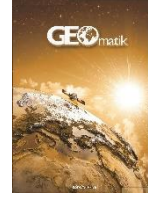




GEOMATİK

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

e-ISSN 2564-6761



Tarihi Yığma Kiliselerde Hasarların Fotogrametrik Ölçme Tekniğiyle İncelenmesi: Artvin Tbeti Kilisesi Örneği

Mustafa Zeybek*¹, Ali Kaya²

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

²Artvin Çoruh Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Artvin, Türkiye

Anahtar Kelimeler

Yığma Kilise
Deplasman
Nokta Bulutu
Kesit
Robust Regresyon

ÖZ

Geçmişte yaşamış farklı medeniyetler inşa ettikleri anıtsal yapılarla günümüze önemli kültürel miraslar bırakmışlardır. Bu yapıların en ihtişamlıları ve döneminin özelliklerini yansıtan; kilise, cami gibi önemli dini yapılar genellikle yerleşim yerlerinin merkezinde inşa edilmiştir. Sonrasında gelen toplum bu yapıları kendi inançları doğrultusunda kullanarak şekillendirmişlerdir. Estetik görünüşlerinin yanında birçok medeniyetin kültürel hafızasını günümüze taşıyan tarihi yapıların korunması ve gelecek nesillere aktarılması insanlığın görevlerindedir. Doğu Karadeniz Bölgesi'nde yer alan Artvin ili ve çevresi zengin tarihe sahip olmakla birlikte farklı uygarlıklara da ev sahipliği yaptığı bilinmektedir. Bu çalışmada Tbeti (Cevizli) kilisesinin yapısal durumunun belirlenmesi, onarım ve güçlendirme için deplasman ölçümleri ele alınmıştır. Deplasman ölçümleri tek periyot olarak tasarlanmıştır. Duvarların üst kısımlarında oluşan hasarlar zemine yakın duvarlar baz alınarak incelenmiştir. Fotogrametrik olarak elde edilen veriler robust regresyon ve polinomal eğri uydurma yöntemleriyle değerlendirilmiştir. Değerlendirme sonucunda yapının kuzey kesiminde bulunan duvarlarda 5 cm'ye varan deplasmanlar tespit edilmiştir. Örnek bir çalışma olarak yığma yapım sistemiyle inşa edilen Tbeti kilisesinde meydana gelen deplasmanlar sunulmuştur. Çalışma sonucunda tek periyotluk ölçüler ile kilise ve diğer yapılarda duvarlar boyunca meydana gelen sapmaların düşey olarak tespit edilebileceği kanısına varılmıştır.

Investigation of Damages in Historical Masonry Churches with Photogrammetric Measurement Techniques: A Case Study of Artvin Tbeti Church

Keywords

Masonry Church
Displacement
Point Cloud
Cross Section
Robust Regression
Polynomial Curve

ABSTRACT

The different civilizations that live in the past have left important cultural heritage to the present day with the monumental structures they built. The most magnificent of these structures and reflect the characteristics of their era; important religious buildings such as churches and mosques were usually built in the center of settlements. The later societies shaped these structures in line with their own beliefs. In addition to the aesthetic aspects, the preservation of historical buildings carrying the cultural memory of many civilizations to the present and transferring them to the next generations is one of the duties of humanity. Artvin province, located in the Eastern Black Sea Region, has a rich history and is known to host different civilizations. In this study, determination of structural status of Tbeti (Cevizli) church and displacement measurements for repair and strengthening are discussed. Displacement measurements are designed as a single period. The damages on the upper parts of the walls were examined with reference to the parts close to the ground. Photogrammetric data were evaluated by robust regression and polynomial curve fitting methods. As a result of the evaluation, displacements up to 5 cm were found on the walls in the northern part of the building. As an example study, displacements occurred in Tbeti church which was built with masonry construction system are presented. As a result of the study, it was concluded that the deviations occurring along the walls in churches and other buildings can be detected vertically with single period measurements.

*Sorumlu Yazar

*(mzeybek@artvin.edu.tr) ORCID ID 0000-0001-8640-1443
(akaya@artvin.edu.tr) ORCID ID 0000-0003-2200-6844

Kaynak Göster (APA)

ZEYBEK, M., KAYA, A. (2020). Tarihi Yığma Kiliselerde Hasarların Fotogrametrik Ölçme Tekniğiyle İncelenmesi: Artvin Tbeti Kilisesi Örneği. Geomatik, 5 (1), 47-57. DOI: 10.29128/geomatik.568584
Retrieved from <https://dergipark.org.tr/tr/pub/geomatik/issue/48883/568584>

1. GİRİŞ

Anıtlar, dünya tarihinin yeri doldurulamaz kanıtı olarak geçmişe ait hafızanın korunmasına katkıda bulunan en değerli eserlerdir. Geçmişte yaşamış farklı medeniyetler inşa ettikleri anıtsal yapılarla günümüze önemli kültürel miraslar bırakmışlardır. Bu kültürel miraslara ait kapsamlı çalışmaların yapılması, insanlığın geçmişini ve geleceğini anlama yükümlülüğünün bir gereğesidir.

Geçtiğimiz yüzyıl boyunca, arkeolojik yüzey araştırmaları yaygın olmakla beraber, gün geçtikçe gelişen teknolojik cihazlarla bu araştırmalar daha etkili biçimde yapılmaktadır (H. M. Yılmaz, Yakar, Gulec, & Dulgerler, 2007). Son yıllarda, pek çok uluslararası kurum ve kuruluş, kültürel mirasın korunması ve restorasyonlarının yapılması ile ilgili fonlar ayırarak bu konuda çalışmaların artırılmasını hedeflemiştir.

Günümüzde pek çok modern ülke, anıt zenginliğine sahip diğer ülkeleri bu anıtları korumaya ve korunmasına yönelik bilimsel araştırma ve çalışmaları yapması için desteklemektedir. Bu çalışmalar genellikle Kültürel Mirasın geometrik yapısının kaydı, risk değerlendirmesi, izlenmesi, geriye dönük restore edilmesi, yeniden yapılandırma ve yönetilmesi olarak sıralanmaktadır (Karabörk et al., 2009; H. M. Yılmaz, Yakar, & Yıldız, 2008).

Beton ve çelik gibi yapı malzemelerinin yapı endüstrisinde kullanılmasıyla birlikte yığma yapıların inşası gün geçtikçe azalmaktadır. Fakat Türkiye yapı stokuna bakıldığında tarihi nitelikteki yığma yapılar önemli bir yer tutmaktadır. Yığma yapılar, düşey yüklere karşı dayanımı yüksek olmasına rağmen depremlerde yatay yükler sonucu oluşacak çekme gerilmelerine ise düşük dayanım göstermektedirler (Brandonisio, Lucibello, Mele, & Luca, 2013). Deprem vb. doğal afetlerle veya insanoğlunun müdahaleleri sonucunda ağır hasar alan bu yapılar kullanım dışı kalmaktadır.

Kültürel Mirasa ait dijital belgeleme, vektörel çizimleri, ortomozaik görüntüleri ve üç boyutlu (3B) modeli gibi geometrik bilgiyle birlikte görsel ölçüm sonuçlarının üretildiği bir dizi çalışmayı içermektedir (Doğan & Yakar, 2018; Korumaz, Dülgerler, & Yakar, 2011; Ulvi & Yakar, 2010). Günümüzde, kültürel yapıların 3B modellenmesi ile belgelendirilmesi ve envantere geçirilmesi genellikle iki farklı yöntemle gerçekleştirilmektedir. Bunlardan ilki, aktif uzaktan algılama yöntemleri; lazer tarayıcı veya radar bazlı sistemler, diğeri ise, pasif/optik görüntü tabanlı modelleme (fotogrametrik veya yeni terimiyle hareketten oluşum (SfM)) yöntemleridir (Bevan et al., 2014; Koutsoudis et al., 2014).

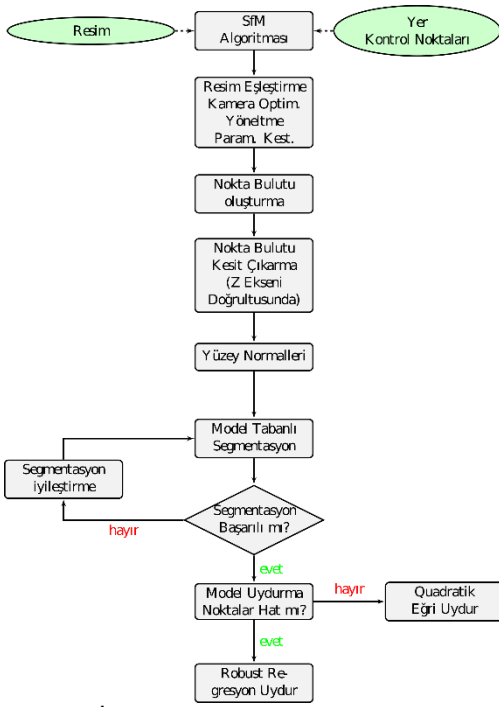
Çeyrek asırdan bu yana, Yersel Lazer Tarama (YLT) tekniği; mühendislik yapıları, mimarlık, yer bilimi, trafik, maden ve peyzaj gibi pek çok alanda dijital verinin temininde yaygın olarak kullanılan bir tekniktir. 3B üretilen veriler yüksek hassasiyet ve doğruluktadır (Uray, Varlık, & Metin, 2018; H Murat Yılmaz & Yakar, 2006).

Arkeolojik ve kültürel anıtların belgelenmesinde fotogrametrik yöntemler ve YLT teknikleri etkili bir şekilde kullanılmaktadır. Daha da önemlisi, YLT, arkeolojik kazılarda yüksek hassasiyette ölçülmesi gereken bölgesel yüzeylerin dijital dokümantasyonunu yapabilen bir yöntemdir. Dijital verilerin temininde YLT tekniği ile diğer yersel ölçüm (örn. Çelik şerit metre, total station) teknikleri karşılaştırıldığında, incelenmesi istenen yüzey morfolojisi ve detaylara ait diğer bilgilerin kaydedilmesi için önemli miktarda zaman kazanımı sağlayan yegâne tekniktir. Ancak, arkeolojik kazılarda lazer tarama tekniklerinin kullanımı; istasyon kurulumu, cihaz transferi, tarama süresi ve gölgelemeyi önleme amaçlı fazla istasyon kurulumu gibi bazı durumlardan dolayı zaman alıcı bir yöntem haline dönüşebilmektedir. Ayrıca, bu cihazın yüksek maliyetli olması, küçük bütçeli projelerde kullanılmasının önüne geçmektedir. Buna alternatif olarak metrik olmayan kameraların kullanımına imkân sağlayan SfM algoritmaları, lazer taramanın doğruluk ve nokta yoğunluğu kalitesine yakın veriler üretebilmektedir.

Bu çalışmadaki yaklaşım ise SfM/fotogrametrik yöntemlerin doğruluğunu, güvenilirliğini bununla birlikte bilgisayarlı görmenin otomasyon ve esneklik avantajlarından faydalanarak geçmişten günümüze varlığını sürdüren yapılardaki erozyon, bozulma ve hasarların tek periyot ölçmeleri ile tespit edilmesidir. Literatür incelendiğinde fotogrametrik yöntemler kullanarak çok zamanlı deformasyon izleme çalışmaları yoğun olarak yer almaktadır (Rodríguez, Rodríguez, Rodríguez, & Sanchez, 2019; Vlákó, Greif, Holzer, Hencelova, & Jezny, 2007). Yapı yüzeylerinde çatlakların tespiti, köprü ve kemerli yapıların sonlu eleman analizi vb. araştırmalarda kullanılan 3B geometrik modeller için fotogrametrik yöntemler tercih edilmektedir (Suziedelyte-Visockiene, Bagdziunaite, Malys, & Maliene, 2015). Ancak bu makalede önerilen yöntemin özgünlüğü, tek periyotluk ölçmelerle yapı üzerindeki deplasman miktarlarının belirlenmesidir. Aşağıdaki bölümlerde önerilen metodolojiye ve uygulanan algoritmalara detaylı olarak değinilmiştir.

2. MATERYAL VE METOTLAR

Bu çalışmada fotogrametrik yöntemle yapının şekli ve konumu 3B olarak belirlenmiştir. Bu yöntem yapının çevresinden alınan birçok görüntü alınmak suretiyle gerçekleştirilmiştir. Bu sayede yapı üzerinde ölçme ve yorum yapma imkanı oluşmuştur. Fotogrametrik ölçme tekniği, ölçülmesi planlanan nesnenin görüntülerinin kaydedildiği herhangi bir durum veya yapı/nesne üzerinde uygulanabilir çok amaçlı bir yöntemdir. Bu yöntemin temel amacı, yapıya ait dijital (koordinatlar ve geometrik öğeler) veya grafik verilerin (görüntüler, çizimler, haritalar) 3B olarak yeniden yapılandırılmasıdır. Bu bölümde uygulanan ölçme yöntemine ait iş akışı **Şekil 1**'de genel hatlarıyla gösterilmiştir.



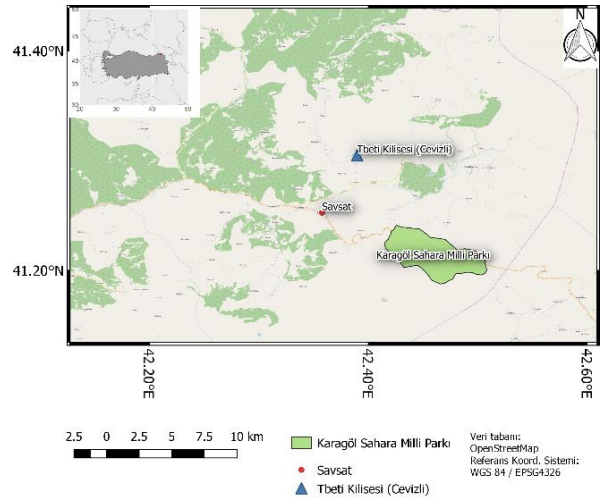
Şekil 1. İş akış şeması

Uygulanan algoritmalar, 3D1PERDEF (3 Boyutlu 1 Periyotluk Deplasman Analizi) kısaltmasıyla, SfM ortamında fotogrametrik ve bilgisayarlı görme algoritmaları sonucunda üretilen nokta bulutları ile tek periyotluk yer değiştirme analizlerinin yapılması için R programlama dilinde kodlanmıştır (Team, 2016). Bu R kodları kullanılarak, 3B nokta bulutu verilerinden belirli aralıklarla kesitler alınmıştır. Yapıyla ilgili herhangi bir referans plan verisi olmadığından alınan kesitlerden zemine en yakın olanı referans plan olarak varsayılmıştır. Bu plan, düşey düzleme göre en uygun hattın robust olarak kestirilmesiyle oluşturulmuştur. Kestirilen bu hat sayesinde olması gereken bina planları teorik olarak oluşturulmuştur. İki boyutlu (2B) yatay deplasman, teorik bina planıyla binanın üst kısımlarından alınan kesitlerle karşılaştırılarak temelden itibaren düzlemsel yapıdan olan sapmalar ortaya çıkarılmıştır. İkinci önerilen yöntem ise k-d temelli en yakın komşu (k- n_n) nokta arama algoritmasıdır. Teorik plan ile yapının üst kısımlarından alınan kesit noktaları arasındaki mesafeler hesaplanmıştır. Bu değerler yatay ekseninde oluşan deplasmanları ifade etmektedir.

2.1. Çalışma Bölgesi

Artvin ili Şavşat ilçesine bağlı Cevizli köyünde bulunan Tbeti kilisesi örnek olarak seçilmiştir (Şekil 2). Kilise düz bir alan üzerine inşa edilmiştir. Yapının günümüze kadar ulaşan herhangi bir kitabesi bulunmamaktadır. Yazılı kaynaklardan edinilen bilgilere göre 10. yy.'ın başlarında bölgede egemen olan Bagrathlı prenslerinden Aşud Koh (Aşot Kukhi) tarafından dönemin Gürcü Ortodoks Piskoposluğunun merkezi olan Tbeti köyünde yaptırılmış olup daha

sonraları dönemin önemli dini merkezleri arasında yer alan yapı 12. ve 15. yy.'larda onarımlar geçirdiği bilinmektedir. Bölgenin İslamiyet'i kabul etmesiyle birlikte cami olarak kullanılan yapı 1885 yılında kubbesine ve haç kollarına yıldırım düşmesi sonucu hasar görmüş daha sonra 1953 yılında kubbesinin tamamen çökmesi ile kullanılamaz hale gelmiştir (Korkut, 2010). Köy içinde bulunan manastır, günümüze kilise ve şapeli ile ulaşmıştır. Kilisenin beden duvarları 1-1,5 m genişliğindedir. Beden duvarları dolgu duvar tekniğinde iç kısmı harç ve moloz taşla doldurulduktan sonra dışı düzgün kesme taş malzeme ile kaplanmıştır. Farklı boyutlardaki taşların kullanıldığı cephe kaplamalarında işçiliğin kaliteli olduğu göze çarpmaktadır. Günümüzde yapının çoğu duvarı yıkılmış, duvar yüzeylerindeki kaplamaları dökülmüş ve beden duvarlarında yer yer dökümler ve çatlakları olan yapı büyük ölçüde tahrip olmuştur. Yapının üst örtüsü ve naosun üzerini örten yüksek kasnaklı kubbenin tamamı çökmüştür. Yapının günümüz halini koruması ve gelecek dönemlerde oluşabilecek hasarlara karşı yapının dijital referans verisinin üretilmesi için bu çalışma alanı seçilmiştir.



Şekil 2. Tbeti Kilisesi konum haritası

2.2. Arazi Çalışmaları

Arazi çalışmaları iki kısımdan oluşmaktadır. Bunlar, Jeodezik Yer Kontrol Noktaları (YKN) ölçümü ve görüntülerin araziden temin edilmesidir. YKN için kapalı poligon ağı istikşaf çalışması yapılmıştır. YKN'ler yapı yüzeyinde belirlenmiş ve koordinatları poligon noktalarından yapılan ölçümlerle elde edilmiştir. Yapı üzerinde detay noktalarının çok olması yapıyı hedef ihtiyacını ortadan kaldırmıştır. Bu nedenle tüm YKN noktaları, yapı üzerinde keskin detayların ve renk ayrımının kolaylıkla yapılabildiği yerlerden seçilmiştir. Kamera yardımıyla yersel görüntüler paralel ve konvergent (Eğik/Serbest) olarak çekilmiştir. Yapıyı temsil eden tüm yüzeylerin 3B nokta bulutlarında yer alması için yüksek kalite ve sayıda görüntüler alınmıştır.

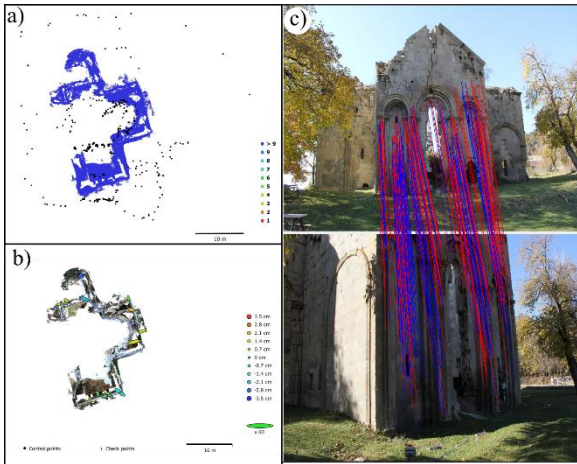
2.3. Yazılım ve Donanımlar

Bu çalışmada, 18 megapiksel CMOS sensörlü Canon EOS 60D dijital tek lensli refleks (DSLR) kamera kullanılmıştır. YKN'lerin ölçümü için PENTAX R 422 VN Total Station 2" (0.6 mgon) 1.5 ~ 300 m : ± (5mm+2ppm) açı ve kenar hassasiyetli total station cihazı kullanılmıştır. Temel olarak elektronik mesafe ölçerler (EDM/Total station); eğik mesafeyi, yatay mesafeyi, yatay açığı, düşey açığı, yükseklik farkını ölçerek koordinatları da otomatik olarak hesaplayan, gösteren ve kaydeden mikro işlemcilerden oluşur. Düşük ücretli fotogrametri yazılımı Agisoft Photoscan v 1.3.3, SfM algoritmalarını barındırdığı ve kolay kullanım arayüzüne sahip olduğu için tercih edilmiştir (<https://www.agisoft.com/>).

2.4. Veri İşleme

Görüntüleri 2B'den 3B'ye dönüştürmek için matematiksel formülasyon dizisine ihtiyaç duyulur. En az iki görüntüden perspektif veya projektif geometri formülleri yardımıyla 3B veriler elde edilir (**Error! Reference source not found.**)(Micheletti, Chandler, & Lane, 2015).

Görüntü tabanlı fotogrametri ve bilgisayarlı görme modelleme teknikleri, nesnelerin geometrik durumunu ortaya koyarak nokta veya alan bazlı deplasman analizlerinin yapılmasını sağlar.



Şekil 3. a) kamera konumları b) YKN nokta konum hassasiyetleri, c) görüntü eşleme

Görüntülerin ölçme amaçlı işlenmesinde en iyi teknik olarak kabul gören fotogrametri tekniği, herhangi bir ölçek kısıtlaması olmadan obje hakkında hassas ve yüksek güvenilirlikli, doğru, metrik ve ayrıntılı 3B bilgiler sunmaktadır.

Görüntüler farklı platformlar kullanılarak, uydu, havasal veya yersel yöntemlerle farklı sensörlerden elde edilebilir. Bu çalışmada yersel yöntemle görüntüler elde edilmiştir. Elde edilen görüntüler kamera kalibrasyonu ile düzeltilmiştir. Fotogrametrik işlemler, görüntülerdeki dönüklük parametrelerinin kestirimi, özellik çıkarımı, yoğun yüzey eşleme ve ortofoto üretimine dayanmaktadır.

Son zamanlarda ise fotogrametrik ölçümlerin yanı sıra, bilgisayarlı görme ile 3B görüntü işleme uygulamaları özellikle otomatik nesne tanıma ve çıkarma teknikleri, uygulama kolaylığı nedeniyle büyük ilgi görmektedir.

Bilgisayarlı görme yaklaşımları, doğruluk parametresi çok önemli olmayan öncül yaklaşık parametre değerlerinin kestirimi, 3B görselleştirme, platform navigasyonu, konumsal tespitler, robot konumlandırma ve hassas parametre kestirimi için önemli roller üstlenmektedir.

Görüntüler yersel ölçülerle birlikte işlenerek belirli koordinat sisteminde 3B nokta bulutu oluşturulmuştur. Bu görüntü işleme 3 adımdan oluşmaktadır: (i) görüntülerin eşleşmesi için eş ve bağlantı noktalarının otomatik çıkarımı; (ii) eşleşen görüntülerde YKN işaretlenmesi ve yöneltme işlemlerinin tanımlanması; (iii) son olarak da yoğun yüzey nokta bulutlarının oluşturulmasıdır (**Error! Reference source not found.**). 2B görüntülere dayanan 3B oluşturma, nesne yapısından çıkarılan özellik noktalarının nesne yapısını yansıtmasına ve yüksek eşleşme doğruluğunun kalitesine bağlıdır.

Görüntülerde özellik çıkarımı farklı yöntemlerle yapılmaktadır. Bunlar, nesne tabanlı stereo, nokta özellikli, çizgi özellikli ve yüzey özellikli çıkarımlardır. Bu yöntemlerin birbirlerine göre avantajları ve dezavantajları vardır. Bu nedenle hangi yöntemin diğerinden daha üstün olduğunu söylemek oldukça zordur. Literatürde nokta özellikli çıkarım yaygın olarak kullanılmaktadır (Remondino, Spera, Nocerino, Menna, & Nex, 2014). Bunlardan önemli olanı, değişken olmayan özellik dönüşümü (SIFT), Lowe (2004) tarafından sunulan algoritmadır. Dört temele sahiptir: ölçek uzayının uç değerlerinin tespiti, ana noktaların konumlandırılması, dönüklük ataması ve son olarak ana nokta tanımlayıcısının oluşturulmasıdır. İlk adımda, ilgi noktaları, görüntüde farklı konum ve ölçeklerde taranarak tanımlanır. Bu adımı gerçekleştirmek için Gaussian (DoG) farkı kullanılır ve nokta adayları piksel altı doğrulukta yerleştirilir. Son adımda, 128 nokta tanımlayıcı oluşturulur ve eşleştirme işlemi için hazırlanır. Genel anlamda SIFT yönteminin performansı iyi olmasına rağmen görüntülerdeki ışık koşullarına ve büyük dönüklük açılara karşı hala kısıtlamalar bulundurmaktadır (Lowe, 2004).

Kamera kalibrasyonu ile kamera parametreleri matematiksel olarak belirlenir (Yakar, 2011). Görüntüler, optik yapısı genellikle sabit olmayan günlük kompakt fotoğraf makineleriyle çekildiğinden, görüntü işleme sürecinde self kalibrasyon tekniğiyle distorsiyonlar giderilmeye çalışılmıştır. Bunun sonucunda seyrek nokta bulutları en uygun duruma getirilmiştir. SfM sadece bağlı kamera koordinatlarına göre 3B geometri üretir. Böylece nokta bulutu çıktısı rastgele bir koordinat sisteminde üretilir. Bu nokta bulutlarının belirli bir sisteme dönüştürülmesi için YKN'ler kullanılmıştır. Seyrek nokta bulutu, özellikli nokta korelasyon ve eşleşme noktaları ile oluşturulur.

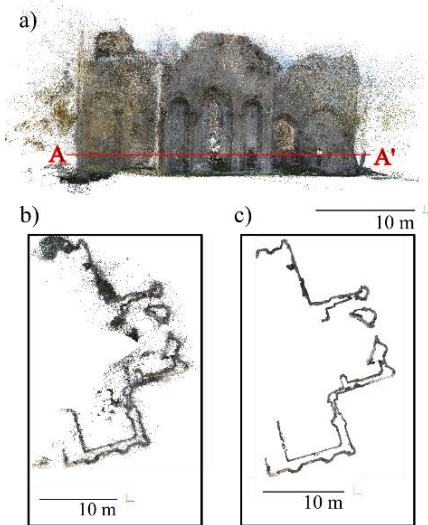
Robust, güvenilir ve yüksek doğrulukla kestirilen dış yöneltme parametreleri sonrasında yoğun nokta bulutlarının oluşturulması için otomatik yoğun görüntü eşleme işlemine geçilir. Günümüzde, bu işlemin gerçekleştirilmesi için her piksele ait nesnenin tam 3B koordinatını belirleyebilen çok sayıda eşleştirme algoritması vardır (Kwak, Datchev, Habib, El-Badry, & Hughes, 2013; Micheletti et al., 2015).

2.4.1. Gürültülü noktaların tespiti ve silinmesi

Bu bölümde, gürültülü/uyuşumsuz noktaların nokta bulutlarından otomatik olarak belirlenmesi ve silinmesi açıklanmaktadır.

Görüntü tabanlı 3B modelleme teknikleri ile oluşturulan nokta bulutları, genellikle lazer tarama gibi aktif tekniklerle elde edilen nokta bulutlarına göre çok daha gürültülüdür. Uyuşumsuz/aykırı noktalar, özellikle diğer yakın komşu gözlemlerine göre tutarlı olmayan bir durum ortaya çıkarmaktadır. Büyük veri setlerinde aykırı noktalar yerel komşu noktalarına göre ortalama değerden uzakta olan noktalardır.

Aykırı noktaların yoğun noktalar içinde tespiti ve bunların nokta bulutlarından elimine edilmesi için birçok istatistiksel yöntem bulunmaktadır (Ning, Li, Tian, & Wang, 2018; Rakotosaona, La Barbera, Guerrero, Mitra, & Ovsjanikov, 2019). Yöntemler, temel olarak verilerin normal bir dağılımda olduğunu varsayarak ortalama ve standart sapmalarına göre aykırı gözlemleri tanımlamaktadır. Bu çalışmada, C++ tabanlı PCL uygulaması olan istatistiksel uyuşumsuz nokta tespit etme ve silme (SOR: Statistical Outlier Removal) algoritması ile nokta bulutlarındaki uyuşumsuz noktalar tespit edilmiş ve silinmiştir (Rusu, Marton, Blodow, Dolha, & Beetz, 2008; Zeybek & Şanlıoğlu, 2019). Şekil 3'te kiliseye ait 3B birleştirme seyrek noktalarının perspektif ve plan görünümü verilmiştir. Şekil 3c'de SOR uygulaması görülmektedir.



Şekil 3. Seyrek ve gürültülü eşleştirme noktalarının gösterimi, a) AA' kesiti gürültülü görünümü, b) AA' kesiti SOR uygulaması sonrası

2.5. Kesit Segmentasyonu (Bölümleme)

Nokta bulutlarından alınan kesitlerin bütünlükten dolayı deplasman analizine tutulacak her bölümün kümeleme ve segmentasyonunun yapılması gerekmektedir. Bunun için en etkili sonuç, yüzeyi oluşturan noktaların normaleri ve aralarındaki Öklid mesafelerine göre sınıflandırılmasıdır.

Geometride, yüzey normali belirli nesneye dik olan çizgi veya vektörel bir nesne olarak tanımlanır. Yüzey normaleri, deplasmanların belirlenmesinde etkin rol oynamasının yanında segmentasyon ve görüntü giydirmeye gibi diğer işlemler için de önemlidir. Her noktaya ait teğet düzlem kestirimi yapılır. Bunun için nokta bulutları arasında en yakın nokta arama algoritmaları belirli yarıçap aralığında farklı uzaklık hesaplama yöntemlerine göre belirlenir. Bunlardan en yaygın olanları *k-nn* arama (*k*-nearest neighbour: *k*-en yakın komşuluk) ve Öklid mesafe algoritmasıdır. Bunun yanında yüzey normalerinin kestirimi için farklı yöntemler geliştirilmiştir (Klasing, Althoff, Wollherr, & Buss, 2009; Zeybek, 2017).

Bu çalışmada yüzey normal hesapları, veri işleme süresinin uygun düzeyde tutulması için tüm model yerine kesit üzerinden yapılması önerilmiştir. Kesitler 50 cm kalınlıkta alınmıştır. Bu sayede veri işleme performansı artırılmıştır. Bir düzlem için yüzey normali *k*- en yakın nokta kümesi içinde oturtulan düzlemin eşitlik **Error! Reference source not found.**'deki gibi a, b, c yüzey normalerinin kestirilmesiyle elde edilmiştir.

$$ax + by + cz + d = 0 \quad (1)$$

Segmentasyon işlemi ile duvar ve kesitleri karşılaştırma uygulamasında kullanılması için en yaygın kümeleme algoritmalarından birisi olan *k-means* yöntemi kullanılmıştır. Ancak, algoritmada sınırlamalar mevcuttur: Özellikle kullanıcının küme sayısını önceden belirlemesi gereklidir. Bunun yanında ilk merkezler algoritma tarafından rastgele seçilir. Son *k-means* kümeleme çözümü, küme merkezlerinin ilk rastgele seçimine çok duyarlı sonuçlar vermektedir. Sonuç olarak *k-means* her defasında çalıştırıldığında farklı sonuçların elde edildiği görülür. Bu nedenle bu çalışmada, *k-means* sonuçlarını iyileştirmek için hiyerarşik *k-means* kümeleme (*hkmeans*) hibrid yöntemi uygulanmıştır (Kassambara & Mundt, 2016).

2.6. Deplasman Analizi

Yüzey deplasmanları, farklı dönemlere ait elde edilen nokta bulutlarıyla ölçülen yapıların 2B veya 3B modelleri üzerinden karşılaştırılarak yapılmaktadır. Bu çalışmada ise dönemsel deplasman tespiti yerine tek periyotluk ölçülerle

yapıdaki olağan dışı model farklılıklarından yer değiştirmeler tespit edilmiştir. Deplasman analizleri, 2B kesit ile yapının alt kısımlarından üst kısımlarına doğru oluşan düzlem dışı hareket miktarlarının belirlenmesi için yapılmıştır. Zemine en yakın bölge referans kesit olarak varsayılmış, k- en yakın komşu mesafe yöntemi ve Robust Lineer regresyon yöntemleriyle kesitler karşılaştırılarak yer değiştirme miktarları tespit edilmiştir. Doğrusal olmayan yapı elemanlarını temsil eden nokta bulutu verilerindeki deplasman ise 2. dereceden polinomal eğri uydurularak tespit edilmeye çalışılmıştır.

2.6.1. Robust doğrusal (lineer) regresyon yöntemiyle hat belirleme

Robust-sağlam regresyon (MASS, robustbase), doğrusal, veri kümesinde güvenli gözlemlerin homojen dağılması durumunda uyumsuz değerlerin etkisini azaltarak bir veya birden fazla bağımlı değişkenden oluşan doğrusal değişkenin tahmin edilmesidir (Koç & Akdeniz, 2007; Rousseeuw, 1987). En küçük kareler regresyonu (OLS) uyumsuz noktalara ve gözlemlere hassasiyet göstermektedir. Bu nedenle uyumsuz ve aykırı noktaların olduğu verilerde robust regresyonun tercih edilmesi gereklidir. Robust regresyon modeliyle daha doğru parametre kestirimleri yapılmaktadır. Hat kestirme işlemindeki kalitenin düşük olduğu aşamada isteğe bağlı olarak otomatik standart sapma değerlerine limit uygulanarak regresyon hattının doğrusal mı yoksa eğri uydurmama yapılacağına da karar verilebilir. Bu çalışmada manuel olarak bu değerlendirme yapılmıştır. Yapının yalnızca apsis bölümü eğrisel olarak değerlendirilmiştir.

2.6.2. İki boyutlu hızlı k-NN nokta bulutu karşılaştırması

C++ ile yazılmış düşük boyutlu nokta bulutları için hızlı bir k en yakın komşu nokta kütüphanesi (Jan Elseberg, Magnenat, Siegwart, & Nüchter, 2012) kullanılarak farklı kesitlerdeki deplasmanlar araştırılmıştır. Aynı zamanda hızlı k-d ağaç uygulamasından (*libnabo*) (J. Elseberg, Magnenat, Siegwart, & Nüchter, 2012) da yararlanılmıştır. Bu hızlı k-d ağaç oluşturma ve arama algoritması, performansı önemli ölçüde arttıran yapısıyla yoğun nokta bulutlarının birleştirilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Buradaki uygulamada ise deplasman tespiti için alınan kesitler arasındaki 2B yatay mesafe farklarının ortaya çıkarılması için R programında kullanılmıştır. 3B analiz ve farkların ortaya konulması kesitler arasındaki kot farklarından dolayı bu çalışma için mümkün değildir.

3. BULGULAR

Görüntüler Kasım 2018'de Canon EOS-60D 18 mm objektif kullanılarak çekilmiştir. Hareketten oluşum algoritmasında, yapının dijital halini 3B oluşturulabilmesi için her bir obje noktasının en az üç

görüntüde tanımlanabilir olması gerekir. Bu nedenle yapının karmaşık mimariye sahip olduğundan 1328 adet yoğun ve yüksek bindirme oranına sahip görüntüler alınmıştır. Görüntüler yapı yüzeyinde eksik alan kalmayacak şekilde ve yapı etrafında çift tur olarak alınmıştır. Bu görüntülerden yeterli detay sağlayacak nitelikteki 375 adet görüntü seçilmiştir. Bu sayede veri işleme performansı da artırılmıştır. Son model oluşumunda daha iyi modelin oluşması için eğik (konvergent) görüntüler ve yapıya nadir açısına sahip görüntüler kullanılmıştır. Özellikle bağlantı ve eşleme noktalarının daha sağlam olması için hem yapıya nadir açılı hem de eğik açılı görüntüler birleştirilerek, daha hassas sonuçların çıkarılmasına özen gösterilmiştir. YKN nokta sayısı kilise duvarlarında belirgin ve gözle görülebilir noktalarda 94 adet yerel X, Y, Z koordinatlarıyla ölçülmüştür. Ölçümün ülke sistemine bağlanması için ITRF96 datumu ve Transverse Merkator projeksiyonunda (TM-TUREF / TM 42 EPSG: 5258) 2 adet poligon noktası Spectra Precision MobileMapper 120 model ve markalı DGPS cihazı kullanılmıştır (Şekil 4a). Kapalı poligon ağı, bu iki poligon noktalarından alınan azimut değerleri yardımıyla ülke koordinat sistemine dönüştürülmüştür. YKN'ler için total station ile ölçülen yatay açı, düşey açı ve eğik mesafe değerleri de ülke koordinat sisteminde belirlenmiştir. Verilerin Agisoft yazılımında değerlendirme aşamasında bilgisayar donanımından optimum faydalanmak için değerlendirme, eşleme ve yoğun eşleme aşamaları orta seviyeli parametrelere göre yapılmıştır. 543194 adet 3B eşleme noktası üretilmiş ve 39651105 adet yoğun nokta bulutu elde edilmiştir (Şekil 4).

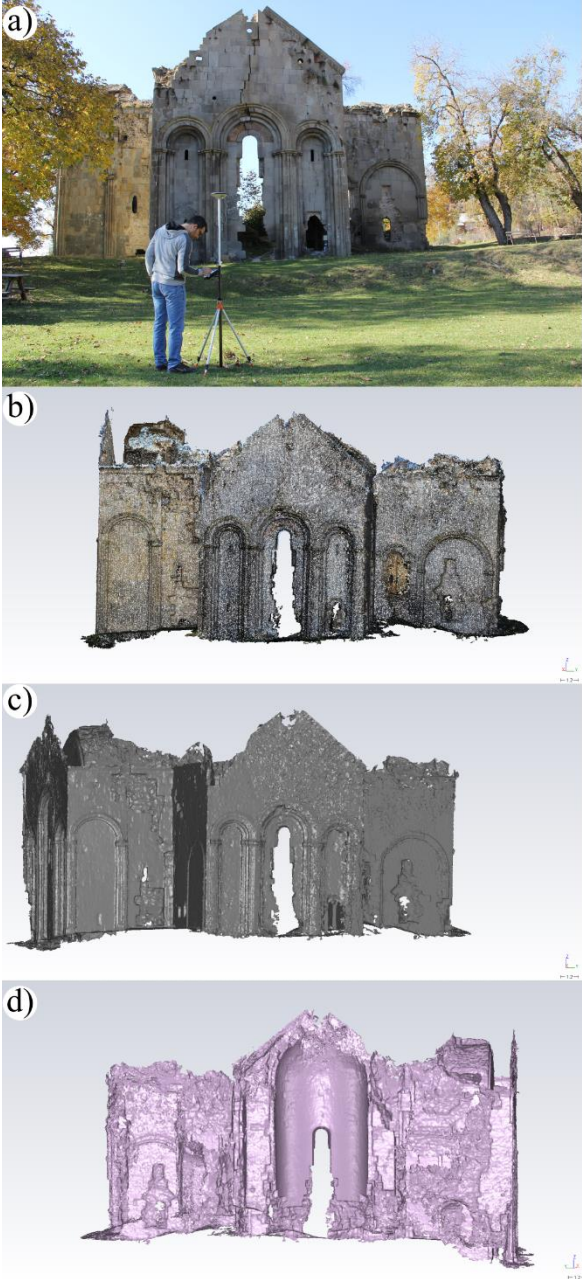
PCL SOR filtre uygulaması sonrasında veri analizi için geriye 36203713 adet nokta kalmıştır. SOR filtresi uygulanırken yapı detaylarının ve motiflerinin kaybolmamasına özen gösterilmiştir. Aksi takdirde filtreleme hataları nedeniyle veri kayıpları yaşanabilmektedir. Kesitler yerden Z eksenini boyunca 50 cm genişliklerinde alınmıştır. Alınan kesitler üzerinden yüzey normalleri hesaplanarak sınıflandırma yapılmıştır. Sınıflandırmalarda duvar sayıları dikkate alınmadan k merkezi sayısı belirlenmiş ve segmentasyon yapılmıştır. Kesitlerin segmentasyonu için hK-means (*factoextra*) yöntemi uygulanmıştır (Şekil 5). Burada tespit edilen kenarların doğruluğu istenilen seviyede değilse k küme sayısı artırılarak işlemler tekrarlanmıştır. Küme sayısı (k) 100 olarak belirlenmiştir. Bu aşamada yüzey normallerinin kalitesi de önem arz etmektedir. Bu sayede karşılaştırılacak kesitler yaklaşık gruplandırılmış olmaktadır.

Bu gruplar arasından deplasman araştırması yapılacak bölge manuel olarak kırılarak kesitler arasında farklar belirlenmiştir (Şekil 6).

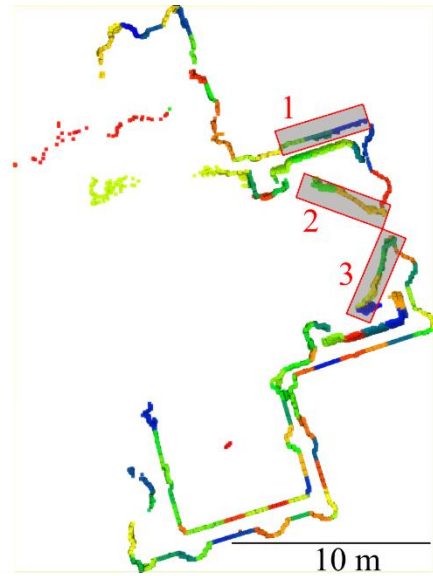
Kesitler alınırken kilise kenarlarındaki topoğrafyanın bozukluğundan dolayı yerden yükseklik değerleri özenle belirlenmiştir. Bu

sayede bina planlarını en iyi şekilde temsil eden minimum kottaki kesit referans kesit olarak belirlenmiştir.

Birinci önerilen yöntem sınıflandırılmış değerler arasında 2B k-nn uygulanmasıdır (Şekil 7). Diğer yöntem ise robust regresyon modellerinin en alt ve en üst kesitler arasında oluşturularak karşılaştırılmasıdır (Şekil 8 ve Şekil 9).

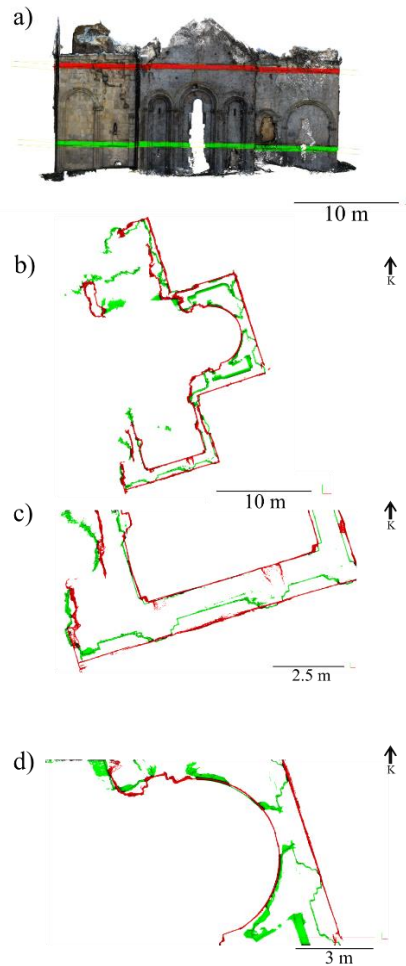


Şekil 4. a) Tbeti Kilisesi Doğu-Batı yönünden görünümü, b) yoğun nokta bulutlarının görünümü, c) mesh model görünümü, d) batı-doğu yönünden mesh model görünümü



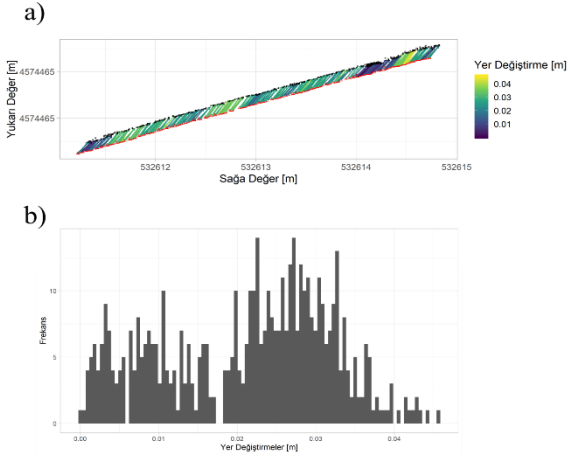
İnceleme alanları

Şekil 5. hkmeans kümeleri



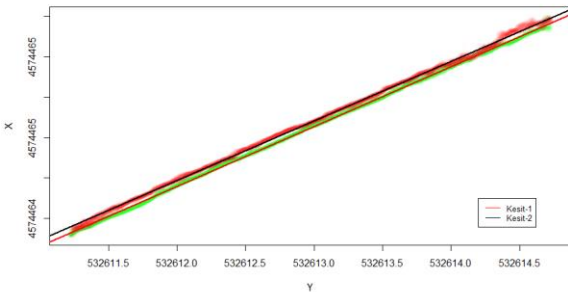
Şekil 6. Yapı üzerinden alınan kesitler a) kesit yerlerinin yapı üzerinde gösterimi, yeşil renk alt kesit 1261.44 m, kırmızı renli kesit üst kesit 1268.43 m, b) yapının plan görünümü, c) güney yönündeki duvar yapısı, d) apsis (iç) kesiti.

Nadir olarak karşılaşılan topoğrafyanın bozuk olduğu alanlarda önerilen yöntemin uygulanmasına dikkat edilmelidir. Zemin kotu 1258.85 m 'dir. İlk kesit yerden 2.29 m yükseklikte alınmıştır. Karşılaştırma kesiti (Kesit 2), 1268.43 m kotundan alınmıştır. Referans kesit 1261.14 m kotlu kesit olarak belirlenmiştir.

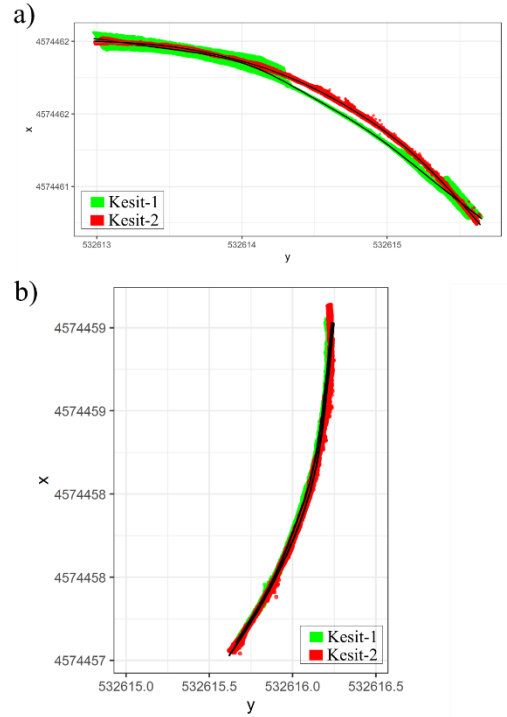


Şekil 7. a) Kuzey yönüne bakan duvarda oluşan deplasmanın vektörel gösterimi, b) deplasman miktarlarının dağılımları (Şekil 5'da 1 no'lu inceleme alanı)

Şekil 7'de yapının kuzey yönüne bakan duvar da 5 cm'ye varan deplasmanlar $k-mn$ yöntemiyle tespit edilmiştir. Batı yamacındaki arkad penceresi üzerindeki derin çatlağın ve kuzey cephesindeki büyük deplasmanların oluşumu yapının kuzey yönüne doğru hareket ettiğini işaret etmektedir. Hareketlerin yoğunluk olarak normal bir dağılım sergilemediği ve 1 ile 3 cm aralığında yoğunlaştığı görülmektedir (Şekil 7b). Üst kısımlarda oluşan bu yüklerin diğer bir etkisi de içyapıdaki kilise apsisinin kuzey kesimlerinde oluşan deplasmanlardır (Şekil 9a).



Şekil 8. Robust regresyon hatları (Şekil 5'da 1 nolu inceleme alanı)



Şekil 9. Polinomal eğri uydurma işlemi (İçyapı-apsis), a) kuzey kesim (Şekil 5'da 2 no'lu inceleme alanı), b) güney kesimi (Şekil 5'da 3 no'lu inceleme alanı)

Şekil 6d' de yer alan apsis segmentlerinin polinomal eğri uydurma işlemine tabi tutulduklarında Şekil 9'daki gibi modeller elde edilmiştir. Apsisin iç kısımlarında oluşan deplasmanlar, kesit ve polinomal eğri uydurma yöntemiyle hareketli ve yüke maruz kaldığını kanıtlamaktadır (Şekil 9). İç apsis yapısındaki deplasman kuzey yönde daha fazla olduğu apsisdeki kestirilen eğri farklılığından anlaşılmaktadır (Şekil 9). Bu tür yapılarda haç kısmındaki bu apsiler simetrik yapıdadır. Fakat bozulmaya maruz kaldığından dolayı simetriklik ortadan kalkmıştır. Kesit analizlerine göre kilisenin ön yüzünde (Doğu yönü) oluşan çatlaklar benzer şekilde iç kesimdeki apsis bloklarında da mevcuttur. Burada oluşan yüklerin apsis e gelen düzensiz yükler veya farklı zemin oturmalarından kaynaklandığı da düşünülmektedir.

Güneye bakan duvarlarda kuzey cephesindeki deplasmanlara göre daha küçük deplasmanlar tespit edilmiştir. Yapının batı kesimlerinde ise iç duvarlarındaki hasarlar ve göçükler kesit analizlerinde tespit edilmiştir.

Robust regresyon standart hatası Kesit 1 için Robust standart hata 0.005 m R^2 , 0.9997, dengelenmiş R^2 değeri 0.9997 olarak elde edilmiştir. Kesit 2 için ise Robust standart hata, 0.008 m, R^2 değeri 0.9992, dengelenmiş R^2 değeri 0.9992 olarak elde edilmiştir. Robust değerler irdelendiğinde oldukça yüksek R^2 değerleriyle kestirimin gerçekleştiği görülmektedir. Bu sonuçlara göre uydurulan regresyon modelinin güveni yüksek bir model olduğu söylenebilir.

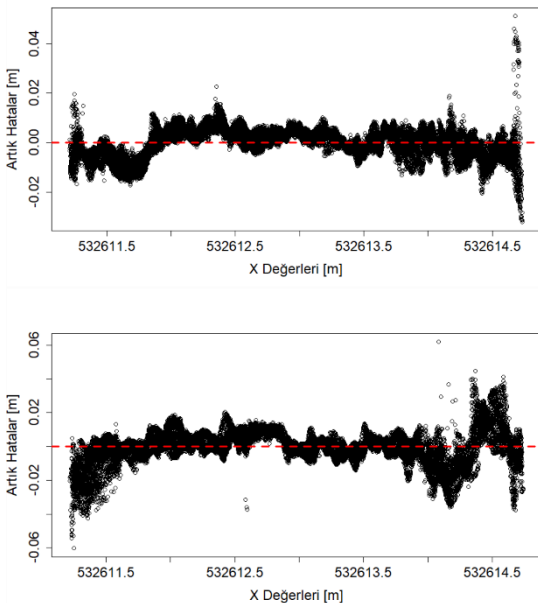
Şekil 10'de Robust regresyon değerlerine ait artık hataların grafiği gösterilmektedir. Kestirilen doğrularda herhangi bir yanlışlık belirtisi görülmemektedir. Ayrıca kesit aralıkları farklı değerlerde alındığında yapıda meydana gelen yerel değişimler de ortaya koyulabilmektedir. Artık hataların normallik testleri değerlendirildiğinde ise Kesit 2'de meydana gelen normallik testi Kesit 1'e göre olan normallikten uzaklaşmaktadır. Bu durum da Kesit 2'deki noktaların deplasmandan kaynaklı daha dağınık olduğunu da ortaya koymaktadır. Ayrıca standart hata değerleri de bu sonucu doğrulamaktadır.

4. SONUÇLAR ve TARTIŞMA

Bu çalışmayla, maliyeti düşük olan SfM görüntü işleme tekniği ile yüksek kaliteli 3B nokta bulutu ve model içerikleri üretilmiştir. Önerilen yöntemler deplasman analizlerinde basit fakat etkili yöntemlerdir. 3D1PERDEF R programlama kodları da analizlerin yapılmasına ve yapı hakkında bilginin elde edilmesine büyük katkı sağlamıştır.

Yapılan bu çalışmaya göre, Tbeti Kilisesi'nin kuzey cephesinde büyük deplasmanların olduğu tespit edilmiştir. Eğer onarım ve güçlendirme çalışmaları yapılmazsa ayakta kalan kısımlar kısa süre içinde yok olma tehlikesi ile karşı karşıya kalacaktır. Bu tahribat süreci depremler, yağma yapı malzemelerinin yorulmadan kaynaklı düşük dayanımı, bitki örtüsü ve insani etkenlere bağlı olarak hızlanabilmektedir.

Tarihi kilise, manastır ve cami gibi pek çok uygarlığın kültürel kimliğini taşıyan önemli yapıların onarımı; tarih, mimarlık ve mühendislik alanlarının ortaklaşa çalışması ile mümkündür. Taş duvarlı tarihi yağma yapılar heterojen formda olmaları nedeniyle yapısal davranışlarının belirlenmesi oldukça zordur (Ural, Oruç, Doğançün, & Tuluk, 2008).



Şekil 10. Robust regresyon artık hata değerleri

Özellikle bu yapıların onarımı ve güçlendirilmesi için yapılan çalışmalarda, yapı malzemelerinin doğrusal olmayan malzeme özellikleri ve harç malzemesinin mekanik özellikleri çok iyi tanımlanmalıdır.

Tbeti kilisesi, günümüzde herhangi bir amaçla kullanılmamaktadır. Böyle tarihi nitelikteki ve farklı dinlere göre kutsal sayılan bu mekânların bir an önce onarılıp güçlendirilerek ülke turizmine kazandırılması gerekmektedir.

Söz konusu yapının onarımı için bazı öneriler aşağıda sunulmuştur:

- Mevcut yapı harcından daha yüksek dayanımlı harç kullanılarak çatlaklar onarılabilir. Kullanılacak harç malzemelerinin var olan malzeme ile kimyasal uyumu çok önemlidir.
- Eğer restorasyon uygulaması yapılacaksa ve yapıya çatı eklenecekse taşıyıcı duvarlara fazla yük gelmesini engellemek için mümkün olduğunca hafif malzemelerin kullanılmasına dikkat edilmelidir.
- Yıkılan duvarlar ve kubbe nedeni ile rijit diyafram eksikliğinden dolayı cephe duvarlarının düzlem dışı hareketinin önüne geçmek için bu duvarların çelik profiller ile güçlendirilmesi gerekmektedir.
- Dolgu duvar tekniğinde inşa edilen duvarların orta bölümlerinde oluşmuş boşlukların harç enjeksiyonu ile doldurulması gerekmektedir.
- Dış duvar ile dolgu arasındaki kuvvet aktarımını sağlamak için enlemesine donatı eklenerek dış duvarın düzlemi dışına devrilmesi önlenilecektir.
- Çatlakların daha fazla açılmasını engellemek için çekme kuvvetini alan U biçimindeki özel donatılar ile dikilerek yüksek bir dayanım ve süneklik sağlanmalıdır.
- Duvarın dış yüzeyine tüm duvar boyunca açılacak yuvalara çekme gerilmesi taşıyabilecek yüksek dayanımlı ve şekil değiştirme özellikleri olan demir çubuklar veya lif takviyeli polimerlerden yapılmış gergi çubukları yerleştirilerek dışı sıva ile kapatılmalıdır.

Gelecek çalışmalarda ise aynı teknikler yardımıyla elde edilen verilerin yine tek periyotluk nokta bulutlarından yüzeylerde ve yağma taş bloklarındaki deplasmanların miktarını ve yüzeyel aşınma/dökülmelerin ortaya çıkarılmasında farklı yöntemlerin geliştirilmesi planlanmaktadır.

KAYNAKÇA

- Bevan, A., Li, X., Martínón-Torres, M., Green, S., Xia, Y., Zhao, K., ... Rehren, T. (2014). Computer vision, archaeological classification and China's terracotta warriors. *Journal of Archaeological Science*, 49, 249-254. doi:10.1016/j.jas.2014.05.014
- Brandonisio, G., Lucibello, G., Mele, E., & Luca, A. D. (2013). Damage and performance evaluation of masonry churches in the 2009 L'Aquila

- earthquake. *Engineering Failure Analysis*, 34, 693-714.
doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.engfailanal.2013.01.021
- Doğan, Y., & Yakar, M. (2018). Gis and Three-Dimensional Modeling for Cultural Heritages. *International Journal of Engineering and Geosciences*. doi:10.26833/ijeg.378257
- Elseberg, J., Magnenat, S., Siegwart, R., & Nuchter, A. (2012). Libnabo: fast K Nearest Neighbour library. Retrieved from https://github.com/ethz-asl/libnabo
- Elseberg, J., Magnenat, S., Siegwart, R., & Nüchter, A. (2012). Comparison of nearest-neighbor-search strategies and implementations for efficient shape registration. *Journal of Software Engineering for Robotics*, 3(1), 2-12.
- Karabörk, H., Göktepe, A., Yılmaz, H., Mutluoğlu, Ö., Yıldız, F., & Yakar, M. (2009). Tarihi ve kültürel varlıkların lazer tarama ve lazer nokta ölçme teknolojileri ile 3B modellenmesinde duyarlılık araştırması ve uygulama modelinin belirlenmesi. 12. *Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı*, 11-15.
- Kassambara, A., & Mundt, F. (2016). Factoextra: extract and visualize the results of multivariate data analyses. *R package version*, 1(3).
- Klasing, K., Althoff, D., Wollherr, D., & Buss, M. (2009). Comparison of Surface Normal Estimation Methods for Range Sensing Applications. *Icra: 2009 Ieee International Conference on Robotics and Automation, Vols 1-7*, 1977-1982.
- Koç, Y. S., & Akdeniz, F. (2007). Robust Tahmin Edicileri ve Özellikleri. *Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İstatistik Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi*.
- Korkut, T. (2010). *Artvin'deki İshan Ve Cevizli (Tbeti) Manastır Kiliselerindeki Taş Süsleme Örnekleri*. (Yüksek Lisans Tezi), YÜZÜNCÜ YIL ÜNİVERSİTESİ, Van.
- Korumaz, A. G., Dülgerler, O. N., & Yakar, M. (2011). KÜLTÜREL MİRASIN BELGELENMESİNDE DİJİTAL YAKLAŞIMLAR. *Selçuk Üniversitesi Mühendislik, Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 26(3), 67-83.
- Koutsoudis, A., Vidmar, B., Ioannakis, G., Arnaoutoglou, F., Pavlidis, G., & Chamzas, C. (2014). Multi-image 3D reconstruction data evaluation. *Journal of Cultural Heritage*, 15(1), 73-79. doi:10.1016/j.culher.2012.12.003
- Kwak, E., Datchev, I., Habib, A., El-Badry, M., & Hughes, C. (2013). Precise Photogrammetric Reconstruction Using Model-Based Image Fitting for 3D Beam Deformation Monitoring. *Journal of Surveying Engineering*, 139(3), 143-155. doi:10.1061/(asce)su.1943-5428.0000105
- Lowe, D. G. (2004). Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints. *International Journal of Computer Vision*, 60(2), 91-110. doi:10.1023/b:Visi.0000029664.99615.94
- Micheletti, N., Chandler, J. H., & Lane, S. N. (2015). Structure from motion (SfM) photogrammetry. *Geomorphological Techniques*.
- Ning, X., Li, F., Tian, G., & Wang, Y. (2018). An efficient outlier removal method for scattered point cloud data. *Plos One*, 13(8), e0201280. doi:10.1371/journal.pone.0201280
- Rakotosaona, M.-J., La Barbera, V., Guerrero, P., Mitra, N. J., & Ovsjanikov, M. (2019). POINTCLEANNET: Learning to Denoise and Remove Outliers from Dense Point Clouds. *arXiv preprint arXiv:1901.01060*.
- Remondino, F., Spera, M. G., Nocerino, E., Menna, F., & Nex, F. (2014). State of the art in high density image matching. *The Photogrammetric Record*, 29(146), 144-166. doi:10.1111/phor.12063
- Rodríguez, A. S., Rodríguez, B. R., Rodríguez, M. S., & Sanchez, P. A. (2019). Laser scanning and its applications to damage detection and monitoring in masonry structures. In
- Rousseeuw, P. j. (1987). *Robust Regression and Outlier Detection*: John Wiley & Sons.
- Rusu, R. B., Marton, Z. C., Blodow, N., Dolha, M., & Beetz, M. (2008). Towards 3D Point cloud based object maps for household environments. *Robotics and Autonomous Systems*, 56(11), 927-941. doi:10.1016/j.robot.2008.08.005
- Suziedelyte-Visockiene, J., Bagdziunaite, R., Malys, N., & Maliene, V. (2015). Close-Range Photogrammetry Enables Documentation of Environment-Induced Deformation of Architectural Heritage. *Environmental Engineering and Management Journal*, 14(6), 1371-1381.
- Team, R. C. (2016). R: A Language and Environment for Statistical Computing In *R Foundation for Statistical Computing* (Vol. Vienna, Austria).
- Ulvi, A., & Yakar, M. (2010). An experimental study on preparing photogrammetric rolove plans of antique theatres. *International Journal of Physical Sciences*, 5(7), 1086-1092.

- Ural, A., Oruç, S., Doğangün, A., & Tuluk, Ö. İ. (2008). Turkish historical arch bridges and their deteriorations and failures. *Engineering Failure Analysis*, 15(1-2), 43-53. doi:10.1016/j.engfailanal.2007.01.006
- Uray, F., Varlık, A., & Metin, A. (2018). Üç Boyutlu Kent Modellerinde Ayrıntı Düzeyi Kavramı İnce Minareli Medrese (Konya) Örneği. *Geomatik*, 74-83. doi:10.29128/geomatik.369065
- Vláko, J., Greif, V., Holzer, R., Hencelova, L., & Jezny, M. (2007). Rock Deformation Monitoring at Cultural Heritage Sites in Slovakia. In K. Sassa, H. Fukuoka, F. Wang, & G. Wang (Eds.), *Progress in Landslide Science* (pp. 261-273). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Yakar, M. (2011). Using Close Range Photogrammetry to Measure the Position of Inaccessible Geological Features. *Experimental Techniques*, 35(1), 54-59. doi:10.1111/j.1747-1567.2009.00583.x
- Yilmaz, H. M., & Yakar, M. (2006). Yersel Lazer Tarama Teknolojisi. *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 2(2), 43-48.
- Yilmaz, H. M., Yakar, M., Gulec, S. A., & Dulgerler, O. N. (2007). Importance of digital close-range photogrammetry in documentation of cultural heritage. *Journal of Cultural Heritage*, 8(4), 428-433. doi:10.1016/j.culher.2007.07.004
- Yilmaz, H. M., Yakar, M., & Yildiz, F. (2008). Documentation of historical caravansaries by digital close range photogrammetry. *Automation in Construction*, 17(4), 489-498. doi:10.1016/j.autcon.2007.09.003
- Zeybek, M. (2017). *Yüksek Çözünürlüklü Topoğrafik Veriler Yardımıyla Heyelanların İzlenmesi* (Doktora), Selçuk Üniversitesi, Konya. (10165841)
- Zeybek, M., & Şanlıoğlu, İ. (2019). Point cloud filtering on UAV based point cloud. *Measurement*, 133, 99-111. doi:10.1016/j.measurement.2018.10.013