

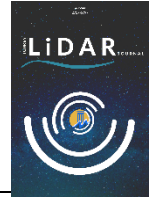


Turkish Journal of LiDAR

Türkiye LiDAR Dergisi

<https://dergipark.org.tr/tr/pub/melid>

e-ISSN 2717-6797



Giyilebilir Mobil LİDAR Kullanım Alanları ve Cambazlı Kilisesinin 3B Modellemesi

Atilla Karabacak^{*1}, Murat Yakar²

¹Mersin Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Mimarlık ve Şehir Planlama Bölümü, Mersin, Türkiye

²Mersin Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, Mersin, Türkiye

Anahtar Kelimeler

Uzaktan Algılama,
Giyilebilir Mobil Lidar,
Fotogrametri,
Lazer Tarama,
3B.

ÖZ

Son 20 yılda navigasyon sistemleri ve teknolojiadaki hızlı değişim, sensörlerin hayatımıza daha fazla girmesi, nokta bulutu ile çok karmaşık yerlerin kolayca algılanabilmesi, haritacılık mesleğinde çevreyi haritalayan yeni sistemleri de beraberinde getirmiştir. Einstein bahsettiği lazer İngilizce adı laser; (Light amplification by Stimulated Emission of Radiatin), 1960 yılında Maiman tarafından ispat edildi ve 1993 yılında ilk ticari Light Detection And Ranging (LİDAR) uçaktan denizaltıları tespit etmek için kullanıldı. 2000 yıllarından sonra mobil LİDAR kullanılmaya başlandı her türlü hareket eden araçlara takılarak havada, karada ve denizde veri toplanmaya başlandı, son yıllarda araçların giremediği yerler için ise bir insanın üzerine giyilebildiği mobil LİDAR kullanılmaya başlandı. Bu çalışmada bu teknolojiyle ilgili yapılan çalışmalar incelenerek Giyilebilir Mobil Lidarın (GML) kullanım alanları araştırılmıştır. GYM ile tarihi Cambazlı Kilisesinin Yer Kontrol Noktası (YKN) kullanarak 3 Boyutlu (3B) modeli ve ortofotusu hata sınırları içerisinde başarıyla oluşturulmuştur.

Wearable Mobile LiDAR Usage Areas and 3D Modeling of Cambazlı Church

Keywords

Remote sensing,
Wearable Mobile Lidar,
Photogrammetry,
Laser Scanning,
3D.

ABSTRACT

In the last 20 years, the rapid change in navigation systems and technology, the introduction of sensors into our lives, the easy perception of very complex places with point cloud, have brought new systems that map the environment in the cartography profession. The laser that Einstein mentioned is laser in English; (Light amplification by Stimulated Emission of Radiatin) was demonstrated by Maiman in 1960, and in 1993 the first commercial Light Detection And Ranging (LIDAR) was used to detect submarines from aircraft. After 2000, mobile LIDAR started to be used, and data was collected in the air, on land and at sea by attaching to all kinds of moving vehicles. In this study, the usage areas of Wearable Mobile Lidar (WML) were investigated by examining the studies on this technology. Using the Ground Control Point (GCP) of the historical Cambazlı Church with WML, the 3-Dimensional (3D) model and orthophoto were successfully created within the error limits.

* Sorumlu Yazar (*Corresponding Author)

{atllakarabacak@mersin.edu.tr} ORCID ID 0000-0002-1096-3949
{myakar@mersin.edu.tr} ORCID ID 0000-0002-2664-6251

Kaynak Göster (APA) / Cite this;

Karabacak, A. & Yakar, M. (2022). Giyilebilir Mobil LİDAR Kullanım Alanları ve Cambazlı Kilisesinin 3B Modellemesi. Türkiye Lidar Dergisi, 4(2), 37-52

1. Mobil LİDAR

Mobil LİDAR hava araçları dışında, hareketli olan araç ya da insanlar üzerine yerleştirilmiş platformdan lazer tarama yapılmasını ifade eder. Sistem bir minibüs, kamyonet, tren, gemi vb. araçlar üzerine monte edilmiş ise araçlı mobil adını alır. Yine elde küçük nesnelere (otomobil, heykel vb.) taramasını yapmak için olanlarına; el tipi mobil tarayıcı denir. Son olarak bir insan platformu üzerine giyerek tarama yapıyorsa; GML denir.

2. YÖNTEM

2.1. Araçlı Mobil LİDAR

Genellikle herhangi bir mobil LiDAR sisteminde: bir mobil platform, bir lazer tarayıcı, bir Küresel Navigasyon Uydu Sistemleri "Global Navigation Satellite Systems" (GNSS) anteni ile birlikte bir atalet ölçüm sistemi "Inertial Measurement Unit" (IMU), dijital kameralar ve tekerlek monteli Mesafe Ölçüm Göstergesi "Distance Measurement Indicator" (DMI) entegre eden bir navigasyon çözüm sistemi; veri depolarını içeren ve tüm sensörlerin işlevini entegre eden bir kontrol sistemini bünyesinde bulundurur (Guan vd., 2016). GNSS, bir kara konumlandırma sisteminin temel bileşenidir ve santimetreye kadar doğruluğu sağlayabilir; ancak GNSS sinyali birçok faktöre bağlı olarak ara ara kesilebilir; örneğin tüneller, yüksek binalar, duvarlar ve ağaç tepeleri vb. nedenlerle tüm bir mobil tarama boyunca GNSS sinyalini korumak neredeyse imkânsızdır. Bu nedenle mobil LiDAR sistemleri, periyodik düzeltmeler almak için GNSS'ye dayanan IMU'lar kullanır. GNSS alıcıları zaman, konum ve hızı ölçer. Konum ve hızı bilgisayar haricinde IMU'ya gönderir, IMU GNSS'den aldığı son konumdan kısa sürede ivmeölçer ve Jiroskoplara konum ve hızlar hesaplanır ve GNSS sinyallerinin kötü olduğu yerlerde sistem IMU tarafından beslenir. Ayrıca, aracın tekerleklerinden birine bağlı olan DMI, tekerlek dönüşlerini ölçerek kat edilen mesafeyi hesaplar. DMI; GNSS ve IMU'nun ek konumlandırma bilgisiyle güvenilirliğini artırır. Ayrıca DMI, araç durması durumunda yinelenen LiDAR verilerinin azaltılmasını sağlar. GNSS ise IMU'ya güncellenmiş konum bilgisi sağlar (Puente vd., 2013). Mobil lazer taramanın plan görünümü Şekil 2'de gösterilmiştir.

Mobil lazer taramadaki konum hesabı aşağıda verilen (1) bağıntısıyla ifade edilebilir (Barber vd., 2008).

$$r_p^m = r(t)_{GPS}^m + R(t)_{IMU}^m (r_s^{IMU} - r_{GPS}^{IMU} + d_p^s R_s^{IMU} \hat{r}(t)_p^s) \quad (1)$$

r_p^m ; obje noktasının konum vektörüdür.

$r(t)_{GPS}^m$; t anındaki GPS anteninin konum

vektörüdür.

$R(t)_{IMU}^m$; IMU çerçevesi arasındaki dönüş matrisidir.

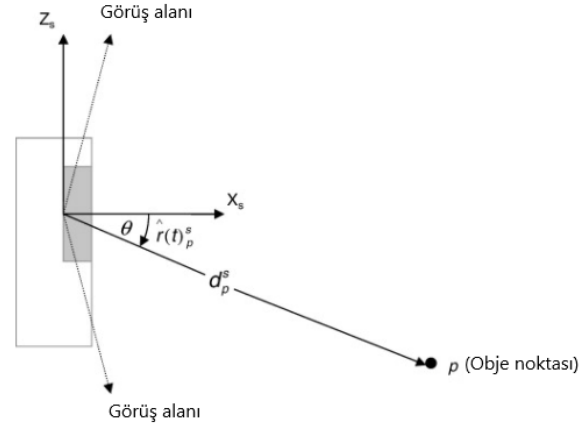
r_s^{IMU} , sensörün IMU'daki konum vektörüdür.

r_{GPS}^{IMU} ; IMU içinde GPS anteninin konum vektörüdür.

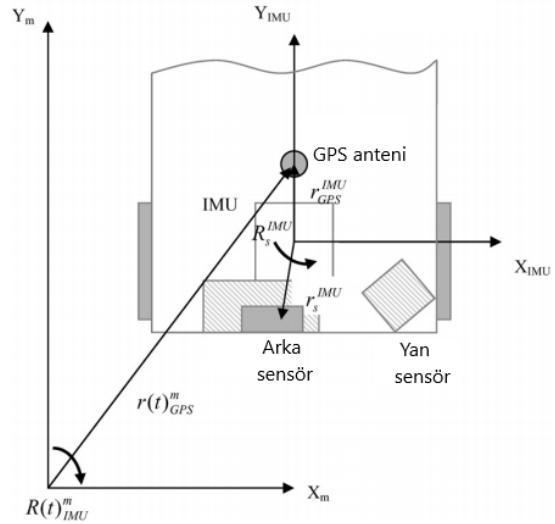
d_p^s ; sensör tarafından objeye gözlemlenen aralıktır.

R_s^{IMU} ; IMU ve sensör çerçevesi arasındaki dönüş matrisidir.

$\hat{r}(t)_p^s = \begin{pmatrix} \cos\theta \\ 0 \\ \sin\theta \end{pmatrix}$; zaman sensör çerçevesi obje noktası yönünde birim vektörü nokta t θ tarama açısıdır (Barber vd., 2008).



Şekil 1. Lazer taramada iki boyutlu plan görünümü (Barber vd., 2008).



Şekil 2. GPS anteni, IMU ve lazer profil oluşturucu plan görünümü (Barber vd., 2008).

Mobil lazer taramadaki konum vektörü aşağıda verilen (2) bağıntılardan hesaplanır (Guan vd., 2016).

$$\begin{bmatrix} X_p \\ Y_p \\ Z_p \end{bmatrix}^m = \begin{bmatrix} X_{GNSS} \\ Y_{GNSS} \\ Z_{GNSS} \end{bmatrix}^m + R_{IMU}^m(w, \varphi, K) \cdot \left(R_s^{IMU}(\Delta w, \Delta \varphi, \Delta K) \cdot r_p^s + \begin{bmatrix} L_x \\ L_y \\ L_z \end{bmatrix}_{GNSS}^{IMU} - \begin{bmatrix} L_x^{G/I} \\ L_y^{G/I} \\ L_z^{G/I} \end{bmatrix}_{GNSS}^{IMU} \right) \quad (2)$$

X_p, Y_p, Z_p ; Eşleme çerçevesinde hedef P'nin konumu.

$X_{GNSS}, Y_{GNSS}, Z_{GNSS}$; GNSS anteninin haritalama çerçevesindeki konumu.

$R_{IMU}^m(w, \varphi, K)$; IMU ve haritalama çerçevesi arasındaki döndürme matrisi, (w, φ, K) yerel haritalama çerçevesine göre sensörün yuvarlanması, eğimi ve yalpalamasıdır. Bu değerler IMU sistemi tarafından sağlanmaktadır.

$R_s^{IMU}(\Delta w, \Delta \phi, \Delta K)$; Lazer tarayıcı ve IMU arasındaki rotasyon matrisi, $(\Delta w, \Delta \phi, \Delta K)$ tarayıcı çerçevesini IMU'nun gövde çerçevesiyle hizalayan ön görüş açılarıdır. Bu değerler sistem kalibrasyonu ile belirlenir.

$r_{p(ad)}$; Lazer tarayıcı koordinat sistemindeki P Noktasının görece konum vektörü, lazer tarayıcı tarafından ölçülen ve döndürülen tarama açısı ve aralığı için α ve d .

L_x, L_y, L_z ; Navigasyon ve IMU orijininin lazer tarayıcı orijinine ofsetleri. Bu değerler sistem kalibrasyonu veya ölçümü ile belirlenir.

$L_x^{G/I}, L_y^{G/I}, L_z^{G/I}$; IMU orijininin GNSS orijinine ofsetleri. Bu değerler sistem kalibrasyonu veya ölçümü ile belirlenir (Guan vd., 2016).

Uzun menzilli darbe tabanlı lazer tarayıcı üreticilerinin bazıları Velodyne, Optech Lynx, RIEGL, Leica ve Trimble markaları sayılabilir. Faz ölçümüne dayalı kısa menzilli lazer tarayıcı üreticilerinin bazıları Z+F ve Faro markaları söylenebilir (Alptekin & Yakar, 2020b; Altuntaş vd., 2007; Doğan & Yakar, 2018).

Aşağıda Tablo 1'de bazı lazer tarayıcıların özellikleri verilmiştir.

Tablo 1. Örnek lazer tarayıcıların teknik özellikleri (Alptekin & Yakar, 2020a)

Lazer tarayıcı	RIEGL VQ-450	Optech Lynx SG1	Z + F PROFİL 9012	Faro Odak x330	Velodin HD64
Veri hızı (MHz)	0.550	0.150-1.200	1	0.976	1.333
Tarama hızı (Hz)	200	500	200	97	5-15
Görüş açısı (°)	360	360	360	360(Y) 300(D)	360 (Y)/26.8(D)
Menzil (m)	800 (80 yansıtma) 70 (10 yansıtma)	250 (10 yansıtma)	119	0,6-330	120 (80 yansıtma) 50 (10 yansıtma)
Mesafe hassasiyeti (mm)	5	5	1	1	10
Mesafe doğruluğu (mm)	8	±50	1	±2	<50
Lazer tipi	Darbe tabanlı	Darbe tabanlı	Faza dayalı	Faza dayalı	Darbe tabanlı

Şekil 3'te araca monte edilmiş mobil LİDAR ve tekerlek sayacı görülmektedir.



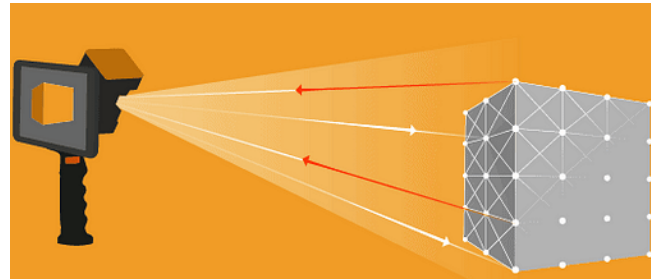
Şekil 3. Farklı araçlara monte edilmiş mobil lazer tarayıcılar (PaksoytekniK, 2021; Yu, 2014).

2.1.1. Araçlı Mobil LİDAR Kullanım Alanları

İlk mobil LiDAR sisteminin ortaya çıkışı 2003 yılıdır. Mobil bir LiDAR sistemi ile harita mühendisleri bir otoyolda, kırsal yolda, demiryolunda, bir nehir veya gölün kıyı şeridinde araç kullanarak veri toplayabilir. Coğrafi Bilgi Sistemi (CBS) verisi almada, 3B şehir modellerinin hazırlanmasında, her türlü mühendislik çalışmalarında, sanal şehir turlarında, emniyet kuvvetlerince, belediye hizmetlerinde ayrıca yol boyunca, ağaçları, köprüleri, sokak lambalarını, binaları, elektrik hatlarını ve diğer yol işaretlerini, asfalttaki çatlaklar, istinat duvarlarını, barbakanları, şev, hendek vb. tüm ayrıntıları 3B nokta bulutu olarak koordinatlarıyla kayıt altına alır (Guan vd., 2016; PaksoytekniK, 2021; Yu, 2014).

2.2. Giyilebilir Mobil LİDAR (GML)

GML bir insanın üzerine genellikle bir sırt çantası vasıtasıyla giyerek taşıdığı ve bir tablet bilgisayar üzerinden gezerken mobil LİDAR taşıyıcı operatör tarafından izlenebilen gezilen yerlerdeki menzile içinde kalan objelerin 360°, 3B nokta bulutu olarak verilerin kaydedildiği bir sistemdir (Şekil 5, 6, 7). İnsan tarafından taşınabilen mobil LİDAR'ın elde ya da sırt çantasında taşınan modelleri piyasada mevcuttur. El tipi olanlar daha küçük sensörler içerdiğinden kaliteli veri alma konusunda sırt çantasında taşınanlar kadar iyi değildir. Giyilebilir mobil; LİDAR sensörü, RGB kamera ve GNSS-IMU bünyesinde barındıran, her türlü ışık koşulunda çalışabilen kompakt sistemlerdir. Tam 360° panoramik görüntüleri yakalayabilen LİDAR sensörleri farklı markalarda 100 - 200 m vb. menzile sahiplerdir. Şekil 4'de bir LİDAR ışığı ile aydınlatılan nesneye çarpan ışınların yansımalarına kadar geçen süreden mesafelerinin hesaplanması ve noktalardan oluşan üçgen model üzerinden yüzeylerin belirlenmesiyle 3B model oluşturulması gösterilmiştir (NAVVIS, 2021; Lauter, 2020; GEXCEL, 2021; Geoslam 2021).



Şekil 4. Mobil LİDAR ile taranmış bir tünelin 3B nokta bulutu (Geoslam 2021).

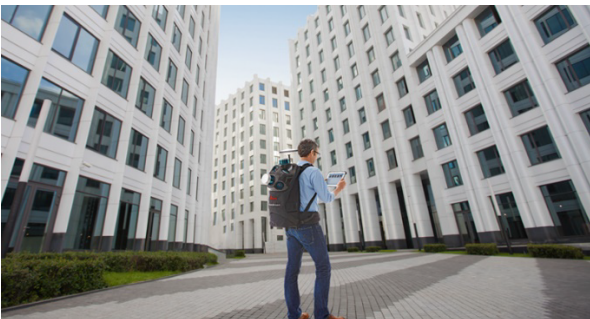
Sistem bir insanın sırtında taşındığından dar ve karmaşık yapılarda kolayca hareket edilerek çalışılabilir. Ayrıca çalışma sahasına giderken arabanın bagajına konarak kolayca taşınabilir. GML insan yürüyebildiği her türlü mekânda kullanılacak şekilde tasarlanmıştır; örneğin iç ve dış mekânlar, yeraltı madenleri tüneller, kültürel miras alanları, ormanlar, kentsel alanlar, binalar ve olay yerinin kayıt altına alınması vb. zorlu ve karmaşık alanlarda çözüm olması için tasarlanmış bir sistemdir (NAVVIS, 2021; Lauter, 2020; GEXCEL, 2021; LEICA, 2021). Farklı firmalara ait giyilebilir mobil LİDAR tarayıcılar Şekil 5, 6, 7'de gösterilmiştir.



Şekil 5. GEXCEL Heron GML tarayıcı (GEXCEL, 2021).



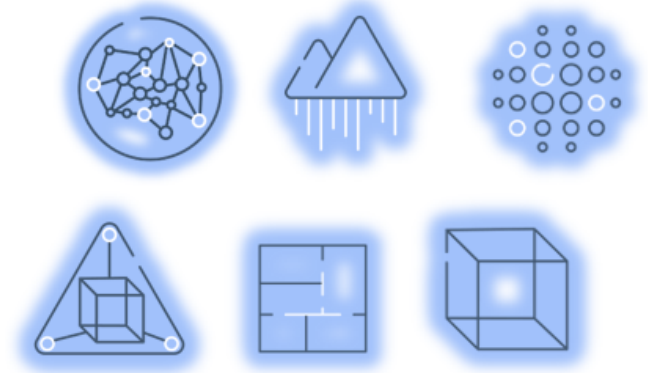
Şekil 6. Navvis GML tarayıcı bir gemi müzesinde tarama yaparken (Lauter, 2020).



Şekil 7. Leica Pegasus Backpack GML tarayıcı kentsel alanda tarama yaparken (LEICA, 2021).

Üstü kapalı mekânlarda GNSS çalışmadığından, açık gökyüzü görünmediği yerlerde konumlandırma için başka yöntemler gereklidir. Eş zamanlı yerleştirme ve haritalama "Simultaneous Localization And Mapping" (SLAM); 2008 yılında geliştirildi, sistem mobil yani hareketle aktif olur, bilinmeyen bir ortamın haritasını

oluştururken aynı zamanda oluşturduğu haritayı farklı konumlara göre iyileştirerek ilerler, ortamda gezinirken sorunu çözmeye yönelik algoritmik bir girişim sunar. SLAM, sayesinde mobil robotik gezinirken bilinmeyen çevreyi algılayarak oluşturulan haritada kendini konumlandırarak ilerler. SLAM LİDAR'dan gelen mesafelerle, bulunduğu sahnede kendini konumlandırır. Bunu yapması için LİDAR, GPS, ivmeölçer, sensörler, algoritma, veri vb. gereklidir. SLAM sayesinde GPS sinyallerinin çekmediği; mağara, tünel, kapalı madenler, bina içleri konumlandırılabilir, ayrıca açık alanlarda da orman içleri, kanyonlar, kent içi yüksek binaların olduğu caddelerde de GPS sinyalleri bozulduğundan çözüm olmaktadır. SLAM teknolojisi zor ve karmaşık alanların ölçümü için devrim yaratmıştır. Göreceli ve mutlak konumlandırma girdilerini alan SLAM giyilebilir mobil LİDAR'ın her yer değişiminin anlık konumunu hesaplar ancak bu şekilde hesaplanan konumunun statik bir konum kadar hassas olması beklenemez (Geoslam, 2021; Thomson, 2020; Thomson, 2021; Yılmaz & Yakar, 2016a). SLAM teknolojisinde birçok farklı bakış açısıyla farklı algoritmalar oluşturulabilmesi Şekil 8'de gösterilmiştir.



Şekil 8. SLAM için farklı algoritmalar geliştirilebilir (Geoslam, 2021).

Elde edilen kartografik verilerin kalitesi için sahada dikkat edilecek hususlar; (Filippo, vd., 2018; Stefano, vd., 2021; Chio ve Hou, 2021).

2.2.1. GML Dikkat Edilecek Hususlar

- Çalışma sahası önceden gezilerek kritik yerler belirlenir yürüme yolundaki engeller kaldırılır;
- Alet Operatörünün güvenli geçişini sağlamak için katlar arasındaki kapı veya merdiven gibi tüm bağlantılara kolayca geçilebilir hale getirin yani kapıları açın;
- Tarama sırasında hareketli nesnelere kaçınm ve bununla ilgili önceden önlem alın;
- İyi bir kapsama alanı ve yüksek çözünürlüklü bir veriye sahip olmak için yavaş yürüyün. İleri hareket çok hızlıysa, SLAM algoritmasının ham lazer verilerini bir nokta bulutuna dönüştürmesi için yeterli zaman olmayabilir;
- Yavaş hareket edilmesi gereken geçiş alanlarına koridordan odaya girerken her iki tarafı aynı anda görmesi için iyice yavaşlanmalıdır;

- Işık farkı olan kapalı yerden açığa ya da tam tersi durumunda da yine her iki taraf görünecek şekilde iyice yavaşlanarak geçilmelidir;
- Çalışma sahasında birbirine benzer sahneler varsa; benzer koridordan birine bir kutu koymak veya boş otoparka bir araba koyarak sahneleri farklılaştırmak;
- Yürürken dönüşleri dairesel yapmak;
- Çıktığımız merdiven yerine inerken başka merdivenden inmek, eğer kapalı mekânda ikinci bir kapı varsa birinden girip diğerinden çıkarak sahneleri farklılaştırmak;
- Başlangıç ve bitiş noktalarının aynı nokta olmasına dikkat edilmesi;
- Ani hareketlerden kaçınmak;
- Hassasiyet istenen yerlerde yürüme hızı düşürülmesi;
- Büyük çalışma sahalarını daha küçük adalara bölerek çalışın; böylece hem büyük dosya boyutundan kurtulun hem de sahayı küçülterek SLAM verilerinde olabilecek hata miktarından kaçınılabilir;
- Her tarama oturumu 30 dakikayı geçmeden tamamlamak önerilir (Yakar vd., 2010a; Oruç & Öztürk, 2021).

2.2.2. Gexcel Heron Giyilebilir 3B Mobil Haritalama Sistemi

2015 yılında geliştirilen, giyilebilir veya el tipi kullanılabilir bir mobil lazer tarayıcıdır. SLAM Algoritması kullanır. Her türlü yürünebilen alanlarda kullanılabilir. İç ve dış mekân, yer altı madenleri, jeo-uzamsal uygulamalar, yapılar, tüneller, kültürel miras alanları, adli olaylar, ormanlar, kentsel alanlar vb. kullanılabilir. Hem geometri hem de renk bilgilerini birlikte toplamak için 3B nokta bulutları ve 5K panoramik görüntüler alabilir.

Bu çalışmada test edilen taşınabilir Mobil lazer tarayıcı Gexcel tarafından üretilen Heron giyilebilir Lidar cihazıdır. 903 nm dalga boyunda kızılötesi lazer ışınları yayan 16 kanallı bir Velodyne Puck LITE lazer tarayıcı ve 360° yatay görüş ve 30° dikey görüşten tek dönüş modunda 300.000 nokta/saniye elde edilmesini sağlar. Menzil ölçümler, 100 m'lik maksimum ölçülebilir mesafe ile uçuş süresi prensibi ile gerçekleştirilir. Lazer tarayıcı sensörü, verileri sistem yörünge tahmininde kullanılan bir XSens MTI, IMU ile birleştirilir. Anket yapılırken, tarama kafa teleskopik bir karbon fiber direğe monte edilir, bir bataryaya ve bir kontrol ünitesine bağlanır.

Aşağıda Şekil 9'da verilen Gexcel Heron giyilebilir 3B mobil haritalama sisteminin ekipmanları gözükmektedir. Lazer sensörünün olduğu tarayıcı kafa bir jalon üzerine vidalanarak kullanılır. Tarayıcı kafadan çıkan kablo bağlantısı güç için batarya, veri alışverişi ve program için tablete bağlanır. Tablet içerisindeki Heron live programıyla cihaz kontrol edilir ve yönetilir. Tablet ekranından yapılan nokta bulutu anlık durumu gözükür ve mobil LİDAR operatörü ekranda olası bir sorun olduğunda iş durdurarak gerekirse başa dönerek işi tekrarlar. LiDAR'ı tutan jalon kemere takılı cebe konularak kullanılacağı gibi el ile dik bir şekilde tutaraktan kullanılabilir.



Şekil 9. Heron GML

Bazı özellikleri (Paksoytek, 2022):

- Döngü kapatma zorunlu değil,
- Başlatma prosedürü gerekli değil,
- Her ışık koşulunda kullanım,
- Mevcut olduğunda referans modelde otomatik yerleştirme,
- SLAM sürecine özgü sürüklenme efektlerinde büyük azalma (patentli algoritmalar)

Üreticinin özelliklerine göre, sistem 3 cm'lik bir yerel doğruluk ve nihai 5 cm bir küresel doğruluk sağlar, döngü ve kapanışların varlığından ayrıca taranan ortamın özelliklerinden SLAM algoritması etkilenebilir ve doğruluk 20-50 cm'ye düşebilir. Kullanılan GML 'ın teknik özellikleri Tablo 2' de verilmiştir.

Tablo 2. Heron Lite Color Teknik Özellikleri (Paksoytek, 2022).

Nitelik	Değer
Uygun Ortam	İç mekân/ Dış mekân
Elde taşınır	Evet
Giyilebilir	Evet
Çeşitli mobil platformlara monte edilebilir.	Evet
(bisiklet, tekne vb.)	
Panoramik kamera	Var
IMU	Var
SLAM	Var
SLAM Algoritmasıyla işlem sonrası yazılımı	Var
(Heron Desktop)	
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 açılabilir 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

Çalışma İçin Uygun Hava Koşulları

- Doğrudan güneş ışığı.
- Rüzgâr.
- Karanlık yerler (panoramik kamera kullanılacaksa yapay aydınlatma gereklidir).
- -10o C' den +45o C'ye kadar çalışma sıcaklığı.

Çalışma İçin Uygun Olmayan Hava Koşulları

- Yağmur, kar, yoğun yağışlar.
- Çok tozlu ortamlar.
- Agresif atmosfer 500 m/s2 den büyük genellikle 11 ms süren sarsıntı.
- Güçlü elektromanyetik alanlar.
- Cihaza gelen su cihazı bozacaktır.

Tarama Esnasında Dikkat Edilecek Hususlar

- Sensörü sallamayın.
- Sıçramayın.
- Ani hareketlerden kaçının.
- Tarama yaparken ve kalibrasyon yaparken lazer sensör başlığına bağlı kabloların, izleyeceğinize göre her zaman sağa baktığından emin olun. Kablo yönü değişirse IMU etkilenebilir.
- Tarama esnasında jalon dik tutulmalıdır.

2.2.3. GML Beklenen Doğruluk

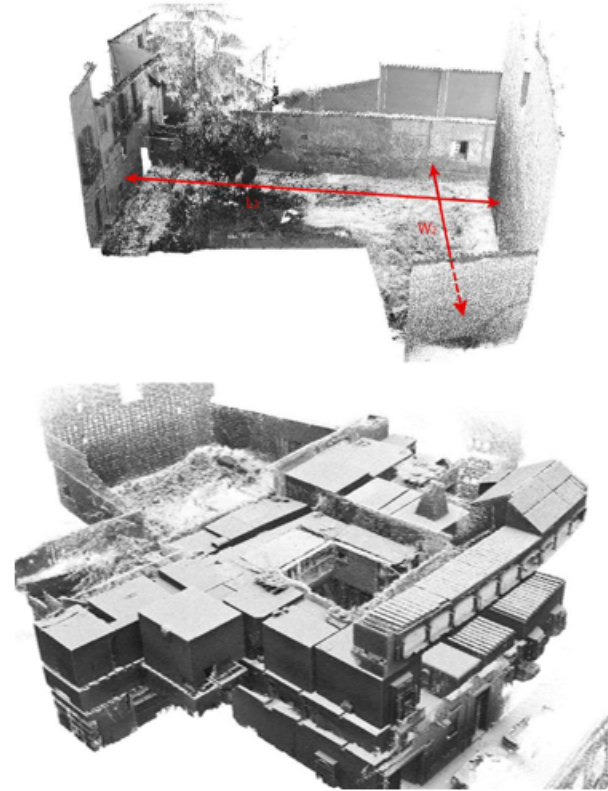
Leica, Viamentris, 3D Laser Mapping ve GreenValley şirketleri doğal olarak çözümlerinin kilometre sayacı nasıl tahmin ettiğini ve LiDAR verilerinin 3D modele hizalanmasını yayınlamamaktadır (Yılmaz & Yakar, 2016b). Bu sistemlerin hassasiyeti artırmak için GNSS/INS yardımını kullandığını biliyoruz (Velas, vd., 2019). Atalet Seyrüsefer Sistemi "Inertial Navigation System" (INS); ivmeölçer ve açıölçer sensörleri kullanarak, hareket halindeki bir aracın (uçak, füze, taşıt, denizaltı, insan vs ...) mutlak konumuna karar verir. Bağımsız çalışma özelliğine sahip olup, herhangi bir elektromanyetik yaymadan çalışır (Yakar vd., 2005; Korumaz vd., 2011; Yakar vd., 2010b; Oruç & Baş, 2021). Çalışma prensibi, referans olan bir başlangıç noktasından itibaren; sürekli hız, ivme ve açı hareketlerini ölçerek gidilen noktadaki konumu bulur, GNSS sistemini destekleme amaçlı kullanılır (Çetin, 2004). Leica Pegasus, GNSS mevcut olduğunda 10 dakikalık yürüyüşten sonra 5 cm'ye ve GNSS yardımı olmadan 5-50 cm'ye kadar hassasiyet elde edebilmektedir. 3B veri kaynağı olarak 2 Velodyne LiDAR tarayıcı ve ek beş yüksek çözünürlüklü kamera seti kullanılmaktadır (LEICA, 2021). Viamentris sırt çantalı mobil Lidar uygun uydu alım koşulları altında 5 cm'den daha az mutlak doğrulukla renklendirilmiş nokta bulutları üretebileceği bildirilmiştir. GNSS sinyallerinin olmadığı alanlarla ilgili ise hassasiyeti verilmemiştir (Ulvi vd., 2015). Zeb Horizon el tipi mobil LiDAR'ın dış ortamda uygun koşullarda 6 mm göreceli hassasiyette çalışabildiği bildirilmiş kapalı mekanlarda hassasiyeti ile ilgili broşürde bilgi bulunamamıştır (Yakar, 2011; Yılmaz vd., 2009; Alptekin & Yakar, 2021). Gexcel Heron, Velodyne VL16 LiDAR sensörü kullanır sistem 3 cm'lik yerel doğruluk ve 5 cm küresel doğruluk sağlar, kapalı alanlarda SLAM algoritmasının etkinliğine bağlı olarak doğruluk 20-50 cm'ye düşürülebilir (Yakar & Doğan, 2017; Alptekin vd., 2022; Karataş vd., 2022).

3. GML KULLANIM ALANLARI

GML esasen araçlı mobil LiDAR'ın giremediği dar ve ağaçlık yerler ile yapı içi, kapalı maden ve tünel vb. GPS sinyallerinin alınmadığı ve bir insanın yürüyerek geçebileceği alanlarda kullanılmak için tasarlanmıştır.

3.1. Kültürel Mirasın Belgelenmesi

Andrea Di Filippo ve arkadaşları (2018) kültürel miras alanında GML kullanarak İspanyanın Segovia şehrinde gotik bir harabenin modellemesini yaparak kayıt altına almışlardır. Modelle arazide ölçülen baz uzunluğu arasında 3 cm fark ile 3B nokta bulutu oluşturmuş ve bu alanda GML'in kullanılabildiğini göstermişlerdir (Şekil 10).

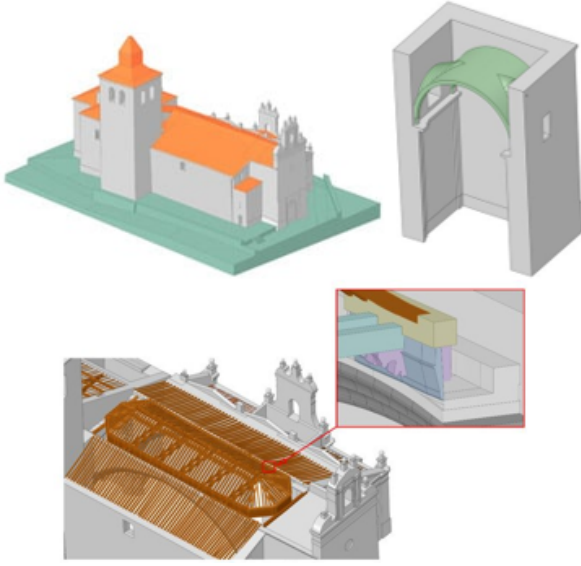


Şekil 10. Birinci şekil doğruluk değerlendirmesi için ölçülen mesafeler, ikinci şekil nokta bulutunu göstermektedir (Filippo, 2018).

Andrea Masiero ve arkadaşları (2018) İtalya Padua'daki bir ortaçağ kalesinin iç mekân araştırmalarını; fotoğraf kamerası ve Agisoft PhotoScan ile elde edilen fotogrametrik yöntemle ve GML yöntemi karşılaştırılmıştır. Yapılan çalışma iç mekânda mutlak hatanın GML ile en düşük olduğunu gösterdi. GML maliyeti açısından, fotogrametri yönteminin fazla nokta yoğunluğu istenmeyen işlerde ekonomik olduğundan dolayı tercih edilmesi önerilmiştir (Masiero vd., 2018).

M. Rodríguez-Martín ve arkadaşları (2022) İspanya Avila'da tarihi Adanero Kilisesi'nin giyilebilir mobil haritalama sistemiyle modellemiş ve ayrıntılı 3B çizimlerini yapmışlar, yersel lazer tarayıcıyla da buldukları sonuçları karşılaştırdıklarında 4 cm kadar fark bulabilmişlerdir. Toplam arazi çalışmasının 2 saat sürdüğü ve cad programında çiziminin bir gün içinde tamamlanarak çok hızlı bir şekilde sonuca ulaştıklarını bildirmişlerdir. Çalışmada sunulan çizimler

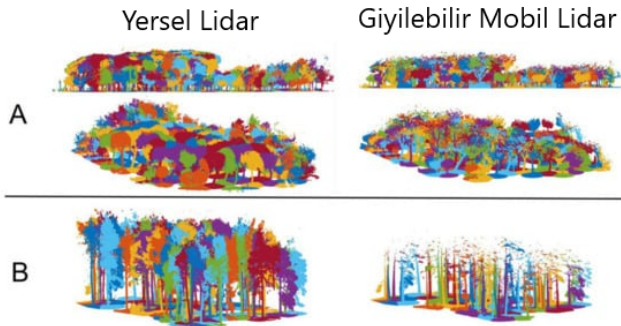
incelendiğinde Şekil 11 ayrıntıların cad çizimlerine başarılı bir şekilde aktarılabilceği görülmektedir, özellikle ahşap detaylar dikkat çekicidir (Rodríguez, 2022).



Şekil 11. Adanero Kilisesi'nin 3B modelleri ayrıntıları çizimde gözükmektedir (Rodríguez, 2022).

3.2. Ormanlık ve Orman Haritalama Çalışmaları

Carlos Coba ve arkadaşları (2018) İspanya'nın kuzey doğusunda San Antonio Parkında otomatik ağaç tespiti için GML (el tipi) ile yersel LİDAR yöntemini ağaç çapı ve yükseklikleri belirleyip aralarındaki farkları bulmuş ayrıca bu sayede hem orman haritasını hem de orman envanteri çıkardıklarını bildirmektedir. Yersel Lidar ile mobil Lidar arasında karesel ortalama hata 3,5 cm bulunmuştur. Ağaç boyları belli bir yüksekliği aştığında yersel Lidar daha iyi sonuç vermiştir, (Şekil 12) ağaç boyları 9-10 m'den daha kısa olduğunda iki yöntem arasında belirgin bir fark bulunamamıştır (Coba vd., 2018).

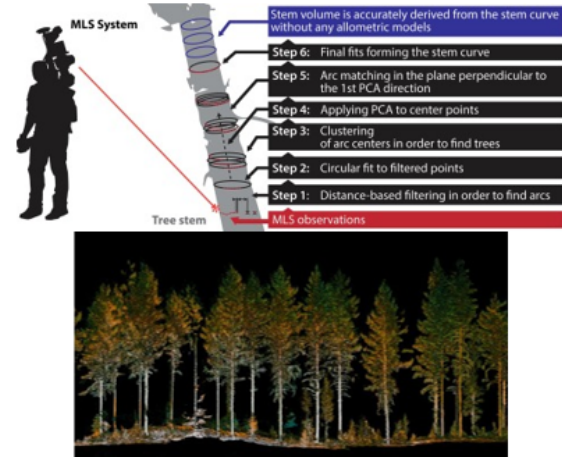


Şekil 12. A ve B arazilerindeki orman ağaçlarının giyilebilir mobil tarayıcı ve Yersel Lidar ile rastgele renklendirilmiş 3B modeli (Coba, vd., 2018).

Sheng Xu ve arkadaşları (2020) Çin'in Nanjing şehrindeki Huangpu Yolu üzerindeki ağaçların çap ve gövde yüksekliklerini belirlemek için GML kullanmışlar elde ettikleri sonuç GML'in bu alanda kullanılabileceğini göstermiştir (Xu, vd., 2020).

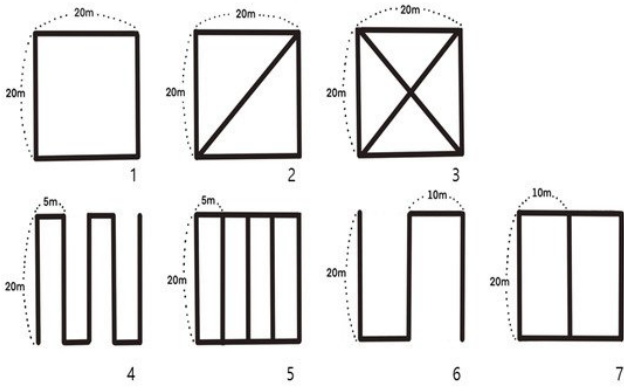
Eric Hyypä ve arkadaşları (2020) Finlandiya'nın Evo şehrindeki Boreal orman bölgesindeki orman

ağaçlarının endüstriyel açıdan incelenmesi için gövde eğriliği, çapı ve gövde hacmi vb. ölçülmesi için GML kullanılmış (Şekil 13) ve orman işletmesinin istediği hassasiyette sonuç elde edilmiştir (Hyypä, vd., 2020).



Şekil 13. Orman ağaçlarının giyilebilir mobil tarayıcıyla ölçümü ve 3B modeli (Hyypä, vd., 2020).

C. Ko ve arkadaşları (2021) Güney Kore, Jeju Adası'nda ormanlık bir alanda giyilebilir mobil tarayıcıyla ağaç envanteri çıkardı, çalışmada diğer orman envanteri çıkarma yöntemleriyle GML karşılaştırılmıştır. Mobil Lazer tarama yöntemi hava koşullarından etkilenir. Yağmur ve kar, darbelerin saçılma özelliklerini etkiler ve özellikle rüzgâr tepelerin hareket etmesine neden olarak nokta bulutunda aykırı değerler üretir, bundan dolayı rüzgâr hızının 5 m/sn içinde kaldığı zamanlarda ormanda tarama yapılmış. Rüzgâr hızı 5m/sn'nin altında alındığından taramalarda bir etkisi olmamıştır. Bir GML'in arazi çalışmalarından sonra verilen ofis çalışmaları yapılır. Bunlar; pilot çıkarma, tüm nokta bulutunun yalnızca bir örnek noktası (20 m × 20 m) içindeki noktaların çıkarılması, gürültü filtreleme, lazer darbelerinin çok yollu etkilerinin neden olduğu aykırı değerleri veriden kaldırma kaliteyi iyileştirme görevleri, yer noktası sınıflandırması, üçgenlenmiş düzensiz ağ algoritmasını kullanarak araziyi ayırma görevi, nitelik tahsisi, her nokta bulutuna bir özellik değeri veren görevler (örnek olarak; direkler, alt bitki örtüsü, yapılar, vb.), kök çıkarma, en kısa yol algoritmasını kullanarak stantları çıkarma şeklinde sayılabilir. Şekil 14'de verilen farklı yürüme yolları izlenerek farklı yolların hangisinin daha iyi sonuç verdiği araştırılmıştır. Ağaç yüksekliklerine göre 5 ve 7 numaralı yürüme yolları daha iyi sonuç vermiştir. Tüm çalışma değerlendirildiğinde yürüme yolu 7 en verimli yürüme yolu olduğu görülmüştür. Sonuç olarak, bir kişi tarafından kullanılabilen GML'in, üç kişilik bir grup tarafından gerçekleştirilen saha araştırması yöntemine göre aynı alan ve zamana göre daha verimli olduğu görülmüştür. Yapılan çalışmada yersel lazer tarama ve mobil lazer taramadan GML taramanın ağaç gövdelerinin araştırılmasında daha etkin olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Sonuç olarak GML hem sahada çalışma süresini hem insan emeğini azaltmıştır ve yöntemin orman alanları için kullanılmasının yerinde olacağı anlaşılmıştır (Şekil 15) (Ko, vd., 2021).

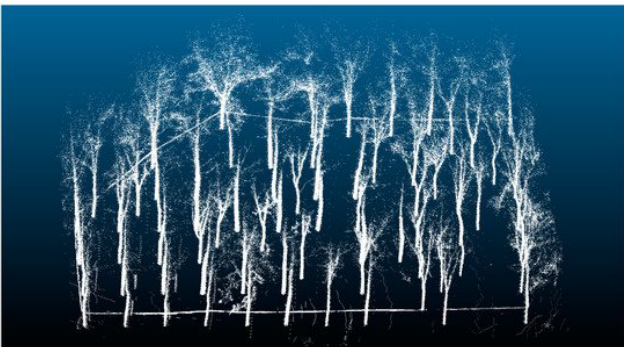


Şekil 14. Sırt çantasındaki mobil lazer tarama cihazı ile ormandaki taramalar için kullanılan farklı alım yolları (Ko, vd., 2021).



Şekil 15. GML ile 3B Orman modelleme (Ko, vd., 2021).

Zhou, S ve arkadaşları Çin'in Pekin şehrinde Bajia Parkında kendi tasarladıkları piyasadan aldıkları Lidar, IMU vb. araçlarla el tipi mobil Lidar tasarladılar. Yaptıkları sistemle bir ormanın 3B haritasını yaptılar, ortalama karekök hatası 0.7 cm ile sonuç elde ettiler, yapılan çalışmadaki oluşan hatanın ormancılık çalışmaları için yeterli olduğunu belirtmişlerdir (Şekil 16) (Zhou, 2019).



Şekil 16. Zeminin çıkarılarak sadece ağaçların gösterildiği 3B nokta bulutu (Zhou, 2019).

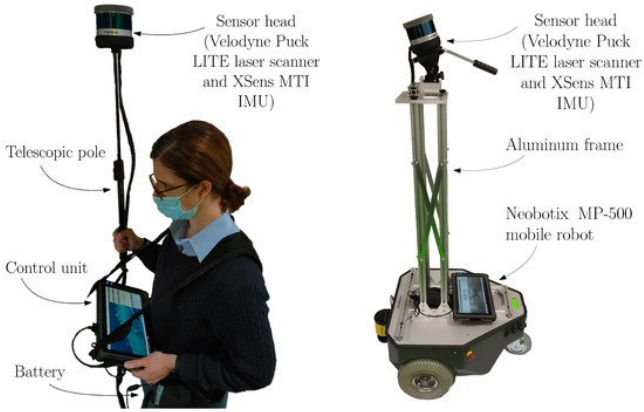
3.3. İç Mekân Modelleme

Geoslam firması ürettiği el tipi LİDAR tarayıcı ile 3 katlı bir binayı sadece 10 dakikada 15 mm doğruluk seviyesine kadar haritalayabildiğini bildirmektedir (Geoslam, 2021).

Roi Otero ve arkadaşları (2020) yılında; mobil iç mekân haritalama sistemleri için bir araştırma yapmıştır. Mobil iç mekân haritalama cihazlarını; el tipi, sırt çantası ve el arabası olarak üç ana fiziksel gruba ayırmışlardır. LiDAR'ın fotogrametriye karşı aşağıdaki avantajları ve eksiklikleri gösterilmiştir. Avantaj olarak ölçümlerin gölgelerden etkilenmediği, geceleri çalışılabilirdiği, veri işlemede hızlı otomasyon sağladığı, üretim süresinin kısa olması ve yoğun ve doğru ölçümler yaptığını belirtmişlerdir. Handikabı; ölçümler yansılardan etkilenir, tanımlama süreci karmaşık olması gösterilmiştir. Sonuç olarak el tipi ve sırt çantası cihazların, iç mekân ortamlarını araştırmak ve haritalamak için isabetli bir seçim olacağını bildirmişlerdir. 2B yerine 3B LİDAR kullanılması tavsiye edilmiştir (Otero, vd., 2020).

E. Maset ve arkadaşları (2021) İtalya Udine 'deki Rizzi Üniversitesi Kampüsü'nün ana binası ve aynı şehirde bulunan dik nehir kıyıları ve akarsu teraslarının bulunduğu bir vadide yersel lazer tarama ve fotogrametri yöntemleriyle, GML tarayıcıyı karşılaştırılmıştır. Uygulamada GML ile 5 ila 10 cm arasında doğrulukta sonuçlar elde edildiği bildirilmiştir, bulunan sonuçların şuanda bu teknolojinin yapıların ve kentsel alanların araştırılmasında uygun olmadığı savunulmuştur, yine yüksek hassasiyet gerektirmeyen işlerde hızlı kullanım için önerilmektedir. Doğal ortam izleme alanında, GML henüz yaygın bir uygulama bulamamıştır ve bu konuda sınırlı sayıda yayına ulaşılabilmektedir. İnsansız Hava Araçlarının (İHA) uçmadığı alanlarda giyilebilir LİDAR'ın ciddi bir rakip olduğu ve bu alanlarda kullanılabilir olduğu ileri sürülmüştür (Maset, vd., 2021).

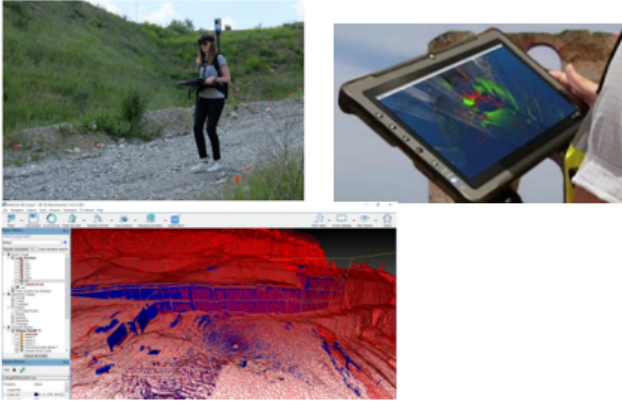
E. Maset ve arkadaşları (2022) GML tarayıcıyı uzaktan kumandalı bir platforma monte ederek kapalı mekânların taranmasında elle taşımaya göre daha iyi sonuçlar elde etmiştir. Şekil 17'de gösterilen 2. şekilde tarama kafası, robot tabanından yaklaşık 1 m yükseklikte özel bir alüminyum destek üzerine bağlanarak taşınmıştır. Bu durum ölçümlerin hep aynı yükseklikten alınmasını sağlamış, tarayıcının salınımı azaltarak iç mekânlarda kolaylık sağlamıştır. Platform kablosuz uzaktan kumanda ile kontrol edilmiştir. Robotik taşıma sabit hız, daha az sarsıntı vb. avantajlar sağlar. El ile taşınan platform durumuna göre robotik taşıma daha yüksek bir yüzey yoğunluğu, daha düzgün nokta dağılımı ve daha düşük gürültü seviyesi gösterildiği bildirilmiştir. Ayrıca elle taşımadaki 2 cm'lik hatanın robotik taşıma ile 1.7 cm seviyesine gerilediği bildirilmiştir (Maset, vd., 2022).



Şekil 17. GML tarayıcının elle ve platform üzerinde taşınması (Maset, vd., 2022).

3.4. Açık Maden Ölçmeleri

G. Vassena ve A. Clerici (2018) İtalya'da aktif bir açık madende zaman zaman yapılan kazı çalışmaları sonucu hafriyatı ölçmek için önce İHA ve yersel lazer tarayıcı kullanmış daha sonra ölçülen nokta bulutunu SLAM verisi olarak GML tarayıcıya yüklemiştir (Şekil 18). Otomatik lokalizasyondan sonra sistem, madenin incelenen kısımlarını gerçek zamanlı olarak görselleştiriyor. Gösterge ekranı yeşil renkte görüntülediği yerlerde bir değişim olmadığı, kırmızı renk ise değişen yerler için kullanılır. Doğruluk incelemesinde 3-4 cm fark bulundu. Gerçek zamanlı değişim algılama yaklaşımı kullanılarak, maden sahalarındaki değişiklikleri tespit etmenin mümkün olduğu ortaya konmuştur (Vassena ve Clerici, 2018).

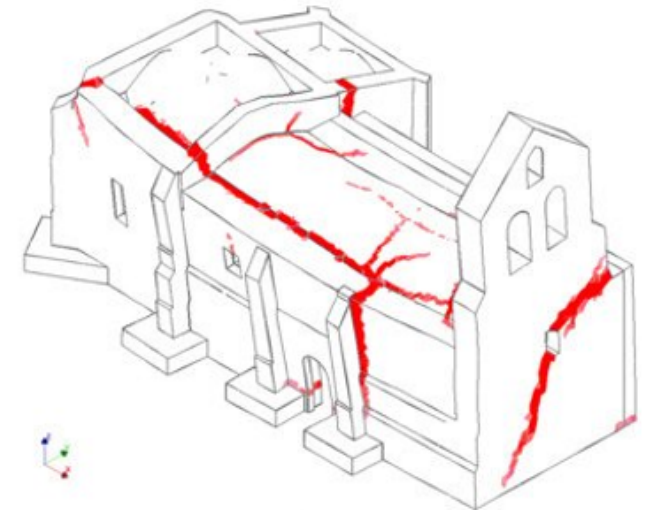
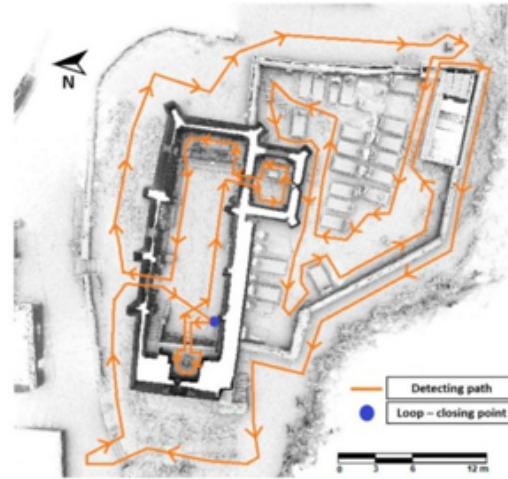


Şekil 18. Açık madende GML kontrol ünitesi ve 3B görüntüsü (Vassena ve Clerici, 2018).

3.5. Sismik olayların yapılarda oluşturduğu deformasyonun belirlenmesi

L. Sánchez-Aparicio ve arkadaşları (2021) İspanya'nın Palencia şehrinde bulunan San Pedro Kilisesini GML haritalama sistemiyle modellemiş ve sismik olayların yapıya etkisinin sayısal simülasyonunu yapmışlardır. Yapının temel aldığı toprakta zaman içerisinde çökmeler meydana gelmiş ve yapı deforme olmuştur. Tarihi yapıların restorasyonu için yapının inşaatı ve tarihi hakkında tam bir bilgiye sahip olabilmeyi sağlayacak olan sayısal analizler ve yapının izlenmesi gerekir. GML ile oluşturulan 3B modellerde deformasyonlar belirlenebilir, yapıya etki eden sismik olayların nasıl etkilediği ortaya konabilir ve doğru

müdahaleler yapılabilir. Çalışmada tüm alanlara ulaşılması başlangıçta planlanır, yürüme yolu üzerinde engeller varsa önceden kaldırılır, hatayı azaltmak için tekrar başlangıç noktasında taramayı bitirecek aşağıda Şekil 19'da gösterildiği gibi yürüme güzergâhı planlanarak tarama yapılmıştır. SLAM teknolojisinde bir önceki noktaya göre bir sonraki nokta hizalandığından hata artarak gider, hatanın en aza indirilmesi başlangıç noktasına tekrar gelerek kapalı bir döngü oluşturmakla azaltılabilir. 18 dakikalık yürüyüşle 27 milyon nokta bulutu alınmış mutlak hatası 7 mm dir. Bulut noktalarında maksimum tutarsızlık 3 cm bulunmuş, noktaların %78'inde 1 cm'nin altında hata çıkmıştır. Nokta bulutunda gürültüler ortadan kaldırmak için filtreler uygulandıktan sonra maksimum tutarsızlık 2 cm'ye düşmüş. Noktaların %95'inde hata 1 cm'nin altına inmiştir. Yapılan CAD çizimlerinde daha ileri sayısal simülasyonlar için kilisenin karmaşık deformasyonlarını yakalayabilen tamamlanmış bir CAD modeli oluşturulabilmiştir. Yapının x, y ve z yönlerinde karmaşık deformasyonu yorumlanmıştır. Tarihi yapının restorasyonunda tekstil karışumlu harç kullanımı denenmiş dikey yükleme için %102'lik bir artışa karşılık, yapının yanal kapasitesini yaklaşık %115 artırdığı sonucuna ulaştıkları bildirilmiştir (Sánchez-Aparicio, vd. 2021).



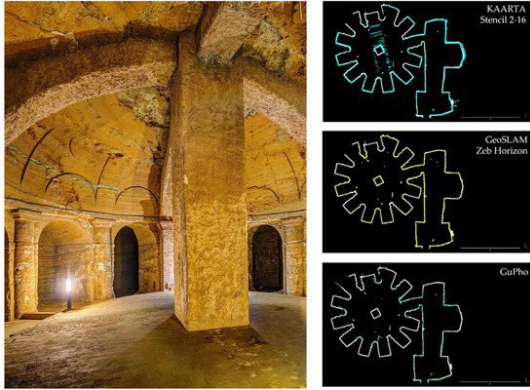
Şekil 19. San Pedro Kilisesi'nin birinci şekilde kapalı tarama güzergâhı ikinci şekilde -y yönündeki çökmesi gözükmektedir (Sánchez-Aparicio vd. 2021).

3.6. Tünel, Mağara Modelleme

F. Di Stefano ve arkadaşları İtalya'nın Camerano şehrindeki Camerano Mağaralarının karmaşık ortamı, şehir merkezinin altında yer alan ve toplam 3 km boyunca uzanan bir dizi salon ve tünelin GML ile 3B modelini yaptılar. Testler, hacimsel karmaşıklık, zayıf aydınlatma koşulları ve zor erişilebilirlik ile karakterize edilen mağara özellikle seçilmiştir. Mobil lazer tarayıcılar ile yapılan mağara düşey kesiti Şekil 20'de gösterilmiştir. Yeraltı çalışma koşulları zor olduğundan mobil tarayıcılar avantaj sağlamaktadır. Bu çalışmada yersel lazer tarayıcıyla üç farklı mobil tarayıcı karşılaştırılmıştır (Şekil 21). Farklı mobil tarayıcılarla yapılan ölçümlerde hata miktarı 1 ile 3 cm arasında hatalarla elde edilmiştir. Mobil tarayıcıların, GNSS konumlandırmasının mevcut olmadığı kapalı alanlarda ve eklemli mimari, peyzaj ve arkeolojik ortamlardaki çalışmalar için uygun olduğunu belirtmektedir (Di Stefano, vd., 2021).



Şekil 20. Yeraltı mağaraları ile Camerano (İtalya) şehir merkezinin düşey kesiti (Di Stefano, vd., 2021).

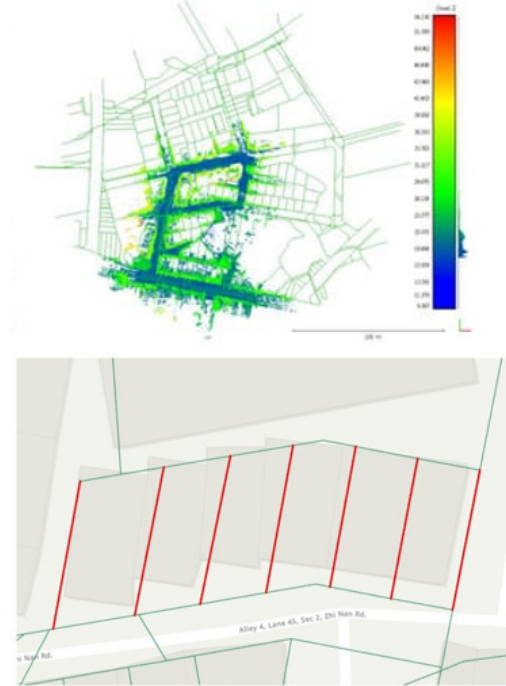


Şekil 21. Mağaranın resmi ve farklı markalı mobil tarayıcılarla on iki gen kubbenin plan kesiti (Di Stefano, vd., 2021).

3.7. Kadastro Paftalarının Yenilenmesi

Chio, S. H., ve Hou, K. W. Tayvan'ın Urban şehrinde 2021 yılında kadastro paftalarının yenilenmesi gerekliliği için GML'i test etmişlerdir. Tayvan'da kadastro paftaları 1/500 ölçeğinde hazırlanmış ve pafta hassasiyeti olarak 0.3 mm kullanılmaktadırlar. Ülkemizde gözün ayırma gücü 0.2 mm alınır. Tayvan'da bir paftadan beklenen doğruluk $500 \times 0.3 = 15$ cm'dir. Yapılan mobil taramalar sonuçları, total-station ile verilen koordinatlardan farklar hesaplanmış ve ölçülerin % 97'sinde hata miktarı 15 cm'nin altında kalmıştır ve ülkelerinde uygulanabilirliğini göstermişlerdir. Yapılan çalışmada SLAM'ın düzgün sonuç verebilmesi için aşağıda sıralanan kurallara uyarak yürüme yörüngesi belirlenmiştir. Hareketli nesnelere taramaktan kaçınılmalı, bu durum hatalara neden olmaktadır. Taranan yolun başlangıç ve bitiş noktaları aynı nokta olmalı, kapalı bir

rota oluşturmalıdır. Hareket hızı normal yürüme hızından (1,1~1,5 m/sn) fazla olmayacak şekilde olmalı ve iyi bir nokta bulutu yoğunluğu sağlamak için sabit hızda yürümek gerekir. Bina köşesini dönerken, tarama görüş açısı büyük ölçüde farklılaşır, bir yörünge oluşturmak için yeterli özellikleri elde etmek için hız ve hareket yavaşlatılmalıdır. İyi nokta bulutu doğruluğunu ve nokta bulutu yoğunluğunu korumak için tarama mesafesinin 50 m içinde tutulması gerekir. Tek bir tarama görevinin süresi 30 dakikayı geçmemelidir. Geniş bir alanı tararken, tarama görevi birkaç bölüme ayrılmalıdır. Çok fazla cam ve pencere içeren alanlardan kaçınılmalıdır, çünkü cam ve pencereler lazer ışınının kırılmasına eğilimlidir ve yanlış nokta bulutlarına neden olacaktır. Dar geçitleri tararken, tarayıcının her iki taraftaki duvarların özelliklerini alabilmesi için tarama yolu ortadan gitmelidir, aksi durumda küçük açıda görünen yakın duvar ayrıntıları çıkmaz. Sonuç olarak elde edilen nokta bulutunda bitişik binalar saçakları ve birleşme yerlerine göre sınır alınmış duvarlar sınır alınmış ve yollardan yapılan ölçümler ile parsellerin sayısal koordinatları elde edilmiştir (Şekil 22), (Chio ve Hou, 2021).

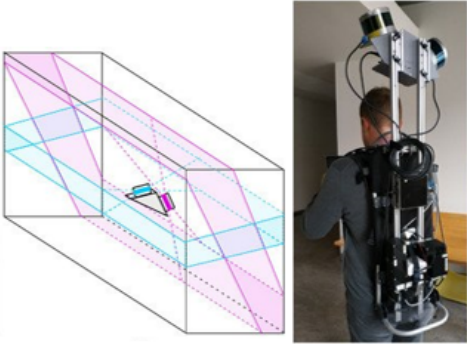


Şekil 22. Giyilebilir Lidar ile birinci şekil filtreleme sonunda nokta bulutu, ikinci şekil muhtemel kadastro sınırlarının çizimi (Chio ve Hou, 2021).

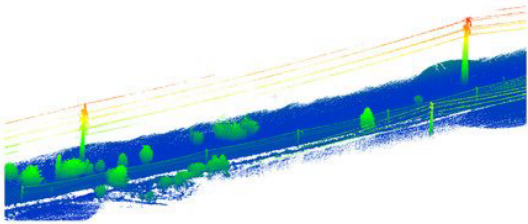
3.8. Enerji Nakil Hatlarının (ENH) Ölçümü

M. Velas, ve arkadaşları (2019) Velodyne LiDAR çifti kullanarak kendi tasarladıkları GML ile iç ve dış mekân haritalamayla ilgili çalışma yaparak test ettiler. Lidar çiftini farklı konumlarda konumlandırarak deneyler yaptılar, sorunları en aza indiren Lidar konumu Şekil 23'te gösterildiği gibi tespit ettiler. Deneyler sırasında, sınırlı (30°) yatay görüş alanının geniş açık alanlar için bir sorun olmadığını keşfettiler, ancak küçük ve dar alanlarda (2 m'den dar koridor vb.) sınırlı bir görüş alanının ciddi sorunlara neden olarak, zayıf doğruluk ve hatta SLAM sisteminin bozulduğunu tespit ettiler. Küçük veya dar alanlarda zemini, tavanı ve duvarları kaplayan

sağlam bir çözüm sağlamak için en az iki senkronize Lidar tarayıcıya ihtiyacımız olduğunu deneysel olarak ortaya koydular. Yaptıkları çalışmaları kapalı mekân ve açık arazide (Şekil 23, 24) ENH 3B modellerini beklenen doğrulukta yapmışlardır (Velas, vd., 2019).



Şekil 23. Araştırmada tespit edilen en iyi çift Lidar konumu (Velas, vd., 2019).



Şekil 24. ENH hattı 3B model (Velas, vd., 2019).

3.9. Altyapı Haritaları

Ulvi ve arkadaşları (2021) Türkiye’de Mersin Üniversitesinin alt yapı haritasının yapmak için GML’i kullandı. Önce yolların haritası yapan ekip, sonra alt yapıyı da rögar kapaklarından çizerek çalışmayı tamamladı. Yapılan çalışma sonucunda alt yapı haritalarının GML ile yapılabilirdiğini bildirmişlerdir (Ulvi, vd., 2021).

3.10. Adli Olay Yeri Belgelenmesinde

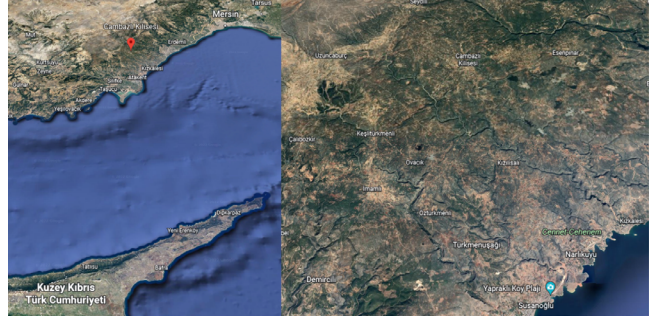
Adli olay yerlerinde ortamın ve ortamdaki cisimlerin konumları, birbirlerine göre yön ve dizilişleri olay öğrenildiğindeki konumu uzun süren mahkeme sürecinde fiziksel mekân olarak saklanması çoğunlukla mümkün değildir (Şekil 25). Vakanın aydınlatılmasında mahkeme süreci ilerledikçe ortamın 3B modelinin üzerinde gereken incelemeler kanıt olarak duracak; hâkim ve bilirkişilerin işini kolaylaştıracaktır. Adliyedeki davaların daha çabuk çözülmesinde ve alınan kararlarda bilimsel kanıt olarak kullanılabilirdiğinden GML önerilir.



Şekil 25. Olay yeri (Kriminal, 2022)

4. GYM ile Cambazlı Kilisesi 3B Modellemesi

Cambazlı kilisesi, Silifke ilçemizin 29 km kuzeyinde, coğrafi koordinatları 36°34’29” kuzey enlemi, 34°01’58” doğu meridyeni konumunda yer almaktadır, haritadaki yeri Şekil 26’da gösterilmiştir. Cambazlı köyü içerisinde kalan Cambazlı kilisesi, Erken Bizans döneminden kalan tarihi yapıdır. Kilise üç neflidir ve günümüze kadar toprak üstünde kalan bölgesinde tek kilisedir (Çalışkan, 2009).



Şekil 26. Cambazlı kilisesinin haritadaki yeri

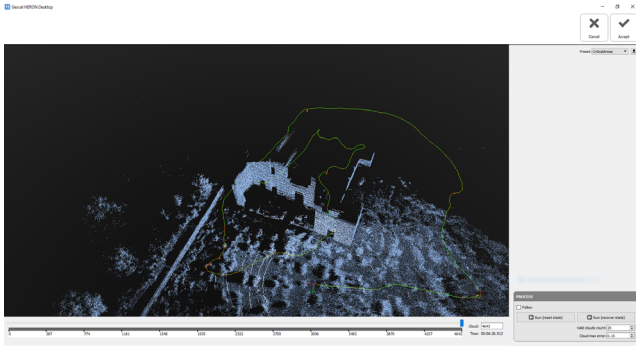
4.1. Cambazlı Kilisesinin YKN Kullanılarak Taranması

Cambazlı Kilisesi ölçümü için 4 YKN tesis edildi noktaların GNSS ve total-station ile ölçümleri yapıldı ve ITRF koordinatları bulundu. GYM ile kapalı poligon şeklinde, içi ve dışı birlikte tarama yapılarak ölçüldü. Çalışma aşamalarından görseller Şekil 27’de verilmiştir.



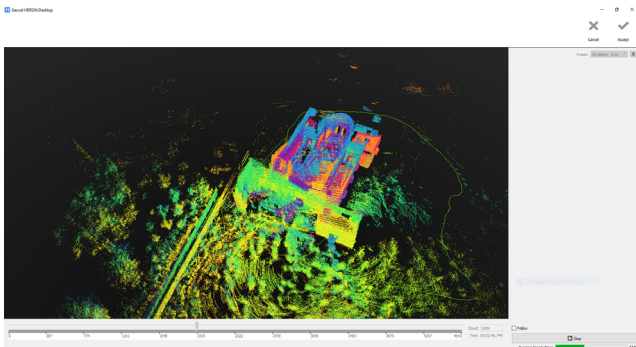
Şekil 27. Cambazlı kilisesi ve arazi çalışmalarından kareler

Güzergâh aşağıdaki şekilde gösterilmiştir. GYM ile güzergâhın taranması yaklaşık 6.5 dakikada sürmüştür. Odometer aşamasından bir ekran görüntüsü Şekil 28’de verilmiştir.



Şekil 28. Odometer ile güzergâh çözülür.

Create Maps aşaması Şekil 29’da verilmiştir.



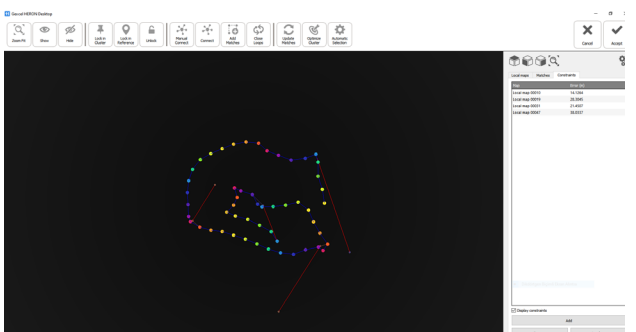
Şekil 29. Create Maps yapılıyor, yeni haritalar üretiliyor.

Oluşan bağlar Şekil 30’da gösterilmiştir.



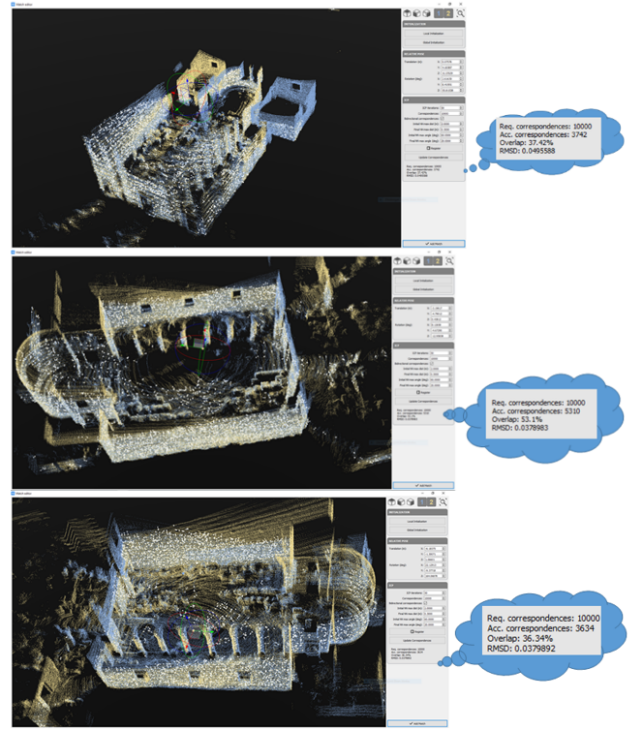
Şekil 30. Global optimizations yapılarak nokta bulutu parçalara ayrılır ve bağlar görüntülenir.

YKN noktaları eklenince bağlar Şekil 31’deki gibi gözlenir.



Şekil 31. YKN noktaları eklendiğinde bağlar.

Eklenen bağlar çakıştırılır çakışma oranları ve RMSD değerleri görüntülenir. Nokta bulutları çakışması görselde beyaz renkte görünür (Şekil 32).



Şekil 32. Yeni atılan bağlardan örnekler ve çakıştırılma oranları.

Yeni atılan bağlarla bağlardaki son durum Şekil 33’de gözükmektedir.



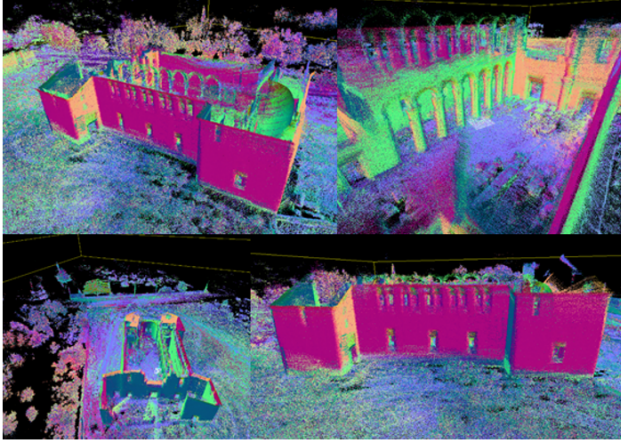
Şekil 33. Dengelenmiş güzergâhta oluşan ve oluşturulan bağ yapısı.

Tüm bağlar birlikte dengelendiğinde RMSD karekök hatası 6 cm ile 2 cm arasında ortalama 3 cm, bağlardaki en büyük hata ise 8 cm ile çoğunluğunda 1 cm civarında, ortalama 2 cm olduğu gözlemlendi. Güzergâh dengelemesinde kontrol noktalarına isabet eden hata ortalama 1 cm çıktı (Şekil 34).

Local maps					Matches			Constraints			Local maps		Matches		Constraints	
Map 1 (ID)	Map 2 (ID)	Overlap (%)	RMSD (cm)	Error (m-rad)	Map	Error (m)										
Local map 00000	Local map 00015	12.1300	5.9596	0.0849	Local map 00010	0.0166193										
Local map 00007	Local map 00009	44.5300	5.6635	0.0568	Local map 00019	0.0170777										
Local map 00015	Local map 00047	8.1900	5.5937	0.0212	Local map 00031	0.00936304										
Local map 00000	Local map 00016	12.3800	5.1993	0.0873	Local map 00047	0.0109513										
Local map 00004	Local map 00006	37.4000	4.9460	0.0296												
Local map 00024	Local map 00022	26.5700	4.9328	0.0217												

Şekil 34. Dengeleme sonucunda bağlardaki ve YKN’da hatalar

Dengelenmiş güzergâhtan 3B model ve ortofoto Şekil 35 ve 36'da elde edilmiştir.

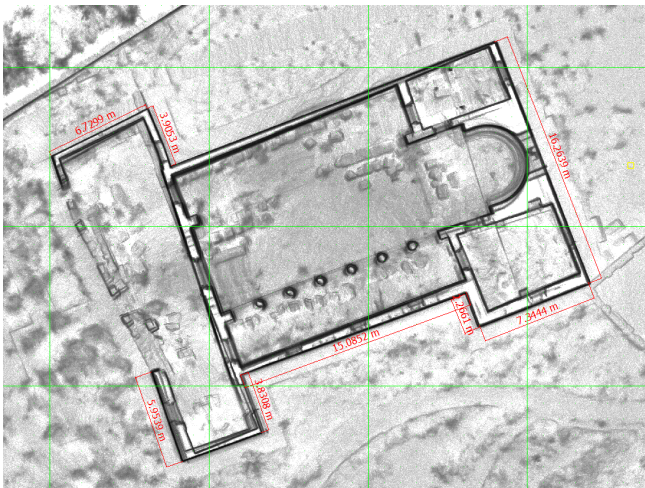


Şekil 35. Cambazlı kilisesinin farklı açılardan 3B modeli



Şekil 36. Cambazlı kilisesinin ortofotosu

Yapının üzerinde arazide ölçülen uzunluklar Tablo 3'te verilmiştir (Şekil 37). Arazi ve ortofoto üzerinde ölçülen uzunlukların farkları sırasıyla 6, 1, 1, 5, 1, 7, 5, 4 cm olmaktadır, uzunluklarda hata ortalaması 4 cm olmaktadır.

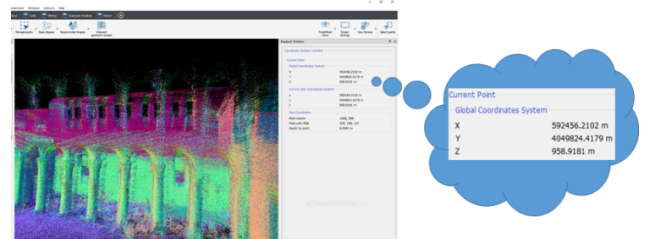


Şekil 37. Cambazlı kilisesinin ortofotosu üzerinden ölçülen uzunluklar.

Tablo 3. Kilisenin arazi ve ortofoto üzerindeki uzunlukları

	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.
Arazideki uzunluk (m)	6.67	3.90	16.27	7.29	2.26	15.16	3.88	5.91
Ortofotoda uzunluk (m)	6.73	3.91	16.26	7.34	2.27	15.09	3.83	5.95
Fark (cm)	6	1	1	5	1	7	5	4

Kilisenin 3B nokta bulutu ITRF koordinatlarına dönüştürüldü (Şekil 38).



Şekil 38. Cambazlı kilisesinin ITRF koordinat sistemine dönüştürmüş 3B modeli

5. SONUÇLAR

GML ile kültürel mirasın belgelenmesi amacıyla Cambazlı Kilisesinde yapılan çalışmada; kilisenin 3B modeli üretilebilmiş, üretilen 3B modelin koordinatları ITRF koordinatlarına dönüştürülmüş ve ortofotosu üretilerek ortofoto üzerindeki uzunluk ile arazi uzunluğu karşılaştırılması sonucu ölçülen uzunluklarda hataların 7 cm'yi geçmediği görülerek sistemin YKN kullanıldığında güvenilir sonuçlar verdiği ortaya konulmuştur.

GML'in kullanım alanlarıyla ilgili yapılan yayınlarda tarihi eserlerin belgelenmesi, iç mekân haritalama, orman haritaları ve envanteri çalışmalarında çokça yayın bulunmuştur. Bunun yanında kapalı maden ve tünel ölçmeleri ve yürüyerek bir insanın geçebildiği saymadığımız birçok alanda kullanılabilir olduğu düşünülmektedir. Sistem araçlı mobil Lidar'dan daha yavaş olmasından dolayı araçlı mobil Lidarın ulaşamadığı alanlarda kullanımı yerinde olacaktır. GPS sinyallerinin alınmadığı kapalı alanlarda SLAM ile haritalamaya devam edebilmek sistemin üstün yanıdır. Burada en çok düşündürülen yanı sistemin GPS sinyali alamadığı 10 dakikalık bir yürüyüş sonucunda 20-50 cm civarında bir hata vermesidir.

Bu çalışmada kullandığımız GML modelinde GNSS desteği olmadığından çalışma alanının açık ya da kapalı olmasının bir önemi olmamaktadır. Kullanılan sistemdeki esas uğraş YKN tesisi ve yapı içlerine YKN tesis etmektir. YKN ölçümlerinin zaman alması arazide hızımızı düşürmektedir, GML'da GNSS olsa ya da YKN hazırda olsa sistemle arazi çalışması çok hızlıdır. Bundan sonraki hedefimiz; çalışmalarda SLAM'ın hatasını düşürecek yöntemler bularak bunları yayınlamak olacaktır.

Bilgilendirme/Teşekkür

Bu çalışma Atilla Karabacak'ın tezinin bir parçasını oluşturmakta olup Mersin Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri tarafından 2021-2-TP2-4538 numaralı proje ile desteklenmiştir.

Yazarların Katkısı

Çalışmadaki tüm katkılar yazarlar arasında eşit orandadır.

Çıkar Çatışması Beyanı

Herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

KAYNAKÇA

- Alptekin, A. & Yakar, M. (2020). Kaya Bloklarının 3B Nokta Bulutunun Yersel Lazer Tarayıcı Kullanarak Elde Edilmesi. *Türkiye Lidar Dergisi*, 2 (1), 1-4.
- Alptekin, A. & Yakar, M. (2020). Mersin Akyar Falez'i'nin 3B modeli. *Türkiye Lidar Dergisi*, 2 (1), 5-9.
- Alptekin, A. & Yakar, M. (2021). 3D model of Üçayak Ruins obtained from point clouds. *Mersin Photogrammetry Journal*, 3(2), 37-40. DOI: 10.53093/mephoj.939079
- Alptekin, A., Çelik, M.Ö., Doğan, Y. & Yakar, M. (2022). Illustrating of a Landslide Site with Photogrammetric and LIDAR Methods. In: El-Askary, H., Erguler, Z.A., Karakus, M., Chaminé, H.I. (eds) *Research Developments in Geotechnics, Geo-Informatics and Remote Sensing*. CAJG 2019. *Advances in Science, Technology & Innovation*. Springer, Cham.
- Altuntas, C., Yıldız, F., Karabork, H., Yakar, M., & Karasaka, L. (2007, October). Surveying and documentation of detailed historical heritage by laser scanning. In XXI International CIPA Symposium, 1(6).
- Barber, D., Mills, J. & Smith-Voysey, S. (2008). Geometric validation of a ground-based mobile laser scanning system. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, 63(1), 128-141.
- Cabo, C., Del Pozo, S., Rodríguez-González, P., Ordóñez, C. & Gonzalez-Aguilera, D. (2018). Comparing terrestrial laser scanning (TLS) and wearable laser scanning (WLS) for individual tree modeling at plot level. *Remote Sensing*, 10(4), 540.
- Carla LAUTER'in 13 Mayıs 2020 tarihli yazısı (Yeni giyilebilir VLX tarayıcıları ile NavVis, mobil haritalamayı ana akım haline getirmeyi hedefliyor) www-geoweeknews-com. (son erişim 01.10.2021)
- Chio, S. H. & Hou, K. W. (2021). Application of a Hand-Held LiDAR Scanner for the Urban Cadastral Detail Survey in Digitized Cadastral Area of

- Taiwan Urban City. *Remote Sensing*, 13(24), 4981.
- Çalışkan, M., Aydın A., Aydınoglu Ü., Kerem F., (2009) Mersin Ören Yerleri Kaleleri Müzeleri, TC Mersin Valiliği, *Seçil Ofset II. Baskı*, İstanbul
- Çetin, Y. Ş. (2004) Ülkemizde uydu hava seyrüsefer haberleşme sistemlerine olan ihtiyacın teknik ve ekonomik boyutunun analizi. *Telekominikasyon Kurumu, Uzmanlık Tezi*, Ankara
- Di Filippo, A., Sánchez-Aparicio, L. J., Barba, S., Martín-Jiménez, J. A., Mora, R. & González Aguilera, D. (2018). Use of a wearable mobile laser system in seamless indoor 3D mapping of a complex historical site. *Remote Sensing*, 10(12), 1897.
- Di Stefano, F., Chiappini, S., Gorreja, A., Balestra, M. & Pierdicca, R. (2021). Mobil 3D tarama LiDAR: bir literatür taraması. *Geomatik, Doğal Tehlikeler ve Risk*, 12 (1), 2387-2429.
- 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.
- Doğan, Y. & Yakar, M. (2018). GIS and three-dimensional modeling for cultural heritages. *International Journal of Engineering and Geosciences*, 3(2), 50-55. DOI: 10.26833/ijeg.378257
- FARO lazer tarayıcı şirketinin ana sayfasından 10 Temmuz 2021 tarihinde <https://www.faro.com/> adresinden erişildi.
- Di Filippo, A., Sánchez-Aparicio, L. J., Barba, S., Martín-Jiménez, J. A., Mora, R. & González Aguilera, D. (2018). Use of a wearable mobile laser system in seamless indoor 3D mapping of a complex historical site. *Remote Sensing*, 10(12).
- Geoslam firmasının ana sayfasından 14 Ekim 2021 tarihinde <https://geoslam.com/>, adresinden erişildi.
- Geoslam Şirketi ana sayfasından 17 Ekim 2022 tarihinde <https://geoslam.com/solutions/zeb-horizon/> adresinden erişildi.
- Geospatial World (2018) New bMS3D-360: The first Backpack Mobile Scanning System including panoramic camera 17 Ekim 2022 tarihinde <https://www.geospatialworld.net/news/new-bms3d-360-first-backpack-mobile-scanning-system-panormic-camera/> adresinden erişildi.
- GEXCEL Şirketinin sayfasından 2 Ekim 2021 tarihinde <https://gexcel.it/en/solutions/heron-portable-3d-mapping-system> adresinden erişildi.
- Glennie, C. (2009). Kinematic terrestrial light-detection and ranging system for scanning. *Transportation research record*, 2105(1), 135-141.
- Guan, H., Li, J., Cao, S. & Yu, Y. (2016). Use of mobile LiDAR in road information inventory: A review. *International Journal of Image and Data Fusion*, 7(3), 219-242.
- Hyppä, E., Kukko, A., Kaijaluoto, R., White, J. C., Wulder, M. A., Pyörälä, J., ... & Hyppä, J. (2020). Accurate derivation of stem curve and volume using backpack mobile laser scanning. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 161, 246-262.

- Karataş, L., Alptekin, A. & Yakar, M. (2022). Creating Architectural Surveys of Traditional Buildings with the Help of Terrestrial Laser Scanning Method (TLS) and Orthophotos: Historical Diyarbakır Sur Mansion. *Advanced LiDAR*, 2(2), 54-63.
- Ko, C., Lee, S., Yim, J., Kim, D. & Kang, J. (2021). Comparison of Forest Inventory Methods at Plot-Level between a Backpack Personal Laser Scanning (BPLS) and Conventional Equipment in Jeju Island, South Korea. *Forests*, 12(3), 308.
- Korumaz, G. A., Dülgerler, O. N. & Yakar, M. (2011). Kültürel Mirasın Belgelenmesinde Dijital Yaklaşımlar. Selçuk Üniversitesi Mühendislik, Bilim Ve Teknoloji Dergisi, 26(3), 67-83.
- Kriminal Han danışmanlık şirketinin sayfasından 13 Ekim 2022 tarihinde <https://bilirkisiraporlari.com/olay-yeri-ve-delil-incelemeleri/> adresinden erişildi.
- LEICA firmasının ana sayfasından 2 Ekim 2021 tarihinde <https://leica-eosystems.com/products/mobile-sensor-platforms/capture-platforms/leica-pegasus-backpack> adresinden erişildi.
- Leica, 2016. Şirketin ana sayfası, 10 Temmuz 2021 tarihinde <https://leica-geosystems.com/products/laser-scanners/software> adresinden erişildi.
- Maset, E., Cucchiario, S., Cazorzi, F., Crosilla, F., Fusiello, A. & Beinat, A. (2021). Investigating The Performance Of A Handheld Mobile Mapping System In Different Outdoor Scenarios. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*.
- Maset, E., Cucchiario, S., Cazorzi, F., Crosilla, F., Fusiello, A. & Beinat, A. (2021). Investigating the Performance of a Handheld Mobile Mapping System in Different Outdoor Scenarios. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 43, B1-2021.
- Maset, E., Scalera, L., Beinat, A., Visintini, D. & Gasparetto, A. (2022). Performance Investigation and Repeatability Assessment of a Mobile Robotic System for 3D Mapping. *Robotics*, 11(3), 54.
- Masiero, A., Fissore, F., Guarnieri, A., Pirotti, F., Visintini, D. & Vettore, A. (2018). Performance evaluation of two indoor mapping systems: Low-cost UWB-aided photogrammetry and backpack laser scanning. *Applied Sciences*, 8(3), 416.
- NAVVIS şirketi sayfasından 1 Ekim 2021 tarihinde [www-navvis-com](http://www.navvis-com) adresinden erişildi.
- Optech şirketinin ana sayfasından 10 Temmuz 2021 tarihinde <http://www.teledyneoptech.com/en/products/mobile-survey/> adresinden erişildi.
- Oruç, M. E. & Baş G. (2021). Kompleks Yapı ve Alanlarda Yersel Lazer Tarama Teknolojisinin Kullanımı. *Türkiye Lidar Dergisi*, 3(2), 39-47.
- Oruç, M. E. & Öztürk, İ. L. (2021). Usability of Terrestrial Laser Technique in Forest Management Planning. *Türkiye Lidar Dergisi*, 3(1), 17-24.
- Otero, R., Lagüela, S., Garrido, I. & Arias, P. (2020). Mobile indoor mapping technologies: A review. *Automation in Construction*, 120, 103399.
- Paksoytekniğin şirketinin sayfasından 17 Ekim 2022 tarihinde <https://paksoytekniğin.com.tr/index.php/paksoy-topcon/lazer-tarama/gexcel-heron> adresinden erişildi.
- Paksoytekniğin şirketinin sayfasından 17 Ekim 2022 tarihinde <https://paksoytekniğin.com.tr/index.php/paksoy-topcon/lazer-tarama/gexcel-heron> adresinden erişildi.
- Paksoytekniğin şirketinin sayfasından 19 Eylül 2021 tarihinde <https://paksoytekniğin.com.tr/index.php/paksoy-topcon/lazer-tarama/ip-s3> adresinden erişildi.
- Puente, I., González-Jorge, H., Martínez-Sánchez, J. & Arias, P. (2013). Review of mobile mapping and surveying technologies. *Measurement*, 46(7), 2127-2145.
- RIEGL lazer ölçüm sistemleri şirketinin ana sayfasından 10 Temmuz 2021 tarihinde <http://www.riegl.com/> adresinden erişildi.
- Rodríguez-Martín, M., Sánchez-Aparicio, L. J., Maté-González, M. Á., Muñoz-Nieto, Á. L. & Gonzalez-Aguilera, D. (2022). Comprehensive Generation of Historical Construction CAD Models from Data Provided by a Wearable Mobile Mapping System: A Case Study of the Church of Adanero Ávila, Spain. *Sensors*, 22(8), 2922.
- Sánchez-Aparicio, L. J., Mora, R., Conde, B., Maté-González, M. Á., Sánchez-Aparicio, M. & González-Aguilera, D. (2021). Integration of a wearable mobile mapping solution and advance numerical simulations for the structural analysis of historical constructions: A case of study in San Pedro Church (Palencia, Spain). *Remote Sensing*, 13(7), 1252.
- Thomson, C. (2021), 3 types of terrestrial laser scanners 2 Ekim 2021 tarihinde <https://info.vercator.com/blog/3-types-of-terrestrial-laser-scanners> adresinden erişildi.
- Thomson, C., (2020), (What is SLAM?) 2 Ekim 2021 tarihinde <https://info.vercator.com/blog/what-is-slam> adresinden erişildi.
- Trimble 3D lazer tarama şirketinin ana sayfasından 10 Temmuz 2021 tarihinde <https://geospatial.trimble.com/3DS> adresinden erişildi.
- Ulvi, A. , Yiğit, A. Y. , Çelik, M. Ö. & Alptekin, A. (2021). Detection of existing infrastructure lines with wearable laser scanners and making infrastructure map: a case of Mersin University . *Mersin Photogrammetry Journal* , 3 (2) , 61-68 . DOI: 10.53093/mephoj.1036301
- Ulvi, A., Yakar, M., Toprak, A. S. & Mutluoğlu, O. (2015). Laser Scanning and Photogrammetric Evaluation of Uzuncaburç Monumental Entrance. *International Journal of Applied Mathematics Electronics and Computers*, 3(1) , 32-36. DOI: 10.18100/ijamec.41690
- Vassena, G. & Clerici, A. (2018). Open pit mine 3D mapping by tls and digital photogrammetry: 3D model update thanks to a slam based approach. *International Archives of the Photogrammetry*,

- Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 42(2), 1145-1148.
- Velas, M., Spanel, M., Slezia, T., Habrovec, J. & Herout, A. (2019). Indoor and outdoor backpack mapping with calibrated pair of velodyne LiDARs. *Sensors*, 19(18), 3944.
- Velodyne lidar şirketinin ana sayfası, 10 Temmuz 2021 tarihinde <https://velodynelidar.com/> adresinden erişildi.
- Xu, S., Sun, X., Yun, J. & Wang, H. (2020). A new clustering-based framework to the stem estimation and growth fitting of street trees from mobile laser scanning data. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 13, 3240-3250.
- Yakar, M. (2011). Using close range photogrammetry to measure the position of inaccessible geological features. *Experimental Techniques*, 35(1), 54-59.
- Yakar, M., & Doğan, Y. (2017). Silifke Aşağı Dünya Obruğunun İHA Kullanılarak Üç Boyutlu Modellenmesi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 17(4), 94-101.
- Yakar, M., Yıldız, F., & Yılmaz, H. M. (2005). Tarihi ve Kültürel Mirasların Belgelenmesinde Jeodezi Fotogrametri Mühendislerinin Rolü. *TMMOB Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası*, 10.
- Yakar, M., Yılmaz, H. M. & Mutluoğlu, Ö. (2010). Comparative evaluation of excavation volume by TLS and total topographic station based methods. *Lasers in Eng.*, 19, 331-345.
- Yakar, M., Yılmaz, H., Yıldız, F., Zeybek, M., Şentürk, H. & Çelik, H. (2010). Silifke-Mersin Bölgesinde Roma Dönemi Eserlerinin 3 Boyutlu Modelleme Çalışması ve Animasyonu. *Jeodezi ve Jeoinformasyon Dergisi*, (101).
- Yılmaz, H. & Yakar, M. (2016). Lidar (Light Detection And Ranging) Tarama Sistemi. *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 2(2), 23-33.
- Yılmaz, H. & Yakar, M. (2016). Yersel Lazer Tarama Teknolojisi. *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 2(2), 43-48.
- Yılmaz, H. M., Yakar, M., Yıldız, F., Karabork, H., Kavurmacı, M. M., Mutluoğlu, O. & Göktepe, A. (2009). Monitoring of corrosion in fairy chimney by terrestrial laser scanning. *Journal of International Environmental Application & Science*, 4(1), 86-91.
- Yu, Y., Li J., Guan H. and Wang C., 3D crack skeleton extraction from mobile LiDAR point clouds. *2014 IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2014, pp. 914-917, doi: 10.1109/IGARSS.2014.6946574.
- Z+F lazer tarayıcı sistemler şirketinin ana sayfasından 10 Temmuz 2021 tarihinde <https://www.zf-laser.com/Home.91.0.html?&L=1> adresinden erişildi.
- Zhou, S., Kang, F., Li, W., Kan, J., Zheng, Y. & He, G. (2019). Extracting diameter at breast height with a handheld mobile LiDAR system in an outdoor environment. *Sensors*, 19(14), 3212.



© Author(s) 2022.

This work is distributed under <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>