



El-tipi LiDAR ölçme sistemleri ve 3B veri işleme Hand-held LiDAR measurement systems and 3D data processing

Mustafa Zeybek*¹

¹Artvin Çoruh Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, Artvin, Türkiye

Anahtar Kelimeler:

El-tipi LiDAR
Nokta bulutu
Harita
Zeb-Revo
GeoSLAM

Keywords:

Hand-held LiDAR
Point cloud
Surveying
Zeb-Revo
GeoSLAM

ÖZ

LiDAR ölçme teknikleri gün geçtikçe yenilikçi yaklaşımlarıyla Harita Mühendisliği ve Yer bilimleri disiplinlerinin altlık harita üretimini kolaylaştırmaktadır. 1960'lı yıllardan bu yana kullanılan LiDAR ölçme sistemleri günümüzde el ile taşınabilir ölçü cihazları haline gelmiştir. Elde edilen yoğun nokta bulutları veri yapısındaki koordinatlar, erişilmesi ve ölçümü zor alanlarda, dar alanlarda ve kapalı alanlarda konumsal bilgi sağlamaktadır. Yeraltı boşluklarının tespiti, mağara ölçmeleri, ormancılık, madencilik ve tünel ölçmeleri gibi pek çok alanda kullanımı mümkün olan bu teknoloji ile haritalama amaçlı kullanımı da giderek yaygınlaşmaktadır. Bu çalışmada, Artvin Çoruh Üniversitesi Seyitler Yerleşkesi içinde el tipi LiDAR teknolojisi Zeb-Revo GeoSLAM verisinin kullanılarak haritalama amaçları için işlenmesi ve doğruluk kriterleri konu edilmiştir.

ABSTRACT

LiDAR measurement techniques are facilitating the production of base maps of Survey Engineering and Earth Sciences disciplines with their innovative approaches. LiDAR measuring systems, which have been used since the 1960s, have become hand-held portable measurement devices today. Obtained dense point clouds coordinates in the data structure provide spatial information in hard-to-reach areas, narrow areas and indoor areas. With this technology, which can be used in many areas such as detection of underground cavities, cave measurements, forestry, mining and tunnel measurements, its use for mapping purposes is becoming widespread. In this study, processing and accuracy criteria for mapping purposes using hand-held LiDAR technology Zeb-Revo GeoSLAM data in Seyitler Campus of Artvin Çoruh University are discussed.

*Sorumlu Yazar

*(mzeybek@artvin.edu.tr) ORCID ID 0000-0001-8640-1443

DOI: XXXXXXXXXXXXX

1. GİRİŞ

Günümüzde havasal LiDAR (ALS), mobil LiDAR (MLS), yersel lazer tarama (TLS) veya hareketten yapı (SfM) gibi pek çok farklı teknik yoğun nokta bulutları bazlı haritalama amaçları için kullanılmaktadır. Belirtilen bu teknikler oldukça iyi performans göstermektedir (Duran, Muhammed Enes, & ÇelİK, 2017; Mustafa Zeybek, 2017, 2018; Mustafa Zeybek & Şanlıoğlu, 2016; M. Zeybek & Şanlıoğlu, 2018; Mustafa Zeybek, Şanlıoğlu, & Genç, 2015). Ancak bu teknikler geniş ve büyük alanların haritalanmasında yaygın ve etkilidir. Kentsel alanların haritalanması dışında, kapalı alanların haritalanması ve envanter oluşturma gibi çalışmalarda farklı teknikler kullanılmaktadır. Bunlardan bir tanesi de anlık konumlandırma ve haritalama (SLAM) algoritma temelli, LiDAR ve İnertiyel ölçme birimi (IMU) entegrasyonlu sistemdir (Lagueta vd., 2018). İlgili ölçü alanının küçük ve görüş alanının çok sınırlı olduğu yerlerin haritalandırılmasında yeni yaklaşımlar gereklidir. Bu yaklaşımlarla hafif ağırlıkta giyilebilir (WLS) veya elle taşınabilir (HMLS) cihazlar haritalama amaçlı kullanılmaya başlamıştır. WLS ve HMLS cihazlarının çoğu, 3B haritalama ünitesi olarak ışık algılama ve mesafe (LiDAR) sensörlerinden elde edilen veriye dayanır. Bununla birlikte genellikle ilgili alana ait renk bilgilerini almak için kameralar da bu sistemlere entegre edilmektedir (Nocerino, Menna, Remondino, Toschi, & Rodriguez-Gonzalvez, 2017).

Geleneksel olarak HMLS ve WLS sistemleri, geniş alanların taranması için en uygun seçimi temsil eden MLS sistemlerine benzer yapıdadır ve dar alanlara ait verilerin elde edilmesinde yaygın ölçüde kullanılmaya başlanmıştır (Chen, Liu, Feng, Shen, & Chen, 2019). Bu sistemler, engebeli araziler, karmaşık engeller bulunduran araziler, kültürel miras yapıları, orman envanter haritaları ile karmaşık karakterdeki iç mekan çalışmalarında 3B haritalama için etkili bir alternatif olarak kullanılmaktadır (Quartermaine, 2018). Diğer MLS sistemlerine göre yaygın olarak, yürüyen insanlar tarafından kolayca taşınabilecek ya da giyilebilecek şekilde tasarlanmış olması ve elde ettiği doğruluk kriterleri farklı disiplinlerde kullanımına uygun olmasını sağlamıştır.

Bu çalışmanın amacı, GeoSLAM şirketi tarafından üretilmiş Zeb-Revo el-tipi LiDAR cihazı kullanarak açık alan (dış mekan) tarması yapılarak haritalama (topoğrafik ve 2B çizim) amaçlı kullanımı potansiyel ve elde edilen nokta bulutunun ampirik verilere göre doğruluk kriterlerinin belirlenerek ortaya koyulmasıdır.

2. YÖNTEM

Mevcut haritalama teknikleri, küçük ve dar alanların haritalandırılmasında yeterli hassasiyete ve pratikliğe sahip değildir. Bunun yanında kullanılan platformların boyutları ve mali açıdan

yerel çalışmalarda kullanımı uygun olmamaktadır. Günümüzde, piyasada ve araştırma laboratuvarlarında yaygın olarak kullanılan cihazlar Şekil 1' de verilmiştir.



Şekil 1. Piyasadaki giyilebilir ve elle taşınabilir (WLS ve HMLS) sistemler, a) Zeb-Revo(GeoSLAM) b) Heron (Gexcel), c) Leica Pegasus:Backpack, d) Kaarta Stencil 2.

Bu makalede, GeoSLAM Zeb-Revo(Geo-SLAM, 2019) el-tipi LiDAR tarayıcısı test edilmiştir. Elde edilen nokta bulutları, yakın mesafede (<10 m) bağıl bir şekilde (RMSE <10 mm) üretildiği belirtilmiştir (Geo-SLAM, 2019). Deneysel olarak verilen bu doğruluk kriterine göre yalnızca mesafe hassasiyeti test edilmiştir. Yatay ve düşey konumsal değerlendirmeler yapılmamıştır. Ancak iyi planlanmış ölçüm ağlarında, uzun döngü ve bloklar sayesinde 30 dk'ya kadar LiDAR sistemi sistematik hata olmadan 1:10000 bağıl hata oranlarında olduğu belirtilmiştir (Dewez, Yart, Thuon, Pannet, & Plat, 2017). Bu durumda 1/1000 ölçekli haritaların düzenlenmesinde yeterli doğruluğa erişildiği söylenebilir (<0.08m).

Geometrik bilgiler, nokta bulutları yapısından manuel olarak çizilebilmektedir. Mobil yöntemlere benzer şekilde gölgeleme etkisiyle oluşan boşluklu alanların doldurulması çoklu grid ve lup kapatma işlemleri veya her iki tekniğin kullanılmasıyla mümkündür.

El-tipi LiDAR (HMLS) teknolojisinin haritalama amaçlı kullanımı için az sayıda birkaç çalışma yapılmıştır (James & Quinton, 2014; Nocerino vd., 2017; Quartermaine, 2018). Bununla birlikte literatürde yer alan çalışmalara göre, el-tipi LiDAR tarayıcılarının farklı uygulamalarda (madencilik, ormancılık vb.) gerçekleştirilen ölçme hızının iyi ve maliyetin belirli seviyelerde olduğundan hem fikirlerdir (Dewez vd., 2017; Lagueta vd., 2018; Nocerino vd., 2017; Vatandaşlar & Zeybek, 2020). Bu cihazların hızlı olması kuşkusuz belirli seviyeye kadar konumsal doğruluk sağladığı anlamına da gelir ancak pratik anlamda haritalama amaçlı kabul edilebilir doğruluk değerleri içinde kaldığı belirtilmelidir.

2.1. GeoSLAM Çalışma Prensipleri

Zeb-Revo el-tipi LiDAR tarayıcısı, uçuş zamanına bağlı havada alınan yolun (time-of-flight), uydu navigasyon sistemlerine ihtiyaç duymadan IMU entegreli bir konumlandırma sistemine sahip bir ölçme cihazıdır. Tarayıcı, etrafında yer alan tüm detayları, eşzamanlı konum ve haritalama (SLAM) algoritmasıyla belirler (Geo-SLAM, 2019). SLAM algoritması, tarayıcının çevresindeki objeleri durağan olarak tanımlar ve bu varsayımına göre noktaların birleştirilmesi sağlanır ve bütün nokta bulutu elde edilir (Sammartano & Spanò, 2018).

GeoSLAM üreticisine göre ölçüm noktalarının hassasiyeti, 5 mm + 1 mm/m olarak değerlendirilmektedir. Ampirik olarak, sabit katsayısının burada küçük olduğu fark edildiğinden iyi yapılandırılmış iç mekân çalışmalarında Zeb-Revo ile yarım santimetrelik hassasiyetten daha iyi bir sonuç verdiği belirtilmektedir. Ürüne ait özellikler Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. GeoSLAM Zeb-Revo teknik özellikler tablosu

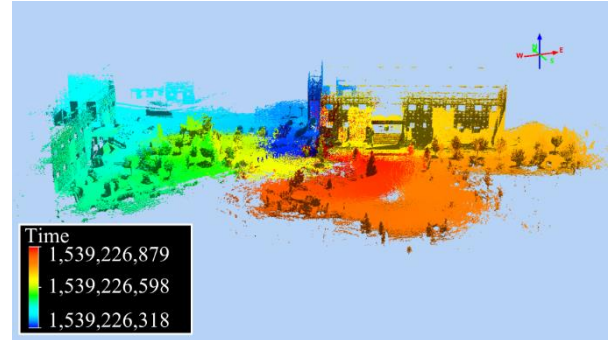
Maksimum mesafe	30m
Veri toplama hızı	43200 nokta/saniye
Çözünürlük	0.625° yatay
	1.8° düşey
Lazer güvenlik sınıfı	1. sınıf
Lazer dalga boyu	905nm
Tarayıcı dönme hızı	0.5 Hz
Toplam sistem ağırlığı	4.1 kg
Bağıl doğruluk kriteri	2-3 cm
Mutlak doğruluk	3-30 cm

2.2. Arazi Ölçmeleri

Çalışma alanı, Türkiye'nin kuzey doğusunda yer alan Artvin ili Artvin Çoruh Üniversitesi Seyitler yerleşkesinde test amaçlı tarama olarak seçilmiştir. Bu ölçmenin yapılma amacı ise, Zeb-Revo cihazının performansını ve kapasitesinin tespit edilmesidir.

Saha içerisinde yeşil alan, bina, araç ve yürüyen insanlar bulunmaktadır. Nokta bulutlarının ayrıntılı ve yeterlilikleri ölçme hızı yani yürüme hızına bağlıdır. SLAM teknolojisi uygulaması dolayısıyla hareketsiz objelerin koordinatlandırılması hatasız olmaktadır. Hareketli objelerin (yürüyen insan vb.) nokta bulutlarında SLAM algoritmasının yapısı gereği oldukça gürültülü tespit edildiği ortaya koymuştur.

Test alanı içinde toplam 561 sn (9.35 dk)'lik ölçme yapılmıştır. Elde edilen nokta sayısı ise 7,686,292'dir. Tarama alanı 11868.75 m² ve yoğunluk ise 647.607 nokta/m² olarak elde edilmiştir (Şekil 1).



Şekil 1. Zeb-Revo ile elde edilen nokta bulutları, (toplam ölçü süresi 9.35 dk)

2.3. Veri İşleme

Bu bölümde, nokta bulutları koordinatlandırma, sınıflandırma ve çizim işlemlerine yer verilmiştir. Bunun için öncelikle nokta bulutlarının koordinatlandırılması/konumlandırılması (georeferencing) yapılmıştır.

Koordinatlandırma işlemi için insansız hava aracı (İHA) nokta bulutlarından yararlanılmıştır. İteratif en yakın nokta (ICP) algoritması (Besl, 1992) ile daha önce koordinatlandırılmış İHA nokta bulutlarına göre ICP algoritması yardımıyla öteleme

ve dönüklük matrisleri elde edilmiş, bütün Zeb-Revo nokta bulutlarına uygulanmıştır. Bu işlem için en az 3 nokta tespit edilerek nokta bulutları yaklaşık olarak birbirine yaklaştırılmalıdır. Aksi takdirde ICP işlemi başarısız olacaktır.

Diğer veri işleme adımı ise sınıflandırma işlemidir. Bu işlem için Bez Simülasyon Filtreleme (CSF) algoritması uygulanmıştır (Zhang vd., 2016). Bezin fiziksel hareketlerine dayalı bu filtreleme, hava LiDAR'ı, yersel lazer tarama ve İHA verilerine uygun olduğu gibi Zeb-Revo verilerinin sınıflandırılmasında da pratik ve etkilidir. Detaylı sınıflandırma işlemi için yer üzeri noktaların özelliklerine göre veya manuel olarak sınıflandırmalar yapılabilmektedir.

Sınıflandırma işlemi sonrasında sayısal arazi modeli ve eş yükseklik eğrileri topoğrafik haritalama amaçları için elde edilmiştir.

Gauss düzleştirme filtresi, gürültü azaltma ve fazla ayrıntıları kaldırma amaçlı kullanılmıştır. Filtre, aritmetik ortalama filtreye benzer, ancak 2 boyutlu Gauss dağılımının şeklini temsil eden farklı bir çekirdek kullanır ve aşağıdaki Denklem (1) ile ifade edilir.

$$\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \quad (1)$$

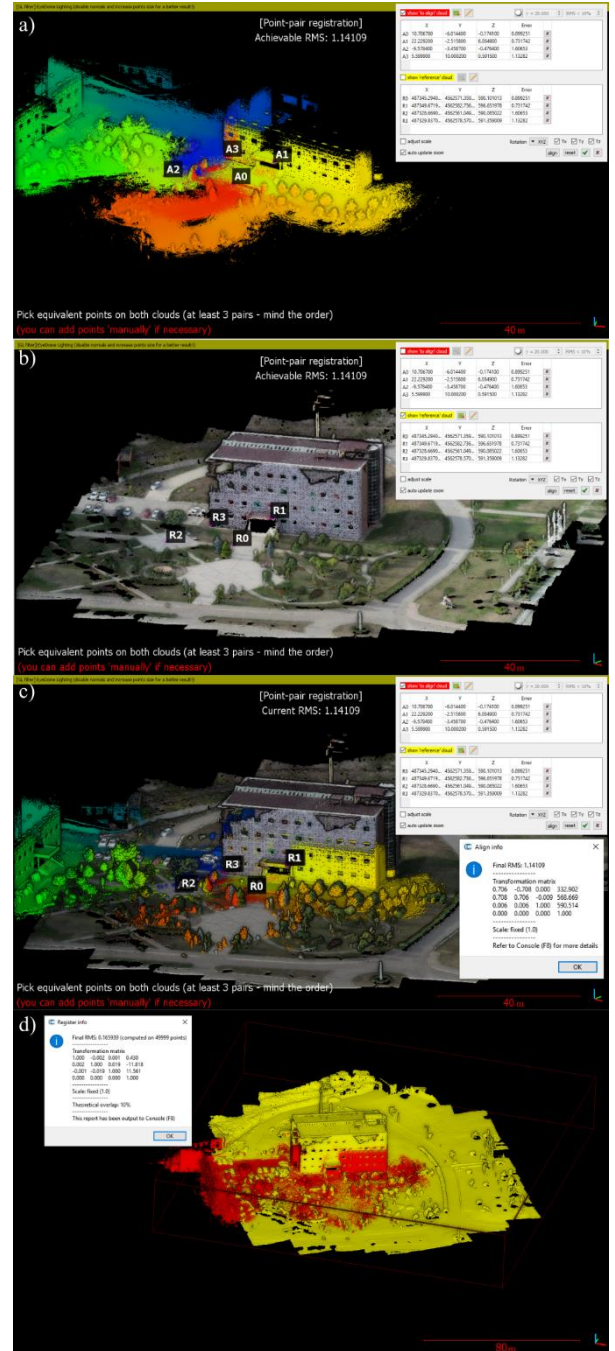
Burada σ çekirdek değerini, x ve y grid değerlerini temsil eder.

2B detay çizimleri CAD/GIS ile 3. Parti yazılım kullanılarak yapılmıştır. Bunun için sınıflandırılmış yer noktaları ve yer noktalarına olan mesafeleri belirlenmiş yer üzeri noktaların 2B çizimleri yapılmıştır. Bunun için Trimble Business Center (TBC) ticari yazılımı kullanılmıştır (TBC, 2019).

3. BULGULAR

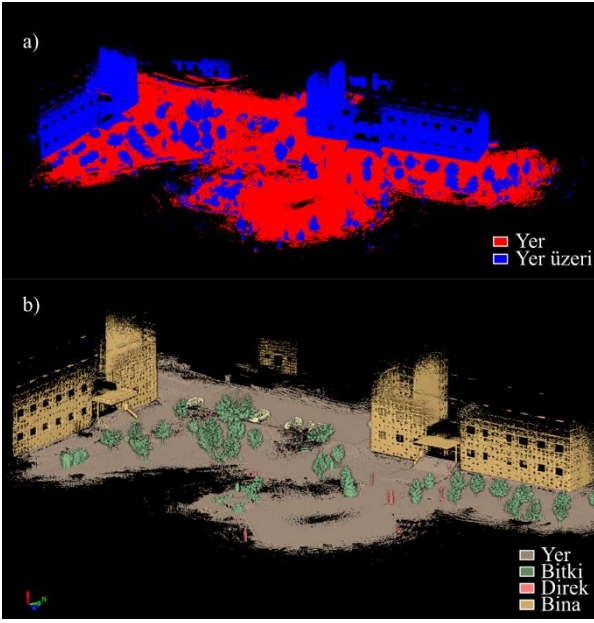
Çalışma alanında elde edilen nokta bulutları, ülke koordinat referans sistemine (TUREF/TM42 EPSG: 5258) bağlanması için daha önce çalışma alanına ait elde edilmiş İHA verileri kullanılarak dönüştürülmüştür. Dönüştürmenin kalitesi, farklı zamanlarda elde edilen nokta bulutları olduğu için zamansal ve mekânsal değişimlerden etkilenmiştir. Ancak yine de metre altında konumsal doğruluk değeri elde edilmiştir. Doğruluk değerlerinin artırılması için ölçmelerin eş zamanlı yapılması daha yüksek doğruluk sağlayacaktır. ICP parametrelerinin hesaplanması için ön işleme ve noktaların birbirine yakınsaması için 4 keskin nokta her iki nokta bulutunda işaretlenmiş (Şekil 2a) ve sonuç olarak karesel ortalama hata değeri 1.14 m olarak elde edilmiştir (Şekil 2b). Yakınlaştırma işlemi sonrasında her iki nokta bulutu aynı koordinat sisteminde tanımlanmıştır (Şekil 2c).

ICP uygulamasında, 50000 nokta örneklem alınarak 0.16 m karesel ortalama hata değeri elde edilmiştir (Şekil 2d).



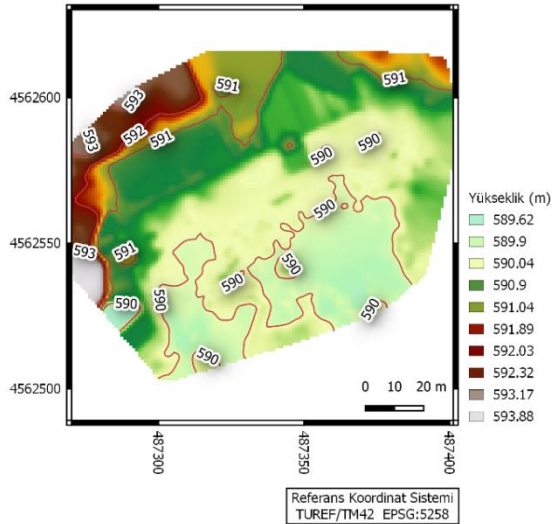
Şekil 2. Koordinatlandırma (Georeferencing) işleminin ICP ile yapılması, a) Zeb-Revo nokta bulutları, b) RGB İHA nokta bulutları c)yaklaşık öteleme işlemi, d) ICP işlemi.

ICP birleştirme işleminde 50000 temel referans eşlenik nokta üzerinden eşleştirme işlemi yapılmaktadır. Nokta bulutları eşlenik nokta eşleştirmeleri hareketli nesnelerin varlığında karesel ortalama hata değerinin büyümesine neden olmaktadır. Bu problemin çözümü için ölçmelerin eş zamanlı veya yapay hedeflerle indirekt koordinatlandırma yöntemiyle en az dört nokta kullanarak benzerlik dönüşümü ile yapılabilir. Yapılan bu çalışmada ise elde edilen mutlak konumsal doğruluk yeterli görülmüştür.



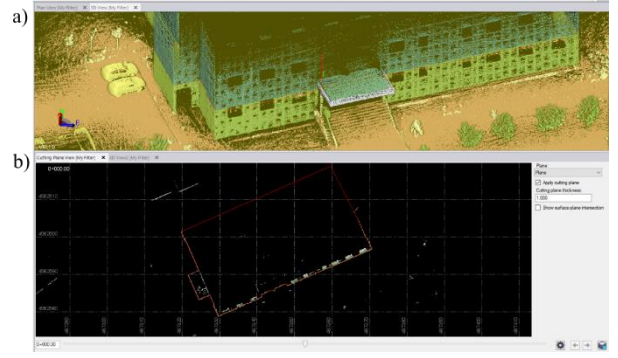
Şekil 3. Sınıflandırma sonucu elde edilen nokta bulutları, a) CSF uygulaması, yer ve yer üzeri noktaların tespiti, b) TBC sınıflandırma sonucu yer ve yer üzeri noktaların sınıflandırılması.

CSF sınıflandırma işlemi nokta bulutlarına uygulanmış ve etkili sonuçlar elde edilmiştir. Nokta bulutları yer ve yer üzeri olarak sınıflandırılmıştır (Şekil 3a). Yer üzeri noktaların detaylı sınıflandırılması ise TBC yazılımı Point cloud modülü ile yapılmış ve 3 farklı ayrı küme elde edilmiştir (Şekil 3b). Sınıflandırılmış zemini temsil eden yer noktalarından sayısal arazi modeli üretilmiştir (Şekil 4).



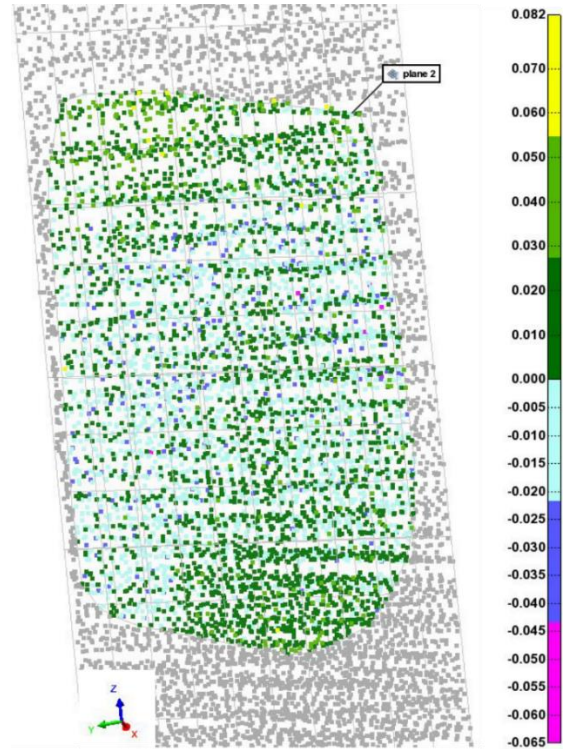
Şekil 4. Sınıflandırılmış yer noktaları ile sayısal arazi modeli.

Yer ve yer üzeri nokta bulutlarında yer alan detayların 2B çizimi de yine TBC yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiş ve ilgili detaylar çizilmiştir (Şekil 5).



Şekil 5. Sınıflandırılmış nokta bulutları üzerinden 2B detayların çizimi, a) nokta bulutları, b) nokta bulutları üzerinden 2B çizim.

Son olarak, Zeb-Revo cihazı ile elde edilen noktaların yüzeyi temsil derecesi ve doğruluk değerlerinin test edilmesi için bina yüzeyine ait en küçük kareler kestirimi ile düzlem uydurulmuş ve uydurulan düzlem sonucu karesel ortalama hata değerinin 0.009 m olduğu tespit edilerek ampirik değerlerle uyum içinde olduğu doğrulanmıştır (Şekil 6).



Şekil 6. En küçük kareler kestirimiyle düzlem uydurma işlemi ve düzlemden sapma değerlerinin görselleştirilmesi (sapma değerleri metre birimindedir).

Düzlem uydurması yapılan bina yüzeyine ait sapma değerleri Şekil 6'da gösterilmiştir. En yüksek sapma değeri 8 cm dolaylarında ve yerden 6 m yukarıda olduğu tespit edilmiştir. Nokta bulutundaki sapma yoğunluk dağılımlarının ± 3 cm dolaylarında olduğu görülmüştür. Bu da yine GeoSLAM tarafından deklare edilen doğruluk kriterleriyle uyum içindedir.

4. SONUÇLAR

Bu makalede, Zeb-Revo el-tipi LiDAR sistemi, haritalama amacıyla dış mekân koşullarında test edilmiştir. Dış mekânda, tarayıcının kapsama alanı maksimum 20 m (etkili mesafe 15 m) olmuştur. 6 m'den kısa mesafeden düzlemsel yüzey oluşturulmuş ve karesel ortalama hata değerine göre noktadaki sapmanın 8 cm'yi aşmadığı belirlenmiştir. Düzlem oluşturmadaki standart sapma değeri ise 9 mm olarak elde edilmiştir. Nokta bulutu üzerinden düzlem veya çizgi çıkarım işlemleri için yeterli doğruluk kriterlerini sağlamaktadır.

Sonuçlar, el-tipi LiDAR Zeb-Revo GeoSLAM ile haritalama performansının diğer sistemler ile karşılaştırılabilir olduğu, herhangi bir nokta bulutu ile senkronizasyon sağlanarak yeniden konumlandırmanın yapılabilirliğini göstermiştir. Endirekt koordinatlandırma yöntemleriyle mutlak konum doğrulukları artırılabilir. Ayrıca, bilinen sınıflandırma ve filtreleme yöntemlerinin güvenilir kümeler oluştuğu, sınıflandırma sonrasında ihtiyaca yönelik topoğrafik ve 2B harita üretimlerinin standartları karşıladığı görülmüştür.

BİLGİLENDİRME/TEŞEKKÜR

Makalede kullanılan Zeb-Revo GeoSLAM cihazının temini ve verilerinin işlenmesindeki katkılarından dolayı Geomatics Group Ltd. ve çalışanlarına teşekkürlerimi sunarım.

KAYNAKÇA

Besl, P. J., McKay, N. D. . (1992). A method for registration of 3-D shapes. *IEEE Transactions Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 14(2), 239-256.

Chen, S. L., Liu, H. Y., Feng, Z. K., Shen, C. Y., & Chen, P. P. (2019). Applicability of personal laser scanning in forestry inventory. *Plos One*, 14(2). Retrieved from <Go to ISI>://WOS:000459806400017

Dewez, T. J. B., Yart, S., Thuon, Y., Pannet, P., & Plat, E. (2017). Towards cavity-collapse hazard maps with Zeb-Revo handheld laser scanner point clouds. *The Photogrammetric Record*, 32(160), 354-376. doi:10.1111/phor.12223

Duran, Z., Muhammed Enes, A., & Çelîk, M. F. (2017). Yersel Fotogrametrik Yöntem ile Yersel Lazer Taramanın Karşılaştırılması ve Doğruluk Analizi. *Harita Dergisi, Temmuz*(158).

Geo-SLAM. (2019). Zeb-Revo Retrieved from <http://geoslam.com/hardware-products/zeb-revo/>

James, M. R., & Quinton, J. N. (2014). Ultra-rapid topographic surveying for complex environments: the hand-held mobile laser scanner (HMLS). *Earth Surface Processes and Landforms*, 39(1), 138-142. doi:10.1002/esp.3489

Laguella, S., Dorado, I., Gesto, M., Arias, P., Gonzalez-Aguilera, D., & Lorenzo, H. (2018). Behavior Analysis of Novel Wearable Indoor Mapping System Based on 3D-SLAM. *Sensors (Basel)*, 18(3). doi:10.3390/s18030766

Nocerino, E., Menna, F., Remondino, F., Toschi, I., & Rodriguez-Gonzalvez, P. (2017). Investigation of indoor and outdoor performance of two portable mobile mapping systems. *Videometrics, Range Imaging, and Applications Xiv*, 10332. doi:10.1117/12.2270761

Quartermaine, J. (2018). Ancient and modern. *Building Surveying Journal*, 36-37.

Sammartano, G., & Spanò, A. (2018). Point clouds by SLAM-based mobile mapping systems: accuracy and geometric content validation in multisensor survey and stand-alone acquisition. *Applied Geomatics*. doi:10.1007/s12518-018-0221-7

TBC. (2019). Geospatial and Point Cloud Classification Module. Retrieved from <https://geospatial.trimble.com/products-and-solutions/trimble-business-center>

Vatandaşlar, C., & Zeybek, M. (2020). Application of handheld laser scanning technology for forest inventory purposes in the NE Turkey. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*. doi:10.3906/tar-1903-40

Zeybek, M. (2017). *Yüksek Çözünürlüklü Topoğrafik Veriler Yardımıyla Heyelanların İzlenmesi* (Doktora). Selçuk Üniversitesi, Konya. (10165841)

Zeybek, M. (2018). *Estimation Of Powerline Route From Airborne Lidar*. Paper presented at the International Conference On Engineering Technologies, Konya/Turkey.

Zeybek, M., & Şanlıoğlu, İ. (2016). *Bare-ground surface extraction from Fused UAV images and Terrestrial laser scanner*. Paper presented at the 3rd Workshop SIG on Forestry/YSDOF, Krakow, Poland.

Zeybek, M., & Şanlıoğlu, İ. (2018). Landslide Monitoring and Assessment for Highway Retainingwall: The Case Study of Taşkent(Turkey) Landslide. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-3/W4, 603-608. doi:10.5194/isprs-archives-xlii-3-w4-603-2018

Zeybek, M., Şanlıoğlu, İ., & Genç, A. (2015). Yüksek Çözünürlüklü Yersel Lazer Tarama Verilerinin Filtrelenmesi ve Filtrelemelerin Heyelan İzlemeye Etkisi. *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, 1(1-2), 11-20.

Zhang, W. M., Qi, J. B., Wan, P., Wang, H. T., Xie, D. H., Wang, X. Y., & Yan, G. J. (2016). An Easy-to-Use Airborne LiDAR Data Filtering Method Based on Cloth Simulation. *Remote Sensing*, 8(6), 501. doi:10.3390/rs8060501