

KAMERA OPTİMİZASYONUNUN POLİGONAL İHA UÇUŞLARINDAN 3B MODELLEME KALİTESİNE ETKİSİ

Umut Güneş SEFERCİK¹, İlyas AYDIN², Mertcan NAZAR³, Taşkın KAVZOĞLU⁴

¹Prof. Dr., Gebze Teknik Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 41400, Gebze, Kocaeli, Türkiye, sefercik@gtu.edu.tr

²Arş. Gör., Gebze Teknik Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 41400, Gebze, Kocaeli, Türkiye, ilyasaydin@gtu.edu.tr

³Arş. Gör., Gebze Teknik Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 41400, Gebze, Kocaeli, Türkiye, mnazar@gtu.edu.tr

⁴Prof. Dr., Gebze Teknik Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 41400, Gebze, Kocaeli, Türkiye, kavzoglu@gtu.edu.tr

ÖZET

İnsansız hava aracı (İHA) teknolojisi sonuç ürünlerinin en doğru geometride elde edilebilmesi ve ileri üretimlerde kullanılabilmesi için fotogrametrik işlem adımlarında pek çok parametrenin ve standartın doğru uygulanması gerekmektedir. Bu standartların başında gelenlerden biri de görüntü alımı yapan kameraların optimizasyonudur. İHA fotogrametrisinde kamera optimizasyonu, yoğun nokta bulutuna dayalı uygulanabilir asli bir model oluşturmanın ön aşaması olan ve karşılıklı yöneltme sonrası ilk olarak üretilen seyrek nokta bulutundaki az sayıda noktaya göre İHA kamerasının yeniden hizalanmasıdır. Bu işlem, geometrik yöneltme doğruluğunu artırmak için paket yazılımlarda kullanıcılar tarafından sıkça tercih edilmekte ve etkisi mutlak yöneltme sonuçlarına göre yorumlanmaktadır. Bu çalışmada, poligonal uçuşlarla elde edilen RGB İHA hava fotoğraflarından üretilen üç boyutlu (3B) modellerin kaliteleri üzerinde kamera optimizasyonunun etkileri araştırılmıştır. Araştırmada, 120 m irtifada yapılan DJI Phantom IV V2 RGB İHA uçuşlarından elde edilen veriler kullanılarak kamera optimizasyonu uygulanmış ve uygulanmamış şekilde ayrı ayrı dijital yüzey modelleri (DYM) üretilmiş ve içerdikleri tüm piksellerin karşılaştırılmasına olanak veren model bazlı yaklaşımlar ile 3B uyum analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizler, açık, bina ve orman sınıflarında ayrı ayrı yapılmış, ek olarak arazi eğiminin sonuçlar üzerindeki etkisi de irdelenmiştir. İHA dijital kameraları, iç yöneltme parametrelerinin doğrudan hava fotoğrafı metaverilerinden çözülmesine olanak verdiği için optimizasyonda müdahale gerektirmemektedir. Optimizasyonda kullanılan iç yöneltme dışındaki parametrelerin kullanımında ise kullanıcı çok dikkatli olmalıdır. Bu araştırmada, program tarafından sunulan tüm parametrelerin eş zamanlı değerlendirilmesinin model üzerinde ki etkilerinin test edilmesi amacıyla kamera optimizasyonunda varsayılan olarak sunulan iç yöneltme ve kamera distorsiyon katsayılarına ek radyal distorsiyon (k_4) ve eğiklik (b_1, b_2) parametreleri de işlem sürecine dahil edilmiştir. Analizler sonucunda, tercih edilen değişkenlere de bağlı olarak, optimizasyonun mutlak yöneltme hassasiyetini arttırırken model doğruluğu üzerinde bilimsel araştırma ihtiyacı doğuracak boyutta negatif etkileri olduğu görülmüştür. Bu bozucu etkiler göz önünde bulundurulduğunda, kullanıcı tarafından tüm işlem adımlarında kontrollü bir ilerleyiş veya optimizasyonun gerekliliği hususunda analiz ihtiyacının zorunluluğu görsel ve istatistiki verilerle ortaya konulmuştur.

Anahtar Sözcükler: Dijital Yüzey Modeli, İnsansız hava aracı, Kamera optimizasyonu, SfM, Uyum analizi

ABSTRACT

IMPACT OF CAMERA CALIBRATION ON POLYGONAL UAV FLIGHTS-BASED 3D MODELLING QUALITY

Many parameters and standards must be applied correctly in photogrammetric process steps to obtain the final products of the unmanned aerial vehicle (UAV) technology in the most accurate geometry and to be used in advanced production. One of the foremost of these standards is the optimization of the cameras that take images. Camera optimization in UAV photogrammetry is the realignment of the UAV camera concerning a small number of points in the sparse point cloud first produced after reciprocal orientation, which is the preliminary stage of creating a viable substantive model based on the dense point cloud. This process is frequently preferred by users in packaged software to increase geometric orientation accuracy and its effect is interpreted according to absolute orientation results. This study investigated the effects of camera optimization on the quality of three-dimensional (3D) models produced from RGB UAV aerial photographs obtained with polygonal flights. In the research, using the data obtained from DJI Phantom IV Pro V2 RGB UAV flights at 120 m altitude, digital surface models (DYM) were produced separately with and without camera optimization, and 3D compatibility analyzes were carried out with model-based approaches that allow comparison of all the pixels they contain. Analyzes were made separately for open land, building, and forest classes, and the effect of land slope on the results was also examined. UAV digital cameras do not require intervention in optimization as they allow interior orientation parameters to be resolved directly from aerial photo metadata. The user should be very careful in the use of parameters other than the interior orientation parameters used in the optimization. In this research, to test the effects of simultaneous evaluation of all parameters presented by the program on the model, radial distortion (k_4) and skew (b_1, b_2) parameters, in addition to the internal orientation and camera distortion coefficients offered by default in-camera optimization, were also included in the processing process. As a result of the analyzes, it was seen that while optimization increases the absolute orientation precision, depending on the preferred variables, it has negative effects on the model accuracy that will necessitate scientific research. Considering these disruptive effects, the necessity of analysis in terms of the necessity of controlled progress or optimization in all process steps by the user has been demonstrated by visual and statistical data.

Keywords: Digital Surface Model, Camera optimization, Fit analysis, SfM, Unmanned aerial vehicle

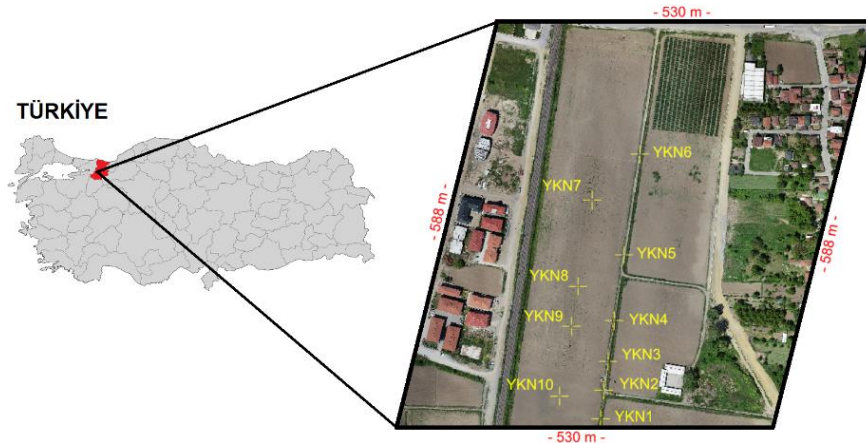
1. GİRİŞ

İnsansız hava aracı (İHA) teknolojisi, geleneksel hava ve uzay kaynaklı uzaktan algılama sistemlerine kıyasla çok daha düşük uçuş irtifalarından sağladığı yüksek mekansal çözünürlüklü, düşük maliyetli ve periyodik veriler sayesinde son dönemde başta haritacılık disiplini olmak üzere yeryüzü topoğrafyası ve üzerindeki doğal ve yapay nesneler ile ilişkili çalışan ormancılıktan dijital tarıma, arkeolojiden mimarlığa kadar pek çok bilim dalında etkin şekilde kullanılır hale gelmiştir (Awais vd., 2022). Kamera donanımlı optik İHA'lar sundukları çok bantlı hava fotoğraflarının görsel yorumlama ve kullanım kolaylığı ve düşük maliyetli ekipmanları nedeniyle lazer, yapay açıklıklı radar ya da termal algılama kabiliyetli İHA'lara nazaran kullanıcılar tarafından daha fazla tercih edilmektedir. Optik İHA'lar yalnızca, kullandıkları GNSS donanımlarının engellenebildiği bölgelerde (askeri alanlar vb.) otonom navigasyon konusunda sıkıntı yaşamakta olup bu durum kullanıcıların ilgili bölgelere yakın uçuş gerçekleştirmemesi ile aşılabilmektedir (Lu vd., 2018). Kullanıcılar, optik İHA'lardan elde ettikleri hava fotoğraflarını genel olarak hareketten yapı oluşturma (SfM) tabanlı paket yazılımlarda kolay ve kullanıcı dostu arayüzler yardımıyla rahatça işleyerek üç boyutlu (3B) modeller ve ortomozaikler elde edebilmektedir (Sefercik vd., 2020). Fakat tüm uzaktan algılama sistemlerinde olduğu gibi İHA teknolojilerinden üretilen ürünlerin görsel kalitesi de çoğu zaman yanıltıcı olabilmektedir. Sonuç ürünlerin kullanılabilirliği ancak geometrik konum doğruluklarının istenilen seviyelerde olması ile mümkündür. Optik mekanizmalarla donatılmış kameraların doğasında bulunan çeşitli mercek kusurları, sonuç ürünlerin kalitesini doğrudan etkilediğinden kameraların kalibrasyon gerekliliği ortaya çıkmıştır (Yanagi ve Chikatsu, 2015). Ek olarak, kalibrasyon işleminin iyileştirilebilmesi için optimizasyon algoritmaları geliştirilmiştir (Han vd., 2016; Tinkham ve Swayze, 2021).

Bu araştırma kapsamında, İHA verilerinin fotogrametrik yöntem ile işlenmesinde en sık tercih edilen SfM tabanlı yazılımlarından biri olan Agisoft Metashape kullanılarak gerçekleştirilen kamera optimizasyonunun poligonal İHA uçuşları ile 3B modelleme performansı üzerinde yarattığı etki incelenmiştir. Optimizasyon işlemine, yazılımda varsayılan olarak sunulan ve literatürde yaygın olarak kullanılan iç yönelme (f , c_x , c_y), radyal distorsiyon (k_1 , k_2 , k_3) ve teğetsel distorsiyon (p_1 , p_2) parametrelerine ek olarak ek radyal distorsiyon katsayısı (k_4) ve eğiklik (b_1 , b_2) parametreleri de dahil edilmiştir (Perez vd., 2011). Bu sayede, tüm değişkenlerin etkisinin gözlemlenmesi amaçlanmıştır. Nokta bulutu ve 3B model bazlı görsel ve istatistiksel analizler gerçekleştirilerek, kamera optimizasyonu-model doğruluğu ilişkisi hakkında çıkarımlarda bulunulmuştur.

2. ÇALIŞMA ALANI ve MATERYALLER

Araştırmada kullanılan çalışma sahası Sakarya il merkezinde Sakarya Mısır Enstitüsüne ait bir arazi olup yaklaşık 0.3 km² genişliğindedir. Alanda, açık, bina ve orman olmak üzere üç arazi sınıfı mevcuttur ve elipsoidal yükseklikler 75-100 m arasında değişmektedir. **Şekil 1**, çalışma sahasının yüksek çözünürlüklü ortomozağini ve Türkiye üzerindeki konumunu göstermektedir. Çalışma sahasında gerçekleştirilen istikşaf sonucunda İHA hava fotoğraflarının mutlak yönelmesinde kullanılmak üzere polikarbon malzemeden üretilmiş 10 adet yer kontrol noktası (YKN) tesis edilmiştir (**Şekil 1**). YKN'lerin 3B koordinatları ağ-RTK (Real Time Kinematik) yöntemi ile CHC i80 GNSS alıcısı kullanılarak belirlenmiştir. Uçuş, DJI Phantom IV Pro V2 İHA ve Pix4D Capture yazılımları kullanılarak 120 m irtifadan Kuzey-Güney yönlü poligonal olarak gerçekleştirilmiştir. Hava fotoğrafları, %80 boyuna ve %60 enine bindirme oranlarında 90° (nadir) bakış açısında elde edilmiştir. 20 MP mekansal çözünürlük ve 8.8 mm odak uzaklığına sahip Sony Exmor kamera ile elde edilen hava fotoğraflarının yer örnekleme aralığı (YÖA) 3.23 cm olmuştur. **Çizelge 1**'de uçuşun gerçekleştirildiği İHA ve YKN'lerin ölçümünde kullanılan GNSS alıcısının özellikleri yer almaktadır.



Şekil 1. Çalışma sahası ve kullanılan YKN'lerin dağılımı

Çizelge 1. Kullanılan İHA ve GNSS alıcısının özellikleri

DJI Phantom IV Pro V2.0 İHA	
Özellik	Değer
Kamera	4K, HD, 1080p, 1", efektif piksel çözünürlüğü 20 MP
Gimbal	3-axis (pitch, roll, yaw)
Uçuş süresi	Maks. 30 dakika
Ağırlık	1375 g
Hız	Maks. 20 m/s in S-mod
Rüzgar gücü dayanımı	Maks. 10 m/s
İşletilebilir ısı	0° to 40°C
Dış ortam konumlama modülü	GPS/GLONASS dual
Doğruluk seviyesi	± 0.1 m D, ± 0.5 m Y (Görüş) ± 0.3 m D, ± 1.5 m Y (GPS)
CHC-i80 GNSS alıcısı	
GNSS teknolojisi	GPS, GLONASS, GALILEO, BeiDou, SBAS, NavIC
Operasyon sistemi	Linux
Çalışma modları	Static, VRS RTK, UHF RTK, tüm haritalama modları
Dahili bellek	32 GB
RTK GNSS konumlama doğruluğu	± 0.8 cm yatay, ± 1.5 cm düşey konum
Batarya kapasitesi	Dual; 10 saat statik, 9 saat hücresel alım, 6 saat UHF alım/gönderim
Ağ-RTK	Mevcut

3. METODOLOJİ

Araştırmanın metodolojisi, İHA hava fotoğraflarından kamera optimizasyonu uygulanmadan ve uygulanarak iki farklı dijital yüzey modeli (DYM) üretimi ve üretilen DYM'lerin istatistiksel ve diferansiyel DYM (DIFDYM) üretimi temelinde, görsel uyum analizlerinin gerçekleştirilmesi olmak üzere iki ana kısımdan meydana gelmektedir. İHA verilerinin değerlendirilebilmesi için standart fotogrametrik işlem adımları kullanılmıştır. Bu işlemler, günümüzde klasik fotogrametrideki matematiksel kuramları temel alan fotogrametrik yazılımların sağladığı avantajlarla otomatik hale gelmiştir. Fotogrametrik çalışmalarda görüntülerin işlenme süreci, genel olarak temel bir iş akış çerçevesi içerisinde ilerlemektedir. Öncelikli olarak temin edilen görüntülerden, bindirmeli alan içerisinde kalan ortak bağlama noktaları yardımıyla karşılıklı yöneltme işlemi gerçekleştirilmektedir. Karşılıklı yöneltme ile eş doğrusallık ve eş düzlemsellik koşullarının sağlanmasıyla üretilen seyrek nokta bulutu verisi sonrasında, görüntüler üzerinde yer alan YKN'ler ile de mutlak yöneltme işlemi tamamlanmaktadır. Kullanılan İHA, RTK donanımına sahip ise mutlak yöneltme işlemi için YKN kullanımına gerek duyulmamaktadır. Hava fotoğraflarının geometrik doğrulaması sonrasında yoğun nokta bulutu üretimi gerçekleştirilmektedir. Bu çalışmada, hava fotoğraflarının geometrik doğrulaması ve yoğun nokta bulutu üretimi SfM tabanlı olarak çalışan Agisoft Metashape Professional yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Kamera optimizasyonu, SfM tabanlı İHA hava fotoğrafı işleme yazılımlarında yoğun nokta bulutu üretiminden önce opsiyonel olarak sunulmakta olan önemli bir işlem adımıdır. Optimizasyon, iç yöneltmesi ve karşılıklı yöneltmesi gerçekleştirilmiş görüntülerden oluşturulan modelin, yöneltme ve distorsiyon parametrelerinde iyileştirme gerçekleştirilerek, model doğruluğunun artırılması amacıyla uygulanmaktadır. İşlemin, ışın demetleri ile blok dengeleme sonucunda ortaya çıkan iç yöneltme (f , c_x , c_y) ve distorsiyon (k_1 , k_2 , k_3 , k_4 , p_1 , p_2) değişkenlerini optimize ederek, bağlantı noktalarının konum doğruluğunun daha hassas bir şekilde belirlenmesinde etkili olduğu varsayılmaktadır (Han vd., 2016; Tinkham ve Swayze, 2021). Bu düzeltme aşamasında, görüntü merkezlerinin GNSS ve YKN koordinatları ve bağlantı noktalarının konum bilgileri temel veri kaynağı olarak kullanılmaktadır. Agisoft Metashape yazılımı, optimizasyon işlemi sürecinde, distorsiyon katsayılarının hesabında eşitlik 1'de belirtilen distorsiyon modelini baz alarak çalışmaktadır (Brown, 1971).

$$x = X/Z \quad y = Y/Z$$

$$x' = x(1 + K_1r^2 + K_2r^4 + K_3r^6 + K_4r^8) + (P_1(r^2 + 2x^2) + 2P_2xy)$$

$$y' = x(1 + K_1r^2 + K_2r^4 + K_3r^6 + K_4r^8) + (P_2(r^2 + 2y^2) + 2P_1xy)$$

(1)

X, Y, Z: Görüntü koordinatları

Agisoft Metashape yazılımında gerçekleştirilen optimizasyon işlemine, yazılımda varsayılan olarak sunulan ve literatürde yaygın olarak kullanılan iç yönelme (f, cx, cy), radyal distorsiyon (k1, k2, k3) ve teğetsel distorsiyon (p1, p2) parametrelerine ek olarak radyal distorsiyon katsayısı (k4) ve eğiklik (b1, b2) parametreleri de dahil edilerek tüm değişkenlerin etkisinin gözlemlenmesi sağlanmıştır. Çalışma hedefleri doğrultusunda, optimizasyon işlemi uygulanmış ve uygulanmamış şekilde elde edilmiş yoğun nokta bulutlarından DYM üretimleri Surfer yazılımında gerçekleştirilmiştir. Yoğun nokta bulutlarından üretilen DYM'lerin kalitesini etkileyen en önemli faktörlerden biri gürültüdür. İHA verilerinde, özellikle yoğun vejetasyon alanları ve sulak arazilerde hava fotoğraflarının eşleşmesinde bağlama noktalarının daha düşük korelasyonlu oluşu, yoğun nokta bulutlarında gürültülere neden olmaktadır. DYM üretimi öncesinde, yoğun nokta bulutları Microstation yazılımı içerisindeki Terrasolid modülü kullanılarak filtrelenmiştir. DYM'ler 0.25 m orijinal grid aralığında her piksel için maksimum Z kullanılması sağlamak amacıyla veri metrikleri (data metrics) enterpolasyon yöntemi kullanılarak üretilmiştir.



Şekil 2. Model üretimleri ve değerlendirme aşamaları

Optimizasyon uygulanmış ve uygulanmamış yoğun nokta bulutlarından ayrı ayrı üretilen DYM'lerin uyum değerlendirmeleri BLUH (Bundle Block Adjustment Leibniz University Hannover) yazılımı kullanılarak model bazlı olarak yapılmış ve bu sayede her iki modelin tüm pikselleri analiz edilmiştir. İki farklı DYM'nin model bazlı analizinde bazı ön koşulların sağlanması gerekmektedir. Bu doğrultuda, öncelikle DYM'lerin yatay ve düşey datumları tutarlı olmalıdır. Çalışmada, her iki DYM de UTM projeksiyonu WGS84 datumunda ve ortometrik yükseklik baz alınarak üretilmiştir. DYM'ler arasındaki yatay konum uyumu standart sapma (SS) hesabı ile tespit edilmiş ve planimetrik farklardan kaynaklı kayıklıklar (ofset) alan bazlı çarpaz korelasyon temelinde uygulanan yatay ötelemeler ile giderilmiş ve tam yatay örtüşme sağlanmıştır. Bu işlemin nedeni, doğru düşey uyum analizi gerçekleştirmek için %100 yatay uyumun sağlanması koşuludur. Düşey uyum analizleri, eşitlik (2) ve (3)'te yer aldığı şekilde SS'e ek olarak normalize medyan mutlak sapmaların (NMMS) hesaplanması temelinde gerçekleştirilmiştir. NMMS, medyan mutlak sapmanın bir türevi olup referans kabul edilen ve analiz edilen DYM arasındaki yükseklik ilişkisinde majör uyumsuzlukların tespitinde son derece etkili sonuçlar ortaya koymaktadır. Ancak minör yükseklik değişimlerinde SS kadar hassasiyet göstermemektedir (Hellerstein, 2008). Eğer yükseklik farkları histogram grafiğinde tek bir tepeye sahip ise yani normal dağılım gösteriyorsa, SS ve NMMS aynı veya yakın değerler ifade edecektir (Höhle ve Höhle, 2009). Orman ve meskun alanlarda ani yükseklik farkı değişimlerinden, büyük değerlerde uyumsuzluklar ortaya çıkmaktadır. Bu gibi durumlarda NMMS normal dağılımı SS normal dağılımına göre yükseklik değişimlerinin frekansına daha yakınsak eğilim gösterecektir.

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

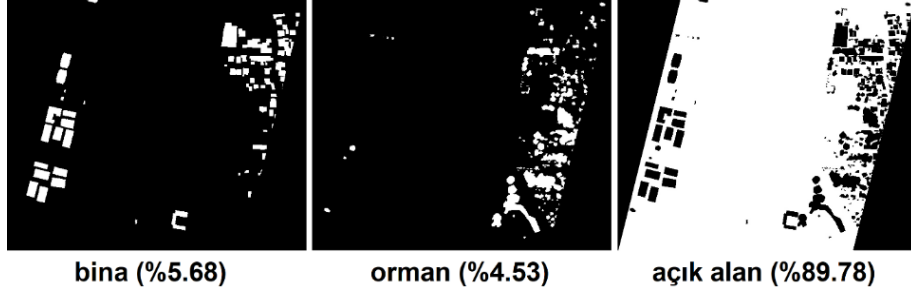
$$NMMS_Z = 1.482615 \times \tilde{x}_i \left[\left| \Delta Z_i - \tilde{x}_j(\Delta Z_j) \right| \right] \quad (3)$$

Eşitlik 1'de n değeri referans veri ile analiz edilen DYM arasındaki incelenen yükseklik farklarının piksel bazlı sayısını temsil ederken, ΔZ_i iki model arasındaki yükseklik farkını, μ yükseklik farklarının ortalamasını temsil etmektedir. Eşitlik 2'de $\tilde{x}_j$ yükseklik farklarının tek değişkenli veri setinin medyanını, $\tilde{x}_i$, $\tilde{x}_j$ 'den olan yükseklik farklarının mutlak değerlerinin medyanını ifade etmektedir. Arazi topoğrafyasındaki değişimin, SS ve NMMS üzerindeki etkisinin incelenmesi amacıyla eşitlik 4 ve 5'te eğim değişkeni faktörü de hesaplamalara dahil edilmiştir.

$$SS_{eğim} = SS_Z + b \times \tan(\alpha) \quad (4)$$

$$NMMS_{eğim} = NMMS_Z + b \times \tan(\alpha) \quad (5)$$

Eşitlik 4 ve 5'te α , arazi eğimini ve b , eğim çarpan faktörünü ifade etmektedir. Bu faktör, arazi eğim grupları göz önünde bulundurularak hesaplanmaktadır. Böylelikle, her farklı arazi kullanımı sınıfı için eğim değişkenine göre de SS ve NMMS hesaplanabilmektedir. Çalışma alanında analizler açık alan, bina ve orman olmak üzere üç farklı arazi sınıfı üzerinde gerçekleştirilmiştir. Arazi sınıflandırma işlemi CAD ortamında manuel vektörleştirme ile gerçekleştirilmiştir. **Şekil 3**, analiz edilen üç arazi sınıfının haritalarını ve kapsadığı alan yüzdeleri yansıtmaktadır.



Şekil 3. Çalışma alanı arazi kullanımı sınıflandırması

Üretilen DYM'lerin SS ve NMMS uluslararası göstergeleri ile istatistiki uyumlarının değerlendirilmesi ardından görsel uyumun ortaya konması amacıyla LISA yazılımı kullanılarak DIFDYM üretilmiştir (eşitlik 6). DIFDYM, piksel bazında hangi arazi sınıfında uyumsuzlukların daha fazla olduğunu ve bu uyumsuzlukların miktarını doğrudan yansıtmaları nedeniyle DYM uyum analizlerinde bilimsel yorumlamalar için çok önemli bir araçtır.

$$DIFDYM = DYM_{RGB} - DYM_{rgb-opt} \quad (6)$$

4. BULGULAR

Çizelge 2, çalışma sahasında tesis edilen YKN'lerin 3B koordinatlarını ve kamera optimizasyonu öncesi ve sonrası mutlak yöneltme karesel ortalama hatalarını (KOH) göstermektedir. Çizelgede, KOH'lar dikkate alındığında optimizasyon işleminin yöneltme sonuçlarını ± 4 mm kadar iyileştirdiği görülmektedir.

Çizelge 2. Mutlak yöneltme sonuçlarında kamera optimizasyonu etkisi

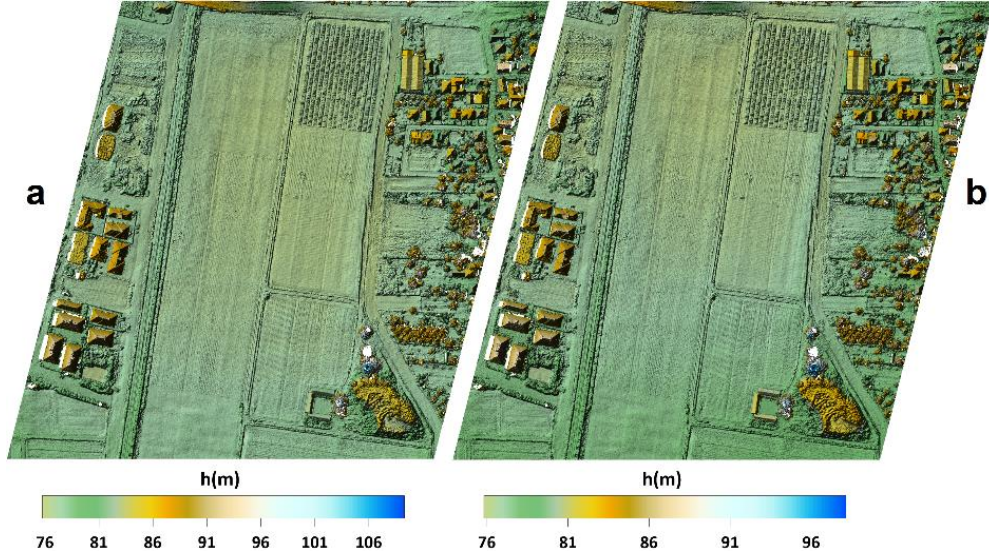
YKN	Y (m)	X (m)	h (m)	RGB		RGB OPT	
				Hata (m)	KOH (m)	Hata (m)	KOH (m)
Y1	277642.582	4509040.945	77.869	0.018771438		0.012337459	
Y2	277646.855	4509080.964	77.726	0.010629323		0.011940941	
Y3	277653.399	4509120.681	77.323	0.019070542		0.010014249	
Y4	277661.785	4509177.704	77.163	0.019335911		0.015813848	
Y5	277675.478	4509269.502	76.871	0.018703736	0.017473	0.017939768	0.013535
Y6	277697.431	4509410.200	76.311	0.019189266		0.014259843	
Y7	277630.561	4509345.759	76.423	0.013534243		0.011389238	
Y8	277611.240	4509225.387	76.873	0.017557815		0.010026076	
Y9	277602.155	4509169.672	77.144	0.012836401		0.012125222	
Y10	277585.273	4509072.136	77.522	0.021811242		0.016865187	

Metodoloji bölümünde de bahsedildiği üzere kamera optimizasyonu uygulanmış (RGB OPT) ve uygulanmamış (RGB) halde elde edilmiş yoğun nokta bulutları üzerinde DYM üretimi öncesinde filtreleme işlemi uygulanmıştır. **Çizelge 3**'te her iki yoğun nokta bulutunun filtreleme öncesi ve sonrasına ait nokta sayıları ve yükseklik değerleri yer almaktadır. Çizelgede de açık şekilde görüldüğü gibi filtreleme sonrası RGB ve RGB OPT yoğun nokta bulutları arasında minimum yükseklikler yaklaşık eşit seviyedeysen maksimum yüksekliklerde ~ 10 m'lik fark göze çarpmaktadır.

Çizelge 3. Nokta bulutları üzerinde filtreleme etkisi

Veri kaynağı	Filtreleme öncesi nokta sayısı	Filtreleme sonrası nokta sayısı	Filtreleme öncesi yükseklik aralığı (m)	Filtreleme sonrası yükseklik aralığı (m)
RGB	43730079	43728783	14.15-146.32	74.63-109.29
RGB OPT	41882015	41880831	40.23-149.61	74.85-98.15

Filtrelenmiş yoğun nokta bulutlarından üretilmiş 0.25 m grid aralığına sahip DYM'ler ise **Şekil 4**'te yer almaktadır. Yükseklik skalaları incelendiğinde, optimizasyonun yükseklik verisi üzerinde meydana getirdiği değişim net bir şekilde görülmektedir.



Şekil 4. Üretilmiş DYM'ler: (a) RGB, (b) RGB OPT

Çizelge 4 ve **5**'te üretilen DYM'lerin yatay ve düşey uyumları SS ve NMMS olarak görülmektedir. DYM'lerin yatay uyumları maksimum iki piksel seviyesindeyken düşey uyumda dikkate değer problemler olduğu saptanmıştır.

Çizelge 4. DYM yatay uyumu

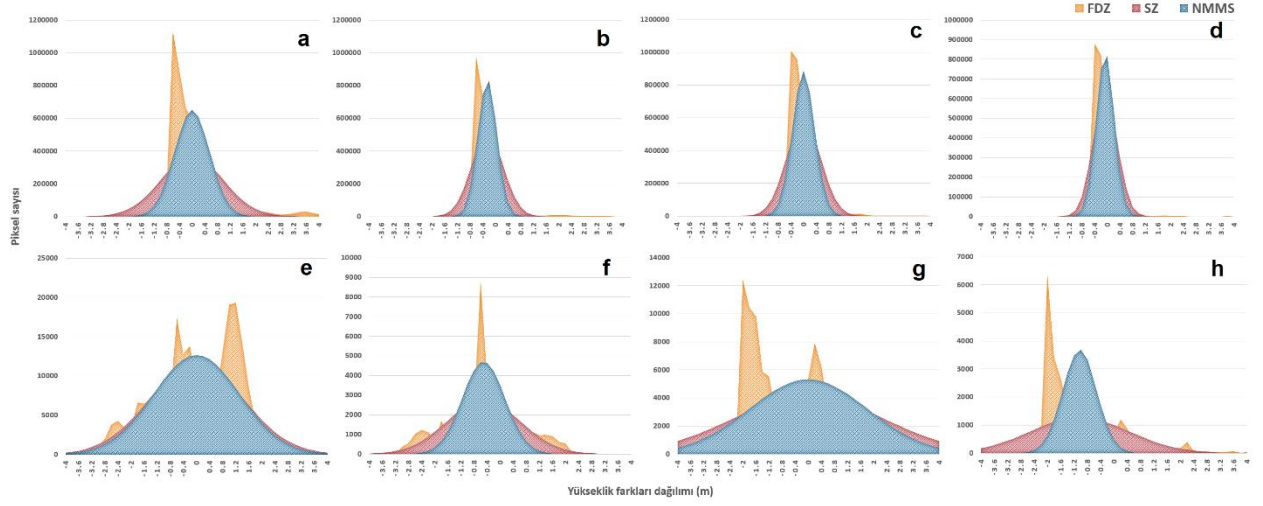
Referans DYM	Test DYM	$SS_x(\text{cm})$	$SS_y(\text{cm})$
RGB (0.25m)	RGB OPT (0.25m)	-6.86	4.20

Çizelge 5. DYM düşey uyumu (α = arazi eğimi) ($<\tan^{-1}0.1$ = eğimsiz alanlar)

Ref. DYM	Test DYM	Sınıf	Sistemik hata (bias) (m)	SS_z (m)		$NMMS_z$ (m)	
				SS_z	SS_z $<\tan^{-1}0.1$	$NMMS_z$	$NMMS_z$ $<\tan^{-1}0.1$
RGB	RGB OPT	Tüm alan (%100)	0.500	$1.314+0.665 \times \tan(\alpha)$	0.503	$0.593+0.865 \times \tan(\alpha)$	0.305
			0.000	$1.107+0.591 \times \tan(\alpha)$	0.503	$0.255+0.750 \times \tan(\alpha)$	0.306
RGB	RGB OPT	Açık alan (%89.78)	0.270	$0.624+0.331 \times \tan(\alpha)$	0.381	$0.231+0.331 \times \tan(\alpha)$	0.294
			0.000	$0.496+0.310 \times \tan(\alpha)$	0.381	$0.152+0.173 \times \tan(\alpha)$	0.294
RGB	RGB OPT	Bina (%5.68)	3.022	$3.181+0.000 \times \tan(\alpha)$	1.124	$3.467+0.410 \times \tan(\alpha)$	0.338
			0.000	$1.211+0.199 \times \tan(\alpha)$	1.124	$1.181+0.139 \times \tan(\alpha)$	0.655
RGB	RGB OPT	Orman (%4.53)	1.926	$2.391+0.683 \times \tan(\alpha)$	1.492	$1.940+0.846 \times \tan(\alpha)$	0.516
			0.000	$1.648+0.446 \times \tan(\alpha)$	1.492	$1.426+0.244 \times \tan(\alpha)$	0.516

DYM'lerin model bazlı uyum değerlendirmelerinde piksellerin yükseklik farkı frekans dağılımı (FDZ), SS ve NMMS ilişkileri yükseklik farkı dağılım grafiklerinin üretimi ile tüm sınıflar için değerlendirilmiştir. Her sınıf için eğimsiz alan ($<5.7^\circ$) grafikleri de ayrı ayrı üretilmiştir. **Çizelge 5** ve **Şekil 5** birlikte değerlendirildiğinde, kamera optimizasyonunun açık ve eğimsiz alanlarda DYM'lerin 3B konum doğruluğu üzerinde dikkate değer bir etki

yaratmadığı ancak bina ve orman gibi arazi sınıflarında objelerin yükseklikleriyle doğru orantılı olarak 3B konum doğruluğunu güçlü şekilde etkilediği saptanmıştır. Majör yükseklik farkları için robust bir gösterge olan NMMS'in tüm arazi sınıfları için DYM'lerde daha simetrik bir dağılım ortaya koyduğu ve özellikle eğimsiz alanlarda FDZ ile minör yükseklik farklarının tasvirini kapsamlı şekilde sunabilen SS'e göre daha uyumlu olduğu izlenmiştir. DYM'lere ait FDZ'ler, özellikle bina ve orman sınıflarında optimizasyonun olumsuz etkisi nedeniyle çok modlu anormal dağılım göstermiştir. Ormana göre daha rijit yapıda olan bina sınıfına ait eğimsiz alanlarda FDZ simetrisinin düzelme eğiliminde olduğu gözlemlenmiş ise de FDZ dağılımları genel anlamda eğimsiz alanlar için de anormaldir.



Şekil 5. Yükseklik farkı dağılımları: (a) tüm alan, (b) tüm alan eğimsiz, (c) açık alan, (d) açık alan eğimsiz, (e) bina, (f) bina eğimsiz, (g) orman, (h) orman eğimsiz

Şekil 6, kamera optimizasyonu uygulanmış ve uygulanmamış verilerden üretilen DYM'lerin farkından elde edilmiş DIFDYM'yi yansıtmaktadır. Arazi sınıflarının etkilerinin daha iyi yorumlanabilmesi için DIFDYM çalışma sahasının ortomozaïği ile birlikte sunulmuştur. Yükseklik farkı skalasında yaklaşık %90 oranıyla dominant açık arazi sınıfında DYM uyumu maksimum seviyede olduğu ve sifıra yakınsadığı tespit edilmiştir. DIFDYM üzerinde kırmızı daireler içerisinde gösterilmiş ormanlık alanlarda ise uyumsuzluğun maksimum seviyelere ulaştığı ve 10 m'ler dolayına kadar yükseldiği saptanmıştır.



Şekil 6. Çalışma sahası ortomozaïği (a), DIFDYM (b)

Yukarıda sunulan bilgi ve bulgular ışığında İHA kameralarının optimizasyonunun çok dikkat edilmesi gereken bir işlem olduğu ve poligonal RGB İHA uçuş verilerinin fotogrametrik işleminde optimizasyonun ihtiyaç olmayan durumlarda tercih edilmemesi gerektiği açık şekilde belirlenmiştir.

5. SONUÇLAR VE GELECEK HEDEFLERİ

Araştırma boyunca gerçekleştirilen uyum analizleri, görsel ve istatistiki analizler neticesinde optimizasyon işleminin mutlak yöneltme hassasiyetini artırırken, model üzerinde önemli derecede bozulma etkilerini beraberinde getirebileceği net bir şekilde ortaya konmuştur. Bu bulgular ışığında, İHA kameralarının optimizasyonunun çok dikkat edilmesi gereken bir işlem olduğu ve poligonal RGB İHA uçuş verilerinin fotogrametrik işleminde optimizasyonun ihtiyaç olmayan durumlarda tercih edilmemesi gerektiği açık şekilde belirlenmiştir. Tüm analizlerden elde edilen çıkarımlarla, arazi yapısının daha değişken topoğrafik özelliklere sahip olduğu bölgelerde, farklı bindirme oranları, farklı kamera açıları ve YKN dağılımının optimizasyon sonucuna etkisinin gözlemlenmesi amacıyla çalışmalar yürütülebileceği fikri, gelecekteki çalışma planlarına altlık olmuştur.

KAYNAKLAR

- Awais, M., Li, W., Cheema, M. J. M., Zaman, Q. U., Shaheen, A., Aslam, B., ... ve Liu, C., 2005. UAV-Based Remote Sensing in Plant Stress Image Using High-Resolution Thermal Sensor for Digital Agriculture Practices: A Meta-Review. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 1-18.
- Brown, D.C., 1971. Close-Range Camera Calibration. *Photogrammetric Engineering*, 37(8): 855-866.
- Han, S., Park, J. ve Lee, W., 2016. On-Site vs. Laboratorial Implementation of Camera Self-Calibration for UAV Photogrammetry. *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, 34(4): 349-356.
- Hellerstein, J. M., 2008. *Quantitative data cleaning for large databases*. Technical Report Presented at United Nations Economic Commission for Europe (UNECE), USA. 42 sayfa.
- Höhle, J. ve Höhle, M., 2009. Accuracy Assessment of Digital Elevation Models by Means of Robust Statistical Methods. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 64: 398-406.
- Lu, Y., Xue, Z., Xia, G. ve Zhang, L., 2018. A Survey on Vision-Based UAV Navigation. *Geo-spatial Information Science*, 21(1): 21-32.
- Pérez, M., Agüera, F. ve Carvajal, F., 2011. Digital Camera Calibration Using Images Taken from an Unmanned Aerial Vehicle. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Zurich, Switzerland, XXXVIII-1/C22 UAV-g, syf: 1-5.
- Sefercik, U. G., Tanrikulu, F. ve Atalay, C., 2020. SFM Tabanlı Yeni Nesil Görüntü Eşleştirme Yazılımlarının Fotogrametrik 3B Modelleme Potansiyellerinin Karşılaştırılması. *Türkiye Fotogrametri Dergisi*, 2(2): 39-45.
- Tinkham, W. T. ve Swayze, N. C., 2021. Influence of Agisoft Metashape Parameters on UAS Structure from Motion Individual Tree Detection from Canopy Height Models. *Forests*, 12(2): 250.
- Yanagi, H. ve Chikatsu, H., 2015. Camera Calibration in 3D Modelling For UAV Application. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Tokyo, Japan, XL-4/W5, syf: 223-226.