

Arkeolojik Alanların İHA ile Modellenmesi: Andoz Kalesi (Espiye-Giresun) Örneği

UAV-Based Modeling of Archaeological Sites: The Case of Andoz Castle (Espiye-Giresun)

Oğulcan Avcı^{1*}, Cüneyt Aktaş²

¹Giresun Üniversitesi, Güzel Sanatlar Fakültesi, Kültür Varlıklarını Koruma ve Onarım Bölümü, 28800, Giresun/Türkiye.

²Giresun Üniversitesi, Güre Yerleşkesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Coğrafya Bölümü, 28200, Giresun/Türkiye.

ARAŞTIRMA MAKALESİ

*Sorumlu yazar:

Oğulcan Avcı
ogulcan.avci@giresun.edu.tr

doi: 10.48123/rsgis.1655969

Yayın süreci

Geliş tarihi: 11.03.2025
Kabul tarihi: 05.07.2025
Basım tarihi: 27.09.2025

Özet

Bu çalışma, Giresun ili Espiye ilçesinde yer alan Andoz Kalesi'nin insansız hava aracı (İHA) destekli fotogrametri yöntemiyle üç boyutlu (3B) olarak modellenmesini konu almaktadır. Araştırma, sarp topoğrafyaya sahip bu tarihi yapının güncel durumunu yüksek doğrulukla belgeleyerek dijital arşivlemeye katkı sunmayı amaçlamaktadır. Bu kapsamda DJI Mini 3 Pro İHA ile toplam 2242 adet fotoğraf toplanmış ve Agisoft Metashape Professional yazılımı kullanılarak Structure from Motion (SfM) ve Multi-View Stereo (MVS) algoritmaları aracılığıyla 3B modelleme gerçekleştirilmiştir. Fotogrametrik doğruluğu artırmak amacıyla, 8 adet yer kontrol noktası (4'ü referans - GCP, 4'ü kontrol - check point olarak) GNSS cihazıyla ölçülerek yazılıma tanımlanmış ve ilgili görüntüler üzerinde manuel işaretlemesi yapılmıştır. Yapılan işlemler sonucunda, araştırma sahasına ait modelin sayısal yükseklik modeli (DEM) için GSD değeri 5.46 cm/piksel, ortofoto için ise nominal GSD değeri 2.00 cm/piksel olarak hesaplanmıştır. Kontrol noktaları üzerinden yapılan doğruluk analizinde, referans (GCP) noktalarında toplam RMS hata 2.06 cm, kontrol (check) noktalarında ise 7.67 cm olarak belirlenmiştir. Üretilen yüksek çözünürlüklü 3B model; restorasyon, sanal tur, kültürel miras yönetimi ve mekânsal analizler gibi çeşitli disiplinlerde bilimsel referans olarak değerlendirilebilecek niteliktedir. Ayrıca, Andoz Kalesi'nin coğrafi bağlamı ve stratejik konumu da çalışmada analiz edilerek, dijital kültürel miras belgelenmesine önemli bir katkı sunulması hedeflenmiştir.

Anahtar kelimeler: Uzaktan algılama, İHA destekli 3B modelleme, Fotogrametri, Arkeolojik belgeleme, Andoz kalesi

Abstract

This study presents the UAV-assisted photogrammetric 3D modeling of Andoz Castle, located in the Espiye district of Giresun Province, Türkiye. The primary aim is to digitally document the current state of the structure, situated in steep terrain, with high spatial accuracy. A total of 2,242 images were captured using a DJI Mini 3 Pro UAV. 3D reconstruction was conducted using Structure from Motion (SfM) and Multi-View Stereo (MVS) algorithms via Agisoft Metashape Professional. To improve accuracy, eight ground control points (GCPs)-four reference and four check points-were measured with a GNSS device and manually marked in the software. The Ground Sampling Distance (GSD) was calculated as 5.46 cm/pixel for the Digital Elevation Model (DEM) and 2.00 cm/pixel for the orthophoto. The Root Mean Square (RMS) error was determined as 2.06 cm for GCPs and 7.67 cm for check points. The resulting high-resolution 3D model provides a reliable basis for restoration, virtual tours, heritage management, and spatial analysis. Additionally, the study analyzes the geographical and strategic context of the castle, aiming to support digital cultural heritage documentation efforts.

Keywords: Remote sensing, UAV-assisted 3D modeling, Photogrammetry, Archaeological documentation, Andoz castle

1. Giriş

Genel olarak nesnelerin ve çevrenin fotoğraflar aracılığıyla ölçülmesi ve modellenmesi tekniği olarak tanımlanan fotogrametri özellikle son yıllarda gelişen İHA teknolojileri ve yüksek çözünürlüklü kameralar sayesinde arkeoloji başta olmak üzere birçok disiplinde vazgeçilmez bir araç haline gelmiştir. Bu teknik günümüzde, video oyun ve film sektöründe gerçekçi mekanların tasarımından (Ceylani & Yavuz, 2023) sanal ve artırılmış gerçeklik uygulamalarına (Çipiloğlu Yıldız vd., 2021; Uslu & Uysal, 2020; Yiğit & Uysal, 2021; Yiğiy & Uysal, 2023), anıt ağaç gibi doğal miras unsurlarının belgelenmesinden (Uslu, 2022; Uslu & Uysal, 2022) endüstriyel mühendislik çözümlerine kadar geniş bir yelpazede kullanılmaktadır. Ancak özellikle arkeolojik ve kültürel mirasın korunması çalışmalarında sağladığı katkılar dikkat çekicidir (Aydın vd., 2023; Çelik vd., 2020; Erbaş vd., 2025; Karakaya & Ulvi, 2024; Özsoy & Aksoy, 2021; Pulat vd., 2022; Şenol vd., 2021; Ulvi & Yiğit, 2020).

Fotogrametrinin bu denli yaygın kabul görmesinin temel nedeni, yüksek doğrulukta üç boyutlu veri elde etme, zamandan tasarruf sağlama ve zorlu arazi koşullarında bile etkili çözümler sunma gibi avantajlarıdır. Arkeolojik alanlarda tarihi yapıların dijital belgelenmesinden mekansal analizlere kadar geniş bir uygulama alanı bulunması, bu yöntemi kültürel miras çalışmalarının vazgeçilmezi haline getirmiştir. Nitekim geleneksel belgeleme tekniklerinin zaman alıcı ve sınırlı doğruluğa sahip olması, fotogrametrik yöntemlerin kültürel mirasın korunması ve gelecek nesillere aktarılması sürecindeki kritik rolünü daha da belirginleştirmektedir.

Arkeolojik çalışmalarda klasik yöntemlerin yanı sıra son dönemde uzaktan algılama yöntemlerinin sunduğu olanaklardan da faydalanılmaktadır. Bunun temel nedeni bahsedilen yöntemlerin arkeolojik siteleri oluşturan tarihi yapıların kurulu oldukları bölgeyle ilişkisi, birbirleriyle olan bağlantısı, mekânsal kurgusu ve kuruluş yerine etki eden faktörler gibi olguların anlaşılabilmesini kolaylaştırmasıdır. Uzaktan algılama yöntemleri, sahip olduğu donanımlar (veri toplama, depolama ve veriye ulaşma) aracılığıyla araştırmacılara daha anlaşılır görsel materyal sunmaktadır. Bu yöntemler daha önceki yöntemlere kıyasla arkeolojik sit çalışmalarında farklı veri türlerini sentezleyerek yeni bilgiler üretme noktasında da zaman kazandırması açısından oldukça önemlidir. Söz konusu yöntemlerin sunmuş olduğu olanaklardan bazıları bu çalışma kapsamında kullanılmıştır.

Arkeolojik alanlar, insanlık tarihinin derin izlerini barındırması ve bulundukları bölgenin kültür tarihinin aydınlatılması açısından oldukça önemli olan alanlardır. Fakat bu alanlar doğal afetler, iklim değişikliği, savaşlar gibi insan kaynaklı tahribat ve zamana bağlı aşınma gibi tehditlerle karşı karşıyadır. Bu nedenle tarihi öneme sahip olan arkeolojik mirasın belgelenmesi, dijital olarak arşivlenmesi ve gelecek nesillere aktarılması, koruma çalışmalarının temelini oluşturmaktadır (Aydın vd., 2023; Özsoy & Aksoy, 2021). Geleneksel belgeleme yöntemleri genellikle manuel ölçümlere, haritalamaya ve fotoğraf çekimine dayanmakta ve zaman alıcı, maliyetli ve engebeli arazilerde sınırlı doğruluk sağlamaktadır. Bu noktada arkeolojik çalışmalarda kullanılan geleneksel yöntemlerden de bahsetmek yerinde olacaktır.

Geleneksel belgeleme yöntemlerinden biri yazılı belgelemedir. Rapor olarak da adlandırılan bu belgeleme türü, çalışma durum/ön inceleme raporu, çalışma ara raporu ve çalışma raporu gibi arkeolojik kazı ve yüzey araştırması boyunca farklı süreçler için hazırlanan üç farklı belgeleme türünü kapsamaktadır. Başka bir belgeleme türü fotografik belgelemedir. Kazı çalışmaları sırasında ele geçen eserlerin ilk durumları ve konservasyon sonrası durumlarının görsel olarak belgelemesinin yapılmasıdır. Ayrıca mimari bakiyeler için konsolidasyon ve restorasyon süreçlerinde de sıkça kullanılan temel bir yöntemdir. Çoğunlukla çizim olarak adlandırılan diğer bir yöntem de grafik belgeleme yöntemidir. Bu yöntemde temel amaç çalışılan alan ve malzemeye göre farklı ölçeklerde yapılan çizimlerle malzemenin ya da bakiyenin kayıt altına alınmasıdır. Geleneksel belgeleme yöntemlerinden bir diğeri bilgi fişleridir. Tespit edilen arkeolojik eserin yapım ve teknik özellikleri ile mevcut korunma durumlarının açıklanmasına olanak tanımaktadır. Ayrıca buluntunun hangi alanda ve hangi kotta tespit edildiğini kayıt altına alması açısından önemlidir. Bilgi fişi kullanımı, bilgilerin düzenli şekilde kayda geçirilmesine olanak tanımasının yanında diğer belgeleme yöntemleri için de planlamayı kolaylaştırmaktadır (Kaya vd., 2021; Şener, 2012).

İlk kez 20. yüzyılın ilk yarısında İngiliz arkeolog Sir Mortimer Wheeler tarafından uygulanan, plankare, grid ya da karolaj sistemi olarak adlandırılan kazı tekniği, arkeolojik kazılarda alanın planlanması ve bölüntülenmesi mantığına dayanmaktadır. Bu sistemde arkeolojik kazı yapılacak alan, 10 X 10 m. veya 5 X 5 m'lik karelere ayrılmakta ve kazı çalışmaları bu sınırlı alanların içinde sürdürülmektedir. Plankare sistemi, arkeolojik alanlarda kesitlerin daha kolay biçimde incelenmesiyle kültür katmanlarının tespiti, buluntu durumunun saptanması ve kaydında da denetim kolaylığı sağlamaktadır. Plankare sisteminin yetersiz kaldığı noktalar için 1970'li yıllarda açık alan sistemi geliştirilmiştir. Bu yöntem özellikle yatay düzlemde oluşturulacak kesite önem vermekte ve araştırmacılara tüm yatay planın kesintisiz olarak incelenebilmesi olanağını sunmaktadır. İngiliz arkeolog David French tarafından ortaya koyulan diğer bir arazi bölüntüleme yöntemi çapraz açma ya da satranç tahtası olarak adlandırılan sistemdir. Bu sistemde, istenildiği kadar geniş bir alandaki pek çok plankarede arkeolojik çalışmalar sürdürülebilir (Sevin, 1995). Tüm bu arazi bölüntüleme yöntemleri geleneksel şekilde el ölçümleriyle yapılmakta ve bu işlem uzun bir süre gerektirmektedir.

İHA kullanımıyla birlikte daha doğru ölçümlerle oldukça kısa zamanda bu yöntemler uygulamaya alınabilir. Ayrıca bahsedilen bu belgeleme türleriyle manuel bir şekilde oluşturulan veriler İHA fotogrametrisiyle daha kısa sürede desimetre altı hata payıyla ve dünya üzerindeki gerçek koordinatlarıyla elde edilebilmekte ve tasniflenebilmektedir.

Son yıllarda dijital teknolojilerin gelişimi, kültür varlıkları koruma ve onarım, restorasyon, arkeoloji ve sanat tarihi gibi disiplinlerde kayda değer yenilikleri beraberinde getirmiştir. Fotogrametri, nesnelerin üç boyutlu (3B) modellerini oluşturmada kullanılan matematiksel ve geometrik analizlere dayanan bir tekniktir. Özellikle 3B modelleme arkeolojik ve tarihi öneme sahip alanların detaylı bir şekilde belgelenmesi, analiz edilmesi ve sanal ortamda yeniden yapılandırılabilmesi için vazgeçilmez bir teknik haline gelmiştir. Bundan dolayı hem yersel hem de havadan fotogrametri yöntemleri arazi çalışmalarını tamamlayıcı bir rol üstlenmektedir.

Literatürde 3B modelleme üzerine fotogrametri, yersel lazer tarama, yapılandırılmış ışık taraması, LiDAR, 3B rölöve çizimleri gibi farklı yöntemler yer almaktadır (Hamal & Ulvi, 2022). Her yöntemin avantaj ve dezavantajları olsa da özellikle fotogrametrik yöntemlerde geniş alanların modellenmesi düşük maliyetlerle gerçekleştirilebildiğinden en fazla tercih edilen yöntemdir.

Yersel fotogrametri, sabit tripodlar ya da taşınabilir sistemlerle yüksek çözünürlüklü fotoğrafların elde edilmesine dayanmaktadır. Bu yöntem özellikle mimari detayların ve küçük ölçekli buluntuların belgelenmesinde etkili bir yöntem olsa da geniş alanların modellenmesinde yetersiz kalabilmektedir. Ayrıca arazi engelleri nedeniyle veri toplama sürecini zorlaştırabilmektedir (Ulvi & Yiğit, 2020). Buna karşılık insansız hava araçları (İHA) ile gerçekleştirilen fotogrametri, geniş ve erişimi zor alanların hızlı, yüksek doğrulukta ve düşük maliyetle modellenmesini sağlamaktadır. Bu kısmı biraz daha detaylandırmak gerekirse; geleneksel yöntemlere kıyasla geniş alanları kısa sürede tarayarak desimetre altı doğrulukta veri elde edebilmekte ayrıca engebeli sarp arazilerde insan erişiminin sınırlı ve riskli olduğu durumlardan etkilenmemekte ve zamansal verilerin izlenmesi için tekrarlanabilir veri setleri sunmaktadır (Kabadayı, 2024; Ulvi & Yiğit, 2020).

Son yıllarda, insansız hava araçları (İHA) ile alınan fotoğraflar ve fotogrametri teknikleri kullanılarak arkeolojik ya da tarihi alanların 3B modellemesi yaygın olarak yapılmaktadır. Özellikle tarihi yapılar, kültürel miras alanları ve arazi analizleri gibi detaylı çalışmalarda, İHA destekli fotogrametri yöntemi, geleneksel ölçüm tekniklerine kıyasla düşük maliyetli ve yüksek doğrulukta hızlı veri üretmede önemli kolaylık sunmaktadır (Esposito vd., 2014; Hamal & Ulvi, 2022; İzci vd., 2024; Şenol vd., 2021; Yılmaz vd., 2018). Bu yöntem, hava fotoğraflarından alınan görüntülerin fotogrametrik işleme tabi tutulmasıyla, ilgili alanın geometrik ve dokusal özelliklerini içeren, ölçülebilir 3B modeller oluşturulmasına olanak tanımaktadır.

Bu çalışmanın konusunu Trabzon Rum İmparatorluğu'nun savunma sisteminin bir parçasını oluşturan, Giresun kıyı kaleleri arasında yer alan Andoz Kalesi'nin söz konusu savunma sistemine bölgesel çapta sağladığı katkısı uzaktan algılamayla somut şekilde ortaya koymaktır. Orta Çağ boyunca Giresun toprakları; Bizans, Abbâsîler, Büyük Selçuklular, Mengücekliler, Danişmendîler, Saltuklular, Trabzon Rum Devleti, Türkiye Selçukluları, Moğollar, Eretnalılar, Şebinkarahisar Emirliği, Akkoyunlular, Karakoyunlular ve Hacıemiroğulları gibi pek çok devlet, beylik ve emirliğin idaresi altında bulunmuştur (Sarıyıldız, 2025). Giresun kentinde tarihi süreçte inşa edilen kalelerin çokluğu dikkat çekmektedir. Ancak tarihi kaynakların bölgenin söz konusu savunma yapıları ve sistemleri hakkında oldukça sığ bilgiler sunması bu dönem savunma sistemleri ve yapılarına dair açıklanması gereken pek çok sorunu ortaya çıkarmaktadır.

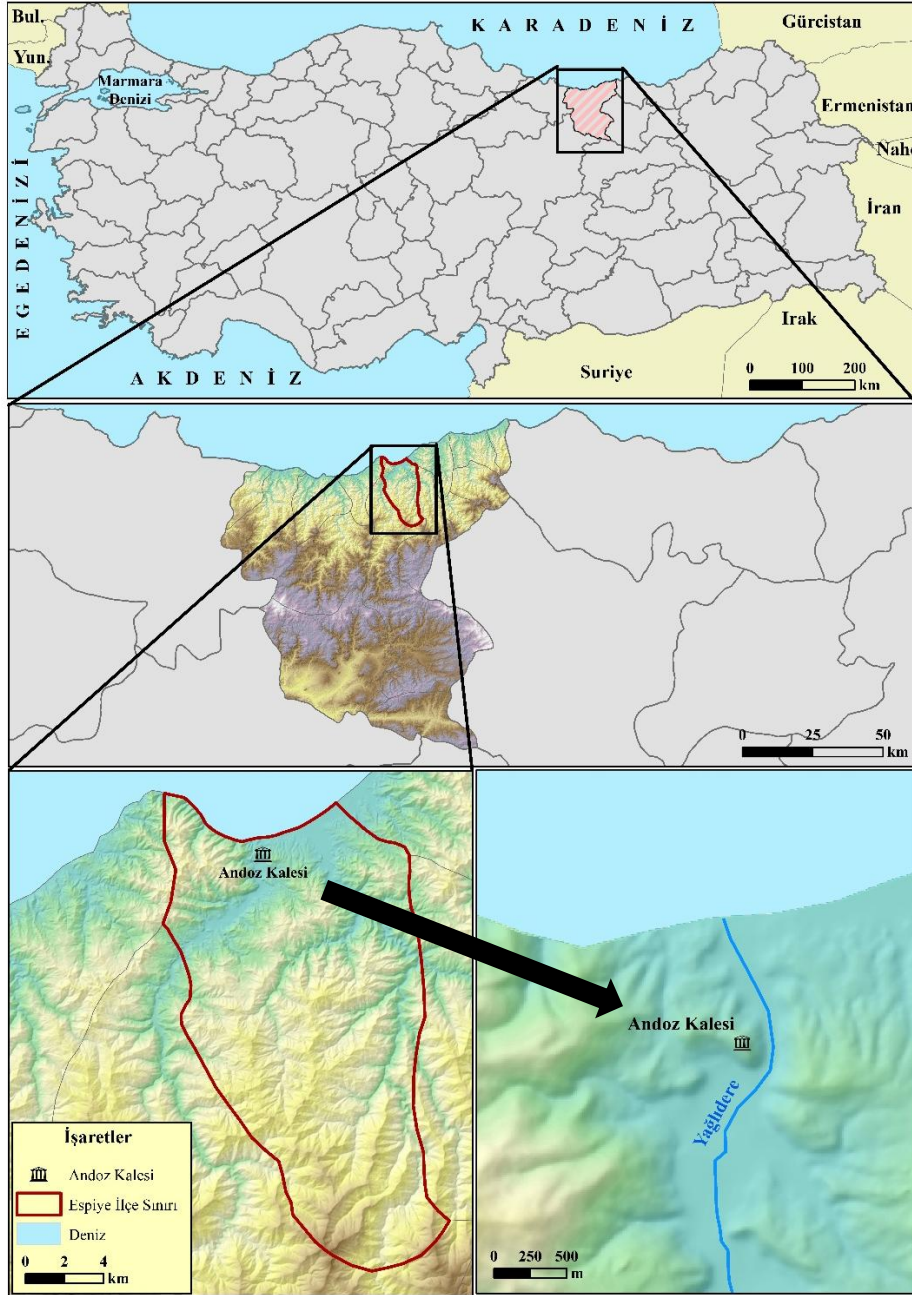
Giresun kenti, Trabzon Rum İmparatorluğu'nun batıdaki son savunma hattı olması nedeniyle oldukça önemlidir (Bryer & Winfield, 1985; Zachariadou & Keçiş, 2007). Giresun'da yer alan kıyı kalelerinden biri olan Andoz Kalesi de lokasyonu itibarıyla bu savunma ağı içerisinde dikkat çekmektedir. Bu çalışma için Karadeniz Bölgesi'nin dik yamaçlarında konumlanan Andoz Kalesi'nin seçilme nedeni, İHA fotogrametrisinin sarp ve kayalık alanlarda yapılacak olan arkeolojik belgeleme çalışmalarını ne derece kolaylaştırdığını net şekilde ortaya koymasıdır. Çünkü kalenin dağlık bir alanda konumlandırılması ve bitki örtüsüyle çevrelenmiş olması geleneksel yöntemlerle yapılacak modellemeyi zorlaştırmaktadır.

1.1 Andoz Kalesi'nin Konumu

Giresun kenti, kurulduğu bölgenin coğrafi yapısı sayesinde stratejik bir öneme sahiptir. Kıyıya paralel uzanan ve oldukça yüksek olan Doğu Karadeniz Dağları, tarihi süreçte olduğu gibi günümüzde de yol güzergahlarının oluşmasında ve ulaşımında problemler ortaya çıkarmaktadır. Dolayısıyla söz konusu bölgenin iç kesimlerine uzun boylu akarsuların meydana getirdiği vadiler sayesinde ulaşılabilir (Bekdemir & Elmacı, 2008; Darkot, 1972; Tozlu, 1985).

Bu çalışmanın konusunu oluşturan Andoz Kalesi küçük bir alana sahip gözlem noktası olarak nitelendirilebilir. Söz konusu kale, Espiye ilçesinin 15 km batısında, Yağlıdere Vadisi'nin girişine hâkim ve denize oldukça yakın konumlu, yaklaşık olarak 152 m yüksekliğinde bir tepe üzerine kurulmuştur (Şekil 1). Osmanlı Dönemi'nde nehir kenarlarına ve yol güzergâhlarına savunma amaçlı kurulan küçük askerî garnizonlara palanka adı verilmektedir. Espiye kenti ve Andoz Kalesi de özellikleri bakımından Osmanlı Dönemi'nde bir palanka statüsündedir (Fatsa, 2010).

Giresun kıyılarının yüksek kıyı profili göstermesi, sahilden iç kesimlere olan karayolu oluşturma alternatiflerini sınırlandırmaktadır. Bu durum, bölgedeki akarsu vadilerinin kullanılmasını zorunlu hale getirmiştir. Yağıldere Vadisi, her dönem Andoz Kalesi'nin doğusundan Espiye sahiline ulaşan alternatif bir güzergah olarak öne çıkmaktadır (Texier, 2002).



Şekil 1. Çalışma sahasının lokasyon haritası

Kalenin inşa tarihini belirten bir kitabesi bulunmamakla birlikte bu konu hakkında kaynaklarda da herhangi bir bilgiye rastlanılmamıştır. Bu noktada Ksenophon'un verdiği bilgiler oldukça kıymetlidir. Müellif, Doğu Karadeniz'den bahsederken sahil ve dağlık kesimlerde yaşayan toplumların bölgenin stratejik noktalarına kale ve gözetleme kuleleri inşa ettiklerini yazmaktadır (Ksenophon, 2014). Andoz Kalesi'nin günümüzdeki veriler ışığında dönemi ve hangi uygarlık tarafından inşa edildiği bilinmemektedir. Triantaphyllides'e göre yapı, adını 13.-14. yüzyıllardaki Türk akınlarına karşı burayı savunan son muhafız Antonios'tan almıştır (Yuka, 2023). Osmanlı İmparatorluğu döneminde Anadolu'yu ziyaret eden, gezi güzergahları arasında Giresun ve civarı da bulunan seyyahların Andoz Kalesi hakkında bilgi vermemeleri oldukça ilginçtir. Öte yandan Emecen (2020) ve Gökbilgin (1962) Osmanlı dönemi tahrir defterlerinde kaleden bahsedilmediğini yazmaktadır. Bu bilgiler özellikle Osmanlı hâkimiyetiyle birlikte bölgenin güvenlik sorunun büyük ölçüde ortadan kalktığına ve kalenin bu dönemde önemini yitirdiğine işaret etmektedir.

Özetle Trabzon'un Komnenoslar döneminde tahkim edilerek güçlü bir hale getirildiği ve bu kalenin Antonios Kalesi olarak anıldığı, bu adlandırmanın da Türk hakimiyeti döneminde Anduz/Andoz şekline dönüştüğü anlaşılmaktadır (Yuka, 2024).

Andoz Kalesi, Kelkit Havzası'ndan Yağlıdere Vadisi yoluyla kıyıya ulaşılan tali bir güzergâhın sahil kesimiyle bulunduğu alanda yer almaktadır. Bu durum söz konusu kalenin stratejik açıdan oldukça önemli bir noktada olduğunu göstermektedir. Kıyı kesimi yaklaşık olarak 3 km'lik bir düzlük oluşturan Espiye kenti iki vadinin ortasına konumlandırılmıştır. Bunlardan doğuda kalanı Özlüce, batıda kalanı ise Yağlıdere'dir. Andoz Kalesi, Espiye'den güneye inen Yağlıdere Vadisi'nin sahile ulaştığı noktanın yaklaşık olarak 1 km kadar güneybatısındaki bir tepe üstünde bulunmaktadır. Bu noktanın Harşit Vadisi'ne, Espiye kentine ve Zefre limanına da oldukça yakın olması kalenin önemini artırmaktadır (Fatsa, 2010). Ayrıca bu bölgeden güney istikametinde oluşturulan yol, sahil kesimiyle Alucra ve tarihi süreçte önemli yerleşmelerden biri olan Şebinkarahisar'ı birbirine bağlamaktadır. Bu özellikleri bakımından Andoz Kalesi, hem Giresun'un tarihi süreçte oluşturulan kıyı savunma hattının önemli bir parçası hem de kent tarihi açısından önemli bir savunma yapısı olarak belirmektedir.

Bu çalışmada yukarıda tarihi ve stratejik önemi vurgulanan Andoz Kalesi'nin İHA destekli fotogrametri kullanılarak 3B modellenmesi gerçekleştirilmiş, bölgenin arkeolojik envanterinin oluşturulması ve koruma stratejilerine katkı sağlaması hedeflenmiştir.

Andoz Kalesinin ilerleyen süreçte doğal afetlerle (heyelan, deprem vs.) ortadan kalkacak seviyede yıkılması ya da beşeri tahribata uğraması halinde yapının günümüzdeki durumu hakkında detaylı görsel materyal sunması açısından bu çalışmanın gelecek dönemde hazırlanabilecek olan restorasyon projeleri ve sanal rekonstrüksiyon çalışmalarına katkı sağlama potansiyeli de bulunmaktadır.

2. Veri ve Yöntem

Araştırmada Andoz Kalesi'nin 3B olarak modellenmesinde uygulanan adımlar Şekil 2'de gösterilmiştir. Çalışmada, halihazırda envanterde bulunan DJI Mini 3 Pro marka/model insansız hava aracı kullanılmıştır (Tablo 1). DJI Mini 3 Pro insansız hava aracının (İHA) hafif ve kompakt yapısı, özellikle dar veya engebeli arazi koşullarında kolay kullanım imkânı sağlamaktadır. Ayrıca 249 gram ağırlığında olması, birçok ülkede İHA kullanımına yönelik yasal düzenlemelere tabi olmadan uçuş yapılmasına olanak tanımaktadır. Gelişmiş engel algılama sistemi sayesinde güvenli uçuş sağlayarak arkeolojik alanlarda riskleri minimize etmektedir. Üzerinde yer alan 1/1.3 inç CMOS sensörü ve 48 MP çözünürlüklü kamerası, yüksek doğrulukta ve detaylı görüntü elde edilmesine katkıda bulunmaktadır. 3 eksenli mekanik gimbal sistemi, çekim sırasında stabiliteyi artırarak fotogrametrik modelleme için gerekli net ve keskin görüntülerin alınmasını sağlamaktadır. GPS, Galileo ve BeiDou uydu sistemleriyle hassas konum belirleme özelliğiyle veri doğruluğunu artırmaktadır. Ayrıca uzun uçuş süresi (standart batarya ile 34 dakika, plus batarya ile 47 dakika), geniş alanların verimli bir şekilde taranmasına olanak tanımaktadır. Bu özellikler, Andoz Kalesi gibi erişimi zor alanların düşük maliyetle ve yüksek doğrulukla modellenmesini sağladığından, bu İHA'nın kullanımı tercih edilmiştir.

Hazırlık	•3B modelleme yapılacak sahanın İHA uçuş planının hazırlanması (Dronelink web sayfası) •Yer kontrol noktalarının (YKN) yerlerinin sahada belirlenmesi
Kontrol	•Mobil aygıt (cep telefonu, tablet bilgisayar vb.) dronelink uygulaması üzerinden uçuş kontrollerin yapılması
Uygulama	•GNSS alıcısı ile YKN koordinatlarının ölçülmesi •İHA ile uçuş planının uygulanması ve fotoğrafik verilerin toplanması
Veri İşleme	•YKN'lerin yazılıma yüklenmesi ve görüntülerde işaretlenmesi •Toplanan verilerin 3B model yazılımında işlenmesi
Sonuç	•Sonuçların elde edilmesi

Şekil 2. Çalışmanın uygulama adımları

Uçuş planı sonrasında elde edilen fotoğraflarla Agisoft Metashape Professional yazılımında fotogrametrik yöntemler kullanılarak sahanın 3B modeli oluşturulmuştur. Agisoft Metashape Professional İHA fotogrametrisinde sıklıkla kullanılan

bir yazılımdır. Bu yazılım sayesinde İHA'lar ile elde edilen görüntüler kullanılarak yüksek çözünürlüklü 3B modeller, ortomozaik haritalar ve sayısal yükseklik modelleri oluşturulabilmektedir. Fotogrametrik işlemli yazılımlar, yeterli donanım kapasitesine sahip bilgisayarlarda daha kısa sürede daha doğru sonuç vermektedir. Bundan dolayı yapılan analizler halihazırda elimizde bulunan Intel Core i7 11700K (3.6 GHz 16 mb) işlemciye, 64 GB RAM ve 500 GB SSD kapasiteye ve Gigabyte GeForce RTX 3060 12 GB ekran kartına sahip, masaüstü bilgisayarda gerçekleştirilmiştir.

Tablo 1. DJI Mini 3 Pro insansız hava aracının teknik özellikleri

Parametreler	Teknik Özellikleri
Engel Algılama	3 yönlü
Gimbal	3 eksenli mekanik gimbal
Ağırlık	249 gram
Ebatlar	145x90x62 mm (katlanmış), 251x362x 70 mm (açık halde)
Maks. Hız	16 m/s (Spor Mod), 10 m/s (Normal Mod), 6 m/s (Sinematik Mod)
Batarya	2453 mAh (standart batarya)-3850 mAh (plus batarya)
Lens	FOV 82.1°, f1/7, 24 mm
Kamera Sensörü	1.3 inç CMOS, 48 MP
Uçuş Süresi	34 dk. (standart batarya)-47 dk (plus batarya)
Maks. İletim Mesafesi	DJI O3, 12 km'ye kadar
Rüzgar Direnci	5. Seviye
Uydu Sistemi	GPS + Galileo + BeiDou
Konum hassasiyeti	Dikey $\pm 1,5$ Yatay $\pm 1,5$ m

2.1 Uçuş Planının Hazırlanması

İnsansız hava araçlarının, belirli bir rota üzerinde sabit uçuş gerçekleştirirken bir yandan da belirlenen noktalarda fotoğraf çekebilmesi için bir uçuş planına ihtiyaçları vardır. İleri seviye İHA kullanıcıları herhangi bir yazılıma bağlı kalmaksızın bu işlemi rahatça yapabilirler. Fakat yine de birtakım sorunların yaşanması kaçınılmaz olabilmektedir. Bunun yerine uçuş planı 3. parti yazılımlar kullanılarak yapılmaktadır. Bu yazılımlar hem başlangıç aşamasındaki İHA kullanıcılarının işini kolaylaştırmakta hem de yapılacak işlemlerdeki hata payını minimize etmektedir. Günümüzde Pix4D Capture, DroneDeploy, Litchi, UgCS vb. farklı yazılımlarla uçuş planları hazırlanabilmektedir. Bu çalışmada uçuş planı hazırlamak için Dronelink yazılımı kullanılmıştır. Mobil ve masaüstü sürümlerinin olması, geniş özellik yelpazesi ve çalışmada kullanılan İHA da dahil olmak üzere birçok İHA modelini desteklemesinden dolayı bu yazılım tercih edilmiştir. Dronelink yazılımını kullanabilmek için öncelikle bir üyelik oluşturulmalıdır (Şekil 3a). Dronelink üyelik planlarında, profesyonel (professional) ve amatör (hobbyist) plan olmak üzere iki kategori sunmaktadır (Şekil 3b). Bunlardan profesyonel plan daha çok ticari-kurumsal kullanıcılar tarafından, amatör plan ise eğlence, eğitim ve kâr amacı gütmeyen kuruluşlar için tercih edilmektedir. Her plan kademesinde farklı seçenekler olmakta birlikte bu çalışma kapsamında amatör plan kategorisinde elit üyelik planı seçilerek, ücretli üyelik oluşturulmuştur.

Hazırlık aşamasında, 3B modellemenin yapılacağı güzergâh Dronelink yazılımının arayüzünde bulunan uydu görüntüsü üzerinden belirlenmiştir. Bu aşamada uçuş bilgileriyle ilgili bir takım parametrik veriler sistem arayüzündeki modüle girilmiştir. Bunlar; uçuş yüksekliği, uçuş hızı, rota tasarımı, yatay ve dikey örtüşme oranı, kamera gimbal açısı gibi bilgilerden oluşmaktadır (Şekil 3c).

Uçuş yüksekliği, veri kalitesini ve modelin doğruluğunu etkileyen en önemli 3B modelleme parametresidir. Uçuş yüksekliği, İHA kameralarının yerden hangi mesafede fotoğraf çekeceğini belirlemekte ve bu, fotoğrafların çözünürlüğü üzerinde önemli bir rol oynamaktadır. Daha düşük bir uçuş yüksekliği, fotoğrafların daha yüksek çözünürlükte olmasını sağlayarak modeldeki yüzey detaylarının daha iyi görünmesine olanak tanımaktadır. Fakat düşük uçuş yüksekliği daha fazla fotoğraf çekilmesini gerektirdiğinden veri işleme sürecinin uzamasına yol açmakta aynı zamanda sahadaki ani yükseklik değişimlerinden kaynaklı bozulmalara da neden olmaktadır. Araştırmada uçuş yüksekliği, kalkış noktasından 50 m olacak şekilde ayarlanmıştır. Bu yükseklik hem Sivil Havacılık Genel Müdürlüğü tarafından yayınlanan İHA Sistemleri Talimatı (SHT-İHA)'nın 19. maddesinin c bendi uyarınca belirlenen maksimum uçuş yüksekliğinin altında kalmakta hem de hem de yüksek çözünürlüklü görüntülerle topografik detayların (bitki örtüsü, yapılar, yüzey dokusu) kaydedilmesini mümkün kılmaktadır. Ayrıca yasal sınırlara uygunluğu da garanti altına almaktadır. Çalışmada 50 metrelik rota haricinde sırasıyla 10 m, 20 m ve 30 m yüksekliğinde ve sırasıyla 70 m, 50 m ve 70 m yarıçapta 3 farklı dairesel yörüngede uçuş gerçekleştirilmiştir.

Uçuş hızı, 3B modelleme projelerinde İHA'nın hareket ettiği hızı ifade etmektedir. İHA'nın uçuş hızı, çekilen fotoğraflar arasındaki örtüşme oranını ve fotoğrafların netliğini etkileyen önemli bir faktördür. Yavaş bir uçuş, daha detaylı ve daha sık fotoğrafların çekilmesini sağlayarak modelin doğruluğunu artırmaktadır. Ancak, bu durum uçuş süresini uzatmakta ve pil tüketiminin artmasına neden olmaktadır. Hızlı bir uçuş ise daha geniş bir alanı daha kısa sürede taramaya olanak tanırken, fotoğraf kalitesinin düşmesine ve örtüşme oranının yeterli seviyede gerçekleşmemesine neden olabilmektedir. Bu çalışmada uçuş hızı 12 km/saat olarak belirlenmiştir.

Rota tasarımı, 3B modelleme projelerinde İHA uçuşunun etkinliğini ve fotoğraf çekim başarısını belirleyen kritik bir aşamadır. Doğru bir rota tasarımı, modelleme yapılacak alanın tümüyle kapsanmasını ve gerekli fotoğrafların uygun örtüşme oranlarıyla çekilmesini, farklı noktaların farklı açılardan algılanabilmesini sağlamaktadır. Genellikle rota, paralel çizgiler halinde oluşturulmaktadır. Bu çizgiler arasındaki mesafe, fotoğrafların yatay ve dikey örtüşme oranlarının en uygun olacağı şekilde, yazılım üzerinden otomatik olarak ayarlanmaktadır. Daha karmaşık yapılar, örneğin tarihi bir kale gibi detaylı yüzeylere sahip bölgelerde, çapraz veya eğimli rotalar eklenerek verilerin daha kapsamlı bir şekilde toplanması sağlanabilmektedir. Çalışmada modelleme için iki farklı tip uçuş rotası oluşturulmuştur. Bunlardan ilki enine ve boyuna paralel çizgilerden oluşan ızgara (grid) tipi uçuş rotasıdır (Şekil 3c). Modellemede oluşturulan ikinci tip uçuş rotası ise dairesel (orbit) uçuş rotasıdır (Şekil 3d, 3e ve 3f). Dairesel rota ile 3B modellemenin yapılacağı sahanın çevresinde daire çizerek uçuş gerçekleştirilmiştir. Böylece yapının yan yüzeylerinin fotoğrafları çekilerek model kalitesi arttırılmıştır. İHA, uçuş planını toplamda 1 saat 50 dakikada tamamlayarak 2242 adet fotoğraf elde etmiştir.

Fotogrametrik görüntülerin elde edilmesindeki önemli noktalardan biri de örtüşme oranıdır. Yüksek örtüşme oranının birtakım avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır. Yüksek örtüşme oranı model kalitesini ve detayı arttırmakta ve hata payını azaltmaktadır. Özellikle arkeolojik alan modellemelerinde, yapı ve bina haritalamalarında hata payını minimize etmek için yüksek örtüşme oranı kullanılmalıdır. Yine eğimli, bitki örtüsü ve binaların yoğunluk gösterdiği alanlarda yüksek örtüşme oranı tercih edilmektedir. Bunların yanında yüksek örtüşme oranı daha fazla görüntü alımına neden olmakta ve daha fazla depolama alanı ihtiyacı oluşturmaktadır. Ayrıca uçuş ve görüntü işleme süresinin uzamasına, yüksek kapasiteli bilgisayar ihtiyacına, bunların yanında pil tüketiminin artmasına da sebebiyet vermektedir. Literatürde uçuş yüksekliklerine ve 3B modelleme türlerine göre farklı örtüşme oranları tercih edilmektedir (Aylar vd., 2024; Karakaya & Ulvi, 2024; Orkan, 2017; Şenol vd., 2021; Tercan, 2017). Bu çalışmada örtüşme oranı boyuna %85 enine ise %80 olarak belirlenmiştir.

Kamera gimbal açısı, 3B modelleme projelerinde doğru perspektifte fotoğraf çekimi yaparak modelin detaylarını ve geometrik doğruluğunu belirleyen önemli bir parametredir. Kamera açısının doğru ayarlanması hem yatay hem de dikey yüzeylerde doku ve detay kaybının önüne geçmektedir. Genellikle ortofoto üretimi ve düz yüzeylerin modellenmesi için kamera, yere tamamen dik (nadirde) 90° olacak şekilde ayarlanmalıdır. Ancak, karmaşık yapılar veya çok yüzeyli nesneler (örneğin, tarihi bir kale veya heykel) üzerinde çalışırken kamera açısının belirli bir eğimle, örneğin, 45° açıyla ayarlanması, farklı perspektiflerden veri toplanmasını sağlayabilmektedir. Bu çalışmada kamera gimbal açısı ızgara tipi uçuş rotasında 90°, dairesel uçuş rotasında ise 45° olarak belirlenmiştir.

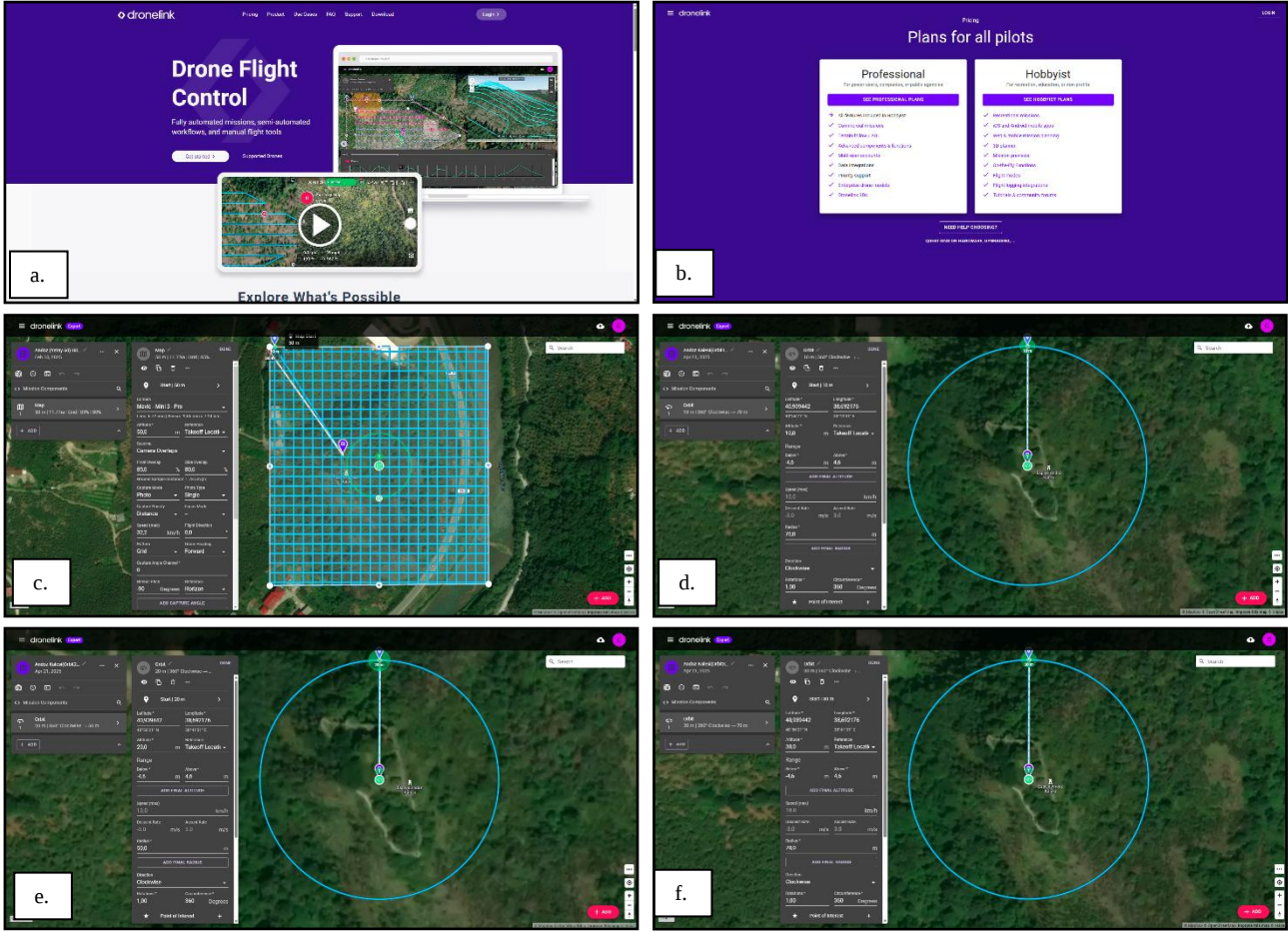
2.2 Yer Kontrol Noktalarının (YKN) Yerlerinin Sahada Belirlenmesi

Fotogrametrik modellemede yüksek mekânsal doğruluk elde edilebilmesi için yer kontrol noktalarının (YKN) hassasiyetle belirlenmesi kritik bir adımdır. Bu noktaların koordinatları, genellikle GNSS alıcıları kullanılarak yüksek doğrulukla ölçülmektedir. Ancak yalnızca ölçüm doğruluğu değil, YKN'lerin çalışma sahasındaki uygun konumlara yerleştirilmesi de modelin genel geometrik güvenilirliği açısından büyük önem taşımaktadır. Bu kapsamda, çalışma alanının topografyası, yapısal çeşitliliği ve görüş açıklığı dikkate alınarak hem yatay hem de düşey doğruluk açısından optimum bir dağılım hedeflenmiştir (Topan vd., 2007). Noktaların hem merkezi hem de kenar bölgeleri temsil edecek şekilde homojen olarak sahaya yerleştirilmesine özen gösterilmiş; ayrıca fiziksel erişilebilirlik, düz zemin tercihi ve uzun süreli görünürlük gibi kriterler de göz önünde bulundurulmuştur. Böylece elde edilen 3B modeller hem görsel hem de ölçümsel açıdan güvenilir hâle getirilmiştir. Araştırma sahasında GNSS ile ölçümü yapılacak YKN'lerin konumları uçuş öncesinde belirlenmiş, ilgili alanlar zemin ile kontrast oluşturacak şekilde spreyl boya ile boyanmıştır (Şekil 4).

2.3 Mobil Aygıt Dronelink DJI Uygulaması Üzerinden Uçuş Kontrollerin Yapılması

Uçuş öncesinde yapılan kontroller hem operasyonel güvenliği sağlamak hem de modelleme için gerekli olan yüksek doğrulukta fotoğraf verisini elde etmek açısından önem arz etmektedir. Uçuş öncesinde İHA'lar için standart kalibrasyon uygulamaları olan GPS, IMU, pusula ve kamera kalibrasyonları yapılarak fotografik verilerin toplanmasında cihazdan kaynaklanabilecek olası hatalar azaltılmıştır. Ayrıca İHA ve ekipman kontrolleri kapsamında pillerin şarj durumları, pervanelerin sağlam ve takılı olduğu, yeterli depolama alanı durumu ve sinyal gücü gibi önemli kontroller de gerçekleştirilmiştir. Tüm bunların yanında çevresel koşullar da uçuş güvenliği açısından önem arz etmektedir. Ayrıca elde edilen görüntülerde topografik gölgelerden kaçınmak için uçuş günü ve saati de önemlidir (Hamal & Ulvi, 2022).

Bu çalışma için yapılan uçuş, 21 Nisan 2025 tarihinde güneş ışınlarının topografyayı en iyi aydınlattığı 12:00-14:00 saatleri arasında, 12°C hava sıcaklığında ve 1 knot (1.85 km/sa) rüzgar hızında gerçekleştirilmiştir. Uçuş sırasında GPS sinyal kalitesi (30-32 uydü), batarya sıcaklığı ve anlık rüzgâr hızı da takip edilmiştir.



Şekil 3. Uçuş planı hazırlık aşamaları: a) Dronelink web sayfasına giriş ve üyelik için ilk adım, b) Üyelik planının seçimi, c) Izgara tipi uçuş rotası, d) 10 m yükseklik ve 70 m yarıçap dairesel rota, e) 20 m yükseklik ve 50 m yarıçap dairesel rota, f) 30 m yükseklik ve 70 m yarıçap dairesel rota



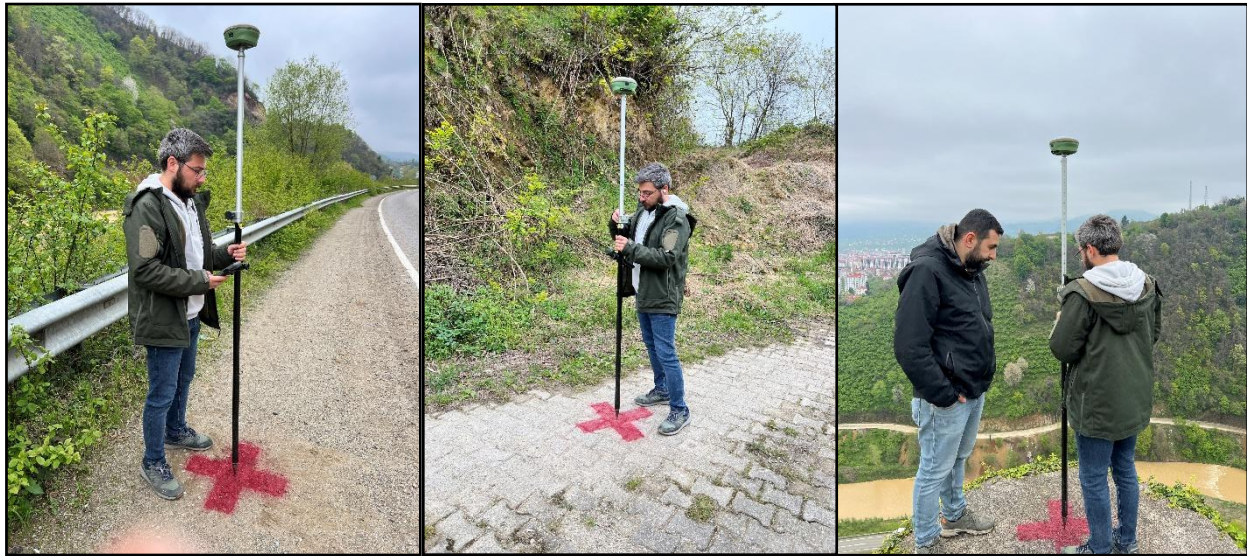
Şekil 4. Çalışma alanında yer kontrol noktalarının (YKN) sahaya yerleştirilmesi süreci. Farklı zemin türlerinde şablon ve sprey boyası kullanılarak oluşturulan işaretlemeler GNSS ölçümleri öncesinde belirlenmiştir

2.4 GNSS Alıcısı ile YKN Koordinatlarının Ölçülmesi

Fotogrametrik modellemede yüksek doğruluk elde etmek amacıyla YKN'lerin hassas koordinatlarının belirlenmesi kritik öneme sahiptir. Bu çalışmada, sahaya önceden yerleştirilen 8 adet YKN'nin konumu, FOIF marka A60 Pro model GNSS alıcısı kullanılarak ölçülmüştür (Şekil 5). Ölçümler, TUSAGA-Aktif CORS-TR ağı üzerinden, ortalama 90 epok gözlem ile gerçekleştirilmiştir. Elde edilen koordinatlar, GRS80 elipsoidi ve UTM projeksiyonuna dayalı TUREF / TM39 (EPSG:5254) koordinat referans sistemine göre hesaplanmış ve Agisoft Metashape Professional yazılımına referans olarak tanımlanarak fotogrametrik modelleme sürecinde kullanılmıştır. Bu noktaların 4'ü modelin konumsal optimizasyonunda referans (kontrol noktası) olarak kullanılırken, diğer 4'ü doğrulama amacıyla kontrol noktası (check point) olarak atanmıştır (Şekil 6). Bu uygulama, modelin hem iç hem de dış doğruluğunun değerlendirilmesine olanak sağlamıştır. Bu adımlar sayesinde oluşturulan 3B modelin mekânsal güvenilirliği artırılmış, arkeolojik belgeleme açısından bilimsel geçerliliği güvence altına alınmıştır. Ölçülen YKN'lere ait bilgiler Tablo 2'de gösterilmiştir.

Tablo 2. Yer kontrol noktalarına (YKN) ait ölçülen koordinatlar

YKN No	X	Y	Z
1-Kontrol	4534133.940	474346.064	14.467
2-Kontrol	4533700.343	474330.523	11.673
3-Referans	4533911.445	474274.353	9.065
4-Kontrol	4533706.218	474009.754	8.222
5-Kontrol	4534121.558	473923.348	61.882
6- Referans	4534120.017	474006.192	67.868
7-Referans	4533933.338	473982.884	100.616
8-Referans	4533889.212	474090.562	152.534



Şekil 5. Yer kontrol noktalarının GNSS alıcısı (FOIF A60 Pro) ile epoklu gözlem yöntemi kullanılarak ölçülmesi



Şekil 6. YKN'lerin araştırma sahasındaki dağılımı (kırmızı noktalar: doğruluk değerlendirmesi için ayrılan kontrol noktalar, sarı noktalar: referanslama noktaları)

2.5 İHA ile Uçuş Planının Uygulanması ve Fotogrametrik Veri Toplama

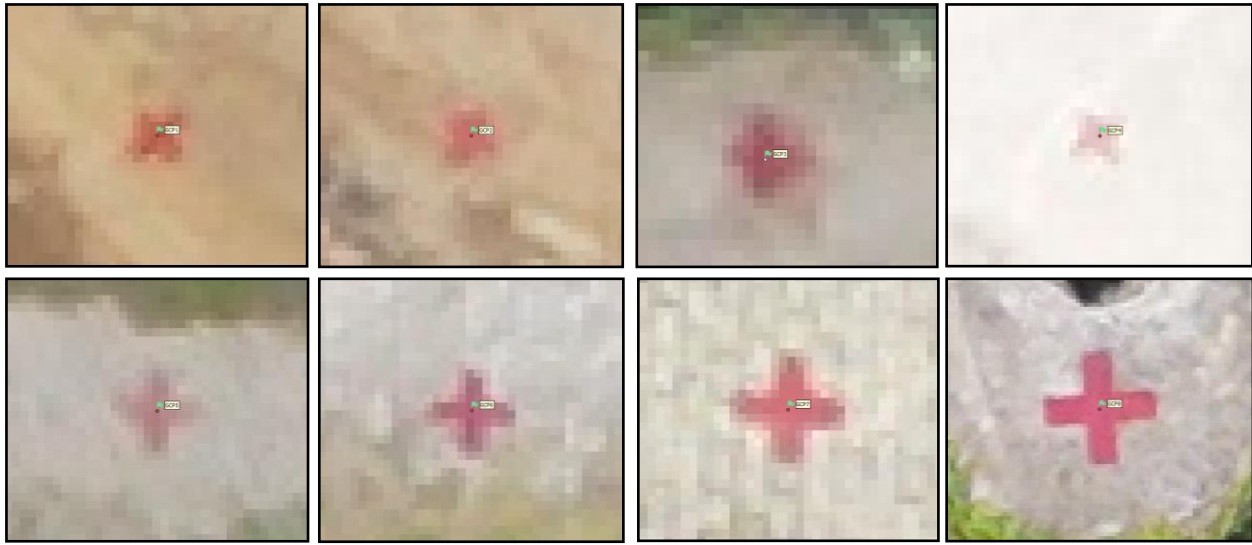
Dronelink DJI uygulaması, İHA uçuşlarının planlanması, yönetilmesi ve gerçek zamanlı olarak kontrollerin sağlanması için kullanılan mobil bir yazılımdır. Uçuş kontrolleri, genellikle mobil bir aygıt (cep telefonu ya da tablet bilgisayar) üzerinden gerçekleştirilmektedir. Bu aşamada, mobil cihaz, İHA ile sürekli iletişim kurarak uçuş sırasında hız, yükseklik, kamera açısı gibi parametreleri gerçek zamanlı olarak izlemekte ve gerektiğinde ayarlamalar yapılmasına olanak tanımaktadır. Dronelink web arayüzü üzerinden uçuş alanıyla ilgili gerekli parametreler ayarlandıktan sonra uçuş planının İHA'ya iletilmesi için internet bağlantısı olan mobil bir cihaz kullanılması gerekmektedir. Çalışmada Android 14 tabanlı işletim sistemine, MediaTek Helio G99 Octa-core işlemciye, 8+8 GB RAM'e, 6.43 inç ekrana sahip Realme 10 marka/model cep telefonu kullanılmıştır. Cep telefonuna Dronelink DJI uygulamasının kurulumu yapıldıktan sonra ilgili kullanıcı adı ve şifre ile uygulama hesabına giriş yapılmıştır. Cep telefonunun Type-C bağlantı noktasıyla İHA kumandasına bağlanarak Dronelink DJI uygulamasındaki uçuş planı İHA kumandasına aktarılmıştır. Bu andan sonra İHA, uçuş planına uygun olarak belirtilen rotada uçarak, ilgili noktalarda belirlenen örtüşme oranına göre fotoğraf çekim işlemini tamamlamış ve kalkış yaptığı noktaya (home point) otomatik iniş gerçekleştirmiştir. Burada dikkat edilmesi gereken husus, 3B olarak modellenecek alanın büyüklüğü ve İHA pilinin bu alan üzerindeki uçuş süresini tamamlayabilecek yeterli kapasiteye sahip olmasıdır. Batarya uçuş kapasitesinin uçuş planını tamamlamaya yetmediği durumlarda İHA, uçuş planını sonlandırarak kalkış yaptığı noktaya dönecektir. Bu durumda yedek batarya kullanılarak uçuş planında kalınan yerden devam etmek mümkündür.

2.6 Verilerin İşlenmesi

Uçuş planına uygun olarak toplanan görsel veriler Agisoft Metashape Professional (v.2.1.1) yazılımı kullanılarak işlenmiştir. Agisoft Metashape Professional yazılımı Structure from Motion (SfM)-Multi-View Stereo (MVS) algoritmalarını kullanarak fotogrametrik ürünlerin üretimi gerçekleştirmektedir (Hamal & Ulvi, 2022; İzci vd., 2024). SfM, örtüşen çoklu iki boyutlu görüntülerden nesne ya da sahnenin 3B modelini, ortak görüntü noktalarını tespit edip bu noktaların konumlarını üçgenleme yöntemiyle hesaplayarak oluşturan bir algoritmalar bütünüdür (Çelik vd., 2020; Dellaert vd., 2000; Peterson vd., 2015; Yakar & Doğan, 2017). MVS, farklı açılardan çekilmiş çoklu görüntüler kullanılarak sahneye ait yüzey noktalarının yoğun derinlik bilgilerini tahmin eden ve yüksek çözünürlüklü üç boyutlu yeniden yapılandırma sağlayan bir tekniktir (Erbaş vd., 2025; Furukawa & Hernández, 2015; Öcalan vd., 2024; Romanoni &

Matteucci, 2019). SfM sonucunda elde edilen seyrek nokta bulutu, MVS yöntemiyle yoğunlaştırılarak detaylı 3B yapıya dönüştürülmektedir.

Sahada GNSS alıcısı ile konumlandırılan ve koordinatları milimetre düzeyinde hassasiyetle belirlenen YKN'ler, yazılıma aktarılan görüntüler üzerinde manuel olarak işaretlenmiştir (Şekil 7). Bu işlem sırasında her bir YKN, farklı açılardan çekilmiş en az 8–10 fotoğraf üzerinde tanımlanmıştır. YKN'lerin görüntüler üzerindeki doğru konumlarının işaretlenmesi, modelin dünya koordinat sistemine doğru oturtulması açısından büyük önem taşımaktadır. Bu sayede oluşturulan fotogrametrik modelin mekânsal doğruluğu artırılmıştır. Manuel işaretleme süreci tamamlandıktan sonra Tools > Optimize Cameras komutu ile kamera yönelim parametreleri yeniden hesaplanmış ve modelin geometrik tutarlılığı iyileştirilmiştir. Görsel veriler aşağıdaki adımlar takip edilerek 3B model haline getirilmiştir.



Şekil 7. Görüntülerde yer alan YKN'lerin manuel olarak işaretlenmesi

Sırasıyla Workflow>Add Photos adımları takip edilerek toplam 2242 adet fotoğraf yazılıma aktarılmıştır. Bu fotoğraflardan 2022 tanesi İHA'nın çekül doğrultusunda, yer yüzeyine 90° açıyla çekmiş olduğu fotoğraflardan oluşmaktadır (Şekil 8a). 220 adet fotoğraf ise 3 farklı dairesel yörüngeden farklı yüksekliklerde ve farklı açılarla çekilen fotoğraflardan oluşmaktadır (Şekil 8b). Dairesel fotoğraflar, tarihi kale gibi yapılarda modelin yan yüzeylerinin daha doğru algılanmasını ve texture (dokulama) işleminde yüzeyin daha doğru algılanmasını sağlamaktadır. Fotoğraflar, dülemsel görüntüler olduğu için derinlik bilgisi içermemektedir.

Workflow>Align Photos adımı uygulanmış, çekim açıları ve ortak noktalarına dayanarak, fotoğraflar hizalanmıştır. Bu adımda yüksek doğruluk ve hassasiyet için Accuracy parametresi Highest olarak seçilmiştir. Bu parametre en yüksek oranda hassasiyet sağlarken, işlemin daha uzun sürede gerçekleşmesine neden olmuştur. Bu işlem ile sahanın basit nokta bulutu oluşturulmuştur. Özellikle yapı modellerinde boyut, form ve detayların çıkarılması için bu adım oldukça önem arz etmektedir. Fotoğrafların hizalanmasının ardından 8 adet YKN projeye dahil edilmiştir. Bu noktaların konum bilgileri, TUREF/TM39 projeksiyon sistemine uygun olarak, GRS80 elipsoidi temel alınarak ve EPSG:5254 kodlu koordinat referans sistemine göre tanımlanmıştır. Böylece modelin küresel koordinat sistemine oturması sağlanmıştır. Her bir YKN, en az 8–10 farklı fotoğraf üzerinde manuel olarak işaretlenmiş, ardından Tools>Optimize Cameras komutu kullanılarak kamera iç parametreleri ve konumları, bu noktalar referans alınarak optimize edilmiştir. Bu işlem sayesinde fotogrametrik modelin geometrik doğruluğu artırılmış, YKN'ler ile modelin eşleşmesi güçlendirilmiştir.

Workflow>Build Point Cloud adımıyla sahasın yoğun nokta bulutu oluşturulmuştur. Bu aşamada modellenecek sahanın geometri detayı artırılmış, mesh (ağ yapısı) ve texture (doku) için temel oluşturulmuş, analizdeki hassasiyet ve doğruluk artırılmıştır (Şekil 8c).

Workflow>Build Model adımıyla, modelin yüzeyini temsil eden bir ağ yapısı (mesh) oluşturularak modelin genel geometrisi ortaya çıkarılmıştır. Bu işlem sırasında yazılım, MVS algoritmasını kullanarak nokta bulutundaki komşu noktaları birleştirmekte ve bu noktaları üçgen yüzeylerle ilişkilendirmektedir. Elde edilen yüzey ağı, modelin detaylı geometrik yapısını temsil etmektedir. Ayrıca sonraki aşamalar (örneğin doku kaplama) için temel oluşturmaktadır. Yüksek kaliteli bir mesh, hem görsel hem de doğruluk için başarılı bir 3B modelin temelini ortaya çıkarmaktadır (Şekil 8d).

Workflow>Build Texture adımıyla 3B modelin yüzeyine renk, desen ve malzeme özellikleri ile görsel detaylar eklenmiştir. Mesh işlemi modelin geometrik formunu temsil ederken, Build Texture işlemi modelin daha gerçekçi görünmesini sağlamaktadır (Şekil 8e).

Workflow > Build Orthomosaic adımıyla, hizalanmış fotoğraflar ve oluşturulan yüzey modeli kullanılarak yüksek doğrulukta ortofoto (ortorektifiye edilmiş fotoğraf) elde edilmiştir. Ortofoto üretim sürecinde, dijital yüzey modeli (DSM) kullanılarak her pikselin gerçek dünya koordinatlarıyla eşleştirilmesi sağlanmış, böylece topografik bozulmalar ortadan kaldırılmıştır. Bu yöntemle oluşturulan ortofoto, ölçümsel doğruluk taşıyan metrik bir veri çıktısı olarak kullanıma sunulmuştur. Özellikle arkeolojik alanların mekânsal analizinde, yapıların konumsal ilişkilerinin hassas bir biçimde belirlenebilmesi açısından ortofoto görüntüler büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmada elde edilen ortofoto, 44.781×51.062 piksel çözünürlükte olup, 2,00 cm/piksel mekânsal çözünürlüğe sahiptir. Bu yüksek çözünürlük değeri sayesinde, detaylı yüzey özelliklerinin ayırt edilebilirliği artırılmış ve görsel analizlerin güvenilirliği sağlanmıştır (Şekil 8f).

Workflow>Build DEM adımı uygulanarak araştırma sahasının DEM (digital elevation model-sayısal yükseklik modeli) verisi oluşturulmuştur. DEM, sahanın yükseklik bilgilerini temsil eden sayısal bir model ve saha ile ilgili detaylı analizler yapmak için kullanılan önemli parametrelerden biridir. Bu adımla birlikte 5,46 cm çözünürlüğünde DEM verisi elde edilmiştir (Şekil 8g).

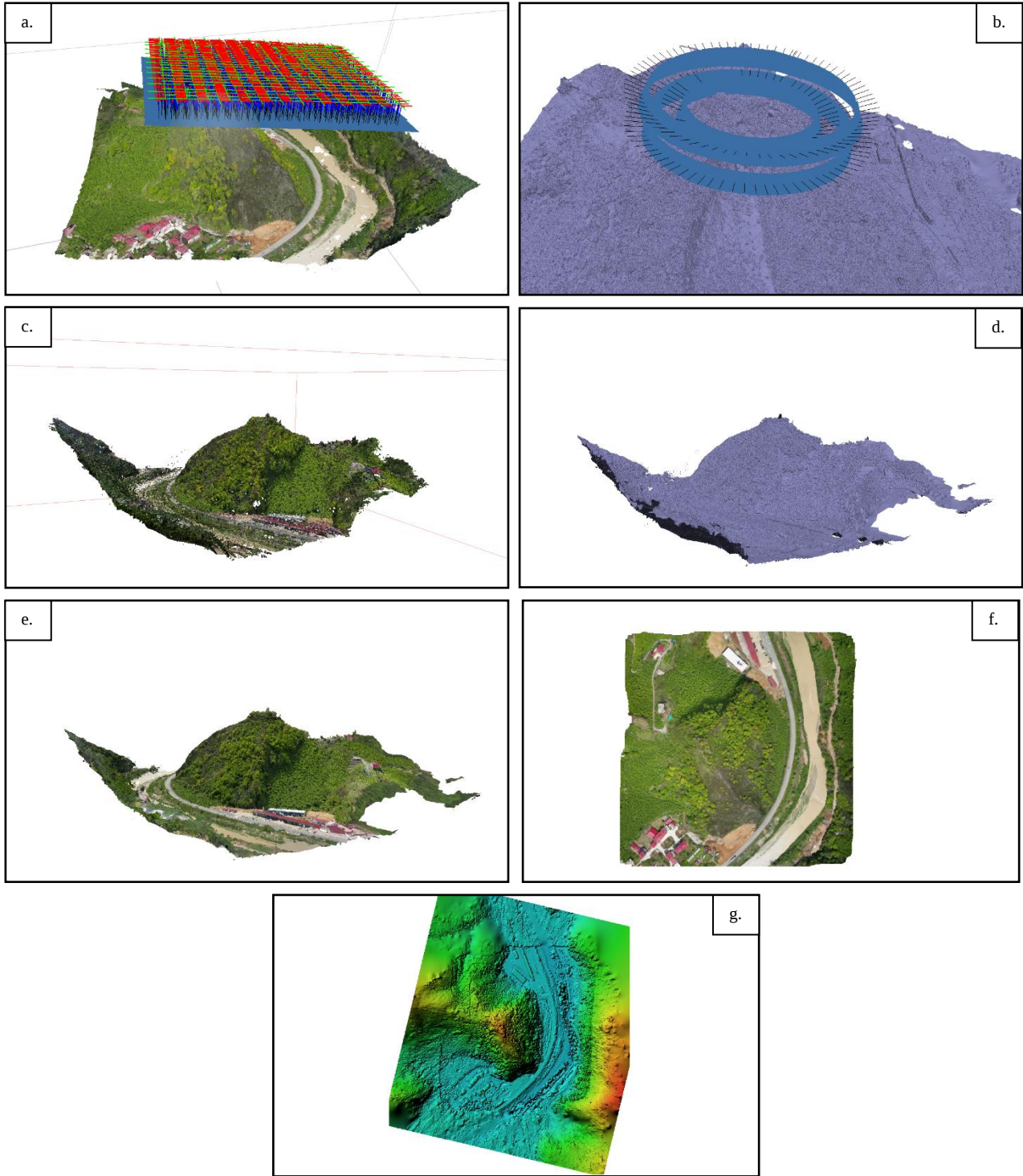
2.5 Sonuçların Elde Edilmesi

Agisoft Metashape Professional yazılımı kullanılarak gerçekleştirilen fotogrametrik işlemler sonucunda, araştırma sahası olan Andoz Kalesi'nin 3B dijital modeli başarıyla oluşturulmuştur (Şekil 9). Model, yaklaşık 353.971.465 poligon detayına ve 5.46 cm/piksel dijital yükseklik modeli (DEM) yer çözünürlüğüne sahiptir. Ayrıca ortofoto çıktısından elde edilen nominal GSD değeri 2.00 cm/piksel olarak belirlenmiştir. Bu değerler, modelin yüzey detaylarını yüksek çözünürlükte temsil ettiğini göstermektedir. Andoz Kalesi'nin bulunduğu engebeli topoğrafik yapı nedeniyle, lokal GSD değerlerinde piksel bazında değişkenlik gözlemlenmekle birlikte, yazılımın uyguladığı ortorektifikasyon süreci bu sapmaları minimize ederek modelin geometrik bütünlüğünü ve doğruluğunu korumaktadır. Fotogrametrik doğruluk, sahada GNSS alıcısı kullanılarak ölçülen toplam 8 adet yer kontrol noktası yardımıyla artırılmıştır. Bu noktalardan 4'ü referanslama amacıyla, diğer 4'ü ise kontrol amacıyla kullanılmıştır. GCP'ler, görüntüler üzerinde manuel olarak işaretlenmiş; ardından kamera kalibrasyon parametreleri optimize edilerek modelin konumsal güvenilirliği sağlanmıştır. Yapılan doğruluk analizine göre, GCP'lerde ortalama konumsal hata X: 1.44 cm, Y: 1.31 cm, Z: 0.66 cm olup, toplam hata 2.06 cm olarak hesaplanmıştır. Kontrol amaçlı kullanılan noktalarda ise bu değerler X: 3.98 cm, Y: 3.79 cm, Z: 5.35 cm, XY: 5.49 olmak üzere, toplam hata 7.67 cm olarak ölçülmüştür. Bu sonuçlar, modelin kontrol noktalarının bulunduğu alanlarda yüksek doğruluğa sahip olduğunu; buna karşılık kontrol dışı bölgelerde ise topografyanın kısa mesafelerde değişen yükseklik ve eğim değerleri ile bazı yer kontrol noktalarının (özellikle GCP1 ve GCP5) modelin kenar bölgelerinde konumlanmasının neden olduğu perspektif bozulmalarına bağlı olarak hata payının arttığını göstermektedir. Elde edilen 3B model, kalenin mevcut durumunu yüksek doğrulukla belgelemekte; restorasyon planlaması, yapısal analiz, izleme çalışmaları, dijital arşivleme ve kültürel mirasın tanıtımı gibi çeşitli alanlarda değerlendirilebilecek niteliktedir. Model, 360° sanal tur uygulamalarına entegre edilebilecek formatlarda dışa aktarılabilen, aynı zamanda çatlak analizi, yüzey deformasyon takibi ve tarihi yapıların dijital rekonstrüksiyonu gibi ileri düzey çalışmalara da olanak sunmaktadır.

Bununla birlikte, modelleme yapılan bölgenin dik topografyası ve ilkbahar mevsiminde yoğun bitki örtüsüyle kaplı olması, bazı alanlarda görüntü kalitesini ve veri bütünlüğünü olumsuz etkilemiştir. Bu nedenle, özellikle sık bitki örtüsüne sahip bölgelerde İHA fotogrametrisinin; yersel fotogrametri, yersel lazer tarama ve LiDAR sistemleri gibi tamamlayıcı yöntemlerle desteklenmesi, modelin genel olarak kalitesini artıracaktır.

Oluşturulan model, çeşitli formatlarda dışa aktarılabilir ve dijital platformlara entegre edilebilir durumdadır. Ancak yüksek detay seviyesi nedeniyle ortaya çıkan büyük dosya boyutu, çevrimiçi platformlara yükleme açısından teknik sınırlamalara yol açmıştır. Çalışma kapsamında, model farklı çevrimiçi platformlara yüklenmek istenmiş; ancak elde edilen yaklaşık 40 GB boyutundaki dosya, 250–500 MB arası yükleme sınırları bulunan bu platformlar tarafından kabul edilmemiştir. Buna rağmen model hem görsel hem de mekânsal doğruluğu ile çeşitli uygulamalar için değerlendirilebilir niteliktedir.

Çalışma kapsamında üretilen sayısal yükseklik modeli (DEM), Andoz Kalesi'nin bulunduğu alanın eğim, yükseklik ve genel arazi yapısını detaylı biçimde ortaya koymakta; topografik analizler için önemli bir veri kaynağı oluşturmaktadır. DEM verisi, aynı zamanda kalenin doğal savunma avantajlarının belirlenmesi, ulaşım ağlarıyla olan ilişkilerinin analiz edilmesi ve heyelan ya da erozyon gibi çevresel risklere karşı duyarlılık değerlendirmeleri için temel bir kaynak sağlamaktadır. Ayrıca DEM verisi, 3B modelin topografik doğruluğunu güçlendirerek, yapının içinde bulunduğu coğrafi bağlamın daha iyi anlaşılmasına katkıda bulunmuştur. Bu yönüyle, restorasyon ve koruma çalışmalarının gelecekteki planlamalarında, yapının çevresel değişimlerden nasıl etkilendiğini izlemek açısından kritik bir referans veri seti olarak değerlendirilebilir.



Şekil 8. 3B model oluşturma adımları: a) Fotoğraf hizalanması, b) Dairesel uçuş rotasından alınan fotoğraflar ve bu fotoğrafların hizalanması, c) Nokta bulutu (point cloud) oluşturulması, d) Mesh (ağ yüzeyi) oluşturularak modelin yüzey detaylarının belirlenmesi, e) Sahanın oluşturulan 3B modeli, f) Sahanın ortofoto görüntüsü, g) Sahanın sayısal yükseklik modeli (DEM)



Şekil 9. Andoç kalesinin 3B modeli

3. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışma kapsamında, Giresun ili Espiye ilçesinde yer alan Andoç Kalesi'nin üç boyutlu (3B) fotogrametrik modeli üretilmiş ve arkeolojik belgeleme süreçlerine dijital tabanlı bir katkı sağlanmıştır. GNSS destekli yer kontrol noktaları ve yüksek çözünürlüklü İHA görüntüleri kullanılarak oluşturulan model hem mekânsal doğruluk hem de görsel detay açısından tatmin edici sonuçlar vermiştir. Sahadan elde edilen 2242 adet fotoğraf, Agisoft Metashape Professional yazılımında işlenmiş; bu işlem sonucunda 2.00 cm/piksel ortofoto ve 5.46 cm/piksel çözünürlüklü DEM elde edilmiştir. Ayrıca, toplam 8 yer kontrol noktasının 4'ü referans (GCP), 4'ü doğrulama (check point) amacıyla kullanılmış ve bu noktalar temel alınarak hesaplanan ortalama RMS hatası 4.87 cm düzeyinde bulunmuştur. Bu değer, modelin yüksek konumsal doğruluğa sahip olduğunu göstermektedir.

Andoç Kalesi'nin farklı açılardan modellenmesi amacıyla orbit ve grid tipi uçuşlar bir arada gerçekleştirilmiş ve bu sayede yapının yan yüzeylerine ait detaylar da başarıyla modellenmiştir. Elde edilen model, restorasyon, sanal tur ve kültürel miras yönetimi gibi çeşitli alanlara katkı sağlayabilecek niteliktedir. Bununla birlikte, çalışma alanının yoğun bitki örtüsü ve topografik farklılıklar içermesi nedeniyle, İHA fotogrametrisinin yersel lazer tarama veya LiDAR sistemleri gibi tamamlayıcı teknolojilerle desteklenmesi önerilmektedir. Elde edilen yüksek doğruluklu 3B model, Andoç Kalesi'nin mevcut durumunun belgelenmesi, arkeolojik envanterlerin dijital ortama aktarılması ve ileride yapılacak restorasyon uygulamaları için temel bir referans veri seti niteliği taşımaktadır.

Bu çalışma, Andoç Kalesi'nin inşa edildiği mevkinin mevcut durumunun el verdiği imkanlarla gerçekleştirilmiştir. Bu nedenle kalenin tarihi sürecini aydınlatmak adına referans edilebilecek yoğunlukta değildir. Fakat arkeolojik alanlarda kullanılan klasik tekniklerin yanı sıra İHA fotogrametrisi, uzaktan algılama yöntemleri ya da coğrafi bilgi sistemleri gibi yeni teknolojik gelişmelerin de kullanılması gerekliliğini ortaya koymaktadır. Özetle bu çalışmanın sağladığı teknik veriler, Andoç Kalesi'nin Giresun kentinde yer alan tarihi savunma yapılarıyla olan ilişkisi, bu alana sağladığı katkı ve kendi döneminde hâkim olabildiği saha hakkında çıkarımlar yapmaya olanak tanımaktadır. Kalesinin tarihi sürecine dair daha kapsamlı bilgiler elde edilebilmesi için arkeolojik bir kazı gerçekleştirilmesi gerekmektedir.

Yapının içinin dolgu toprak ve bitki örtüsüyle kaplı olması kalenin bünyesinde bulunan yapıların/mimari öğelerin tespit edilerek değerlendirilmesini imkânsız hale getirmektedir. Dolayısıyla Andoz Kalesi gibi, hakkında literatürün oldukça sığ bilgiler sunduğu ve yetersiz kaldığı sit alanlarının tarihi sürecinin aydınlatılmasında arkeolojik verilere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenle arkeolojik kazı çalışmaları ve fotogrametrik yöntemlerin multidisipliner çerçevede yürütülmesi oldukça önem arz etmektedir. Bu şekilde multidisipliner bir çalışma yöntemiyle yürütülen arkeolojik çalışmalarda uzaktan algılama yöntemleri ve coğrafi bilgi sistemlerinin sağladığı teknik detaylar alanların daha net bir şekilde algılanmasına katkı sağlayacaktır.

Teşekkür

Bu çalışma kapsamında yer kontrol noktalarının koordinatlarının ölçümünde sağladıkları teknik destek ve katkılarından dolayı 2809-909 Nolu Lisanslı Harita Kadastro Mühendislik Bürosu'na teşekkür ederiz.

Kaynaklar

- Aydın, İ., Oso, C., Yaşar, M., & Polat, N. (2023). Tarihi Kızılkoyun Nekropol alanında M54 no.lu kaya mezarının fotogrametri ile 3B modellemesi. *Türkiye Fotogrametri Dergisi*, 5(1), 36–42.
- Aylar, F., Gürgöze, S., Zeybek, H. İ., Uzun, A., & Şen, H. (2024). Dış Kayalıkları'nın (İmranlı, Sivas) insansız hava aracı (İHA) kullanılarak 3 boyutlu modelinin oluşturulması. *Geomatik*, 9(1), 69–85. <https://doi.org/10.29128/geomatik.1341633>
- Bekdemir, Ü., & Elmacı, S. (2008, 9–11 Ekim). *Giresun kentinin gelişimini etkileyen faktörler* [Bildiri sunumu]. Uluslararası Giresun ve Doğu Karadeniz Sosyal Bilimler Sempozyumu, Giresun, Türkiye.
- Bryer, A., & Winfield, D. (1985). *The Byzantine monuments and topography of the Pontos*. Dumbarton Oaks Research Library and Collection.
- Ceylani, M. U., & Yavuz, U. G. (2023). Fotoğrafik modelleme: Fotogrametri tekniği ile video oyunlarında nesne-sahne tasarımı. *EKEV Akademi Dergisi*, 93, 342–358. <https://doi.org/10.17753/sosekev.1214540>
- Çelik, M. Ö., Yakar, İ., Hamal, S., Oğuz, G. M., & Kanun, E. (2020). Sfm tekniği ile oluşturulan 3B modellerin kültürel mirasın belgelenmesi çalışmalarında kullanılması: Gözne Kalesi örneği. *Türkiye İnsansız Hava Araçları Dergisi*, 2(1), 22–27.
- Çipiloğlu Yıldız, Z., Türker, M., & Ak, R. (2021). Mimari miras eğitiminde artırılmış gerçeklik ve fotogrametri desteği. *Bilişim Teknolojileri Dergisi*, 14(2), 137–149. <https://doi.org/10.17671/gazibtd.792539>
- Darkot, B. (1972). *Türkiye iktisadî coğrafyası*. İstanbul Matbaası.
- Dellaert, F., Seitz, S. M., Thorpe, C. E., & Thrun, S. (2000, June 13–15). *Structure from motion without correspondence* [Conference presentation]. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR 2000), Hilton Head, South Carolina. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2000.854916>
- Emecen, F. (2020). *Karadeniz kıyı kentleri tarihi*. Turkuaz Kitap.
- Erbaş, N. F., Kabadayı, A., & Varlık, A. (2025). Tarihi eserlerin İHA fotogrametrisi yöntemi kullanılarak 3 boyutlu modellenmesi: Yozgat Garipler Köyü Kilisesi örneği. *Kültürel Miras Araştırmaları*, 6(1), 15–24.
- Esposito, S., Fallavollita, P., Wahbeh, W., Nardinocchi, C., & Balsia, M. (2014, July 13–18). *Performance evaluation of UAV photogrammetric 3D reconstruction* [Symposium presentation]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium, Quebec City, QC, Canada.
- Fatsa, M. (2010). *XV ve XVI yüzyıllarda Giresun sosyal ve ekonomik hayat*. Bilge Ajans Matbaa.
- Furukawa, Y., & Hernández, C. (2015). Multi-view stereo: A tutorial. *Foundations and Trends in Computer Graphics and Vision*, 9(1–2), 1–148.
- Gökbilgin, M. T. (1962). XVI. yüzyıl başlarında Trabzon Livası ve Doğu Karadeniz Bölgesi. *Belleten*, 26(102), 293–338.
- Hamal, S. N. G., & Ulvi, A. (2022). 3B kent modelleri oluşturma sürecinde İHA fotogrametrisi ve CBS entegrasyonu: Mersin Üniversitesi Çiftlikköy Kampüsü örneği. *Türkiye Coğrafi Bilgi Sistemleri Dergisi*, 4(2), 97–105.
- İzci, V., Ulvi, A., & Yiğit, A. Y. (2024). Yer kontrol nokta (YKN) sayısı ve dağılımının harita üretim hassasiyetine etkisinin araştırılması. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 40(2), 167–180.
- Kabadayı, A. (2024). Mobil cihazların fotogrametri tabanlı 3B modellemedeki potansiyeli üzerine bir araştırma. *Türkiye Fotogrametri Dergisi*, 6(2), 71–77. <https://doi.org/10.53030/tufod.1593632>
- Karakaya, E. H., & Ulvi, A. (2024). İHA fotogrametrisi kullanarak tarihi alanların üç boyutlu belgelenmesi: Soli Pompeiopolis Antik Kenti örneği. *Türkiye Fotogrametri Dergisi*, 6(2), 39–47.

- Kaya, Y., Yiğit, A. Y., Ulvi, A., & Yakar, M. (2021). Arkeolojik alanların dokümantasyonunun yersel lazer tarama ve İHA teknikleri ile elde edilmesi: Konya Yunuslar örneği. *Harita Dergisi*, (165), 57–72.
- Ksenophon. (2014). *Anabasis: Onbinlerin dönüşü* (S. Ceviz, Çev.). Parola Yayınları.
- Orkan, Ö. (2017). İnsansız hava aracı (İHA) ile farklı yüksekliklerden üretilen sayısal yüzey modellerinin (SYM) doğruluk analizi. *Mühendislik ve Yer Bilimleri Dergisi*, 2(1), 1–7.
- Öcalan, T., Arıcan, D., Araei, R. M., Gül, C., & Tunalioglu, N. (2024). Accuracy analysis of 3D point clouds obtained from camera and LiDAR sensors of smartphones and tablets. *Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 39(3), 1771–1781. <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.1138633>
- Özsoy, E. E., & Aksoy, T. (2021). Risk altındaki arkeolojik alanların belgelendirilmesinde fotogrametri ile uzaktan algılama entegrasyonu: İstanbul Kara Surları örnekleme. *GSI Journals Serie C: Advancements in Information Sciences and Technologies*, 4(2), 80–101. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/aist/issue/63581/1020153>
- Peterson, E., Klein, M., & Stewart, R. (2015). *Whitepaper on structure from motion (SfM) photogrammetry: Constructing three dimensional models from photography* (Rapor No. ST-2015-3835-1). U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Research and Development Office.
- Pulat, F., Yakar, M., & Ulvi, A. (2022). Yersel fotogrametrik yöntem kullanılarak fotogrametrik yazılımların karşılaştırılması: Hüsrev Paşa Camii örneği. *Türkiye Fotogrametri Dergisi*, 4(1), 30–40.
- Romanoni, A., & Matteucci, M. (2019, October 27 – November 2). *TAPA-MVS: Textureless-aware PatchMatch multi-view stereo* [Conference presentation]. IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV), Seoul, South Korea.
- Sarıyıldız, B. (2025). *Orta Çağ'da Giresun*. Serander Yayınları.
- Sevin, V. (1995). *Arkeolojik kazı sistemi el kitabı*. Arkeoloji ve Sanat Yayınları.
- Şener, Y. S. (2012). Arkeolojik alanda *in situ* (yerinde) mozaik koruma yöntemleri. *Journal of Mosaic Research*, 5, 201–220.
- Şenol, H. İ., Polat, N., Çokoğullu, S., Memduhoğlu, A., Ulukavak, M., Oral, M., Karaçizmeli, M., & Marangoz, Ö. (2021). İHA fotogrametrisinin arkeolojik yüzey araştırmalarına katkılarının incelenmesi. *TÜBA-AR Türkiye Bilimler Akademisi Arkeoloji Dergisi*, 28, 175–186. <https://doi.org/10.22520/tubaar.2021.28.009>
- Tercan, E. (2017). Karayolu projelerinde insansız hava aracı ile üretilen sayısal arazi modelinin değerlendirilmesi: Bucak–Kocaaliler yolu örneği. *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 8(2), 172–183.
- Texier, C. (2002). *Küçük Asya: Coğrafyası, tarihi ve arkeolojisi III* (A. Suat, K. Y. Koprman, & M. Yıldız, Çev.). Enformasyon ve Dokümantasyon Hizmetleri Vakfı.
- Topan, H., Oruç, M., & Koçak, M. G. (2007, 2–6 Nisan). *Ortogörüntü üretiminde yer kontrol noktası seçimi ve sonuçlara etkisi* [Bildiri sunumu]. TMMOB Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası 11. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı, Ankara, Türkiye.
- Tozlu, S. (1985). Giresun şehrinin kara ve deniz ulaşımı. In A. Çelik (Ed.), *Yeşil Giresun Gazetesine Göre Cumhuriyetin İlk Yıllarında Giresun, Hasan Öğütçü Armağanı* (pp. 173–194). Karadeniz Teknik Üniversitesi Yayınları.
- Ulvi, A., & Yiğit, A. Y. (2020). İHA fotogrametrisi tekniği kullanarak 3B model oluşturma: Yakutiye Medresesi örneği. *Türkiye Fotogrametri Dergisi*, 2(2), 46–54.
- Uslu, A. (2022). Fotogrametri tekniği kullanılarak anıt ağaçların dijital belgelenmesi: Mızık Çamı Tabiat Anıtı örneği. *Bartın Orman Fakültesi Dergisi*, 24(1), 1–12. <https://doi.org/10.24011/barofd.1002203>
- Uslu, A., & Uysal, M. (2020). Kültürel mirasın etkileşimli keşfi için mobil artırılmış gerçeklik ve web tabanlı görselleştirme teknolojilerinin kullanılması: Sfenks Heykeli örneği. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 20(6), 1024–1031. <https://doi.org/10.35414/akufemubid.819267>
- Uslu, A., & Uysal, M. (2022). Kitle kaynaklı veriler kullanılarak anıt ağaçların 3 boyutlu modellenmesi: Boab hapishane ağacı örneği. *Anadolu Orman Araştırmaları Dergisi*, 8(2), 98–103. <https://doi.org/10.53516/ajfr.1204041>
- Yakar, M., & Doğan, Y. (2017). Silifke Aşağı Dünya Obruğunun İHA kullanılarak üç boyutlu modellenmesi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 17(4), 94–101.
- Yılmaz, H. M., Mutluoğlu, Ö., Ulvi, A., Yaman, A., & Bilgilioglu, S. S. (2018). İnsansız hava aracı ile ortofoto üretimi ve Aksaray Üniversitesi kampüsü örneği. *Geomatik*, 3(2), 129–136. <https://doi.org/10.29128/geomatik.369553>
- Yiğit, A. Y., & Uysal, M. (2021). Tarihi eserlerin 3B modellenmesi ve artırılmış gerçeklik ile görselleştirilmesi. *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 8(2), 1032–1043. <https://doi.org/10.35193/bseufbd.1011064>
- Yiğit, A. Y., & Uysal, M. (2023). Dijital ikizlerin geliştirilmesinde fotogrametrinin kullanımı ve artırılmış gerçeklik ile görselleştirilmesi. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 12(4), 1372–1384. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.1313019>

- Yuka, A. (2023). *Orta ve Doğu Karadeniz Bölgesi Sahil Kaleleri* [Doktora tezi, Atatürk Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi>.
- Yuka, A. (2024). Giresun Espiye’de bir Orta Çağ savunma yapısı; Andoz Kalesi. *Milli Kültür Araştırmaları Dergisi*, 8(2), 158–177.
- Zachariadou, E. A., & Çev. Keçiş, M. (2007). Trabzon ve Türkler (1352-1402). *OTAM Ankara Üniversitesi Osmanlı Tarihi Araştırma ve Uygulama Merkezi Dergisi*, 22, 221-241. https://doi.org/10.1501/OTAM_0000000185