrametri ve kuyu içi fotoğrafçılık gibi diğer yöntemlerle entegrasyonu, veri toplamayı daha da geliştirebilir (Johnston vd., 2018; Spadaro vd., 2024).

Sonuç olarak, yersel lazer tarama sistemleri, mühendislik ve restorasyon projeleri için kritik öneme sahip olan ayrıntılı 3D modeller sağlayarak yeraltı yapılarının haritalanmasında oldukça etkilidir. Çevresel koşullar ve tamamlayıcı teknikler gibi hususlar optimum sonuçlar için gereklidir (Di Stefano vd., 2021; Fabbri vd., 2017; Gallay vd., 2015; Nováková vd., 2022; Spadaro vd., 2024). Ancak, bu teknolojinin tüm potansiyel kullanım alanları henüz tam anlamıyla keşfedilmemiştir; özellikle yeraltı şehirlerinin haritalanmasında lazer tarama sistemleri halen sınırlı bir kullanım alanına sahiptir.

Yeraltı şehirleri, tarih boyunca pek çok medeniyetin çeşitli amaçlar doğrultusunda inşa ettiği, çoğu zaman savunma, saklanma ya da yerleşim amacıyla kullanılan yapılar olarak öne çıkmaktadır. Bu yapılar, yer altına inşa edilmeleri sebebiyle doğal çevresel etkilerden korunmuş ve günümüze kadar ulaşabilmiştir. Ancak, bu tür yapıların karmaşıklığı ve yeraltı koşullarının zorlayıcı doğası, haritalama ve restorasyon çalışmalarını zorlaştırmaktadır. Geleneksel haritalama yöntemleri ile bu tür yapıların detaylı bir şekilde haritalanması oldukça zahmetli ve zaman alıcıdır. Son yıllarda, gelişen lazer tarama teknolojisi, yeraltı şehirlerinin haritalanmasında da önemli bir araç haline gelmeye başlamıştır. Ancak, literatürde yeraltı şehirlerinin lazer tarama teknolojisi ile haritalanmasına ilişkin sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır.

Bu bilgiler doğrultusunda bu çalışmada, daha önce kapsamlı bir haritalama ve restorasyon çalışması yapılmamış olan Aydıntepe Yeraltı Şehri örnek olarak seçilmiştir. Aydıntepe Yeraltı Şehri, yeraltında bulunması, düzensiz yapısı ve girintili çıkıntılı özellikleriyle haritalama çalışmalarında zorluk çıkaran bir yapı sunmaktadır. Bu yapı, yersel lazer tarama sistemleri kullanılarak detaylı bir şekilde haritalanacak ve elde edilen veriler 3B bir model oluşturmak için kullanılacaktır. Çalışmanın temel amacı, yersel lazer tarama

teknolojisinin yeraltı yapılarında, özellikle de yeraltı şehirlerinde kullanılabilirliğini incelemek ve bu yöntemin mühendislik ile restorasyon projelerine olan katkılarını ortaya koymaktır. Ayrıca, bu çalışma, yeraltı şehirlerinin haritalanmasında lazer tarama teknolojisinin avantajlarını ve sınırlamalarını belirlemek açısından önemli bir örnek oluşturacaktır.

Gelişen teknolojinin ve özellikle lazer tarama sistemlerinin haritalama çalışmalarına getirdiği yenilikler, mühendislik ve restorasyon projelerinin daha verimli ve doğru bir şekilde yapılmasını sağlamaktadır. Bu bağlamda, Aydıntepe Yeraltı Şehri'nin 3B haritasının çıkarılması, ilerleyen dönemlerde gerçekleştirilecek restorasyon ve koruma projeleri için sağlam bir temel oluşturacaktır. Bu çalışma, yeraltı şehirlerinin haritalanması ve korunması ile ilgili literatüre katkı sağlayacak ve mühendislik ile restorasyon alanlarındaki uygulamalara ışık tutacaktır.

1.1. Problemin Tanımı

Teknolojik gelişmelerle birlikte arazi ölçüm cihazları ve bunlarla birlikte haritalama teknikleri de hızla değişmektedir. Bu değişimler sonucunda haritalama çalışmalarında daha detaylı, daha hassas haritalar üretebilmektedir ve aynı zamanda yapılan çalışmalarda zamandan ve iş gücünden ciddi manada tasarruf edilebilmektedir. Teknolojinin ilerlemesiyle gelişen ve yaygınlaşan lazer tarama cihazları kullanıcılar tarafından daha kolay ulaşılabilir bir hale gelmiştir. Lazer tarama cihazları kullanımındaki kolaylık, yoğun 3B nokta bulutu verisi üretebilmesi sayesinde yerüstü haritalama ve 3B model oluşturma da kendisine ciddi manada yer edinmiştir. Yerüstü haritalama çalışmalarında kullanılan yeni ölçüm cihazları ve yöntemleri, çalışılması ve haritalanması zor olan yeraltı yapılarında daha pratik ve hızlı bir biçimde, daha detaylı ve hassas haritalar üretmek amacıyla kullanılmaya başlanmıştır. Daha önceki çalışmalar incelendiğinde yeraltı haritalama çalışmalarında özellikle mağara, tünel ve kapalı maden çalışmalarında lazer tarama cihazlarının kullanıldığı ve etkin sonuçlar alındığı görülmektedir. Fakat yapılan araştırmalar sonucunda lazer tarama cihazlarının karmaşık, uzun ve girintili yapılı yeraltı şehir haritalama çalışmalarında fazla kullanılmamış olduğu tespit edilmiştir. Yeraltı şehirleri dar, uzun bir hat (koridor) şeklinde, girintili (odalı), karmaşık ve hatta çok katlı olabilmektedir. Lazer tarama cihazlarının yeraltı şehirleri haritalama çalışmalarında kullanılabilirliğinin, performansının, doğruluğunun ve hassasiyetinin ne olduğu tam olarak bilinmemektedir.

Bayburt ili, Aydıntepe ilçesinde bulunan ve ilçe merkezi tam üstüne kurulmuş olan Aydıntepe Yeraltı Şehri'nin daha önceden kapsamlı bir haritası yapılmamıştır. Yeraltı Şehri'nin tam olarak nereden geçtiği, üstünde ne gibi yapılaşmanın olduğu kesin olarak bilinmemektedir. Aydıntepe Belediye'sinin yaptırmış olduğu imar planında yeraltı şehri koruma altına alınmıştır. Fakat imar planındaki koruma alanının yeraltı şehrini ne kadar kapsadığı da net olarak bilinmemektedir. Bunlarla birlikte yeraltı şehrinde zamanla göçükler ve tahribatlar meydana gelmiştir. Bu göçük ve tahribatların boyutunun tespit edilmesi yeraltı şehrinin geleceği ve korunması önemli bir konudur.

Lazer tarama cihazlarının yeraltı şehirlerinde kullanılabilirliğinin araştırılması, sağlayabileceği avantajların belirlenmesi ve aynı zamanda Aydıntepe Yeraltı Şehri'nin 3B modellenmesi ve 2B haritalanması ile yeraltı şehrinin durumunun belirlenmesi önemli hususlardır.

1.2. Tezin Amacı

Bu tez çalışmadaki ana amaç; teknoloji ile gelişen ve kullanımı yaygınlaşan lazer tarama cihazı ile daha önceden kapsamlı bir haritalama çalışması yapılmamış olan Aydıntepe Yeraltı Şehri'nin 3B modellemeyle 2B haritasını üretmektir. Teknolojinin ilerlemesiyle gelişen kullanımı yaygınlaşan lazer tarama cihazları, kullanımındaki kolaylık ve yoğun 3B nokta bulutu verisi üretebilmesi sayesinde yerüstü haritalama çalışmaları ve 3B model oluşturma işlerinde kendisine ciddi manada yer edinmiştir. Son zamanlarda kapalı ortam ve yeraltı yapılarında da kullanılmaya başlanılan lazer tarama cihazlarının karmaşık yapılı yeraltı şehirlerinin haritalamasında kullanımlarına uygunluğu, avantajları ve dezavantajları irdelenecektir. Elde edilen 3B yeraltı şehir haritası kadastro haritası, halihazır harita ve imar planı ile karşılaştırılarak yer üstü mülkiyet yapısı ve yapılaşma durumu irdelenecektir. Ayrıca bu yöntem ile Aydıntepe Yeraltı Şehri 3B modellenip, haritalanması ve bu modelin mühendislik projeleri ve restorasyon çalışmaları için altlık olarak kullanılmasındaki avantajları da değerlendirilecektir. Bu tezin tamamlanmasıyla elde edilecek çıktılar, benzer çalışmalara ışık tutacak, yeraltı şehri ve bölgenin tanıtılmasına da fayda sağlayacaktır. Aynı zamanda bu çalışma ile imar planında yeraltı şehrinin koruma altına alınıp alınmadığı tespit edilecek ve yeraltı şehrini tahribata uğratabilecek yeni yapılaşmanın önüne geçilebilecektir. Bu çalışma ile yukarıdaki amaçlara ilave olarak Aydıntepe Yeraltı Şehri'nin belgelendirilip arşivlenmesi sağlanacaktır.

1.3. Metodoloji

Bu çalışma için; öncelikle üretilecek olan yeraltı şehri haritasının doğruluğunun kontrol edilebilmesi ve mevcut haritalarla karşılaştırılarak durumunun daha iyi irdelenebilmesi adına ülke veya global koordinat sistemine dayalı olarak üretilmesi gerekmektedir. Bunun için çalışma alanının yakın çevresinde bulunan nirengi ve poligon noktaları bilgileri Aydıntepe Belediyesi, Bayburt Kadastro Müdürlüğü ve diğer Kamu Kurumlarından temin edilecektir. Çalışma alanına yakın sabit poligon noktası bulunmaması durumunda ise yeni poligon noktaları tesis edilecek olup, bu noktaların koordinatları Büyük Ölçekli Harita ve Harita Bilgileri Üretim Yönetmeliği'ndeki hususlar dikkate alınarak GNSS ile belirlenecektir. Koordinatı bilinen sabit noktalar kullanılarak lazer tarama işlemi gerçekleştirilecektir. Lazer tarama işleminden sonra ölçüme ait ham veriler bilgisayara aktarılacak olup paket programlar aracılığı ile nokta bulutu verisi elde edilecektir. Bu nokta bulutu verisinden Aydıntepe Yeraltı Şehri'ne 3B harita elde edilecektir. Elde edilen bu haritadan yeraltı şehrine ait bilgilere ulaşılabilecek ve aynı zamanda Aydıntepe Belediyesi'nden alınacak olan Halihazır Harita ve İmar Planı ile Bayburt Kadastro Müdürlüğü'nden alınan Aydıntepe Kadastro haritası ile karşılaştırılacak ve yeraltı şehrinin üst kısmındaki mülkiyet yapısı, yapılaşma ve imar durumu irdelenecektir.

1.4. Yeraltı Yapıları

Yer yüzeyinin altında birçok doğal veya doğal olmayan nedenlerden dolayı çok sayıda boşluk bulunmaktadır. Yerin altında bulunan bu boşluklar; mağaralar, kapalı maden ocakları, yeraltı şehirleri ve tünellerdir. Yerin altında bulunan bu yapılara yeraltı yapıları denilmektedir.

1.4.1. Mağaralar

Mağaralar, yüzey ile doğrudan bağlantısı olan ve genişlik ve yükseklik açısından en az bir insanın sürünerek girebilmesine imkân tanıyan yeraltı boşluklarıdır. Jeolojik süreçler, su aşındırması, kimyasal etkileşimler, hidrotermal aktiviteler ve tektonik hareketler gibi çeşitli doğal güçlerin etkisiyle uzun zaman diliminde oluşan özgün yapılar olarak nitelendirilirler (Roncat vd., 2011).

1.4.2. Kapalı Maden Ocakları

Mineraller, belirli fiziko-kimyasal koşullar altında elementlerin bir araya gelmesiyle oluşur. Ekonomik değer taşıyan ve belirli geometrilere yer kabuğunda birikim oluşturan bir veya daha fazla mineralin oluşturduğu yapıya maden yatağı denir. Maden yataklarının işletilmesi sonucunda maden ocağı veya maden işletmesi oluşur. Maden ocakları, açık ve kapalı madencilik olmak üzere iki ana kategoriye ayrılır (Aydın, 2000).

Açık maden işletmeleri, toprak kazılarak doğrudan maden cevherine ulaşılabilen işletmelerdir. Taş ocakları, bu tür işletmelerin bir örneğidir. Ancak, toprak kazılarak doğrudan madene erişilemeyen durumlarda ve maden yerin derinliklerinde ise cevherlere ulaşmak için kazılar yapılır. Bu tür madencilik çalışmalarının gerçekleştirildiği yerlere kapalı maden ocakları denir (Aydın, 2000). Kapalı maden ocaklarında, personelin işletmeye geçişi ve malzeme ile cevherin taşınması için, yatay veya hafif eğik olarak kazılan geçitlere galeri adı verilir. Dikey veya neredeyse dikey olarak kazılan yeraltı geçitlerine ise kuyu denir. Cevhere ulaşıldıktan sonra, madenin yer altından çıkarılması için kazı veya patlatma işlemleri gerçekleştirilir. Dünya genelinde, bu yöntemle aktif olarak çalışılan yüzlerce maden sahası bulunmaktadır.

1.4.3. Yeraltı Şehirleri

Yeraltı şehirleri, ilk ve orta çağlarda sürekli savaşlar döneminde yöre halkının güvenliğini sağlamak amacıyla inşa edilen, şehir büyüklüğünde sığınaklardır. Bu şehirler, tehlike anlarında saklanma ve korunma ihtiyacını karşılamak için yapılmıştır.

Kolayca oyulabilen kayaların işlenmesiyle yapılan yeraltı şehirleri genellikle çok katlıdır. Dışarıdan dar bir giriş kapısı ile girilen bu şehirlerin katları, eğimli ve basamaklıdır. Dar koridorlar aracılığıyla birbirine bağlanır ve bu koridorlara girişi kontrol etmek için yuvarlak taş kapılar kullanılır, böylece yeraltı şehri güven altına alınır.

Yeraltı şehirlerinde binlerce kişiyi barındıracak kadar büyük alanlar bulunur. Bu şehirlerde yaşam için gerekli olan depolar, mutfaklar, toplu yaşam alanları, su sarnıçları ve hava bacaları gibi birçok bölüm ile ibadet yerleri bulunur. Bu yapılar, tarihsel ve kültürel açıdan büyük bir değere sahiptir.

Günümüzde, bu yeraltı şehirleri koruma altına alınmış, restore edilmiş ve turizme açılmıştır. Bu sayede, bu eşsiz yapılar ziyaretçilere tarihi ve kültürel bir deneyim sunmaktadır.

1.5. Yeraltı Yapılarının Haritalanmasının Önemi

Mağaralar, doğal olaylar ve çeşitli kuvvetlerin etkisiyle uzun zaman diliminde oluşan yapılar olarak kabul edilir (Roncat vd., 2011). Mağaraların oluşum sürecinin anlaşılması, doğal kuvvetlerin etkisi ve gücünün belirlenmesi ve doğanın gizemlerinin çözülmesi birçok bilim insanının ilgisini çekmektedir. Mağaraların uzunlukları, derinlikleri ve hidrojeolojik sistemdeki fiziko-kimyasal süreçlerin belirlenmesi ve belgelenmesi, ancak bir mağara haritası aracılığıyla daha etkin bir şekilde gerçekleştirilebilir (Lichti & Gordon, 2004). Bu haritalar, geniş, orta ve mini düzeydeki mağara şekillerinin özelliklerini belirleme, mağara oluşum sürecini anlama ve mağara içindeki özgün yapıları çözme çalışmalarında son derece önemlidir. Küçük ölçekli nesnelere genellikle standart mağara haritalarında gösterilmemektedir. Bu nedenle özel mağara morfogenetik haritaları oluşturmak için bu nesnelere belgelenmeli, yorumlanmalı ve özel işaretler ve sembollerle sonuç haritalarında gösterilmelidir (Roncat vd., 2011).

Ayrıca, mağaralar içerdikleri damla taşları ve travertenler gibi görsel güzellikler nedeniyle insanların ilgisini çeker. Bu tür yerlerin turizme açılması, ülke ekonomisine katkı sağlar. Ancak, turizme açılan mağaraların iç düzenlemeleri, ziyaretçilerin güvenliği ve mağaranın minimum zarar görmesi için gereklidir. Bu gereklilik, mühendislik uygulamalarını (inşaat, elektrik, mimari) beraberinde getirir. Tüm bu uygulamalar, hata payını en aza indirmek için detaylı mağara haritaları üzerinde gerçekleştirilmelidir (TMB, 2007).

Yeraltı şehirleri ise yapıldıkları döneme ait izler taşırlar. O döneme ait ne gibi tarihsel olayların olduğu, o dönemde yaşayan insanların inanışları ve dönemin teknolojik gelişmeleri hakkında bilgiler sunarlar. Bu yüzden geçmişe ışık tutup tarihi aydınlatmak isteyen tarihçiler için önemli yerlerdir. Tarihsel dönemde gerçekleşen olayların ve bu eşsiz yapıların kayıt altına alınıp belgelenmesi için bu şehirlerin haritalanması büyük önem arz etmektedir.

Yeraltı şehirleri tarihsel süreç içerisinde meydana gelen depremler, jeolojik olaylar gibi iç kuvvetlerin etkisi ile ve defnediciler tarafından tahribata uğramaktadır. Yeraltı şehirleri tarihsel ve kültürel miras olduğu için tahribata uğrayan kısımlarının restorasyonu yapılarak koruma altına alınmaları ve ziyarete açılarak ülke turizmine kazandırılmaları gerekmektedir. Yeraltı şehrinin büyüklüğünün ve meydana gelen hasarların tespit edilmesi için haritalanması gerekmektedir. Ayrıca bu haritalar, hasarlı yerlerin onarılması,

ziyaretçilerin güvenliğinin sağlanması ve ziyaretçiler tarafından görebileceği zararların minimuma indirilmesi amacıyla yapılan restorasyon projeleri için olmazsa olmazdır.

Yeraltı maden ocaklarında ise durum biraz farklıdır. Yeraltında bulunan cevhere ulaşmak için açılacak olan kuyu ve galerilerin yönlendirilmesinde, yapılan kazı ve çıkarılan madenin miktarlarının hesaplanmasında önemlidir. Ayrıca yeraltı haritalanması galeri ve diğer yeraltı kısımlarında meydana gelen gerilmelerin ve deformasyonların belirlenmesinde de kullanılmaktadırlar.

Özetle yeraltı yapılarının haritalanması aşağıdaki nedenlerden dolayı önemli ve gereklidir.

- Yeraltı yapılarının belgelendirilerek arşivlenmesi ve kayıt altına alınması
- Restorasyon çalışmaları için altlık olarak kullanılmaları
- Arama kurtarma çalışmalarında kullanımları
- Yapılacak çalışmalar iş planlarının oluşturulması
- Kazı hacminin hesaplanması
- Deformasyonların incelenmesi

1.6. Yeraltı Haritalama Teknikleri

Yeraltı haritaları, çeşitli mekanik ve optik cihazlar aracılığıyla ölçülen sayısal verilerin, teknik çizim kurallarına ve belirli bir ölçeğe uygun olarak hazırlanan haritalardır. Yeraltı haritalama süreci genellikle iki aşamada gerçekleştirilir: ölçümlerin yeraltında alınması ve bu ölçümlerin kâğıt üzerine aktarılması işlemleri.

İlk aşama, yeraltındaki boşluklarda yapılan ölçümleri içerirken, ikinci aşama masa başında gerçekleştirilir. Temel haritalama ekipmanları genellikle yerüstünde kullanılan klasik haritalama ekipmanları ile aynıdır, ancak yeraltı koşullarında çalışabilmeleri için bazı modifikasyonlara tabi tutulmuşlardır. Örneğin, yerüstünde kullanılan teodolitler, madenlerde kullanılmak üzere özelleştirilmiş madenci teodolitleri haline getirilmiştir. Bu teodolitlerin açılış daireleri ve gözlem çizgileri aydınlatılmıştır ve tavan noktalarını merkezlemek için bir işarete sahiptirler. Ayrıca, sehpaaları sürgülüdür, böylece yeraltı zemininde kolayca taşınabilirler.

Yeraltındaki bazı yerlerin dar, basık ve girintili çıkıntılı olmasından dolayı sehpa kurulup teodolit ve totalstation gibi cihazlarla ölçüm yapılamamaktadır. Bu gibi zorlu çalışma alanları için özel ölçme ekipmanları geliştirilmiştir. Yeraltındaki ölçmeler ile

yerüstü ölçümleri temel olarak benzerlik gösterse de yeraltı ortamının; karanlık, dar, nemli, tozlu, sıcak ve yetersiz hava veya zehirli gazlar gibi olumsuz şartlar taşınmasına ek olarak bu yapılara genelde tek taraftan girişin olması sebebiyle ölçümlerin dayalı olarak yapılamamaktadır. Bu gibi nedenlerden dolayı ölçümlerde zorluklar ve farklılıklar ortaya çıkmaktadır.

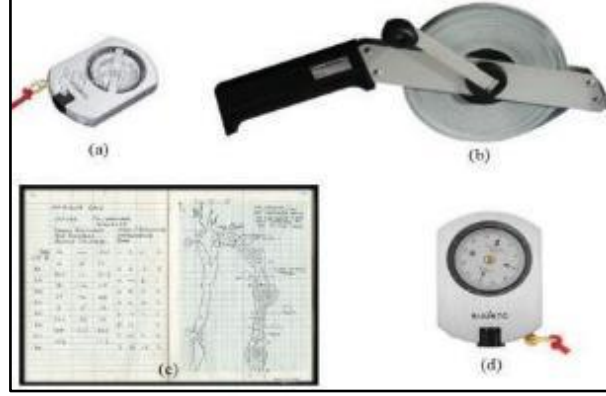
Yeraltı haritalama yöntemleri; teknoloji ile gelişen ölçüm cihazlarının kullanım ve çalışma prensiplerindeki farklılıklardan ve yeraltındaki zorlu çalışma koşullarına uygun olarak üretilen ölçüm aletlerinden meydana gelmektedir. En ilkel ölçüm ekipmanı olarak pusula, çelik şerit metre, klinometre (eğimölçer) gibi aletler kullanılırken zamanla bunların yerlerini elektronik mesafe ve doğrultu ölçen aletler ile zorlu şartlarda ölçümleri gerçekleştirecek özel olarak ihtiyaca göre üretilen aletler almıştır. Günümüzde ise kullanım alanları giderek genişleyen LİDAR teknolojileri yeraltı haritalamasında da kullanılarak kendisine yer bulmuştur. Son zamanlarda ise yersel fotogrametri, insansız hava araçları (İHA), fotogrametrik yöntem uygulamaları da yeraltı haritalama çalışmalarında denenmeye başlanmıştır.

LİDAR tabanlı teknikler, yüksek hassasiyet ve ayrıntılı 3B veriler sunmasından dolayı yer altı haritalama uygulamalarında önemli bir rol oynamaktadır. Çeşitli çalışmalar, LİDAR'ın tüneller ve yeraltı otoparkları gibi yer altı ortamlarındaki önemini vurgulayarak, doğru haritalama sonuçları sağlama yeteneğini ortaya koymaktadır (Trybała vd., 2023). Ayrıca yer altı otoparklarını santimetre düzeyinde doğrulukla ve semantik modelleme yetenekleriyle haritalamak için LİDAR kullanan yeni yöntemlerdendir (Suleymanoglu vd., 2022). LİDAR noktalarını kullanarak tünelleri modellemek için ayrıntılı bir metodoloji ortaya koyan ve doğru tünel modellerinin oluşturulmasındaki karmaşık süreci sergileyen çalışmalar bulunmaktadır (Gong vd., 2019). Bu çalışmalar toplu olarak LİDAR'ın yeraltı haritalamasındaki etkinliğini vurgulayarak, çeşitli yeraltı ortamlarındaki uygulamalarına ilişkin değerli bilgiler sunmaktadır.

1.6.1. Yeraltı Yapılarının Kroki Niteliğinde Haritalanması

Yeraltı yapılarının kroki niteliğinde haritalanması haritacılık adına günümüzde pek kullanılmayan bir yöntemdir. Günümüzde bu yöntem mağaracılar ve arama kurtarma ekipleri tarafından keşfedilmemiş mağaralarda kullanılmaktadır. Bu yöntemde kullanılan

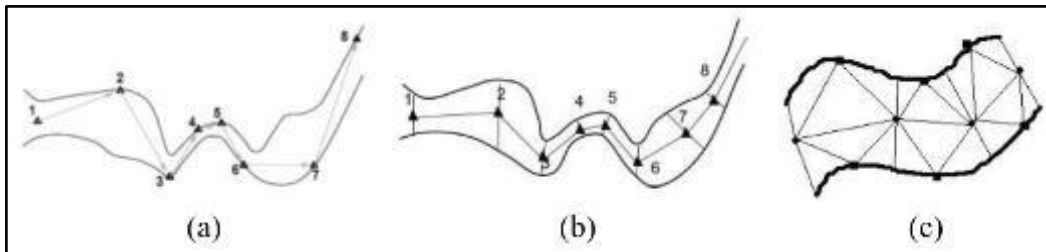
temel haritalama ekipmanları, pusula, klinometre (eğimölçer), şerit metre ya da lazer metre ve ölçüm karnesinden oluşur (Şekil 1), (Pekkan, 2018).



Şekil 1. Mağara içerisinde kullanılan temel haritalama ekipmanları (a) Klinometre (b) Şerit metre (c) Ölçüm karnesi ve not defteri (d) Pusula (Pekkan, 2018)

Haritalama işlemi, seçilen ölçüm noktaları arasındaki mesafe, azimut ve eğimin ölçülmesini içerir. Ayrıca, her istasyonda genişlik ve yükseklik ölçümleri yapılır veya tahmin edilir ve bu veriler ölçüm defterine kaydedilir. Bu işlemler için en az iki kişinin çalışması gerekmektedir (Pekkan, 2018).

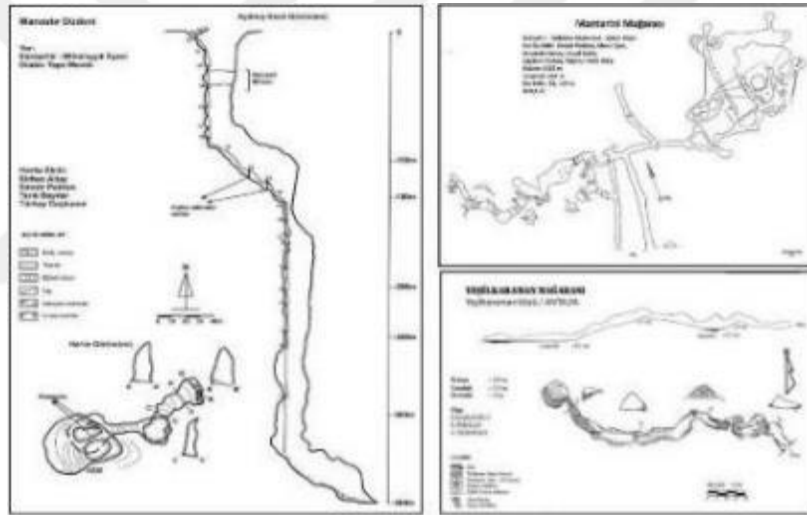
Mağara haritalamasında, ölçüm noktaları (istasyonlar), duvarlardan duvarlara, orta hat izleme veya poligon oluşturma tekniklerine uygun şekilde belirlenir (Şekil 2). Hangi tekniğin seçileceği, mağara koşulları ve haritalama süresi gibi faktörlere bağlı olarak değişiklik gösterebilir (Pekkan, 2018).



Şekil 2. Mağara haritalamasında uygulanan ölçüm teknikleri: a) Duvardan duvara b) Orta hat takibi c) Poligon oluşturma (Pekkan, 2018)

Haritalama süreci, genellikle mağara girişinin hemen dışındaki bir noktadan başlar ve bu nokta başlangıç noktası olarak adlandırılır (TMB, 2007). Bu noktadan diğer noktalara olan azimut (pusulanın kuzeyden yaptığı açı), eğim ve mesafe ölçülerek kaydedilir. Mağara içerisinde sürekli yeni noktalar belirlenir ve bu noktalar arasındaki azimut, eğim ve mesafe ölçülerek ölçüm defterine işlenir. Ölçümleri alan kişi aynı zamanda mağaranın planını çizer ve önemli yerleri belirtir. Bu noktalar genellikle yükselti farkları, iniş-çıkışlar, göller, büyük sarkıt ve dikitler gibi belirgin fiziksel değişimlerin olduğu yerlerdir.

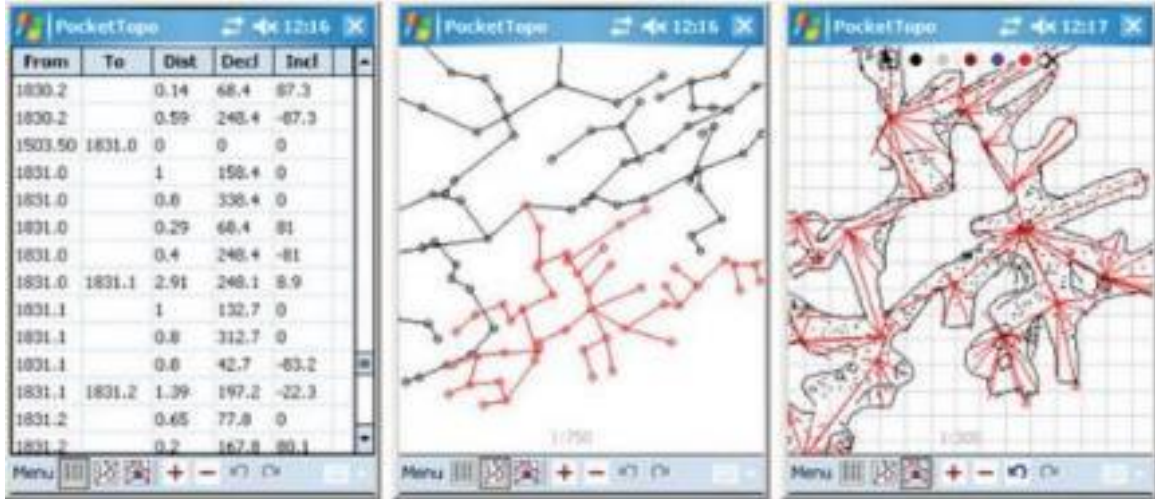
Ölçümlerin ölçekli kâğıda aktarılması işlemi, milimetrik kâğıda elle yapılabilir ve daha sonra bilgisayara aktarılabilir veya doğrudan bilgisayar ortamında çeşitli yazılımlar aracılığıyla çizilebilir (Pekkan, 2018). Şekil 3.'te çeşitli yeraltı (mağara) haritası örnekleri gösterilmektedir.



Şekil 3. Yeraltı (mağara) haritalarından örnekler (Pekkan, 2018)

Geleneksel haritalama teknikleri, zaman alıcıdır ve insan kaynaklı hatalara oldukça açık olmalarının yanı sıra, elle veri toplama ve kayıt gerektirirler (Hunter, 2010). Ancak, bilgisayar teknolojisinin gelişmesiyle birlikte, yeraltı yapılarından alınan ölçümler doğrudan haritalama programlarına aktarılabilen ve bu veriler bilgisayar ortamında ölçekli olarak birleştirilerek yüksek hassasiyetli yeraltı haritaları oluşturulabilmektedir. Bugünlerde, tablet bilgisayarlara kurulu olan haritalama programları ve lazer metre ölçümleri sayesinde, yeraltında yapılan ölçümler not defterine aktarılmadan doğrudan bilgisayar ortamında hızlı ve yüksek hassasiyetle çizilebilmektedir (Şekil 4). Bu yöntem, birleştirilmiş sistemler olarak

adlandırılır ve lazer metreden kayıt cihazına verinin doğrudan transferini sağlayarak insan kaynaklı hataların birçoğunu ortadan kaldırır (Beat, 2008).



Şekil 4. Not defteri kullanılmadan yapılan haritalamaya bir örnek (Pekkan, 2018)

1.6.2. Klasik Haritacılık Yöntemleri ile Yeraltı Yapılarının Haritalaması

Yeraltı yapılarının haritalanması, yeraltı yapılarının zorlu çalışma şartlarından ve teknolojik yenilikler sayesinde klasik haritacılık yöntemlerinden önemli ölçüde gelişmiştir. Çağdaş mühendislik ölçme ve haritalama teknikleri geleneksel haritalama ilkelerine entegre edilerek yeraltı yapılarının ölçülmesinde doğruluk artırılmış ve kör noktalar en aza indirildiği bilinmektedir (Bobylev, 2016; Santa vd., 2022).

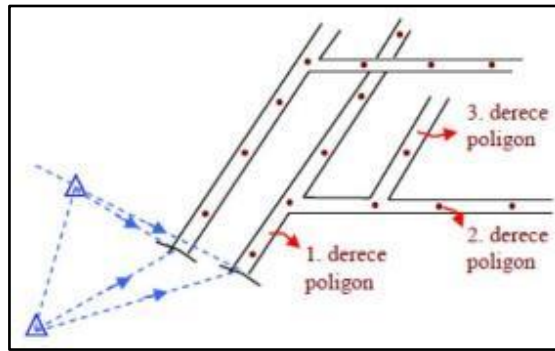
Klasik ölçme aletlerinden teodolit, totalstation gibi doğrultu ve uzunluk ölçen cihazlar koordinatı bilinen bir noktaya kurulup, koordinat bilinen başka bir nokta aracılığı ile bağlantı yapılarak ölçümler yapılabilmektedir. Mağara, yeraltı şehirleri ve kapalı maden galerileri kıvrımlı ve çok bölmeli olabilmektedir. Bu yüzden de tek bir noktadan yeraltı yapısının tamamını tek bir noktadan ölçmek mümkün değildir, birçok noktadan ölçüm yapılması gerekir. Ölçüm verilerinin birleştirilmesi, ölçümlerde bütünlüğün sağlanması ve koordinatlı bir şekilde haritalanması için yeraltı yapısında uygun yerlere poligon ağının tesis edilmesi ve bu poligon ağının da yeryüzündeki sabit noktalara dayandırılması gerekmektedir.

Yeraltı yapıları genel olarak tek girişli, dar, kıvrımlı, girintili çıkıntılı ve bölümlü şekillerde olduğu için poligon ağının tesisinde ve ölçümünde yeryüzündeki ölçme metotlarına göre farklılıklar bulunmaktadır. Özellikle kapalı maden ocaklarında personelin

yeryüzünden cevhere ulaşmak için kullandığı veya yeraltından çıkarılan cevherin yeryüzüne taşınırken kullanılan galerilerde zemine tesis edilen noktalar zamanla tahribata uğrayabilir. Bu gibi yerlerde noktalar tavana, zeminde duvara yakın yerlere veya duvara tesis edilmesi gerekebilir (Aydın, 2000). Yeraltındaki yapıların bazı kısımları veya tamamı dar ve basık olup, sehpa kurulmasına elverişli olmayabilir. Bu gibi kısımlarda doğrultu ve uzunluk ölçmek için özel olarak geliştirilen asma teodolit, asma daire, asma pusula, çelik şerit metre, eğik tel gibi basit ölçme aletleri kullanılarak, doğrultu ve uzunluk ölçümleri için özel metotlar geliştirilmiştir.

- Yeraltında Sabit Noktaların Tesisi

Ölçüm sürecinde temel unsur noktalardır. Yeraltı haritalamasında sabit noktaların belirlenmesi, doğru veri toplama ve analiz için çok önemlidir. Bu nedenle noktaların sabit kalması önemlidir. Ayrıca noktanın yeri belirlenirken ölçüm işlemlerine uygun olacak şekilde belirlenmelidir. Noktalar, geçici veya işaretlendiği yerde sürekli olarak kalacak şekilde inşa edilirler. Yeraltı çalışma alanlarında, planların hazırlanması ve çeşitli amaçlarla topoğrafik ölçümlerin yapılmasında, poligon ve nivelman röper noktalarından faydalanılır. Yüzeyden, zemin katmanlarına açılan tesis ve üretim boşluklarına yön, koordinat ve kot bilgileri, buradaki kazı çalışmalarının yönlendirilmesi için poligon noktaları ve geçkilerden yararlanılarak sağlanır (Aydın, 2000).



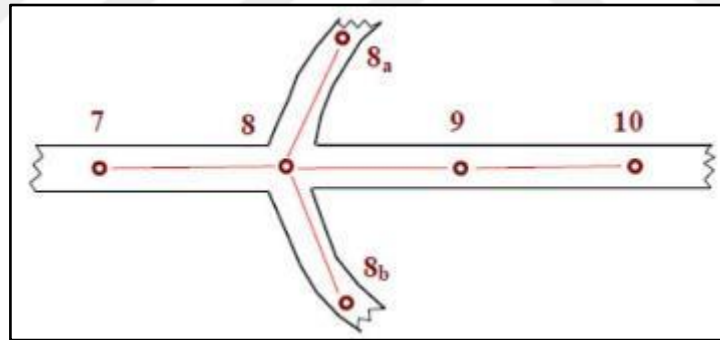
Şekil 5. Yeraltı poligon geçkilerine örnek (Aydın, 2000)

Farklı noktaların, poligon noktaları, ara noktalar, kot röper noktaları gibi, belirli işaretlerle birbirinden ayırt edilmesi önemlidir. Örneğin, poligon noktaları daire sembolüyle,

ara noktalar artı işaretiyle, kot röper noktaları ise kare sembolüyle gösterilebilir ve bu işaretler genellikle farklı renklerle (kırmızı, siyah, beyaz vb.) belirtilir (Aydın, 2000).

Nokta yerinin seçiminde dikkat edilmesi gereken bazı hususlar şunlardır (Aydın, 2000):

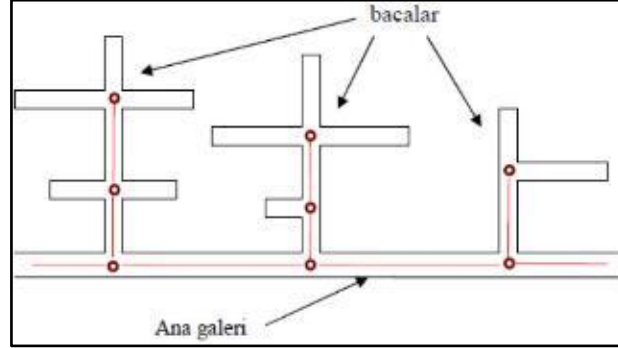
- Noktalar, ölçümlerin kolaylıkla yapılabileceği yerlere inşa edilmelidir ve herhangi bir çıkıntı, belirgin direk veya kama gözlemelerini engellememelidir.
- Noktaların kolayca bulunabilir olması önemlidir.
- Noktaların sürekli sabit kalabilecekleri yerlerde tesis edilmesi gerekmektedir.
- Poligon noktaları yatay düzlemde, nivelman röperleri ise düşey düzlemde yer değiştirmemelidir.
- Geçici noktalar, sabitlik şartı zaruri olmadığından tavanda, zeminde veya rahatlıkla tesis edilebilecekleri yerlerde alınabilirler.
- Galerilerin kesişim noktalarına mutlaka bir poligon noktası işaretlenmelidir.
- Galerilerin kavşak noktalarında alınacak noktalar, kolay bir gözlem sağlamak için galeri içine doğru olmalıdır.



Şekil 6. Kavşak noktasında istasyon noktası seçme (Aydın, 2000)

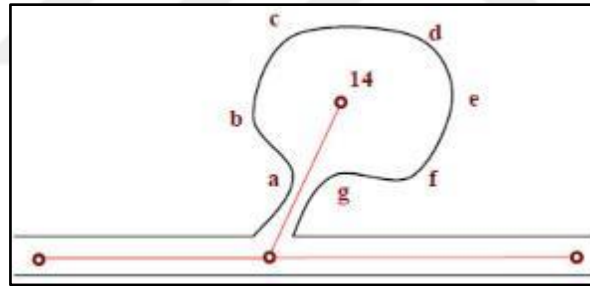
- Noktalar arası mesafe mümkün olduğunca büyük olmalıdır. Aynı düzlemde uzayan düzgün bir galeride, ara noktalar uzun gözlemler sağlayacak şekilde alınabilir. Bu yaklaşım, ölçüm ve hesaplama süreçlerinde zaman kazandırabilir. Ancak, damar içinde açılan galeriler genellikle düzgün bir doğrultu ve eğim izlemez, bu nedenle kıvrımlı bir şekilde açılır. Bu durumda, bu kurala tam olarak uyum sağlamak mümkün olmayabilir ve noktalar istenmeyen şekilde birbirine yakın alınabilir.

- Ana galerilerde, poligon noktaları mümkünse aynı düzlem üzerinde olmalıdır. Bu durum, ölçüm ve hesaplama işlemlerinde zaman kazandırabilir.



Şekil 7. Düzgün bir galeride noktaların aynı doğrultu üzerinde alınması (Aydın, 2000)

- Detay alınacak noktalardan, detay noktalarının kolaylıkla gözlenebilmesi gerekir.

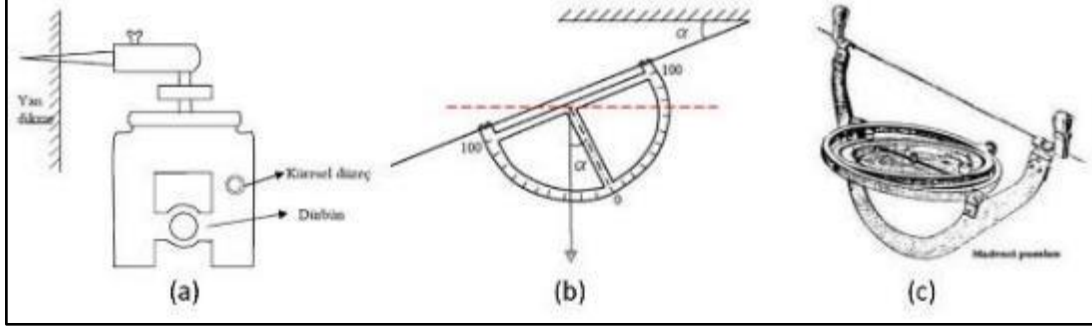


Şekil 8. Detay gözlemleri için nokta yeri seçimi (Aydın, 2000)

- Poligon noktaları galerinin ortasına değil, trafiği aksatmayacak şekilde yan duvara yakın, yan duvar üzerinde veya tavanda işaretlenmelidir.
- Yeraltı Açılı Ölçümleri

Yeraltı ölçme koşulları, dar ve zorlu çalışma ortamı nedeniyle yerüstünden farklılık gösterir. Bu nedenle, ölçme aletlerinin de yeraltı çalışmalarına uygun olmasını gerektirir. Bu amaçla, yeraltında kullanılmak üzere özel aletler geliştirilmiştir. Bu aletler, yerüstünde

kullanılanlara göre daha küçük ve hafiftir (Aydın, 2000). Yeraltında açı ölçmek için teodolit, totalstation, asma teodolit, asma daire ve asma pusula gibi araçlar kullanılır.



Şekil 9. Yeraltı ölçümleri için geliştirilen ölçme aletleri: (a) Asma teodolit, (b) Asma daire, (c) Asma (madenci) pusulası (Aydın, 2000)

Yeraltı ortamından kaynaklanan zorluklar ve kullanılan ölçme aletlerinin çeşitliğinden dolayı yeraltında farklı metotlarda açı ölçümleri gerçekleştirilir (Aydın, 2000). Bu metotlar şunlardır;

- 3 sehpa metodu (tepe açılarının ölçümü)
- Açıklık Açısı (azimut) Metodu
- Topografya Açısı Metodu
- Yardımcı Dürbünler ile Açıların Ölçülmesi
- Yan Yardımcı Dürbünler ile Açıların Ölçülmesi
- Üst Yardımcı Dürbünler ile Açıların Ölçülmesi
- Açıların Dışmerkez Ölçülmesi

Açı ölçümleri madencilik, tünelcilik ve jeolojik izleme gibi çeşitli alanlarda önemli bir rol oynamaktadır. Bu ölçümlerin doğruluğunu ve verimliliğini artırmak için farklı yöntemler önerilmiştir. Örneğin, bir çalışmada sığ yeraltı kaynaklarının hassas konumunun belirlenmesi için seyahat süresi ve polarizasyon açısı bilgilerini birleştiren hibrit bir konumlandırma modeli tanıtılmıştır (Li vd., 2022). Ayrıca, tünellerde azimutları belirlemek için tam otomatik bir sisteme odaklanan bir makalede açıklandığı gibi otomatik sistemlerin geliştirilmesi, yeraltı ortamlarında açı ölçümlerinin doğruluğunu önemli ölçüde artırabilir (Wetherelt & Hunt, 2004).

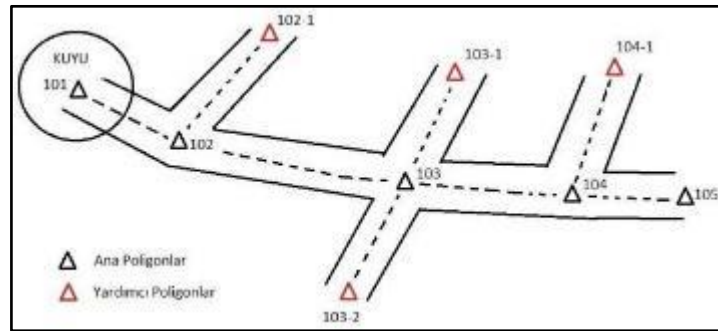
- Yeraltında Mesafe Ölçmesi

Yeraltında çalışma koşulları, yerüstünden oldukça farklıdır. Modern elektronik cihazlar genellikle uzunluk ölçümlerini kendi içlerinde mm hassasiyetinde gerçekleştirir. Ancak, yeraltında uzun ölçümler yapmak genellikle zorlu ve sınırlıdır, bu nedenle bu modern aletlerin kullanımı sınırlıdır. Bununla birlikte, ileri bir aşamada, aynı doğrultuda uzanan uzun tüneller ve galerilerin ölçümünde, bu modern aletlerden daha hızlı ve hassas sonuçlar elde etmek mümkündür. Galerilerin eğimine bağlı olarak, uzunluklar genellikle elektronik mesafe ölçer veya şerit metre kullanılarak yatay veya eğik olarak ölçülür (Aydın, 2000). Eğimli ölçümlerde eğimin belirlenmesi için asma daire de kullanılabilir. Bunun yanında yeraltında mesafe ölçümü, madencilik, boşluk tespiti, heyelan izleme ve GPS'in olmadığı ortamlarda konumlandırma gibi çeşitli uygulamalarla bu ihtiyacı karşılamak için farklı teknolojiler ve yöntemler geliştirilmiştir. Örneğin, maden çalışmalarında elektronik optik mesafe ölçerlere sahip totalstationların kullanılması önerilmiştir (Černota vd., 2011).

- Yeraltında Poligon Geçkileri

Yeraltında poligonlar hassasiyetlerine göre iki sınıfa ayrılırlar.

- Ana poligonlar: Galerilerin yeryüzüne göre konumlarını belirlemek için tesis edilen poligon noktalarıdır.
- Yardımcı poligonlar: Detay alımları, galeri ve küçük tünellerin bakım ve konumunu belirlemek için tesis edilen poligon noktalarıdır.



Şekil 10. Hassasiyetlerine göre gösterilen yeraltı poligonları (Aydın, 2000)

Yeraltı poligonları yeraltı işletme şekline göre üçe ayrılırlar:

- Ana poligonlar: 1. Derece poligon dizileridir. Ana nakil ve havalandırma yolları ile ana galerilerde tesis edilen poligon dizilerini oluştururlar. Yönelmede bu güzergâhlar kullanılırlar ve kavşak kesişim yerlerine tesis edilirler.
- Bağlantı poligonları: Ana poligon noktalarının sıklaştırılması ile oluşturulurlar. Detay alımında, küçük galeri ve tünellerin konumlarını tayin etmede ve bu alanlardaki değişimleri plana işlemek amacıyla tesis edilirler.
- Tamamlayıcı poligonlar: Sürekli bir değişimin yaşandığı madenlerin durumunu ortaya koymak için tesis edilen noktalardır. Bunlara ikmal poligonları da denir.

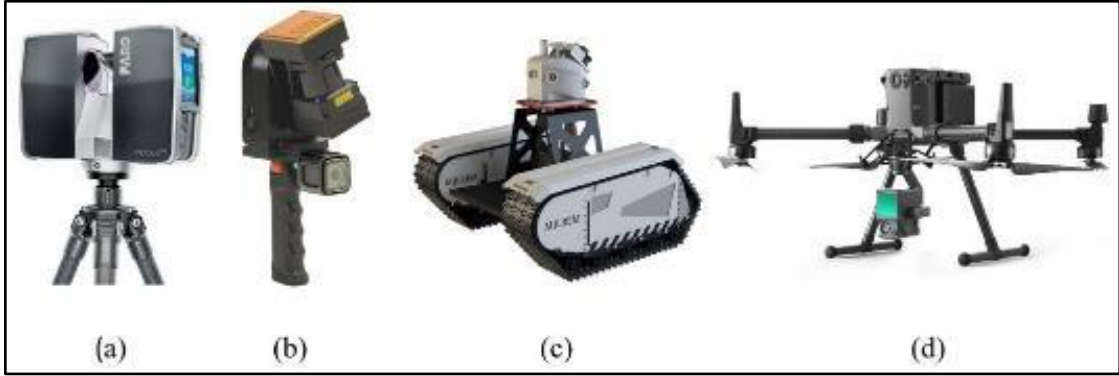
1.6.3. Yersel LİDAR

Yersel lazer tarama, nesnelere doğrudan, hassas ve otomatik olarak üç boyutlu koordinatlarının belirlenmesini sağlayan bir teknolojidir (Reshetyuk, 2009). Bu sistemler, fiziksel verilerin hızlı ve yoğun bir şekilde ölçülmesine imkân tanır. Yersel lazer tarayıcılar, üçgenleme, faz karşılaştırma ve lazer ışını uçuş zamanı ölçümü gibi farklı çalışma prensiplerine dayanarak çalışırlar (Boehler & Marbs, 2002). Lazer ışını uçuş zamanı ve faz karşılaştırma yöntemlerine dayalı tarayıcılar, uzun mesafeler ve büyük nesnelere taranmasında kullanılırken, üçgenleme sistemli tarayıcılar daha çok küçük nesnelere hassas taraması için uygundur (González-Aguilera vd., 2009; Yastikli, 2007).

Yeraltı yapılarının haritalanması için yersel LİDAR teknolojilerinin kullanımı çeşitli çalışmalarda araştırılmış, yersel lazer tarama teknolojilerinin, farklı kullanım alanlarına sahip olduğu saptanmıştır (Lichti & Gordon, 2004). Bu teknoloji, tersine mühendislik uygulamaları, yapısal değişikliklerin izlenmesi, deformasyon ölçümleri, kültürel mirasın belgelenmesi, jeolojik uygulamalar gibi birçok alanda kullanılmaktadır (Dunning vd., 2009; Ergincan vd., 2010; Kukreja vd., 2006; Riveiro vd., 2011; Yastikli, 2007). Örneğin (Farella, 2016) yeraltı tünellerini sayısallaştırmak için elde taşınan bir lazer tarama sisteminin etkinliğini gösterirken, (Puente vd., 2014) mobil bir LİDAR sistemi kullanarak yol tüneli armatürlerini tespit etmek için otomatik bir yöntem geliştirmiştir. (Aijazi vd., 2019), inşaat sırasında yeraltı boru ağlarının haritalanması ve modellenmesi için taşınabilir otomatik bir çözüm geliştirerek bu çalışmayı daha da ilerletmiştir. Ancak (Eyre vd., 2016), özellikle

yeraltı madenlerindeki düşük açılı süreksizliklerin belirlenmesinde bu teknolojilerin sınırlamalarını vurgulamıştır. Bu çalışmalar toplu olarak, yeraltı yapılarının haritalanması için yersel LİDAR teknolojilerinin potansiyelinin altını çizerken, aynı zamanda doğruluk ve veri yoğunluğunda daha fazla ilerleme ihtiyacına işaret etmektedir. Bu gelişmeler, yeraltı alanında da yersel lazer tarayıcılarının kullanımının giderek artacağını göstermektedir. Özellikle, mağaraların karmaşık yapısı ve düzensiz geometrisi nedeniyle, bu alanların görselleştirilmesi, 3D veri elde edilmesi ve modellenmesinde yersel lazer tarayıcılar önemli avantajlar sağlamaktadır (Avdan vd., 2013).

Yersel LİDAR sistemlerinin sabit ve mobil olan türleri bulunmaktadır. Sabit yersel lazer tarama cihazları bir noktaya kurularak cihazın görmüş olduğu yüzeyleri 3B nokta bulutu olarak taramaktadır. Mobil yersel lazerler tarama cihazlarının ise insanlar tarafından taşınan ve insansız kara ve hava araçlarına monte edilebilen türleri bulunmaktadır. İnsanların rahat hareket edemeyeceği, tehlikeli, dar ve basık yeraltı yapılarında insansız kara aracına monte edilen yersel lazer tarama sistemleri kullanılmaktadır. Geniş ve yüksek açıklığa sahip yeraltı yapılarında ise insansız hava aracına monte edilebilen lazer tarama cihazları kullanılabilmektedir.



Şekil 11. Yersel lazer tarama cihazları: (a) sabit noktaya kurulan (Motif, 2024), (b) el ile taşınan (Geomatics, 2024), (c) insansız kara aracına monte edilen (Leica, 2024), (d) insansız hava aracına (İHA) monte edilen lazer tarayıcı (Skydata, 2024)

Yersel lazer tarama teknolojileri 3B yoğun bir nokta bulut verisi sağlamaktadır. Bu sebeple ölçüm yüzeylerindeki tüm detaylar hassas bir şekilde 3b boyutlu olarak ölçülüp modellenebilir. Bazı yersel lazer tarama cihazlarında RGB, kızılötesi ve termal bantlar bulunmaktadır. Bu bantlar sayesinde ölçüm yüzeyinin renk bilgisine, fiziksel ve kimyasal

özelliklerine de ulaşılabilmektedir. Ayrıca yersel tarama teknolojilerinin birçoğu ölçüm yapılacak alanda sabit nokta tesisine ihtiyaç duymazlar. Ölçümler tarayıcı alet orjinli x, y, z nokta bulutu olup, ek ölçüler ve hesaplamalarla jeodezik koordinat sistemine dönüştürülebilirler. Bu sebeplerden dolayı yeraltı haritalanmasında oldukça tercih edilmektedir.

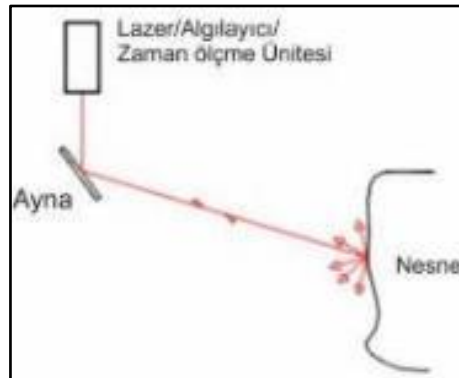
- Lazer Tarayıcıların Ölçüm Prensibi

Yersel lazer tarayıcılarında kullanılan ölçüm yöntemi, ışık sinyalinin cihaz ile ölçülen nesne arasındaki gidiş-dönüş süresinin ölçülmesine dayanır (Özdoğan ve Deliormanlı, 2018). Işık hızı sabit olduğundan, ölçülen nesne ile cihaz arasındaki mesafe, basitçe hesaplanabilir, denklem 1'de olduğu gibi.

$$d = c \times t / 2 \quad \text{Eşitlik 1}$$

d= cihaz ile ölçülen cisim arası mesafe (m)
c= ışığın hızı (299 792 458 m/saniye)
t= ışığın cihazdan cisime gidip yansıtılarak cihaza dönüş süresi (sn)

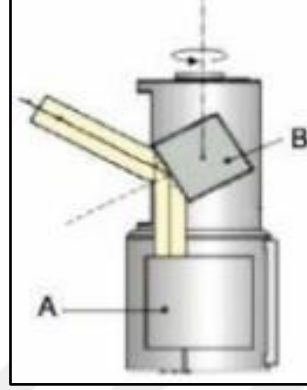
Uçuş zamanı sistemini kullanarak çalışan sistemler, uzun mesafelerde ölçüm yapabilir ve makul doğruluklar elde edebilirler (Fröhlich vd., 2004; Karşıdağ, 2011b). Uçuş zamanı sisteminin çalışma prensibi Şekil 12'de özetlenmiştir.



Şekil 12. Uçuş zamanı sistemi (Boehler & Marbs, 2002)

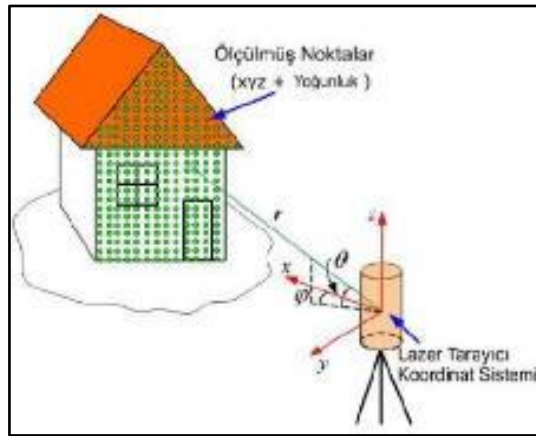
Yersel lazer tarayıcılar, yatay ve düşey düzlemde lazer ışığını ileten bir mekanizmaya sahiptir. Tarayıcının ilgili bölümünden (Şekil 13, A) ayrılan ışın, cihazın gövdesindeki hızla

dönen optik (aynaya benzer) üniteye (Şekil 13, B) çarpar ve bu yüzeyden yansarak cihazdan yatay olarak çıkar. Tarayıcı, veri topladıkça düşey düzlem etrafında çok küçük açılarla ışın göndermeye devam eder. Bu işlem, tarama bitinceye kadar devam eder (Özdoğan, 2015; Vozikis vd., 2004).



Şekil 13. Yersel lazer tarayıcı cihazın çalışma prensibi (Vozikis vd., 2004)

Her tarama işleminden sonra, kullanıcıya nokta bulutu olarak isimlendirilen noktaların bir listesi verilir. Bu bulutta, her bir nokta, kutupsal koordinatlar (r , ϕ , θ) kullanılarak tarayıcıya kaydedilir. Bu kutupsal koordinatlarla belirtilen noktaların kartezyen koordinatları (x , y , z), tarayıcı yazılımı tarafından hesaplanır ve kullanıcıya kartezyen koordinatlar olarak sunulur. Ayrıca, tarayıcı tarafından taranan yüzeyde kaydedilen bir başka veri, nesneye çarpan ve geri yansıyan enerjinin yoğunluğudur (Şekil 14).



Şekil 14. Yersel lazer tarayıcı cihazın ölçüm prensibi (Staiger, 2003)

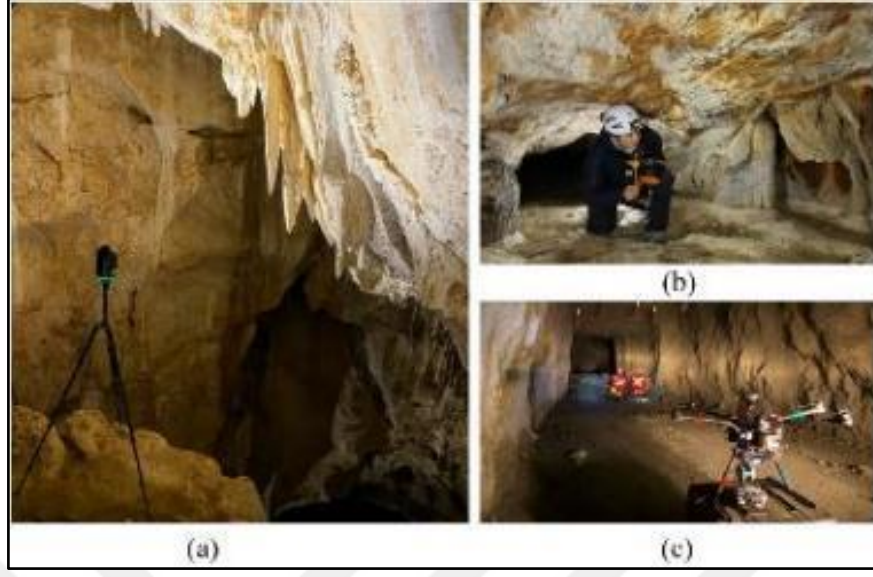
Lazer tarayıcı tarafından ham olarak alınan kutupsal koordinatlar, kartezyen koordinatlara çevrilirken kullanılan matris denklemi 2’de sunulmuştur.

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

Eşitlik 2

1.6.4. Yersel LİDAR Teknolojilerinin Yeraltında Yeraltı Haritalamasında Kullanımı

Yersel LİDAR teknolojileri, yeraltı boşlukları gibi zorlu ortamlarda doğru üç boyutlu konumsal veri sağlama yetenekleri nedeniyle yeraltı haritalamasında önemli bir rol oynamaktadır (Li vd., 2022; Trybała vd., 2023). Bu sistemler, geleneksel haritalama yöntemlerini daha az etkili hale getiren oklüzyon, GNSS sinyali eksikliği ve düşük aydınlatma gibi engellerle karşı karşıyadır. Mobil LİDAR sistemlerinin genişletilmiş Kalman filtreleri ve gerçek koordinatlarla entegre edilmesiyle, ölçümlerin doğruluğu önemli ölçüde artırılabilir ve yeraltı alanlarının 3B uzamsal algısı geliştirilebilir (Errington vd., 2016). Ayrıca, ham LİDAR yoğunluk verilerinden tahmini yansıma değerinin kullanılması, yeraltı madenlerinde kil içeriğinin modellenmesinde umut vaat ederek yeraltı ortamlarında mineral bileşiminin haritalanması potansiyelini ortaya koymuştur (Pechini, 1967). Genel olarak, yersel LİDAR teknolojilerinin yenilikçi yaklaşımlar ve veri entegrasyon yöntemleriyle birleşimi, verimli ve ayrıntılı yeraltı haritalama uygulamaları için değerli bilgiler sunmaktadır. Yersel LİDAR teknolojilerinin yeraltında kullanımının, yer üstündeki kullanımından bir farkı yoktur. Tek fark yeraltındaki çalışma ortamından kaynaklanan zorluklardır. Yersel LİDAR teknolojilerinin zemine sabit noktalara ihtiyacının olmaması, el ile rahatlıkla taşınarak ölçümlerin yapılabilmesi, hatta insanların giremeyeceği dar, karanlık ve tehlikeli alanlarda insansız kara araçlarına monte edilerek ölçümler gerçekleştirilebilmesinden dolayı yeraltı haritalamasında tercih edilmektedir. Ayrıca metrekaeye binlerce nokta gönderip, yüzeylerdeki tüm detaylar rahatlıkla ölçülebilmektedir. Bu ölçüm verileri sayesinde tüm detaylar 3B olarak modellenebilmektedir (Özdoğan, 2015). 3B model sayesinde rahatlıkla kazı alanları hesaplanabilmektedir. Bu gibi sebeplerden dolayı yersel LİDAR teknolojileri yeraltı haritalanmasında özellikle restorasyon ve kapalı maden ocaklarında sıklıkla kullanılmaktadır.

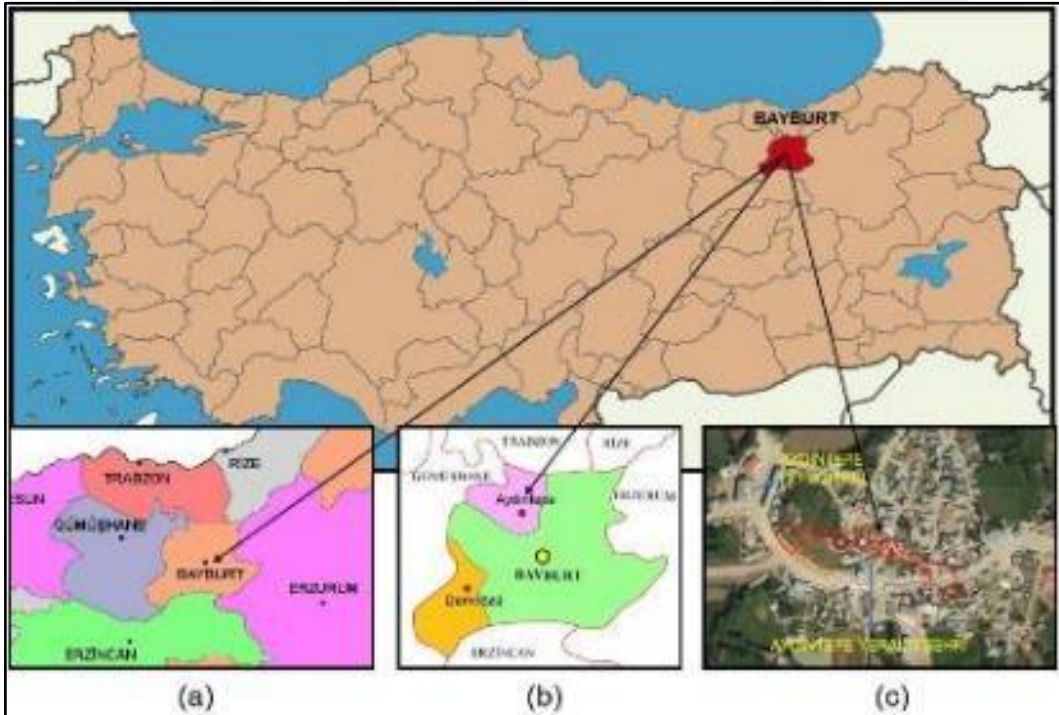


Şekil 15. Yeraltında lazer tarayıcıların kullanımına örnekler (BBC, Business Insider – Webtekno, 2024); (a) sabit noktaya kurulan, (b) el ile taşınan, (c) insansız hava aracına (İHA) monte edilen lazer tarayıcılar

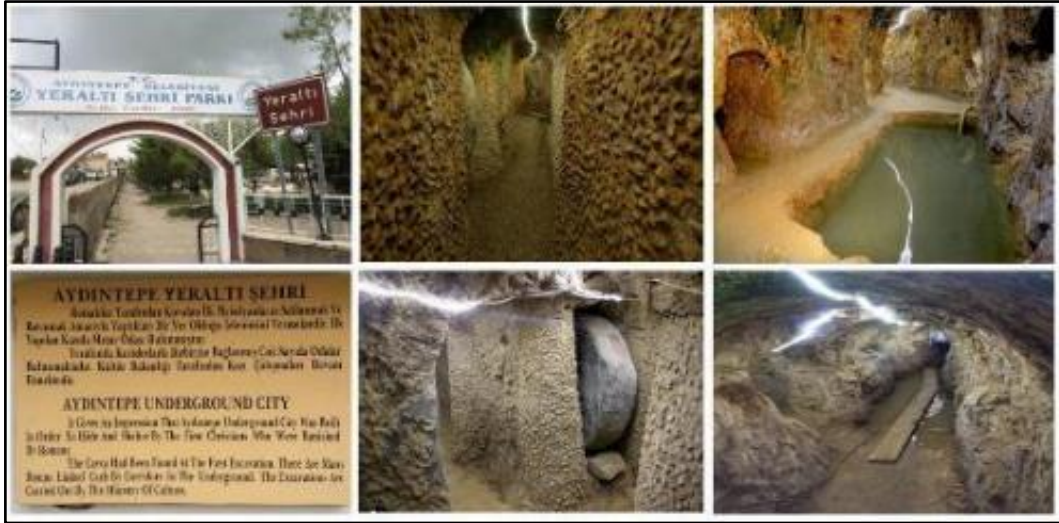
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Bu tez kapsamında, birçok yeraltı yapılarının haritalanmasında kullanılmaya başlanılan yersel lazer tarama cihazlarının yeraltı şehri haritalamasında kullanımı üzerine bir çalışma yapılmıştır. Bu çalışma kapsamında uygulama alanı olarak Aydıntepe Yeraltı Şehri seçilmiştir.

Bayburt ili Aydıntepe ilçe merkezinde bulunan Aydıntepe Yeraltı Şehri (Şekil 16. ve Şekil 17.), bölgenin tarihi, sosyo-ekonomik, idari ve demografik yapısı hakkında bilgiler sunmaktadır. Kültür ve Turizm Bakanlığı tarafından koruma altına alınan bu yeraltı şehri birçok araştırmacının ve ziyaretçinin ilgisini çekmektedir. Uzun zamandan beri ziyaretçilere açık olmasına rağmen kapsamlı bir haritalama çalışması, ziyaretçiler için çevre düzenlenmesi, yeraltı şehrinin tahribata uğrayan kısımları için kapsamlı bir restorasyon çalışması ve yeraltı şehirde meydana gelen göçüklerin boyutunun belirlenmesine yönelik bir çalışma yapılmamıştır. Çalışma alanı olarak Aydıntepe Yeraltı Şehri'nin seçilmesinde en önemli nedenler yukarıda sayılmış olan eksikliklerdir.



Şekil 16. Bayburt ilinin komşu şehirlere göre konumu (Coğrafya Hocası, 2021), b) Bayburt ili ve ilçeleri, c) yeraltı şehri tahmini sınırlarının gösterildiği uydu görüntüsü



Şekil 17. Aydıntepe Yeraltı Şehri'nden görseller (Aydıntepe, 2021)

Yeraltı şehri genel olarak doğu-batı yönünde ilerleyen, içerisinde toplam 10 adet oda, 1 adet havuz ve dışarıdan hava akışını sağlamak için bacalar bulunmaktadır. 70-150 cm genişliğinde, yaklaşık 2 m yüksekliğinde ve 2 taraftan da yeryüzü ile bağlantısı bulunan koridor şeklinde bir yapıdır. Yer altı şehrinin iç kısmı çok dar ve aşırı kıvrımlı olmasından dolayı içerisinde poligon ağı tesis etmek ve yeraltı şehrinin iç kısmında detay ölçüsü alıp haritalamak oldukça güçtür. Bu yüzden, yakın mesafeden ölçüm yapabilme kabiliyeti olan, saniyede 300bin nokta ölçümü yapabilen ve anlık konumlandırma ve haritalama (SLAM) teknolojili gezici lazer tarayıcı ile yeraltı şehri 3B olarak detaylıca taranmıştır. Yeraltı şehrinin her iki girişine ITRF-96 koordinat sistemindeki toplam 6 poligon noktası tesis edilerek, oluşturulan 3B model bu noktalar kullanılarak ITRF-96 koordinat sistemine tanımlı olarak üretilmiştir.

2.1. Saha ve Ofis Çalışmaları

Aydıntepe Yeraltı Şehri'ne ait 3B modeli; ülke veya global koordinat sistemlerinde tanımlamak, bu haritadan daha efektif faydalanılması ve üretilmiş olan diğer (kadastro haritası, halihazır harita, vb.) haritalarla birlikte kullanılması açısından önemlidir. Çalışma alanımızın çevresinde daha önceden tesis edilmiş olan poligon noktaları aranmış fakat çalışma alanımızın yakın çevresinde poligon veya nirengi noktası bulunamamıştır. Bu sebeple yeraltı şehrinin giriş ve çıkış yerlerine yeni poligon noktaları tesis edilmiş olup,

yeraltı şehrinin lazer tarama işlemleri bu poligon noktalarına dayalı olarak gerçekleştirilmiştir.

2.1.1. Yer Kontrol Noktalarının Tesisi ve Ölçümü

Aydıntepe Yeraltı Şehri'nin 3B modelini oluşturmak ve bu modeli ITRF koordinat sisteminde tanımlamak için yeraltı şehrinin her 2 girişine 3'er poligon noktası tesis edilmiştir. Bu poligon noktaları Geomax markalı GNSS alıcı vasıtasıyla CORS-TR sistemi kullanılarak, Büyük Ölçekli Harita ve Harita Bilgileri Üretim Yönetmeliğine göre ölçülüp, koordinatları hesaplanmıştır.



Şekil 18.Saha çalışması kapsamında kullanılan GNSS alıcısı (Geosystems, 2024)

2.1.2. Lazer Tarama İşlemi

Haritalama çalışmalarında ana unsur noktadır. Ölçümün gerçekleştirileceği alanda tüm detaylar ve karakteristik noktalar ölçülür ve bu noktaların koordinat değerleri hesaplanarak gerekli çizimler ile haritalama işlemi gerçekleştirilir. Birçok ölçme yöntemi ile koordinatlı nokta verileri oluşturulabilmektedir. Çalışma alanımız; tarihi bir yapı ve kapalı ortam olması, zeminde ve duvarlarında birçok detayın bulunması bununla beraber de bu detayların belgelenmesi yoğun bir nokta bulutu verisi ile çalışılmasını zorunlu hale getirmiştir. Yoğun bir nokta bulutu verisi üretmenin en kolay ve pratik yolu ise lazer tarayıcı kullanmaktır. Bu sebeple çalışmada “Gexcel Heron Lite Color LİDAR” tarama cihazı kullanılmıştır (Şekil 19.). Gexcel Heron Lite Color LİDAR tarama cihazına ait teknik özellikler Şekil 20.’de gösterilmiştir.



Şekil 19.Saha çalışması kapsamında kullanılan yersel lazer tarama cihazı (Paksoyteknik, 2022)

Nitelik	Değer
Uygun Ortam	İç mekân/ Dış mekân
Elde taşınır	Evet
Giyilebilir	Evet
Çeşitli mobil platformlara monte edilebilir. (bisiklet, tekne vb.)	Evet
Panoramik kamera	Var
IMU	Var
SLAM	Var
SLAM Algoritmasıyla işlem sonrası yazılımı (Heron Desktop)	Var
Gelişmiş nokta bulutu işleme yazılımı (Reconstructor)	Var
2B Harita Ölçümü için ücretsiz Araç (GeoBlueprint)	Var
Çıktı formatları	E57,LAS, PLY
LİDAR Sensörü	Velodyne VLP 16
Lazer dalga boyu	903 nm
Lazer sensörü açısal görüş alanı	Yatayda 360°, düşey -15°+15°
Menzil	80-100 m
Tarama Hızı	Saniyede 300 000 nokta
Bölgesel doğruluk	~ 3 cm
Maksimum ölçüm çözünürlüğü	~ 2 cm
Genel doğruluk	~ 5 cm
Veri depolama	256 GB
Çalışma saati	~ 5/7 saat
Çalışma sıcaklığı	-10° C ile +45° C arası
Saklama sıcaklığı	-40° C ile +60° C arası

Şekil 20.Gexcel Heron Lite Color LİDAR tarama cihazının teknik özellikleri (Paksoyteknik, 2022)

Lazer tarama işlemi park içerisindeki ana girişten (doğu) başlanarak kale çıkışına (batı) doğru yapılmıştır. Ana girişe tesis edilen poligon noktaları cihaza tanımlanarak girişin etrafından (yer yüzeyi) lazer taramaya başlanılmış ve yeraltı şehrine girilmiştir. Girişteki dar sahanlık ve girişi kapatmaya yarayan yuvarlak kayanın olduğu yerler taranarak ilerlenmiştir. 4 odaya girişi olan geniş bir hol alanına gelinmiş ve bu odalar da taranarak ilerlemeye devam edilmiştir. Havuz ve 4 odaya giriş olan geniş bir sahanlığa gelinmiş, buradaki 3 oda da taranarak devam edilmiştir. Yeraltı şehrini büyük bir kısmında aydınlatma olması o kısımların rahatlıkla taranmasını sağlamıştır. Fakat aydınlatmanın bulunmadığı bazı kısımlarda ise bir kişi lazer tarayıcı görüş alanı dışında kalarak tarama cihazını taşıyan kişinin önünü aydınlatmış ve tarama işlemine devam edilmiştir. Yeraltı şehrinin zemini, yan kısımları ve tavadaki detayların kolaylıkla belirlenebilmesi ve nokta bulutunun renklendirilmesi için aydınlık olan kısımlarda, lazer tarama cihazında bulunan kamera aracılığıyla fotoğraflar çekilmiştir. Yeraltı şehrinin sonlarında meydana gelmiş olan göçüklerin de bulunduğu alan taranarak kale (batı) kısmından dışarıya çıkılmıştır. Yeraltı şehrinin çıkış kısmındaki poligon noktaları lazer tarama cihazına tanımlanıp bu bölge de taranarak lazer tarama işlemi tamamlanmıştır.

2.1.3. Nokta Bulutu Verilerinin Dengelenmesi

Lazer tarama işlemi bittikten sonra ölçüm verileri ham veri olarak bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Ham veriler Heron Desktop 2.4 uygulaması ile dengelenip nokta bulutu verisi oluşturulmuştur. Reconstructor 4.4.1 programı aracılığıyla lazer tarama işlemi gerçekleştirilirken çekilen 360⁰ fotoğraflar kullanılarak nokta bulutu verisi renklendirilmiştir. Aydıntepe Yeraltı Şehri'ne ait 3B haritanın yandan görünümü Şekil 21.'de, üstten görünümü ise Şekil 22.'de verilmiştir.



Şekil 21. Yeraltı Şehrine ait 3B modelin yandan görünümü



Şekil 22. Yeraltı şehrine ait oluşturulan 3B haritanın üstten görünümü

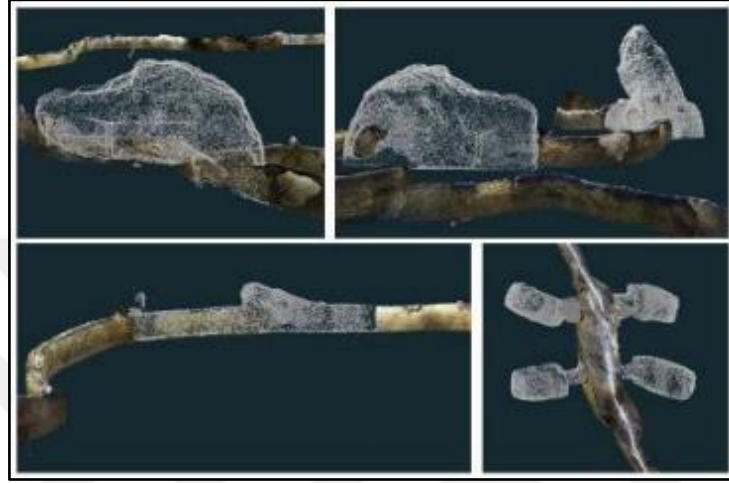
2.2. 3B Modele Ait Teknik Bilgiler

Veriler düzenlenip, dengelenip, hatalı ölçüler çıkarıldıktan sonra elde edilen nokta bulutu verisi 689.011.964 adet noktadan oluştuğu belirlenmiştir. Bu nokta sayısı alanın büyüklüğü göz önünde bulundurulduğunda çok yoğun bir nokta bulutu verisi olduğu anlamı taşımaktadır. Ortalama nokta yoğunluğu 88.329 adet/m^2 'dir. Bu kadar yoğun bir nokta bulutu verisinden çalışma alanındaki tüm detaylar en ince ayrıntısına kadar görülmektedir. Nokta yoğunluğu Şekil 23.'te görüldüğü gibi yer yer farklılıklar göstermektedir. Bunun sebebi yeraltı şehrinin koridorlarının bazı yerlerinde genişliğin çok az olması, yüzeyin pürüzlülüğü ve yüzeyin aşırı girintili çıkıntılı bir yapıda olmasından kaynaklanmaktadır. Nokta bulutu verisindeki noktalar arası mesafe ortalama olarak $0,003365 \text{ m}$ 'dir.



Şekil 23.3B modele ait küçük bir kesitin ekran görüntüsü

Yeraltı şehrinin iç kısmının büyük bir çoğunluğunda aydınlatma bulunmaktadır. Aydınlatma bulunan bölgelerde lazer tarama işlemi gerçekleştirilirken fotoğraflar çekilmiş olup noktalara ait renk bilgileri bu fotoğraflardan elde edilmiştir. Yeraltı şehirde aydınlatma olmayan veya ışığın yeterli olmadığı yerlerde fotoğraf çekilememiş olup, bu bölgelere denk gelen kısımlarda Şekil 24.'te de görüldüğü gibi noktalara ait renk bilgisi üretilmemiştir.



Şekil 24. Yeraltı şehirde aydınlatmanın yetersiz veya hiç olmadığı yerlere ait nokta bulutu verisinden görüntüler

2.3. Yeraltı Şehrine Ait Elde Edilen Bilgiler

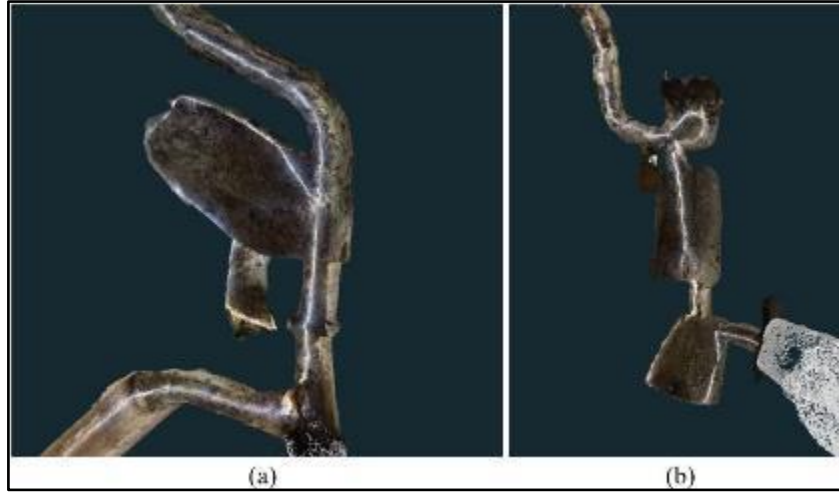
Aydıntepe Yeraltı Şehri yer yüzeyinin 2,00 – 2,50 m aşağısına denk gelecek şekilde, yörede “Bayburt Taşı” olarak tabir edilen kayaç zemin oyularak inşa edilmiş bir yapıdır. Yeraltı şehrinin girişi ile çıkışı arasındaki toplam uzunluk 573,50 m’dir. Dönemin inşaat aletlerinin yetersizliği ve zemin yapısının yumuşak veya sert olmasından dolayı yeraltı şehri oluşturulan yüzeyler girintili, çıkıntılı, pürüzlü ve asimetric şekilli bir yapıdadır. Oluşturulan 3B model incelendiğinde yeraltı şehrinin iç kısmındaki yüzeylerin pürüzlülüğü, girintili, çıkıntılı ve asimetric yapısı görülmektedir. Yeraltı şehrinin düzensiz ve asimetric bir yapıda olmasından dolayı koridor, sahanlık, hol ve oda gibi yapıların her noktasındaki ölçüler farklılık göstermektedir. Bu yüzden yapılarının ölçüleri hakkında net bir ölçü belirtmek mümkün değildir. Genel olarak koridorların genişlikleri 1,00 – 1,70 m ve tavan yüksekliği ise 1,50 – 2,30 m arasında değişkenlik göstermektedir.

Ölçüleri birbirinden farklı 10 adet oda bulunmaktadır. Bu odalardan 4 tanesinin bir hole, diğer 4 odadan sadece 1 tanesine girilememiş olup bu 4 oda da başka bir hole ve son 2 odanın da yine farklı bir hole bağlantısı bulunmaktadır. Bu odalar asimetrik yapılı olup genişlikleri 1,70 – 2,30 m, uzunluklarını 2,50 – 3,95 m ve yükseklikleri de 1,80 - 2,30 m arasında değişkenlik göstermektedir. Odaların ve bağlanmış oldukları hollerden 2 tanesine ait görüntü Şekil 25.'te verilmiştir. Hollerin uzunlukları 5,00 m ile 7,00 m, genişlikleri ise 2,00 m ile 3,00 m arasında değişkenlik göstermektedir. Hollerin yüksekliği hem koridor hem de oda yüksekliklerinden fazladır.



Şekil 25.Odaların ve bağlandıkları hollere ait ekran görüntüsü

Yeraltı şehrinin hem giriş hem de çıkış kısımlarında toplanma ve karşılama alanları gibi geniş sahanlıklar bulunmaktadır. Bu sahanlıkların genişleri 2,35 – 3,90 m, uzunlukları 5,60 – 6,86 m, yükseklikleri ise 2,00 – 2,40 m arasında değişkenlik gösterdiği belirlenmiştir.



Şekil 26.(a) Yeraltı şehrinin giriş tarafındaki sahanlık alan, (b) yeraltı şehrinin çıkış tarafındaki sahanlık alan

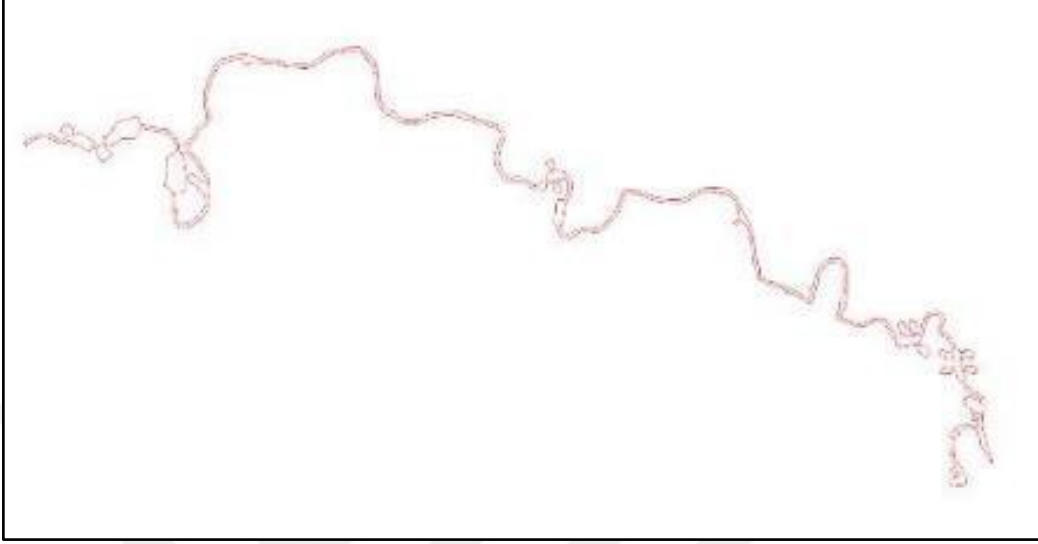
Yeraltı şehrinin giriş, çıkış ve dört adet de havalandırma bacası olmak üzere yer yüzeyi ile 6 adet bağlantısı noktası bulunmaktadır.

2.4. 3B Modelden 2B Harita Üretimi

Üretilen 3B modelde çok yoğun nokta bulutu verisinin olması ve aynı zamanda dosya boyutunun çok fazla olması ilerleyen aşamalarda yapılacak olan çalışmalarda güçlük yaşanmasına sebep olacağı düşünülmektedir. Yoğun veriyi işlemek ve kullanmak için güçlü işlemcili ve büyük bellekli bilgisayara ihtiyaç duyulmaktadır. Ayrıca yapılacak bazı çalışmalar için bu kadar yoğun veriye ihtiyaç duyulmayacaktır. Bu yüzden, 3B modelden 2B harita üretilmesi ilerleyen çalışmalarda işlemleri kolaylaştıracak, farklı amaçları için kullanılabilirliğini arttıracak ve sektörde yaygın olarak kullanılan CAD tabanlı programlarda da kullanılabilmesini sağlayacaktır.

3B modelden farklı farklı yöntemler ile 2B boyutlu harita üretmek mümkündür. Yeraltı şehrinin düzgün geometrik şekilli olmaması, yan yüzeylerin iç bükey veya dış bükey şekillerde olması, bazı yerlerde tavanın zemine göre daha geniş olması gibi sebeplerden dolayı yeraltı şehrinin en geniş yerlerine göre 2 boyutlu haritanın üretilmesi daha doğru olacaktır. 3Dserver programı kullanılarak 3B modelin üstten görünümüne ait ve içerisinde koordinat bilgisi olan .tif formatında raster (fotoğraf) veri üretilmiştir. Üretilen bu veri NadCAD programı aracılığı ile raster sayısallaştırma işlemi gerçekleştirilerek 2B harita

oluşturulmuştur. Bu şekilde üretilen 2B haritaya ait görüntü şekil 26.'da ve bu haritanın uydugrntsyle çakıştırılmış halinin görüntüsü ise şekil 27.'de verilmiştir.



şekil 27. Yeraltı Őhrine ait oluşturulan 3B haritanın üstten görünümü



şekil 28. Yeraltı Őhrine ait 3B haritanın uydugrnts ile çakıştırılmış hali

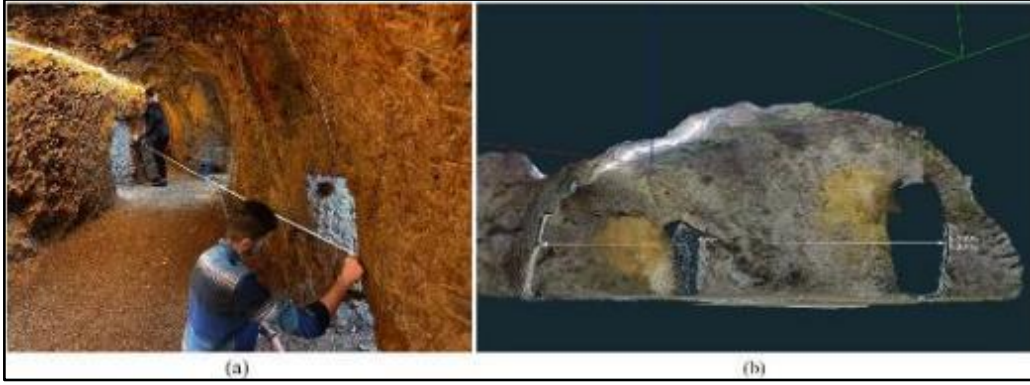
3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Lazer tarama yöntemi ile üretilen Aydıntepe Yeraltı Şehri'ne ait 3B modelin doğruluğunun ve hassasiyetin test edilmiş, 2B harita ise oluşturularak mevcut haritalarla karşılaştırılarak yeraltı şehrinin durumu tespit edilmiş ve bu 3B modelin mühendislik ve restorasyon çalışmalarında ne gibi faydalar sağlayabileceği irdelenmiştir.

3.1. 3B Modellemenin Doğruluğu ve Hassasiyetinin Belirlenmesi

Nokta bulutu verisinden elde edilen Aydıntepe Yeraltı Şehri 3B haritasının doğruluğunu ve hassasiyetini test etmek amacıyla yeraltı şehirde karakteristik ve belirgin hatlar belirleyip bu hatların gerçek uzunluk değeri ile 3B modeldeki ölçü değerlerinin karşılaştırılması gereklidir. Mevsimden ve Aydıntepe yeraltı su hatlarındaki sızıntılardan kaynaklı olarak yeraltı şehrinin büyük bir bölümünde su birikintisi oluşmuş ve yeraltı şehrinin bazı bölümlerinde göçük meydana gelme riskinin olmasından dolayı yeraltı şehri ziyarete kapatılmıştır. Aydıntepe Kaymakamlığı ve Aydıntepe Belediyesi ile görüşmeler sonucunda yeraltı şehrine giriş izni alınmış olup yeraltı şehrine girilmiştir. Yeraltının girişinden başlayarak 90 m kadar mesafede hiçbir sorun yok iken bu mesafeden sonra ziyaretçilerin ilerlemesini engellemek amacıyla yeraltı şehrinin koridoru ahşap kalaslar ile kapatılmıştır. Yeraltı şehirde bulunan su birikintisi bu engellerden hemen sonra başlamaktadır. Ayrıca olası elektrik kaçaklarını önlemek amacıyla bu kısımda aydınlatma hattının kabloları da kesilmiştir. Yeraltı şehrinin ilerleyen kısımları karanlık ve tehlikeli olabileceğinden bu engelden ileriye gidilememiştir. Kontrol ölçüleri yeraltı şehrinin giriş kısmına yakın tehlikesiz alandan alınmıştır. Yeraltı şehrinin iç yapısının düzgün bir geometrik yapıda olmaması, yüzeylerin aşırı girintili çıkıntılı ve pürüzlü olmasından dolayı ölçü alınabilecek karakteristik ve belirgin yer bulmak çok zor olmasından ötürü toplam 18 adet kontrol mesafesi ölçülmüştür.

Yeraltı şehirden metre ile alınmış olan kontrol ölçülerini karşılaştırmak için 3Dserver programı kullanılmıştır. Yoğun nokta bulutu verisinin boyutunun çok büyük olmasından kaynaklı diğer programlar bu veriyi açarken zorlanmaktadır ve veri açıldığı zaman bilgisayar özelliklerinin yetersiz kalmasından dolayı da proje üzerinde çalışmakta güçlük çekilmektedir. Hem bu sebeplerden hem de 3Dserver programının ara yüzünün kullanışlı ve



Şekil 31. (a) yeraltı şehrinden alınan kontrol ölçüsü, (b) 3B modelden sorgulanan mesafe

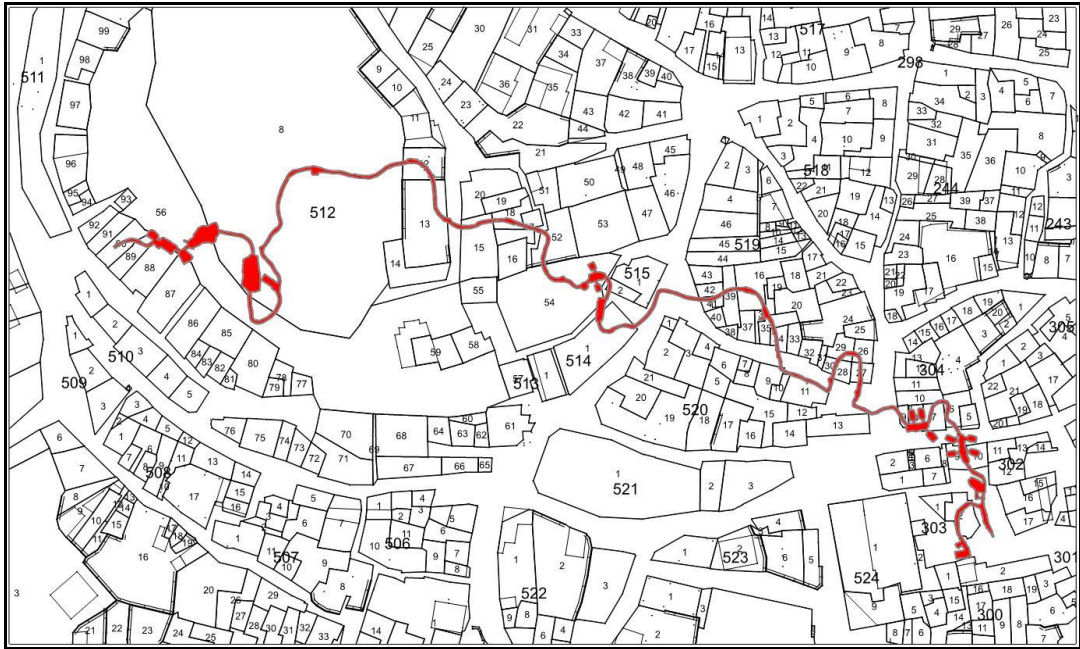
Hem yeraltı şehrinden metre ile alınan kontrol ölçüleri hem de 3B modelden sorgulanan uzunluklar ve bunların farkları Tablo 1.'de gösterilmiştir. Tablo 1. incelendiğinde kontrol ölçülerinin farkları en az 5 mm iken en fazla 40 mm'dir. Farklar ortalaması ise 16,9 mm'dir. Yeraltı şehrinin düzgün yüzeyli olmaması yerinden alınan kontrol ölçüleri ile sorgulanan ölçülere olumsuz etki etmesine rağmen ulaşılan sonuçlar tatmin edicidir.

Tablo 1. 3B modelin kontrolü için yerinden alınan ölçüler ile modelden sorgulanan ölçüler

	Yerinden Ölçü (m)	Modelden Ölçü (m)	Fark (mm)
1	0,745	0,730	15,00
2	0,710	0,690	20,00
3	1,670	1,660	10,00
4	0,845	0,850	5,00
5	1,640	1,620	20,00
6	3,580	3,570	10,00
7	2,135	2,120	15,00
8	5,265	5,280	15,00
9	3,585	3,600	15,00
10	1,975	1,980	5,00
11	0,545	0,550	5,00
12	0,570	0,560	10,00
13	1,640	1,600	40,00
14	1,890	1,860	30,00
15	4,150	4,120	30,00
16	1,895	1,870	25,00
17	3,660	3,650	10,00
18	1,325	1,350	25,00

3.2. 2B Haritanın Kadastro Haritası ile Çakıştırılıp İrdelenmesi

Aydıntepe ilçesi yeraltı şehrinin üstüne kurulmuş bir ilçedir. Bu yüzden yeraltı şehrinin üst kısmında yapılaşmalar ve özel mülkiyete konu parseller bulunmaktadır. Yeraltı şehrini üst kısmında kamu ve özel mülkiyete konu arazilerin tespiti için Bayburt Kadastro Müdürlüğü'nden Aydıntepe ilçesine ait kadastro haritası sayısal olarak temin edilmiştir. Aydıntepe Yeraltı Şehri'nin 3B nokta bulutu verisinden yeraltı şehrine ait 2 boyutlu haritası üretilmiştir. Üretilen bu 2B harita ile Aydıntepe Kadastro haritası çakıştırılmış olup Şekil 26.'da gösterilmektedir.



Şekil 32. Aydıntepe Yeraltı Şehri'nin 2B haritası ile Aydıntepe ilçesinin kadastro haritasının çakıştırılmış hali

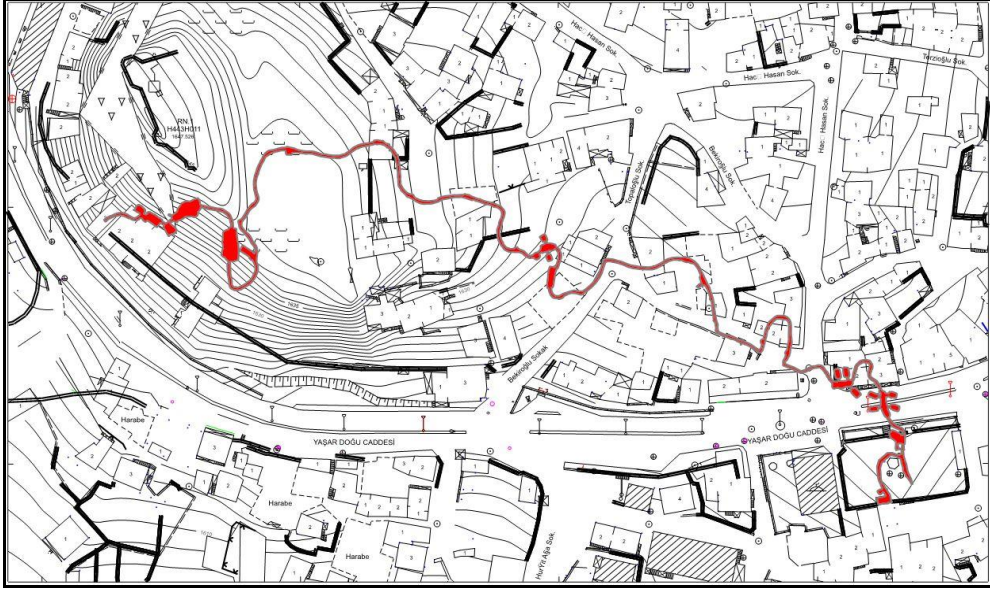
Aydıntepe Yeraltı Şehri'ne ait 2 boyutlu harita ile Aydıntepe kadastro haritaları çakıştırılıp incelendiğinde yeraltı şehrinin özel mülkiyete ve kamuya ait toplam 37 adet parselin, parkların, yolların ve Aydıntepe Kalesinin altından geçtiği görülmektedir. Yeraltı şehrinin altından geçtiği parsellere ait ada ve parsel numaraları Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Yeraltı şehrinin üstünde bulunan kadastral parsel listesi

	Ada	Parsel
1	302	8
2	302	9
3	302	10
4	303	2
5	304	6
6	304	7
7	304	8
8	304	9
9	512	8
10	512	12
11	512	13
12	512	15
13	512	17
14	512	18
15	512	52
16	512	54
17	512	56
18	512	87
19	512	88
20	512	89
21	512	90
22	514	5
23	515	2
24	519	16
25	519	26
26	519	27
27	519	28
28	519	29
29	519	30
30	519	34
31	519	35
32	519	36
33	519	39
34	519	41
35	519	42
36	520	9
37	520	11

3.3. 2B Haritanın Halihazır Harita ile Çakıştırılıp İrdelenmesi

Şehirler; yaşayan, gelişen ve değişen mekânlardır. Aydıntepe ilçesi nüfus bakımından küçük, gelişmişlik bakımından yavaş ilerleyen bir ilçe olmasına rağmen birçok yeni yapılaşmalar, yol bakım ve onarımları, yeraltı telefon, internet, elektrik, içme suyu ve kanalizasyon hattı gibi altyapıların bakımları, onarımları ve hatta yeni alt yapı hattı çalışmaları yapılmaktadır. Yapılan bu inşaat çalışmaları neticesinde ister istemez yeraltı şehri tahribata uğramaktadır. Yeraltı şehrinin tam olarak Aydıntepe ilçesinin neresinden geçtiği, üzerinde ne gibi yapılaşmanın olduğu, üzerinden geçen yolların ve altyapı hattının bilinmesi bu bölgelerde yapılacak çalışmalarda gerekli tedbirlerin alınması yönünden önemlidir. Aydıntepe Belediyesi'nden temin edilen Aydıntepe ilçe merkezine ait olan halihazır harita ile yeraltı şehrine ait 2B harita çakıştırılmış olup Şekil 27.'de gösterilmiştir.



Şekil 33. Aydıntepe Yeraltı Şehri'nin 2B haritası ile Aydıntepe ilçesi hâlihazır haritasının çakıştırılmış hali

Şekil 24. incelendiğinde yeraltı şehrinin girişi Yeraltı Şehri Parkı'ndan başlayıp, parkın altından geçerek Aydıntepe ilçesinin en işlek caddesi olan Yaşar Doğu Caddesi'ni dik bir şekilde kesmektedir. Yeraltı şehri ile caddenin tam kesiştiği noktada yeraltı şehrine ait geniş bir hol ve bu hole bağlanan 4 adet oda bulunmaktadır. Caddeden sonra yeraltı şehri 2 katlı ve 3 katlı olan 2 binanın altından geçmektedir ve yeraltı şehrinin bu kısmından geniş

bir hol, holün içerisinde küçük bir havuz ve bu hole bağlanan 4 adet (odalardan 1 tanesine girilememiştir) oda bulunmaktadır. Bu kısımdan sonra yeraltı şehri kısmen Topaloğlu Sokak boyunca paralel gitse de yeraltı şehrinin kıvrımlı yapısından dolayı Topaloğlu Sokak çevresindeki tek katlı ve 2 katlı evlerin altından da geçmektedir. Topaloğlu Sokak'tan sonra yeraltı şehri tek katlı ve 2 katlı yapıların olduğu diğer yapı adasının altına doğru ilerlemektedir. Bu adada bulunan Aydıntepe Mezarlığı ile Aydıntepe Kale'sinin altından geçerek kale giriş kısmındaki merdivenlerden yer yüzeyine çıkmaktadır. Yeraltı şehrinin mezarlık kısmında bir adet ve kale kısmına denk gelen yerlerinde ise iki adet göçük meydana gelmiştir. Mezarlık kısmındaki göçüğün boyutunun küçük olmasına rağmen kale kısmındaki göçükler nispeten büyük sayılabilecek boyuttadır. Göçüklere ait ekran görüntüsü Şekil 34.'te gösterilmiştir.



Şekil 34.(a) kale kısmında meydana gelen göçükler, (b) mezarlık kısmında meydana gelen göçük

3.4. 2B Haritanın İmar Planı ile Çakıştırılıp İrdelenmesi

Aydıntepe Belediyesi'nden temin edilen Aydıntepe İlçe merkezine ait olan İmar Planı ile çakıştırılmış olup, yeraltı şehrinin durumu ile mevcut imar planı Şekil 35.'te gösterilmiştir. Aydıntepe Belediyesi'nin İmar Planı incelendiğinde yeraltı şehrinin koruma altına alındığı görülmektedir. Fakat bu koruma alanı incelendiğinde çalışmamızdan üretilen yeraltı şehri haritası ile tamamen çakışmadığı tespit edilmiştir. Yeraltı şehrinin büyük bir kısmı koruma alanında kalmaktadır. Fakat yeraltı şehrinin bazı kısımları yapılaşmaya

Restorasyon öncesinde yapısal analizlerin doğru yapılması, tarihi yapının korunması ve müdahalelerin zarar vermeden gerçekleştirilmesi açısından kritik öneme sahiptir. Lazer tarama ile elde edilen veriler, zayıf noktaların ve çatlakların tespit edilmesine olanak tanır. Bu bilgiler, mühendislerin ve mimarların restorasyon sürecinde hangi alanlara öncelik vereceklerini belirleyerek, gerekli güçlendirme çalışmalarını planlamalarını sağlar. Böylece, müdahalelerin etkileri önceden değerlendirilebilir ve istenmeyen hasarlar en aza indirilebilir.

Bu teknoloji ayrıca, mühendis ve mimarlara daha etkin tasarım ve planlama yapma imkânı sunar. Restorasyon işlemleri dijital ortamda planlanabilir, potansiyel hatalar erken tespit edilip düzeltilerek proje maliyetleri düşürülebilir. Böylece, restorasyon işlemleri daha güvenli ve verimli bir şekilde gerçekleştirilebilir, inşaat süreçleri hızlanır.

Yeraltı şehirleri genellikle dar ve erişimi zor alanlar içerir, bu da doğrudan insan müdahalesini riskli hale getirebilir. Lazer tarama teknolojisi, doğrudan müdahaleyi en aza indirir ve riskli bölgelerde güvenliği artırır. Ayrıca, bu modeller erişim kısıtlı alanların detaylarını ortaya çıkararak çalışmaların daha güvenli yürütülmesine olanak tanır.

Zamanla doğal aşınma ve tahribata uğrayan Aydıntepe gibi tarihi yapılar için lazer tarama ile elde edilen dijital modeller, kalıcı bir kayıt sunar. Bu, gelecekteki restorasyon çalışmalarında referans olarak kullanılabilir. Yapının farklı dönemlerdeki durumları karşılaştırılarak zamanla oluşan değişiklikler analiz edilebilir ve gerekli müdahaleler zamanında yapılabilir.

Sonuç olarak, lazer tarama ve 3B modelleme teknolojileri, mühendislik projeleri ve restorasyon çalışmalarında yüksek hassasiyet, verimlilik, maliyet tasarrufu ve güvenlik sağlar. Bu teknoloji, yapıların belgelenmesini, yapısal analizlerin yapılmasını ve güvenli restorasyon işlemlerinin yürütülmesini destekleyerek yapıların korunmasına büyük katkı sunar.

4. SONUÇLAR

Yersel lazer tarayıcının yeraltı şehirleri gibi zorlu ve karmaşık yapıların 3B modellenmesinde kullanılabilirliği test edilmiştir. Bu çalışma sonucunda yersel lazer tarama cihazları ile çalışma alanının dar, kıvrımlı, girintili çıkıntılı ve koridor şeklinde çok uzun olması fark etmeksizin doğru bir şekilde 3B model oluşturabileceği görülmüştür. Yeraltı şehri içerisinden metre ile alınmış ölçüler doğru kabul edilip, bu ölçüler ile 3B modelden sorgulanan ölçüleri karşılaştırıldığında birbirleri arasında farkın ortalama 1.69 cm olması, hassas bir şekilde 3B model oluşturulabildiğini göstermektedir. Teodolit ve totalstation gibi klasik ölçme aletleri ile yeraltı şehrinin haritasının oluşturulması planlanmış olsaydı, öncelikle yeraltı şehri içerisine çok sayıda poligon noktalarının tesis edilmesi, ölçülmesi ve hesaplanması ardına detay ölçümünün yapılması gerekirdi. Bu durumda günlerce arazi çalışması yapılmasının yanında bir sürü de hesaplama ihtiyacı duyulurdu. Ayrıca bu çalışma için en az iki insana ihtiyaç duyulacak ve oluşturulan haritada tüm detaylar gösterilemeyecekti. Yersel lazer tarama cihazı ile yeraltı şehrinin tarama işlemi yaklaşık bir saat sürmüş ve tarama işlemini sadece bir kişi tarafından gerçekleştirmiştir. Yersel lazer tarama cihazlarının iş gücünden ve zamandan tasarruf sağladığı aşikardır.

Tarama işlemi sonrasında çok yoğun bir nokta bulutu verisi elde edilmiş olup, yeraltı şehrindeki tüm detaylar en ince ayrıntısına kadar 3B olarak görüntülenebilmektedir. Bu sayede yeraltı şehrinde bulunan tüm detaylar belgelenmiş olup, zamanla oluşabilecek olan tüm yapısal bozulmaların tespiti de kolaylaşacaktır. Çok yoğun nokta bulutu verisini işlemek ve bu veri ile çalışma yapmak için güçlü işlemcili ve büyük bellek boyutlu bilgisayara ihtiyaç duyulmaktadır. Yersel lazer tarama cihazlarının verisini işlemek ve kullanmak için iyi özellikli bilgisayara ihtiyaç duyulması dezavantajlı bir durum olarak görülmektedir.

Bu çalışma Aydıntepe Yeraltı Şehri açısından değerlendirilecek olursa; öncelikle yeraltı şehrinin tüm detaylarının görüldüğü 3B model üretilmiştir. 3B model ile yeraltı şehrinin fiziki durumu belgelenmiş ve kayıt altına alınmış olup, yeraltı şehrine ait tüm ölçü değerlerine bilgisayar ortamında 3B model aracılığı ile ulaşılabilmektedir. Ayrıca 3B modelden 2B harita elde edilerek yeraltı şehri, yer yüzeyinin ne kadar derinliğinde olduğu ve nerelerden geçtiği de tespit edilmiştir.

Yeraltı şehrinin 2B haritası ile Aydıntepe Halihazır Haritası karşılaştırılıp incelendiğinde yeraltı şehri birçok yapının altından geçtiği görülmektedir. Bu yapılar, yeraltı şehri için risk

oluşturmaktadır. Aynı şekilde yeraltı şehri de bu yapılar için risk oluşturmaktadır. Halihazır haritaya işlenmiş olan bazı alt yapı hatları yer yüzeyi ile yeraltı şehri arasından geçmektedir. İçme suyu ve kanalizasyon hatlarında bulunan kaçaklardan ve yağmur esnasında yer yüzeyinde bulunan sular yeraltı şehrine sızmaktadır. Sızın bu sular yeraltı şehri içerisine dolmaktadır.

Yeraltı şehrinin Kadastro Haritası ve İmar Planındaki durumuna bakıldığında; yeraltı şehri kamu veya özel mülkiyete ait 37 adet parselin altından geçmektedir. Bu parsellerin bazılarında yapılaşma mevcuttur. Bu yapılar ve bu yapılarda yapılacak olan tadilat çalışmaları yeraltı şehri için risk oluşturmaktadır. Aynı zamanda bu yapıların bazıları İmar Planında bulunan koruma alanında kalmaktadır. İmar Planındaki Aydıntepe Yeraltı Şehri koruma alanına bakıldığında, koruma alanı tam olarak yeraltı şehri sınırlarını kapsamamaktadır. Yeraltı şehri üç farklı yapı adasının altından geçmektedir. Bu yapı adaları incelendiğinde; yeraltı şehri hem yapı olan parsellerin hem de yapı inşaatına izin verilecek parsellerin altından geçmektedir.

Sonuç olarak Yeraltı şehirleri gibi tarihi ve kültürel açıdan değerli yapıların korunmasında, yalnızca mevcut yapıların güvenliğini sağlamak yeterli değildir; aynı zamanda bu yapıların aslına uygun bir şekilde restore edilmesi de büyük önem taşımaktadır. Restorasyon, yapıların orijinal kimliğini ve estetiğini korurken, aynı zamanda bu yapıların dayanıklılığını artırarak çevresel ve yapısal faktörlere karşı dirençli hale getirir. Özellikle yeraltı yapıları gibi hassas bölgelerde yapılan restorasyon çalışmaları, bu tür alanların doğal aşınma, su sızıntıları ve çevresel tehlikelere karşı korunmasını sağlamaktadır. Gelecek çalışmalar için restorasyon, tarihi yapıların ve kültürel mirasın sürdürülebilirliğini sağlamak için gereklidir. Uygulanan doğru teknikler ve alınan önlemler, bu yapıların hem uzun vadede korunmasını hem de yeni nesil mühendislik projelerine referans olacaktır. Bu çalışma ile Aydıntepe Yeraltı Şehri'nin korunması ve gelecek nesillere aktarılması açısından önemli bir adım atıldığı düşünülmektedir.

5. ÖNERİLER

Yeraltı yapıları, çok karmaşık, kıvrımlı, dar ve uzun şekilli yapılar olabilmektedir. Bu sebeple lazer tarama cihazı ile bu tip yapılarda çalışma planlanması durumunda, mümkünse yeraltı yapısının içerisinde poligon ağı veya sabit noktalar tesis etmenin, üretilen haritanın doğruluğunu ve hassasiyetini arttıracacağı gibi lazer tarama verilerinin bilgisayar ortamında değerlendirme, hesaplama ve dengeleme işlemlerini de kolaylaştıracağı düşünülmektedir.

Bulgular irdelendiğinde mevcut durumdaki yapılaşma hem yer altı şehri hem de mevcut yapılar için risk oluşturmaktadır. Buralarda meydana gelebilecek tehlikeli bir durum sonucunda hem yeraltı şehri tahribata uğrayacak hem de yeraltı şehri üstündeki yapı zarara uğrayacaktır. Bu durumda maddi kaybın yanında o yapılarda yaşayan canlıların can güvenliği de tehlike altında olacaktır. Bu yapı ve parsellerin kamulaştırılıp yeraltı şehri ve yapılar için bulunan riskin bertaraf edilmesi önemli bir husustur.

Yeraltı şehri ile yer yüzeyi arasında birçok alt yapı hattı bulunmaktadır. Bu alt yapı hatlarından özellikle kanalizasyon ve içme suyu hattındaki sızıntılardan ve yüzeydeki yağmur sularından yeraltı şehrinin içerisine su dolmaktadır. Bu sular, yeraltı yapısının tabanını ve yüzeyleri oluşturan kayaç yapısını aşındırmaktadır. Yeraltı şehrinin olduğu yere denk gelen alt yapılar alternatif güzergahlar belirlenerek pasif hale getirilmesi yeraltı şehri için tehlike oluşturmayacak ve aynı zamanda bu alt yapı hatlarında yapılacak olan bakım onarım çalışmaları yeraltı şehri için bir tehlike oluşturmamış olacaktır.

Yeraltı şehrinin üst kısmında bulunan parsellerde yapılacak olan imar çalışmalarını yeraltı şehri zarar verebileceğinden İmar Planında bu yapılara kısıtlama getirilmiştir. Yeraltı şehrinin üstünde bulunan 37 adet parselin tapu kütüklerine şerh düşülmesi, bu parsellerin satışlarında üçüncü kişilerin mağduriyet yaşamamaları adına önemli bir husustur.

İmar Planında yeraltı şehri korunma altına almak için koruma şeridi belirtilmiştir. Fakat bu koruma şeridi yeraltı şehri tamamen kapsamamaktadır. Bu yüzden İmar Planında koruma alanını yeraltı şehrinin 2B haritasına göre güncellenmesi önemli bir husustur. Yeraltı şehrinin üst kısmında yapılacak her türlü inşaat çalışmasının engellenmesi, yeraltı şehri korumaya yönelik önemli bir tedbir olacaktır.

6. KAYNAKLAR

- Aijazi, A. K., Malaterre, L., Trassoudaine, L., Chateau, T., & Checchin, P. (2019). Automatic detection and modeling of underground pipes using a portable 3D LiDAR system. *Sensors*, 19(24), 5345.
- Altuntaş, C., & Yıldız, F. (2008). Yersel lazer tarayıcı ölçme prensipleri ve nokta bulutlarının birleştirilmesi. *Jeodezi ve Jeoinformasyon Dergisi*, 98, 20-27.
- Avdan, U., Pekkan, E., & Çömert, R. (2013). Mağara ölçümlerinde yersel lazer tarayıcıların kullanılması (Tozman mağarası örneği). *Harita teknolojileri elektronik dergisi*, 5(2), 16-28.
- Aydın, Ö. (2000). *Aydın, Ö., 2000. Madencilik Ölçmeleri*. Yıldız Teknik Üniversitesi Yayınları.
- Aydıntepe. (2021). *2021 Aydıntepe Yeraltı Şehri* [Dataset]. https://www.tripadvisor.com.tr/Attraction_Review-g784813-d3511519-Reviews-Aydıntepe_Underground_City-Bayburt_Bayburt_Province.html
- BBC, Business Insider – Webtekno. (2024). *2024 Derin zaman deneyi: Bu mağarada 1 gün 24 saat değil!* [Dataset]. https://indigodergisi.com/2022/11/derin-zaman-deneyi-bu-magarada-1-gun-24-saat-degil/#google_vignette
- Beat, H. (2008). *Paperless Caving-An Electronic Cave Surveying System La topo sans papier-un système électronique de topographie*.
- Bobylev, N. (2016). Underground space as an urban indicator: Measuring use of subsurface. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 55, 40-51.
- Boehler, W., & Marbs, A. (2002). 3D scanning instruments. *Proceedings of the CIPA WG*, 6(9), 1-4.
- Černota, P., Staňková, H., & Gašincová, S. (2011). *Indirect distance measuring as applied upon both connecting surveys and orientation one*.
- Coğrafya Hocası. (2021). *2021 Türkiye'nin İlleri Dilsiz Harita* [Dataset].
- Di Stefano, F., Torresani, A., Farella, E. M., Pierdicca, R., Menna, F., & Remondino, F. (2021). 3D surveying of underground built heritage: Opportunities and challenges of mobile technologies. *Sustainability*, 13(23), 13289.
- Dunning, S., Massey, C., & Rosser, N. (2009). Structural and geomorphological features of landslides in the Bhutan Himalaya derived from Terrestrial Laser Scanning. *Geomorphology*, 103(1), 17-29.

- Ergincan, F., Çabuk, A., Avdan, U., & Tün, M. (2010). Advanced technologies for archaeological documentation: Patara case. *Scientific Research and Essays*, 5(18), 2615-2629.
- Errington, A. F., Daku, B. L., & Prugger, A. F. (2016). Clay mapping in underground potash mines: An initial investigation into the use of corrected intensity terrestrial LiDAR data. *2016 IEEE International Conference on Imaging Systems and Techniques (IST)*, 94-99.
- Eyre, M., Wetherelt, A., & Coggan, J. (2016). Evaluation of automated underground mapping solutions for mining and civil engineering applications. *Journal of Applied Remote Sensing*, 10(4), 046011-046011.
- Fabbri, S., Sauro, F., Santagata, T., Rossi, G., & De Waele, J. (2017). High-resolution 3-D mapping using terrestrial laser scanning as a tool for geomorphological and speleogenetical studies in caves: An example from the Lessini mountains (North Italy). *Geomorphology*, 280, 16-29.
- Farella, E. M. (2016). 3D mapping of underground environments with a hand-held laser scanner. *Bollettino della società italiana di fotogrammetria e topografia*, 2, 1-10.
- Fröhlich, C., Mettenleiter, M., & others. (2004). Terrestrial laser scanning—new perspectives in 3D surveying. *International archives of photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences*, 36(8), W2.
- Gallay, M., Kaňuk, J., Hochmuth, Z., Meneely, J. D., Hofierka, J., & Sedlák, V. (2015). Large-scale and high-resolution 3-D cave mapping by terrestrial laser scanning: A case study of the Domica Cave, Slovakia. *International Journal of Speleology*, 44(3), 277-291.
- Geomatics, G. (2024). *2024 Zeb-Revo El Tipi Lazer Tarayıcı* [Dataset]. <https://www.geomaticsgroup.com/urunler/-zeb-revo-el-tipi-lazer-tarayici->
- Geosystems. (2024). *2024 Geomax Zenith 35 GPS GNSS Rover with Getac PS336 Data Collector Kit* [Dataset]. <https://www.precision-geosystems.com/product/geomax-zenith-35-gps-gnss-rover-with-getacps336-data-collector/?v=84de8e2b14bb>
- Gong, Z., Li, J., Luo, Z., Wen, C., Wang, C., & Zelek, J. (2019). Mapping and semantic modeling of underground parking lots using a backpack LiDAR system. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 22(2), 734-746.
- González-Aguilera, D., Muñoz-Nieto, A., Gómez-Lahoz, J., Herrero-Pascual, J., & Gutierrez-Alonso, G. (2009). 3D digital surveying and modelling of cave geometry: Application to paleolithic rock art. *Sensors*, 9(02), 1108-1127.
- Hunter, D. (2010). A field trial of common hand-held cave survey instruments and their readers. *Bullita Cave System*, 183, 10-12.

- Johnston, J., Semmler, M., Montgomery, M., Fityus, S., Lea, J., Black, K., & McDonald, S. (2018). Comparison of imaging technologies for geotechnical investigation of abandoned coal mine workings: A case study. *Australian Geomechanics Journal*, 53(3), 125-137.
- Karabacak, A., & Yakar, M. (2023). Giyilebilir Mobil LiDAR'ın Kadastroda Kullanılabilirliği. *Türkiye Lidar Dergisi*, 5(2), 52-60.
- Karasaka, L. (2012). *Mobil yersel lazer tarama sistemlerinin fotogrametrik rölöve projelerinde kullanılabilirliği üzerine bir çalışma*.
- Karşıdağ, G. (2011a). Yersel lazer tarama ölçmelerinde doğruluk analizi. İstanbul Teknik Üniversitesi. *Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*.
- Karşıdağ, G. (2011b). Yersel lazer tarama ölçmelerinde doğruluk analizi. İstanbul Teknik Üniversitesi. *Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*.
- Kaya, B. C., & Bıyık, M. E. (2024). Kentsel Alanlarda Kadastro Haritaları için Mobil LiDAR Yönteminin Kullanılması. *Türkiye Lidar Dergisi*, 6(1), 36-43.
- Kukreja, S. L., Löfberg, J., & Brenner, M. J. (2006). A least absolute shrinkage and selection operator (LASSO) for nonlinear system identification. *IFAC proceedings volumes*, 39(1), Article 1.
- Leica, G. (2024). *2024 Leica Geosystems Milrem announce Pegasus Multiscope* [Dataset]. <https://leica-geosystems.com/blog-content/2016/leica-geosystems-milrem-announce-pegasus-multiscope>
- Li, J., Yan, X., Zhao, F., & Zhao, X. (2022). The underground explosion point high precision measurement method based on multidimensional information fusion of vibration sensors. *Sensor Review*, 42(3), 281-293.
- Lichti, D. D., & Gordon, S. J. (2004). Error propagation in directly georeferenced terrestrial laser scanner point clouds for cultural heritage recording. *Proc. of FIG Working Week, Athens, Greece, May, 22-27*.
- Motif, H. (2024). *3 Boyutlu Lazer Tarama* [Dataset]. <https://motifharita.com/3b-lazer-tarama/>
- Nováková, M., Gallay, M., Šupinský, J., Ferré, E., Asti, R., de Saint Blanquat, M., Bajolet, F., & Sorriaux, P. (2022). Correcting laser scanning intensity recorded in a cave environment for high-resolution lithological mapping: A case study of the Gouffre Georges, France. *Remote Sensing of Environment*, 280, 113210.
- Özdemir, E., Erdal, K., Veziroğlu, F., & Ateş, S. S. (2022). Tuz Mağaralarında Sırt Çantası LiDAR Sisteminin 3B Model Üretiminde Kullanılması; Tuzluca, Iğdır Örneği. *Türkiye Uzaktan Algılama Dergisi*, 4(1), 36-42.

- Özdoğan, M. V. (2015). *Madencilik Faaliyetleri Sonucu Oluşan Yüzey Hareketlerinin Yeni Teknolojiler Ile Belirlenmesi* [PhD Thesis]. Dokuz Eylül Üniversitesi (Turkey).
- PaksoytekniK. (2022). *PaksoytekniK 2022 PROFESYONEL 3D MOBİL HARİTALAMA SİSTEMİ* [Dataset]. <https://paksoytekniK.com.tr/urun/gexcel-heron/>
- Pechini, M. P. (1967). Washington, DC: US patent and trademark office. *US patent*, 3, 697.
- Pekkan, E. (2018). Pekkan, E., 2018. Mağara Araştırma ve Haritalama Yöntemleri. İçinde *Mağara Araştırma ve Haritalama Yöntemler*. Mavi Gezen.
- Puente, I., González-Jorge, H., Martínez-Sánchez, J., & Arias, P. (2014). Automatic detection of road tunnel luminaires using a mobile LiDAR system. *Measurement*, 47, 569-575.
- Reshetyuk, Y. (2009). *Self-calibration and direct georeferencing in terrestrial laser scanning* [PhD Thesis]. KTH.
- Riveiro, B., Morer, P., Arias, P., & De Arteaga, I. (2011). Terrestrial laser scanning and limit analysis of masonry arch bridges. *Construction and building materials*, 25(4), 1726-1735.
- Roncat, A., Dublyansky, Y., Spötl, C., & Dorninger, P. (2011). Full-3D surveying of caves: A case study of Märchenhöhle (Austria). *Proceedings of the International Association for Mathematical Geosciences (IAMG 2011)*.
- Santa, C., Chaminé, H. I., & Fernandes, I. (2022). Methodologies for Mapping in Large Rock Excavations in Hazardous Geotechnical Contexts. *International Workshop on Natural Hazards*, 151-156.
- Skydata. (2024). *2024 DJI Zenmuse L1 Lidar Scanner Payload for M350* [Dataset]. <https://www.skystore.fi/tuote/dji-l1-lidar-scanner>
- Spadaro, A., Piras, M., Grasso, N., Lollino, P., Parisi, A., & Giordan, D. (2024). Three-dimensional modelling of artificial caves for geomechanical analysis. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 48, 401-407.
- Staiger, R. (2003). Terrestrial laser scanning technology, systems and applications. *2nd FIG Regional Conference Marrakech, Morocco, 1*, 1-10.
- Suleymanoglu, B., Soycan, M., & Toth, C. (2022). Indoor mapping: Experiences with lidar slam. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 43, 279-285.
- TMB. (2007). *TMB, 2007. Mağaracılıkta Ölçme Bilgisi ve Haritacılık*, (C. 3). Eğitim Yayınları.

- Trybała, P., Kasza, D., Wajs, J., & Remondino, F. (2023). Comparison of low-cost handheld lidar-based slam systems for mapping underground tunnels. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 48, 517-524.
- Ulvi, A., Yakar, M., Yiğit, A., & Kaya, Y. (2019). Arkeolojik Alanların Dokümantasyonunun Yersel Lazer Tarama Ve İha Teknikleri İle Elde Edilmesi: Konya Yunuslar Örneği. *TUFUAB X. Teknik Sempozyumu, Aksaray*.
- Vozikis, G., Haring, A., Vozikis, E., & Kraus, K. (2004). *Laser scanning: A new method for recording and documentation in archaeology*. na.
- Wetherelt, A., & Hunt, P. (2004). Azimuth determinations using an adapted Wild GAK1 (an alternative approach). *Survey review*, 37(294), 592-603.
- Yadav, M., & Singh, A. K. (2018). Rural road surface extraction using mobile LiDAR point cloud data. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 46, 531-538.
- Yastikli, N. (2007). Documentation of cultural heritage using digital photogrammetry and laser scanning. *Journal of Cultural heritage*, 8(4), 423-427.
- Zeybek, M. (2021). Indoor mapping and positioning applications of hand-held lidar simultaneous localization and mapping (slam) systems. *Türkiye Lidar Dergisi*, 3(1), 7-16.

ÖZGEÇMİŞ

İlkokulu Arslan Bey İlköğretim Okulu'nda, liseyi Hoca Ahmet Yesevi Lisesi'nde tamamladı. 2006 yılında Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği bölümünde Lisans eğitimi almaya hak kazandı. Lisans eğitimini 09/08/2011 tarihinde tamamladı. Lisans mezuniyetinden hemen sonra Sinop İli Boyabat İlçesinde haritacılık faaliyetlerinde hizmet veren bir şirket kurdu ve 2017 yılı mayıs ayına kadar bu şirkette çalıştı. 2017 yılı mayıs ayında Bayburt Üniversitesi'nde öğretim görevlisi olarak çalışmaya başladı. Aynı zamanda ikinci lisans olarak Bayburt Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği bölümünde Lisans eğitimi almaya hak kazandı. İkinci lisans eğitimini 29/07/2020 tarihinde tamamladı. 2021 yıl Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Harita Mühendisliği Anabilim Dalı'nda "Yüksek Lisans" eğitimine başladı. Şu an Bayburt Üniversitesi'nde öğretim görevlisi olarak çalışmaktadır.