

Giyilebilir Mobil LİDAR ile Çelik Yapı Ölçümü

Atilla Karabacak ^{*1}, Murat Yakar ²

¹Mersin Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Mimarlık ve Şehir Planlama Bölümü, Mersin, Türkiye, atilakarabacak@mersin.edu.tr

²Mersin Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, Mersin, Türkiye, myakar@mersin.edu.tr

Kaynak Göster: Karabacak, A., & Yakar, M. (2026). Giyilebilir Mobil LİDAR ile Çelik Yapı Ölçümü. Geomatik, 11 (1), 129-138.

DOI: 10.29128/geomatik.1806941

Anahtar Kelimeler

Çelik Yapı
Giyilebilir Mobil Lidar
Fotogrametri
Lazer Tarama
3B
Araştırma Makalesi
Geliş:20.09.2025
Revize:17.11.2025
Kabul:21.11.2025
Yayınlanma:01.04.2026



Öz

Teknolojideki baş döndürücü gelişmeler, haritacılık ve ölçme mühendisliği alanında veri toplama yöntemlerinin önemli ölçüde dönüşmesine neden olmuştur. Bu gelişmelerin en dikkat çekici örneklerinden biri LİDAR (Light Detection and Ranging) teknolojisidir. LİDAR sistemleri, yüksek doğrulukta üç boyutlu (3B) konum bilgisi üretme kapasitesi sayesinde, arazi modelleme, şehir planlama, altyapı yönetimi ve yapı analizi gibi çok sayıda uygulamada yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle mobil LİDAR sistemlerinin hareketli araçlara entegre edilmesiyle 21. yüzyılın başlarında yüksek çözünürlüklü nokta bulutu verilerinin elde edilmesi mümkün hâle gelmiştir. Günümüzde ise bu teknoloji, taşınabilir sistemlerle birleşerek Giyilebilir Mobil LİDAR (GML) formunda yeni bir boyut kazanmıştır.

Bu çalışmada, GML teknolojisinin yapı ölçümlerinde kullanılabilirliği araştırılmıştır. Araştırma alanı olarak, 2023 Kahramanmaraş depremlerinden etkilenen Malatya'daki TCDD tren bakım istasyonu seçilmiştir. Çalışma kapsamında, yapının çevresinde sekiz adet yer kontrol noktası (YKN) oluşturulmuş ve bu noktalar total station yardımıyla koordinatlandırılmıştır. Ardından GML cihazı ile yaklaşık 21 dakika süren tarama işlemi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen nokta bulutu verileri değerlendirilerek istasyonun 3B modeli ve ortofotosu üretilmiştir. Yapılan doğruluk analizi sonucunda karekök hata (RMSE) değeri 3.6 cm olarak belirlenmiştir.

Elde edilen model, yapının mevcut durumunu yüksek doğrulukla yansıtmaktadır. Her ne kadar deprem öncesine ait bir model bulunmadığından doğrudan hasar analizi yapılamamış olsa da, oluşturulan 3B model üzerinden mesafe, açı ve düşey deformasyon ölçümleri kesitler alınarak yapılabilmektedir. Bu durum, GML teknolojisinin yapıların afet öncesi ve sonrası durumlarının karşılaştırmalı analizi için büyük bir potansiyele sahip olduğunu göstermektedir.

Steel Structure Measurement with Wearable Mobile LIDAR

Keywords

Steel structure
Wearable Mobile Lidar
Photogrammetry
Laser Scanning
3D
Research Article
Received: 20.09.2025
Revised: 17.11.2025
Accepted: 21.11.2025
Published:01.04.2026

Abstract

The rapid advancement of technology has significantly transformed data acquisition methods in surveying and geomatics engineering. One of the most remarkable innovations in this field is LiDAR (Light Detection and Ranging) technology. Owing to its ability to generate highly accurate three-dimensional (3D) spatial data, LiDAR has been extensively used in terrain modeling, urban planning, infrastructure monitoring, and structural analysis. With the introduction of mobile LiDAR systems mounted on moving vehicles in the early 21st century, it became possible to collect high-resolution point cloud data efficiently. More recently, this technology has evolved into Wearable Mobile LiDAR (GML), enabling flexible and human-scale spatial data acquisition.

This study investigates the applicability of GML technology for building measurements. The research was conducted at the TCDD train maintenance station in Malatya, Turkey, which was damaged during the 2023 Kahramanmaraş earthquakes. Eight Ground Control Points (GCPs) were established along the walking path and measured using a total station. The GML data acquisition took approximately 21 minutes. The resulting point cloud data were processed to

produce a 3D model and orthophoto of the station, achieving a Root Mean Square Error (RMSE) of 3.6 cm.

Although the absence of a pre-earthquake model prevented a direct assessment of structural damage, the generated 3D model allows distance, angle, and vertical deformation analyses through cross-section evaluations. Consequently, the integration of 3D models into the documentation and registration stages of buildings can enable accurate post-disaster deformation and damage assessment using GML technology.

1. Giriş

Giyilebilir Mobil LIDAR (GML) teknolojisi, yersel ölçme yöntemlerine kıyasla önemli avantajlar sunan yenilikçi bir ölçme tekniği olarak öne çıkmaktadır. Bu teknoloji, operatörün üzerindeki hafif ve taşınabilir sensörler aracılığıyla çalışmakta ve yüksek çözünürlüklü 3B nokta bulutu verilerini kısa sürede elde edebilme kapasitesine sahiptir. Bu özellik, özellikle geniş alanların hızlı taranması, karmaşık yapılar veya zorlu arazi koşullarında veri toplama gibi geleneksel yöntemlerin zaman alıcı ve lojistik açıdan zor olduğu durumlarda önemli bir avantaj sağlamaktadır.

GML sistemleri, klasik statik yersel lazer tarama (TLS) ve fotogrametri gibi yöntemlerle karşılaştırıldığında, sahada geçirdiği süreyi önemli ölçüde azaltmakta ve daha esnek veri toplama olanağı sunmaktadır. Bu esneklik, özellikle tarihi yapıların belgelenmesi, arkeolojik alanların incelenmesi, altyapı ve inşaat projelerinin izlenmesi gibi alanlarda değerli bir çözüm sunmaktadır. Ayrıca, kullanıcıya hareket halindeyken veri toplama imkânı vererek, erişilmesi güç alanlarda ya da güvenlik açısından riskli bölgelerde veri toplamanın önünü açmaktadır.

Buna rağmen, GML teknolojisi görece yeni bir teknoloji olduğundan, kullanım alanları ve metodolojileri hâlen gelişme aşamasındadır. Sistemlerin farklı çevresel koşullardaki performansı, veri doğruluğu ve çözünürlüğü, sensör kalibrasyonu, operatör hareket hızı ve veri işleme algoritmaları gibi pek çok faktöre bağlı olarak değişkenlik gösterebilmektedir. Bu nedenle, teknoloji ile ilgili standart protokoller ve en iyi uygulama yöntemleri henüz tam olarak olgunlaşmamıştır. Akademik çalışmalar, farklı saha koşullarında GML'nin veri kalitesi ve doğruluğunu analiz ederek, sistemin mevcut sınırlamalarını ve potansiyel kullanım alanlarını ortaya koymayı hedeflemektedir.

Yapılan önceki çalışmalar, GML sistemlerinin su yüzeyleri dışında kalan tüm nesneleri etkili biçimde ölçebildiğini ortaya koymuştur [1-6]. Bu bulgular, teknolojinin özellikle kentsel alanlar, yapı kompleksleri, tarihi mekânlar ve mühendislik yapıları gibi karmaşık çevrelerde yüksek doğruluk ve detay seviyesiyle veri toplayabildiğini göstermektedir.[1-10] GML sistemleri, insan gözüyle fark edilmesi güç olan ayrıntıları bile algılayabilmekte, böylece mikro düzeyde geometrik doğruluk sağlamaktadır. Bununla birlikte, sistemin taşınabilir yapısı ve insan tarafından kullanılması nedeniyle, veri toplama sürecinin başarısı büyük ölçüde operatörün deneyimine, hareket kabiliyetine ve sistem hâkimiyetine bağlıdır. Bu nedenle, GML uygulamalarında tecrübeli ve dikkatli bir operatörün varlığı, elde edilen verinin kalitesi açısından kritik öneme sahiptir.

Günümüzde yapı ölçüm çalışmaları ağırlıklı olarak yersel ölçme yöntemleri (örneğin total station, lazer tarayıcılar) ve fotogrametrik yaklaşımlar (özellikle insansız hava araçları - İHA fotogrametrisi) ile gerçekleştirilmektedir. Ancak bu yöntemler, özellikle dar alanlarda, iç mekânlarda veya hızlı veri gerektiren durumlarda belirli sınırlılıklar göstermektedir. GML teknolojisi, bu noktada hem yersel hem fotogrametrik yöntemlere kıyasla daha esnek, taşınabilir ve zaman açısından verimli bir alternatif sunmaktadır.

Bu çalışmada, GML teknolojisinin yapı ölçüm çalışmalarında kullanılabilirliği ve doğruluk düzeyi incelenmiştir. Uygulama alanı olarak, Malatya kent merkezinde yer alan TCDD tren bakım istasyonu seçilmiştir. Bu yapı, 2023 Kahramanmaraş merkezli depremleri sırasında ciddi şekilde etkilenmiş ve kısmi hasar görmüştür. İstasyon binası çelik donatılı betonarme bir yapıya sahiptir ve ölçüm çalışmaları için hem yapısal bütünlüğü hem de geometrik karmaşıklığı nedeniyle uygun bir örnek teşkil etmektedir.

Çalışmanın temel amacı, söz konusu istasyonun 3B modelinin ve haritasının GML teknolojisi kullanılarak oluşturulmasıdır. Bu kapsamda, GML sistemi ile yapılan taramalar sonucunda binanın dış geometrisi yüksek doğrulukla modellenmiştir. Elde edilen 3B model, yapının mevcut durumunu dijital ortamda temsil ederken, gelecekte yapılacak deformasyon analizleri, bakım planlaması ve afet sonrası değerlendirmeler için de referans veri olarak kullanılabilir.

Sonuç olarak, bu çalışma GML teknolojisinin yapı ölçümlerinde uygulanabilirliğini, hız avantajını ve doğruluk potansiyelini ortaya koymaktadır. GML, Türkiye'de henüz yaygın olarak kullanılmayan, ancak veri toplama hızını artıran, detaylı ve hassas sonuçlar sunan bir sistem olarak, geleceğin haritacılık ve yapı belgeleme teknolojilerinden biri olmaya adaydır.

2. Gexcel Heron Giyilebilir 3B Mobil Haritalama Sistemi

Gexcel Heron, 2015 yılında piyasaya sürülen, giyilebilir veya el tipi olarak kullanılabilen yenilikçi bir mobil lazer tarama sistemidir. Sistem, harita üretimi ve üç boyutlu (3B) modelleme çalışmalarında, hareketli kullanıcı üzerinden veri toplama prensibine dayanır. Bir insanın yürüyerek geçebildiği her alanda kullanılabilmesi, onu özellikle dar geçitlerde, kapalı mekânlarda ve karmaşık geometri yapılarında avantajlı hâle getirmektedir. Sabit tarama sistemlerinin erişemediği alanlarda, kullanıcı hareketiyle eşzamanlı veri toplanmasına olanak tanınması, Gexcel Heron'un en önemli üstünlüklerinden biridir.

Sistemin konum belirleme ve hareket takibi için SLAM (Simultaneous Localization and Mapping)

algoritması kullanılmaktadır. Bu algoritma, GPS sinyalinin alınamadığı veya zayıf olduğu kapalı alanlar, tüneller, mağaralar, kültürel miras yapıları ve endüstriyel tesisler gibi ortamlarda, gerçek zamanlı konum çözümü yapabilmektedir. SLAM algoritması, LIDAR'dan elde edilen nokta bulutu verisini IMU (Inertial Measurement Unit) verisiyle bütünleştirerek, kullanıcının konumunu ve tarama hattını sürekli olarak optimize eder. Böylece sistem, harici bir GNSS alıcısına ihtiyaç duymadan yüksek doğrulukta 3B haritalar oluşturabilir [11-16].

Gexcel Heron sistemi, doğal ve yapay ortamların iç ve dış mekânlarının, açık veya kapalı maden ocaklarının, mağaraların, tünellerin, mimari yapıların ve özellikle ölçülmesi güç, karmaşık geometri bölgelemlerin modellenmesinde yaygın biçimde kullanılabilir. Ayrıca kültürel miras alanlarının belgelenmesi ve 3B dijital ikizlerinin oluşturulmasında da etkili bir araçtır. Sistem, sadece geometrik veriyi değil aynı zamanda renk (RGB) bilgilerini de toplayarak gerçekçi 3B nokta bulutları ve panoramik görüntüler elde edebilmektedir.

Bu çalışmada kullanılan taşınabilir mobil lazer tarayıcı, Gexcel firmasına ait Heron giyilebilir LIDAR cihazıdır. Sistem, 903 nm dalga boyunda kızılötesi lazer ışını kullanan Velodyne Puck LITE sensörü ile donatılmıştır. Bu sensör, 16 lazer kanalı aracılığıyla 360° yatay görüş açısı ve $\pm 15^\circ$ düşey görüş alanı içerisinde saniyede yaklaşık 300.000 nokta ölçebilmektedir. 100 metreye kadar menzile sunan bu sensör, yüksek yoğunlukta nokta bulutu üretimi sayesinde hem iç hem dış mekânlarda detaylı geometri elde etmeyi sağlar.

LIDAR sensörü, sistemin hareket doğruluğunu sağlamak amacıyla XSens MTi serisi bir IMU (Ataletsel Ölçüm Birimi) ile entegre çalışmaktadır. IMU, ivmeölçer, jiroskop ve manyetometre verilerini kullanarak sistemin konum ve yönelim bilgilerini hesaplar. Bu veriler, SLAM algoritmasıyla birleştirilerek gerçek zamanlı yörünge tahmini yapılır.

Saha çalışması sırasında LIDAR kafası, teleskopik karbon fiber bir jalon üzerine monte edilerek taşınabilir hâle getirilmiştir. Sistem, bir batarya ünitesi ve bir kontrol ünitesi (tablet) ile entegre şekilde çalışır. Batarya, tarayıcı kafaya enerji sağlarken; kontrol ünitesi, veri akışını yönetir ve kullanıcıya anlık görselleştirme imkânı sunar.

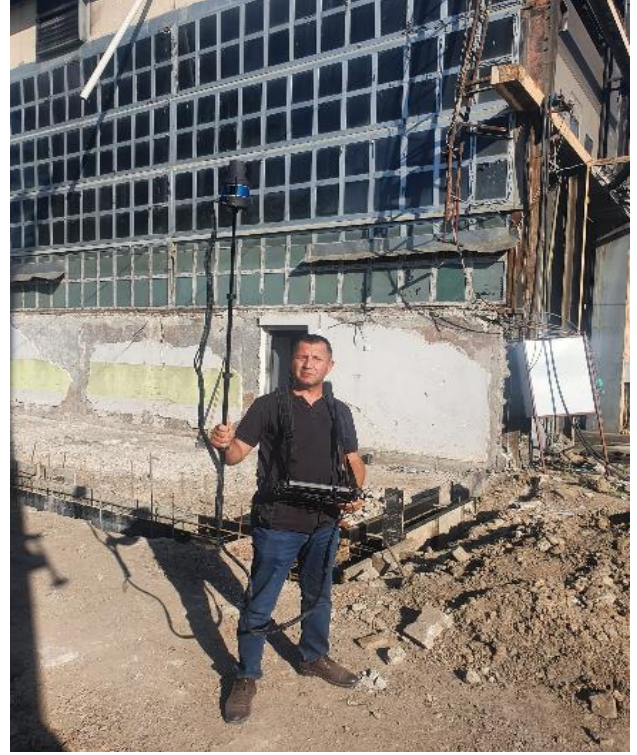
Tablet bilgisayar üzerinde çalışan Heron Live yazılımı, sistemin kontrolü ve izlenmesi için kullanılmaktadır. Bu yazılım aracılığıyla tarama süreci başlatılabilir, durdurulabilir ve anlık olarak toplanan nokta bulutu verisi ekranda görüntülenebilir. Böylece operatör, veri kalitesini ve kapsama alanını gerçek zamanlı olarak izleyebilmekte, olası bir hata veya veri kaybı durumunda tarama sürecine müdahale ederek yeniden ölçüm yapabilmektedir.

Tarama işlemi sırasında operatör, cihazı iki farklı şekilde kullanabilir:

Giyilebilir modda, tarayıcı jalonu özel bir kemer bağlantısı aracılığıyla bel hizasında taşır ve eller serbest şekilde veri toplar.

El tipi modda, jalonu dik konumda elinde tutarak daha kontrollü ve hedef odaklı taramalar gerçekleştirir.

Bu esnek kullanım biçimi, operatöre çalışma alanına ve hedef yapıya bağlı olarak en uygun ölçme pozisyonunu seçme özgürlüğü tanır (şekil 1).



Şekil 1. Heron GML.

2.1. Gexcel Heron sisteminin çalışma koşulları ve doğruluk özellikleri

Üretici firma tarafından sağlanan teknik bilgilere göre Gexcel Heron sistemi, yaklaşık 3 cm yerel doğruluk (local accuracy) ve yaklaşık 5 cm küresel doğruluk (global accuracy) sağlamaktadır. Bu doğruluk değerleri, sistemin SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) algoritmasının performansına ve tarama ortamının özelliklerine doğrudan bağlıdır [10-11].

SLAM algoritması, kullanıcı hareketiyle birlikte sensör verilerini sürekli olarak analiz ederek anlık konum çözümü yapmaktadır. Ancak bu algoritmanın başarısı, döngü (loop closure) noktalarının varlığına, yüzeylerin yansıtıcılığına, geometrik karmaşıklığa ve ortamdaki tekrarlayan desenlerin sayısına bağlı olarak değişebilir. Örneğin, geometrik olarak benzer yüzeylerin fazla olduğu veya kapalı alan döngülerinin yeterince oluşmadığı ortamlarda SLAM algoritması sapmalar gösterebilmektedir [10,12]. Bu tür durumlarda sistem doğruluğu 20-50 cm aralığına kadar düşebilmektedir.

Bu bağlamda, yüksek doğruluk gerektiren mühendislik ölçümlerinde yer kontrol noktaları (YKN) kullanımı, modelin küresel koordinat sistemine oturtulması açısından hâlen önemini korumaktadır. Bununla birlikte, Gexcel Heron'un yeni nesil modellerinde GNSS entegrasyonu sağlanarak, konum verisinin doğrudan küresel sistemle ilişkilendirilmesi mümkün hâle gelmiştir. Bu sayede, bazı uygulamalarda YKN ihtiyacı ortadan kaldırılmıştır.

2.2. Uygun çalışma koşulları

Sistemin güvenli ve doğru biçimde çalışabilmesi için üretici tarafından belirlenen çevresel koşullara uyulması gerekmektedir. Gexcel Heron sistemi, -10°C ile +45°C arasındaki sıcaklıklarda sorunsuz biçimde çalışabilmektedir. Bunun dışında aşağıdaki çevresel koşullar sistem performansını etkileyebilmektedir:

Uygun Çalışma Koşulları

Doğrudan güneş ışığının bulunduğu açık alanlar,
Hafif rüzgârlı koşullar,

Karanlık veya loş aydınlatmalı iç mekânlar.

Uygun Olmayan Çalışma Koşulları

Yağmur, kar ve yoğun yağışın bulunduğu ortamlar,
Toz yoğunluğu yüksek, partikül birikimli alanlar,
500 m/s²'den büyük ivmeli sarsıntıların görüldüğü
agresif atmosferler,
Güçlü elektromanyetik alanların bulunduğu endüstriyel
bölgeler,

Cihaza doğrudan su temasının olduğu durumlar (bu durum cihazın kalıcı hasar görmesine neden olabilir).

Bu koşulların dışına çıkılması, özellikle lazer ölçüm performansında zayıflama, sensörün veri bütünlüğünde kayıp veya SLAM algoritmasında konum sapmalarına neden olabilir.

2.3. Tarama esnasında dikkat edilmesi gereken hususlar

Tarama işlemi sırasında sistemin mekanik stabilitesi ve sensör kablolarının yönü büyük önem taşımaktadır. Ölçüm sırasında aşağıdaki noktalara dikkat edilmelidir:

Sensörün ani sallanması, zıplama veya ani yön değişikliklerinden kaçınılmalıdır.

Jalona monte edilmiş tarayıcı dik konumda tutulmalıdır.

Tarama ve kalibrasyon işlemleri sırasında lazer sensör başlığına bağlı kabloların yönü, hareket güzergâhına göre her zaman sağa bakacak şekilde konumlandırılmalıdır. Kabloların yönünün değiştirilmesi, IMU sensörünün referans yönelimini etkileyerek konum hesaplamasında hata oluşturabilir.

Tarama esnasında operatörün yürüyüş hızı sabit ve dengeli olmalı; ani duruş, dönüş veya hız değişimleri yapılmamalıdır.

Bu kuralların ihlali, SLAM temelli yörünge hesaplamasında birikimli hatalara yol açabileceğinden, veri kalitesini doğrudan düşürür.

2.4. Kullanım Alanları ve Teknolojik Potansiyel

Giyilebilir Mobil LIDAR (GML) sistemleri, yürüyen bir insanın erişebildiği alanların 3B modellenmesi amacıyla geliştirilmiştir. Bu sistemler, operatörün hareketiyle eşzamanlı olarak çevreyi tarar ve yüksek yoğunlukta nokta bulutu üretir. Gexcel Heron sistemi, gözle görülebilen ve konumları sabit olan tüm nesneleri ölçebilmektedir. Bu kapsamda, su yüzeyleri dışındaki tüm katı nesneler, yüzeyler ve yapılar sistem tarafından algılanarak 3B olarak modellenebilir [1-6]

GML sistemleri günümüzde birçok farklı alanda uygulanmaktadır:

Yapı modelleme ve mühendislik ölçmeleri [4,6],

Ormancılık ve bitki örtüsü analizi [5],

Kültürel mirasın belgelenmesi ve dijital ikiz oluşturulması [1,3,7],

Yol, tünel ve mağara haritalaması [5],

Kadastro ve hâlihazır harita üretimi [9].

Bu uygulamalarda sistem, özellikle insan erişiminin mümkün olduğu ancak sabit LIDAR veya İHA sistemlerinin sınırlı kalabildiği alanlarda veri toplama hızını ve operasyonel esnekliği artırmaktadır [17-35]. Hatta insan erişiminin mümkün olmadığı alanlarda fotogrametrik yöntemlerle hem ölçüm hemde eserlerin çizimini elde etmek mümkün olmaktadır [36,37,38]. Yersel lazer tarayıcılarla da önemli bilimsel çalışmalar yapılabilir hacim hesaplarından sayısal arazi modeline kadar her türlü vrileri sağlıklı hassas ve kullanılabılır düzeyde elde edilebilir [39-46].

Gexcel Heron Giyilebilir LIDAR sistemi, yerinde veri toplama kolaylığı, yüksek hız, anlık modelleme kabiliyeti ve SLAM temelli konum belirleme özellikleriyle modern haritacılık çalışmalarında önemli bir yenilik sunmaktadır. Özellikle afet sonrası durum değerlendirmesi, iç mekân haritalama ve kültürel mirasın korunması gibi alanlarda taşınabilir, kullanıcı dostu ve doğruluğu yüksek bir ölçme sistemi olarak öne çıkmaktadır.

3. GML ile istasyon binasının 3b modellenmesi ve haritası

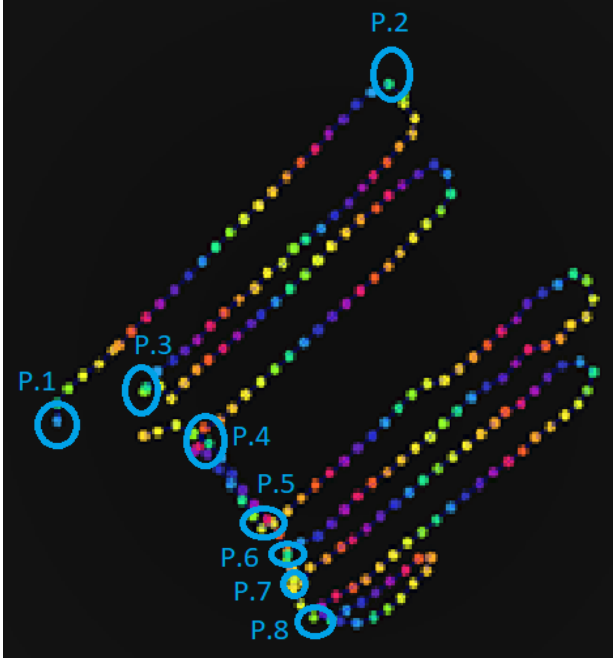
Bu çalışmada Gexcel Heron Giyilebilir Mobil Lazer (GML) sistemi kullanılarak istasyon binasının üç boyutlu (3B) modellenmesi gerçekleştirilmiştir. Ölçüm çalışmaları öncesinde, bina çevresinde sekiz adet poligon noktası tesis edilmiştir. Bu poligon noktalarının koordinatları, yüksek doğruluk sağlamak amacıyla Total Station cihazı kullanılarak belirlenmiştir. Poligon ağı, ölçüm alanını homojen biçimde kapsayacak şekilde konumlandırılmış, böylece hem bina içi hem de bina dışı alanlarda koordinat birliği sağlanmıştır.

İstasyon binası, tren lokomotiflerinin giriş ve çıkışına uygun geniş koridorlardan ve bağlantı alanlarından oluşmaktadır. Bu nedenle, veri toplama işlemi sırasında tarama güzergâhları, koridor yapısı dikkate alınarak sistematik ve çakışmalı biçimde planlanmıştır. Her koridor boyunca yürüyüş rotaları önceden belirlenmiş, olası kör alanların (blind spots) ortadan kaldırılması için güzergâhlar arasında minimum 20-30% örtüşme sağlanmıştır.

Güzergâhların uç noktalarına Yer Kontrol Noktaları (YKN) tesis edilmiştir (Şekil 2). Bu noktalar, SLAM algoritmasının konumlandırma doğruluğunu artırmak, döngü kapanışlarının (loop closures) etkin biçimde tanımlanmasını sağlamak ve genel hataların birikimini önlemek amacıyla kullanılmıştır. YKN'ler, yapı alanına olabildiğince homojen dağıtılarak, hem bina içi hem de bina dışı bölgelerde denge ölçümü (adjustment) yapılabilir bir ağ kurulmuştur. Bu yöntem, özellikle SLAM tabanlı mobil tarama sistemlerinde ortaya çıkabilecek yörünge sapması (trajectory drift) problemlerinin minimize edilmesini sağlamaktadır.

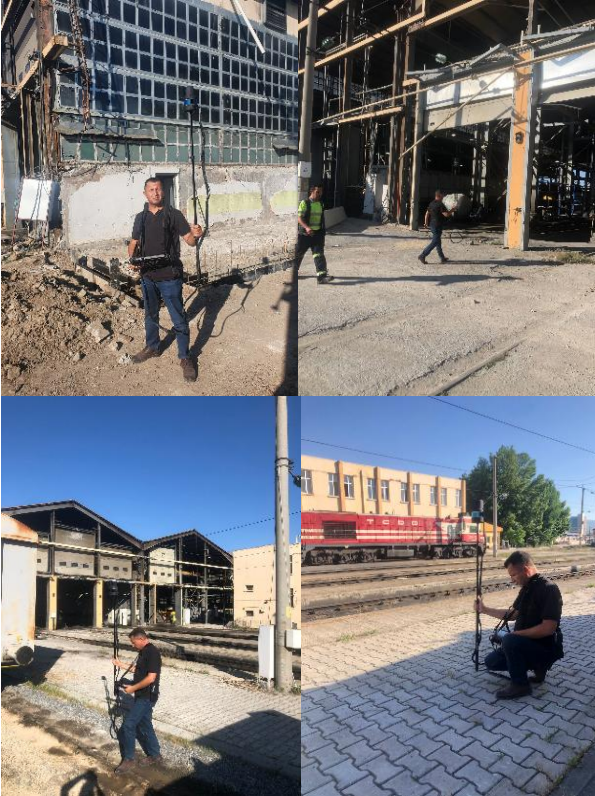
Toplanan veriler, Heron Live yazılımı üzerinden anlık olarak kontrol edilmiş, hatalı veya eksik tarama alanları belirlenmiş ve gerektiğinde aynı güzergâhlar yeniden

taranmıştır. Bu şekilde elde edilen nokta bulutu verileri, ofis ortamında Heron Desktop yazılımı ile birleştirilmiş, ardından Gexcel Reconstructor yazılımında filtreleme, hizalama ve georeferanslama işlemleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2. İzlenen güzergâh üzerinde YKN yaklaşık yerleri.

Aşağıda verilen Şekil 3’de GML ile ölçüme başlama anı gözükmemektedir.



Şekil 3. Arazi çalışmasından kareler.

Deprem nedeniyle hasar gören istasyonun hâlihazırdaki resimleri Şekil 4’de görüldüğü gibidir.



Şekil 4. İstasyon binasından kareler.

3.1 İstasyon binasının GML ile ölçümü

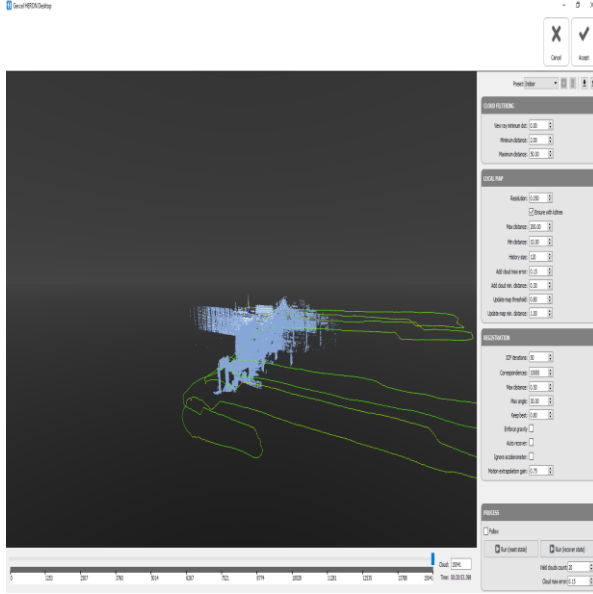
Ölçüm öncesinde, istasyon binası ve çevresi detaylı biçimde incelenmiş, Gexcel Heron Giyilebilir Mobil Lazer (GML) sistemiyle veri toplama sürecini optimize etmek için yürüme güzergâhları belirlenmiştir. Çalışma alanı, hem açık alan hem de kapalı yapı bölümlerinden oluştuğundan, sistemin SLAM tabanlı konumlandırmasının kararlılığını artırmak amacıyla güzergâh planlaması özenle yapılmıştır.

Arazi gezisi sırasında, yürüyüş rotası üzerinde poligon noktaları tesis edilmiş ve bunlar Total Station yardımıyla ölçülerek yerel koordinat sistemi içinde tanımlanmıştır. İstasyon binasının iç mekânında yer alan kolonların batı uçlarına sekiz adet Yer Kontrol Noktası (YKN) yerleştirilmiştir. Bu noktalar, güzergâhın başı ve sonu arasında kapalı bir döngü (loop closure) oluşturacak şekilde konumlandırılmıştır. Böylelikle, SLAM algoritmasının doğruluğu artırılmış, yörünge sapması (trajectory drift) minimize edilmiştir.

Güzergâh planlamasında, istasyon binasının mimari yapısı ve ölçüm sırasında karşılaşılabilecek engeller dikkate alınmıştır. Bina içinde bazı kısımlar düz zemin üzerinde yürünerek ölçülürken, lokomotiflerin yansıdığı yükseltilmiş platform bölgelerine erişim için merdivenlerle çıkılmıştır. Bu durum, sistemin farklı kotlardaki verileri kesintisiz biçimde kaydetmesini sağlamıştır.

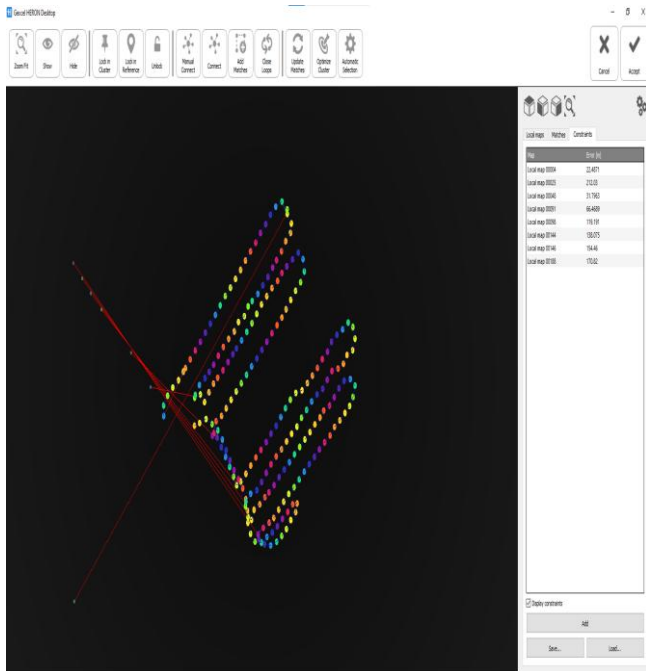
Tarama süresi toplamda yaklaşık 21 dakika sürmüştür ve bu süre boyunca sistem, saniyede 300.000 nokta üreterek yüksek yoğunluklu bir nokta bulutu (point cloud) verisi toplamıştır. Tarama işlemi boyunca, Heron Live yazılımı üzerinden anlık veri akışı izlenmiş ve olası veri kayıplarının önüne geçilmiştir.

Elde edilen güzergâhın odometre kaydı, Şekil 5'te gösterilmiştir. Bu kayıt, kullanıcının bina içindeki hareket rotasını, hız değişimlerini ve SLAM yörüngesinin genel karakterini ortaya koymaktadır. Güzergâhın döngüsel yapısı, ölçüm verilerinin ofis aşamasında hizalanması ve kapatılması açısından önemli bir avantaj sağlamıştır.



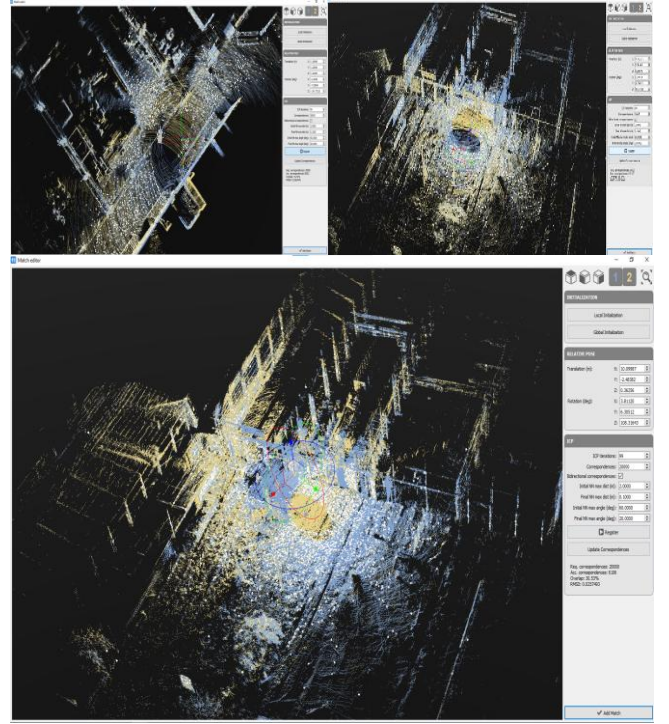
Şekil 5. Güzergâhın Odometre edilmesi.

Otomatik oluşturulmuş ve YKN noktaları dâhil edilmiş bağlar Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 6. YKN noktaları dahil edilmiş bağlar.

Yeni bağlar çekildi ve eklenen bağlar çakıştırıldı çakışan yerler Şekil 7'de beyaz renkte görülmektedir.



Şekil 7. Yeni bağ çakıştırılır.

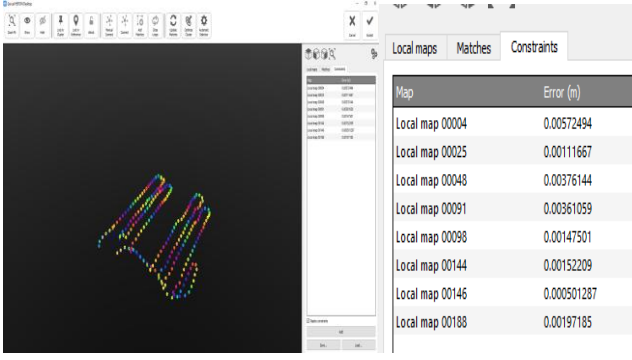
Bağlardaki en büyük ortalama karekök hatası (RMSD), 3.6 cm, bağlardaki en büyük hata 7 cm çıkmıştır. Şekil 8'de bağlardaki çakışma oranları, hata ve RMSD değerleri görülmektedir.

Map 1 (ID)	Map 2 (ID)	Overlap (%)	RMSD (cm)	Error (m+rad)
Local map 00062	Local map 00063	62.5200	2.5870	0.0703
Local map 00004	Local map 00050	16.8750	3.0994	0.0700
Local map 00067	Local map 00068	60.1600	2.9671	0.0669
Local map 00038	Local map 00039	60.3000	2.2861	0.0665
Local map 00064	Local map 00065	59.1400	2.3577	0.0644
Local map 00021	Local map 00003	14.7500	2.8950	0.0628
Local map 00065	Local map 00066	62.4700	2.8104	0.0586
Local map 00053	Local map 00054	55.7200	3.5325	0.0568
Local map 00058	Local map 00059	75.2400	2.2156	0.0567
Local map 00059	Local map 00060	70.3200	2.2595	0.0551
Local map 00035	Local map 00036	59.1900	2.6209	0.0544
Local map 00066	Local map 00067	69.8800	2.2669	0.0541
Local map 00032	Local map 00033	69.4400	2.1405	0.0527
Local map 00050	Local map 00003	14.6400	3.1660	0.0518
Local map 00045	Local map 00046	68.7800	2.5072	0.0512
Local map 00056	Local map 00057	73.1000	2.3157	0.0512

Map 1 (ID)	Map 2 (ID)	Overlap (%)	RMSD (cm)	Error (m+rad)
Local map 00003	Local map 00089	38.8600	2.2464	0.0392
Local map 00034	Local map 00030	9.1550	2.8669	0.0374
Local map 00003	Local map 00004	58.2400	2.0468	0.0323
Local map 00009	Local map 00010	50.0200	2.4795	0.0201
Local map 00053	Local map 00054	55.6300	3.0219	0.0189
Local map 00043	Local map 00046	26.6150	2.4490	0.0177

Şekil 8. Bağlardaki hata ve RMSD

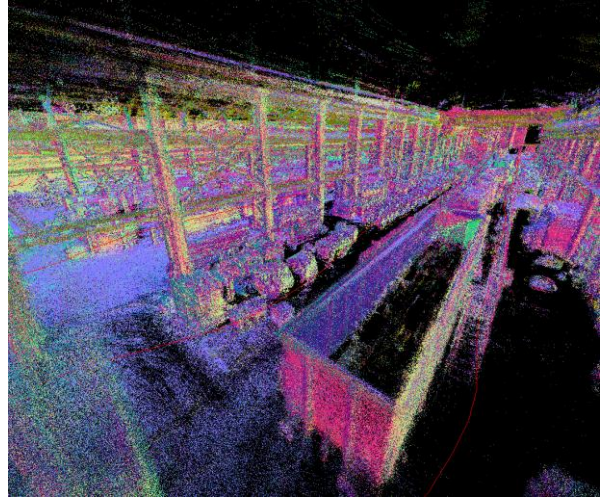
Dengeleme sonucunda YKN noktalarına isabet eden hataların en büyüğü 6 mm olarak Şekil 9'da gözlenmektedir.



Map	Error (m)
Local map 00004	0.00572494
Local map 00025	0.00111667
Local map 00048	0.00376144
Local map 00091	0.00361059
Local map 00098	0.00147501
Local map 00144	0.00152209
Local map 00146	0.000501287
Local map 00188	0.00197185

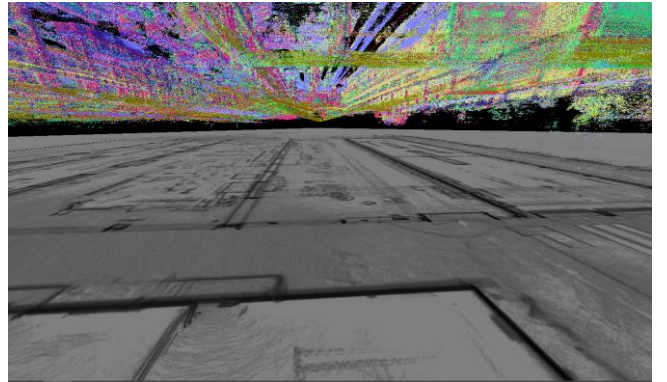
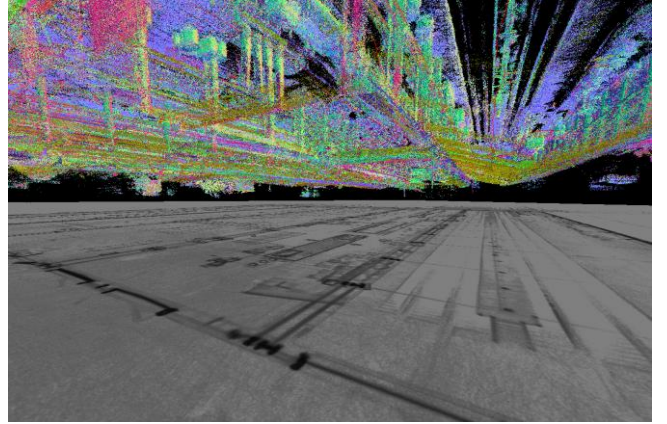
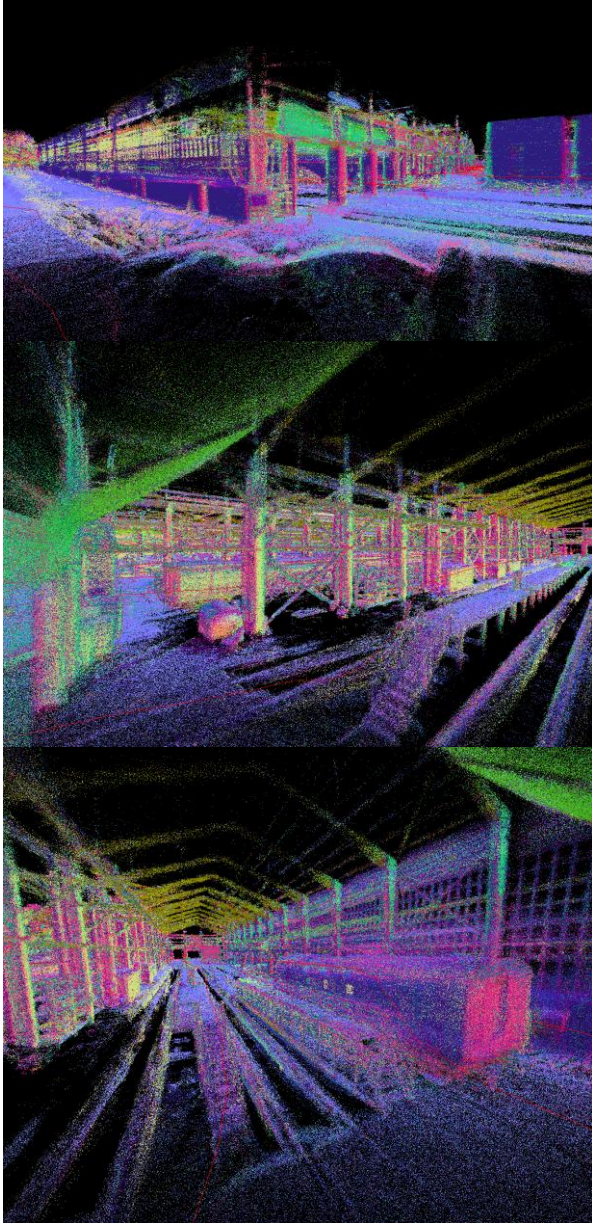
Şekil 9. Dengeleme sonucu YKN isabet eden hatalar.

Reconstructor’da farklı açılardan yapı adası 3B modeli Şekil 10’da incelenebilir üzerinden ölçü alınabilir.



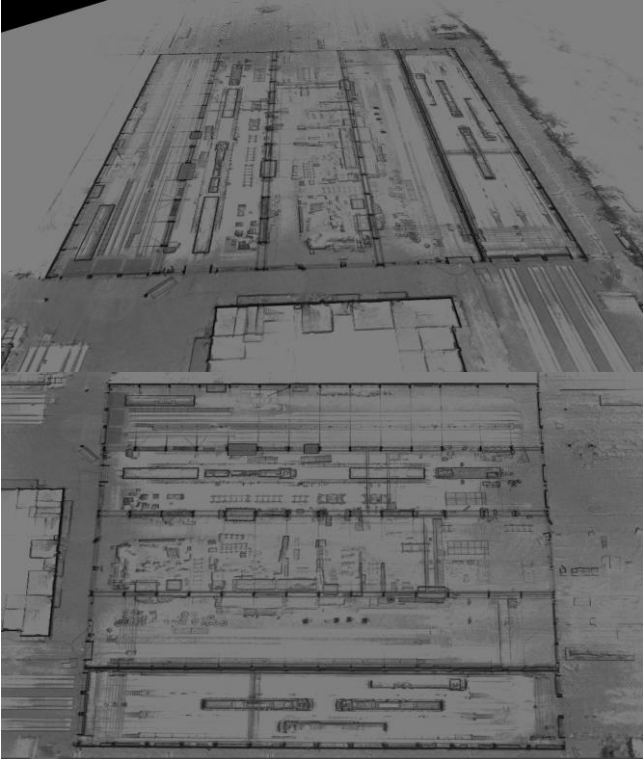
Şekil 10. Reconstructor’da farklı açılardan yapı adası 3B modeli

Reconstructor’da yapının 3B modeli ve ortofotosu aynı anda Şekil 11’de gözüktüğü gibi üretildi.



Şekil 11. İstasyon binasının 3B modeli ve ortofotosu.

İstasyon binasının Reconstructor’da ortofotosu Şekil 12’de gözüktüğü gibi üretildi.



Şekil 12. İstasyon binasının ortofotosu.

4. Sonuçlar

Bu çalışmada, Gexcel Heron Giyilebilir Mobil Lidar (GML) sistemi kullanılarak Malatya’da bulunan TCDDY tren bakım istasyonu üç boyutlu olarak modellenmiştir. Çalışma, GML teknolojisinin bina ölçeğinde ölçme ve haritalama çalışmalarındaki uygulanabilirliğini değerlendirmeyi amaçlamıştır.

Arazi çalışması yaklaşık 21 dakika sürmüş ve sistemin sağladığı hızlı veri toplama avantajı gözlemlenmiştir. Ölçüm sırasında tesis edilen sekiz Yer Kontrol Noktası (YKN), SLAM tabanlı konumlandırma algoritmasının doğruluğunu artırarak hataların birikmesini önlemiştir. Dengeleme işlemleri sonunda elde edilen sonuçlar, GML sisteminin yapı ölçümlerinde kullanılabilecek düzeyde yüksek doğruluk sunduğunu göstermiştir.

Elde edilen sonuçlar şu şekilde özetlenebilir:

Ortalama Karekök hatası (RMSE): 3.6 cm

En büyük bağ hatası: 7 cm

Dengeleme sonrası kontrol noktası hatası (maksimum): 6 mm

Toplam tarama süresi: 21 dakika

Üretilen veriler: 3B nokta bulutu, 3B model, ortofoto

Bu sonuçlar, GML sisteminin yapı modelleme, deformasyon analizi, kültürel miras belgelenmesi, kadastral ve hâlihazır harita üretimi gibi birçok alanda kullanılabileceğini göstermektedir. Sistem, klasik yersel ölçüm ve fotogrametri yöntemlerine göre daha kısa sürede yüksek yoğunlukta veri üretmesiyle öne çıkmaktadır. Ancak, GML sisteminin kullanımındaki bazı dezavantajları da dikkate alınmalıdır:

SLAM algoritmasının doğruluğu, kapalı döngü oluşturulmasına ve tarama alanındaki geometrik çeşitliliğe bağlıdır.

Yansıtıcı yüzeyler, su, cam veya parlak metal nesneler sistemin veri kalitesini olumsuz etkileyebilir.

Operatör tecrübesi, tarama planlaması ve cihazın dik tutulması gibi unsurlar doğruluğu doğrudan etkiler.

Gelecekteki çalışmalar için öneriler:

GML sistemlerinin GNSS entegrasyonlu yeni modelleri, YKN gereksinimini ortadan kaldırarak açık alanlarda konum doğruluğunu artırabilir.

Farklı yapı türleri (betonarme, çelik, tarihi yapılar vb.) üzerinde karşılaştırmalı doğruluk analizleri yapılabilir.

GML verilerinin BIM (Building Information Modeling) ve CBS (Coğrafi Bilgi Sistemleri) tabanlı analizlerle bütünleştirilmesi, afet yönetimi ve kentsel planlama süreçlerine katkı sağlayabilir.

Afet öncesi ve sonrası ölçümler karşılaştırılarak deformasyon izleme modelleri geliştirilebilir.

Sonuç olarak, GML teknolojisi taşınabilirliği, hız ve doğruluk avantajları sayesinde ülkemizde yapıların 3B belgelenmesinde güçlü bir alternatif olarak değerlendirilebilir. Özellikle deprem riski altındaki bölgelerde, kamusal yapıların afet öncesi 3B kayıtlarının oluşturulması; hasar tespiti, restorasyon planlaması ve yeniden inşa süreçlerinde nesnel, ölçülebilir ve tekrarlanabilir bir veri temeli sunacaktır.

Araştırmacıların katkı oranı

Atilla Karabacak: Literatür taraması, Arazi çalışması, Modelleme, Makale yazımı; **Murat Yakar:** Düzenleme

Çatışma Beyanı

Herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Kaynakça

1. Karabacak, A., & Yakar, M. (2022) Giyilebilir Mobil LİDAR Kullanım Alanları ve Cambazlı Kilisesinin 3B Modellemesi. Türkiye Lidar Dergisi, 4(2), 37-52.
2. Karabacak, A., & Yakar, M. (2023). 3D modeling of Mersin Akyar Cliffs with wearable mobile LIDAR. Advanced Engineering Days (AED), 6, 86-89.
3. Karabacak, A., & Yakar, M. (2023). 3D modeling of Mersin Sarisih Caravanserai with wearable mobile LIDAR. Advanced Engineering Days (AED), 6, 90-93.
4. Karabacak, A., & Yakar, M. (2023). 3D Modeling of Mufti Abdullah Sıddık Mosque using Wearable Mobile LiDAR. Advanced LiDAR, 3(1), 01-09.
5. Karabacak, A. (2022) Mobil Haritalama Yöntemlerinin Farklı Yerlerde Uygulamaları ve Karşılaşılan Sorunlar, Mersin Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Uzaktan Algılama Ve Coğrafi Bilgi Sistemleri Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi.
6. Karabacak, A. (2025). Giyilebilir Mobil LİDAR (GML) ile Köprülerin Modellenmesi. Kültürel Miras Araştırmaları, 6(2), 107-114.

7. Yakar, M., Yılmaz, H. M., & Karabacak, A. (2025). Giyilebilir LiDAR Teknolojilerinin Kültürel Mirasların Ölçümünde Kullanımı. *Kültürel Miras Araştırmaları*, 6(2), 91-102.
8. Uslu, M. P., Karabacak, A., & Yakar, M. Comparison of Traditional Methods and 3D Laser Scanners in Architectural Structures: The Case of Kuruçeşme in Mersin. *Cultural Heritage and Science*, 6(2), 156-164.
9. Karabacak, A., & Yakar, M. (2023). Giyilebilir Mobil LiDAR'ın Kadastroda Kullanılabilirliği. *Türkiye Lidar Dergisi*, 5(2), 52-60.
10. Yakar, M.; Karabacak, A. (2023) *Giyilebilir Mobil Lidar ve Uygulamaları*, Isbn: 978-625-8101-40-9, Asatlas Akademi, Baskı Sayısı: 1, 196 Sayfa, Konya, Türkiye.
11. PaksoytekniK şirketinin sayfasından 17 Ekim 2022 tarihinde <https://paksoytekniK.com.tr/index.php/paksoy-topcon/lazer-tarama/gexcel-heron> adresinden erişildi.
12. GEXCEL Şirketinin sayfasından 2 Ekim 2021 tarihinde <https://gexcel.it/en/solutions/heron-portable-3d-mapping-system> adresinden erişildi.
13. Geoslam firmasının ana sayfasından 14 Ekim 2021 tarihinde <https://geoslam.com/>, adresinden erişildi.
14. 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).
15. LEICA firmasının ana sayfasından 2 Ekim 2021 tarihinde <https://leica-geosystems.com/products/mobile-sensor-platforms/capture-platforms/leica-pegasus-backpack> adresinden erişildi.
16. NAVVIS şirketi sayfasından 1 Ekim 2021 tarihinde www-navvis-com adresinden erişildi.
17. Maset, E., Cucchiari, S., Cazorzi, F., Crosilla, F., Fusiello, A., & Beinai, 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.
18. 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.
19. 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.
20. 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.
21. Cabo, C., Del Pozo, S., Rodríguez-Gonzálvez, 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.
22. 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.
23. Hyypä, E., Kukko, A., Kaialuoto, R., White, J. C., Wulder, M. A., Pyörälä, J., ... & Hyypä, J. (2020). Accurate derivation of stem curve and volume using backpack mobile laser scanning. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 161, 246-262.
24. 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.
25. 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.
26. Otero, R., Lagüela, S., Garrido, I., & Arias, P. (2020). Mobile indoor mapping technologies: A review. *Automation in Construction*, 120, 103399.
27. Maset, E., Scalera, L., Beinai, A., Visintini, D., & Gasparetto, A. (2022). Performance Investigation and Repeatability Assessment of a Mobile Robotic System for 3D Mapping. *Robotics*, 11(3), 54.
28. 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.
29. 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.
30. Di Stefano, F., Chiappini, S., Gorreja, A., Balestra, M., & Pierdicca, R. (2021). Mobile 3D scan LiDAR: A literature review. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 12(1), 2387-2429.
31. 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.

32. 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.
33. Velas, M., Spanel, M., Sleziak, T., Habrovec, J., & Herout, A. (2019). Indoor and outdoor backpack mapping with calibrated pair of velodyne LiDARs. *Sensors*, 19(18), 3944.
34. Thomson C., (2020), (What is SLAM?) 2 Ekim 2021 tarihinde <https://info.vercator.com/blog/what-is-slam> adresinden erişildi.
35. 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.
36. Yakar, M. (2011). Using close range photogrammetry to measure the position of inaccessible geological features. *Experimental Techniques*, 35(1), 54-59.
37. Alyilmaz, C., Yakar, M., & Yilmaz, H. M. (2010). Drawing of petroglyphs in Mongolia by close range photogrammetry. *Scientific Research and Essays*, 5(11), 1216-1222.
38. Alyilmaz, C., Alyilmaz, S., & Yakar, M. (2010)., Measurement of petroglyphs (rock of arts) of Qobustan with close range photogrammetry. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 38(Part 5), 29-32.
39. Yakar M, Yilmaz H M & Mutluoğlu Ö (2010). Comparative evaluation of excavation volume by TLS and total topographic station based methods. *Lasers in Eng*, 19, 331-345
40. Yakar, M., Yilmaz, H. M., & Yurt, K. (2010). The effect of grid resolution in defining terrain surface. *Experimental Techniques*, 34(6), 23-29
41. Yilmaz, H. M. & Yakar, M. (2008). Computing Of Volume Of Excavation Areas By Digital Close Range Photogrammetry. *Arabian J. Sci. Eng.* 33(1A), 63-78.
42. Yakar, M., Yilmaz, H. M. & Mutluoglu, O. (2010). Close range photogrammetry and robotic total station in volume calculation. *International Journal of the Physical Sciences*. 5(2), 086-096
43. Yakar, M. & Yilmaz, H. M. (2008). Using in volume computing of digital close range photogrammetry. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 37(3b).
44. Korumaza, A. G., Korumaz, M., Dulgerler, O. N., Karasaka, L., Yıldız, F., Yakar, M. (2010). Evaluation of laser scanner performance in documentation of historical and architectural ruins, a case study in Konya. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 38(5), 361-366
45. Yakar, M., Yıldız, F., Uray, F., & Metin, A. (2010). Photogrammetric Measurement of The Meke Lake and Its Environment with Kite Photographs to Monitoring of Water Level to Climate Change. In *ISPRS Commission V Mid-Term Symposium* (pp. 613-616)
46. Tükenmez F & Yakar M (2023). Production of road maps in highway projects by unmanned aerial vehicle (UAV). *Advanced Engineering Days (AED)*, Mersin, Türkiye, 6, 94-96.



© Author(s) 2026. This work is distributed under <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>