



Investigation of the filtering methods on 3D models using terrestrial laser scanning data

Melis Uzar*^{ID}, Nursu Tunalıoğlu^{ID}, Duygu Arıcan^{ID}, Tümay Arda^{ID}

Department of Geomatic Engineering, Yıldız Technical University, İstanbul, 34220, Turkey

Highlights:

- Processing the point cloud using terrestrial laser scanning
- Noise reduction on point cloud and smoothing
- Deviation analysis

Keywords:

- Terrestrial Laser Scanning
- Architectural Inventory
- Filtering Methods
- Point Cloud
- 3D Modeling

Article Info:

Research Article
Received: 31.01.2018
Accepted: 11.12.2018

DOI:

10.17341/gazimmfd.571546

Correspondence:

Author: Melis Uzar
e-mail: auzar@yildiz.edu.tr
phone: +90 212 383 5276

Graphical/Tabular Abstract

Laser scanning measurement system has been widely used in the documentation of cultural heritage with the use of state-of-art-technology in this field. Laser scanning is a technology that can collect three-dimensional location data quickly, reliable and detailed for many different applications. In this study, modeling facilities have been exposed with terrestrial laser scanner technology to make three dimensional inventories of historic artefacts and the filtering effects on the models have been investigated. Thus, coloring point cloud, registration, filtering, surface modeling, and deviation analysis have been performed on data sets, respectively. Noise reduction and smoothing filters have been used to filter data. Comparisons of the obtained models have been utilized by deviation analysis. Accordingly, the effects of filtering methods on the creation of historical inventories have been examined.



Figure A. Flowchart of the study

Purpose: The aim of this study is to obtain improved models using terrestrial laser scanner data for creations of three dimensional inventories of historical artifacts.

Theory and Methods:

Within the scope of this study, coloring point cloud, registration, filtering, surface modeling, and deviation analysis have been performed on data sets, respectively. Noise reduction and smoothing filters have been used to filter data. Comparisons of the obtained models have been utilized by deviation analysis.

Results:

As a result of the deviation analysis, when the filtered models and non-filtered models compared in respectively Tavra Creek Church and Stone Building, the results show 10% and 5% improvement in removing of spikes, 24% and 14% improvement in overlapped edges, 39% and 33% improvement in removing of the small holes. However, a 38% improvement in self-intersecting triangles has achieved for the Tavra Creek Church, 3% deterioration has been occurred for Stone building model.

Conclusion:

The noise reduction and smoothing filters can be applied successfully in different architectural modeling studies despite using different terrestrial laser scanners. In addition to architectural modeling studies, it is suggested that the noise reduction and smoothing filters can be applied effectively in other terrestrial laser scanning studies.



Yersel lazer tarama verisi ile elde edilen 3B modellerde filtreleme etkisinin araştırılması

Melis Uzar*^{ID}, Nursu Tunalioglu^{ID}, Duygu Arıcan^{ID}, Tümay Arda^{ID}

Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, İstanbul, 34220, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Yersel lazer tarama verileri ile nokta bulutu işleme
- Nokta bulutu gürültü giderme ve yumuşatma
- Sapma analizi

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi
Geliş: 31.01.2018
Kabul: 11.12.2018

DOI:

10.17341/gazimmfd.571546

Anahtar Kelimeler:

Yersel lazer tarama,
mimari envanter,
filtreleme yöntemleri,
nokta bulutu,
3B modelleme

ÖZET

Tarihi eserlerin geçmişten geleceğe korunması ve aktarılması için yapılması gereken en önemli husus bu kültürel miraslara ait envanterlerin oluşturulmasıdır. Bu envanterler, yıpranmış eserlerin restorasyonlarının yapılabilmesi ve zamanla kaybolan eserlerin özneliklerinin elde edilen veriler ile tekrar yerlerine koyulabilmesi açısından oldukça önemlidir. Bu envanterlerin oluşturulması sırasında eserlerin dokümantasyonlarının, eserlere zarar verilmeden yapılması hassasiyet gerektiren bir husustur. Gelişen teknolojinin bu alanda kullanılması ile lazer tarama ölçme sistemi, kültürel mirasın dokümantasyonunda yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Lazer tarama, birçok farklı uygulama için üç boyutlu konum verisini hızlı, güvenilir ve detaylı bir şekilde toplayabilen bir teknolojidir. Lazer tarayıcılar, günümüzde özellikle fotogrametri ve uzaktan algılama çalışma alanlarında önemli bir araştırma konusudur. Bu çalışmada, tarihi yapıların üç boyutlu envanterinin oluşturulması için yersel lazer tarama teknolojisi ile modelleme çalışması yapılmıştır. Bu kapsamda, filtrelemenin modellere etkileri araştırılmıştır. Bu amaçla, farklı ölçme aletleriyle alınan yapılan iki ayrı veri seti kullanılmıştır. İlk veri seti Sivas Temeltepe'de bulunan Tavra Deresi Kilisesi'ne, ikinci veri seti ise Mersin'de bulunan Taş Bina'ya ait nokta bulutudur. Bu çalışma kapsamında veri setlerine sırasıyla renklendirme, birleştirme, filtreleme, yüzey modelleme ve sapma analizi yapılmıştır. Verilerin filtrelenmesi için gürültü giderme ve yumuşatma filtreleme yöntemleri kullanılmıştır. Elde edilen modellerin karşılaştırılması sapma analizi ile yapılmıştır. Buna göre, tarihi yapıların envanterlerinin oluşturulması çalışmalarında filtreleme işlemlerinin etkileri incelenmiştir.

Investigation of the filtering methods on 3D models using terrestrial laser scanning data

H I G H L I G H T S

- Processing the point cloud using terrestrial laser scanning
- Noise reduction on point cloud and smoothing
- Deviation analysis

Article Info

Research Article
Received: 31.01.2018
Accepted: 11.12.2018

DOI:

10.17341/gazimmfd.571546

Keywords:

Terrestrial Laser scanning,
architectural inventory,
filtering methods,
point cloud,
3D modeling

ABSTRACT

Making inventories of cultural heritages is the most important issue for protecting and transferring of these historical artefacts from past to the future. Creation of these inventories is quite crucial for restoration of worn artefacts and recovering artefacts, which have lost attributes over time, with collected data. During the creation of these inventories, documentation of these artefacts should be done without damaging them. Laser scanning measurement system has been widely used in the documentation of cultural heritage with the use of state-of-art-technology in this field. Laser scanning is a technology that can collect three-dimensional location data quickly, reliable and detailed for many different applications. Today, laser scanners are an important research topic in especially photogrammetry and remote sensing study areas. In this study, modeling facilities have been exposed with terrestrial laser scanner technology to make three dimensional inventories of historic artefacts. In this context, the filtering effects on the models have been investigated. For this purpose, two different datasets collected with different scanners has been used. The first dataset belongs to Church of Tavra Creek, which is located in Sivas Temeltepe. Second dataset is a point cloud which belongs to stone building in Mersin. Within the scope of this study, coloring point cloud, registration, filtering, surface modeling, and deviation analysis have been performed on data sets, respectively. Noise reduction and smoothing filters have been used to filter data. Comparisons of the obtained models have been utilized by deviation analysis. Accordingly, the effects of filtering methods on the creation of historical inventories have been examined.

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: auzar@yildiz.edu.tr, ntunali@yildiz.edu.tr, duyguaricann@gmail.com, tumay.ar.da@gmail.com /
Tel: +90 212 383 5276
1766

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Tarihi yapılar, kültürel mirasın nesilden nesile aktarımı için önemli bir bileşen olmakla birlikte, medeniyetlerin de sembolüdür. Bu eserlerin zamanla yıpranması, depremler, toprak kaymaları, atmosferik döngü ve sel gibi yıkıcı faktörlerin etkisi ile zarar görmesi durumunda restorasyonları için modellenmesi oldukça önemlidir [1]. Günümüzde kültürel mirasın korunmasında bilgi toplama ve sayısal dokümantasyon uygulamaları sürecin önemli bir parçasıdır [2]. Lazer tarama ya da LiDAR (Light Detection and Ranging) teknolojisi ile nokta bulutu olarak bilinen obje yüzeyinin topografyasına ait hızlı ve doğruluğu yüksek üç boyutlu veri elde edilmektedir. Bu özellikleri nedeniyle lazer tarama teknolojilerine son zamanlarda ilgi oldukça artmıştır. Büyük ölçekli modelleme çalışmalarında otomatik ve etkili metotların geliştirilmesi ile binaların modellenmesi için lazer tarama yöntemi, yüksek doğruluklu 3 boyutlu verilerin toplanmasında maliyet ve zaman bakımından kazanç sağlamaktadır [3].

Kinect ve uçuş zamanı (Time of Flight-ToF) kameraları gibi düşük maliyetli sensörlerin hızlı gelişimi, nokta bulutu elde etmeyi kolaylaştırmaktadır [4-8]. Bununla birlikte, bu sensörlerle elde edilen nokta bulutu ve algılayıcıların sınırlamaları, edinim cihazının doğal gürültüsü, tarama alanındaki aydınlık veya yansıtıcı nitelikteki yüzey veya eserler nedeniyle kaçınılmaz olarak aşırı derecede gürültüye maruz kalmaktadır [9-12]. Bu nedenle, sonraki işlemler için uygun olan doğru nokta bulutlarını elde etmek için ham nokta bulutları üzerinde filtreleme işlemleri gerçekleştirilmektedir [13].

Diğer bir işlem olan kalibrasyon, başka bir deyişle, sistematik hataların düzeltilmesi, iyi bir model doğruluğu elde edebilmek için son derece önemlidir. Kalibrasyon işlemi, ideal olarak alet üreticisi tarafından yapılır ve veri edinimi sırasında uygulanır. Fakat bazen yerleşik kalibrasyonla düzgün bir şekilde ele alınamayan sistematik hatalar vardır [14]. Bu durumda ek kalibrasyon fonksiyonlarının belirlenmesi ve uygulanması gereklidir [15-17]. Kalibrasyon ile sistematik hataları ortadan kaldırmaya çalışırken, rastgele ölçüm hatalarının etkisini azaltmak için yumuşatma filtresi kullanılır. Yumuşatma filtresi nokta bulutuna [18] veya bir üçgen modele uygulanabilir. Filtreleme, zor ve önemli bir işlemdir. Çünkü filtrelenmiş verinin kalitesi modellenmenin üzerinde doğrudan etkiye sahiptir [19].

Can vd. [20], kültürel mirasın korunması ve gelecek nesillere güvenle aktarılması için mühendislik, mimarlık, sanat tarihi ve arkeoloji gibi bilim alanlarıyla yapılan disiplinler arası ortak çalışmaların önemli olduğunu vurgulamışlardır. Özellikle bu bağlamda mühendislik yapılarının fiziksel davranışları ve yapısal özelliklerinin çözülmesi ve bu sayede kültürel değerlerin korunması ve geleceğe devredilmesinin, 21. yüzyılın önemli mühendislik araştırma ve uygulama konularının başında geldiğini ifade etmişlerdir. Can vd.

[20]'nin bu çalışmasında tarihi yapılar için çözüm yolu olarak kullanılan sonlu elemanlar yöntemi hesabının, en önemli aşamasının sayısal modelleme olduğu belirtilmiştir. Can ve Ünay [21], tarihi yapıların zaman içerisinde aşınması veya doğal afetler sonucunda zarar görmesi sonucunda, eserlerin hasarlarının önlenmesi ve onarılması için sayısal modellerin önemini vurgulamış, çalışmalarında sayısal modellemenin temel prensipleri ve analizleri üzerinde durarak restorasyon çalışmalarında bu analizlerin anlaşılmasını kolaylaştırmayı hedeflemişlerdir. Baik [22], tarihi yapıların dokümantasyonu amacıyla manuel ve yarı otomatik modelleme ile elde edilen nokta bulutu yardımıyla Cidde'de bulunan Tarihi Nasif Evi'nin bina bilgi modelini tasarlamıştır. Lerma ve ark. [23], yersel lazer tarama ve yakın mesafe fotogrametrisi ile Paleolitik döneme ait olan Parpallo mağarasının üç boyutlu arkeolojik dokümantasyonunu oluşturmuştur. Bir başka çalışmada ise Ergün [24], yersel lazer tarama verisi ile bina içerisindeki modelleme uygulamalarında üç boyutlu obje filtrelemeleri için farklı bir yaklaşım izlemiştir. Nothegger ve Dorninger [25] 2009'da kültürel mirasın dokümantasyonu için yüksek çözünürlüklü yersel lazer tarayıcı nokta bulutunun filtrelenmesi için gürültü giderme ve yumuşatma filtrelerini farklı çözünürlükte iki veri setine uygulamıştır. Uygulama sonucunda filtrelenen modelleri gerçek modeller ile karşılaştırarak kavisli alanlarda deformasyon miktarının arttığına dikkat çekmiştir.

Bu çalışmada, tarihi yapıların envanterlerinin oluşturulması için yapılan modelleme çalışmalarında filtrelemenin etkisi incelenmiştir. Modelleme işlemi için Sivas'taki Tavra Deresi Kilisesi ve Mersin'deki Taş Bina'nın nokta bulutu verileri farklı lazer tarayıcılardan elde edilerek kullanılmıştır. Uygulama, iki veri setinde filtrelenmiş modellerin oluşturulması için sırasıyla; nokta bulutlarının renklendirilmesi, birleştirilmesi, filtreleme ve yüzey modelleme adımlarını kapsamaktadır. Filtresiz üretilen modeller için ise aynı işlem adımları filtreleme işlemi uygulanmadan izlenmiştir. Ardından sapma analizi yapılarak filtreli ve filtresiz modellerin karşılaştırılması yapılmıştır. Sapma analizi ile filtrelerin modele etkileri istatistiki olarak ortaya koyulurken, veri setlerinin farklı çözünürlükteki yersel lazer tarayıcılarla elde edilmesi ve farklı yöntemlerle birleştirilmesi ile de filtrelerin farklı özelliklerdeki veri setlerindeki etkinliği ortaya konulmuştur.

2. MATERYAL VE METOT (MATERIAL AND METHOD)

Bu çalışmada, yapım yılı ve yapı kullanım şekli farklı olan biri Mersin'deki Taş Bina diğeri de Sivas Temeltepe'de bulunan Tavra Deresi Kilisesi olmak üzere iki farklı mimari alan, uygulama bölgesi olarak seçilmiştir. Bu kapsamda Şekil 1'de konumları gösterilen Sivas'taki Tavra Deresi Kilisesi'nde ve Mersin'deki Taş Bina'da yersel lazer tarama yapılmış ve iki ayrı veri seti elde edilmiştir. Çalışmada kullanılan veri setlerinden ilki, Sivas Temeltepe'deki askeri kışla binasının içerisinde bulunan, Sivas'ta son kalan ve tahmini XIX. yüzyılın ikinci yarısında yapılan Ermeni

kilisesine aittir. Bu yapıya ait veri seti 2014 yılında Riegl LMS-Z390i marka yersel lazer tarayıcı ile elde edilmiştir. Nokta bulutu verisinin toplanması için 10 noktadan alım gerçekleştirilmiştir. Her tarama pozisyonu için tarayıcıya entegre olan sayısal bir kameradan görüntü alınmış ve elde edilen görüntüler ile renklendirme işlemi yapılmıştır. Kontrol noktalarına ait ölçümler Sokkia marka Total Station (TS) ile yapılmıştır.

Kullanılan ikinci veri seti ise Mersin'deki taş binadır. Bu yapıya ait veri seti FARO FOCUS^{3D} 330X yersel lazer tarayıcı ile 2016 yılında 31 noktadan alım yapılarak elde edilmiştir. Tarayıcıya entegre olarak kalibre edilen fotoğraf makinesi ile çekilen fotoğraflar kullanılarak nokta bulutları renklendirilmiştir. Kullanılan yersel lazer tarayıcılara ait teknik özellikler Tablo 1'de görülmektedir.

Şekil 2'de çalışmada izlenen iş akışı sunulmuştur. Buna göre, her iki veri seti için de filtreleme prosedürü uygulanmadan ve sonrasında uygulanarak iki farklı model oluşturulmuştur.

2.1. Nokta Bulutunun Renklendirilmesi (Colouring Point Cloud)

Nokta bulutu verisinin renklendirilme işleminde iki veri seti için de yersel lazer tarayıcıya entegre olan sayısal kamera

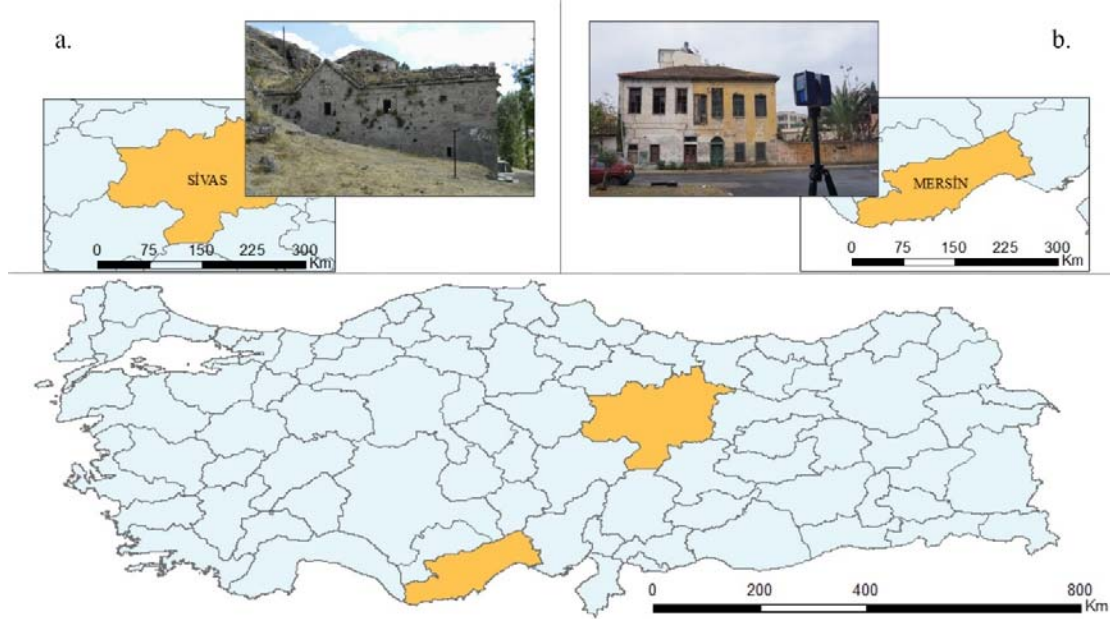
görüntüleri kullanılmıştır. Bindirmeli olarak çekilen fotoğraflar, fotoğraflardaki her pikselin RGB değerleri, o piksele karşılık gelen noktaya atanarak Şekil 3'te görüldüğü gibi renklendirilmiştir.

Bu işlem, Sivas Tavra Deresi Kilisesi için 10 farklı tarama pozisyonu ve Mersin Taş Bina için 31 farklı tarama pozisyonu için tekrarlanmıştır.

2.2. Nokta Bulutunun Birleştirilmesi (Point Cloud Registration)

Şekil 2'de verilen iş akış diyagramında belirtildiği gibi renklendirme işleminin ardından birleştirme işlemi gerçekleştirilmiştir. İlk veri seti olan Tavra Deresi Kilisesi'ne ait nokta bulutlarının birleştirilmesinde bağımsız model yöntemindeki tek adımlı yaklaşım uygulanmıştır. İkinci çalışma bölgesinde bulunan Mersin'deki taş binaya ait nokta verilerinin birleştirilmesinde iteratif en yakın nokta yöntemi kullanılmıştır.

Bağımsız model yönteminde iki adımlı yaklaşım ve tek adımlı yaklaşım olmak üzere iki yaklaşım bulunmaktadır. İki adımlı yaklaşımda; tarama pozisyonu koordinat sistemi, proje koordinat sistemi ve jeodezik koordinat sistemi olmak üzere üç farklı koordinat sistemi kullanılmaktadır. İlk aşamada, tarama pozisyonlarından bir tanesi referans olarak

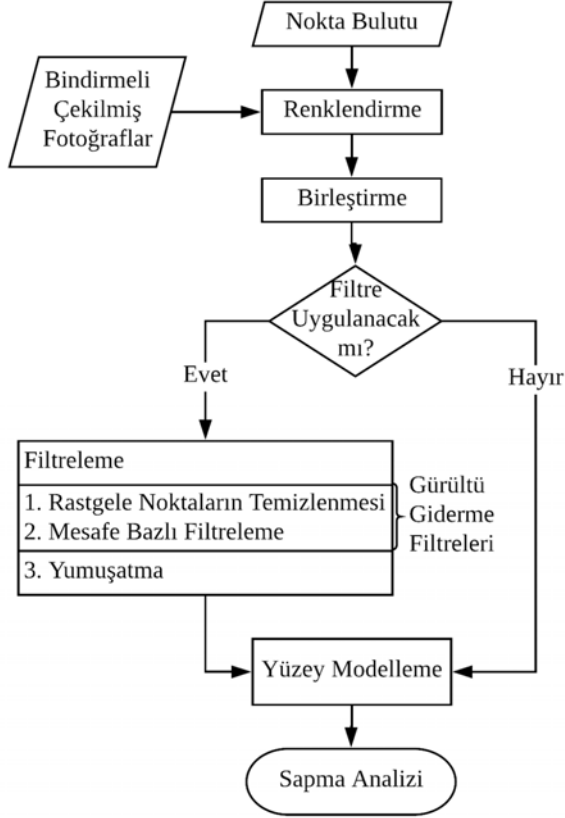


Şekil 1. Çalışma alanı a) Tavra Deresi Kilisesi Sivas b) Taş Bina Mersin
(Study area (a) Tavra Creek Church Sivas (b) Stone building Mersin.)

Tablo 1. Yersel lazer tarayıcıların teknik özellikleri (Technical specifications of terrestrial laser scanners)

Özellikler	Riegl LMS-Z390i	Faro Focus ^{3D} 330X
Lazer Sınıfı	1H	1
Minimum Ölçüm Mesafesi	1 m	0,6 m
Maksimum Ölçüm Mesafesi	400 m	330 m
Mesafe Doğruluğu	± 2 mm	± 2 mm
Ölçüm Hızı	11.000 nokta/s	976.000 nokta/s

seçilerek, bu seçilen pozisyona bağlanan diğer pozisyonlarla proje koordinat sistemi oluşturulur. İkinci aşamada ise kontrol noktalarına ait koordinatlar kullanılarak proje koordinat sistemi, jeodezik koordinat sistemine dönüştürülür. İki adımlı yaklaşım Şekil 4'te verilmiştir.



Şekil 2. İş akışı (Workflow)

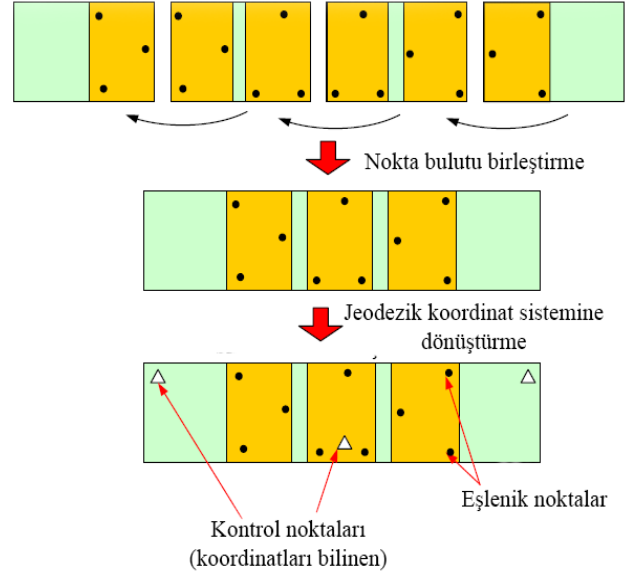
Tek adımlı yaklaşımda ise taramalar arasında bindirmeye ihtiyaç duyulmamaktadır. Her bir tarama Şekil 5'te gösterildiği gibi diğerlerinden bağımsız olarak jeodezik koordinatlandırılmaktadır.

Bu yaklaşımda 3 boyutlu benzerlik dönüşümü kullanılır. Dönüştürülen noktaların koordinatları, aşağıda verilen eşitlik (Eş. 1) ile hesaplanmaktadır;

$$X_e = \Delta X_{ie} + R_{ie} X_i \quad (1)$$



Şekil 3. Bindirmeli çekilmiş fotoğraflar ile renklendirilmiş taramalar a) Tavra Deresi Kilisesi b) Taş Bina (Coloured scans using overlapped photographs (a) Tavra Creek Church (b) Stone Building)



Şekil 4. İki adımlı yaklaşım (Two-step approach) [26]

Burada, $X_i = [X_i \ Y_i \ Z_i]^T$ bir noktanın tarama koordinat sistemindeki koordinatları; $X_e = [X \ Y \ Z]^T$ bir noktanın jeodezik koordinat sistemindeki koordinatları; ΔX_{ie} tarama koordinat sisteminden jeodezik koordinat sistemine öteleme; R_{ie} tarama koordinat sisteminden jeodezik koordinat sistemine olan dönüklük matrisleridir. Dönüklük matrisleri x, y ve z koordinatları arasındaki ω , φ , κ dönüklük açılarından oluşmaktadır (Eş. 2).

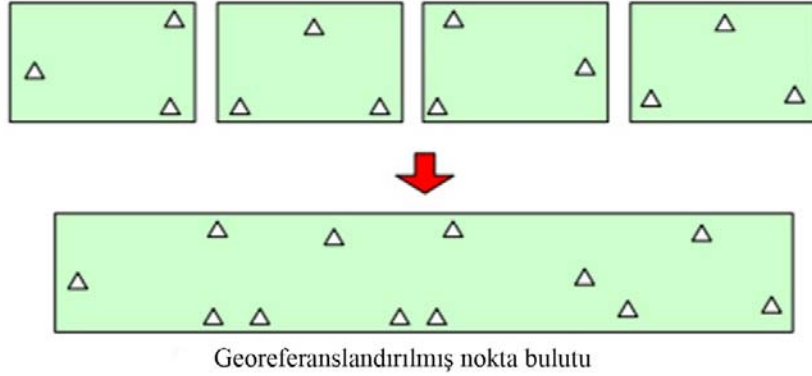
$$R_{ie} = R_1(\omega) \cdot R_2(\varphi) \cdot R_3(\kappa) \quad (2)$$

Eş. 2'de belirtilen 3 eksendeki dönüklük matrisleri Eş. 3, Eş. 4 ve Eş. 5'te verildiği gibidir.

$$R_1(\omega) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega & \sin \omega \\ 0 & -\sin \omega & \cos \omega \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$R_2(\varphi) = \begin{bmatrix} \cos \varphi & 0 & -\sin \varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \varphi & 0 & \cos \varphi \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$R_3(\kappa) = \begin{bmatrix} \cos \kappa & \sin \kappa & 0 \\ -\sin \kappa & \cos \kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$



Şekil 5. Tek adımlı yaklaşım (One-step approach) [26]

Buradaki;

$R_1(\omega)$: x yönündeki dönüklük matrisi

$R_2(\varphi)$: y yönündeki dönüklük matrisi

$R_3(\kappa)$: z yönündeki dönüklük matrisi olarak ifade edilmektedir [26].

Bu uygulamada, birleştirme için her tarama noktasında minimum 3 kontrol noktasına ihtiyaç duyulmuştur. Kontrol noktalarına ait ölçümler TS ile yapılmıştır. TS, koordinatı bilinen bir poligon noktası üzerine kurularak koordinatı bilinen başka bir poligon noktasına bağlanmış, daha sonrasında tüm kontrol noktalarının ölçümü yapılarak konumları hesaplanmıştır. Tarama pozisyonlarının bağlanmasında kullanılan kontrol nokta sayısı ve bu noktalara ait hesaplanan standart sapma değerleri Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Tarama pozisyonlarına ait kontrol nokta sayısı ve standart sapmaları

(Number of control points and standard deviations which belong to the scanning positions)

Pozisyon adı	Kullanılan kontrol nokta sayısı	Birleştirmenin standart sapması (mm)
Pos01	10	0,8
Pos02	7	0,8
Pos03	5	1,0
Pos04	4	1,2
Pos05	4	1,1
Pos06	5	0,8
Pos07	5	0,3
Pos08	3	0,9
Pos09	8	0,7
Pos10	4	1,4

İteratif en yakın nokta yönteminde aşağıda verilen koşula dayalı olarak; $\vec{q}R = [q_0 \ q_1 \ q_2 \ q_3]^t$, $q_0 \geq 0$ ve $q_0^2 + q_1^2 + q_2^2 + q_3^2 = 1$ eşitliklerini sağlayan birim vektördür.

Bu birim vektör kullanılarak rotasyon matrisi oluşturulmaktadır (Eş. 6).

$$R = \begin{bmatrix} q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 & 2(q_1q_2 - q_0q_3) & 2(q_1q_3 + q_0q_2) \\ 2(q_1q_2 + q_0q_3) & q_0^2 + q_2^2 - q_1^2 - q_3^2 & 2(q_2q_3 - q_0q_1) \\ 2(q_1q_3 - q_0q_2) & 2(q_2q_3 + q_0q_1) & q_0^2 + q_3^2 - q_1^2 - q_2^2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

Dönüşüm vektörü ve birleştirme durum vektörleri Eş. 7 ve Eş. 8’de tanımlanmaktadır.

$$\vec{q}\tau = [q_4 \ q_5 \ q_6]^t \quad (7)$$

$$\vec{q} = [\vec{q}R | \vec{q}\tau]^t \quad (8)$$

Ölçülen nokta veri seti $P = \{\vec{p}_i\}$ ve model nokta veri seti $X = \{\vec{x}_i\}$ olmak üzere her \vec{p}_i noktası için bir \vec{x}_i noktası bulunmaktadır.

Veri setlerinin ağırlık merkezleri Eş. 9 ve Eş. 10 ile hesaplanmaktadır.

$$\vec{\mu}_p = \frac{1}{N_p} \sum_{i=1}^{N_p} \vec{p}_i \quad (9)$$

$$\vec{\mu}_x = \frac{1}{N_x} \sum_{i=1}^{N_x} \vec{x}_i \quad (10)$$

Çapraz kovaryans matrisi aşağıda verilen Eş. 11’e göre bulunmaktadır.

$$\Sigma_{px} = \frac{1}{N_p} \sum_{i=1}^{N_p} [\vec{p}_i \vec{x}_i^t] - \vec{\mu}_p \vec{\mu}_x^t \quad (11)$$

$A_{ij} = (\Sigma_{px} - \Sigma_{px}^T)_{ij}$ Anti-simetrik matrisinin döngüsel bileşenleri sütun vektörünü oluşturmaktadır (Eş. 12).

$$\Delta = [A_{23} \ A_{31} \ A_{12}]^T \quad (12)$$

Sütun vektörü simetrik 4x4 boyutundaki $Q(\Sigma_{px})$ matrisini oluşturmakta kullanılmaktadır (Eş. 13).

$$Q(\Sigma_{px}) = \begin{bmatrix} tr(\Sigma_{px}) & & & \Delta^T \\ & \Delta & & \\ & & \Sigma_{px} + \Sigma_{px}^T - tr(\Sigma_{px})\mathbf{I}_3 & \\ & & & \end{bmatrix} \quad (13)$$

$Q(\Sigma_{px})$ matrisinin en büyük öz-değerine karşılık gelen öz-vektör rotasyon için

en uygun olan seçilerek, en uygun dönüşüm vektörü hesaplanmaktadır (Eş. 14).

$$\vec{q}\tau = \vec{\mu}_x - \mathbf{R}(\vec{q}R) \vec{\mu}_p \quad (14)$$

İterasyonun sonlandırılması için dönüşümün standart sapmasının hata sınırının içinde kalması gerekmektedir. En küçük kareler dengelemesine dayanan denklem Eş. 15’de verilmektedir.

$$(\vec{q}, d_{ms}) = Q(P, X) \quad (15)$$

Burada d_{ms} hata sınırını ifade etmektedir. Her iki işlemde iterasyon sayısı 30 alınmış ve birleştirme sağlanmıştır. Tablo 3’te İteratif en yakın nokta yöntemine ait sözde kod verilmiştir.

2.3. Filtreleme (Filtering)

Birleştirilen her iki nokta bulutuna, gürültü giderme amacıyla sırasıyla rastgele noktaların temizlenmesi ve mesafe bazlı filtreleme uygulanmıştır. Rastgele dağılmış noktaların temizlenmesi, taranan veri içerisinde tek tük dağılmış, istenmeyen noktaların silinmesi işlemini kapsamaktadır. Bu yaklaşımda, noktaların filtrelenmesi için kullanılacak karşılaştırma kriteri için grid alanı oluşturulmaktadır. Buna göre, karşılaştırma için kullanılacak alanın boyutu, grid boyutu parametresi ile piksel bazında girilmiştir. Her nokta için oluşturulan bu alanın içerisinde kalan noktaların, tarayıcıya olan uzaklıkları ile seçilen noktanın tarayıcıya olan uzaklığı karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma sonucunda iki uzaklık arasındaki fark ve girilen mesafe eşik değerinden az ise nokta sayıma dahil edilmiştir. Sayılan noktalar karşılaştırma alanındaki noktalara oranlandığında paylaşırma eşik değerinden küçük ise silinerek filtreleme işlemi uygulanmıştır. Bu çalışmada rastgele noktaların temizlenmesinde kullanılan parametreler Tablo 4’te verilmiştir. Parametre değerleri belirlenirken iki veri setinde de model üzerindeki noktalardan kayıp olmaması ve gürültülerin temizlenebilir olması göz önünde bulundurulmuştur. Grid boyutu 3 piksel seçilerek, 3 piksellik bir alanda hesaplama yapılmıştır. Mesafe eşik değeri olarak 0,01 m ve 0,05 m arasındaki değerler 0,01 m’lik farklarla

uygulanmış, model üzerindeki noktalarda kayıp olmadan en iyi sonuç 0,02 m ile alınmıştır. Paylaşırma eşik değeri ise %50 olarak seçilerek taranan noktaların yarısı mesafe eşik değeri ile belirlenen 0,02 m’nin altında ise tarama noktalarının kalması, diğer durumda ise silinmesi sağlanmıştır.

Tablo 4. Rastgele noktaların filtrelenmesinde kullanılan parametre değerleri
(Parameters for stray filtering)

	Parametre	Değer
Rastgele Noktalar	Grid Boyutu	3 px
	Mesafe Eşik Değeri	0,02 m
	Paylaşırma Eşik Değeri	50,0 %

Mesafe bazlı filtreleme, tarayıcıdan kullanıcı tarafından girilen değer kadar mesafedeki noktaların silinmesi sağlar. Çalışmanın bu aşamasında kullanılan parametreler Tablo 5’te verilmiştir. Minimum mesafe olarak 0 m, maksimum mesafe ise modellenecek objenin tarayıcıya en uzak noktasının içerisinde kaldığı nokta bulutu üzerinden tespit edilerek 50 m olarak belirlenmiştir. Bu şekilde tarayıcıdan 50 m uzaktaki noktaların silinmesi sağlanmıştır.

Tablo 5. Mesafe bazlı filtrelemede kullanılan parametre değerleri
(Parameters for distance based filtering)

	Parametre	Değer
Mesafe Bazlı	Min. Mesafe	0 m
	Maks. Mesafe	50 m

Gürültülerin giderilmesi için uygulanan filtreleme işlemlerinin ardından ortalama yumuşatma filtresi uygulanmıştır. Bu adımda, grid boyutu kullanıcı tarafından piksel bazında girilerek pikselleri çevreleyen alanın oluşturulması sağlanmıştır. Aynı zamanda, girilen mesafe eşik değeri sınırının içerisinde olan noktalar ile ortalama ölçüm değeri hesaplanmıştır. Buna göre noktanın ölçülen değeri, ortalama ölçüm değeri ile değiştirilmiştir. Bu işlemde nokta sayısı azalmamakta, sadece yerleri değişmektedir. Bu adımda kullanılan parametre değerleri Tablo 6’da verilmiştir. Grid boyutu 3 piksel olarak belirlenerek 3

Tablo 3. İteratif en yakın nokta yöntemine ait sözde kod (Pseudo-code of Iterative closest point method)

Algoritma İteratif En Yakın Nokta Yöntemi		
1	PC1 = readPointCloud (“NoktaBulut1”);	//Nokta bulutunu dosyadan oku
2	PC2 = readPointCloud (“NoktaBulut2”);	
3	i = 0 ;	//İterasyon sayısı
4	R[0] = donusumMatrisi;	//Rotasyon Matrisi tanımla
5	While (i < maxIterasyon OR esikDeger < esikDegerMin)	
6	-İki nokta bulutundaki karşılıklı noktaları dönüşüm matrisine göre hesapla;	
78	-Dönüşüm matrisini amaç fonksiyonunu minimize edecek şekilde güncelle;	
8	If (esikDeger < eskiDegerMin)	
9	Break;	
10	End-If	
11	i++;	
12	End-While	

piksellik grid alanı oluşturulmuş, mesafe eşik değeri ise 0,01 m ve 0,05 m arasındaki değerler 0,01 m farklar ile uygulanarak en uygun değer 0,02 m olduğu tespit edilmiştir. Bu değer altına düşüldüğünde bina köşesi gibi keskin alanlarda da yumuşatma olduğu görülmüş, bu değer üzerine çıkıldığında ise obje yüzeyi pürüzlü ve noktaların dağılımından kaynaklı üçgen model üzerinde hataların çoğaldığı tespit edilmiştir. Filtreli ve filtresiz nokta bulutları Şekil 6'da görülmektedir.

Tablo 6. Yumuşatma filtresine ait parametre değerleri
(Parameters obtained from smoothing filter)

	Parametre	Değer
Yumuşatma (Smoothing)	Grid Boyutu	3 px
	Mesafe Eşik Değeri	0,02 m

2.4. Yüzeylerin Modellenmesi (Modeling of the Surfaces)

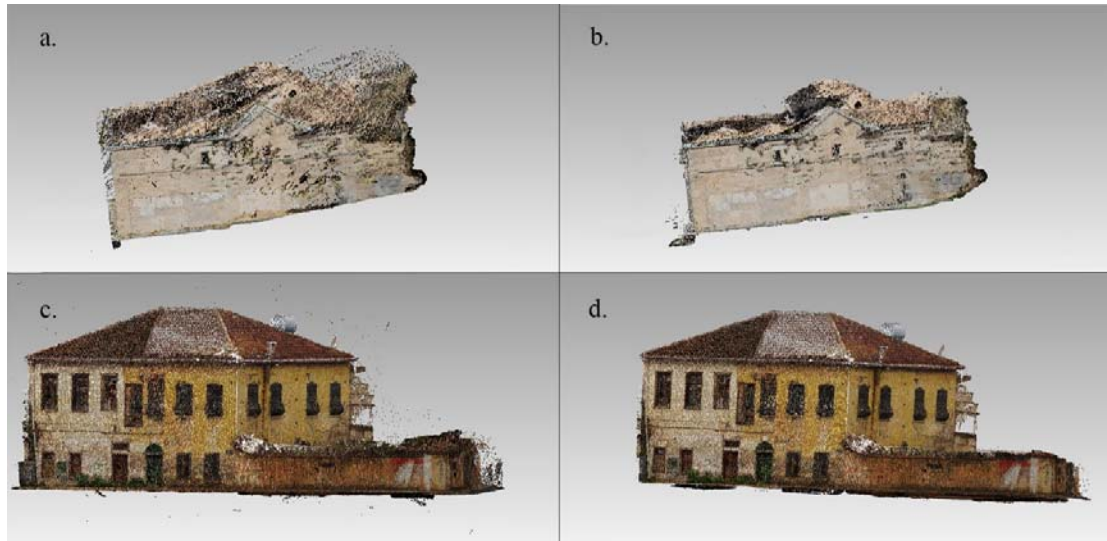
Her iki veri seti için de filtrelenen ve filtrelenmeyen nokta bulutlarına modelleme yapılmadan önce nokta seyreltme yapılarak aynı konumda yer alan noktalar temizlenmiştir. Analizin etkin olarak yapılabilmesi için maksimum üçgen sayısı 2.500.000 alınmış ve lineer enterpolasyonla

üçgenlemeye dayalı yüzey modeli kullanılarak iki veri setine ait filtreli ve filtresiz toplam dört farklı model elde edilmiştir. Üçgenler modelin kenarında ise iki kenarından, diğerleri ise üç kenarından birbirlerine bağlı olmalıdır. Bu şarta uymayan üçgenler, bağımsız üçgen olarak atanmış ve bu adımda silinmişlerdir.

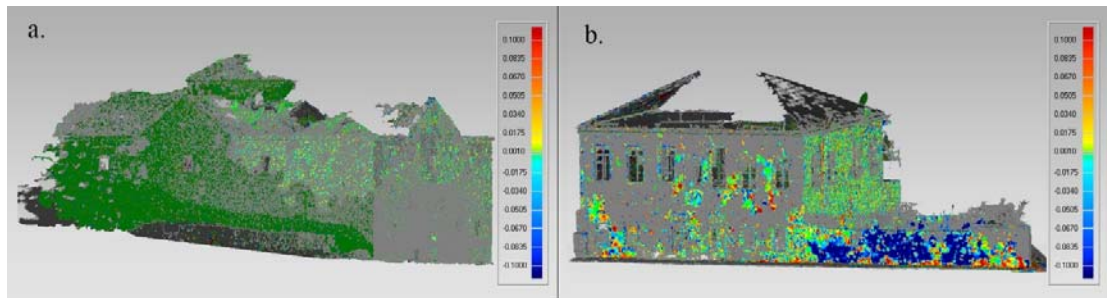
4. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

Elde edilen modeller arasındaki farklılıklar sapma analizi ile hesaplanmıştır. İki veri seti için de filtre uygulanmamış model referans olarak seçilmiş ve filtre uygulanmış model ile üst üste bindirilmiştir. Bindirmede gösterim ve ayırt etme kolaylığı sağlaması amacıyla 15 renk grubuna ayrılan bir spektrum kullanılmıştır. Kabul edilen sapma aralığı ± 1 mm olarak seçilmiştir. Sapma aralığında kalan yüzeyler Şekil 7'de yeşil renk ile gösterilmiştir. Değişmeyen yüzeyler ise gri renk ile gösterilmiştir.

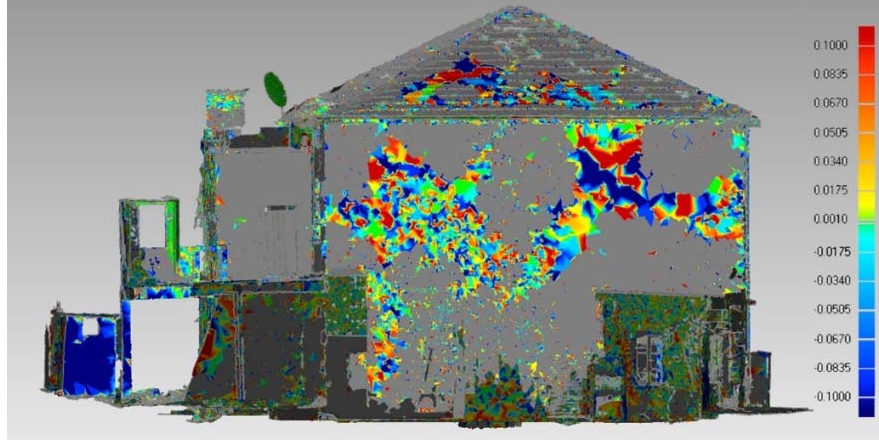
Tarayıcıdan gönderilen ışının taranan yüzeye dik olarak çarpmamasından dolayı, modelde gürültüler oluşmuştur. Bu durum, sapma analizi ile elde edilen model incelendiğinde Şekil 8'de gösterildiği gibi, gürültünün fazla olduğu



Şekil 6. Filtreli ve filtresiz nokta bulutları a) Tavra Deresi Kilisesi (filtresiz) b) Tavra Deresi Kilisesi (filtreli) c) Taş Bina (filtresiz) d) Taş Bina (filtreli) (Filtered and nonfiltered point clouds (a) Tavra Creek Church (nonfiltered) (b) Tavra Creek Church (filtered) (c) Stone building (nonfiltered) (d) Stone building (filtered))



Şekil 7. Sapma analizi sonuç görüntüleri a) Tavra Deresi Kilisesi b) Taş Bina
(Resulting images of deviation analysis (a) Tavra Creek Church (b) Stone Building)



Şekil 8. Filtrelemenin etkisi ile değişimin fazla olduğu alanlar (Areas with high deviations resulted in filtering effects)

kısımların mavi ve kırmızı ile renklendirmesi ile belirtilmiştir. Analiz sonucunda, iki model karşılaştırıldığında görülen farklılıklar Tavra Deresi Kilisesi için Tablo 7’de ve Taş bina için ise Tablo 8’de verilmiştir. Buna göre, Tavra Deresi Kilisesi ve Taş Bina için uygulanan filtreleme sonucunda sırasıyla sivri uçlu çıkıntılarda; %10 ve %5, çok katlı kenarlarda %24 ve %14, küçük boşlukların temizlenmesinde %39 ve %33 oranında iyileştirme sağlanmıştır. Ancak, Tavra Deresi Kilisesi için kendini kesen üçgenlerde %38 oranında iyileştirme sağlanırken, bu değer Taş Bina’da uygulanan filtreler sonucunda iyileştirmeye neden olmadığı bununla birlikte %3 oranında kötüleştirdiği görülmüştür.

Tablo 7. Tavra Deresi Kilisesi’ne ait filtreli ve filtresiz yüzey modelleri üzerinde tespit edilen kusurlar (Defects detected on the filtered and unfiltered surface models of Tavra Creek Church)

Tavra Deresi Kilisesi	Filtresiz Model (Adet)	Filtreli Model (Adet)
Sivri Uçlu Çıkıntılar	428.874	385.254
Kendini Kesen Üçgenler	380.678	236.032
Çok Katlı Kenarlar	348.259	264.001
Küçük Boşluklar	33.231	20.356

Tablo 8. Taş Bina’ya ait filtreli ve filtresiz yüzey modelleri üzerinde tespit edilen kusurlar (Defects detected on the filtered and unfiltered surface models of Stone Building)

Taş Bina	Filtresiz Model (adet)	Filtreli Model (adet)
Sivri Uçlu Çıkıntılar	2.836.127	2.684.412
Kendini Kesen Üçgenler	125.277	128.512
Çok Katlı Kenarlar	207.828	178.828
Küçük Boşluklar	5.811	3.898

Sapma analizi sonucunda, Tablo 7 ve Tablo 8’de sıralanan filtreli ve filtresiz modellerdeki farklara ait maksimum mesafeler, ortalama mesafeler, standart sapma ve RMS değerleri Tablo 9’da verilmiştir.

Tablo 9. Analiz sonucunda elde edilen istatistiksel veriler (Statistical information of analysis)

	Tavra Deresi Kilisesi (m)	Taş Bina (m)
Maksimum mesafe (dışa doğru)	0,8798	1,4600
Maksimum mesafe (içe doğru)	0,8881	1,4600
Ortalama mesafe (dışa doğru)	0,0243	0,0604
Ortalama mesafe (içe doğru)	0,0240	0,0441
Standart sapma	0,0439	0,1887
RMS	0,0439	0,1890

3. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada tarihi yapıların üç boyutlu envanterinin oluşturulması için yersel lazer tarama teknolojisi kullanılarak modelleme çalışması yapılmıştır. Bu amaçla farklı zamanlarda ve farklı yersel lazer tarayıcılarla alımı yapılan iki ayrı veri setine filtre uygulanmadan modeller üretilmiştir. Ayrıca aynı veri setlerine gürültü giderme ve yumuşatma filtreleri uygulanarak modeller üretilmiştir. Üretilen modellerin karşılaştırma işlemi sapma analizi ile yapılmıştır. Sapma analizi sonucunda elde edilen standart sapma değerleri; Tavra Deresi Kilisesi için 0,0439 m, Taş bina için ise 0,1887 m olarak elde edilmiştir. Bu verilere göre, önerilen filtreleme algoritmalarının uygulanması ile etkin bir iyileştirme ve kabul edilebilir model doğruluğu sağlanmaktadır.

Elde edilen filtreli ve filtresiz modeller karşılaştırıldığında, iki veri setinde de sivri uçlu çıkıntıların filtrelenen modelde azaldığı tespit edilmiştir. Ayrıca model üzerinde kendisiyle

kesişen üçgenler ve model üzerinde oluşan boşluklarda da azalma olduğu görülmüştür. Bu azalma miktarı Tavra Deresi Kilisesi ve Taş Bina için uygulanan filtreleme sonucunda sırasıyla sivri uçlu çıkıntılarda %10 ve %5, çok katlı kenarlarda %24 ve %14, küçük boşlukların temizlenmesinde %39 ve %33 oranında iyileştirme sağlanmıştır. Bu problemlerin azaltılması ile oluşturulan model, alımı yapılan eserin iyileştirme ile daha doğru bir şekilde elde edilmesini sağlamıştır. Bu problemlerin gürültü kaynaklı olduğu sonucuna varılmıştır.

Yersel lazer tarayıcı ile ölçüm sırasında, bina yüzeyine dik gelmeyen lazer ışınlarının çok fazla saçılma yaparak gürültüye neden olduğu görülmüştür. Ayrıca bina cephesinin kenar ve köşe noktalarına çarpan lazer ışınları da saçılma yaparak gürültüye neden olmuştur. Bu durum için gürültü giderme filtreleri ile Taş Bina ve Tavra Deresi Kilisesi nokta bulutlarında nokta sayılarının %5 ve %10 oranlarında azalması sağlanmış ve model doğruluğunu olumsuz yönde etkileyen gürültüler giderilmiştir. Ayrıca, işlem adımlarının daha etkili ve hızlı bir şekilde zaman kaybı olmadan uygulanmasını sağlamıştır.

Sonuç olarak, gürültü giderme ve yumuşatma filtrelerinin farklı yersel lazer tarayıcılar kullanılmasına rağmen mimari modelleme çalışmalarında başarıyla uygulanabileceği sonucuna ulaşılmıştır. Mimari modelleme çalışmalarının yanı sıra gürültü giderme ve yumuşatma filtrelerinin yersel lazer tarayıcı ile yapılan diğer çalışmalarda da etkili bir şekilde uygulanabileceği ön görülmektedir.

Sonraki çalışmalarda, bu filtrelerin yanında farklı nitelikteki filtreleme teknikleri kullanılarak nokta bulutunda ve dolayısıyla modelde iyileştirmenin yapılabilirliği araştırılacaktır. Ayrıca oluşturulan modeller üzerine de filtreler uygulanarak iyileştirme çalışması yapılabileceği düşünülmektedir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışmada kullanılan veri setlerini sağlamasından dolayı Hakan Ögütçü ve Ostem Harita'ya teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Erenoğlu, R. C., Akcay, O., Erenoglu, O., An UAS-assisted multi-sensor approach for 3D modeling and reconstruction of cultural heritage site, *J. Cult. Heritage*, 26, 1-12, 2017.
2. Cheng, L., Wang, Y., Chen, Y., Li, M., Using LiDAR for digital documentation of ancient city walls, *J. Cult. Heritage*, 17, 188-193, 2016.
3. Truong-Hong, L., Laefer, D. F., Octree-based, automatic building façade generation from LiDAR data, *Comput.-Aided Des.*, 53, 46-61 2014.
4. Holz, D. and Behnke, S., Fast range image segmentation and smoothing using approximate surface reconstruction and region growing, 12th International Conference on Intelligent Autonomous Systems (IAS), Jeju Island, Korea. 61-73, 26-29 Haziran 2012.
5. Xu, W., Lee, I.-S., Lee, S.-K., Lu, B. and Lee, E.-J., Multi view-based hand posture recognition method based on point cloud. *KSII Trans. Internet Inf. Syst.*, 9, 2585-2598, 2015.
6. Aslan M., Akbulut Y., Şengür A., İnce M.C., Skeleton based efficient fall detection, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University* 32 (4), 1025-1034, 2017.
7. Park, J., Kim, H., Tai, W.-Y., Brown, M.S. and Kweon, I., High quality depth map up sampling for 3D-ToF cameras. *International Conference on Computer Vision*, Barcelona, Spain, 1623-1630, 06-13 Kasım 2011.
8. Huhle, B., Schairer, T., Jenke, P. and Strasser W., Robust non-local denoising of colored depth data, *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops*, Anchorage, AK, USA, 1-7, 23-28 Haziran 2008.
9. Narváez, E. A. L. And Narváez, N. E. L., Point cloud denoising using robust principal component analysis, *Proceedings of the First International Conference on Computer Graphics Theory and Applications*, Setúbal, Portugal, 51-58, 25-28 Şubat 2006.
10. Zaman, F., Wong, Y. P. And Ng, B. Y., Density-based denoising of point cloud, *ROVISP 2016: 9th International Conference on Robotics, Vision, Signal Processing & Power Applications*, 287-295, 2-3 Şubat 2016.
11. Landa, J., Procházka, D. and Štastný, J., Point cloud processing for smart systems, *ACTA UNIV AGRIC SILVIC MENDEL BRUN*, 61, 2415-2421, 2013.
12. Xie, H., McDonnell, K. T. And Qin H., Surface reconstruction of noisy and defective data sets, *Visualization*, IEEE, Austin, TX, USA, 259-266, 10-15 Ekim 2004.
13. Han, X.-F, Jin, J. S., Wang, M.-J, Jiang, W., Gao, L. and Xiao L., A review of algorithms for the filtering 3D point cloud, *Signal Process. Image Commun.*, 57, 103-112, 2017.
14. Nothegger, C. and Dorninger, P., 3D segmentation of unstructured point clouds for building modelling, *Photogrammetric Image Analysis*, Munich, Germany, 19-21 Eylül 2007.
15. Dorninger, P., Nothegger, C., Pfeifer, N. and Molnár, G., On-the-job detection and correction of systematic cyclic distance measurement errors of terrestrial laser scanners, *JAG*, 2, 191-204, 2008.
16. Gielsdorf, F., Rietdorf, A. and Gruendig, L., A Concept for the calibration of terrestrial laser scanners, *FIG Working Week*, Athens, Greece, 22-27 Mayıs 2004.
17. Lichti, D.D., Error modeling, calibration and analysis of an AM-CW terrestrial laser scanner system, *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, 61, 307-324, 2007.
18. Levin, D., *Geometric Modeling for Scientific Visualization*, Mesh-independent surface interpolation, Editörler: Brunnett, G., Hamann, B., Müller, H., Linsen, L., Springer-Verlag Berlin Heidelberg, <http://www.springer.com>, 37-49, 2004.

19. Sithole G., Segmentation and Classification of Airborne Laser Scanner Data, Doktor Tezi, Master of Science integrated Geoinformation and Map Production (IGP), ITC-Enschede, Nederland, 2005.
20. Can H., Kubin J. and Ünay A.İ., Seismic behavior of historical masonry buildings with irregular geometry, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 27 (3), 679-686, 2012.
21. Can, H. and Ünay, A. İ., Numerical analysis tools to determine earthquake behavior of historical structures, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 27 (1), 211-217, 2012.
22. Baik, A., From point cloud to Jeddah Heritage BIM Nasif Historical House–case study, Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage, 4, 1-18, 2017.
23. Lerma J.L., Navarro S., Cabrelles M. and Villaverde V., Terrestrial laser scanning and close range photogrammetry for 3D archaeological, J. Archaeolog. Sci., 37, 499-507, 2010.
24. Ergün B., A novel 3D geometric object filtering function for application in indoor area with terrestrial laser scanning data, Opt. Laser Technol., 42, 799-804, 2010.
25. Nothegger C., Dorninger P., 3D Filtering of High-Resolution Terrestrial Laser Scanner Point Clouds for Cultural Heritage Documentation, Photogrammetrie Fernerkundung Geoinformation, 1, 53-63, 2009.
26. Reshetyuk Y., Self-calibration and direct georeferencing in terrestrial laser scanning, Doktora Tezi, Royal Institute of Technology (KTH), Department of Transport and Economics, Division of Geodesy, Stockholm, 2009.

