

# KARMAŞIK TOPOĞRAFYADA KÜLTÜREL MİRAS BELGELENMESİ VE RESTORASYON PLANLAMASI: BAHÇELİ KALESİ'NDE YERSEL LİDAR DESTEKLİ YAKLAŞIM

Mehmet Fatih AYDIN<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Bağımsız Araştırmacı, Bursa, Türkiye  
dr.mimarfatihaydin@gmail.com, 0000-0002-4904-6435

## ÖZET

Bu çalışma, Artvin ili Yusufeli ilçesi sınırlarında yer alan ve karmaşık topoğrafik yapısı ile dikkat çeken Bahçeli Kalesi'nin sayısal belgeleme ve koruma planlaması süreçlerine yönelik olarak gerçekleştirilmiştir. Yapının mevcut durumunu yüksek doğrulukla belgelemek ve bozulma tipolojisini detaylandırmak amacıyla, Yersel Lidar Taraması (YLT) ve yoğunluk (intensity) tabanlı yüzey analizleri kullanılmıştır. Çalışma kapsamında, farklı açılardan gerçekleştirilen taramalarla oluşturulan yüksek yoğunluklu nokta bulutu veri seti, detaylı bozulma haritalarının ve üç boyutlu yapı modelinin temelini oluşturmuştur. Bu veriler üzerinden hazırlanan bozulma sınıflandırması, yapı üzerindeki malzeme kaybı, çatlak gelişimi, biyolojik etkiler ve tuzlanma gibi temel bozulma türlerinin mekânsal dağılımını hassas biçimde ortaya koymuştur. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda geliştirilen müdahale paftaları, restorasyon planlamasına doğrudan entegre edilerek acil müdahale, koruyucu müdahale ve izleme gerektiren alanların belirlenmesini sağlamıştır. Böylece, yapı üzerinde uygulanacak koruma ve restorasyon çalışmalarının bilimsel temele dayalı, ölçülebilir ve izlenebilir hale gelmesi amaçlanmıştır. Çalışmanın özgün katkısı, YLT teknolojisinin yalnızca belge üretimi değil, aynı zamanda bozulma tipolojisinin sınıflandırılması, müdahale planlaması geliştirilmesi ve uygulama sonrası izleme süreçlerine entegrasyonu açısından etkin biçimde kullanılmasıdır. Sonuç olarak, Bahçeli Kalesi özelinde gerçekleştirilen bu uygulama, Türkiye'de kırsal ve zor topografyalı kültürel miras yapılarına yönelik sayısal teknoloji tabanlı koruma yaklaşımları için uygulanabilir ve geliştirilebilir bir model sunmakta; literatüre de yöntemsel ve uygulamalı bir katkı sağlamaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** Yersel Lidar Taraması, Kültürel Miras Belgelemesi, Bozulma Haritalaması, Restorasyon Planlaması, Sayısal Koruma Teknolojileri

## CULTURAL HERITAGE DOCUMENTATION AND RESTORATION PLANNING IN COMPLEX TOPOGRAPHY: A TERRESTRIAL LIDAR- SUPPORTED APPROACH AT BAHÇELİ CASTLE

### ABSTRACT

This study focuses on the processes of digital documentation and conservation planning for Bahçeli Castle, located in the Yusufeli district of Gümüşhane province, an area characterized by complex topography. To accurately document the structure's current condition with high accuracy and to detail its deterioration typology, Terrestrial Laser Scanning (TLS) and intensity-based surface analyses were applied. A high-density point cloud dataset, generated through multi-angle scans, served as the foundation for creating detailed deterioration maps and a three-dimensional structural model. The classification of deterioration revealed the spatial distribution of key types, including as material loss, crack formation, biological colonization, and salt efflorescence. The resulting intervention plans were integrated into the conservation strategy, enabling the identification of urgent intervention areas, preventive maintenance zones, and - regions requiring monitoring. These approaches ensure that conservation and restoration efforts are scientifically grounded, measurable, and traceable. The main contribution of this study lies in the effective use of TLS not only for documentation but also for deterioration classification, intervention planning, and post-intervention monitoring. The methodology developed for Bahçeli Castle offers a practical model for applying digital technologies to the conservation of rural and topographically challenging cultural heritage structures in Turkey.

**Keywords:** Terrestrial Lidar Scanning, Cultural Heritage Documentation, Deterioration Mapping, Restoration Planning, Digital Conservation Technologies

### ARAŞTIRMA MAKALESİ / RESEARCH ARTICLE

Geliş/Received: 21.06.2025 Kabul/Accepted: 27.10.2025

Aydın, M. F. (2025), Karmaşık topoğrafyada kültürel miras belgelenmesi ve restorasyon planlaması: Bahçeli Kalesi'nde yersel lidar destekli yaklaşım. KARESİ Journal of Architecture, 4(2), 154-176.

## EXTENDED SUMMARY

### Research Problem and Purpose

Bahçeli Castle, situated in the village of Bahçeli in Turkey's rural interior, is a historically and strategically significant cultural heritage site featuring multi-layered architectural characteristics. Perched atop a steep rock formation and constructed using vernacular masonry techniques, the castle exhibits evidence of various construction phases and functions, which remain largely undocumented in academic literature. The castle's current condition —characterized by partial collapse, structural instability, and severe material erosion—necessitates urgent and methodologically rigorous documentation to support future conservation efforts.

While digital documentation technologies such as Terrestrial Laser Scanning (TLS) and spectral imaging have become widespread globally, their application in Turkey remains largely confined to geometric recording phases. Integrated approaches that combine high-density spatial data, material analysis, and conservation planning are rare, particularly for rural and topographically challenging sites. Therefore, this study aims to bridge that gap by providing a comprehensive multi-scalar documentation of Bahçeli Castle using advanced laser scanning technologies, followed by analytical visualization and interpretive conservation modeling. The goal is not only to document the monument's current physical state with high accuracy but also to contribute a replicable methodology to the national and international literature on heritage documentation and preservation.

### Methodology

The primary data for this study were collected using a FARO Focus X130 terrestrial laser scanner. During the fieldwork, 14 scanning stations were strategically positioned at various elevations and orientations to ensure optimal coverage of the castle's architecture and its rocky topographical base. This approach resulted in a high-resolution point cloud with an average density of 3500 to 4500 points per square meter, enabling detailed identification of architectural elements, surface degradation, and volumetric relationships.

The raw data were preprocessed using FARO Scene software. This process involved point alignment across stations (registration), noise filtering, and segmentation. The processed point cloud was then subjected to RGB mapping through intensity-to-color conversion to produce visually enriched surface models. These models enabled the identification of different material zones, surface textures, and potential degradation patterns.

Next, the dataset was exported to AutoCAD for vector-based analysis. Orthophoto images and elevation models were converted into planimetric drawings and overlaid with observational data to support stratigraphic evaluations. In addition to conventional mesh modeling, I-RGB visualizations and elevation-based surface mapping were employed to detect material detachment, vertical displacements, and micro-topographical anomalies—particularly on sloped wall surfaces and cliff interfaces.

## Findings

The laser scanning and visualization process revealed several critical aspects of Bahçeli Castle's condition and construction. Key findings include:

- Identification of distinct construction layers, especially at the junctions of vertical wall masses and rock base formations.
- Severe surface erosion is present on the southwest-facing walls exposed to prevailing winds and rainfall, as confirmed by both RGB imagery and elevation differential mapping.
- Displacement and partial collapse of vertical masonry segments are, evident from vertical deviations in point cloud alignments and are confirmed by elevation maps.
- Evidence of differential weathering and material heterogeneity suggests at least two construction phases each characterized by distinct masonry techniques and mortar compositions.

Moreover, spectral rendering of point cloud data enabled the spatially interpretation of damage zones that are not easily visible through traditional field surveys. The integration of plan, section, and elevation outputs provided a comprehensive visual narrative of the site's degradation and conservation requirements.

## Conclusions and Recommendations

Bahçeli Castle stands as a rare example of rural defensive architecture located in a topographically complex environment. This study provides the most detailed digital documentation of the site to date and emphasizes the importance of high-density terrestrial laser scanning TLS data in guiding conservation decisions. The findings affirm that spotty or geometrically-limited digital documentation is insufficient for effective conservation planning, particularly for multi-layered, eroding, and structurally vulnerable heritage sites.

One of the key conclusions is the necessity of integrating spectral, geometric, and material data in a single, interoperable workflow. In Turkey, where many rural heritage structures remain undocumented

or insufficiently studied, this approach provides a replicable and scalable model. Future conservation strategies must prioritize continuous use, even under adaptive reuse scenarios- to ensure routine maintenance and foster community engagement.

This study contributes to expanding the methodological toolkit available to heritage professionals and conservation authorities. By developing awareness and establishing standards for complex rural sites like Bahçeli Castle, we can better protect the spatial, cultural, and architectural values they embody. Moreover, if adapted more widely, this integrated approach can transform how topographically sensitive heritage sites are analyzed, preserved, and reintroduced to the public.

## 1. GİRİŞ

Günümüzde kültürel miras yapı ve alanlarının belgelenmesi, koruma stratejilerinin oluşturulması ve sürdürülebilir yönetim politikalarının geliştirilmesi süreçlerinde, sayısal teknolojilerin kullanımı büyük önem kazanmıştır (Grussenmeyer et al., 2008; Lerma et al., 2011). Özellikle Lidar (Light Detection and Ranging) teknolojisi, yüksek doğrulukta üç boyutlu veri üretme kapasitesi sayesinde, karmaşık geometrilere ve erişilmesi zor topoğrafyalara sahip kültürel miras alanlarında belgeleme ve analiz açısından güçlü bir araç olarak öne çıkmaktadır. Karmaşık topografya” ifadesi, bu çalışmada yalnızca betimleyici bir kavram olarak değil, literatürde kullanılan teknik bir terim olarak da tercih edilmiştir. Uluslararası araştırmalarda özellikle yüksek eğimli yamaçlar, sarp kaya kütleleri, çok yönlü eğimlerin bir arada bulunduğu alanlar ve erişimi güç jeomorfolojik formasyonlar ‘complex topography’ olarak tanımlanmaktadır (Fassi, Fregonese, Ackermann & De Troia, 2013). Bu kavram, yüzeyin düzensiz morfolojisinin belgeleme, ölçüm ve modelleme süreçlerinde ek zorluklar yarattığını ifade eder. Geleneksel ölçüm yöntemleri bu tür alanlarda sınırlı kalmakta, lazer tarama (LiDAR) ve yüksek çözünürlüklü fotogrametri gibi teknolojiler ise karmaşık yüzeylerin yüksek doğrulukla belgelenmesine olanak tanımaktadır. Bahçeli Kalesi’nin konumlandığı dik kayalık kütle, dar ulaşım yolları, farklı eğim derecelerinin kısa mesafede değişmesi ve sarp vadilere açılan uçurum kenarları nedeniyle literatürdeki bu tanıma birebir uymaktadır. Dolayısıyla makalenin başlığında kullanılan ‘karmaşık topografya’ ifadesi, hem saha koşullarının betimlenmesi hem de kullanılan belgeleme yöntemlerinin bu zorlukları aşma kapasitesini vurgulamak için özellikle seçilmiştir.

Lidar teknolojisi, yapıların geometrik doğruluğunu yüksek hassasiyetle belgelemekle kalmamakta, aynı zamanda yüzey morfolojisinin ve bozulma süreçlerinin detaylı analizine de imkan sağlamaktadır (Fassi et al., 2013). Bu doğrultuda Lidar ile üretilen nokta bulutu verileri, çeşitli iş akışları üzerinden ortofoto, yüzey haritası ve bozulma haritaları üretiminde kullanılmakta; CAD ortamları ve HBIM (Heritage Building Information Modelling) sistemleri ile entegrasyonu da mümkün hale gelmektedir (Rodríguez-Gonzálvez et al., 2017). Son yıllarda, spektral görüntüleme teknikleri ile Lidar verilerinin bütünleşik kullanımı, yüzey bozulma tiplerinin daha doğru sınıflandırılmasına olanak sağlayarak koruma süreçlerinin optimizasyonuna katkıda bulunmaktadır (Remondino & Rizzi, 2010). Bu çalışma kapsamında da benzer şekilde, Bahçeli Kalesi örneğinde yüksek çözünürlüklü Lidar taraması ve spektral görüntüleme yöntemleri birlikte kullanılarak, yapının mevcut fiziksel durumu ve yüzey bozulma süreçleri kapsamlı biçimde analiz edilmiştir.

### 1.1. Türkiye’deki Uygulamalar ve Literatürdeki Boşluk

Türkiye’de kültürel miras yapı ve alanlarının belgelenmesinde sayısal üç boyutlu belgeleme yöntemleri giderek daha yaygın kullanılmakta olup, bu kapsamda Lidar teknolojisinin de uygulama örnekleri

artmaktadır (Yastıklı, 2007). Özellikle taşınmaz kültür varlıklarının rölöve, restitüsyon ve restorasyon süreçlerinde Lidar verilerinden yararlanılan çeşitli projeler gerçekleştirilmiştir. Bununla birlikte, mevcut uygulamaların çoğunluğu geometrik belge üretimi ile sınırlı kalmakta; bozulma süreçlerinin parametrik analizi, yüzey morfolojisi değişimlerinin izlenmesi ve koruma planlamasına doğrudan veri üretme gibi ileri düzey uygulama örnekleri Türkiye literatüründe oldukça sınırlıdır (Fassi et al., 2013).

Uluslararası literatürde ise, Lidar verileri ile spektral görüntüleme verilerinin bütünleşik kullanımı, özellikle son yıllarda yüzey bozulma sınıflandırması ve malzeme analizleri için etkin ve yenilikçi bir yöntem olarak kabul edilmektedir (Lerma et al., 2011). Bu yöntem, özellikle karmaşık taş yüzeylerde biyolojik ve fiziksel bozulmaların ayrıntılı olarak haritalanmasına olanak sağlamakta ve böylece koruma ve restorasyon stratejilerinin daha bilinçli biçimde geliştirilmesine katkıda bulunmaktadır (Grussenmeyer et al., 2008).

Türkiye’de bu tür bütünleşik yaklaşımı kullanan örneklerin sınırlı olması, konunun uygulama pratiği ve literatür açısından geliştirilmesi gereken bir alan olduğunu göstermektedir. Bu bağlamda Bahçeli Kalesi üzerine yürütülen bu çalışma, yüksek çözünürlüklü Lidar verileri ile birlikte I-RGB, Spot ve Normal spektral görsellerin bütünleşik biçimde değerlendirilmesi bakımından öncü ve yenilikçi bir uygulama örneği niteliğindedir. Çalışma aynı zamanda, restorasyon ve müdahale planlaması süreçlerine doğrudan veri üretme potansiyeli ile Türkiye’de kültürel mirasın belgelenmesi ve korunması alanındaki uygulamalara katkı sağlayacak özgün bir yaklaşım sunmaktadır.

## 1.2. Bahçeli Kalesi ve Çalışmanın Amacı

Bahçeli Kalesi, Artvin ili Yusufeli ilçesi Bahçeli köyü sınırları içerisinde, bölgeye hâkim bir ana kaya kütlesi üzerinde konumlanan ve Ortaçağ dönemine tarihlenen önemli bir savunma yapısıdır (Ünsal, 2010; Artvinli, 2013). Moloz taş duvar örgü sistemi ile inşa edilmiş olan yapının, Ortaçağ Gürcü kaleleri tipolojisine ait olduğu, plan özellikleri ve malzeme kullanımı ile literatürde belirtilmektedir (Ünsal, 2010). Yapının ilk inşa evresi tam olarak belgelenememiş olmakla birlikte, bölgede hâkim olan tarihsel süreç ve benzer yapıların verileri doğrultusunda, Bizans sonrası dönem ve Ortaçağ Gürcü hâkimiyet evresi içerisinde değerlendirilmesi önerilmektedir (Artvinli, 2013; Aytekin & Aktaş, 2010). Stratejik konumu itibarıyla, Çoruh Havzası üzerinde önemli geçiş yollarını denetleyen bu tür kalelerin, jeopolitik ve ticari güzergâhlar üzerinde etkin rol oynadığı, askeri ve gözetim işlevleri taşıdığı bilinmektedir (Ünsal, 2010; Toksoy, 2010).

Bahçeli Kalesi’nin mevcut durumu, yüksek eğimli topografik yapı, erişimin zorluğu ve zamana bağlı fiziksel bozulmalar nedeniyle büyük oranda zarar görmüş durumdadır. Yapıda; malzeme kaybı,

biyolojik bozulma, taş yüzey deformasyonları, çatlak oluşumları ve derz erozyonu gibi ciddi bozulma süreçleri gözlemlenmektedir (Ünsal, 2010; Artvinli, 2013).

Bu çalışma kapsamında temel amaçlar şunlardır: Bahçeli Kalesi'nin mevcut fiziksel durumunu yüksek çözünürlüklü Lidar taraması ve spektral görüntüleme yöntemleriyle belgelemek, yapının bozulma tipolojisini parametrik ve mekânsal olarak sınıflandırmak, elde edilen verileri restorasyon ve koruma planlamasına doğrudan entegre edilebilir nitelikte görselleştirmek, Türkiye'de sınırlı olan Yersel Lidar tabanlı bozulma analizleri ve restorasyon planlaması entegrasyonuna özgün bir katkı sunmak ve ulusal/uluslararası literatüre referans olacak bir örnek oluşturmak ve ulusal/uluslararası literatüre referans olacak bir örnek oluşturmak. Çalışmanın çıktıları, benzer topografik ve yapısal özelliklere sahip kültürel miras alanlarının belgelenmesi ve korunması için model niteliğinde kullanılacak bir yöntemsel çerçeve geliştirmeyi de hedeflemektedir.

## 2. YÖNTEM

Bahçeli Kalesi, Artvin ili Yusufeli ilçesi Bahçeli köyü sınırları içerisinde, Çoruh Vadisi'ni gören ve bölgeye hâkim bir kaya kütlesi üzerinde konumlanmaktadır (Ünsal, 2010). Kalenin bulunduğu alan, tarihsel olarak Klarçeti ve Tao-Klarçeti bölgelerinin bir parçası olup, Bizans sonrası dönemden itibaren sırasıyla Gürcü, Selçuklu ve Osmanlı hakimiyet evrelerine sahne olmuştur (Toksoy, 2010; Artvinli, 2013).

Çoruh Havzası ve çevresinde yer alan bu tip kaleler, tarih boyunca askeri-stratejik amaçlarla inşa edilmiş; geçiş yollarının denetlenmesi, sınır savunması ve bölgesel hakimiyetin korunması gibi işlevler üstlenmişlerdir (Ünsal, 2010). Bölgedeki benzer yapılar arasında Çevreli Kalesi, Tekkale Kalesi, Kılıçkaya Kalesi ve Bostancı (Utavi) Kalesi gibi örnekler yer almaktadır; Bahçeli Kalesi de bu Ortaçağ Gürcü kaleleri tipolojisinin önemli örneklerinden biridir (Ünsal, 2010).

Plan özellikleri ve malzeme kullanımına bakıldığında, Bahçeli Kalesi'nin moloz taş duvar örgüsü ile inşa edildiği, Ortaçağ dönemine ait karakteristik özellikler taşıdığı ve Gürcü inşa geleneği ile uyum gösterdiği belirtilmektedir (Ünsal, 2010; Artvinli, 2013). Yapının ilk inşa evresi kesin olarak belgelenememekle birlikte, Bizans sonrası - Gürcü hakimiyet evresi içinde inşa edildiği genel olarak kabul edilmektedir (Toksoy, 2010).

Mevcut kalıntılar, duvar izleri, kapı açıklıkları, su sarmıcı ve kule kalıntıları ile birlikte, yapının savunma ve gözetim işlevleri açısından kurgulandığını göstermektedir (Aytekin & Aktaş, 2010). Bölgedeki tarihsel gelişmeler bağlamında, 19. yüzyılda yaşanan Osmanlı-Rus Savaşları sırasında yapının ciddi tahribata uğradığı, mevcut fiziksel bozulmaların büyük ölçüde bu dönemin etkileriyle ilişkili olduğu

değerlendirilmektedir (Artvinli, 2013). Günümüzde, Bahçeli Kalesi'nin ulaşımı zorlu, yüksek eğimli bir topoğrafyada yer almakta olup, bozulma süreçleri aktif şekilde devam eden ve koruma müdahalelerine ihtiyaç duyan bir yapı konumundadır.

Bahçeli Kalesi, Artvin ili Yusufeli ilçesi Dere Kapı mevkiinde, yaklaşık 700 m rakımda yer almaktadır. Kale, 60 m yüksekliğindeki hâkim bir ana kaya kütle üzerine inşa edilmiştir. Doğu-batı doğrultusunda uzanan yapıya, diğer cephelerin sarp kayalık ve uçurumlarla çevrili olması nedeniyle yalnızca güney yönünden giriş sağlanmaktadır. Bu konumu sayesinde kale, çevreye tam hâkimiyet kurabilen stratejik bir noktadadır. Güney bölümünde bir su sarnıcı bulunmaktadır; sarnıcın içi, irili ufaklı taşların kireç harcıyla örülmesiyle oluşturulmuştur. Günümüzde hâlâ ayakta kalan sur duvarlarının, Ortaçağ dönemine tarihlenebilecek moloz taş örgü tekniğiyle inşa edildiği anlaşılmaktadır (Şekil 1).



a) Bahçeli Kalesi Konumu (Harita Genel Müdürlüğü, 2025, yazar tarafından düzenlenmiştir)



b) Bahçeli Kalesi Kuşbakışı Görünümü (Yazarın Kişisel Arşivi)



c) Bahçeli Kalesi Güneybatı Yönünden Bakış (Yazarın Kişisel Arşivi)



d) Bahçeli Kalesi İç Kısmında Sıvasız Duvarlar (Yazarın Kişisel Arşivi)

Şekil 1. Bahçeli Kalesi'nin konumu ile güncel durumunu yansıtan farklı açılardan görüntüleri

## 2.1. Lidar Veri Toplama Süreci

Bu çalışmada Bahçeli Kalesi'nin mevcut fiziksel durumunun yüksek doğrulukta belgelenmesi amacıyla, Yersel Lazer Tarama (YLT / Terrestrial Laser Scanning - TLS) yöntemi kullanılmıştır. YLT yöntemi, karmaşık geometrilere ve erişilmesi güç topoğrafyalara sahip kültürel miras yapı ve alanlarının üç boyutlu belgelenmesinde yüksek doğruluk ve detay seviyesi sağlayan etkili bir teknolojidir

(Grussenmeyer et al., 2008; Fassi et al., 2013). Alan çalışmaları kapsamında, FARO Focus X130 model Lidar tarayıcı kullanılmıştır. Saha çalışmaları sırasında, yapının farklı yükseklik ve açıdan en iyi kapsama sağlanacak şekilde yaklaşık 14 farklı adet tarama istasyonu kurulmuştur. Tarama sırasında, yapının dış cepheleri, iç alanları, kaya oturum yüzeyi ve çevre topoğrafik yapı kapsamlı şekilde belgelenmiştir.

Tarama işlemi sırasında elde edilen ham nokta bulutu verilerinin ortalama yoğunluğu yaklaşık olarak 3500–4500 pt/m<sup>2</sup> seviyesinde gerçekleşmiştir. Bu yoğunluk seviyesi, çalışma kapsamında hedeflenen bozulma sınıflandırması ve yüzey morfolojisi analizleri için yeterli bir detay düzeyi sağlamıştır. Elde edilen tarama verileri, Faro Scene yazılımı aracılığıyla ön işleme tabi tutulmuş, tarama istasyonları arasında noktaların hizalanması, gürültü azaltma ve gereksiz veri noktalarının temizlenmesi işlemleri gerçekleştirilmiştir.

Özellikle Bahçeli Kalesi'nin topoğrafik konumu ve yüksek eğimli kaya oturumu dikkate alındığında, çok yönlü ve yüksek yoğunluklu veri toplama gerekliliği ortaya çıkmıştır. Bu nedenle saha çalışması sırasında, yapının tüm yönlerden optimum şekilde taranabilmesi için farklı mesafe ve yükseklik seviyelerinde ek istasyonlar da kurulmuştur. Bu aşamada üretilen hizalanmış ve optimize edilmiş nokta bulutu, sonraki aşamada spektral görüntüleme, ortofoto üretimi ve bozulma haritalama süreçlerinin temel veri setini oluşturmuştur. Bu noktada ayrıca, yapının ve çevresel topoğrafyanın genel görünümünü ortaya koyan yüksek yoğunluklu nokta bulutu modeli de üretilmiştir (Şekil 2a).

## 2.2. Veri İşleme ve Ortofoto Üretimi

Tarama işlemi sonrasında elde edilen ham nokta bulutu verileri, AutoCAD yazılımı ortamında işlenmiştir. Bu aşamada ilk olarak, farklı tarama istasyonlarına ait veri kümeleri global koordinat sistemine göre hizalanmış ve noktalar arası uyumlaştırma sağlanmıştır (Grussenmeyer et al., 2008; Fassi et al., 2013). Ardından gürültü azaltma (noise filtering) işlemleri gerçekleştirilmiş ve gereksiz veri noktaları (örn. bitki örtüsü, zemin fazlalıkları) temizlenmiştir (Rodríguez-Gonzálvez et al., 2017). Bu işlem sonucunda optimize edilmiş, yüksek yoğunluklu nokta bulutu veri seti elde edilmiştir.

Sonraki aşamada, bu nokta bulutu kullanılarak mesh (yüzey modeli) oluşturma ve yüksek çözünürlüklü ortofoto görüntülerin üretimi gerçekleştirilmiştir. RGB verileri ile zenginleştirilmiş bu ortofoto görüntüler, AutoCAD ortamına aktarılmış ve burada vektörleştirme çalışmaları yapılmıştır (Fassi et al., 2013). Bahçeli Kalesi'nin tüm cepheleri ve topoğrafik oturum alanı, bu süreçte detaylı biçimde katmanlı vektör çizimlerine dönüştürülmüş ve bozulma haritalarının hazırlanması için temel veri sağlanmıştır. Ayrıca, bu süreç sonunda elde edilen ortofotolar, müdahale planlarının geliştirilmesine de doğrudan katkıda bulunmuştur.

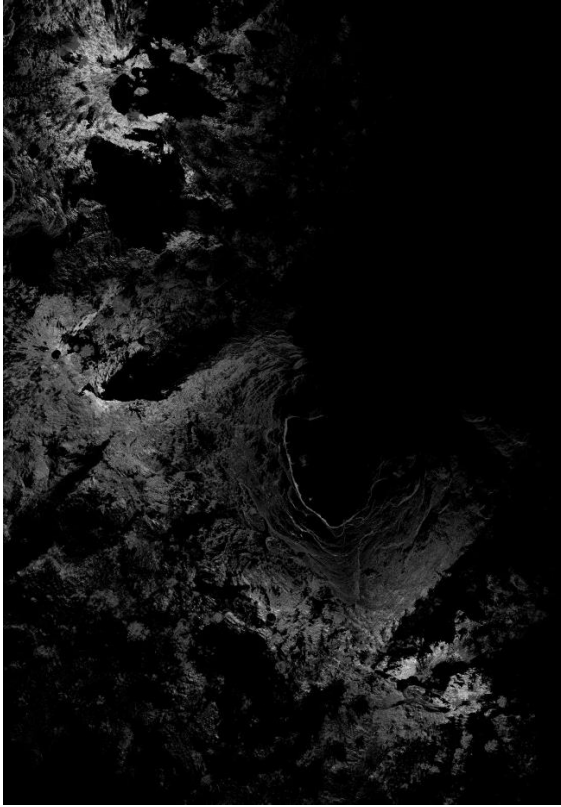
### 2.3. Lidar Tabanlı Yoğunluk Görselleştirme ve Yüzey Analizi

Bu çalışmada, Lidar taraması sonucunda elde edilen yoğunluk (intensity) verileri, yapı yüzeylerinin detaylı analizine ve bozulma tipolojisinin desteklenmesine katkı sağlamak amacıyla değerlendirilmiştir.

Intensity (I) verileri, Lidar cihazı tarafından gönderilen lazer ışınının yüzeye çarpıp geri yansıyan ışının yansıma gücünü ölçen bir parametredir ve yüzeyin malzeme özelliklerine, doku durumuna ve yüzey bozulma düzeyine bağlı olarak değişiklik göstermektedir (Armesto-González et al., 2010).

Bu kapsamda, işlenmiş nokta bulutu üzerinden aşağıdaki görselleştirme türleri hazırlanmıştır:

- a) I-RGB Görüntüleme (Intensity + RGB); malzeme farklılıklarının, doku kayıplarının ve biyolojik etkilerin daha iyi algılanmasını sağlamıştır (Şekil 2b).



a) Bahçeli Kalesi ve Çevresinin Nokta Bulutu Intensity Görselleştirmesi (Lidar Verisi Tabanlı Genel Yerleşim Modeli)

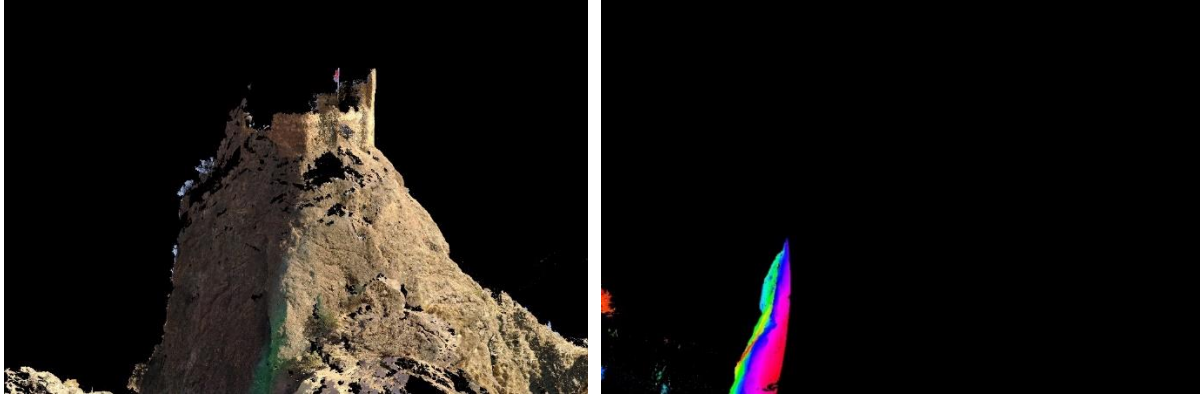


b) Bahçeli Kalesi I-RGB Görüntüleme (Nokta Bulutu Verisi Üzerinden Malzeme ve Yüzey Farklılıkları Analizi)

**Şekil 2.** Bahçeli Kalesi ve çevresine ait nokta bulutu verilerinin farklı görselleştirme teknikleri ile değerlendirilmesi (Yazarın Kişisel Arşivi)

- b) Intensity (I) Görüntüleme; yüzeyin lazer yansıma özelliklerine dayalı olarak bozulma derecesinin belirlenmesine yardımcı olmuştur (Şekil 3a).

c) Distance/Elevation Color Mapping; yüzey morfolojisindeki yükseklik farklarının ve geometrik sapmaların görselleştirilmesini sağlamıştır (Şekil 3b).



a) Bahçeli Kalesi Intensity (I) Görüntüleme  
(Yüzey Bozulma Ön Analizi için)

b) Bahçeli Kalesi Distance/Elevation Color  
Mapping (Geometrik Deformasyon Analizi)

**Şekil 3.** Bahçeli Kalesi'ne ait nokta bulutu üzerinden üretilmiş iki farklı görselleştirme yöntemi (Yazarın Kişisel Arşivi)

Bu görselleştirme türleri, bozulma haritalarının oluşturulması sürecinde temel referans katmanlar olarak kullanılmış ve vektör tabanlı bozulma sınıflandırması için destekleyici veri üretmiştir. Lidar intensity analizine dayalı yüzey değerlendirme yöntemi, özellikle karmaşık taş yüzeyli kültür varlıklarında bozulma süreçlerinin mekânsal olarak daha iyi anlaşılmasına olanak tanımakta ve restorasyon planlaması için önemli bir katkı sağlamaktadır (Fassi et al., 2013; Armesto-González et al., 2010). Bu çalışmada da Bahçeli Kalesi özelinde, intensity verilerinin sağladığı detaylı yüzey analizi çıktıları, bozulma tipolojisinin hassasiyetini artırmış ve müdahale planlamasına doğrudan destek sağlamıştır.

### 3. BULGULAR

Bahçeli Kalesi'nin mevcut durumunun dijital belgelenmesi sürecinde üretilen genel nokta bulutu verileri, yapının ve topoğrafyanın karmaşık geometrisini yüksek doğrulukla ortaya koymuştur. Taranan veri seti, FARO Focus X130 model lazer tarayıcı ile gerçekleştirilmiş olup, yaklaşık 3500–4500 pt/m<sup>2</sup> yoğunluğunda bir nokta dağılımına sahiptir ve toplamda yaklaşık 14 adet tarama istasyonu ile oluşturulmuştur. Elde edilen üç boyutlu model, yapının stratejik olarak konumlandığı sarp kaya kütlesi ile olan ilişkisini, topografik süreklilik ve yapılaşma sınırları açısından açıkça göstermektedir. Çalışma kapsamında üretilen yüksek yoğunluklu nokta bulutu üzerinden, yapının ve çevresel topoğrafyanın genel yerleşimini görselleştiren intensity temelli model oluşturulmuştur. Bu model, kalenin sarp kaya kütlesi üzerindeki oturumunu ve topografik adaptasyonunu bütüncül biçimde belgelemektedir. Özellikle kalenin doğu ve güney cephelerinde kaya yüzeyleri ile sur duvarlarının kesişim bölgelerinde gözlenen boşluklar ve düzensizlikler, fiziksel bozulmaların ve doğal aşınmanın etkilerini belgelemektedir.

Genel görünümde, yapı cephesindeki yükseklik farklılıkları ve topografik adaptasyonun dengeli bir şekilde sağlanmaya çalışıldığı anlaşılmaktadır. Bu bulgular, ilerleyen bölümlerde detaylandırılacak yüzey bozulma analizlerinin temel veri althığını oluşturmuştur.

### 3.1. Yüzey Özellikleri ve Malzeme Ayrımları

I-RGB formatında işlenmiş nokta bulutu verileri, yapının yüzey özellikleri ve malzeme farklılıklarının detaylı biçimde analiz edilmesini sağlamaktadır. Bu görüntüleme, lazer tarayıcı tarafından kaydedilen yoğunluk (intensity) değerlerinin RGB renk haritasına dönüştürülmesiyle oluşturulmuş olup, FARO Scene yazılımı ortamında, hizalama, yoğunluk eşleme ve gürültü azaltma gibi ön işleme parametreleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bahçeli Kalesi'nde I-RGB görüntüsü üzerinde yapılan incelemede, özellikle taş örgü yüzeyleri ile doğal kaya yüzeyleri arasında belirgin yansıma farkları tespit edilmiştir. Sur duvarlarının üst kısımlarında ve burç bölgelerinde daha yüksek yoğunlukta ve homojen yansıma karakteri gözlenirken, kuzeydoğu yamaçlardaki doğal kaya yüzeylerinde daha düşük ve heterojen yansıma değerleri kaydedilmiştir.

Ayrıca, bu görüntüleme yöntemi sayesinde, sur yüzeyindeki muhtemel yenileme müdahaleleri, tamir izleri ve farklı dönemlere ait yapı katmanları da ön tanımlı olarak ayrıştırılmıştır. I-RGB analizi, yapı malzemelerinin durum tespitine yönelik sonraki müdahale paftalarının hazırlanmasında temel bir veri katmanı olarak kullanılmıştır (Şekil 4a).

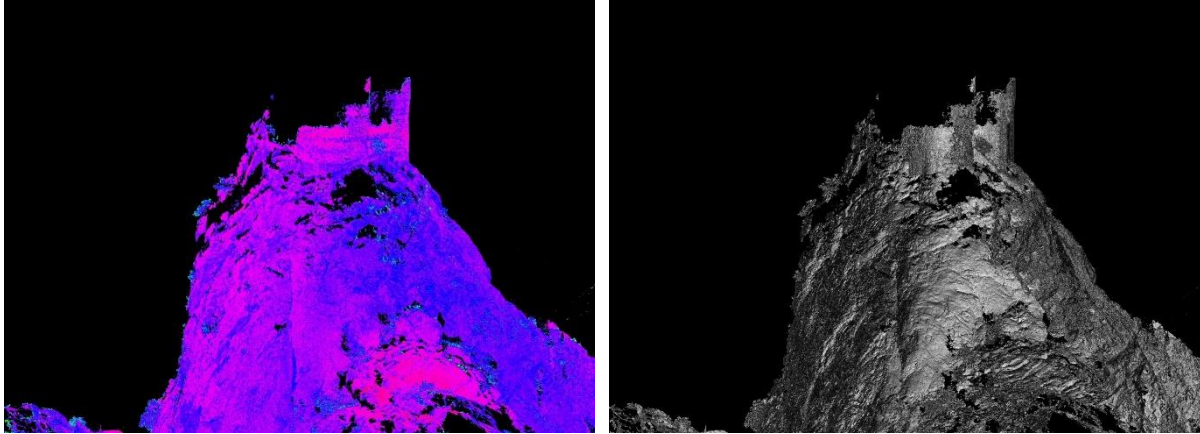
### 3.2. Yüzey Bozulma Tespitleri

Spot View (Spot analiz görüntüleme), nokta bulutu üzerinde yüzey eğimi ve yansıma karakteristiklerinin renk skalası üzerinden görselleştirilmesine imkân sağlamaktadır. Bahçeli Kalesi üzerinde bu analiz yöntemi, özellikle farklı eğim yüzeylerinde meydana gelen bozulma tiplerinin ön teşhisinde etkili bir araç olarak kullanılmıştır.

Spot görüntüleme sırasında, RGB renk verilerinin analizine dayalı olarak FARO Scene yazılımı aracılığıyla gerçekleştirilen iş akışında; renk kontrastı, yoğunluk değişimi ve yüzey eğimi parametreleri kullanılmıştır. Bu bağlamda, dikey ve eğimli yüzeylerde gözlenen renk yoğunluğu artışları, potansiyel fiziksel bozulmaların görsel işareti olarak yorumlanmıştır. Özellikle güneybatı cephesi ile burç duvarlarının üst kotlarında, kopma, erozyon ve malzeme kaybı işaretleri taşıyan anomaliler tespit edilmiştir. Ayrıca, kuzey yamacında doğal kaya kütlesi üzerinde belirgin yüzey ayrışmaları ve biyolojik etkilerin neden olduğu farklılaşmalar da Spot analiz ile net biçimde ortaya konulmuştur. Bu bulgular, daha sonra yapılan detaylı bozulma haritalarının ve müdahale önerilerinin hazırlanmasında temel referans verisi olarak kullanılmıştır.

### 3.3. Geometrik Deformasyon ve Yükseklik Analizi

Distance/Elevation temelli analiz, nokta bulutu üzerinde her noktanın lazer tarayıcıya olan mesafesine veya göreceli yükseklik değerine göre renklendirilmesi esasına dayanmaktadır. Bahçeli Kalesi için bu yöntemle oluşturulan Elevation görüntüsü, yapının hem makro ölçekte topografik yerleşimini hem de mikro ölçekte geometrik deformasyon bölgelerini görselleştirmiştir. Elevation analizinde, sur duvarlarının farklı yükseklik zonları renk kodlamaları ile açıkça ayırt edilebilmiştir. Özellikle batı cephesi surları ile kuzeydoğu kaya omurgası arasında meydana gelen düşey kayma ve çökme izleri, renk geçişleri üzerinden rahatlıkla gözlemlenmiştir. Ayrıca, doğal kaya yüzeylerinde yer alan çatlak gelişimleri ve erozyon süreçleri de elevation haritasında izlenebilir kılınmıştır. Bu bulgular, kalenin statik güvenlik değerlendirmesi ve koruma önceliklerinin belirlenmesi açısından kritik bir veri altlığı sağlamıştır. Bu analiz bulguları, ilerleyen bölümlerde detaylandırılacak bozulma sınıflandırma tablolarının ve müdahale stratejilerinin bilimsel temelini oluşturmaktadır (Şekil 4b).



a) Bahçeli Kalesi I-RGB Görüntüleme (Yüzey Özellikleri ve Malzeme Ayrımları Tespiti)

b) Bahçeli Kalesi Elevation Görüntüleme (Distance/Elevation Temelli Geometrik Deformasyon Tespiti)

Şekil 4. Bahçeli Kalesi'nde malzeme ayrımı ve yüzey deformasyonuna yönelik gelişmiş görselleştirme çıktıları (Yazarın Kişisel Arşivi)

## 4. TARTIŞMA VE DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada kullanılan Yersel Lazer Tarama (YLT) ve yoğunluk tabanlı görselleştirme yöntemleri, Bahçeli Kalesi gibi karmaşık topoğrafyaya sahip ve erişimi güç kültürel miras yapılarına yönelik belge üretiminde önemli avantajlar sağlamıştır. Yöntemin başlıca avantajları arasında: yüksek çözünürlüklü ve gerçek mekânsal ölçekli veri üretimi, doğal kaya yüzeyleri ile yapı yüzeylerinin bütüncül ve karşılaştırmalı biçimde belgelenebilmesi, morfolojik bozulmaların ve yüzey farklılıklarının detaylı analizine olanak sağlaması yer almaktadır (Fassi et al., 2013). Ancak yöntemin bazı kısıtları da söz konusudur. Özellikle çok yoğun bitki örtüsü bulunan alanlarda nokta bulutunun seyrelmesi, bazı yüzeylerde yansıma kayıpları (ör. koyu renkli taş yüzeylerde düşük intensity) gibi teknik sınırlamalarla

karşılaşmıştır. Ayrıca, Lidar yoğunluk verilerinin malzeme bazlı spektral analiz yerine geçememesi, bu tür analizlerin tamamlayıcı yöntemlerle desteklenmesini gerektirmektedir.

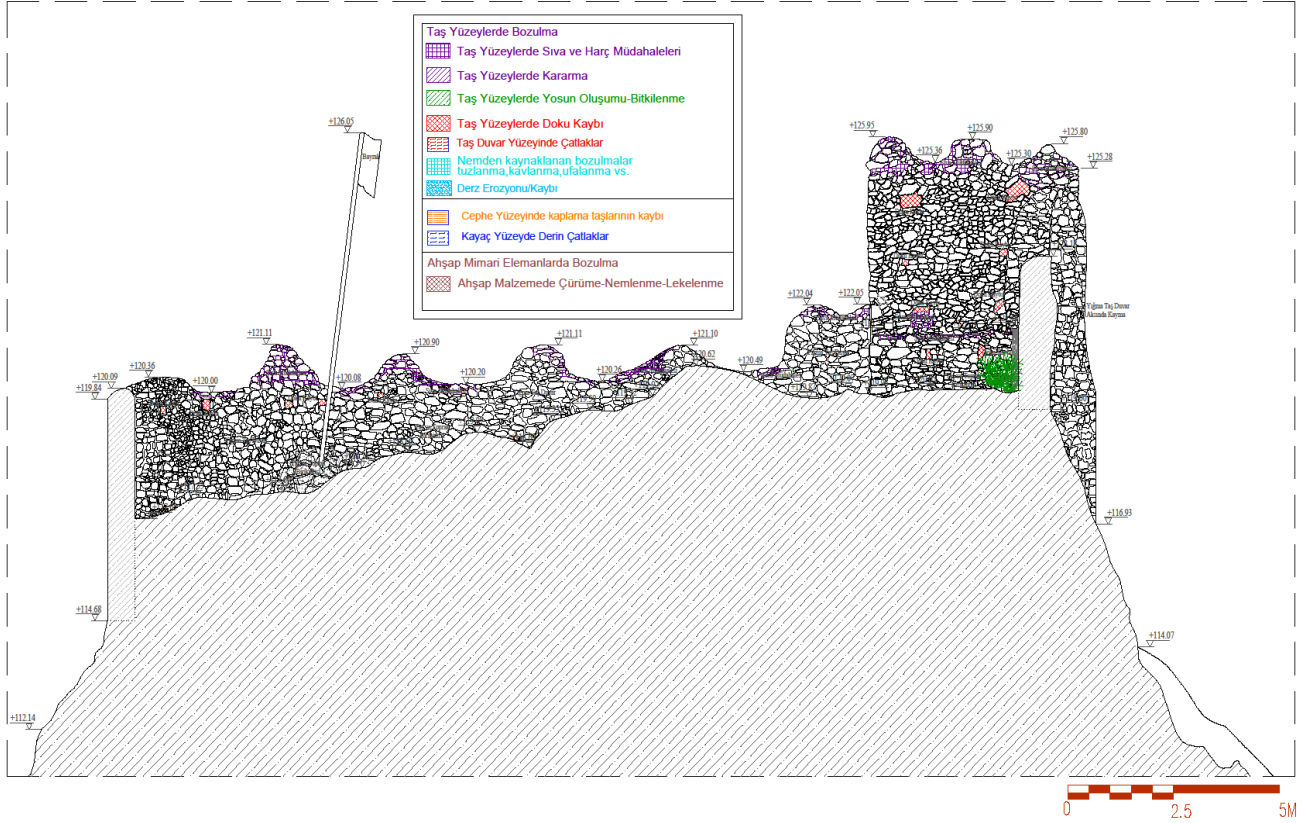
#### 4.1. Yüzey Bozulma Sınıflandırmasının Değerlendirilmesi

Çalışma kapsamında hazırlanan bozulma haritaları, Fitzner et al. (2002) ve ICOMOS (2011) rehberleri doğrultusunda sınıflandırılmış ve pafta üzerinde görselleştirilmiştir.

Kale yüzeyinde en sık gözlemlenen bozulma türleri:

- a) Malzeme kaybı (Loss of material)
- b) Doku erozyonu (Surface erosion)
- c) Çatlak gelişimi (Cracking)
- d) Biyolojik etkiler (Biological colonization)
- e) Tuzlanma (Salt efflorescence)
- f) Ayrılma ve boşluk oluşumu (Delamination & Detachment) olarak belirlenmiştir.

Hazırlanan bozulma paftasında bu türler farklı renk ve simge kodları ile gösterilmiş ve müdahale planlaması için temel veri oluşturmuştur (Şekil 5).



Şekil 5. Bahçeli Kalesi Bozulma Haritası (Malzeme Kaybı, Çatlaklar, Biyolojik Etkiler ve Tuzlanma Dağılımı) (Yazarın Kişisel Arşivi)

Yüzey yoğunluğu ve yayılım alanı açısından:

- Güney cephesi ve burç bölgelerinde malzeme kaybı ve çatlaklar,
- Doğu ve kuzey cephesinde biyolojik etkiler ve tuzlanma baskındır.

Bu sınıflandırma, Lidar intensity verileri ve Spot analiz çıktıları ile karşılaştırıldığında yüksek uyum göstermiş, yöntemin bozulma tespiti için güvenilir bir temel sunduğu gözlemlenmiştir (Fassi et al., 2013; Armesto-González et al., 2010).

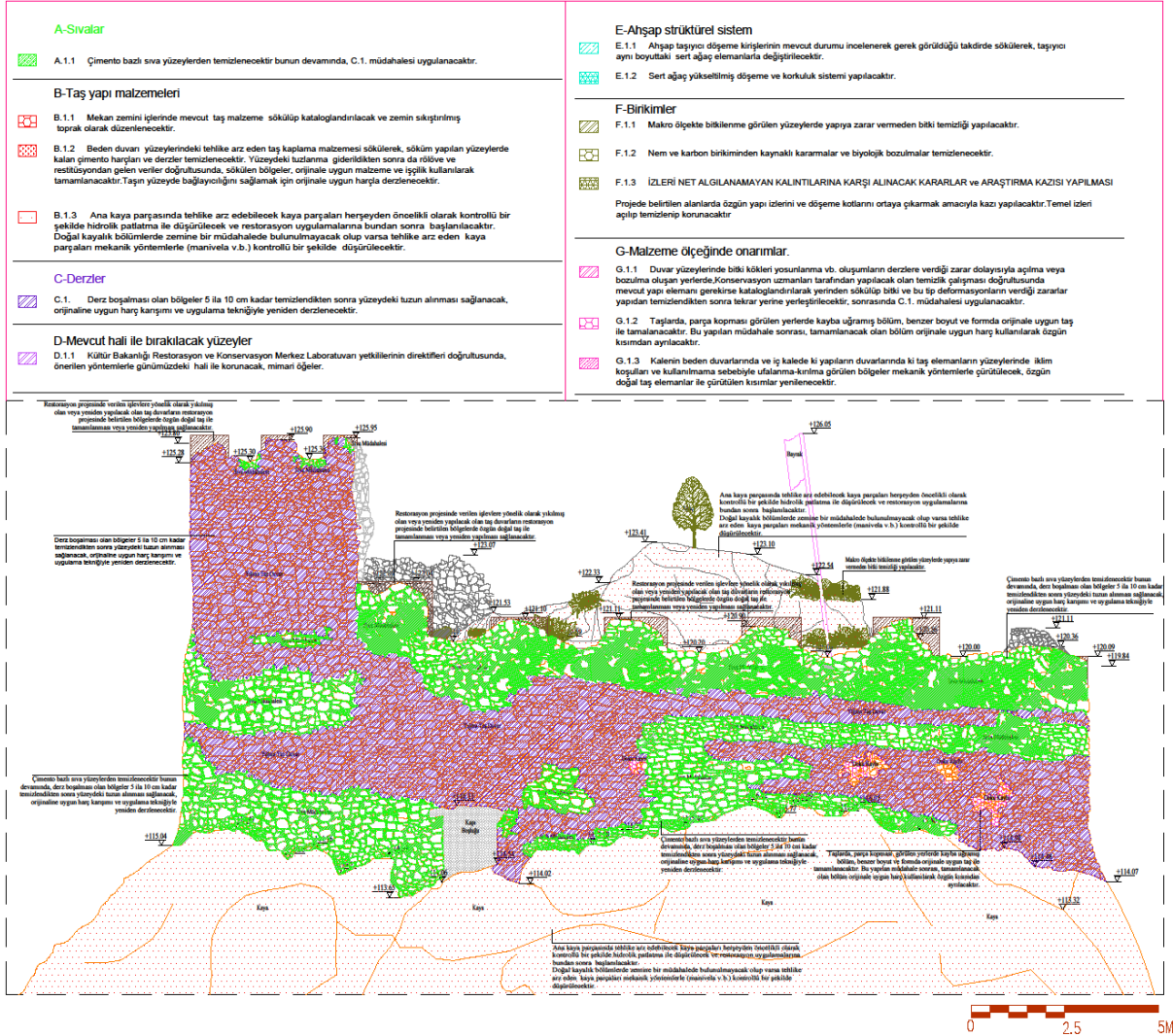
#### 4.2. Restorasyon Planlamasına Katkı

Bahçeli Kalesi'nde gerçekleştirilen Lidar tabanlı belgeleme ve bozulma analizleri, yapının restorasyon ve koruma planlaması süreçlerine doğrudan katkı sağlamıştır.

Yüksek çözünürlüklü nokta bulutu verileri ve yoğunluk (Intensity) analizleri, yapıdaki bozulma dağılımını ve yapısal deformasyonları mekânsal doğrulukla ortaya koymuş ve bu bulgular üzerinden müdahale öncelikleri belirlenmiştir.

Bu süreçte Bozulma Paftası (Şekil 6) üzerinde tanımlanan:





Şekil 7. Bahçeli Kalesi Müdahale Paftası Restorasyon ve Koruma Planlamasına Yönelik Müdahale Önerileri (Yazarın Kişisel Arşivi)

Bu bütünleşik yaklaşım sayesinde, Bahçeli Kalesi için bilimsel temele dayalı, veri odaklı bir müdahale planı geliştirilmiş ve örnek bir sayısal belge destekli restorasyon modeli oluşturulmuştur (Fassi et al., 2013; Remondino & Rizzi, 2010).

### 4.3. Literatürle Karşılaştırma ve Özgünlük

Lidar tabanlı kültürel miras belgelenmesi ve bozulma haritalaması alanında uluslararası literatürde önemli gelişmeler kaydedilmektedir (Grussenmeyer et al., 2008; Fassi et al., 2013). Özellikle karmaşık topografyaya ve zor erişimli konumlara sahip miras alanlarında yüksek doğruluklu üç boyutlu belge üretimi ve morfolojik bozulma analizleri için Lidar teknolojisinin sağladığı avantajlar birçok çalışmada vurgulanmıştır (Lerma et al., 2011; Sapirstein, 2016).

Bu yöntemlerin Türkiye'deki uygulamaları da çeşitlenmektedir. Mevcut çalışmalar çoğunlukla geometrik belgeleme aşamasında kalmakta; bozulma sınıflandırması ve restorasyon planlamasına doğrudan veri sağlama düzeyine ulaşan uygulamalar da ilerleme göstermektedir. Bahçeli Kalesi çalışması bu bakımdan öncü ve özgün çalışmalardan biri olmaya adaydır. Bu çalışmada: Lidar yoğunluk verileri, Bozulma paftaları, Müdahale planları, CAD tabanlı haritalama ve vektörleştirme süreçleri bütünleşik olarak kullanılmıştır.

Bu yönüyle, çalışmanın özgün katkıları şu şekilde özetlenebilir:

- a) Türkiye'de Lidar veri temelli bozulma haritalamasının örneklerinden biri olması,
- b) Müdahale planlamasına doğrudan entegre veri üretmiş olması,
- c) Literatürde kısıtlı sayıda çalışılmış olan "topografyaya adapte savunma yapılarında" bu yöntemin uygulanabilirliğini göstermesi,
- d) Bozulma ve müdahale paftalarının Lidar analizleri ile desteklenerek bilimsel temele oturtulmuş olması.

Bu özellikleriyle çalışma, uluslararası literatürde de karmaşık savunma yapıları ve taş yapıların korunması konusundaki yaklaşımlara özgün bir katkı sunmaktadır ve ileride benzer projeler için model alınabilecek bir yöntem seti oluşturmuştur.

## 5. TARTIŞMA

Bahçeli Kalesi üzerinde gerçekleştirilen bu çalışma, kültürel miras yapılarına yönelik sayısal belgeleme tekniklerinin sadece belge üretimi aşamasında değil, aynı zamanda restorasyon planlamasına entegrasyonunda da ne denli etkin bir araç olduğunu ortaya koymuştur. Çalışma sürecinde kullanılan Yersel Lidar Taraması (YLT) ve intensity tabanlı yüzey analizleri, yapıdaki karmaşık bozulma süreçlerinin ve morfolojik deformasyonların detaylı biçimde ortaya konmasına olanak sağlamıştır. Bu bağlamda bozulma sınıflandırmasının parametrik olarak tanımlanabilmesi ve müdahale planlarının doğrudan bu verilere dayandırılması, çalışmanın en güçlü yönleri arasında yer almaktadır. Bununla birlikte, elde edilen veriler ışığında ortaya çıkan bazı yöntemsel kısıtlar ve geleceğe yönelik iyileştirme potansiyelleri de değerlendirilmelidir.

### 5.1. Bozulma Haritalarının Etkililiği ve Uygulama Yeterliliği

Çalışmada oluşturulan bozulma haritaları, yapının farklı bölgelerinde gözlemlenen bozulma türlerini mekânsal olarak hassas biçimde tanımlayabilmiş ve uygulanabilir müdahale stratejilerinin geliştirilmesine doğrudan katkı sağlamıştır.

Özellikle yüksek çözünürlüklü nokta bulutu verisi ve intensity analizleri sayesinde: malzeme kaybı, çatlak gelişimi, biyolojik etkiler ve tuzlanma gibi temel bozulma türlerinin yüzeydeki dağılımı net biçimde haritalanmıştır. Bozulma yoğunluğu haritaları, müdahale paftalarının hazırlanmasında güçlü bir temel oluşturmuş ve bu durum, restorasyon planlama sürecinde sezgisel değil, veri temelli kararların alınabilmesini sağlamıştır. Ancak uygulama sürecine yönelik olarak gözlemlenen bazı sınırlılıklar da dikkate alınmalıdır. Özellikle:

- Yoğun bitki örtüsüne sahip bölgelerde nokta yoğunluğu sınırlı kalmış ve bozulma tespiti kısmen eksik kalmıştır.
- Çok ince yüzey çatlakları gibi mikro ölçekte bozulmaların tespitinde Lidar çözünürlüğünün sınırları ortaya çıkmıştır.
- Malzeme bazlı farklılaşmaların (ör. taş cinsi farklılıkları) net olarak ayrıştırılabilmesi için, tam spektral analiz entegrasyonuna ihtiyaç duyulmuştur.

Bu değerlendirmeler ışığında, bozulma haritalarının genel olarak yüksek doğrulukta ve uygulama yeterliliğine sahip olduğu, ancak gelecekte spektral ve yapısal analizlerle desteklenerek daha da geliştirilebileceği sonucuna varılmıştır.

## 5.2. Müdahale Önerilerinin Etkililiği ve Uygulanabilirliği

Çalışmada elde edilen bozulma haritaları temel alınarak hazırlanan müdahale paftaları, Bahçeli Kalesi'nin korunmasına yönelik planlı, aşamalı ve veri temelli bir müdahale stratejisi geliştirilmesine olanak sağlamıştır.

Bu paftalar, yapının farklı bölümlerinde tespit edilen bozulma türlerine özgü müdahale yöntemlerini, mekânsal dağılımları ile birlikte detaylı bir şekilde sunmaktadır. Özellikle; acil müdahale gerektiren yapısal sorunlar, Koruyucu bakım önlemleri, Yüzey iyileştirme ve temizlik çalışmaları gibi farklı müdahale türleri, paftalarda ayrı ayrı işaretlenmiş ve her biri için önerilen teknikler detaylandırılmıştır.

Müdahale paftalarında dikkat çeken önemli noktalar şunlardır:

- Çatlak enjeksiyonu ve taş tamamlama çalışmaları, en çok zarar görmüş burç ve sur bölümlerinde yoğunlaşmıştır.
- Yüzey temizlik ve koruma işlemleri, özellikle biyolojik oluşum ve tuzlanmanın baskın olduğu kuzeydoğu cephesi için önerilmiştir.
- Su drenaj sistemleri ve nem kontrol önlemleri, topoğrafik eğimin etkili olduğu bölgelerde planlanmıştır.

Bu müdahale önerilerinin önemli bir avantajı, doğrudan sayısal veri temelli analizlere dayanıyor olmasıdır. Bu durum, müdahalelerin rastgele değil, bozulma yoğunluğuna ve risk derecesine göre

önceliklendirilmiş olmasını sağlamasıdır. Ancak uygulamaya yönelik değerlendirmelerde dikkate alınması gereken bazı noktalar da bulunmaktadır; Müdahale tekniklerinin seçiminde, kullanılan malzemenin ve orijinal yapı dokusunun özelliklerine daha fazla odaklanması gerekebilir ve önerilen tekniklerin sahada uygulanabilirliğini artırmak için, taş cinsi ve mevcut derz malzemesi analizlerinin de müdahale öncesinde tamamlanması gereklidir. Ayrıca, saha koşullarına ve erişim zorluklarına bağlı olarak, önerilen müdahale yöntemlerinin uygulanabilirliği bazı bölgelerde sınırlı kalabilir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, müdahale paftaları, Bahçeli Kalesi'nin korunmasına yönelik olarak bilimsel temele dayalı ve uygulamaya dönük bir müdahale stratejisi sunmakta ve bu yönüyle Türkiye'de kültürel miras koruma pratiği açısından model oluşturabilecek bir yaklaşım geliştirmektedir.

### 5.3. Yöntemin Koruma Pratiğine Katkısı

Bahçeli Kalesi üzerinde gerçekleştirilen bu çalışma, Yersel Lidar Taraması (YLT) ve yoğunluk tabanlı yüzey analizleri gibi sayısal belgeleme yöntemlerinin, yalnızca belgeleme aracı değil, aynı zamanda koruma ve restorasyon planlamasının doğrudan bir bileşeni olarak kullanılabilmesini açık bir biçimde ortaya koymuştur. Türkiye'de kültürel miras koruma alanında, Lidar teknolojisinin kullanımına ilişkin çalışmaların büyük bir kısmı, genellikle üç boyutlu belgeleme ve dijital arşivleme ile sınırlı kalmaktadır (Yastıklı, 2017). Bu çalışmada ise, belge üretim aşamasının ötesine geçilerek, elde edilen verilerle; Bozulma sınıflandırması, müdahale planlaması ve Uygulama sonrası izleme süreçlerine doğrudan katkı sağlaması hedeflenmiş ve başarıyla gerçekleştirilmiştir.

Bu metodolojik yaklaşımın koruma pratiğine sağladığı temel katkılar şu şekilde özetlenebilir:

- Bilimsel temele dayalı karar alma: Bozulma verilerinin sayısal olarak modellenmesi, müdahale kararlarının daha nesnel ve ölçülebilir temellere dayanmasını sağlamaktadır.
- Şeffaf ve izlenebilir restorasyon süreçleri: Üretilen nokta bulutu ve bozulma haritaları, uygulama öncesi ve sonrası durum karşılaştırmalarını mümkün kılmakta ve koruma sürecinin izlenebilirliğini artırmaktadır.
- Mekânsal analiz kabiliyeti: Yapının farklı bölümlerindeki bozulma dinamikleri, mekânsal olarak hassas biçimde analiz edilebilmekte ve önceliklendirilmiş müdahale planları oluşturulabilmektedir.
- Zor erişimli alanlarda etkin belge üretimi: Bahçeli Kalesi gibi sarp topoğrafyada yer alan ve erişimi zor olan yapılarda, Lidar teknolojisi sayesinde yüksek doğrulukta veri üretimi sağlanmış ve bu sayede geleneksel yöntemlerle belgelenmesi güç olan alanlar da korunabilir bilgiye dönüştürülmüştür (Fassi et al., 2013).

Buna karşılık, yöntemin daha da geliştirilmesine yönelik bazı açılımlar da değerlendirilmiştir. Şüphesiz; Spektral analizlerin entegrasyonu, malzeme bazlı bozulma süreçlerinin daha hassas biçimde analiz edilmesine katkı sağlayacaktır. Ayrıca, HBIM tabanlı veri yönetimi, belge üretiminden uygulama

sürecine kadar olan tüm aşamaların bütünleşik olarak yönetilmesine olanak tanıyacaktır (Bruno et al., 2018) ve dijital ikiz (Digital Twin) altyapısının kurulması, yapının dinamik izlenmesine ve bozulma süreçlerinin zaman içinde analiz edilmesine imkân verecektir.

Sonuç olarak, Bahçeli Kalesi çalışması, Türkiye’de kültürel miras koruma pratiğinin dijitalleşmesi yönünde somut bir adımı temsil etmekte ve sayısal teknolojilerin restorasyon planlaması süreçlerine entegrasyonu için güçlü bir model ortaya koymaktadır.

## 6. SONUÇ

Bahçeli Kalesi üzerinde yürütülen bu çalışma, Türkiye’de kültürel miras koruma süreçlerine sayısal teknolojilerin entegrasyonu bakımından önemli bir metodolojik ve uygulamalı katkı sunmuştur. Yersel Lidar Taraması (YLT) ve yoğunluk (intensity) tabanlı yüzey analizleri kullanılarak geliştirilen belge üretim süreci, geleneksel yöntemlerin sınırlı kaldığı birçok alanda yüksek doğrulukta, kapsamlı ve nesnel veri setleri sağlamıştır. Bu veri setleri temel alınarak hazırlanan bozulma haritaları ve müdahale paftaları, restorasyon planlamasının bilimsel temelli ve mekânsal olarak hassas biçimde yapılandırılmasına doğrudan katkı sağlamıştır.

Çalışmanın ortaya koyduğu sonuçlar, Türkiye’de özellikle karmaşık topoğrafyaya sahip, zor erişimli ve fiziksel risk altındaki kültürel miras yapıları için yenilikçi bir koruma yaklaşımı geliştirilmesine imkân tanımaktadır. Uluslararası literatürle karşılaştırıldığında (Grussenmeyer et al., 2008; Fassi et al., 2013), çalışmanın özgün katkıları arasında; sayısal belgeleme verisinin doğrudan restorasyon planlamasına entegrasyonu, bozulma tipolojisinin parametrik ve mekânsal sınıflandırılması ve İzlenebilir-sürdürülebilir koruma süreçlerinin yapılandırılması yer almaktadır. Bu metodoloji, yalnızca Bahçeli Kalesi için değil, Türkiye genelinde benzer karaktere sahip; savunma yapıları, kırsal yerleşim kaleleri, zor topoğrafyadaki kültürel miras alanları için uygulanabilir ve geliştirilebilir bir model sunmaktadır.

İleriye Dönük Öneriler:

Çalışmada elde edilen deneyimler ışığında, gelecekte yapılacak benzer uygulamalarda:

- Spektral analizlerin ve malzeme karakterizasyon çalışmalarının daha fazla entegre edilmesi,
- HBIM (Heritage Building Information Modeling) altyapısının geliştirilerek veri yönetiminin bütüncül biçimde yürütülmesi,
- Dijital ikiz (Digital Twin) teknolojilerinin uygulanarak dinamik izleme ve koruma süreçlerinin sürekli güncellenmesi,
- Ulusal düzeyde sayısal belge tabanlarının oluşturulması ve ortak veri paylaşım platformlarının geliştirilmesi önerilmektedir.

Sonuç olarak, bu çalışma Türkiye’de sayısal teknolojilerin kültürel miras koruma süreçlerine entegrasyonu konusunda önemli bir örnek oluşturmuş ve gelecekte bu alanda yürütülecek araştırmalar ve uygulamalar için yol gösterici bir referans model geliştirmiştir.

## KAYNAKLAR

- Armesto-González, J., Riveiro-Rodríguez, B., González-Aguilera, D., & Rivas-Brea, M. T. (2010). Terrestrial laser scanning intensity data applied to damage detection for historical buildings. *Journal of Archaeological Science*, 37(12), 3037-3047.
- Artvinli, T. (2013). *Yusufeli Külliyesi* (Vol. 1). İstanbul.
- Aytekin, O., & Aktaş, A. (2010). Yusufeli’de yapılmaları planlanan hidro-elektrik barajların kültür varlıklarına olan etkileri üzerine ön değerlendirme. In *Geçmişten Geleceğe Yusufeli Sempozyumu Bildirileri* (pp. 79–94).
- Brumana, R., Oreni, D., Raimondi, A., Georgopoulos, A., & Bregianni, A. (2013). HBIM for conservation and management of built heritage: Towards a library of vaults and wooden beam floors.
- Bruno, N., & Roncella, R. (2018). A restoration oriented HBIM system for cultural heritage documentation: The case study of Parma Cathedral. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 42, 171-178.
- Fassi, F., Fregonese, L., Ackermann, S., & De Troia, V. (2013). Comparison between laser scanning and automated 3D modeling techniques for heritage documentation. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, II-5/W1, 73–78.
- Fitzner, B., Heinrichs, K., & La Bouchardiere, D. (2002). Damage index for stone monuments.
- Grussenmeyer, P., Landes, T., Voegtli, T., & Ringle, K. (2008). Comparison methods of terrestrial laser scanning, photogrammetry and tacheometry data for recording of cultural heritage buildings. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 37(B5), 213-218.
- Harita Genel Müdürlüğü. (2025). *Türkiye topoğrafya haritaları*. Erişim tarihi: 6 Eylül 2025, <https://www.harita.gov.tr/>
- ICOMOS. (2011). *Illustrated glossary on stone deterioration patterns*. ICOMOS International Scientific Committee for Stone (ISCS).

- Lerma, J. L., Navarro, S., Cabrelles, M., & Villaverde, V. (2010). Terrestrial laser scanning and close range photogrammetry for 3D archaeological documentation: the Upper Palaeolithic Cave of Parpalló as a case study. *Journal of Archaeological Science*, 37(3), 499-507.
- Remondino, F., & Rizzi, A. (2010). *Reality-based 3D documentation of natural and cultural heritage sites: techniques, problems, and examples*. *Applied Geomatics*, 2, 85–100. <https://doi.org/10.1007/s12518-010-0025-x>
- Rodríguez-González, P., Jimenez Fernandez-Palacios, B., Muñoz-Nieto, Á. L., Arias-Sanchez, P., & Gonzalez-Aguilera, D. (2017). Mobile LiDAR system: New possibilities for the documentation and dissemination of large cultural heritage sites. *Remote Sensing*, 9(3), 189.
- Sapirstein, P. (2016). Accurate measurement with photogrammetry at large sites. *Journal of Archaeological Science*, 66, 137-145.
- Toksoy, A. (2010). Türk Hâkimiyetinde Yusufeli. In M. Demirel & M. Akıllı (Eds.), *Geçmişten Geleceğe Yusufeli Sempozyumu Bildirileri* (pp. 19–24). Yusufeli Belediyesi. (ISBN: 978-605-88588-0-0).
- Ünsal, V. (2007). Yusufeli Kaleleri. *Atatürk Üniversitesi Türkiyat Araştırmaları Enstitüsü Dergisi*, 33, 199–216.
- Ünsal, V. (2010). Yusufeli Kaleleri. *Journal of Turkish Research Institute*, 14(33), 199-216.

