

DÜŞÜK İRTİFADAN ALINAN HAVA GÖRÜNTÜLERİNİN İŞLENMESİNDE KULLANILAN YAZILIMLARIN YÜZEY MODELLEME PERFORMANSLARININ KARŞILAŞTIRILMASI

Mehmet DOĞRULUK¹, İlyas YALÇIN²

¹ Öğr. Gör. Dr., Hacettepe Üniversitesi, Mimarlık ve Şehir Planlama Bölümü, 06909, Malıköy, Ankara, mehmet.dogruluk@hacettepe.edu.tr

² Öğr. Gör., Hacettepe Üniversitesi, Mimarlık ve Şehir Planlama Bölümü, 06909, Malıköy, Ankara, ilyas.yalcin@hacettepe.edu.tr

ÖZET

Günümüzde insansız hava araçları (İHA) üzerine entegre edilen kameralar ile düşük irtifadan (<120m) toplanan görüntüler, harita üretim faaliyetlerinin yanı sıra birçok farklı alanda kullanılmaktadır. Özellikle yerleşim alanlarına yönelik yüzey modellerinin oluşturulmasında, farklı açılardan yüksek çözünürlükte görüntü elde edebilme yetenekleri nedeniyle İHA'lar ön plana çıkmaktadır. Üretilen yüzey modellerinin arazi gerçeği ile tutarlılığı ise İHA'nın uçuş modu, yapıların birbirleri arasındaki uzaklık ve yapı yüksekliği gibi geometrik parametrelerin yanı sıra görüntü işleme yazılımının performansına da bağlıdır. İHA görüntülerinin işlenmesinde kullanılan fotogrametrik değerlendirme yazılımları temelde benzer bir görüntü işleme yaklaşımı kullanmalarına karşın üretilen sonuçlar geometrik olarak farklılık gösterebilmektedir. Özellikle yapıların zeminle birleşim hatları ve karakteristik bölgeleri üzerinde gözlemlenen bu geometrik farklılıkların büyüklüğü, sıklığı ve konumu kullanılan görüntü işleme yazılımına bağlı olarak değişebilmektedir. Bu çalışmada öncelikle Hacettepe Üniversitesi'nin Başkent OSB Yerleşkesi üzerinde İHA ile alçak irtifadan yüksek çözünürlüklü görüntü alımı gerçekleştirilmiştir. Bu görüntüler üç farklı görüntü işleme yazılımı (Agisoft Metashape, DJI Terra, ContextCapture) kullanılarak değerlendirilmiş ve yerleşke binalarını da kapsayan üç farklı yüzey modeli üretilmiştir. Bu modeller üzerindeki geometrik farklılıklar öncelikle görsel olarak değerlendirilmiş ve aynı zamanda modellerin birbirleri ile uyumu farklı konumlardan alınan dikey profiller yardımıyla incelenmiştir. Ayrıca farklı yazılımlarla üretilen yüzey modellerinin yer gerçeği ile uyumu istatistiksel yaklaşımlarla değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar kullanılan yazılımların yerleşim alanlarındaki yüzey modelleme çalışmalarında sunduğu avantaj ve dezavantajları ortaya koymaktadır.

Anahtar Sözcükler: yüzey modeli, insansız hava aracı, Agisoft, DJI Terra, ContextCapture, görüntü işleme

ABSTRACT

COMPARISON OF SURFACE MODELING PERFORMANCE OF SOFTWARE USED FOR PROCESSING AERIAL IMAGES FROM LOW ALTITUDE

Today, images collected from low altitude (<120m) with cameras integrated on unmanned aerial vehicles (UAV) are used in many different fields as well as map production activities. Especially in the generation of surface models for residential areas, UAVs stand out due to their ability to obtain high resolution images from different viewing angles. The consistency of the produced surface models with the terrain reality depends on the geometric parameters such as the flight mode of the UAV, the distance between the structures/buildings and the height of the buildings, as well as the performance of the image processing software. Although the photogrammetric evaluation software used in the processing of UAV images basically use a similar image processing approach, the results produced may differ from each other. The geometric differences on these models were first evaluated visually, and at the same time, the compatibility of the models with each other was examined with the help of vertical profiles taken from different positions. In addition, the compatibility of the surface models produced with different software with the ground reality was evaluated with statistical approaches. The results obtained reveal the advantages and disadvantages of the software used in surface modeling studies in residential areas.

Keywords: surface modelling, unmanned aerial vehicle, Agisoft, DJI Terra, ContextCapture, image processing

1. GİRİŞ

İnsansız hava aracı (İHA) platformları günümüzde özellikle yer bilimleri araştırmalarında ihtiyaç duyulan haritalama ve üç boyutlu (3B) modelleme çalışmalarının yanı sıra birçok farklı disiplin tarafından ihtiyaç duyulan mekânsal verileri sağlayabilmesi nedeniyle, insanlı hava fotogrametrisinin düşük maliyetli bir alternatifi olarak değerlendirilmektedir (Nex ve Remondino, 2014). İHA ile düşük irtifadan ve farklı görüntüleme açılardan elde edilen çok yüksek çözünürlüklü (< 10 cm) görüntüler kullanılarak görece küçük alanlar için ya da binalar ve ağaçlar gibi tekil objeler için oldukça yüksek prezisyonlu yüzey modelleri üretilmektedir (Ma vd., 2020). Temelde İHA görüntülerinden üretilen SYM'lerin yeryüzü gerçeği ile uyumu; İHA platformunun sahip olduğu donanımların (kamera ve navigasyon sistemi vb.) özellikleri, uçuş planı, görüntülenen bölgenin topografik karakteristikleri,

görüntüleme anındaki meteorolojik koşullar, coğrafi referanslama yaklaşımı ve kullanılan fotogrametrik görüntü işleme yazılımının performansı gibi farklı etkenlere bağlı olarak değişebilmektedir (Liu vd., 2018; Ali ve Abed, 2019; Hinge vd., 2019). Son yıllarda haritalama amacıyla kullanılmak üzere birçok ticari İHA platformu geliştirilmiş ve satışa sunulmuştur. Söz konusu İHA platformları üzerinde, görüntülerin konumlarına gerçek zamanlı kinematik (RTK) düzeltme yapılmasına olanak tanıyan ek donanımlar, zorlu hava koşullarında İHA'nın stabilizasyonu sağlayan gelişmiş sensörler ve nadir dışı (eğik) görüntü alımındaki lens distorsiyonlarına karşı kalibrasyon olanağı sağlayan kameralar yer almaktadır (Mulakala, 2019). Hassas konum bilgisine ihtiyaç duyan geniş bir kullanıcı kitlesinin ilgisini çeken bu İHA'lar, yer kontrol noktası (YKN) olmaksızın doğrudan coğrafi referanslama yoluyla ya da birkaç YKN kullanarak dolaylı coğrafi referanslama ile güvenilir SYM'ler üretmek için birçok araştırmacının motivasyonunu arttırmıştır (Peppia vd., 2019; Taddia vd., 2019; Eker vd., 2020; Przybilla vd., 2020; Stott vd., 2020; Taddia vd., 2020; Türk ve Öcalan, 2020; Wang ve Shu, 2022).

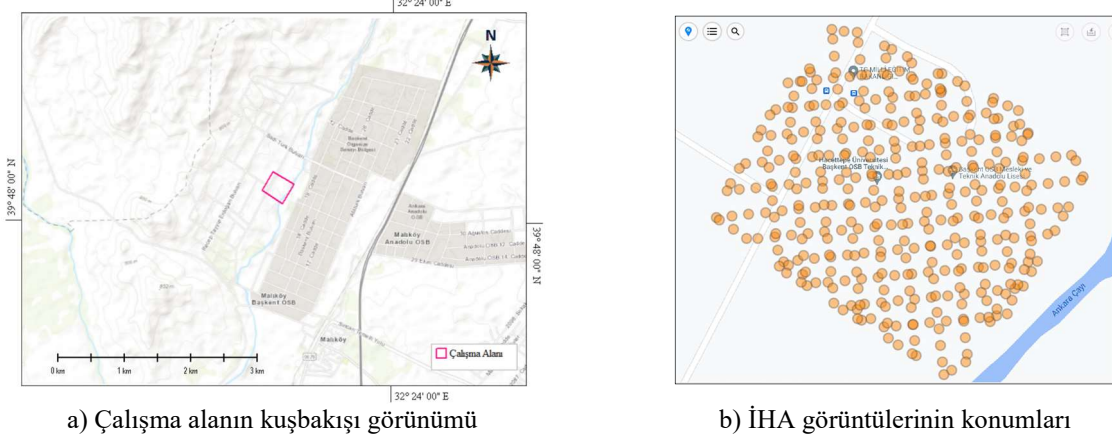
İHA ile toplanan görüntülerin değerlendirmesi ve bu sayede SYM gibi fotogrametrik ürünler elde edilmesi için bir görüntü işleme yazılımına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu amaç için tasarlanan çoğu yazılım paketi, bir sahnenin 3B geometrisini oluşturmak için SfM (Structure from Motion) tekniğini kullanmaktadır. Klasik bir SfM; tek bir görüntü için özellik çıkarma, her bir görüntü çifti için özellik eşleştirme ve iteratif blok dengelemeye dayalı parametre çözme olarak gruplandırılabilir üç ana aşamadan oluşmaktadır (Jiang vd., 2020). Birinci aşamada her bir örtüşen görüntü için aday özellik noktaları (key points) belirlenir. İkinci aşamada ise aday özellik noktaları yardımıyla çoklu stereo çiftlerin oryantasyonu sağlanır. Başka bir deyişle örtüşen görüntüler eşleştirilir ve hizalanır. Ayrıca bu aşamada örtüşen görüntülerdeki eş detaylar (tie points) için bir özellik veri tabanını (seyrek nokta bulutu) oluşturulur. Üçüncü ve son aşamada ise seyrek nokta bulutunun yerleşik bir harita koordinat sistemine coğrafi referanslaması için demet dengeleme uygulanır (Berra ve Peppia, 2020). Bu işlemin bir parçası olarak görüntü alımında kullanılan kamera için bir optik model (örn. odak uzaklığı ve lens distorsiyon parametreleri vb.) tahmin edilir. Blok dengelemeye harici kontrol ölçümlerinin (YKN'lerin) dahil edilmesi durumunda, verilerin mutlak yönelimi ve ölçeğini tanımlanır ve ayrıca sistematik hataları etkili bir şekilde azaltılabilecek kısıtlamalar eklenir (James vd., 2017). SfM iş akışı tamamlandığında, seyrek nokta bulutuna bir genişletme ve filtreleme prosedürü uygulanarak yoğun nokta bulutuna dönüştürülmekte ve ayrıca SYM üretilmektedir. Kullanıcılar tüm süreçlerin sonuçlarını (parametre seçimi ile) kısmen iyileştirebilse de esasında SYM üretim performansı yerleşik SfM tekniğine ve SYM üretiminde kullanılan algoritmaya bağlıdır (Cao vd., 2017). Son yıllarda söz konusu yazılımların; blok dengeleme (Gini vd., 2013; Casella vd., 2020; Jiang vd., 2020), nokta bulutu (Vacca vd., 2018; Zeybek ve Biçici, 2021; Li ve McKinney, 2022) ve SYM üretim kabiliyetlerini (Sona vd., 2014; Suziedelyte Visockiene vd., 2014; Kaimaris vd., 2017; Sefercik vd., 2020) değerlendiren çok sayıda araştırma gerçekleştirilmiştir. Bu araştırmalar, farklı yüzey karakteristiklerine sahip alanların modellenmesinde kullanıcıların beklentilerine uygun seçimler yapmasına ve ilgili yazılım paketlerinin gelişmeye açık yönlerinin ortaya koyulmasına önemli katkılar sağlamıştır. Bu çalışma doğrudan yapıları alanlar için İHA görüntülerinden üretilen yüzey modellerinin performansının değerlendirilmesine odaklanmaktadır. Bu amaçla, binaları da kapsayan bir çalışma alanı belirlenmiş ve İHA ile alçak irtifadan (~ 90 m) yüksek çözünürlüklü görüntü alımı gerçekleştirilmiştir. Bu görüntüler üç farklı görüntü işleme yazılımı kullanılarak değerlendirilmiş ve doğrudan ve dolaylı coğrafi referanslama yaklaşımları ile toplam altı farklı yüzey modeli üretilmiştir. Bu modeller üzerindeki geometrik farklılıklar öncelikle görsel olarak değerlendirilmiş ve aynı zamanda modellerin birbirleri ile uyumu farklı konumlardan alınan düşey profiller yardımıyla incelenmiştir. Ayrıca farklı yazılımlarla üretilen yüzey modellerinin yer gerçeği ile uyumu YKN'ler yardımıyla istatistiksel yaklaşımlarla değerlendirilmiştir. Söz konusu değerlendirmeler ile elde edilen bulgular ise çalışmanın sonuçlar bölümünde tartışılmıştır.

2. UYGULAMA

Uygulama aşamasında, İHA görüntülerinin işlenmesi amacıyla geliştirilen ve son yıllarda kullanımı yaygınlaşan üç farklı görüntü işleme yazılımının (Agisoft Metashape (v1.8), ContextCapture (v10.19) ve DJI Terra (v3.55)) yüzey modeli üretim performansı değerlendirilmiştir. Çalışma kapsamında üretilen tüm yüzey modelleri TUREF/ TM33 yatay datumunda ve WGS84 elipsoidine dayalı olarak elde edilmiştir. Değerlendirme için gerçekleştirilen tüm deneyler 3.3 GHz Intel Xeon- E2124 CPU ve 5 GB NVIDIA Quadro P2000 grafik kartına ve 80 GB sistem belleğine (RAM) sahip bir Windows PC üzerinde gerçekleştirilmiştir.

2.1. Çalışma Alanı ve Görüntü Alımı

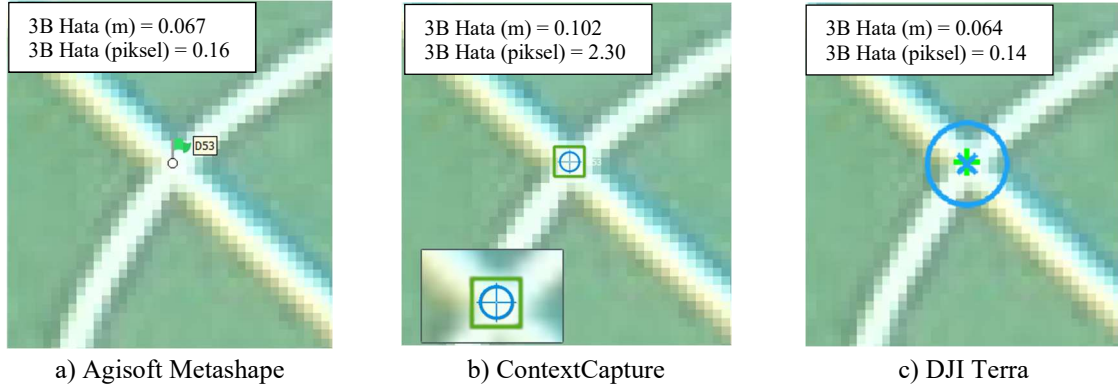
Çalışma alanı, Ankara'da, Hacettepe Üniversitesi'nin Başkent Organize Sanayi (OSB) bölgesi içerisinde yer alan yerleşke binalarını kapsayan ve yaklaşık 0.18 km² büyüklüğünde bir alan olarak belirlenmiştir (Şekil 1-a). Yüksek çözünürlüklü görüntü alımının uçuş planlamasında DJI GS uygulaması kullanılmış ve %70 enine, %80 boyuna fotogrametrik bindirme oranları ile "Double Grid" görüntüleme modu (-60° eğik) tercih edilmiştir. DJI Phantom 4 RTK platformu ile gerçekleştirilen uçuş sonucunda yaklaşık 0.024 m yer örnekleme aralığı değerine sahip 385 örtüşen görüntü elde edilmiştir (Şekil 1-b). Görüntülerin RTK düzeltmeleri TUSAGA-Aktif sistemine dayalı (Ağ-RTK) olarak alınmış ve tüm görüntüler fix çözümle elde edilmiştir. DJI tarafından geliştirilen ve dört motor ile çalışan İHA platformunun teknik detaylarına üreticinin web sayfasından ulaşılabilir (DJI, 2022).



Şekil 1. Çalışma alanı (kırmızı kutu) ve bindirmeli görüntülerin konumları (turuncu noktalar)

2.2. Görüntülerden Yüzey Modeli Üretimi

Test edilen yazılım paketlerinin SYM üretimindeki iş akışları; Hava triyagülasyonu/hizalama, YKN ekleme/işaretleme, optimizasyon ve SYM üretimi olmak üzere dört temel aşamada tamamlanmaktadır. Bu kapsamda, öncelikle hava triyagülasyonu/hizalama aşaması ile görüntüler hizalanmış ve seyrek nokta bulutları üretilmiştir. Ardından South G1 Plus GNSS alıcısı ile Ağ-RTK yöntemine dayalı olarak gerçekleştirilen saha ölçümleri ile (her nokta için 60 epok gözlem yapılarak) toplanan 21 YKN'nin zemin koordinatları yazılımlara eklenmiştir. YKN'lerin görüntü koordinatları, her YKN'de ortalama 20 görüntü üzerinde işaretlenmiş ve her üç yazılımda da aynı görüntüler kullanılmıştır. Böylece YKN'lerin görüntüler üzerindeki pozisyonlarının üç yazılımda da mümkün olduğunca aynı olması sağlanmaya çalışılmıştır. Bu aşamada kullanılan yazılımlar arasında en çok yakınlaşma oranını (%18000) DJI Terra sağlarken, Agisoft Metashape ve ContextCapture sırasıyla %5000 ve %1000 yakınlaşma sağlamaktadır. Şekil 2'de D53 numaralı noktanın YKN işaretleme aşaması gösterilmektedir. Bu YKN için her üç yazılımda da aynı 27 görüntünün aynı pikselleri işaretlenmiştir. Söz konusu nokta için hesaplana 3B hatalar da Şekil 2'de gösterilmektedir.



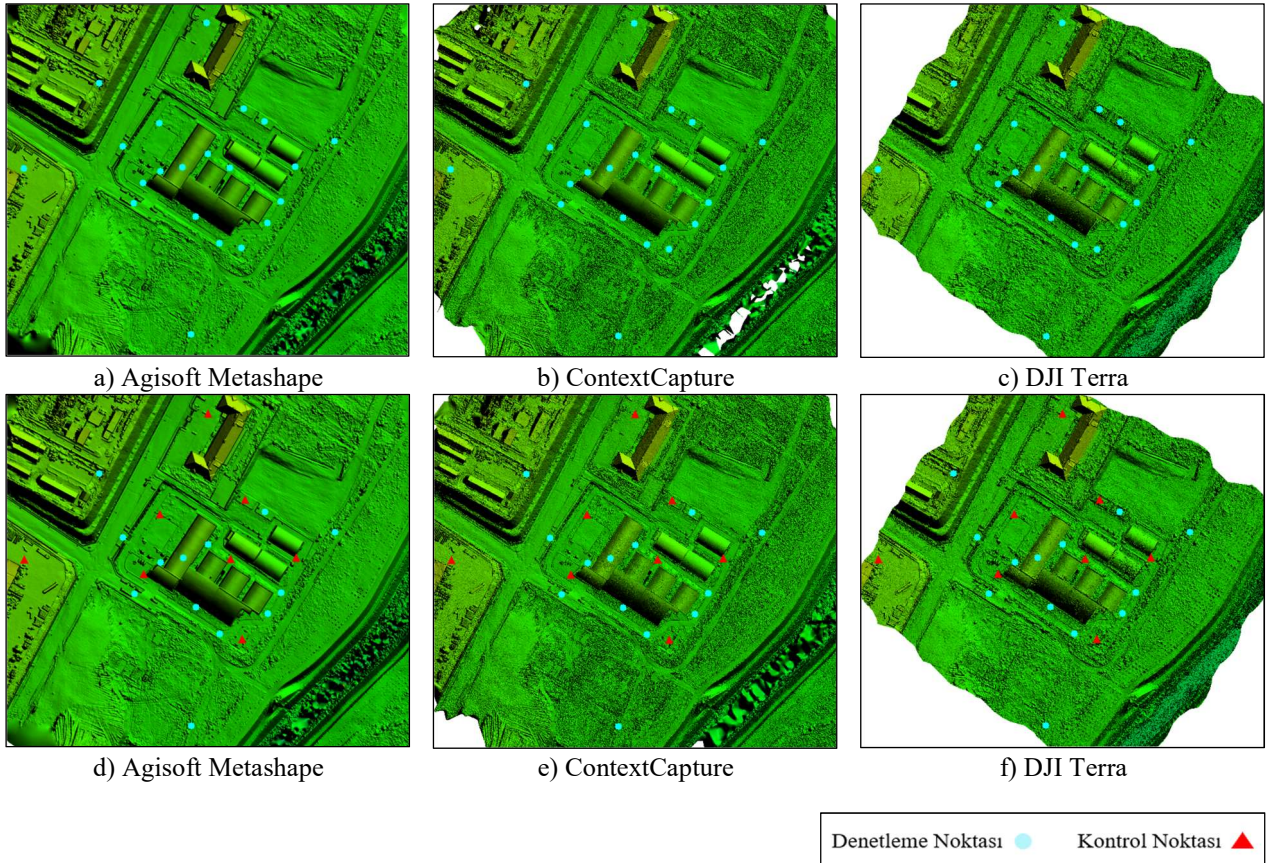
Şekil 2. Farklı görüntü işleme yazılımları ile işaretlene YKN'ler ve hataları.

Şekil 2'de gösterilen işaretleme süreci 21 YKN için uygulandıktan sonra tüm YKN'ler denetleme noktası (check point) olarak atanmış ve seyrek nokta bulutunun optimizasyonu ve coğrafi referanslaması sadece görüntülere dayalı olarak (doğrudan coğrafi referanslama) gerçekleştirilmiştir. Ardından SYM'ler üretilmiştir. Her üç yazılımda da SYM üretiminde seçilen tüm parametreler Çizelge 1'de özetlenmiştir. Agisoft Metashape'in iş akışında, SYM'nin yoğun nokta bulutuna dayalı olarak üretilmesi önerilmektedir (Agisoft, 2022). Diğer taraftan, DJI Terra ile üretilen SYM'nin piksel boyutu otomatik olarak atanmaktadır. Bu nedenle diğer yazılımlar ile üretilen SYM'lerin piksel boyutu (çözünürlüğü), DJI Terra'ya göre ayarlanmıştır.

İkinci SYM üretim sürecinde seçilen 8 YKN, kontrol noktası (control point) olarak atanmış ve seyrek nokta bulutunun optimizasyonu ve coğrafi referanslaması bu YKN'lere dayalı olarak (dolaylı coğrafi referanslama) gerçekleştirilmiştir. Son aşamada ise tekrar SYM üretilmiştir. Bu aşamada üretilen SYM'lerde Çizelge 1'de gösterilen iş akışı, bazı YKN'lerin kontrol noktası olarak atanması dışında tekrar edilmiştir. Ayrıca, ContextCapture yazılımının hava triyagülasyonu aşamasındaki parametreler; "Adjustment constraints: Photo pos metadata + Control point" olarak ve "Final rigid registration: Control point" olarak ayarlanmıştır (Bentley, 2022). Üç farklı görüntü işleme yazılımı ile üretilen altı farklı SYM'nin kuşbakışı görünümü ve kullanılan YKN'lerin konumu Şekil 3'te gösterilmektedir. SYM'lerin görselleştirmesinde Global Mapper v23.1 yazılımı kullanılmıştır.

Çizelge 1. Farklı görüntü işleme yazılımları için SYM üretiminde kullanılan ayarlar.

Agisoft Metashape	ContextCapture	DJI Terra
<u>Align Settings</u> - Accuracy: High - Generic Preselection: Enable - Reference Preselection: Source <u>Advanced Settings</u> - Key point limit: 40,000 - Tie point limit: 4,000 - Apply mask to: None	<u>Aerotriangulation Settings</u> - Adjustment constraints: Photo pos metadata - Final rigid registration: Photo pos metadata - Poses and tie points: Compute - Optical parameters: Adjust main parameter <u>Advanced Settings</u> - Key points density: Normal - Pair selection mode: Default	<u>Aerotriangulation Settings</u> - Mapping Scenes: Normal - Computation Method: Standalone - Constrain with Image POS Data: Enable <u>Advanced Settings:</u> - Feature Point Density: High
<u>Markers</u> - Check Point: 21 - Control Point: 0 - Marker accuracy: 0.005	<u>Survey Points</u> - Check Point: 21 - Control Point: 0 - Horizontal accuracy: 0.01 - Vertical accuracy: 0.01	<u>GCP Management</u> - Check Point: 21 - Control Point: 0 - Horizontal accuracy: 0.005 - Vertical accuracy: 0.005
<u>Dense Cloud Settings</u> - Quality: High - Depth filtering: Mild - Calculate point color: Enable <u>DEM Settings</u> - Source data: Dense cloud - Interpolation: Enable - Point classes: All - Resolution: 0.047m	<u>DSM Settings</u> - Selection of matching pairs: Generic - Geometric precision: Extra - Hole-filling: Fill all holes - Color equalization mode: Blockwise - Geometry resolution limit: 0 m - Resolution: 0.047 m - Merge output parts: Enable	<u>2D Map Settings</u> - Resolution: High - Mapping Scenes: Urban - Computation Method: Standalone <u>Advanced Settings:</u> - Feature Point Density: High - Map Grid: Disable - Light Uniformity/Haze Reduction: Disable



Şekil 3. Farklı görüntü işleme yazılımları kullanılarak üretilen SYM'ler. İlk satır (a, b, c) doğrudan coğrafi referanslama, ikinci satır (d, e, f) ise dolaylı coğrafi referanslama yaklaşımı ile üretilen SYM'leri göstermektedir.

Şekil 3'te görülen SYM'ler incelendiğinde, Agisoft Metashape ile üretilen SYM'lerin ($_{AM}SYM$) diğerlerine göre daha az gürültülü olduğu görülmektedir. Özellikle bina çatılarında DJI Terra ile üretilen SYM'lerin ($_{DJIT}SYM$) oldukça gürültülü olduğu görülmektedir. Ayrıca $_{DJIT}SYM$ 'ler, diğerlerine göre ~ 5 hektar daha küçük bir alanı kapsamaktadır.

İHA görüntülerinden SYM üretiminde kullanılan görüntü işleme yazılımlarının işlem süreleri de birbirlerine göre farklılık göstermektedir. Yazılımların görüntü işleme süresi genellikle seyrek nokta bulutunun oluşturulması ve fotogrametrik ürünlerin (SYM, ortomozaik vb.) elde edilmesine için ayrı ayrı hesaplanmaktadır. Çizelge 2’de her üç yazılım için raporlanan işlem süreleri ve harcanan toplam süre gösterilmektedir.

Çizelge 2. Kullanılan yazılımlarının görüntü işleme süreleri.

Yazılım Paketi	Seyrek Nokta Bulutu (dak.)	Optimizasyon (dak.)	Yoğun Nokta Bulutu (dak.)	SYM üretimi (dak.)	Toplam Süre (dak.)
Agisoft Photoscan	18.3	0.3	179	4.1	201.7
ContextCapture	25.01	3.8	-	133	161.81
DJI Terra	9.8	1.6	-	22.2	33.6

Çizelge 2’de görülen işlem süreleri incelendiğinde DJI Terra’nın diğerlerine göre oldukça kısa sürede SYM üretimini gerçekleştirdiği görülmektedir. Ayrıca DJI Terra için hesaplanan toplam süre içerisinde, giriş piksel çözünürlüğüne eşit bir çözünürlükte (bu çalışma için 0.024 m) ortomozaik ve giriş piksel çözünürlüğünün yaklaşık beş katına eşit bir nokta aralığı (point spacing) değerine sahip (bu çalışma için 0.12 m) nokta bulutu üretmektedir. Bununla beraber, DJI Terra’nın mevcut sürümünde (v3.55) daha yoğun bir nokta bulutu üretilmemektedir. SYM üretimi için en uzun toplam işlem süresi ise Agisoft Metashape yazılımı için hesaplanmıştır.

2.3. Yüzey Modellerinin Doğruluk Değerlendirmeleri

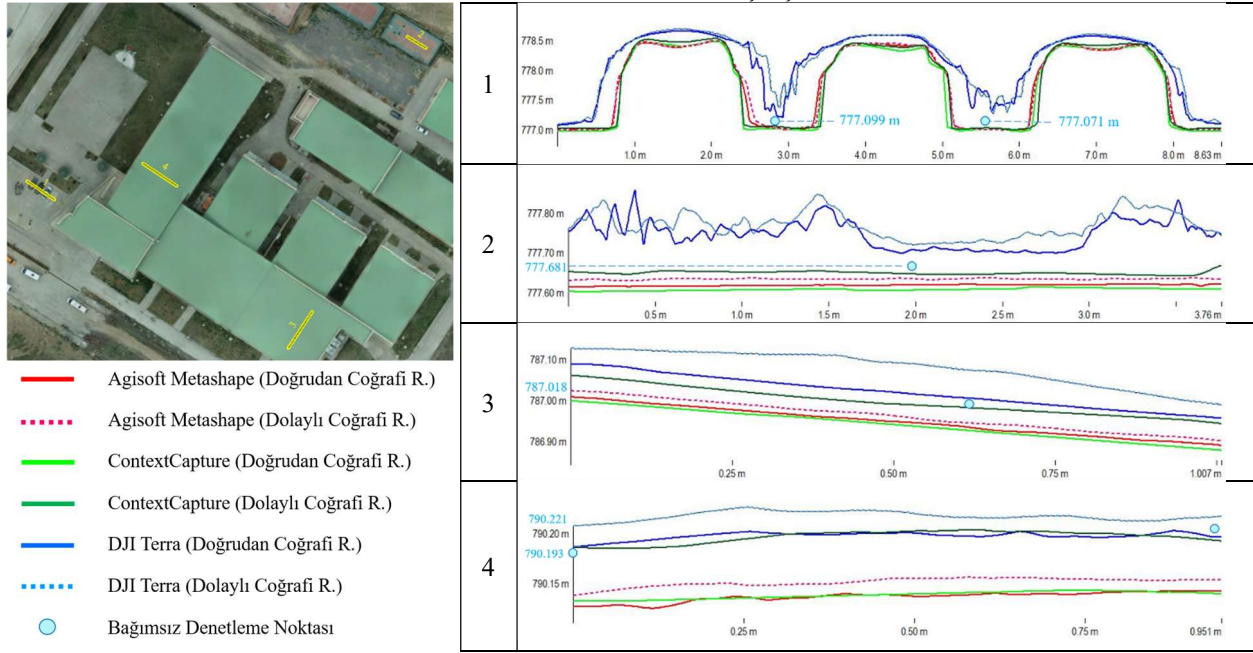
Çalışmada kapsamında üç farklı yazılım paketi ile elde edilen altı farklı SYM’nin arazi gerçeği ile uyumu farklı yaklaşımlar ile değerlendirilmiştir. Bunlardan ilki blok dengeleme sonuçlarının karşılaştırılmasıdır. Bu değerlendirmede kontrol noktası (KN) ve denetleme noktası (DN) olarak atanan YKN’ler için hesaplanan farkların karesel ortalama hataları (KOH) ile incelenmiştir. Üretilen SYM’ler için hesaplanan X, Y ve Z yönlerindeki hataların istatistikleri Çizelge 3’te gösterilmektedir.

Çizelge 3. Farklı görüntü işleme yazılımları ile elde edilen blok dengeleme sonuçları.

Yazılım	Nokta Sayısı KN / DN	KOH (m)			
		X KN / DN	Y KN / DN	Z KN / DN	Toplam KN / DN
Agisoft Photoscan	0 / 21	----- / 0.014	----- / 0.009	----- / 0.027	----- / 0.032
	8 / 13	0.014 / 0.009	0.010 / 0.007	0.017 / 0.012	0.024 / 0.016
Context Capture	0 / 21	----- / 0.018	----- / 0.018	----- / 0.053	----- / 0.059
	8 / 13	0.006 / 0.010	0.006 / 0.011	0.007 / 0.015	0.011 / 0.021
DJI Terra	0 / 21	----- / 0.012	----- / 0.008	----- / 0.025	----- / 0.029
	8 / 13	0.013 / 0.010	0.010 / 0.006	0.014 / 0.012	0.022 / 0.017

Çizelge 2’de görülen istatistikler incelendiğinde doğrudan coğrafi referanslama sonucunda DN’ler için hesaplanan en küçük KOH değerlerinin (± 0.029 m) DJI Terra ile elde edildiği görülmektedir. Dolaylı coğrafi referanslama sonucunda ise DN’ler için hesaplanan en küçük KOH değeri (± 0.016 m) Agisoft Metashape ile elde edilmiştir. ContextCapture yazılımında ise KN’lerdeki KOH değerlerinin tüm yönlerde (X, Y ve Z) diğerlerinden daha küçük olduğu görülmektedir.

Gerçekleştirilen ikinci değerlendirme SYM’ler arasındaki düşey farklara dayanmaktadır. Bu değerlendirmeyi gerçekleştirmeden önce üretilen tüm SYM’lerin birbirleri aynı yatay düzlemde hizalanmaları sağlanmıştır. SYM’lerin hizalanmaları için ise açık kaynak kodlu bir uygulama olan “arcPycor” kullanılmıştır. Hizalama aşamasında, blok dengeleme sonucunda en küçük KOH değerleri elde edilen $_{AM}$ SYM referans (master) yüzey olarak kabul edilmiş ve diğer SYM’ler hizalanan (slave) olarak belirlenmiştir. Nuth-Kääb algoritmasına dayanan arcPycor uygulamasının detayları için bkz (Wang ve Ye, 2021). Hizalama aşamasının ardından SYM’ler üzerinden alınan düşey profiller kullanılarak üretilen yüzey modellerinin uyumu değerlendirilmiştir. Bu aşamada, doğrudan ve dolaylı coğrafi referanslama yaklaşımları ile üretilen tüm SYM’ler birbirleri ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca düşey profillerin alındığı konumda GNSS alıcısı ile bağımsız denetleme noktaları (BDN) ölçülmüştür. Dolaylı coğrafi referanslama sonucunda üretilen SYM’ler üzerinden alınan profiller ve BDN’ler Şekil 4’te gösterilmektedir.



Şekil 4. Üretilen SYM'ler üzerinden alınan profiller. (1) otopark, (2) basketbol sahası, (3 ve 4) bina çatısı.

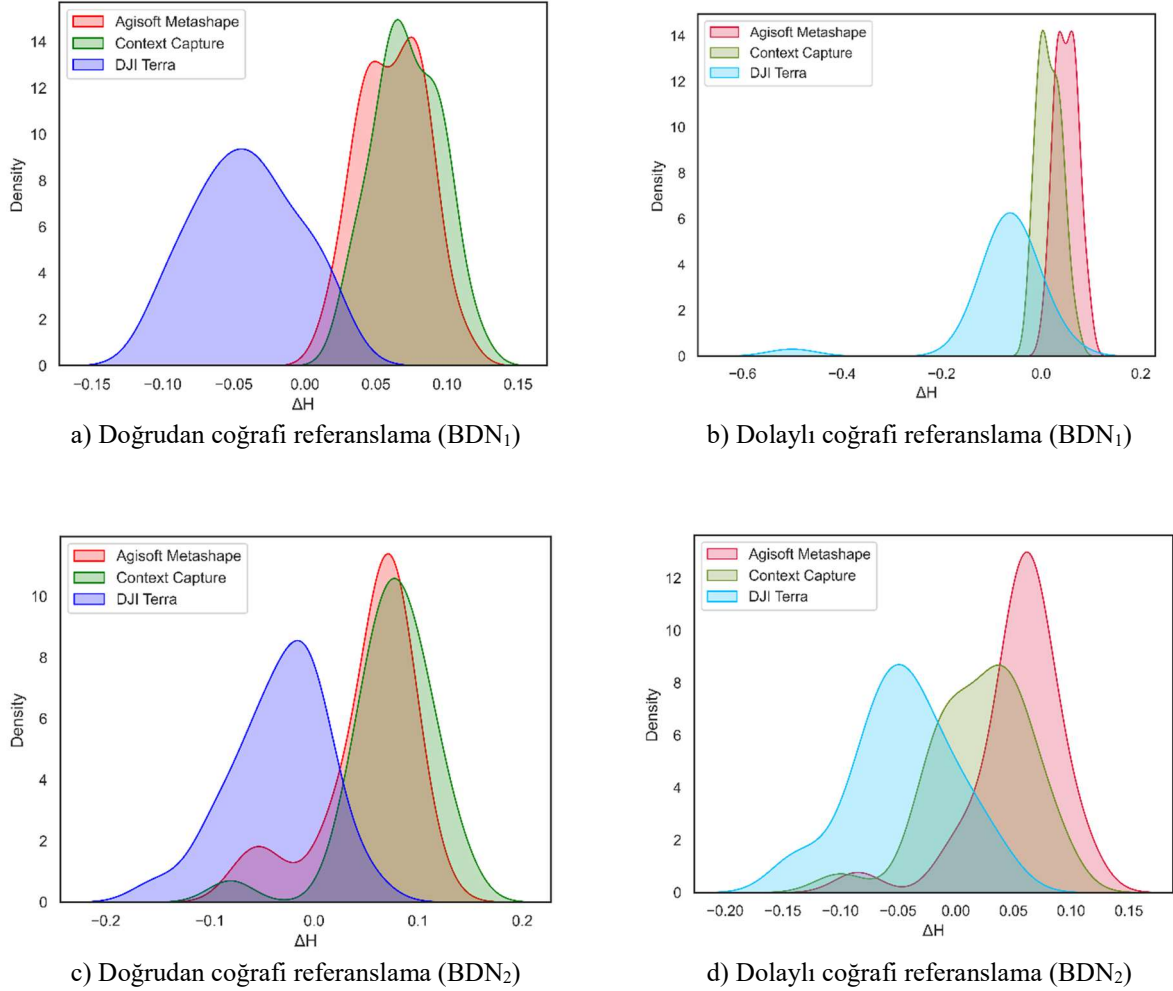
Şekil 4'te görülen düşey profiller incelendiğinde, genel olarak DJITSYM'lerin sistematik olarak daha yüksekte bir profil çizgisine sahip olduğu görülmektedir. Bulanla beraber, özellikle otopark alanından ve basketbol sahasından alınan profillerde, DJITSYM'lerde ciddi düşey sapmalar (gürültü) ortaya çıktığı görülmektedir. Bununla beraber bina çatılarından alınan profillerde, tekrarlayan doku olmasına karşın kullanılan her üç yazılım ile elde edilen sonuçların dar bir yükseklik aralığında (< 10 cm) tutarlı sonuçlar ürettiği görülmektedir. BDN'ler açısından değerlendirildiğinde, dolaylı coğrafi referanslama ile üretilen AMSYM ve CCSYM'lerin ölçülen BDN'lere daha yakın olduğu söylenebilir.

Uygulama kapsamında gerçekleştirilen son değerlendirmede, çalışma alanının çeşitli bölgelerinden ölçülen BDN'ler ile SYM'ler karşılaştırılmıştır. SYM'lerin arazi gerçeği ile uyumunu daha detaylı incelemek için BDN'ler iki farklı gruba ayrılmıştır. Çalışma alanının açık alanlarından (bahçe, bina çatısı vb.) ölçülen noktalar ilk gruptaki BDN'leri (BDN₁) oluşturur. İkinci grupta ölçülen noktalar (BDN₂) ise binaların zeminle birleşim hatları ve balkon gibi karakteristik bölgelerinden ölçülen noktalardır. BDN₁ grubundaki noktalar (26 nokta) GNSS alıcısı kullanılarak, BDN₂ grubundaki noktaları (26 nokta) ise Leica TC805 Total Station ile ölçülmüştür. BDN'lerin çalışma alanındaki dağılımları, niteliklerine göre farklı renklerde gruplanmış ve Şekil 5'te gösterilmiştir.



Şekil 5. Bağımsız denetleme noktalarının çalışma alanındaki dağılımları (sarı renkli noktalar BDN₁, turuncu renkli noktalar BDN₂).

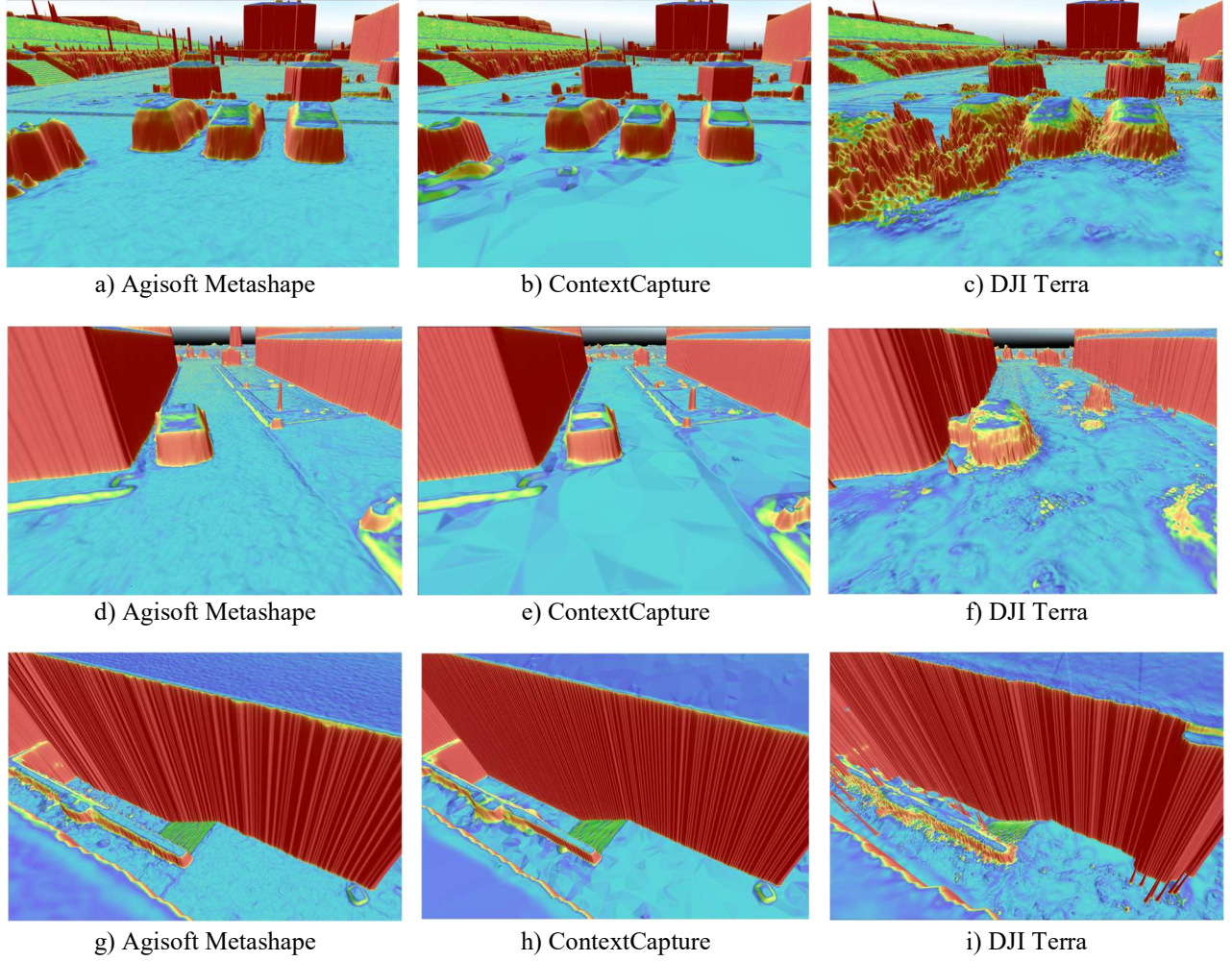
BDN'ler ile gerçekleştirilen karşılaştırmalar sonucunda elde edilen düşey hatalara (Δz) dayalı olarak oluşturulan, histogram grafikleri Şekil 6'da gösterilmiştir. Oluşturulan histogramlar coğrafi referanslama yaklaşımına ve BDN'lerin niteliğine göre gruplanmıştır. Kullanılan her bir yazılım ile elde edilen sonuçlar farklı renklerde gösterilmiştir.



Şekil 6. BDN'ler ile SYM'ler arasında gerçekleştirilen karşılaştırmalar sonucunda elde edilen düşey hataların histogram grafikleri

Şekil 6'da verilen grafikler incelendiğinde, doğrudan coğrafi referanslama ile açık alanlardan ölçülen BDN₁'ler için elde edilen yükseklik farklarının (a), kullanılan yazılımlara göre farklılık gösterdiği görülmektedir. Şekil 4'te verilen düşey profiller ile uyumlu olarak, DJITSYM'nin BDN₁'lere göre sistematik olarak (yaklaşık 5 cm) daha yüksekte olduğu görülmektedir. Bunun aksine, AMSYM ve CCSYM ise yaklaşık 5 cm daha alçakta bir yüzey modeli temsil etmektedir. Dolaylı coğrafi referanslama sonuçlarında (b) ise histogramların genişliğinin azalma eğilimi gösterdiği ve tepe noktalarının sıfıra yaklaştığı görülmektedir. Bu durum, arazi gerçeği ile SYM'ler arasındaki tutarlılığın arttığını işaret etmektedir. Bununla beraber DJITSYM'de yaklaşık 50 cm yüksekliğinde bir salınım olduğu görülmektedir. Bu durum bu SYM üzerinde oluşan gürültüler ile açıklanabilir (Şekil 4). BDN₂'ler için elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, doğrudan (c) ve (d) dolaylı coğrafi referanslama sonuçlarının birbirlerine benzer olduğu ve hata büyüklüklerinin BDN₁'e göre arttığı (± 20 cm) görülmektedir. Bu durum, üretilen SYM'lerin özellikle binaların bulunduğu bölgelerde yer gerçeği ile uyumunun azaldığını göstermektedir.

Karşılaştırılan yazılımların, yüzeyin karakteristik bölgelerinde gösterdiği yüzey modelleme performansını daha detaylı incelemek için hata büyüklüklerinin arttığı bölgelerin (otopark ve binaların zemin birleşim hatları) 3B görünümü Şekil 7'de görselleştirilmiştir. Görsellerin tamamı dolaylı coğrafi referanslama yaklaşımı ile üretilen SYM'ler üzerinden alınmıştır.



Şekil 7. Farklı görüntü işleme yazılımları kullanılarak üretilen SYM'lerin 3B görünüşleri. İlk sütun (a, d, g) $_{AM}$ SYM'yi, ikinci sütun (b, e, h) $_{CC}$ SYM'yi, üçüncü sütun (c, f, i) $_{DJT}$ SYM'yi temsil etmektedir.

Şekil 7'deki görseller incelendiğinde, genel olarak $_{AM}$ SYM ve $_{CC}$ SYM'nin benzer bir modelleme performansı gösterdiği ve özellikle mikro detayları başarılı bir şekilde temsil ettiği söylenebilir. $_{DJT}$ SYM'nin ise özellikle otopark (c) ve merdiven bulunan (i) bölgelerde oldukça gürültülü bir yüzey temsili sağladığı görülmektedir. Ayrıca bina-zemin birleşim hatlarının yumuşatıldığı (f) ve diğer SYM'lere göre bu alanlarda daha fazla yatay salınım ortaya çıktığı görülmektedir.

3. SONUÇLAR

Bu çalışmada üç farklı görüntü işleme yazılımının aynı İHA görüntüleri ile üretilen altı farklı yüzey modeli karşılaştırılıp ve söz konusu yazılım paketlerinin yüzey modellemedeki performansları kontrollü bir test süreci ile farklı açılardan ele alınmıştır. Oluşturulan yüzey modellerinin görsel değerlendirmesi sonucunda, Agisoft Metashape'in daha pürüzsüz modeller ürettiği ve ContextCapture ile tutarlı bir yüzey temsili sağladığı söylenebilir. Mevcut çalışmada DJI Terra ile üretilen yüzey modelinde ortaya çıkan gürültüler, yüzeyde gerçekte var olmayan dokular oluşmasına neden olmuştur. Bu durum, özellikle geometrik değişimleri belirlemek amacıyla gerçekleştirilen yer bilimleri araştırmalarında yanlış değerlendirmeler yapılmasına neden olabilir. SYM üretimi aşamasında ortaya çıktığı düşünülen bu problem üretici firmaya iletilmiştir. Diğer taraftan, DJI Terra görüntü işleme süresi ve ara yüzü bakımından değerlendirildiğinde, diğer yazılımlara göre avantaj sağlamaktadır.

Mevcut çalışmada elde edilen sonuçlar geometrik doğruluk bakımından değerlendirildiğinde, her üç yazılımında da YKN ile dolaylı coğrafi referanslama gerçekleştirmeksizin hassas sonuçlar ürettiği ($\pm 0.20m$ yükseklik hatası aralığında) söylenebilir. Ayrıca doğrudan coğrafi referanslamada DJI Terra'nın arazi gerçeğinin üzerinde (~ 5 cm), diğer yazılımların ise altında (~ 5 cm) modeller ürettiği görülmüştür. 8 YKN ile gerçekleştirilen dolaylı coğrafi referanslama sonucunda üretilen modellerin arazi gerçeğine yaklaştığı (düşey farkların büyüklüklerinin küçüldüğü) ancak sistematik hataların aynı yönde devam ettiği söylenebilir. Değerlendirilen yazılımlar, beklendiği üzere, görece düz ve açık alanlarda daha iyi bir yüzey temsili sağlamış, özellikle binaların zemin birleşim hatlarında ve karakteristik

M. Doğruluk ve İ. Yalçın: Düşük İrtifadan Alınan Hava Görüntülerinin İşlenmesinde Kullanılan Yazılımların Bina Modelleme Performanslarının Karşılaştırılması

bölgelerinde hata büyüklükleri artmıştır. Bağımsız denetleme noktaları ile gerçekleştirilen değerlendirme sonuçlarına göre, Agisoft Metashape ve ContextCapture yazılımlarının oldukça hassas sonuçlar ürettiği, DJI Terra'nın ise daha düşük bir performans gösterdiği söylenebilir. Mevcut çalışma, kullanılan görüntü işleme yazılımlarının yüzey modelleme performansını etkilediğini, bina yüksekliklerinin daha fazla olduğu bölgelerde ve farklı İHA uçuş modları ile yapılacak yeni çalışmaların gerekliliğini ortaya koyar.

4. TEŞEKKÜR

Yazarlar, 19793 nolu proje kapsamında sağlanan destek nedeniyle Hacettepe Üniversitesi'ne teşekkür eder.

KAYNAKLAR

Agisoft, M. 2022. Agisoft Metashape User Manual Professional Edition, Version 1.8. Retrieved 19 Eylül, 2022, from https://www.agisoft.com/pdf/metashape-pro_1_8_en.pdf.

Ali, H. H., Abed, F. M., 2019. The impact of UAV flight planning parameters on topographic mapping quality control. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* **518**(2): 18-22.

Bentley, C. 2022. ContextCapture Aerotriangulation (AT) settings. Retrieved 15 Kasım, 2022, from https://communities.bentley.com/products/3d_imaging_and_point_cloud_software/w/wiki/57599/contextcapture-aerotriangulation-at-settings.

Berra, E. F., Peppia, M. V., 2020. Advances and Challenges of UAV SFM MVS Photogrammetry and Remote Sensing: Short Review. *2020 IEEE Latin American GRSS & ISPRS Remote Sensing Conference (LAGIRS)*.

Cao, M., Li, S., Jia, W., Li, S., Liu, X., 2017. Robust bundle adjustment for large-scale structure from motion. *Multimedia Tools and Applications* **76**(21): 21843-21867.

Casella, V., Chiabrando, F., Franzini, M., Manzano, A. M., 2020. Accuracy Assessment of a UAV Block by Different Software Packages, Processing Schemes and Validation Strategies. *ISPRS International Journal of Geo-Information* **9**(3): 164.

DJI. 2022. Phantom 4 RTK Specifications. Retrieved 17 Ekim, 2022, from <https://www.dji.com/phantom-4-rtk/info>.

Eker, R., Alkan, E., Aydın, A., 2020. A comparative analysis of UAV-RTK and UAV-PPK methods in mapping different surface types. *European Journal of Forest Engineering* **7**(1): 12-25.

Gini, R., Pagliari, D., Passoni, D., Pinto, L., Sona, G., Dosso, P., 2013. UAV photogrammetry: Block triangulation comparisons. *Int. Arch. Photogram. Remote Sens. Spat. Inf. Sci* **1**: W2.

Hinge, L., Gundorph, J., Ujang, U., Azri, S., Anton, F., Rahman, A. A., 2019. Comparative analysis of 3D photogrammetry modeling software packages for drones survey. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* **42**: 95-100.

James, M. R., Robson, S., d'Oleire-Oltmanns, S., Niethammer, U., 2017. Optimising UAV topographic surveys processed with structure-from-motion: Ground control quality, quantity and bundle adjustment. *Geomorphology* **280**: 51-66.

Jiang, S., Jiang, C., Jiang, W., 2020. Efficient structure from motion for large-scale UAV images: A review and a comparison of SfM tools. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* **167**: 230-251.

Kaimaris, D., Patias, P., Sifnaiou, M., 2017. UAV and the comparison of image processing software. *International Journal of Intelligent Unmanned Systems*.

Li, Y., McKinney, N., 2022. A Comparison of Different Software Packages in sUAS-Based Land Feature Reconstruction. *sUAS Applications in Geography*. K. Konsoer, M. Leitner and Q. Lewis. Cham, Springer International Publishing: 95-121.

Liu, C., Akbar, A., Wu, H., 2018. Dynamic Model Constrained Optimal Flight Speed Determination of Surveying UAV Under Wind Condition. *2018 26th International Conference on Geoinformatics*.

- M. Doğruluk ve İ. Yalçın: Düşük İrtifadan Alınan Hava Görüntülerinin İşlenmesinde Kullanılan Yazılımların Bina Modelleme Performanslarının Karşılaştırılması
- Ma, Y., Chen, Y., Zhang, L., Zhang, Z., Wang, J., Yu, W., Xing, Z., Hu, Y., Liu, Z.,** 2020. Three-dimensional reconstruction of plants and a single building from UAV images. *International Journal of Precision Agricultural Aviation* 3(4).
- Mulakala, J.,** 2019. Measurement accuracy of the DJI Phantom 4 RTK & photogrammetry. *DroneDeploy, Published in Partnership with DJI*.
- Nex, F., Remondino, F.,** 2014. UAV for 3D mapping applications: a review. *Applied Geomatics* 6(1): 1-15.
- Peppas, M., Hall, J., Goodyear, J., Mills, J.,** 2019. Photogrammetric assessment and comparison of DJI Phantom 4 pro and phantom 4 RTK small unmanned aircraft systems. *ISPRS Geospatial Week 2019*.
- Przybilla, H.-J., Bäumer, M., Luhmann, T., Hastedt, H., Eilers, M.,** 2020. Interaction Between Direct Georeferencing, Control Point Configuration And Camera Self-Calibration For Rtk-Based Uav Photogrammetry. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*.
- Sefercik, U. G., Tanrikulu, F., Atalay, C.,** 2020. SfM tabanlı yeni nesil görüntü eşleştirme yazılımlarının fotogrametrik 3B modelleme potansiyellerinin karşılaştırması. *Türkiye Fotogrametri Dergisi* 2(2): 39-45.
- Sona, G., Pinto, L., Pagliari, D., Passoni, D., Gini, R.,** 2014. Experimental analysis of different software packages for orientation and digital surface modelling from UAV images. *Earth Science Informatics* 7(2): 97-107.
- Stott, E., Williams, R. D., Hoey, T. B.,** 2020. Ground control point distribution for accurate kilometre-scale topographic mapping using an RTK-GNSS unmanned aerial vehicle and SfM photogrammetry. *Drones* 4(3): 55.
- Suziedelyte Visockiene, J., Brucas, D., Ragauskas, U.,** 2014. Comparison of UAV images processing softwares. *Journal of Measurements in Engineering* 2(2): 111-121.
- Taddia, Y., González-García, L., Zambello, E., Pellegrinelli, A.,** 2020. Quality Assessment of Photogrammetric Models for Façade and Building Reconstruction Using DJI Phantom 4 RTK. *Remote Sensing* 12(19): 3144.
- Taddia, Y., Stecchi, F., Pellegrinelli, A.,** 2019. Using Dji Phantom 4 Rtk Drone for Topographic Mapping of Coastal Areas. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 4213: 625-630.
- Türk, T., Öcalan, T.,** 2020. PPK GNSS Sistemine Sahip İnsansız Hava Araçları İle Elde Edilen Fotogrametrik Ürünlerin Doğruluğunun Farklı Yaklaşımlarla İrdelenmesi. *Türkiye Fotogrametri Dergisi* 2(1): 22-28.
- Vacca, G., Furfaro, G., Dessi, A.,** 2018. The use of the UAV images for the building 3D model generation. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 42(4W8): 217-223.
- Wang, D., Shu, H.,** 2022. Accuracy Analysis of Three-Dimensional Modeling of a Multi-Level UAV without Control Points. *Buildings* 12(5): 592.
- Wang, Y.-z., Ye, Q.-h.,** 2021. arcPycor: an open-source automated GIS tool to co-register elevation datasets. *Journal of Mountain Science* 18(4): 923-931.
- Zeybek, M., Biçici, S.,** 2021. 3D Dense Reconstruction of Road Surface from UAV Images and Comparison of SfM Based Software Performance. *Turkish Journal of Remote Sensing and GIS* 2(2): 96-105.