

Araştırma Makalesi / Research Article

## Bir Kaya Düşme Alanında LiDAR Sensörlü Akıllı Telefon Kullanarak Tekil Kaya Blok Hacimlerinin Belirlenmesi

*The Determination of Individual Rock Block Volumes Using a Smartphone with LIDAR Sensor for a Rockfall Area*

Mehmet DOĞRULUK<sup>1</sup> , Nurgül YEŞİLOĞLU-GÜLTEKİN<sup>2</sup> 

<sup>1</sup> Hacettepe Üniversitesi Başkent OSB Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Mimarlık ve Şehir Planlama Bölümü, Ankara, Türkiye

<sup>2</sup> Hacettepe Üniversitesi Başkent OSB Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, İnşaat Bölümü, Ankara, Türkiye

Geliş (Received): 6 Mayıs (May) 2024 / Düzeltme (Revised): 14 Mayıs (May) 2024 / Kabul (Accepted): 22 Mayıs (May) 2024

### ÖZ

Bir kaya düşmesi bölgesinde düşen blokların hacminin belirlenmesi kaya düşmesi modelleme çalışmaları için önemli bir parametredir. Bu kapsamda yoğun bir araç trafiğinin bulunduğu Ankara Zir Vadisi yamaçlarından düşen 30 adet andezit bloğun hem şerit metre ile boyutları ölçülmüş, hem de lazer tarama özelliği bulunan bir akıllı telefon aracılığıyla fotogrametrik üç boyutlu (3B) modeli oluşturulmuştur. Böylece hem geleneksel, hem de fotogrametrik yöntemle toplanan veriler yardımıyla düşen blokların hacim hesapları gerçekleştirilmiş ve bu iki farklı yöntemle yapılan hesaplar karşılaştırılmıştır. Buna göre; geleneksel yöntemle belirlenen hacim değerleri ile fotogrametrik olarak belirlenen hacimler arasında istatistiksel olarak yüksek bir ilişki bulunmaktadır. Arazide şerit metre ile yapılan ölçümler zaman kaybı oluşturmakta, sonuçlar ölçümü alan kişinin hassasiyetine bağlı olarak değişebilmektedir. Ayrıca, düzensiz bir şekle sahip blokların hacmi hesaplanırken şekil düzenli bir geometriye indirgenmekte ve bir yaklaşımda bulunmaktadır. Akıllı telefonlar ile tek bir ölçümle her bir blok ayırtlanabilmekte ve hacimleri ayrı ayrı hesaplanabilmektedir. Elde edilen bulgular, çalışmada kullanılan fotogrametrik yöntemi uygulama pratikliği açısından ön plana çıkarmaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** Kaya düşmesi, Blok hacmi, Akıllı telefon, LiDAR, nokta bulutu

### ABSTRACT

*Determining the volume of fallen blocks in a rockfall area is a crucial parameter for rockfall modeling studies. Within this scope, the dimensions of 30 andesite blocks that had fallen from the slopes of the Ankara Zir Valley, where there is heavy vehicle traffic, were measured with a tape measure and a photogrammetric three-dimensional (3D) model was generated using a smartphone equipped with laser scanning capabilities. Hence, the fallen blocks' volume was determined by utilizing data obtained from both conventional and photogrammetric methods, and, a comparison was subsequently made between the calculations derived from these two different approaches. There is a significant statistical correlation between the volume values obtained by the conventional method and those found using photogrammetry. Measurements conducted using tape measures in the field can be time consuming and the results may vary depending on the precision of the individual performing the measurement. Furthermore, while determining the volume of blocks that have an irregular shape, the shape is simplified to a regular geometric form and an approximation is performed. Smartphones enable the differentiation of each block through a single*

*measurement, allowing the independent calculation of their volumes. These results emphasize the effectiveness of the photogrammetric method employed in this study.*

**Keywords:** Rockfall, Block volume, Smartphone, LiDAR, Point cloud

## GİRİŞ

Ülkemiz doğal tehlikelerin etkisi altında bulunan bir coğrafyada yer almakta olup, bu olayların afetlere dönüşmemesi için tehlikelerin yerinde belirlenip değerlendirilmesi büyük önem taşımaktadır. Kaya düşmeleri büyük oranda hasara neden olabilecek özellikle doğal tehlikeler olup, kaya düşmesi kaynak alanlarında askıda duran ve düşen blokların boyutlarının ve hacimlerinin bilinmesi kaya düşmelerinin modellenmesi noktasında oldukça önemlidir. Blok hacmi, düşme hareketinin dinamiğini ve sonuçlarını belirlemede önemli bir rol oynamaktadır. Bu nedenle kaya düşmesi analizlerinde kaya blokların hacim değerlerini dikkate alan ve farklı blok boyutlarının kaya düşmesi senaryolarını etkilediğini ortaya koyan çok sayıda çalışma mevcuttur (Agliardi vd., 2009; Ağca vd., 2020a; Assali vd., 2014; Frattini vd., 2008; Guzzetti vd., 2002; Gültekin, 2023; Sarro vd., 2018; Topal vd., 2007). Günümüzde kaya blok hacimlerinin belirlenmesi için ihtiyaç duyulan veriler geleneksel yerinde ölçümle veya üç boyutlu (3B) lazer tarama ve fotogrametrik görüntü alımı gibi dijital veri toplama yaklaşımları ile elde edilebilmektedir. Literatürde bu verilerden yararlanarak kaya bloklarının hacimlerinin belirlenmesine yönelik çok sayıda bilimsel çalışma bulunmaktadır (Ağca vd., 2020b; Chen vd., 2017; Illeditsch ve Preh, 2024; Koulibaly vd., 2023; Umili vd., 2020). Bu çalışmalarda, erişilmesi zor olan kısımlarda yer alan kaya bloklarının hacim hesabı için genellikle dijital verilere (nokta bulutu, mesh model vb.) dayalı 3B modelleme yaklaşımları önerilmektedir.

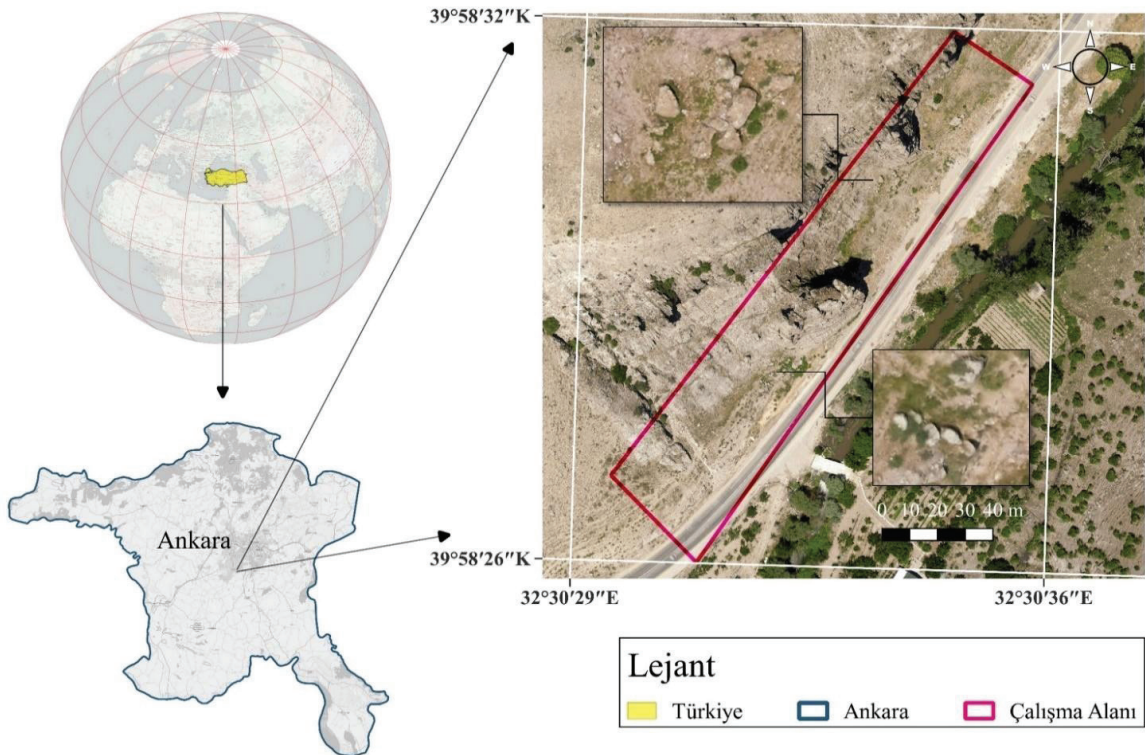
Son yıllarda mobil cihazlar üzerine yerleştirilen sensörlerin kalitesinin ve çeşitliliğinin artması bu cihazları farklı amaçlara yönelik jeo-uzamsal veriler toplamak için uygun bir alternatif haline getirmiştir. 2020 yılında LiDAR (Light Detection and Ranging) sensörüne sahip Apple iPhone 12 Pro'nun satışa sunulmasıyla birlikte bu alandaki bilimsel çalışmalar hız kazanmıştır (Luetzenburg vd., 2021). Örneğin King vd. (2022), kar derinliğindeki değişiklikleri doğru bir şekilde gözlemlemek için iPhone 12 Pro'nun kullanılabilirliğini araştırmıştır. Torkan vd. (2023), iPhone 12 Pro Max'in LiDAR sensörünün kalitesinin yer altı alanlarının 3B modellerini oluşturmak için yeterli olduğunun altını çizmiştir. Zeybek ve Ediz (2022), yol yüzeyindeki çukurları iPhone 12 Pro ile belirlemiştir. Riquelme vd. (2021), kayalık şevleri 3B modellemek ve süreksizlik setlerini çıkarmak için iPhone 12 Pro'yu kullanmıştır ve 3 m'yi aşmayan mesafelerden yüksek ve düşük çözünürlüklü görüntü alım konfigürasyonlarını ve bunların işleme sürelerini (20 saniye ile 4 dakika arasında) araştırmıştır.

iPhone'ların daha güncel versiyonları (iPhone 13/14/15 Pro) daha gelişmiş LiDAR sensörlere ve kameralara sahiptir (Nik Azhan Hakim vd., 2023; Stevenson ve Liscio, 2024). Bu nedenle yakın tarihli çalışmalar ağaçlar, kültür mirası eserleri ve iç mekan nesnelere gibi çeşitli boyut ve özellikteki spesifik objelerin doğru ve güvenilir 3B modellerini oluşturmak için bu cihazların kullanımına odaklanmaktadır (Catharia vd., 2023; Gopal ve Shukor, 2023; Gülci vd., 2023; Łabędź vd., 2022; Monsalve vd., 2023; Tatsumi vd., 2023; Tazudin vd., 2023;

Vacca, 2023). Ancak, düşen kaya blokları gibi düzgün şekillere sahip olmayan objelerin tekil 3B modellenmesine odaklanan çalışmaların sayısı oldukça sınırlıdır. Örneğin, Mikita vd. (2020) zeminde yer alan iki kaya bloğu için 3B modeller üretmiş ancak LiDAR sensörüne sahip olmayan bir akıllı telefon (Xiaomi MI 8) kullanmıştır. Paukkonen (2023), bir arkeolojik projenin 3B dokümantasyonu kapsamında iki kaya bloğu için nokta bulutları oluşturmuş ve bunların hacim hesaplarını gerçekleştirmiştir. Ivanovski vd. (2023) bir kaya çıkıntısının nokta bulutunu oluşturmak için iPhone 13 Pro kullanmıştır. Literatürdeki bu mevcut çalışmalar benzer özelliklere sahip bir ya da birkaç kayanın ya da objenin 3B modellenmesini ele almaktadır. Bu çalışmada ise; farklı ve çok sayıda kaya

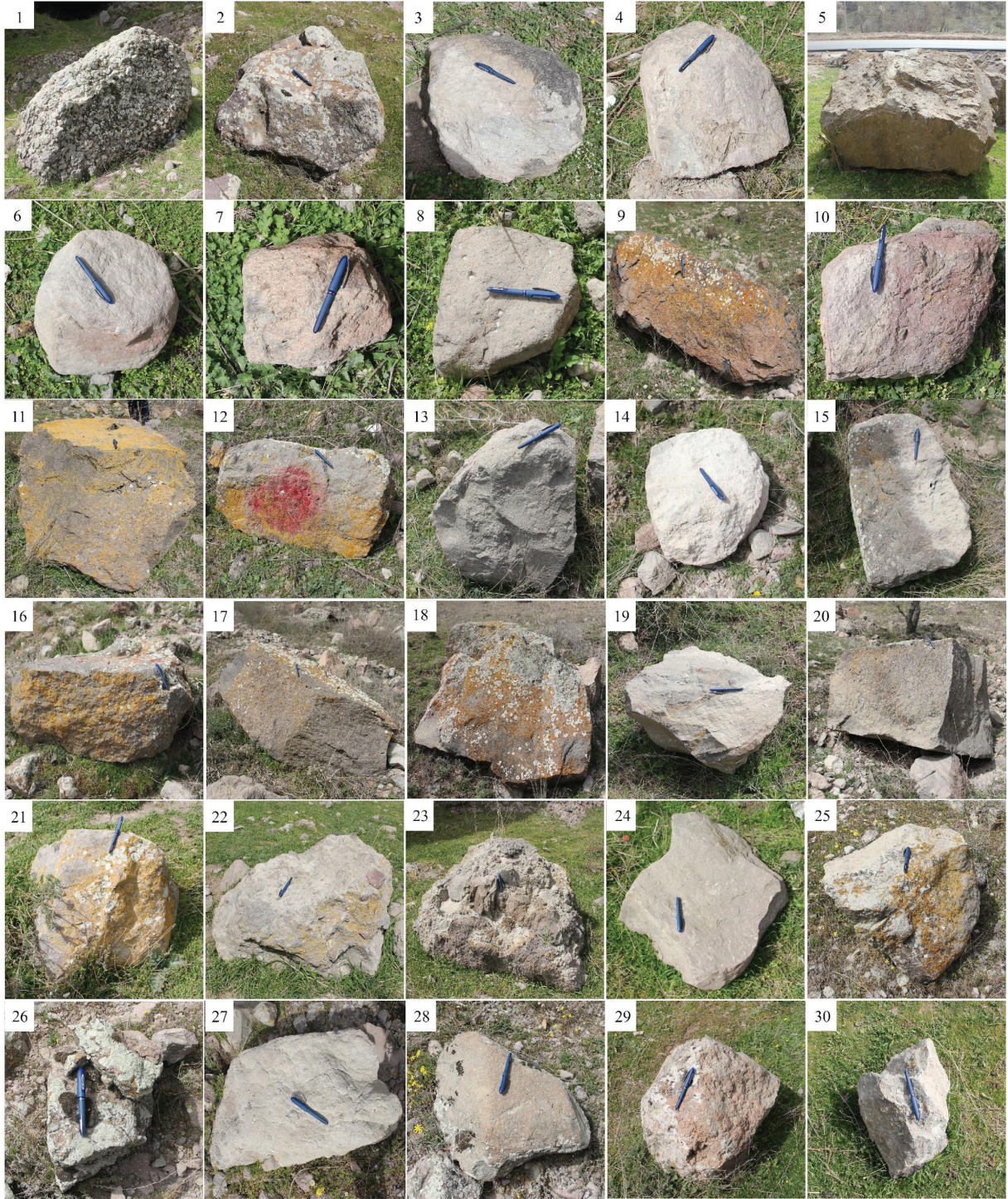
bloğunun hacimlerini hesaplamak için, LiDAR sensörlü bir akıllı telefon ile toplanan verilerin, geleneksel arazi ölçümleri verilerine alternatif olup olmayacağını araştırılması amaçlanmıştır.

Bu kapsamda, aktif bir kaya düşmesi kaynak alanında yer alan farklı şekil ve boyutlara sahip 30 kaya bloğu incelenmiştir. Öncelikle LiDAR sensörüne sahip bir iPhone 14 Pro Max akıllı telefon ile kaya blokların fotogrametrik görüntüleri alınmış ve bu verilerden yoğun nokta bulutları üretilmiştir. Diğer taraftan, arazi çalışmaları kapsamında yerinde yapılan geleneksel ölçümler ile kaya bloklarının boyutları belirlenmiştir. Fotogrametrik yöntemle ve geleneksel yöntemle belirlenen hacimler karşılaştırılmıştır.



Şekil 1. Çalışma alanı yer bulduru haritası.

Figure 1. Location map of the study area.



Şekil 2. Çalışma kapsamında değerlendirilen bloklar.

Figure 2. The blocks that were evaluated for the study.

## ÇALIŞMA ALANI

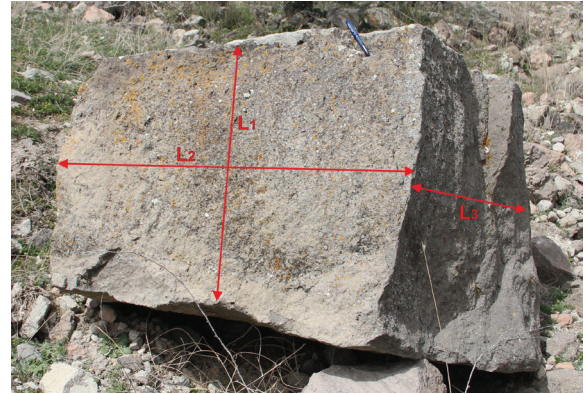
Çalışma alanı, Ankara İli Sincan İlçesi sınırları içinde yer alan ve geçmişte bir yerleşimin de merkezi olan Zir Vadisi'dir. Zir Vadisi yamaçları kaya düşmelerinin izlendiği ve yoğun bir araç trafiğinin olduğu bir alandır. Çok sayıda ağır ve orta vasıta araç, atık taşıma aracı ve binek araç bu yolu kullanmaktadır. Çalışma alanı 1/100000 ölçekli Ankara İ28-İ29 jeoloji paftaları içinde yer almaktadır. Bölge lav önü çökmesi sonucu oluşan blok ve kül akışlarının meydana getirdiği peri bacası görünümlü tüf-aglomera, andezit ve bazalt üyelerinden oluşan özel oluşumları içermektedir (Bilgin, 2014; Ersoy, 2003). Bu oluşumlarda kaya düşmeleri meydana gelmektedir. Zir Vadisi 2018 yılında "Doğal Sit-Sürdürülebilir Koruma ve Kontrollü Kullanım Alanı" olarak tescil edilmiştir (Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2018). Çalışma alanına ait yer bulduru haritası Şekil 1' de yer almaktadır.

## Geleneksel Yöntem

Çalışma kapsamında, geleneksel yerinde ölçümde her bağımsız kaya bloğu için şerit metre ile en ( $L_1$ ), boy ( $L_2$ ) ve yükseklik ( $L_3$ ) değerleri cm hassasiyetinde ölçülmüş ve ölçülen bloklara bir numara atanmıştır (Şekil 3).

Arazi çalışmaları sırasında ölçülen blokların büyük kısmı köşeli, paralel kenarlı geometrik şekle daha uygundur. Ancak çok az sayıda elipsoid şekle yakın bloklar da görülmektedir. Arazide ölçülen blokların şekilleri düzenli bir geometriye sahipse elde edilen sonuçlar gerçekçidir. Ancak, düzensiz bir geometriye sahip bloğun boyutlarından hacim hesabına geçmek için düzenli bir geometri için yaklaşımda bulunmaktadır. Geleneksel yöntemle farklı büyüklüklerdeki toplam 30

blok değerlendirilmiştir. Bu blokların her biri fotoğraflanmış (Şekil 2) ve boyutları şerit metre ile ölçülmüştür (Çizelge 1).



Şekil 3. Arazide yapılan geleneksel ölçüm (Blok 20).  
Figure 3. Conventional measurement method in the field (Block 20).

Çizelge 1. Arazi çalışmaları ile ölçülen blok boyutları  
Table 1. Block sizes measured in field studies

Blok No	$L_1$ (cm)	$L_2$ (cm)	$L_3$ (cm)	Blok No	$L_1$ (cm)	$L_2$ (cm)	$L_3$ (cm)
Blok 1	190	130	90	Blok 16	85	56	46
Blok 2	80	75	45	Blok 17	133	58	49
Blok 3	50	42	35	Blok 18	115	110	35
Blok 4	38	25	25	Blok 19	66	60	25
Blok 5	200	129	80	Blok 20	110	103	85
Blok 6	35	30	25	Blok 21	60	40	24
Blok 7	27	22	14	Blok 22	103	63	50
Blok 8	24	25	13	Blok 23	157	138	61
Blok 9	168	71	52	Blok 24	49	49	20
Blok 10	35	34	23	Blok 25	55	43	40
Blok 11	104	75	60	Blok 26	32	30	22
Blok 12	90	50	37	Blok 27	78	33	21
Blok 13	58	55	40	Blok 28	40	35	16
Blok 14	30	28	18	Blok 29	36	32	25
Blok 15	60	38	24	Blok 30	40	30	16

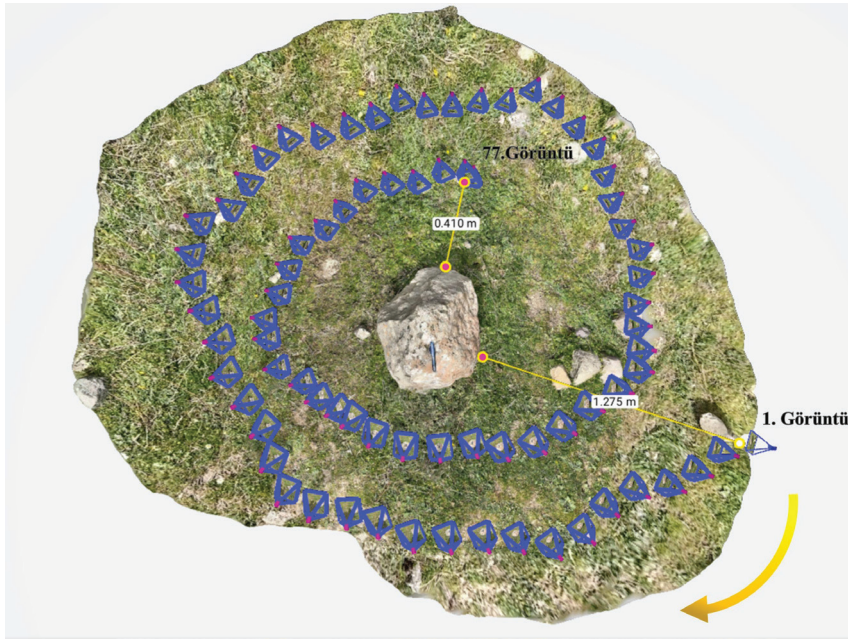
## Fotogrametrik Yöntem

Çalışma kapsamında düşen kaya blokların hacimlerinin belirlenmesinde kullanılan bir diğer yöntem fotogrametrik yöntemdir. Fotogrametrik veriler, lazer tarama özelliğine sahip bir mobil cihaz olan Apple iPhone 14 Pro Max ile toplanmıştır. Söz konusu akıllı telefonun arka yüzünde üç adet görünür ışık kamera (ana, geniş açı ve telefoto) ve bir LiDAR sensörü yer almaktadır (Apple, 2023). iPhone 14 Pro Max'ta Dikey Boşluklu Yüzey Yayan Lazerler (Vertical Cavity Surface Emitting Lasers- VCSELs) kullanılmaktadır. Lazer darbelerin doğrudan uçuş süresi, Tek Foton Çığ Fotodiyotları (Single Photon Avalanche Photodiodes – SPADs) ile ölçülmektedir. Cihaz etkinleştirildiğinde VCSEL tarafından toplam 576 nokta yayılmaktadır (Monsalve vd., 2023; Moyano vd., 2023). Daha sonra 576 derinlik noktası, 60 Hz'de  $256 \times 192$  derinlik haritası üretmek için geniş açılı mercekten gelen gerçek renk (Red, Green, Blue - RGB) değerleriyle özel bir veri birleştirme işlemi yoluyla birleştirilmektedir (Tondo vd., 2023). iPhone Pro modelleri, dahili GNSS (Global Navigation Satellite Systems) alıcısına ve manyetometre, barometre, üç eksenli jiroskop ve ivme ölçeri içeren atalet ölçüm birimi (Inertial Measurement Unit - IMU) sensörlerine sahiptir (Apple, 2023). Görüntü alımı esnasında pasif ve aktif sensörlerden gelen bilgiler ile dahili GNSS alıcısından elde edilen bilgiler birleştirilerek görüntülerin poz (konum ve yönelim) bilgileri belirlenmektedir. Bununla beraber, kullanıcılar bir sahnenin alımı esnasında hareket halindedir ve sabit olmayan el hareketleri sürüklenme hatalarına neden olmaktadır (Scargill vd., 2022; Tamimi, 2022). Bu hatayı azaltmak için ölçüme başlamadan önce akıllı telefon bir el gimbali (DJI Osmo Mobile SE) üzerine monte edilmiştir. El gimbali, kameranın belirli bir düşey açıya ayarlanmasını sağlamakla beraber hareket

esnasında ortaya çıkan titreşimlerin görüntü kalitesi ve derinlik haritası üzerindeki olumsuz etkilerini azaltmaktadır (Rasti vd., 2021).

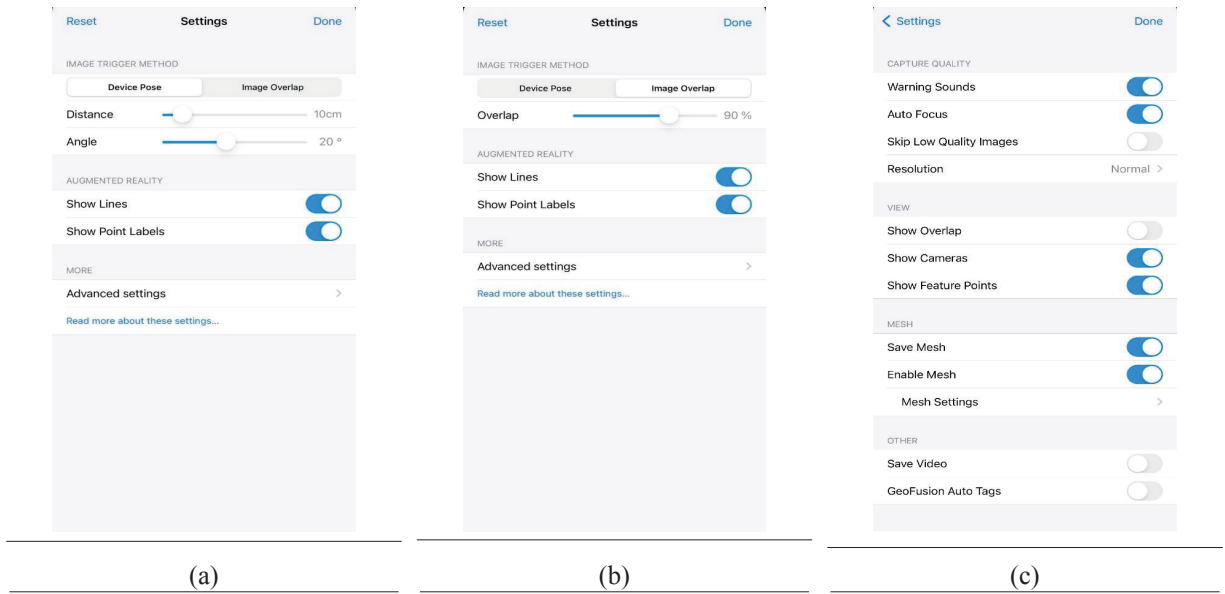
Çalışma kapsamında kaya blok modelleri üretmek için farklı görüntüleme açılarından yersel görüntü alımına başlamadan önce en iyi sonuçları elde etmek ve görüntüler arasında yeterli örtüşmeyi sağlamak için obje(ler) merkezde olacak biçimde dairesel bir yörünge belirlenmiştir (Rutkowski ve Lipecki, 2023). Ayrıca, görüntü alımı esnasında LiDAR sensörü ile optimum sonuçları elde etmek için sahneye olan uzaklık  $\sim 3$  m'yi aşmayacak şekilde ayarlanmıştır (Tavani vd., 2022). Şekil 4'te bir kaya bloğunun ölçüm senaryosu ve sahnelerin görüntüleme geometrisi mavi renkte gösterilmektedir. Ayrıca ölçüm yönü (sarı ok) ve başlangıç ve bitiş görüntülerinin objeye olan yaklaşık uzaklıkları da Şekil 4'te verilmiştir. Çalışma kapsamında modellenecek tüm bloklar için bu aşama gerçekleştirilmiştir. Bazı bloklar tek tek taranırken bazı bloklar topluca taranabilmiştir.

Hâlihazırda mobil cihazlar ile uyumlu olarak çalışan ve görüntü verileri ile LiDAR verileri arasındaki entegrasyonu sağlayan birçok mobil uygulama (EveryPoint, 3D Scanner App, Polycam, Pix4Dcatch vb.) mevcuttur. Bu uygulamalar, LiDAR sensörü tarafından yakalanan noktaları gerçek zamanlı olarak kalibre eden bir eşzamanlı konum belirleme ve harita oluşturma (Simultaneous Localization and Mapping-SLAM) algoritması aracılığıyla bir nokta bulutu üreterek LiDAR'ın haritalama yeteneklerine erişime olanak tanımaktadır (Hou vd., 2024; Teppati Losè vd., 2022). Bu çalışmada Pix4Dcatch v.1.31.2 uygulaması kullanılmıştır. Pix4Dcatch uygulaması için tercih edilen tüm ayarlar Şekil 5'te gösterilmektedir.



Şekil 4. Kaya bloklarının yersel görüntü alım geometrisi

Figure 4: Terrestrial image acquisition geometry of rock blocks



Şekil 5. Pix4Dcatch uygulamasında seçilen görüntü alım ayarları (a) cihaz görüntü ayarları, (b) görüntü örtüşme ayarları, (c) ileri düzey ayarlar.

Figure 5. The image adjustments of Pix4Dcatch software (a) device image settings (b) image aliasing settings, (c) advanced settings.

Uygulama başlatıldığında iPhone belirli bir mesafe ya da açı değeri kadar hareket ettikçe (bu çalışma için 0.10 m ve 20 °) yeni görüntü alımı tetiklenmekte ve kaydedilen görüntüler ön işleme alınırken ekranda nesnenin yüzeyi üzerinde üçgen bir ağ görüntülenmektedir (Tamimi ve Toth, 2023a). Kullanıcı daha fazla veri toplamak için cihazı hareket ettirdikçe Pix4Dcatch, ağı gerçek zamanlı olarak günceller ve ölçülen alanları ve oluşan üçgenleri göstermektedir. Bu sayede kullanıcı ek tarama gerektiren bölgeleri belirleyebilmekte ve bu bölgeler için daha fazla görüntü almayı tercih edebilmektedir. Ayrıca cihazlarında LiDAR sensörleri bulunan kullanıcılar, sahnede hangi detayların yakalandığı hakkında bilgi edinmek için canlı ön izleme özelliğini kullanabilmektedir (Pix4D, 2024a).

## VERİLERİN DEĞERLENDİRİLMESİ

### *Fotogrametrik Verilerin İşlenmesi*

Fotogrametrik verilerindeğerlendirilmesinde Intel Xeon E-2124 merkezi işlemciye, Quadro P2000 grafik işlemciye ve 80 GB sistem belleğine sahip bir masaüstü bilgisayar kullanılmıştır. Değerlendirme yazılımı olarak ise Pix4Dmatic v.1.58.1 kullanılmıştır. Söz konusu yazılım, Pix4Dcatch ile toplanan veriler için ayrıntılı ve doğru bir 3B temsilinin oluşturulmasına olanak tanımaktadır (Suleymanoglu vd., 2023; Tamimi ve Toth, 2023b). iPhone mobil cihazlar ile tamamlanmış bir Pix4Dcatch projesini Pix4Dmatic ile değerlendirmek için projenin öncelikle dışa aktarılması gerekmektedir. Dışa aktarılan proje, Pix4Dmatic yazılımına girdi olarak verilir. LiDAR özellikli cihazlarla üretilen projelerde görüntü sayısınca oluşturulan “Confidence.tiff” ve “DepthMap.tiff” dosyaları LiDAR derinlik verilerini temsil ederken, “Image.jpg” dosyaları görüntü içeriğini temsil etmektedir. Pix4Dmatic yazılımında LiDAR

özellikli iPhone cihazlar ile toplanan verilerden nokta bulutu elde etmek için kalibrasyon, derinlik nokta bulutu, yoğun nokta bulutu ve derinlik ve yoğunluk füzyon aşamalarını içeren bir iş akışı uygulanmaktadır (Pix4D, 2024b). Çalışma kapsamında tüm aşamalarda Pix4Dcatch uygulaması için oluşturulan şablon ayarları kullanılmıştır. Her kaya bloğu için Pix4Dmatic yazılımından çıktı olarak ise derinlik nokta bulutu ve yoğun nokta bulutunun füzyonu sonucunda oluşturulan kaynaştırılmış nokta bulutu elde edilmiştir.

### **Kalibrasyon**

Kalibrasyon, hareketten yapı (Structure from Motion –SfM) yöntemi ile bir veri kümesinin işlenmesindeki ilk aşamadır ve sonraki adımların temelini oluşturmaktadır. Bu aşamada görüntü ölçeği, anahtar noktalar, otomatik kesişme bağlantı noktaları, iç güven düzeyi ve LiDAR derinlik haritaları (modelin ölçeğini daha doğru tahmin etmek ve veri boşluklarını doldurmak için) kalibrasyonu geliştirmek amacıyla kullanılmaktadır (Pix4D, 2024c). Bu aşama tamamlandığında, eşleşen anahtar nokta sayısına sahip seyrek nokta bulutu oluşturulmaktadır. Kalibrasyon aşamasında kullanılan ayarlar Şekil 6’da verilmiştir.

### **Derinlik nokta bulutu**

Derinlik nokta bulutu, LiDAR derinlik haritalarından oluşturulmaktadır. Yansıtıcı ve tekrarlayan dokulu yüzeylerde hatalı görüntü eşlemeye bağlı veri boşlukları oluşması durumunda derinlik haritalarından oluşturulan nokta bulutu bu boşlukları doldurmak üzere kullanılabilir (Pix4D, 2024d). Pix4Dmatic’in mevcut sürümünde kullanıcılar derinlik haritası ayarlarını görüntüleyememekte ve değiştirememektedir.



## Yoğun nokta bulutu

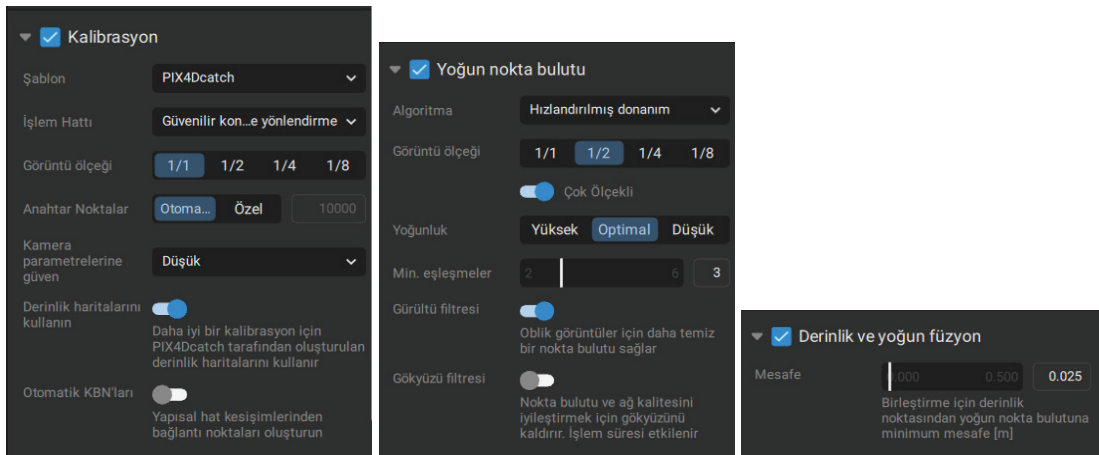
Bu aşamada, kalibrasyon sonucunda üretilen seyrek nokta bulutu yoğun nokta bulutuna dönüştürülmektedir. Görüntü ölçeği, ek 3B noktaların hesaplandığı görüntülerin ölçeğini tanımlamaktadır. Çoklu ölçek etkinleştirildiğinde, birden fazla görüntü ölçeğinde ek 3B noktalar hesaplanmaktadır. Yoğunluk parametresi, oluşacak nokta bulutunun yoğunluğunu tanımlamaktadır. Ön tanımlı ayar “optimal” olarak varsayılmıştır ve bu ayarda orijinal görüntünün her 8 pikseli için bir 3B nokta hesaplanmaktadır. Minimum eşleşme sayısı, 3B noktanın görüntülere geçerli minimum yeniden projeksiyon sayısını temsil etmektedir. Minimum eşleşme sayısı 3 (varsayılan) olarak ayarlandığında, her 3B noktanın en az 3 görüntüde doğru şekilde yeniden yansıtılması gerekmektedir. Gürültü filtresi, eğik görüntülere sahip veri kümeleri için daha temiz bir nokta bulutu sağlamaktadır (Pix4D, 2024d). Seçilen yoğun nokta bulutu ayarları Şekil 6’da gösterilmektedir.

## Derinlik ve yoğunluk füzyon

Derinlik ve yoğun füzyon seçeneği, yoğun nokta bulutunu ve LiDAR nokta bulutunu birleştirmekte ve nihai nokta bulutunu daha yoğun ve daha eksiksiz hale getirmektedir. Kullanıcı, bir derinlik noktası ile yoğun nokta bulutunu kaynaştırmak için gereken minimum mesafeyi ayarlayabilmektedir. Pix4Dmatic ayarlarında bu mesafe 0.025 m olarak varsayılmıştır (Pix4D, 2024d). Seçilen derinlik ve yoğunluk füzyon ayarları Şekil 6’da gösterilmektedir.

## Kaya blok nokta bulutları

Çalışma kapsamında toplanan verilerin (görüntü ve LiDAR) fotogrametrik değerlendirilmesi sonucunda her kaya bloğu için kaynaştırılmış nokta bulutu verileri üretilmiştir (Şekil 7). Fotogrametrik değerlendirme sonuçları ile üretilen nokta bulutlarının özellikleri ise Çizelge 2’de birlikte gösterilmektedir.



(a)

(b)

(c)

Şekil 6. Pix4Dmatic yazılımında seçilen görüntü işleme ayarları (a) kalibrasyon, (b) yoğun nokta bulutu, (c) derinlik ve yoğunluk füzyon.

Figure 6. Image processing settings selected in Pix4Dmatic software (a) calibration, (b) dense point cloud, (c) depth and dense fusion.



Şekil 7. Kaya blokları temsil eden nokta bulutları.

Figure 7. Point clouds representing rock blocks.

Çizelge 2. Fotogrametrik değerlendirme sonuçları.

Table 2. Results of photogrammetric evaluation.

Blok No	Girdi / Kalibre Edilen Görüntü Sayısı	Kamera Optimizasyonu (%)	Yer Örnekleme Aralığı (YÖA) (m)	Nokta Yoğunluğu (nokta/m <sup>2</sup> )
1	269 / 269	0.01	0.002	302885
2	86 / 86	0.03	0.001	450087
3	56 / 56	0.07	0.001	363786
4	56 / 56	0.08	0.001	299157
5	270 / 270	0.03	0.001	223518
6	60 / 60	0.03	0.001	350202
7	56 / 56	0.06	0.001	295320
8	66 / 66	0.04	0.001	386521
9	129 / 129	0.02	0.002	224393
10	67 / 67	0.07	0.001	382762
11	71 / 71	0.02	0.001	291645
12	109 / 109	0.02	0.001	612732
13	104 / 104	0.03	0.001	512793
14	41 / 41	0.04	0.001	430379
15	75 / 75	0.03	0.001	489683
16	104 / 104	0.04	0.001	421178
17	117 / 117	0.01	0.001	305009
18	142 / 142	0.03	0.001	521832
19	91 / 91	0.05	0.001	477875
20	140 / 140	0.01	0.001	360885
21	75 / 75	0.06	0.001	528238
22	83 / 83	0.05	0.001	453856
23	123 / 123	0.02	0.001	525561
24	45 / 45	0.01	0.001	426422
25	73 / 73	0.01	0.001	643257
26	46 / 46	0.03	0.001	856377
27	89 / 89	0.03	0.001	943937
28	68 / 68	0.03	0.001	597824
29	77 / 77	0.04	0.001	554886
30	59 / 59	0.01	0.001	548157

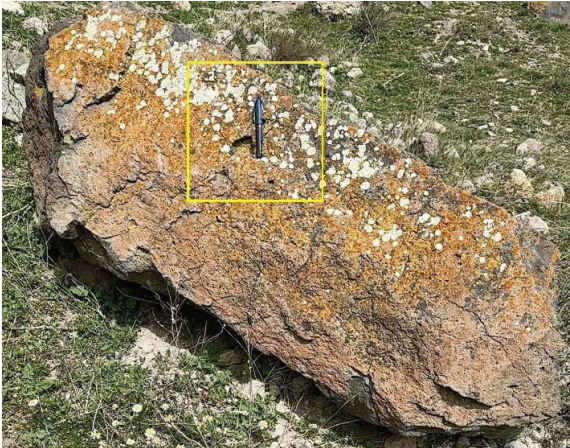
Çizelge 2'deki fotogrametrik değerlendirme sonuçları incelendiğinde, her kaya bloğu için girdi görüntülerinin tamamının kalibre edildiği ve nokta bulutu üretiminde kullanıldığı görülmektedir. Kamera optimizasyonu ise kameranın başlangıç ve optimize edilmiş odak uzaklığı arasındaki farkın yüzdesini temsil etmektedir. Bu değer tüm kaya blokları için % 0.01-0.08 arasında değişmektedir. Elde edilen

bu sonuçlar benzer çalışmaların sonuçları ile uyumludur (An vd., 2021; Gillihan, 2021; Jasińska vd., 2023).

### Nokta Bulutlarının Doğruluk Değerlendirmesi

Mobil cihazlar ile üretilen fotogrametrik modellerin doğruluğu, hassas şekilde ölçülen yer kontrol noktalarının modele dahil edilmesiyle

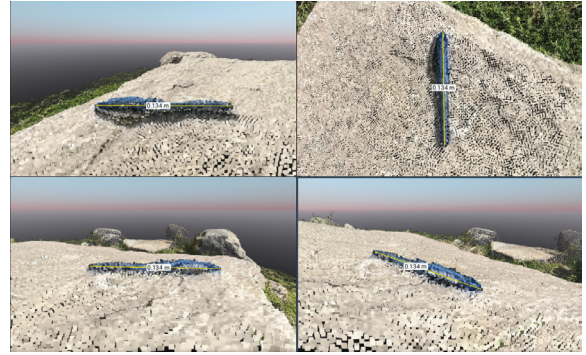
ya da görüntü alımında ek donanımlar (viDoc) kullanılarak artırılabilir (Pavelka jr vd., 2023). Modele ek verilerinin dahil edilmediği durumlarda dahili GNSS alıcısının sağladığı mutlak pozisyon doğruluğu birkaç metre düzeyindedir (Brach vd., 2023; Corradetti vd., 2022; Winberg vd., 2023). Bir fotogrametrik projenin görelî (rölatif) doğruluğu ise bir nokta bulutu, model ya da ortomozaik üzerindeki bireysel özelliklerin referans eş özelliklerle karşılaştırılması yoluyla ölçülebilmektedir (Tamimi ve Toth, 2023a). Örneğin, bir nokta bulutu üzerinden iki nokta arasında ölçülen mesafe ile gerçekteki mesafe tutarlıysa nokta bulutunun rölatif doğruluğu yüksektir (Luetzenburg vd., 2021). Bu çalışmada nokta bulutlarının rölatif doğruluğunu test etmek için veri toplamaya başlamadan önce kaya blokları üzerine uzunluğu (0.135 m) bilinen bir kalem yerleştirilmiştir (Şekil 8). Bu sayede referans uzunluk ile nokta bulutları üzerinden ölçülen uzunluk karşılaştırılmıştır.



Şekil 8. Doğruluk değerlendirmesinde kullanılan referans obje.

*Figure 8. The reference object used in accuracy evaluation.*

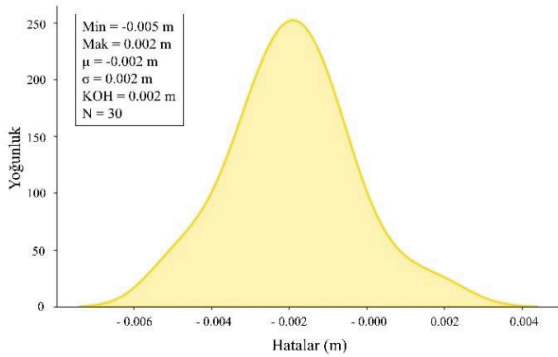
Nokta bulutlarının görelî doğruluğunu araştırmak için; bloklar üzerine yerleştirilen kalemin uzunluğu, Pix4Dsurvey yazılımı kullanılarak ölçülmüştür. Şekil 9'da 24 numaralı kayanoktabulutunun üzerinden gerçekleştirilen dijital ölçümün sonucu (0.134 m) gösterilmektedir. Objeye başlangıç ve bitiş noktalarını yeterince hassas yakalamak için bu ölçüm dört farklı bakış açısından kontrollü olarak yapılmıştır.



Şekil 9. Farklı bakış açılarından gerçekleştirilen dijital ölçüm.

*Figure 9. Digital measurement performed from different perspectives.*

Modellenen her kaya bloğu için bu ölçüm işlemi tekrarlanmıştır. Daha sonra gözlemlenen uzunluklar ile kalemin gerçekteki uzunluğu karşılaştırılmış ve model hataları hesaplanmıştır. Şekil 10'da bu hataların istatistikleri Kernel yoğunluk grafiği üzerinde gösterilmektedir. Burada hataların ortalaması ( $\mu$ ) -0.002 m, standart sapma ( $\sigma$ ) ve karesel ortalama hata (KOH) değerleri ise  $\pm 0.002$  m olarak hesaplanmıştır. Tavani vd. (2022) yaptıkları çalışmada 14 bağımsız model oluşturmuş ve bu modeller üzerinden ölçülen dijital ve gerçek mesafeler arasındaki farkların 0.01 m düzeyinde olduğunu raporlamışlardır. Çalışma, bu sonuçlar ile karşılaştırıldığında, kaya blokları üzerine yerleştirilen kalem için elde edilen farkların çok daha küçük olduğu görülmektedir.



Şekil 10. Model hataları için Kernel yoğunluk grafiği.  
Figure 10. Kernel density plot of model errors.

## KAYA BLOKLARIN HACİM HESAPLARI

Çalışma kapsamında 30 adet arazide belirlenen kaya blok için geleneksel ve fotogrametrik yöntemlerle hacim hesapları gerçekleştirilmiştir.

## Geleneksel Yöntemle Hacim Hesabı

Çalışma kapsamında boyutları arazide şerit metre ile ölçülen düşmüş blokların hacim hesaplamaları, blokların şekillerinin heterojenliği nedeniyle, paralel kenarlı (Eşitlik 1) ve elipsoid (Eşitlik 2, Eşitlik 3) olmak üzere iki farklı geometrik şekil esas alınarak belirlenmiştir. Böylece bu iki farklı geometrik şekil için hacim hesapları ( $V_p$ ,  $V_e$ ) yapılmıştır (Umili vd., 2020). Hesaplamalar Çizelge 3’de verilmiştir.

$$V_p = L_1 L_2 L_3 \quad (1)$$

$$V_e = \frac{4}{3} \pi \frac{d_{1,2}}{2} \frac{d_{1,3}}{2} \frac{d_{2,3}}{2} \quad (2)$$

Burada  $L_{1,2,3}$  her bir bloğa ait üç farklı kenar uzunluklarını,  $d_{1,2,3}$  blokların üç farklı kenarının köşegenlerini ifade etmektedir. Buna göre köşegenler Eşitlik 3’te verildiği gibi hesaplanmıştır.

$$d_{ij} = \sqrt{L_i^2 + L_j^2} \quad (3)$$

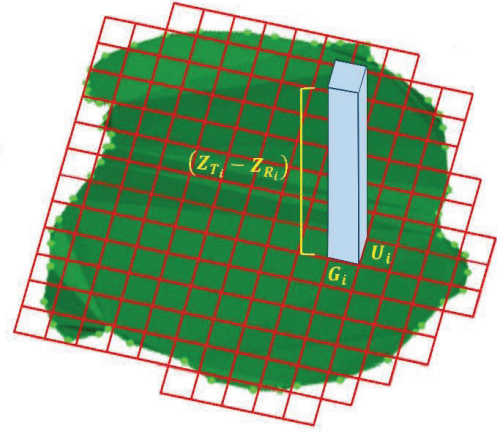
Çizelge 3. Geleneksel yöntemle hesaplama aşamaları.

Table 3. Calculation steps for conventional method.

Blok No	$d_{1,2}$ ( $L_1, L_2$ ) (cm)	$d_{1,3}$ ( $L_1, L_3$ ) (cm)	$d_{2,3}$ ( $L_2, L_3$ ) (cm)	Blok No	$d_{1,2}$ ( $L_1, L_2$ ) (cm)	$d_{1,3}$ ( $L_1, L_3$ ) (cm)	$d_{2,3}$ ( $L_2, L_3$ ) (cm)
Blok 1	230.217	210.238	158.114	Blok 16	101.789	96.649	72.471
Blok 2	109.659	91.788	87.464	Blok 17	145.097	141.739	75.928
Blok 3	65.299	61.033	54.672	Blok 18	159.138	120.208	115.434
Blok 4	45.486	45.486	35.355	Blok 19	89.196	70.576	65.000
Blok 5	237.994	215.407	151.793	Blok 20	150.695	139.014	133.544
Blok 6	46.098	43.012	39.051	Blok 21	72.111	64.622	46.648
Blok 7	34.828	30.414	26.077	Blok 22	120.739	114.495	80.430
Blok 8	34.655	27.295	28.178	Blok 23	209.029	168.434	150.881
Blok 9	182.387	175.864	88.006	Blok 24	69.296	52.924	52.924
Blok 10	48.795	41.881	41.049	Blok 25	69.814	68.007	58.728
Blok 11	128.222	120.067	96.047	Blok 26	43.863	38.833	37.202
Blok 12	102.956	97.309	62.201	Blok 27	84.694	80.777	39.115
Blok 13	79.931	70.456	68.007	Blok 28	53.151	43.081	38.484
Blok 14	41.037	34.986	33.287	Blok 29	48.166	43.829	40.608
Blok 15	71.021	64.622	44.944	Blok 30	50.000	43.081	34.000

### Fotogrametrik Yöntemle Hacim Hesabı

Nokta bulutu verilerine dayalı olarak gerçekleştirilen hacim hesaplama yaklaşımları dışbükey kapsülleme, voksel, dilimleme ve ampirik formüllere dayalı yöntemler olarak sıralanabilmektedir. Her bir hacim hesaplama yönteminin farklı yüzeyler ve objeler için güçlü ve zayıf yönleri bulunmaktadır (Wang vd., 2023). Örneğin kayaların askıda bulunduğu, yüzey yönlerinde ve sarkma özelliklerinde büyük farklılıklar bulunan zorlu arazilerde dışbükey kapsülleme yöntemleri daha hassas sonuçlar vermektedir (DiFrancesco vd., 2021; Walton ve Weidner, 2023). Dilimleme yöntemleri ise düzensiz özelliklere sahip ve yüzeyde boşluklar (delikler) içeren kayalar için daha uygundur (Li vd., 2019). Ampirik formüllere dayalı yöntemler ise belirli geometrik şekillere uyan kaya blokları için kolay uygulanabilir özellik göstermektedir (Battulwar vd., 2021; Jaklič vd., 2015; Koulibaly vd., 2023). Voksel yönteminde hedef objeyi temsil eden nokta bulutu hücreler (vokseller) oluşturacak şekilde referans yüzeye yansıtılmaktadır. Voksel yöntemi hücre boyutuna ve projeksiyon düzlemine duyarlıdır. Çoğu durumda iyi bir çözünürlük (küçük hücre değeri) ve görece düz bir projeksiyon yüzeyi, daha doğru bir hacim hesabı ile sonuçlanmaktadır (Doğan ve Güllü, 2021). Çalışma alanında yer alan kaya bloklarını temsil eden nokta bulutu verilerinin küçük hücreler oluşturmak için yeterli yoğunluğa sahip olması nedeniyle bu çalışmada hacim hesabında voksel yöntemi kullanılmıştır. Tüm hacim hesaplamaları Pix4Dsurvey v.1.58.2 yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Pix4Dsurvey yazılımında hacim hesabı, referans yüzeyi oluşturan her noktanın yüksekliği dikkate alınarak hesaplanmaktadır. Daha sonra referans yüzey, girdi Yer Örnekleme Aralığına (YÖA) eşit voksellere yansıtılmaktadır (Şekil 11).



Şekil 11. Referans yüzeyin yansıtıldığı vokseller (kırmızı) ve bir vokselin hacminin (mavi) grafik gösterimi (Pix4D, 2024e).

Figure 11. Graphical representation of the projected voxels (red) and the volume of a voxel (blue) onto the reference surface (Pix4D, 2024e).

Her voksel ( $V_i$ ) için hacim değeri Eşitlik 4 ile hesaplanmaktadır (Pix4D, 2024e).

$$V_i = U_i \times G_i \times (Z_{T_i} - Z_{R_i}) \quad (4)$$

$V_i$  voksel hacmini,  $U_i$  voksel uzunluğunu,  $G_i$  voksel genişliğini,  $Z_{T_i}$  vokselin merkezine karşılık gelen arazi yüksekliğini,  $Z_{R_i}$  ise; vokselin merkezine karşılık gelen referans yüzeyin yüksekliğini temsil etmektedir. Bir vokselin uzunluğu ve genişliği ise Eşitlik 5'te gösterildiği gibi projenin ortalama YÖA değerine eşittir.

$$YÖA_{ort} = U_i = G_i \quad (5)$$

Her bir nokta bulutu için toplam kaya blok hacmi voksel hacimlerinin toplamına eşittir ve Eşitlik 6'da gösterildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$V_T = V_1 + V_2 + \dots + V_n \quad (6)$$

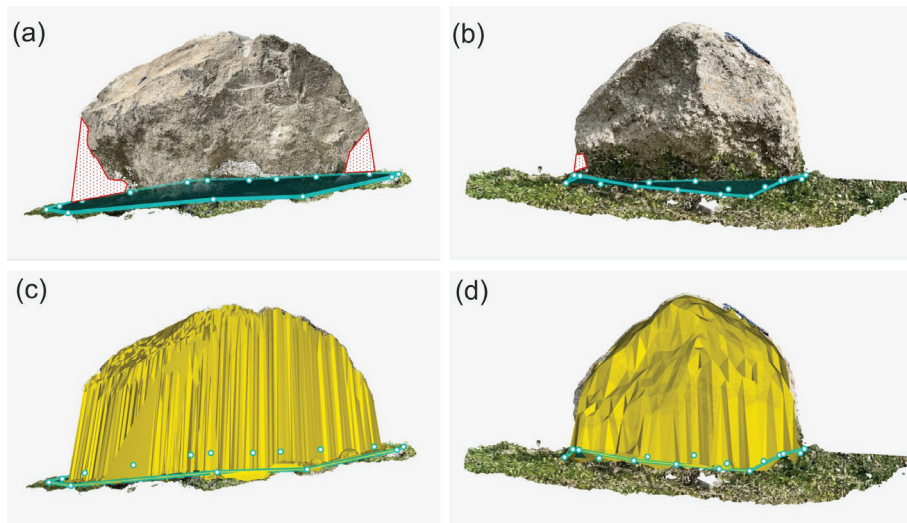
Kaya blokların hacim hesabına başlamadan önce nokta bulutları bir dizi ön işlem sürecinden

geçirilmiştir. Öncelikle nokta bulutlarında kayanın yakın çevresini temsil etmeyen kısımlar kesilmiştir. Daha sonra gürültülü noktalarını kaldırmak için CloudCompare v.2.12.4 yazılımında yer alan gürültü filtresi (noise filter) kullanılmıştır. Burada, arama yarıçapı parametresi olarak proje YÖA değerinin üç katı ve maksimum mutlak hata sınırı parametresi olarak ise derinlik ve yoğunluk füzyonunda kullanılan eşik değer (0.025 m) seçilmiştir (Zhang vd., 2018). Ayrıca 3'ten az komşusu olan izole edilmiş noktalar da kaldırılmıştır. Son olarak kayaların zeminle birleşim bölgelerinde yer alan ilgisiz objeleri (otlar, çiçekler vb.) temsil eden noktalar manuel olarak silinmiştir. Böylece bu noktaların hacim hesabının dışında tutulması sağlanmıştır. Ön işleme aşamasının ardından her kaya bloğu için projeksiyon yüzeyini oluşturan poligonlar belirlenmiştir. Güllü vd. (2018) hesap yüzeyi olarak üç noktadan geçen düzlem kullanmıştır. Bu çalışmada referans yüzey, farklı yüksekliklere sahip noktalar içeren

poligonlar şeklinde belirlenmiştir. Bu yaklaşım özellikle arazi eğiminin arttığı bölgelerde daha gerçekçi bir hesap yüzeyi oluşturmaya olanak tanımaktadır. Şekil 12'de iki farklı kaya bloğu için oluşturulan referans yüzey (mavi) ve nokta bulutları (a ve b) ile hacim hesapları sonucunda oluşan vokseller (c ve d) birlikte gösterilmektedir. Şekil 12c ve Şekil 12d incelendiğinde, blok nokta bulutları üzerinde kırmızı renkte gösterilen içbükey boşlukların hacim hesabına dahil edildiği görülmektedir. Bu durumun hacim hesap sonuçlarına etkisi Şekil 12a'da verilen kaya için daha çok iken, Şekil 12b'de verilen kaya için daha az olup, voksel yönteminin bir sınırlaması olarak değerlendirilmektedir.

### Hacim Hesaplarının Değerlendirmesi

Çalışma kapsamında kaya bloklarının geleneksel verilere dayalı hacim hesapları ( $V_p$ ,  $V_c$ ) ve fotogrametrik verilere dayalı hacim hesapları ( $V_f$ ) Çizelge 4'te verilmiştir.



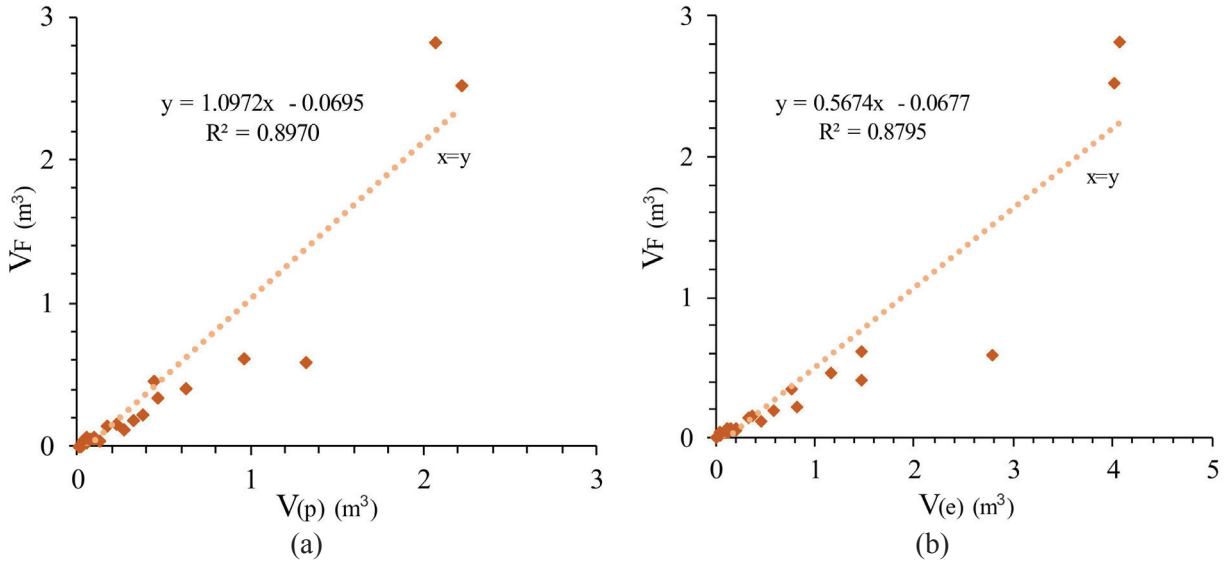
Şekil 12. Kaya blok için çizilen referans yüzeyi ve hacim hesabı sonucu oluşan vokseller.

Figure 12. A reference surface created for the rock block, and voxels generated as a result of the volume calculation.

Çizelge 4. Blok hacim sonuçları.

Table 4. Block volume results.

Blok No	$V_p$ (m <sup>3</sup> )	$V_e$ (m <sup>3</sup> )	$V_F$ (m <sup>3</sup> )	Blok No	$V_p$ (m <sup>3</sup> )	$V_e$ (m <sup>3</sup> )	$V_F$ (m <sup>3</sup> )
Blok 1	2.223	4.005	2.523	Blok 16	0.219	0.373	0.157
Blok 2	0.270	0.461	0.120	Blok 17	0.378	0.817	0.220
Blok 3	0.074	0.114	0.052	Blok 18	0.443	1.156	0.457
Blok 4	0.024	0.038	0.030	Blok 19	0.099	0.214	0.071
Blok 5	2.064	4.072	2.820	Blok 20	0.963	1.464	0.618
Blok 6	0.026	0.041	0.020	Blok 21	0.058	0.114	0.044
Blok 7	0.008	0.014	0.007	Blok 22	0.324	0.582	0.187
Blok 8	0.008	0.014	0.006	Blok 23	1.322	2.780	0.587
Blok 9	0.620	1.477	0.415	Blok 24	0.048	0.102	0.035
Blok 10	0.027	0.044	0.021	Blok 25	0.095	0.146	0.061
Blok 11	0.468	0.774	0.341	Blok 26	0.021	0.033	0.011
Blok 12	0.167	0.326	0.147	Blok 27	0.054	0.140	0.041
Blok 13	0.128	0.200	0.048	Blok 28	0.022	0.046	0.014
Blok 14	0.015	0.025	0.013	Blok 29	0.029	0.045	0.042
Blok 15	0.055	0.108	0.067	Blok 30	0.019	0.038	0.009



Şekil 13. Geleneksel yöntemlerle belirlenen hacim hesapları ile fotogrametrik yöntemle belirlenen hacim hesaplarının çapraz korelasyon grafikleri (a)  $V_p$ - $V_F$  (b)  $V_e$ - $V_F$

Figure 13. Cross correlation graphs between volume calculations from conventional method and photogrammetric method (a)  $V_p$ - $V_F$  (b)  $V_e$ - $V_F$



Çizelge 4'te verilen hacim değerleri incelendiğinde, geleneksel yöntem ile genel olarak daha büyük hacimler hesaplandığı görülmektedir.

Her bir bloğun şerit metre ile ölçülerek, farklı iki geometri için hesaplanan blok hacimleri ( $V_p$ ,  $V_e$ ) ile fotogrametrik yöntemle belirlenen hacimler karşılaştırılmıştır (Şekil 13).

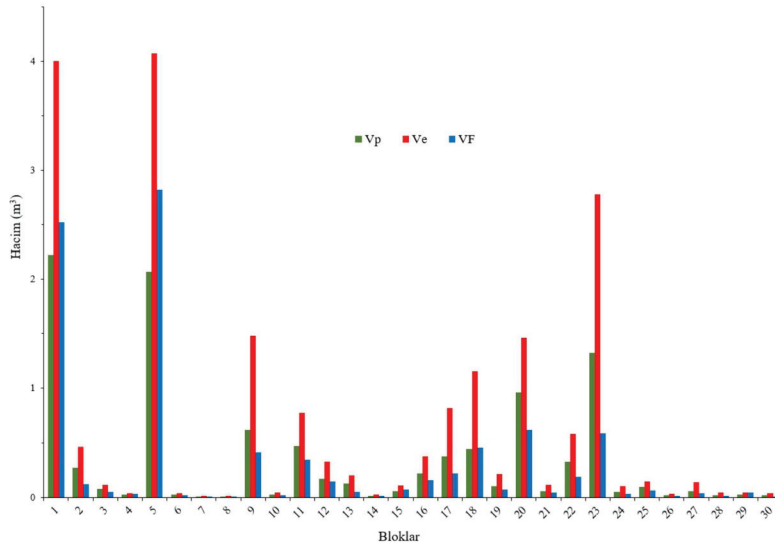
Şekil 14'te her bir blok için geleneksel yöntemle ( $V_p$ ,  $V_e$ ) ve fotogrametrik yöntemle ( $V_f$ ) hesaplanan hacimler için sütun grafiği verilmiştir. Bu grafikte farklı geometrik şekillerde belirlenmiş hacimlerle fotogrametrik analizle belirlenen hacimler bir arada görülmektedir.

## SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Çalışma alanı olarak seçilen Zir Vadisi kaya düşmelerinin yaşandığı ve yoğun araç trafiğinin bulunduğu bir alan olup, düşen blokların hacminin belirlenmesi kaya düşmesi modelleme çalışmaları için önemli bir parametredir.

Blokların hacminin hesaplanması; düşen ya da düşebilecek özellikte bulunan blokların kaya düşme alanlarında yaratacakları etkinin boyutunu etkileyebilir bir parametredir. Çünkü düşen blokların boyutu, bloğun sahip olduğu ya da olacağı potansiyel ve kinetik enerjilerini belirlemektedir. Bu durum kaya düşmesi analiz çalışmalarında düşen blokların ilerleme mesafelerini etkileyecek, kaya düşmelerinden korunma ve önleme yöntemlerini belirleyecektir. Bu nedenle kaya blokların hacimlerinin doğru belirlenmesi kaya düşmesi analiz çalışmalarında önemli bir yer tutmaktadır.

Zir Vadisi yamaçlarından düşen kaya bloklarının hacimleri; arazide şerit metre ile ölçülen boyutlar kullanılarak iki farklı geometrik şekil için ve fotogrametrik yöntem için belirlenmiştir. Bu amaçla arazi çalışmaları sırasında geleneksel yöntemle ölçümleri alınan 30 adet blok için aynı zamanda fotogrametrik analizler gerçekleştirilmiştir.



Şekil 14. Geleneksel ( $V_p$ ,  $V_e$ ) ve fotogrametrik ( $V_f$ ) yöntemle belirlenmiş blok hacim değerlerine ait sütun grafiği  
 Figure 14. Column graph of the block volume values determined by conventional method ( $V_p$ ,  $V_e$ ) and photogrammetric ( $V_f$ ) method

Fotogrametrik 3B model oluşturmak için ihtiyaç duyulan veriler, lazer tarama özelliğine sahip Apple iPhone 14 Pro Max ile toplanmıştır. Görüntü verileri ile LiDAR verileri arasındaki entegrasyonu sağlamak için Pix4Dcatch, nokta bulutu üretmek için Pix4Dmatic ve hacim hesaplamaları için Pix4Dsurvey yazılımları kullanılmıştır.

Bu çalışma kapsamında arazide yapılan ölçümlerden ve fotogrametrik yöntemlerden elde edilen hacimler arasında çapraz korelasyon grafikleri çizilmiş ve bu grafiklere göre determinasyon katsayıları belirlenmiştir ( $R^2$ ). Buna göre arazide şerit metre ile boyutları ölçülerek belirlenen  $V_p$  ile  $V_f$  arasında  $0.90 V_c$  ile  $V_f$  arasında ise  $0.88 R^2$  değerleri belirlenmiştir. Grafikler değerlendirildiğinde; arazide ölçülen blokların boyutu büyüdükçe ölçümü güçleşmekte ve fotogrametrik olarak yapılan değerlendirme ile arasındaki fark açılmaktadır. Bu durum; ölçülmesi, erişilmesi güç alanlarda daha da belirgin olacaktır. Ayrıca arazide şerit metre ile yapılan ölçümler zaman kaybı oluşturmakta, ölçümü alan kişinin hassasiyetine bağlı olarak değişebilmektedir. Özellikle düzenli bir geometriye sahip olmayan blokların hacimlerinin belirlenmesinde güçlük yaşanmakta, bu tür bloklar geometrisi bilinen şekillere indirgenmek durumunda kalınmaktadır. Bu durum arazide şerit metre ile alınan ölçümlerle belirlenen hacim hesaplamalarının sınırlamasıdır. Şerit metre ile her bir blok için tek tek ölçüm yapılırken, akıllı telefonlar ile çoklu blokların etrafından alınan tek bir ölçümle her bir blok ayırtlanabilmekte ve hacimleri ayrı ayrı hesaplanabilmektedir. Çalışma kapsamında kullanılan fotogrametrik yöntemler uygulamada gösterdiği pratikliği açısından tercih edilebilir bir yöntemdir. Ayrıca, fotogrametrik çalışmalar ile elde edilen sonuçlar, LiDAR özellikli cihazın yer kontrol noktası olmaksızın farklı boyut ve şekillere sahip kaya

blok modelleri üretmek için saha çalışmalarında faydasını ortaya koymaktadır. Bu cihazlar kısıtlı mutlak konum doğruluğu ve tarama mesafesi gibi dezavantajlarına rağmen, kaya modellemede oldukça yüksek ölçeklendirme doğruluğu sağlamakta ve güvenilir hacim değerleri üretmek için geleneksel saha ölçümlerine göre güçlü bir alternatif oluşturmaktadır. Ancak, kaya yüksekliğinin görüntü alımını zorlaştıracak düzeyde arttığı durumlarda (örneğin 3m), kayanın üst kısımlarını görüntülemek için uzatma çubuğu kullanılması gerekmektedir. Ayrıca, bina gibi çok daha büyük ölçekteki projeler söz konusu olduğunda ise, göreceli doğruluğun korunmasındaki zorluklar ve modeller üzerinde oluşan deformasyonlara bağlı tutarsızlıklar literatürde vurgulanmıştır (Miller vd., 2023; Tamimi, 2022). Bu nedenle, modellenen obje/yüzey büyüklüğünün çok arttığı durumlarda ölçek ve sürüklenme hatalarını azaltmak için kontrol noktaları gibi ek veriler ya da viDoc gibi ek donanımlar kullanılması, sonuç ürünlerin mutlak ve göreceli doğruluğunu arttırabilmektedir (Moyano vd., 2023; Süleymanoğlu vd., 2023).

Tamimi ve Toth (2023), iPhone 13 Pro verilerine dayalı olarak Pix4Dsurvey yazılımında hesapladıkları hacim değerlerini İnsansız Hava Aracı (İHA) görüntülerinden hesaplanan hacim değerleri ile karşılaştırmışlar ve iki yöntem arasında %8 fark bulmuşlardır. Rutkowski ve Lipecki (2023), profesyonel yersel lazer tarayıcı ile iPhone 13 Pro'dan elde edilen verileri karşılaştırmış ve %2'nin altında hatalarla beton hacimlerinin belirlenebileceğini göstermişlerdir. iPhone 14 Pro Max kullanarak yapılan bu çalışmada ise; fotogrametrik verilerin yüksek bağıl doğruluğu göz önüne alındığında, bu veriler ile gerçek değere daha yakın blok hacimleri hesaplandığı değerlendirilmektedir. Ancak, voksel yönteminde referans yüzey ile kaya yüzeyi arasında bulunan boşlukların hacim hesabına

dahil edilmesi, blok hacimlerinin olduğundan fazla hesaplanmasına neden olmaktadır. Bu durum yöntemin bir sınırlaması olup, gelecekteki çalışmalarda farklı hacim hesaplama yaklaşımları kullanılarak nokta bulutlarından hesaplanan hacim değerlerinin doğruluğu artırılabilir. Tüm bu değerlendirmelere ek olarak; ilerideki çalışmalar için; farklı dijital veri elde etme platformları ile elde edilen nokta bulutlarının karşılaştırılması üzerine çalışmaların yapılması önerilmektedir.

## KATKI BELİRTME

Yazarlar, çalışmada kullanılan Pix4Dmatic v.1.58.1 uygulaması ile ilgili desteğinden dolayı ATAY Mühendislik'e teşekkürlerini sunarlar.

## KAYNAKLAR

- Agliardi, F., Crosta, G. B., & Frattini, P. (2009). Integrating Rockfall Risk Assessment and Countermeasure Design by 3D Modelling Techniques. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 9(4), 1059-1073. <https://doi.org/https://doi.org/10.5194/nhess-9-1059-2009>
- Ağca, M., Gültekin, N., & Kaya, E. (2020a). İnsansız Hava Aracından Elde Edilen Veriler ile Kaya Düşme Potansiyelinin Değerlendirilmesi: Adam Kayalar Örneği, *Mersin. Geomatik*, 5(2), 134-145. <https://doi.org/https://doi.org/10.29128/geomatik.595574>
- Ağca, M., Kaya, E., & Yılmaz, H. M. (2020b). Yersel Ve Fotogrametrik Yöntemler İle Kaya Bloklarının Hacimlerinin Hesaplanması: Selime Örneği, *Aksaray. Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 20(3), 465-471. <https://doi.org/https://doi.org/10.35414/akufemubid.679005>
- An, P., Fang, K., Jiang, Q., Zhang, H., & Zhang, Y. (2021). Measurement of Rock Joint Surfaces by Using Smartphone Structure From Motion (SfM) Photogrammetry. *Sensors*, 21(3), 922. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/s21030922>
- Apple. (2023). iPhone 14 Pro Max - Teknik Özellikleri. Retrieved 1 Nisan from <https://support.apple.com/tr-tr/111846>
- Assali, P., Grussenmeyer, P., Villemin, T., Pollet, N., & Viguier, F. (2014). Surveying and Modeling of Rock Discontinuities by Terrestrial Laser Scanning and Photogrammetry: Semi-Automatic Approaches for Linear Outcrop Inspection. *Journal of Structural Geology*, 66, 102-114. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jsg.2014.05.014>
- Battulwar, R., Zare-Naghadehi, M., Emami, E., & Sattarvand, J. (2021). A State-of-The-Art Review of Automated Extraction of Rock Mass Discontinuity Characteristics Using Three-Dimensional Surface Models. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 13(4), 920-936. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2021.01.008>
- Bilgin, A. (2014). Türkiye Jeoloji Haritaları Ankara İ-28 Paftası (Publication Number 208) MTA Jeoloji Etütleri Dairesi. Ankara, Türkiye.
- Brach, M., Tracz, W., Krok, G., & Gaşior, J. (2023). Feasibility of Low-Cost LiDAR Scanner Implementation in Forest Sampling Techniques. *Forests*, 14(4), 706. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/f14040706>
- Catharia, O., Richard, F., Vignoles, H., Véron, P., Aoussat, A., & Segonds, F. (2023). Smartphone LiDAR Data: A Case Study for Numerisation of Indoor Buildings in Railway Stations. *Sensors*, 23(4), 1967. <https://www.mdpi.com/1424-8220/23/4/1967>
- Chen, N., Kemeny, J., Jiang, Q., & Pan, Z. (2017). Automatic Extraction of Blocks from 3D Point Clouds of Fractured Rock. *Computers & Geosciences*, 109, 149-161. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cageo.2017.08.013>
- Corradetti, A., Seers, T., Mercuri, M., Calligaris, C., Buseti, A., & Zini, L. (2022). Benchmarking Different SfM-MVS Photogrammetric and iOS

- LiDAR Acquisition Methods for the Digital Preservation of a Short-Lived Excavation: A Case Study from an Area of Sinkhole Related Subsidence. *Remote Sensing*, 14(20), 5187. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/rs14205187>
- Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. (2018). Ankara ili, Sincan ilçesi, Zir Vadisi Doğal Sit Alanı “Doğal Sit-Sürdürülebilir Koruma ve Kontrollü Kullanım Alanı» olarak tescil edilmiştir. Retrieved 1 Mayıs from <https://tvk.csb.gov.tr/ankara-ili-sincan-ilcesi-zir-vadisi-dogal-sit-alani-dogal-sit-surdurulebilir-koruma-ve-kontrollu-kullanim-alani-olarak-tescil-edilmistir.-duyuru-366770>
- DiFrancesco, P.-M., Bonneau, D. A., & Hutchinson, D. J. (2021). Computational Geometry-Based Surface Reconstruction for Volume Estimation: A Case Study on Magnitude-Frequency Relations for A Lidar-Derived Rockfall Inventory. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 10(3), 157. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/ijgi10030157>
- DJI. (2022). Osmo Mobile SE - Technical Specifications. Retrieved 30 Mart from <https://www.dji.com/global/osmo-mobile-se/specs>
- Doğan, S., & Güllü, H. (2021). Multiple Methods for Voxel Modeling And Finite Element Analysis for Man-Made Caves in Soft Rock of Gaziantep. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 81(1), 23. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s10064-021-02489-8>
- Ersoy, O. (2003). Soğumakta Olan Lav Akıntısının Patlamalı Çökmesi İle Oluşan Blok ve Kül Akışının ve Patlama Zonu Özelliklerinin İncelenmesi: Zir Çayı Lav Akışı Örneği, Kuzeybatı Ankara [Master’s Thesis, Hacettepe Üniversitesi]. Ankara, Türkiye.
- Frattini, P., Crosta, G., Carrara, A., & Agliardi, F. (2008). Assessment of Rockfall Susceptibility by Integrating Statistical and Physically-Based Approaches. *Geomorphology*, 94(3), 419-437. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.10.037>
- Gillihan, R. N. (2021). Accuracy Comparisons of iPhone 12 Pro LiDAR Outputs [Ph.D. Thesis, University of Colorado]. Colorado, USA
- Gopal, L., & Shukor, S. A. A. (2023). Modelling Small Artefact for Preservation – A Case Study of Perlis Heritage. *Journal of Physics: Conference Series*, 2641(1), 012005. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2641/1/012005>
- Guzzetti, F., Crosta, G., Detti, R., & Agliardi, F. (2002). STONE: A Computer Program for The Three-Dimensional Simulation of Rock-Falls. *Computers & Geosciences*, 28(9), 1079-1093. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0098-3004\(02\)00025-0](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0098-3004(02)00025-0)
- Gülci, S., Yurtseven, H., Akay, A. O., & Akgul, M. (2023). Measuring tree diameter using a LiDAR-equipped smartphone: a comparison of smartphone- and caliper-based DBH. *Environmental Monitoring and Assessment*, 195(6), 678. <https://doi.org/10.1007/s10661-023-11366-8>
- Güllü, M., Solmaz, M., Baybura, T., & Turgut, B. (2018). Tehlikeli Kaya Bloklarının Düşürülmesi ve Metrajlarının Lazer Tarayıcı İle Hesaplanması. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 18(1), 276-284. <https://doi.org/https://doi.org/10.5578/fmbd.66782>
- Gültekin, N. (2023). Ankara Zir Vadisi kaya düşmelerinin üç boyutlu analizlerle değerlendirilmesi. *Yerbilimleri*, 44(2), 179-201. <https://doi.org/https://doi.org/10.17824/yerbilimleri.1332884>
- Hou, J., Hübner, P., Schmidt, J., & Iwaszczuk, D. (2024). Indoor Mapping with Entertainment Devices: Evaluating the Impact of Different Mapping Strategies for Microsoft HoloLens 2 and Apple iPhone 14 Pro. *Sensors*, 24(4), 1062. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/s24041062>

- Illeditsch, M., & Preh, A. (2024). Determination of meaningful block sizes for rockfall modelling. *Natural Hazards*, 120(6), 5685-5710. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s11069-024-06432-4>
- Ivanovski, I., Nedelkovska, N., Petrov, G., Jovanovski, M., & Nikolovski, T. (2023). COMPARISON BETWEEN TRADITIONAL AND CONTEMPORARY METHODS FOR DATA RECORDING IN STRUCTURAL GEOLOGY. *Geologica Macedonica*, 37(2), 119-133. <https://doi.org/10.46763/GEOL23372119i>
- Jaklič, A., Erič, M., Mihajlović, I., Stopinšek, Ž., & Solina, F. (2015). Volumetric Models from 3D Point Clouds: The Case Study of Sarcophagi Cargo from a 2nd/3rd Century AD Roman Shipwreck near Sutivan on Island Brač, Croatia. *Journal of Archaeological Science*, 62, 143-152. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jas.2015.08.007>
- Jasińska, A., Pyka, K., Pastucha, E., & Midtiby, H. S. (2023). A Simple Way to Reduce 3D Model Deformation in Smartphone Photogrammetry. *Sensors*, 23(2), 728. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/s23020728>
- King, F., Kelly, R., & Fletcher, C. G. (2022). Evaluation of LiDAR-Derived Snow Depth Estimates From the iPhone 12 Pro. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 19, 1-5. <https://doi.org/https://doi.org/10.1109/LGRS.2022.3166665>
- Koulibaly, A. S., Shahbazi, A., Saeidi, A., Rouleau, A., Quirion, M., & Chesnaux, R. (2023). Advancements in rock block volume calculation by analytical method for geological engineering applications. *Environmental Earth Sciences*, 82(13), 344. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s12665-023-11027-6>
- Łabędź, P., Skabek, K., Ozimek, P., Rola, D., Ozimek, A., & Ostrowska, K. (2022). Accuracy Verification of Surface Models of Architectural Objects from the iPad LiDAR in the Context of Photogrammetry Methods. *Sensors*, 22(21), 8504. <https://www.mdpi.com/1424-8220/22/21/8504>
- Li, B., Wei, J., Wang, L., Ma, B., & Xu, M. (2019). A Comparative Analysis of Two Point Cloud Volume Calculation Methods. *International Journal of Remote Sensing*, 40(8), 3227-3246. <https://doi.org/https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1541111>
- Luetzenburg, G., Kroon, A., & Bjørk, A. A. (2021). Evaluation of the Apple iPhone 12 Pro LiDAR for an Application in Geosciences. *Scientific Reports*, 11(1), 22221. <https://doi.org/https://doi.org/10.1038/s41598-021-01763-9>
- Mikita, T., Balková, M., Bajer, A., Cibulka, M., & Patočka, Z. (2020). Comparison of Different Remote Sensing Methods for 3D Modeling of Small Rock Outcrops. *Sensors*, 20(6), 1663. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/s20061663>
- Miller, S. H., Hashemian, A., Gillihan, R., & Benes, S. (2023). Accuracy and Repeatability of Mobile Phone LiDAR Capture <https://doi.org/10.4271/2023-01-0614>
- Monsalve, A., Yager, E. M., & Tonina, D. (2023). Evaluating Apple iPhone LiDAR measurements of topography and roughness elements in coarse bedded streams. *Journal of Ecohydraulics*, 1-11. <https://doi.org/https://doi.org/10.1080/24705357.2023.2204087>
- Moyano, J., Nieto-Julián, J. E., Fernández-Alconchel, M., Oreni, D., & Estévez-Pardal, R. (2023). Analysis and Precision of Light Detection and Ranging Sensors Integrated in Mobile Phones as a Framework for Registration of Ground Control Points for Unmanned Aerial Vehicles in the Scanning Technique for Building Information Modelling in Archaeological Sites. *Drones*, 7(7), 477. <https://www.mdpi.com/2504-446X/7/7/477>
- Nik Azhan Hakim, N., Razali, R., Said, M., Muhamad, M., Abdul Rahim, H., & Mokhtar, M. (2023). Accuracy Assessment on Detail Survey Plan Using iPhone 13 Pro Max LiDAR Sensor. *International Journal of Geoinformatics*, 19(5). <https://doi.org/https://doi.org/10.52939/ijg.v19i5.2665>

- Paukkonen, N. (2023). Towards a Mobile 3D Documentation Solution. Video-Based Photogrammetry and iPhone 12 Pro as Fieldwork Documentation Tools. *Journal of Computer Applications in Archaeology*. <https://doi.org/10.5334/jcaa.135>
- Pavelka jr, K., Kuzmanov, P., Pavelka, K., & Rapuca, A. (2023). Different data joining as a basic model for hbim – a case project St. Pataleimon in Skopje. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLVIII-5/W2-2023, 85-91. <https://doi.org/https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-5-W2-2023-85-2023>
- Pix4D. (2024a). Capture a project - PIX4Dcatch. Retrieved 15 Mart from <https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/4409722555025-Capture-a-project-PIX4Dcatch>
- Pix4D. (2024b). How to process PIX4Dcatch datasets in PIX4Dmatic. Retrieved 25 Mart from <https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/4414523101073-How-to-process-PIX4Dcatch-datasets-in-PIX4Dmatic>
- Pix4D. (2024c). FAQ - PIX4Dcatch. Retrieved 26 Mart from <https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/360043331092-FAQ-PIX4Dcatch#benefits>
- Pix4D. (2024d). Pix4D Processing options. Retrieved 25 Mart from <https://support.pix4d.com/hc/en-us/sections/4407352591889-Processing-options>
- Pix4D. (2024e). Volume measurement - PIX4Dsurvey. Retrieved 30 Ocak from <https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/4405473285777-Volume-measurement-PIX4Dsurvey>
- Rasti, S., Bleakley, C. J., Silvestre, G. C. M., Holden, N. M., Langton, D., & O'Hare, G. M. P. (2021). Crop Growth Stage Estimation Prior to Canopy Closure Using Deep Learning Algorithms. *Neural Computing and Applications*, 33(5), 1733-1743. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s00521-020-05064-6>
- Riquelme, A., Tomás, R., Cano, M., Pastor, J. L., & Jordá-Bordehore, L. (2021). Extraction of Discontinuity Sets of Rocky Slopes Using Iphone-12 Derived 3DPC and Comparison to TLS and SFM Datasets. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 833(1), 012056. <https://doi.org/https://doi.org/10.1088/1755-1315/833/1/012056>
- Rutkowski, W., & Lipecki, T. (2023). Use of the iPhone 13 Pro LiDAR Scanner for Inspection and Measurement in the Mineshaft Sinking Process. *Remote Sensing*, 15(21), 5089. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/rs15215089>
- Sarro, R., Riquelme, A., García-Davalillo, J. C., Mateos, R. M., Tomás, R., Pastor, J. L., Cano, M., & Herrera, G. (2018). Rockfall Simulation Based on UAV Photogrammetry Data Obtained During An Emergency Declaration: Application at A Cultural Heritage Site. *Remote Sensing*, 10(12), 1923. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/rs10121923>
- Scargill, T., Premsankar, G., Chen, J., & Gorlatova, M. (2022, 3-6 May 2022). Here To Stay: A Quantitative Comparison of Virtual Object Stability in Markerless Mobile AR. 2022 2nd International Workshop on Cyber-Physical-Human System Design and Implementation (CPHS),
- Stevenson, S., & Liscio, E. (2024). Assessing iPhone LiDAR & Recon-3D for determining area of origin in bloodstain pattern analysis. *Journal of Forensic Sciences*, 69(3), 1045-1060. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/1556-4029.15476>
- Suleymanoglu, B., Tamimi, R., Yilmaz, Y., Soycan, M., & Toth, C. (2023). Road Infrastructure Mapping by Using Iphone 14 Pro: An Accuracy Assessment. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLVIII-M-1-2023, 347-353. <https://doi.org/https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-M-1-2023-347-2023>
- Tamimi, R. (2022). Relative Accuracy Found within Iphone Data Collection. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLIII-B2-2022, 303-308. <https://doi.org/https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B2-2022-303-2022>

- Tamimi, R., & Toth, C. (2023a). Performance Assessment of a Mini Mobile Mapping System: Iphone 14 Pro Installed on a e-Scooter. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLVIII-M-3-2023, 307-315. <https://doi.org/https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-M-3-2023-307-2023>
- Tamimi, R., & Toth, C. (2023b). Comparison of Iphone 13 Pro's Camera and Lidar Sensor To UAS Photogrammetric Model of The Great Pyramid of Giza. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLVIII-M-3-2023, 299-306. <https://doi.org/https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-M-3-2023-299-2023>
- Tatsumi, S., Yamaguchi, K., & Furuya, N. (2023). ForestScanner: A mobile application for measuring and mapping trees with LiDAR-equipped iPhone and iPad. *Methods in Ecology and Evolution*, 14(7), 1603-1609. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/2041-210X.13900>
- Tavani, S., Billi, A., Corradetti, A., Mercuri, M., Bosman, A., Cuffaro, M., Seers, T., & Carminati, E. (2022). Smartphone assisted fieldwork: Towards the digital transition of geoscience fieldwork using LiDAR-equipped iPhones. *Earth-Science Reviews*, 227, 103969. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2022.103969>
- Tazudin, H., Shukor, S. A. A., & Johari, J. (2023). Performance Evaluation of Different Devices and Algorithms for Modelling Small Artefact. *Journal of Physics: Conference Series*, 2641(1), 012026. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2641/1/012026>
- Teppati Losè, L., Spreafico, A., Chiabrando, F., & Giulio Tonolo, F. (2022). Apple LiDAR Sensor for 3D Surveying: Tests and Results in the Cultural Heritage Domain. *Remote Sensing*, 14(17), 4157. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/rs14174157>
- Tondo, G. R., Riley, C., & Morgenthal, G. (2023). Characterization of the iPhone LiDAR-Based Sensing System for Vibration Measurement and Modal Analysis. *Sensors*, 23(18), 7832. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/s23187832>
- Topal, T., Akin, M., & Ozden, U. A. (2007). Assessment of Rockfall Hazard Around Afyon Castle, Turkey. *Environmental Geology*, 53(1), 191-200. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s00254-006-0633-2>
- Torkan, M., Janiszewski, M., Uotinen, L., & Rinne, M. (2023). Method to obtain 3D point clouds of tunnels using smartphone LiDAR and comparison to photogrammetry. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1124(1), 012016. <https://doi.org/https://doi.org/10.1088/1755-1315/1124/1/012016>
- Umili, G., Bonetto, S. M. R., Mosca, P., Vagnon, F., & Ferrero, A. M. (2020). In Situ Block Size Distribution Aimed at the Choice of the Design Block for Rockfall Barriers Design: A Case Study along Gardesana Road. *Geosciences*, 10(6), 223. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/geosciences10060223>
- Vacca, G. (2023). 3D Survey with Apple LiDAR Sensor— Test and Assessment for Architectural and Cultural Heritage. *Heritage*, 6(2), 1476-1501. <https://www.mdpi.com/2571-9408/6/2/80>
- Walton, G., & Weidner, L. (2023). Accuracy of Rockfall Volume Reconstruction from Point Cloud Data—Evaluating the Influences of Data Quality and Filtering. *Remote Sensing*, 15(1), 165. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/rs15010165>
- Wang, Y., Ding, M., Zhang, Q., Zhang, X., & Qu, Z. (2023). Volume calculation methods of irregular stone artifacts based on 3D laser scanning technology. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 22(6), 3386-3402. <https://doi.org/https://doi.org/10.1080/13467581.2023.2182640>
- Winberg, O., Pyörälä, J., Yu, X., Kaartinen, H., Kukko, A., Holopainen, M., Holmgren, J., Lehtomäki, M., & Hyypä, J. (2023). Branch information extraction from Norway spruce using handheld laser scanning point clouds in Nordic forests. *ISPRS Open Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 9, 100040. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ophoto.2023.100040>

Zeybek, M., & Ediz, D. (2022). Detection of Road Distress with Mobile Phone LiDAR Sensors. *Advanced LiDAR*, 2(2), 48-53. <http://193.255.128.114/index.php/lidar/article/view/465>

Zhang, Z., Gerke, M., Vosselman, G., & Yang, M. Y. (2018). Filtering Photogrammetric Point Clouds Using Standard Lidar Filters Towards DTM Generation. *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, IV-2, 319-326. <https://doi.org/https://doi.org/10.5194/isprs-annals-IV-2-319-2018>