

## SFM Tabanlı Yeni Nesil Görüntü Eşleştirme Yazılımlarının Fotogrametrik 3B Modelleme Potansiyellerinin Karşılaştırması

Umut G. Sefercik<sup>1</sup>, Feride Tanrikulu<sup>2</sup>, Can Atalay<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Gebze Teknik Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, Kocaeli, Türkiye

<sup>2</sup>Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Geomatik Mühendisliği ABD, Türkiye

<sup>3</sup>Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Geomatik Mühendisliği Bölümü, Zonguldak, Türkiye

### Anahtar Kelimeler

SFM  
VisualSFM  
Agisoft  
Pix4D  
Dijital Yüzey Modeli

### ÖZ

Lokal hareket işaretleri ile iki boyutlu görüntü dizilerinin birleşiminden üç boyutlu (3B) yapıları kestirebilmek için geliştirilmiş Hareketten Yapı (Structure From Motion, SFM) fotogrametrik görüntü eşleştirme algoritması, yeni nesil ve yaygın olarak kullanılan bulut tabanlı görüntü eşleştirme yazılımlarının temel prensibidir. Bu yazılımlar ortak prensipte çalışmasına rağmen, kullanıcı tarafından müdahale edilemeyen gömülü parametrelerine bağlı olarak 3B sonuç ürünleri farklı özellikler ve distorsiyonlar içermektedir. Bu çalışmada, Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi Çaycuma Kampüsü'nde insansız hava aracı (İHA) ile elde edilen yüksek çözünürlüklü hava fotoğraflarından VisualSFM, Agisoft ve Pix4D SFM tabanlı yeni nesil görüntü eşleme yazılımları kullanılarak eş grid aralıklı 3B dijital yüzey modelleri (DYM) üretilmiştir. Üretilen DYM'ler kapsamlı bir şekilde değerlendirilmiş ve Agisoft DYM'si referans olarak kullanılarak DYM'ler görsel ve istatistiksel yaklaşımlarla karşılaştırılmıştır. Standart sapma ve normalize medyan mutlak sapma temelinde elde edilen sonuçlar, analiz edilen SFM tabanlı yazılımların artılarını ve eksilerini açıkça ortaya koymuştur.

## Photogrammetric 3D Modelling Potential Comparison of SFM-Based New Generation Image Matching Software

### Keywords

SFM  
VisualSFM  
Agisoft  
Pix4D  
Digital Surface Model

### ABSTRACT

Structure from motion (SFM) matching algorithm is the basic principle of new generation and widely used image matching software. Although these software work in common principle, their final products may contain different characteristics and distortions depending on their buried parameters. In the literature, there is lack of publications which compare the three dimensional modelling performance of SFM based new generation software. Accordingly, our research group decided to carry out a study that could be a reference for upcoming researches. In this study, using VisualSFM, Agisoft and Pix4D SFM based image matching software, 3D digital surface models (DSM) were generated from unmanned air vehicle (UAV) high resolution aerial photos in a Campus of Zonguldak Bulent Ecevit University. Generated DSMs were comprehensively evaluated and compared by visual and statistical approaches utilizing the Agisoft DSM as the reference. The results clearly demonstrated the pros and cons of each analyzed SFM-based software.

## 1. GİRİŞ

Lokal hareket işaretleri ile iki boyutlu görüntü dizilerinin birleşiminden üç boyutlu (3B) yapıları kestirebilmek için geliştirilmiş Hareketten Yapı (Structure From Motion, SFM) fotogrametrik görüntü eşleştirme algoritması, yeni nesil ve yaygın olarak kullanılan bulut tabanlı görüntü eşleştirme yazılımlarının temel prensibidir (Hartley ve Zisserman 2003, Carrivick ve ark. 2016). Bu yazılımlar ortak prensipte çalışmasına rağmen, kullanıcı tarafından müdahale edilemeyen gömülü parametrelerine bağlı olarak 3B sonuç ürünleri farklı özellikler ve distorsiyonlar içermektedir.

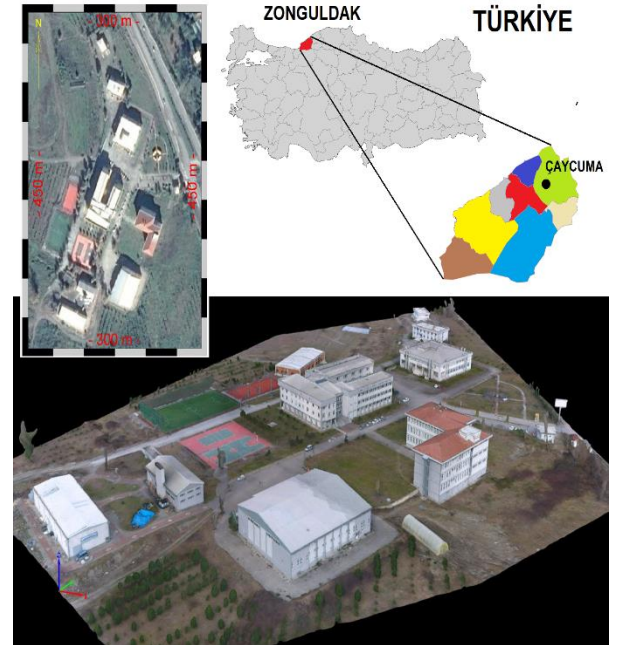
Optik İHA teknolojisinde, geleneksel fotogrametri ve Hava Kaynaklı Lazer Taramaya (ALS) ( $\geq 800$  m) kıyasla çok daha düşük uçuş irtifalarının ( $\leq 300$  m) avantajı ile çok yüksek çözünürlüklü (VHR) hava fotoğrafları elde edilebilmektedir (Yang ve ark. 2016; Zongjian ve ark. 2012). Örneğin, ekibimizce yapılmış bir saha testinde, 12 Mega Piksel (MP) çözünürlüklü kameraya sahip bir optik İHA ile 200 m irtifadan yaklaşık 6 cm yer örnekleme aralıklı hava fotoğrafı elde edilebildiği tespit edilmiştir. Bu durum, İHA'nın geleneksel fotogrametri ve ALS'ye göre özellikle geniş olmayan çalışma alanları için büyük bir avantajdır. Buna ek olarak, İHA nokta bulutları CMOS sensör entegreli çok bantlı dijital kameralarla orijinal renklerinde elde edilir ki bu durum da ALS'ye göre büyük bir avantajdır (Rosnell ve Honkavaara 2012; Swatantran ve ark. 2016). İHA'nın uygulamalarda çok daha fazla tercih edilmesinin bir nedeni de maliyeti göz önüne alındığında daha ulaşılabilir oluşudur. Nokta bulutlarının İHA teknolojisine adaptasyonu ile çok sayıda nokta bulutu tabanlı ticari yazılım paketi piyasaya sürülmüş ve kullanıcılar tarafından büyük ilgi görmüştür (Alidoost ve Arefi 2017). Bu yazılım paketleri, hedef alanlarda yüksek çözünürlüklü ortogörüntü ve dijital yüzey modeli (DYM) üretimi için İHA stereo veri işleme destekler ve temel prensipleri "Hareketten Yapı (SFM)" eşleştirme algoritmasıdır. Tüm İHA kullanıcıları veri işleme için mevcut yazılım paketlerinden birini tercih eder, ancak daha iyi bir DYM oluşturmak için hangi yazılım paketinden faydalanmaları gerektiği günümüzde bu alandaki en büyük soru işaretlerinden biridir. Yapılan literatür araştırmasında, nokta bulutu tabanlı ticari yazılımlarla uygulamaların henüz bir kaç yıldır yapılıyor oluşu nedeniyle birbirleriyle kıyaslamalarını içeren çalışmaların mevcut olmadığı görülmüştür (Birdal ve ark. 2017; Jiang ve Jiang 2018; Cömert ve ark. 2019).

Bu çalışmada, en çok tercih edilen SFM tabanlı görüntü eşleştirme yazılım paketlerinden üçü olan Agisoft, Pix4d ve Visual SFM'nin (VSFM) sonuç DYM'leri ve bunların birbirleri ile tutarlılığı analiz edilmiştir. Analizlerde, farklı arazi sınıflarını içeren Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi'nin Çaycuma yerleşkesi çalışma alanı olarak kullanılmıştır. Uygulamalarda ayrıca, çalışma alanının yarısı tek

demet (bundle) diğer yarısı ise çift demet uçuşla fotoğraflanarak, incelenen yazılımların sonuç DYM'lerinin hava fotoğrafı sayısı ile olan ilişkileride analiz edilmiştir. Çalışma, amaçlar doğrultusunda şu şekilde düzenlenmiştir: Çalışma alanı ve kullanılan materyeller bölüm 2'de verilmiştir. Hava fotoğraflarının alımı, karşılıklı ve mutlak yönelme, DYM üretim ve değerlendirme metodolojileri bölüm 3'te sunulmuştur. Bölüm 4'te bulgular sergilenmiş ve sonuçlar bölümü ile çalışma sonlandırılmıştır.

## 2. ÇALIŞMA ALANI VE MATERYALLER

Çalışma alanı, Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi'nin üçüncü büyük kampüsü olan Çaycuma yerleşkesidir. Alan, bina, bitki örtüsü ve açık alan olarak farklı arazi sınıflarına sahiptir. Topoğrafyanın büyük kısmı düzdür ve güneyi kısmen eğimlidir. Şekil 1, çalışma alanının yerini ve bu çalışmada elde edilen 3B ortomozaiğini göstermektedir. İHA uçuşlarında, DJI Phantom IV insansız hava aracı ve SATLAB SL600 GNSS alıcısı kullanılmıştır. Tablo 1'de, kullanılan İHA ve GNSS alıcısının özet bilgileri sunulmuştur.



Şekil 1. Çalışma alanının yeri ve İHA uçuşlarından elde edilen örnek bir hava fotoğrafı

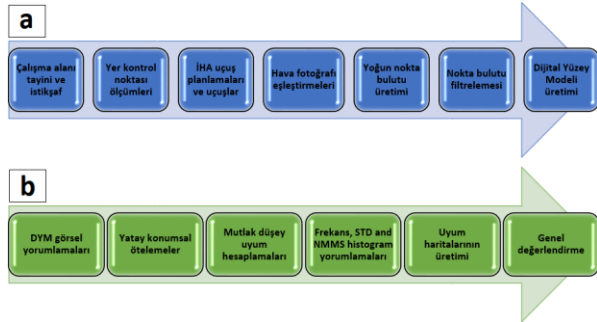
## 3. METODOLOJİ

Çalışmanın metodolojisi Şekil 2'de gösterildiği gibi iki ana kısımda ele alınmıştır. İlk bölüm başlangıçtan DYM üretimine kadar geçen işlem adımlarını kapsarken, ikinci bölüm üretilen DYM'lerin görsel ve istatistiksel uyum değerlendirme adımlarını kapsamaktadır. İlk bölümde, hava fotoğraflarının eşleştirilmesi ve yoğun nokta bulutlarının oluşturulması için Agisoft, Pix4d ve VSFM yazılım paketleri kullanılmıştır. Ayrıca yoğun nokta bulutlarının incelenmesi ve filtrelenmesi için Microstation TerraScan modülü ve

DYM üretimi için LISA ve Surfer yazılımları kullanılmıştır. İkinci bölümde, oluşturulan DYM'lerin yatay kayıklıklarının belirlenerek ötelenmesi ve karşılaştırmaya dayalı uyum değerlendirilmesi için Hannover Leibniz Üniversitesi Demet Blok Dengeleme (BLUH) DYM yazılımı kullanılmıştır. Görsel yorumlama ve uyum haritası üretimi için yine LISA ve Surfer yazılımlarından faydalanılmıştır.

**Tablo 1.** Kullanılan materyellerin özellikleri

DJI Phantom IV	
Kamera	4K, HD, 1080p, 1/2.3", efektif piksel 12.4 MP
Gimbal	3-eksenli (pitch, roll, yaw)
Uçuş süresi	Tek uçuşta maksimum 28 dakika
Ağırlık	1380 gr
Hız	Maksimum 20 m/s
Rüzgar hızına mukavemeti	Maksimum 10 m/s
Operasyonel ısı	0°- 40°
GNSS modülü	GPS + GLONASS dual
Konum doğruluğu	0.1 m Düşey, 0.3 m Yatay (görüş); 0.5 m Düşey, 1.5 m Yatay (GPS)
SATLAB SL 600 GNSS	
GNSS teknolojisi	6G ; GPS, GLONASS, GALILEO, BeiDou, SBAS, QZSS
Operasyon sistemi	Linux
Çalışma modları	Statik, VRS RTK, UHF RTK, tüm ölçüm modları
Dahili bellek	1 GB
RTK Konum doğruluğu	0.8 cm H, 1.5 cm V with 99.9% confidence level
Pil	Dual; 24 h statik, 18 h RTK baz, 15 h RTK gezici
TUSAGA-Aktif	Mevcut



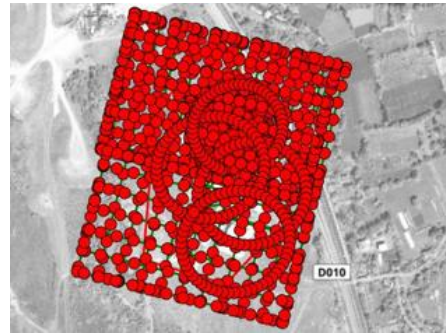
**Şekil 2.** Çalışmanın metodolojisi; (a) oluşturma adımları, (b) değerlendirme adımları

DJI Phantom IV İHA ile elde edilen hava fotoğraflarının doğru eşleştirilmesi için, 17 yer kontrol noktası (YKN) tesis edilmiş ve arazide ölçülmüştür. YKN'ler statik GNSS yöntemi ile ölçülmüş ve  $\geq 1$  cm yatay ve düşey mutlak konum doğruluğuna sahiptirler. Arazide konumlandırılmış YKN'lerin dağılımı ve örnek GNSS ölçümü Şekil 3'te gösterilmektedir.



**Şekil 3.** YKN dağılımı ve bir örnek GNSS ölçümü

Uçuş planlamasında, çalışma alanının herhangi bir boşluk olmadan tam olarak stereo kapsanması temel hedef olarak belirlenmiştir. Buna göre, alanın tümü tek demet (Kuzey-Güney, Doğu-Batı veya ilgili alanın tek yönlü uçuşması) uçuş tekniğiyle fotoğraflanmış ve binalar ayrıca dairesel olarak uçulmuştur. Daha fazla fotoğrafın sonuç DYM'ler üzerindeki etkisini test etmek için, tamamı tek demet fotoğraflama ile algılanmış alanın yarısında uçuş şeritleri kaydırılarak çift demet (tek yönlü uçuşa dik olacak şekilde ilgi alanının tekrardan uçuşması) algılama yapılmıştır. Uçuşlarda, en az %80 boyuna ve %40 enine bindirme oranları ve dairesel uçuşlarda bina yan yüzeylerinin daha iyi algılanması için %5-10 eğik çekim tercih edilmiştir. Şekil 4, uçuş planı uyarınca elde edilen hava fotoğraflarının merkez noktalarını göstermektedir.



**Şekil 4.** Kullanılan İHA ve hava fotoğrafı merkez noktaları

Elde edilen hava fotoğrafları Agisoft, Pix4d ve VSFM yazılım paketleriyle ayrı ayrı eşleştirilmiş ve yüksek çözünürlüklü nokta bulutları elde edilmiştir. Pix4d nokta bulutunda, tek demet uçuşundan üretilen nokta bulutunun özellikle Güney-Batı kısmında gürültülü bölümler olduğu görülmüştür. Tespit edilen gürültülü bölümler, nokta bulutunun düşey profilinde fence tekniği ile filtrelenmiştir. Şekil 5, Pix4d nokta bulutunun gürültülü ve filtrelenmiş versiyonunu göstermektedir. Çalışma alanının

DYM'leri Agisoft, Pix4d ve VSFM nokta bulutlarından ayrı ayrı üretilmiştir. Orijinal grid aralığı 0.25 m olarak tercih edilmiştir. Vektör raster dönüşümü için, her piksel için maksimum Z kullanılmasını sağlamak amacıyla data metrikleri (data metrics) enterpolasyon yöntemi kullanılmıştır. YKN'lere göre doğruluk ve elde edilen nokta bulutları ve DYM'lerin görsel yorumlaması ile çalışma alanı için referans model olarak Agisoft DYM tercih edilmiş ve uyum analizlerinde Pix4d ve VSFM DYM'leri Agisoft DYM ile karşılaştırılmıştır.



**Şekil 5.** Gürültülü (a) ve filtrelenmiş (b) Pix4d nokta bulutu verisi

DYM'lerin değerlendirilmesinde, bazı ön düzeltmeler gerekmektedir. İlk olarak, DYM'lerin koordinat sistemi, yatay ve düşey datumu aynı olmalıdır. Agisoft, Pix4d ve VSFM'de İHA fotoğraflarının eşleştirilmesi için aynı YKN'lerin kullanılması nedeniyle, koordinat sistemi ve datum aynıdır. Ortak koordinat sistemi Evrensel Enlem Merkatoru (UTM), yatay datum Dünya Jeodezik Sistemi 1984 (WGS84) ve düşey datum ortometriktir. Başka bir ön düzeltme, doğru düşey doğruluk ve uyum değerlendirmesinin ana kuralı olan karşılaştırılan DYM'lerin % 100 yatay örtüşümüdür. Agisoft, Pix4d ve VSFM DYM'leri arasındaki yatay kayıklıklar, alan tabanlı çapraz korelasyon ile ortadan kaldırılmıştır (Baltsavias ve ark. 2008; Alobeid ve ark. 2010). Tablo 2, X ve Y yönlerinde tespit edilen ve giderilen kayıklıkların standart sapmalarını göstermektedir.

**Tablo 2.** Tespit edilen ve giderilen yatay kayıklıklar

Referans DYM	Karşılaştırılan DYM	STD <sub>x</sub> (cm)	STD <sub>y</sub> (cm)
Agisoft (0.25m)	Pix4d (0.25m)	0.1	- 6.8
	VSFM (0.25m)	- 0.5	- 6.4

Düşey uyum analizinde, piksel tabanlı yükseklik farklılıklarının standart sapması (STD<sub>Z</sub>) ve normalize medyan mutlak sapması (NMMS) kullanılmıştır. NMMS özellikle majör yükseklik farkları için robust bir hesaplama metriğidir ancak büyük bir veri setindeki minör aykırı değerlerin belirlenmesinde STD<sub>Z</sub> kadar hassas değildir (Hellerstein 2008). Karşılaştırılan DYM'ler arasında normal yükseklik farkı olması durumunda NMSS ya STD<sub>Z</sub> ile aynıdır ya da daha küçüktür. NMSS'in STD<sub>Z</sub>'den büyük olması ise yükseklik farklılıklarının anormal dağılımına işaret eder ki bu durumda üretilen model ciddi boyutta hata ya da distorsiyon içeriyor demektir ve mutlaka tekrar detaylı şekilde kontrol edilmeli, hata kaynakları bulunmalı ve hatalar

giderilmelidir. Şayet hatalar giderilemiyorsa DYM dikkatli şekilde tüm parametreler gözden geçirilerek yeniden üretilmelidir.

NMSS, tek değişkenli kantitatif veri serisinin değişkenliğinin robust bir ölçüsü olan medyan mutlak sapmanın (MMS) bir türevidir. STD<sub>Z</sub>, MMS ve NMSS denklemleri eşitlik 1, 2 ve 3'te sunulmaktadır.

$$STD_Z = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta Z_i - \mu)^2}{n-1}} \quad (1)$$

$$MMS = \bar{X}_i [|\Delta Z_i - \bar{X}_j (\Delta Z_j)|] \quad (2)$$

$$NMMS = 1.4826 \times (MMS) \quad (3)$$

Eşitliklerde,  $\mu$  referans DYM ve karşılaştırılan DYM arasındaki piksel bazlı yükseklik farklarının aritmetik ortalamasıdır.  $\bar{X}_j$ ,  $(\Delta Z_1, \Delta Z_2, \dots, \Delta Z_n)$  piksel bazında yükseklik farkları tek değişkenli veri kümesinin medyanıdır.  $\bar{X}_i$  ise,  $\bar{X}_j$ 'den olan yükseklik farklarının medyanıdır. Uyum analizi, bir eğim faktörü kullanılarak eğimli ve eğimsiz alanlar için ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir. Analizde, eğimli alanların ayrılması için eşik değeri olarak eğim  $< \tan^{-1} 0.1$  ( $\sim 6^\circ$ ) kullanılmıştır.

Agisoft ve karşılaştırılan DYM'ler arasındaki piksel bazlı yükseklik farklarından üretilen uyum haritaları, eşitlik 4 kullanılarak oluşturulmuştur.

$$Uyum\ haritası = DYM_{AGISOFT} - DYM_{Karşılaştırılan} \quad (4)$$

#### 4. BULGULAR

Agisoft, Pix4d ve VSFM'den elde edilen nokta bulutları Şekil 6'da gösterilmektedir. Açıkça görülebileceği gibi, Agisoft nokta bulutu diğerlerine kıyasla gerçek görünür yüzeye daha yakındır. Pix4d ve VSFM nokta bulutlarında, yer yer dikkat çekici boşluklar mevcuttur. Bu durum, çalışma alanında elde edilen hava fotoğraflarında eşleşme performanslarının Agisoft kadar yüksek olmadığı anlamına gelmektedir. Bir başka bulgu da eşleşmeden sonra elde edilen nokta sayısıdır. Agisoft ve Pix4d benzer sayıda noktaya sahip olmasına rağmen, VSFM aynı sayıda hava fotoğrafı ile bunların onda biri kadar nokta ile sınırlı kalmıştır.

Diğer bir çıkarım, tek ve çift demet uçuş yapılan bölgelerde nokta bulutu yapısındaki ciddi farklılık olarak göze çarpmaktadır. Agisoft nokta bulutunda herhangi bir farklılık göze çarpmazken Pix4d ve VSFM nokta bulutlarının güney bölümlerinde birtakım boşluklar göze çarpmaktadır.

Agisoft, Pix4d ve VSFM nokta bulutlarından üretilen DYM'ler Şekil 7'de gösterilmektedir. Nokta bulutu sonuçlarına paralel olarak Agisoft DYM'nin görsel performansı Pix4d ve VSFM'den daha üstündür. DSM üretiminde daha az sayıda nokta bulunduğundan, VSFM DSM'nin tanımlama potansiyeli diğerlerinden daha düşük olarak ortaya çıkmıştır. Agisoft ile karşılaştırıldığında, hem Pix4d hem de VSFM DYM, özellikle tek demet uçuştan gelen alanda nokta bulutlarına paralel olarak gürültüye sahiptir (lütfen Şekil 4'ü inceleyiniz). Çift demet uçuşlu üst yarıda, Pix4d ve

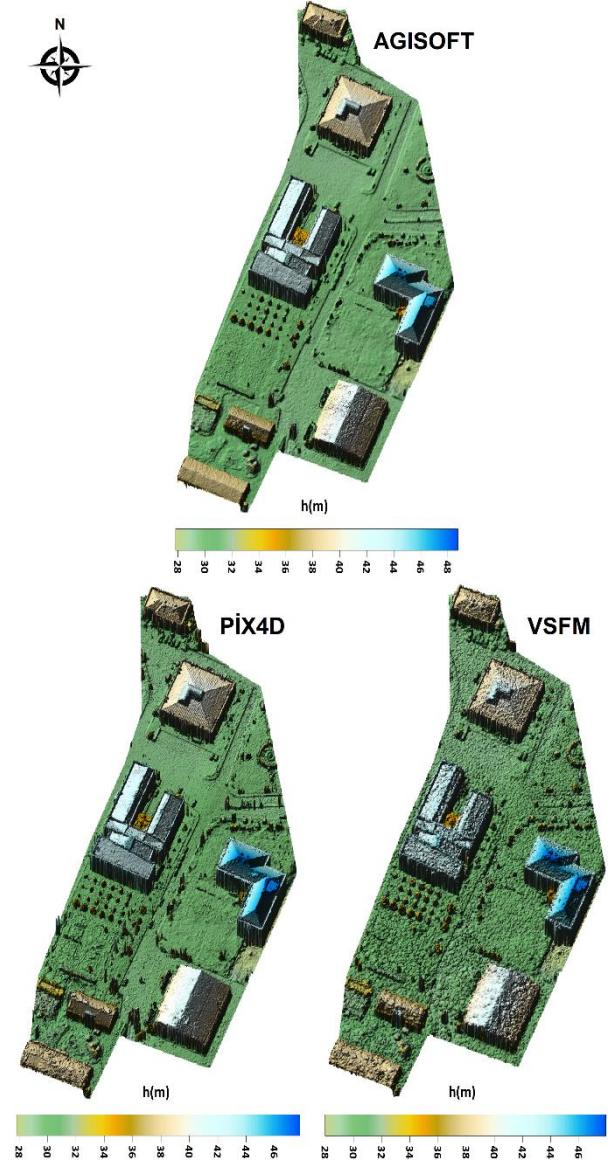
VSFM DYM'lerin tanımlama potansiyeli alt yarıdan daha yüksektir. Bu, Agisoft ile karşılaştırıldığında Pix4d ve VSFM'de daha yüksek 3B modelleme performansı için daha fazla sayıda hava fotoğrafına ihtiyaç duyulduğu anlamına gelmektedir.



Şekil 6. Agisoft, Pix4d ve VSFM nokta bulutları

Tablo 3'te, referans Agisoft DYM ile Pix4d ve VSFM DYM'leri arasındaki mutlak düşey uyum, STDz ve NMSS olarak sunulmuştur. Tabloda, arazi eğiminin ve çıplak topoğrafya üzerindeki ani yükseklik değişimlerine sahip bina, bitki örtüsü gibi nesnelerin sonuçlar üzerindeki etkisinin anlaşılabilmesi için tüm alan ve eğimsiz alanların sonuçları ayrı ayrı verilmiştir. Analizlerde, doğru yorumlama yapabilmek için yükseklik farkı bir metreden fazla olan pikseller kaba nokta olarak tasvir edilmiş ve hariç tutulmuştur. Pix4d ve VSFM için hariç tutulan noktaların yüzdesi çok benzer ve sırasıyla % 0.91 ve % 0.89'dur. Analizlerde, referans ve karşılaştırılan DYM'ler arasındaki sistematik hata hesaplanmış ve düşey öteleme ile giderilerek ortadan kaldırılmıştır. Her iki DYM'nin NMSS sonuçları STDz'lerinin yaklaşık üçte biri ve  $\pm 15$  cm

seviyesindedir, bu da majör seviyedeki detaylar için DYM kalitelerinin referansa yakın olduğu anlamına gelmektedir. Ancak, STDz sonuçları minör yükseklik farkları cephesinde mutlak düşey uyumun daha düşük seyrettiğini işaret etmektedir. STDz sonuçları tüm alan için yaklaşık  $\pm 40$  cm seviyesinde iken eğimsiz alanlarda, her iki DYM için de yaklaşık  $\pm 25$  cm dolayındadır.

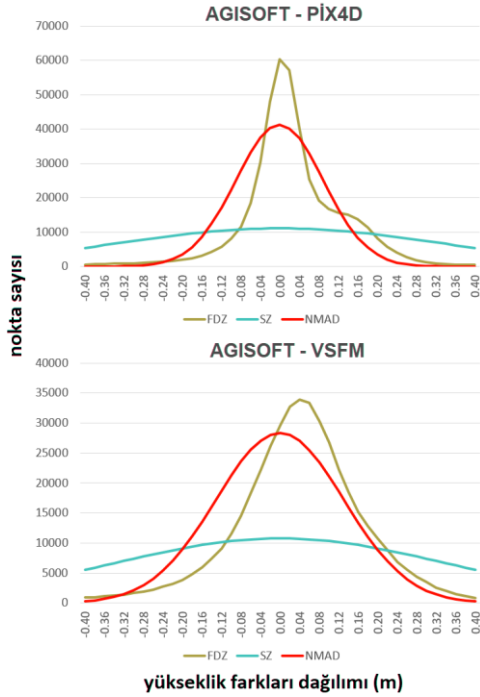


Şekil 7. Agisoft, Pix4d ve VSFM nokta bulutlarından elde edilen DYM'ler

Tablo 3. Agisoft referansı ile Pix4d ve VSFM DYM'lerinin mutlak düşey uyumu ( $\alpha$ = eğim)

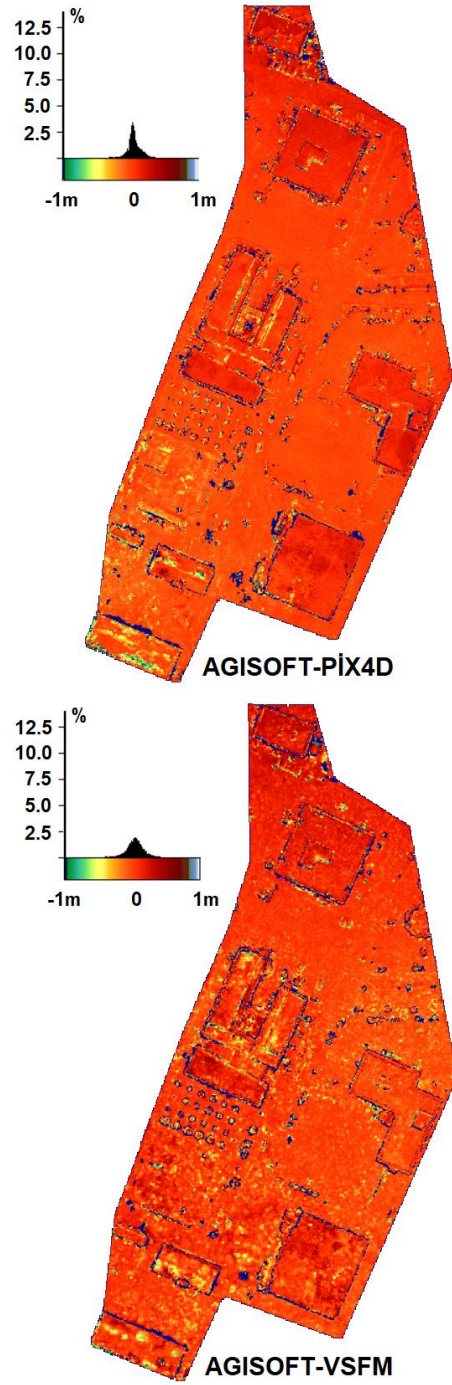
Ref. DYM	Karşılaştırılan DYM	Arazi sınıfı	Sistematik hata (cm)	STDz (m)	NMSS (m)	Hariç nokta (%)
Agisoft (0.25m)	Pix4d (0.25 m)	Tüm alan	- 4.2	$0.40+0.12 \times \tan(\alpha)$	$0.12+0.16 \times \tan(\alpha)$	0.91
		Eğimsiz alan		0.23	0.05	
	VSFM (0.25 m)	Tüm alan	- 18.4	$0.39+0.11 \times \tan(\alpha)$	$0.15+0.15 \times \tan(\alpha)$	0.89
		Eğimsiz alan		0.25	0.10	

Şekil 8, referans ve karşılaştırılan DYM'ler arasındaki yükseklik farklarının frekans, STD<sub>z</sub> ve NMSS cinsinden dağılım histogramını göstermektedir. Agisoft-Pix4d analizinde, NMSS, STD<sub>z</sub> 'ye nazaran frekans ile daha iyi bir eşleşmeye sahiptir ve yükseklik farklarının modu, tam bir tutarlılığı gösteren sıfır civarındadır. Bununla birlikte, yaklaşık 0.16 m'de, anormal bir dağılımı gösteren ikinci bir mod bulunmaktadır. Bu ikinci mod, tek demet uçuşundan üretilen alanın etkisi ile oluşmuştur. Öte yandan, Agisoft-VSFM grafiğinin yapısı tamamen farklıdır. Yükseklik farklarının modları frekans, STD<sub>z</sub> ve NMSS için değişmektedir. STD<sub>z</sub> ve NMSS zirvelerinin sıfır olduğu yerlerde, frekans 0.06 m civarındadır. Çizgilerin yapıları normal bir dağılımı göstermektedir ve Pix4d'ye nazaran daha simetriktir. Ancak, dağılımın genişliği, Pix4d'ye göre referans DYM ile daha düşük mutlak düşey uyum olduğunu ortaya koymaktadır.



Şekil 8. Frekans, STD<sub>z</sub> ve NMSS olarak yükseklik farklılıklarının dağılım histogramı

Şekil 9, ± 1 m yükseklik farkı ölçekli Agisoft DYM referansı ile Pix4d ve VSFM DYM'lerin düşey uyum haritalarını göstermektedir. Turuncu renkli alanlar neredeyse tam tutarlı parçaları, koyu maviler ise en düşük tutarlı alanları temsil etmektedir. Uyum haritaları, Pix4d DYM'nin referans Agisoft DYM ile daha uyumlu olduğunu göstermektedir. Özellikle bina çatılarında ve bitki örtüsünde VSFM DYM'nin uyumu Pix4d'den daha düşüktür. Her iki DYM için de, en düşük uyumlu bölümler enterpolasyon etkisi ile doğruluk kaybının maksimum olduğu nesne kenarlarıdır.



Şekil 9. Pix4d ve VSFM DSM'leri uyum haritaları

## 5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, SFM-tabanlı yeni nesil görüntü eşleştirme yazılımları Agisoft, Pix4d ve VSFM'in 3B sonuç ürün performansları değerlendirilmiştir. Seçilen uygun bir çalışma alanında, DJI Phantom IV optik İHA ile 12 megapiksel çözünürlüklü hava fotoğrafları alınmış ve incelenen yazılımlar ile yüksek çözünürlüklü nokta bulutları elde edilmiştir. Agisoft ve Pix4d benzer sayıda noktaya sahipken, VSFM'in aynı sayıda hava fotoğrafı ile onda bir sayıda nokta ürettiği tespit edilmiştir. Pix4d ve VSFM nokta bulutlarında, tek demet uçuşlu bölümlerde bazı dikkate değer boşluklar oluşmuştur. YKN sonuçları ve görsel bulut değerlendirmeleri sonucunda Agisoft

verisi DYM uyum analizleri için referans olarak seçilmiştir.

DYM üretimleri 25 cm orijinal grid aralığında yapılmış ve daha az sayıda nokta kullanıldığından, VSFM DYM'nin topoğrafik tasvir potansiyelinin diğerlerinden daha zayıf olduğu görülmüştür. Mutlak düşey uyum sonuçları, Pix4d ve VSFM DYM'lerin Agisoft DYM ile benzer mutlak düşey uyuma sahip olduğunu göstermiştir. Her iki DYM'nin NMMS sonuçları STDz'den daha iyidir, bu da genel detaylar için kalitelerin Agisoft'a çok yakın olduğu anlamına gelmektedir. Ancak STDz sonuçları minör yükseklik farklılıklarının yoğun olarak bulunduğu işaretler. Sonuçlar incelendiğinde, Pix4d DYM'nin Agisoft ile daha uyumlu olduğu ortaya çıkmıştır. Özellikle bina çatılarında ve bitki örtüsünde VSFM DYM'nin uyumu Pix4d'den daha düşüktür. En düşük uyum bölümleri ise her iki DYM için de enterpolasyon etkisi ile doğruluk kaybının maksimum olduğu nesne köşeleridir.

Genel olarak, görsel ve istatistiksel sonuçlar belirlenen çalışma alanı karakteristiklerinde, Pix4d nokta bulutları ile üretilen DYM'nin referans Agisoft DYM ile daha uyumlu olduğunu ve VSFM DYM'nin performansının Pix4d ve Agisoft'tan daha düşük olduğunu kanıtlamıştır. Ancak elde edilen sonuçların Agisoft DYM referanslığında olduğu unutulmamalıdır. Gelecek çalışmalarda, yersel lazer tarama gibi bir bağımsız referans veri ışığında elde edilebilecek karşılaştırma sonuçları çok daha net yorumlamalar yapılmasını sağlayacaktır.

## TEŞEKKÜR

Bu çalışmayı bilimsel araştırma projesi kapsamında desteklemesinden dolayı Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi'ne teşekkürlerimizi sunarız.

## KAYNAKÇA

- Alidoost, F. and H. Arefi. 2017. Comparison Of Uas-Based Photogrammetry Software For 3d Point Cloud Generation: A Survey Over A Historical Site. Pp. 55-61 in ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. 4. Copernicus GmbH.
- Alobeid, A., Jacobsen, K., Heipke, C., 2010. Comparison of Matching Algorithms for DSM generation in urban areas from IKONOS imagery. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 76(9):1041-1050.
- Baltsavias, E., Gruen, A., Eisenbeiss, H., Zhang, L., Waser, T., 2008. High-quality image matching

and automated generation of 3D tree models. *International Journal of Remote Sensing* 29(5):1243-1259.

- Birdal, A. C., Avdan, U., & Türk, T. (2017). Estimating tree heights with images from an unmanned aerial vehicle. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 8(2), 1144-1156. 10.1080/19475705.2017.1300608
- Carrivick, J. L., Smith, M. W., Quincey, D. J. (2016). *Structure from Motion in the Geosciences*. Wiley-Blackwell, 208 sayfa. ISBN 978-1-118-89584-9
- Comert, R., Avdan, U., Gorum, T., & Nefeslioglu, H. A. (2019). Mapping of shallow landslides with object-based image analysis from unmanned aerial vehicle data. *Engineering Geology*, 260(February), 105264/j.enggeo.2019.105264
- Jiang, S., & Jiang, W. (2018). Efficient SfM for Oblique UAV Images: From Match Pair Selection to Geometrical Verification. *Remote Sensing*, 10(8), 1246. 10.3390/rs10081246
- Hartley, R. ve Zisserman, A. (2003). *Multiple View Geometry in Computer Vision*. Cambridge University Press. ISBN 978-0-521-54051-3.
- Hellerstein, J. M., 2008. Quantitative Data Cleaning for Large Databases. Technical Report Presented at United Nations Economic Commission for Europe (UNECE), p. 42.
- Rosnell, T., Honkavaara, E., 2012. Point cloud generation from aerial image data acquired by a quadcopter type micro unmanned aerial vehicle and a digital still camera. *Sensors* 12:453-480.
- Swatantran, A., Tang, H., Barrett, T., 2016. Rapid, high-resolution forest structure and terrain mapping over large areas using single photon lidar. *Sci Rep* 6:1-12.
- Teizer, J., Kim, C., Bosché, F., 2005. Real-time 3D Modelling for Accelerated and Safer Construction using Emerging Technology. 539-543
- Yang, Ying, Zongjian Lin, and Fengzhu Liu. 2016. Stable Imaging and Accuracy Issues of Low-Altitude Unmanned Aerial Vehicle Photogrammetry Systems. *Remote Sensing* 8(4):316.
- Zongjian, Lin, Su Guozhong, and Xie Feifei. 2012. Uav-Borne Low Altitude Photogrammetry System. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XXXIX-B1. Melbourne (Australia).

