



PPK yöntemi ile İHA verilerinden üretilen ortofoto ve SYM ürünlerinin konumsal doğruluğunun araştırılması: Antarktika'daki Horseshoe Adası örneği

Investigation of the positional accuracy of orthophoto and DEM Products generated from UAV data with the PPK method: A case study of Horseshoe Island, Antarctica

Esra Günaydın^{1,*}, Mahmut Oğuz Selbesoğlu², Mustafa Fahri Karabulut³, Oleg Vassilev⁴, Burak Akpınar⁵, Mustafa Yanalak⁶, Özgün Oktar⁷, Burcu Özsoy⁸

^{1,2,6} İstanbul Teknik Üniversitesi, Geomatik Mühendisliği Bölümü, 34469, İstanbul, Türkiye

³ Fırat Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 23119, Elazığ, Türkiye

⁴ Bulgar Antarktika Enstitüsü, 1504, Sofya, Bulgaristan

⁵ Yıldız Teknik Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 34220, İstanbul, Türkiye

^{7,8} TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi, Kutup Araştırmaları Enstitüsü, 41470, Kocaeli, Türkiye

⁸ İstanbul Teknik Üniversitesi, Deniz Ulaştırma İşletme Mühendisliği Bölümü, 34940, İstanbul, Türkiye

Öz

Küresel iklim değişikliği süreçlerinin daha iyi anlaşılabilmesi ve insanlığın gelecekteki süreçlere uyum sağlayabilmesi açısından buzul alanlardaki değişikliklerin izlenmesi önem taşımaktadır. Buzul değişimlerinin takibi için kullanılan yöntemlerden birisi olan insansız hava aracı (İHA) fotogrametrisi ile kriyosferin ve buzul değişikliklerinin yüksek konumsal doğrulukla izlenebilmesi için küresel konum belirleme sistemlerine (Global Navigation Satellite System-GNSS) dayanan konum belirleme yöntemleri kullanılmaktadır. Bu çalışmada Antarktika'da, Türk Bilimsel Araştırma Kampı'na ev sahipliği yapan Horseshoe Adası'nda, buzul takibi amacıyla belirlenen bir test alanında kinematik ölçme sonrası değerlendirme (Post Processing Kinematic-PPK) yöntemi kullanılarak üretilen fotogrametrik ürünlerin konumsal doğruluğu araştırılmıştır. Hava fotoğraflarından hareket ile nesne oluşturma (Structure from Motion-SfM) yöntemine dayanarak üretilen ortofoto ve sayısal yükseklik modelinin (SYM) konum doğruluğu, arazide klasik gerçek zamanlı kinematik (Real Time Kinematic-RTK) konum belirleme yöntemiyle konumları belirlenmiş yer kontrol noktaları kullanılarak elde edilmiştir. Yatay ve düşey koordinatlar için hesaplanan karesel ortalama hata değerleri sırasıyla 1.05 cm, 0.52 cm ve 11.33 cm'dir.

Anahtar kelimeler: Antarktika, İHA, PPK, Ortofoto, SYM

1 Giriş

Küresel iklim sistemlerini etkileyen temel bileşen olan güneş radyasyonu, Dünya'nın farklı enlemlerinde sıcaklık farklılıklarına sebep olmaktadır. Bir yılda kutuplara göre beş kat daha fazla radyasyon alan ekvator bölgesinden kutup bölgelerine atmosfer ve okyanuslar aracılığıyla ısı akışı gerçekleşmektedir [1]. Küresel iklim değişikliğinin dünya genelinde sıcaklık dağılımını etkilemesiyle kutup

Abstract

Monitoring changes in glacial areas is important for a better understanding of global climate change processes and adaptation of humanity to future processes. Unmanned aerial vehicle (UAV) photogrammetry, one of the methods used to monitor glacier changes, uses positioning methods based on global navigation satellite systems (GNSS) to monitor cryosphere and glacier changes with high positional accuracy. In this study, the positional accuracy of photogrammetric products generated using the Post Processing Kinematic (PPK) method was investigated in a test area designated for glacier monitoring on Horseshoe Island, which hosts the Turkish Scientific Research Camp in Antarctica. The positional accuracy of the orthophoto and digital elevation model (DEM) generated based on the Structure from Motion (SfM) method using aerial photographs was determined with ground control points whose positions were determined using the classical real-time kinematic positioning (RTK) method in the field. The root mean square error values calculated for horizontal and vertical coordinates are 1.05 cm, 0.52 cm, and 11.33 cm, respectively.

Keywords: Antarctica, UAV, PPK, Orthophoto, DEM

bölgelerinde daha hızlı bir ısınma yaşanması buzulların erimesini tetiklemektedir. Aynı zamanda atmosferik dolaşım sistemlerini ve deniz akıntılarını etkileyen bu durum Dünya genelinde ısı transferinde dengesizliklere yol açabilmektedir. Kutup bölgeleri gezegenimizdeki bir çok bölgeyle karşılaştırıldığında, küresel iklim değişikliği etkilerinin çok daha hızlı bir şekilde gözlemlendiği bölgelerdir [2]. Bilim insanları tarafından dünyanın doğal

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: esgunaydin@itu.edu.tr (E. Günaydın)

Geliş / Received: 17.06.2024 Kabul / Accepted: 02.10.2024 Yayımlanma / Published: 15.01.2025

doi: 10.28948/ngumuh.1500951

laboratuvarı olarak adlandırılan ve büyük bölümü buz tabakası ile kaplı olan Antarktika Kıtası'nda artan sıcaklıklar; okyanus asitlenmesi, buz tabakalarının incilmesi ve bu etkilerin sonucunda da deniz seviyesinin yükselmesi risklerini beraberinde getirmektedir. Güney Okyanusu, Atlantik, Pasifik ve Hint Okyanusları arasında bağlantı görevi gören Antarktika'da iklim değişikliği araştırmaları yapılması küresel iklim sisteminin geleceğini tahmin etmek, küresel iklim ve ekolojik sistemler için kritik öneme sahiptir [3]. Bu etkileri daha iyi anlamak ve gelecek yüzyıl için daha iyi projeksiyonlar üretebilmek için atmosfer, okyanus ve kriyosfer ilişkilerini görebileceğimiz modellere ihtiyaç duyulmaktadır [4]. Bu ihtiyaçlar doğrultusunda kullanılan uzaktan algılama yöntemleri geniş kapsama alanı ve küresel ölçekte devamlı izleyebilme yeteneklerine sahiptir. Ancak uzaktan algılamada uydu sistemleri buzul alanları izlemede hava koşulları, görüntü kalitesi ve maliyet ile ilgili çeşitli kısıtlamalarla karşı karşıya kalabilmektedir [5, 6]. Antarktika ve çevresindeki küçük adalarda gerçekleştirilecek izleme çalışmalarında ihtiyaç duyulan yüksek çözünürlükte veriler için bölgesel ölçekte çalışmalara gereksinim duyulmaktadır [7].

Son yıllarda dinamik yapıdaki buzulların yüzey topoğrafyasını inceleme, morfolojik özelliklerindeki varyasyonları izleme ve topoğrafyayı haritalama gibi çalışmalarda yüksek mekansal çözünürlüklü görüntüler sağlayabilen insansız hava aracı (İHA) destekli sistemlerin uydu sistemlerine bir alternatif ya da destekleyici araç olarak kullanıldığı görülmektedir [8]. 2006 ve 2021 yılları arasında Antarktika Kıtası'nda İHA teknolojisi kullanılarak yapılan bilimsel araştırmalar sonucunda yazılan makale sayısına bakıldığında, özellikle 2019 yılından büyük bir artış olduğu görülmüştür [9]. Antarktika'nın florasına ait özelliklerin araştırılması, yeryüzü şekillerinin haritalandırılması, kar kalınlığı ve alansal değişimlerinin izlenmesi gibi çalışmalarda İHA fotogrametrisi yönteminin kullanıldığı görülmektedir [7, 8, 10, 11]. Bu yöntemle üretilen ortofoto ve sayısal yükseklik modeli (SYM) ürünleri çeşitli disiplinler için temel veri kaynağı olarak kullanılmaktadır.

Buzul bölgelerde yapılan değişim analizlerinin birçoğu için üretilen fotogrametrik ürünlerin mekansal çözünürlüğü ve konum doğruluğu oldukça önemlidir. Konum belirleme yöntemleri açısından incelendiğinde, uçuş bölgesinde yer kontrol noktası tesis edilmesine gereksinim duyulmadan kullanılacak küresel konum belirleme sistemlerine (Global Navigation Satellite Systems-GNSS) dayanan ölçme yöntemleri mevcuttur. Bu yöntemlerden biri İHA'nın sahip olduğu GNSS alıcısının, bir radyo bağlantısı üzerinden referans istasyonu ile gerçek zamanlı iletişim kurarak eş zamanlı düzeltmeler gerçekleştirilen gerçek zamanlı kinematik (Real Time Kinematic-RTK) yöntemidir [12]. Bu yöntemle İHA sisteminin gerçek zamanlı olarak konumu santimetre düzeyinde belirlenebilmektedir [13]. Bunun yanında İHA üzerindeki GNSS alıcısının veri kaydetme özelliğine sahip olması, kinematik ölçme sonrası değerlendirme (Post Processing Kinematic-PPK) çözümü yapılmasına olanak sağlamaktadır. Çekim sırasında kameranın konum verilerinin düzeltilmesi işlemi PPK ile

ölçme sonrası değerlendirme adımında gerçekleştirilmektedir. Bu yöntem özellikle ulaşılması zor alanlarda zaman ve risk faktörleri açısından büyük bir avantaj sağlamaktadır [14].

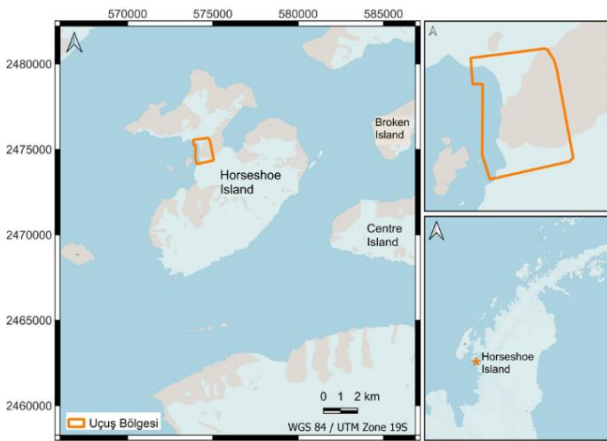
Antarktika ve benzer özelliklere sahip buzul bölgeler içeren alanlarda ise, çeşitli amaçlarla İHA fotogrametrisi yöntemi kullanılmışken, PPK yöntemi kullanılarak üretilen fotogrametrik ürünlerin konumsal doğruluğunu irdeleyen sınırlı sayıda çalışma mevcuttur. Doğu Antarktika'da farklı test alanlarında buzul yüzeyinde ve hareketindeki değişiklikleri tespit etmek için İHA fotogrametrisinin kullanıldığı bir çalışmada, PPK ile doğrudan coğrafi referanslama yöntemi kullanılarak yüksek mekansal çözünürlükte sayısal yükseklik modelleri üretilmiştir. Konumsal doğruluk güvenlik problemleri nedeniyle sadece belirli bölgelere yer kontrol noktaları (YKN)'ler tesis edilerek araştırılsa da buzul hareketlerinden dolayı doğruluk değerlendirmesinde kullanılamayacağı görülmüştür. Kabaca bir doğruluk değerlendirmesi yapılabilmesi adına hava triyagülasyonunun doğruluğuna ilişkin değerler sunulmuştur. Farklı çalışma bölgeleri için hesaplanan standart sapma değerleri yatay koordinat bileşeni için 3-190 cm ve düşey koordinat bileşeni için ise 3-80 cm arasında değişmektedir [15]. Batı Grönland'daki Store Buzulu'nda gerçekleştirilen bir diğer çalışma, çevresel ve lojistik açısından yer kontrol noktalarının tesis edilmesinin güç olduğu bölgelerde, GNSS destekli hava triyagülasyonunun avantajlarını sunmayı ve buzul dinamiği çalışmaları için bu yöntemi doğrulamayı amaçlamıştır. Çalışmada PPK yönteminin tercih edilmesinin sebebi, gerçek zamanlı radyo bağlantısına ihtiyaç duyulmadan hassas sonuçlar elde edilebileceği şeklinde açıklanmıştır. Yaklaşık 450 m yükseklikte bir buzul ortamında SfM (Structure from Motion-hareket ile nesne oluşturma) fotogrametrisi ile üretilen ürünlerinin yatay ve düşey koordinatlar için doğruluk değerleri sırasıyla ± 12 cm; ± 14 cm olarak sunulmuştur [16]. Forni Buzulu'nda (İtalyan Alpleri) gerçekleştirilen diğer bir çalışmada ise, DJI marka Phantom 4 RTK hava aracı kullanılarak 2022 yılı ağustos ortasında buzul bölgenin mevcut durumu araştırılmıştır. PPK ve SfM fotogrametrisinin entegrasyonu ile buzul yüzey morfolojisini tanımlamak için üretilen fotogrametrik ürünlerin, gelecekte morfolojik değişimler ve hacimsel farkların ortaya konulabilmesi için yapılacak çalışmalara referans olması amaçlanmıştır. Üretilen ortofoto ve SYM için yer örnekleme aralığı (YÖA) sırasıyla 3 cm ve 20 cm olarak belirlenmiştir; 2B ve 3B konumsal doğruluklarını ifade eden RMSE değerleri ise sırasıyla 4 cm ve 5 cm olduğu belirtilmiştir [17]. Antarktika'da Larsemann Tepeleri'nde gerçekleştirilen başka bir çalışmada ise doğrudan coğrafi referanslama yöntemleri değerlendirilmiştir. Yer kontrol noktalarının tesis edilemeyeceği bölgeler için bu yöntemlerin performansını değerlendiren çalışmada, aralarında PPK yönteminin de bulunduğu üç farklı yöntem ile üretilen ortofoto ve SYM ürünlerinin 3.48-3.91 cm ($\sim 0.7xYÖA$) yatay ve 14.23-15.88 cm ($\sim 2.6xYÖA$) arasında düşey doğruluk değerlerine sahip olduğu görülmüştür [18].

Buzul alanlarında İHA fotogrametrisi yönteminin kullanıldığı çeşitli çalışmalar mevcut olsa da özellikle Antarktika'da PPK yönteminin test edildiği çalışmalar sınırlıdır. Bu çalışma, Antarktika'nın Türk bilimsel araştırmalarına ev sahipliği yapan Horseshoe Adası'nda belirlenen bir test alanında, zorlu çevresel koşullarda İHA fotogrametrisi kullanılarak yüksek mekansal çözünürlükte ve konumsal doğrulukta fotogrametrik ürünlerin elde edilmesine odaklanmaktadır. Özellikle ani yükseklik değişimlerinin ve derin buzul yarıklarının bulunduğu çalışma bölgemizde, İHA ile elde edilen hava fotoğraflarının PPK yöntemiyle değerlendirilmesi sonucunda üretilen ortofoto ve SYM ürünlerinin konum doğruluğu incelenmiştir.

2 Çalışma alanı

Antarktika iklim koşulları açısından soğuk hava, şiddetli rüzgarlar ve kuraklık özellikleriyle ön plana çıkmaktadır. Özellikle iç kesimlerinde hakim olan aşırı soğuk, havanın kurumasına yol açarken, yerçekimi kaynaklı güçlü rüzgarların oluşumuna da sebep olmaktadır [19]. Bölgede milyonlarca yıl boyunca biriken buzlar yaklaşık 4.8 km derinliğe kadar ulaşabilmektedir. Kıtanın yaklaşık olarak 13,7 milyon kilometrekarelik alanı (yaklaşık %97,6'sı) kar ve buzul alanlardan oluşmaktadır [20]. Bölgedeki kar ve buz tabakaları, güneş ışığını büyük ölçüde yansıtarak yüksek albedo oluşturur; bu durum ise sensörlerin algılamasında yanlısalmalara yol açarak görüntülerde istenmeyen unsurların ortaya çıkmasına neden olabilir [21].

İHA ile uçuş görevlerinin gerçekleştirildiği test alanının bulunduğu Horseshoe Adası, Antarktika Yarımadası'nın batısında yer alan bir adadır. Adanın toplam yüzey alanı yaklaşık 60 km² olup, bunun %66'sı kar/buzul alanlarla kaplıdır [22]. Türk Bilimsel Araştırma İstasyonunun yer aldığı adada belirlenen test alanı (yaklaşık -67.8301° enlem ve -67.2376° boylam) yaklaşık olarak 1.4 km²'lik bölgeyi kapsamaktadır (Şekil 1).



Şekil 1. Horseshoe Adası'nda insansız hava aracı ile uçuş gerçekleştirilen bölge, Antarktika

İnsansız hava aracı ile uçuş yapılacak bölge seçilirken, vahşi yaşamın rahatsız edilmemesi ve olumsuz çevresel etkilerin gerçekleşmemesi için güvenli ve istasyona yakın bir alan olmasına özen gösterilmiştir.

3 Yöntem

3.1 İnsansız hava aracı fotogrametrisi

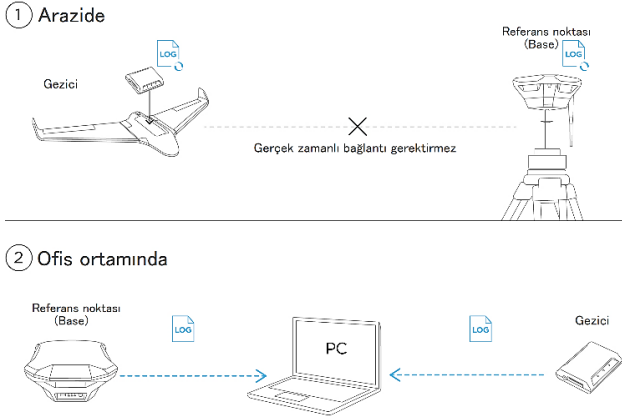
İHA fotogrametrisi, erişilmesi zor ortamlarda veri toplayabilen, kullanımı kolay ve otonom veya manuel olarak kullanılabilen İHA'lar ile gerçekleştirilen bir yöntemdir. Bu yöntem, yüksek mekansal çözünürlüğe sahip kameralarla çekilen fotoğrafların fotogrametrik işleme tabi tutulmasıyla, yüksek mekansal çözünürlükte ortofoto ve üç boyutlu sayısal yüzey modelleri elde edilmesini sağlar. Son yıllarda bilgisayar işlem gücü performanslarının artmasıyla birlikte şirketler güçlü yazılım platformları geliştirmiştir. Bu gelişmeler, araştırmacıların İHA fotogrametrisiyle 3B model üretme çalışmalarına olan ilgilerini önemli ölçüde artırmıştır [23]. İHA fotogrametrisinde birçok yazılım platformunda kullanılan SfM tekniği, farklı noktalardan çekilen ve yüksek düzeyde örtüşen iki boyutlu (2B) hava fotoğraflarından benzer kilit noktaları otomatik olarak bularak üç boyutlu (3B) veri elde edilmesine temel oluşturan görüntü eşleme algoritmasıdır [24].

İHA sistemleri ile hava fotoğrafları elde edilmesinde genel prosedür sırasıyla; uçuş parametrelerinin belirlenmesi, uçuş planının hazırlanması, uçuş görevinin tamamlanması ve verilerin kalite kontrolünün gerçekleştirilmesi şeklindedir. Hava fotoğraflarının elde edilmesinden sonraki fotogrametrik süreç ise; genel olarak; hava triyngülasyonu, iç ve dış yönelme parametrelerinin belirlenmesi (kamera parametrelerinin tanımlanması ve yer kontrol noktaları ölçmeleri), 2B fotoğraflardan 3B geometrinin oluşturulmasına yönelik model tanımlanması, yüzey modelleri ve ortofoto ürünlerinin oluşturulması aşamalarından oluşmaktadır [25].

3.2 Kinematik ölçme sonrası değerlendirme

Uçuş görevinin gerçekleştirileceği bölgede YKN tesis edilmesine gereksinim duyulmadan kullanılacak farklı GNSS ölçme yöntemleri mevcuttur. Başlıca kullanılacak yöntemlerden Diferansiyel GNSS (DGNSS) ve RTK, en az biri referans ve biri gezici olmak üzere birden fazla alıcının kullanıldığı konum belirleme teknikleridir. Referans ve gezici arasında radyo frekansı ya da internet gibi kablosuz iletişim kanalı gerektirmektedir. DGNSS konumlandırma tekniği kod ölçülerini kullanmaktadır ve bu nedenle desimetre mertebesinde daha yüksek konum doğruluğu gerektiren uygulamalarda taşıyıcı faz ölçmelerine dayanan RTK yöntemi ön plana çıkmaktadır. Ancak bazı uygulamalarda gezicinin referans istasyonuna olan mesafesi ve zayıf internet bağlantısı RTK performansını etkileyebilmektedir [26].

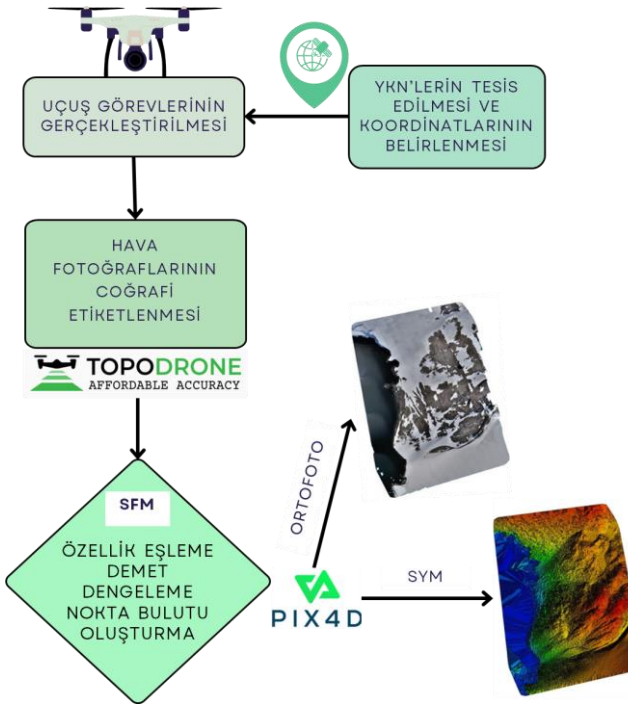
Bir diğer alternatif olan PPK yöntemiyle uçuş esnasında İHA'da mevcut GNSS alıcısı tarafından toplanan ham GNSS verileri, uçuş esnasında sürekli gözlem yapmaktan olan sabit referans istasyonu verilerine dayanarak işlenmektedir. Bu yöntem taşıyıcı faz ölçmelerine dayanmaktadır ve santimetre mertebesinde konum doğruluğu sağlamaktadır [27]. Hassas konumlandırma gerçek zamanlı olarak gerçekleşmemektedir. Hem İHA'ya hem de referans istasyonuna ait GNSS gözlem verileri daha sonra ofis ortamında değerlendirilir (Şekil 2).



Şekil 2. PPK yöntemi işleyişi [28]

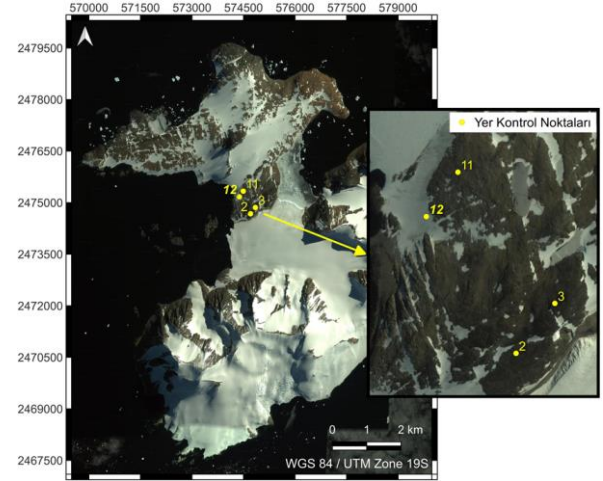
4 İş akışı

Çalışma İHA fotogrametrisi yöntemiyle yüksek mekansal çözünürlükte ortofoto ve SYM üretilmesi ve PPK yönteminin konumsal doğruluğunun araştırılması üzerine odaklanmaktadır. Genel işlem adımları Şekil 3'de gösterilmektedir. Öncelikle PPK yönteminin doğruluğunu kıyaslayabilmek için uçuş planı hazırlanacak bölgede yer kontrol noktalarının tesis edilmesi planlanmıştır.



Şekil 3. İHA fotogrametrisi yöntemiyle ortofoto ve SYM üretilmesine ait iş akışı diyagramı

Bu doğrultuda uçuş planı hazırlanacak bölgeye dağılmış 4 adet yer kontrol noktasının yerleri arazide belirlenmiştir (Şekil 4). Yer seçimi sırasında nokta tesisi yapılabilecek sağlam nitelikte zeminler olmasına dikkat edilmiştir.



Şekil 4. YKN'lerin uçuş bölgesindeki dağılımı

Önceden hazırlanmış 30cmx30cm kare lamine işaretçiler M8 paslanmaz çelik dübel ve cıvata ile belirlenen yerlere sıkıca sabitlenmiştir. Emlid firmasına ait Reach RS2 GNSS alıcısı kullanılarak her noktanın konumu RTK yöntemiyle belirlenmiştir (Şekil 5).



Şekil 5. Uçuş bölgesinde yer kontrol noktalarının işaretçilerinin yerleştirilmesi ve RTK ölçmeleri

Çalışma bölgesinde ani yükseklik değişimleri ve keskin kayalar, arazide sık ve homojen bir şekilde YKN'lerin tesis edilmesini zorlaştıran unsurlardır. Sefer sırasında hava koşullarının elverişliliği ve zamansal kısıtlamalar dikkate alınarak; kolaylıkla erişilebilir, farklı yüksekliklerde ve genel olarak homojen bir dağılım gösterecek şekilde konumları belirlenmiştir. Ayrıca, ani kar yağışlarının YKN işaretçilerini kapatma riski göz önünde bulundurularak, noktaların en hızlı ve en uygun şartlarda tesis edilmesine özen gösterilmiştir. YKN'lerin koordinat bilgileri Tablo 1'de sunulmuştur.

Tablo 1. YKN'lerin coğrafi koordinatları

Nokta Numarası	Enlem	Boylam	Elipsoidal Yük.(m)
2	67.8330°S	67.2256°W	107.526
3	67.8314°S	67.2224°W	134.143
11	67.8272°S	67.2311°W	89.193
12	67.8287°S	67.2337°W	56.347

Çalışmada uçuş görevlerini gerçekleştirmek üzere uçuş planı, İHA'nın kalkacağı noktadan 90 m sabit uçuş yüksekliğinde; ileri ve yan örtü oranları %80 ve %75 olacak şekilde düzenlenmiştir. Uçuş görevlerinin gerçekleştirildiği DJI Marka Phantom 4 Pro hava aracı ile ilgili temel özellikler Tablo 2'de sunulmuştur.

Uçuşlar gerçekleştirilirken, eş zamanlı olarak referans istasyonunda 5 saat boyunca GNSS uydu gözlemleri gerçekleştirilmiştir. Tüm uçuş görevinin tamamlanması için 6 batarya kullanılmış olup sonuç olarak 2257 adet görüntü verisi elde edilmiştir. Görüntü verilerinin tamamı 18.36 GB dosya boyutuna sahiptir. Fotoğraf merkezi koordinatları yaklaşık koordinatlar olan görüntü verileri TOPODRONE PPK Post Processing yazılımının demo versiyonu kullanılarak ofis ortamında işlenmiştir. Sırasıyla İHA'nın GNSS alıcısı tarafından toplanan gözlem dosyası ve ham görüntü verileri, İHA model bilgisi ve anten sapma değerleri, referans istasyonunda toplanan GNSS gözlem dosyası ve referans istasyonunun hassas koordinat bilgileri yazılıma girdi olarak verilmiş olup, fotoğraf merkezi koordinatları yeniden hesaplanmış görüntüler çıktı olarak alınmıştır. Pix4Dmapper yazılımının 4.8.4 versiyonu kullanılarak görüntülerin kalibrasyonu, örtüşen görüntülerden bağlama noktalarının otomatik olarak bulunması, konum doğruluğu araştırılmak üzere YKN'lerin

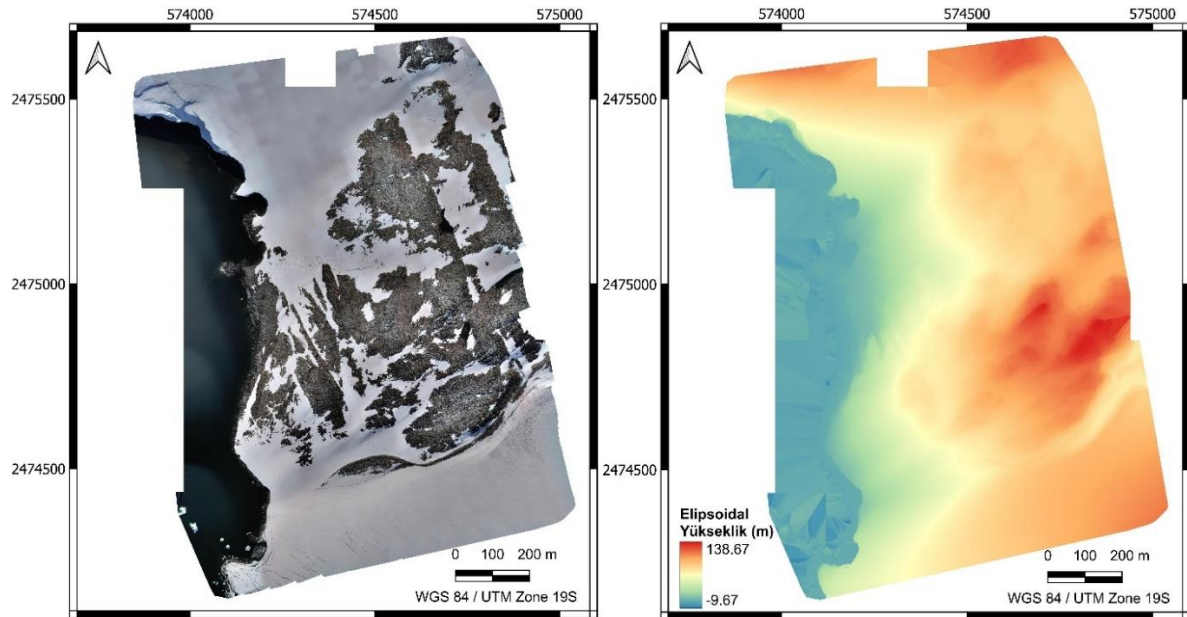
görüntülerde işaretlenmesi, yoğun nokta bulutu, ortofoto ve SYM ürünlerinin üretilmesi aşamaları gerçekleştirilmiştir. Çalışma alanında YKN'lerden üçü (3, 11 ve 12 numaralı noktalar) rektifikasyon amaçlı biri (2 numaralı nokta) kontrol amaçlı kullanılarak tekrarlanmış ve fotogrametrik ürünler ikinci bir yöntemle de elde edilmiştir. Çıktı verilerin koordinat sistemi WGS 84/UTM 19S olarak tanımlanmıştır.

5 Bulgular

Test alanında 14 Şubat 2022 tarihinde İHA uçuş görevleri tamamlanması ardından elde edilen 2257 adet görüntünün, fotogrametrik değerlendirilmeyle üretilen ortofoto ve SYM ürünlerinin (Şekil 6) ortalama yer örnekleme aralığı 2.74 cm'dir (Tablo 3). Her iki yöntemle üretilen fotogrametrik ürünlerde de görüntülerin yaklaşık %96'sı kalibre edilmiş, görüntü başına ortalama 4041 anahtar nokta bulunmuş ve kalibre edilmiş görüntü başına ortalama 1120 eşleme gerçekleşmiştir. PPK işlemi ile konumları hesaplanan YKN'lerin klasik RTK yöntemiyle konumları belirlenmiş YKN'ler ile kıyaslanmıştır. Bu amaçla 3B yatay (X, Y) ve dikey (Z) koordinatları için hesaplanan karesel ortalama hata (RMSE) değerleri sırasıyla 1.05 cm, 0.52 cm ve 11.33 cm'dir.

Tablo 2. Phantom 4 Pro hava aracı teknik özellikler [29]

Ağırlık (Pil ve pervaneler dahil)	Maksimum Rüzgar Hızı Direnci	Maksimum Uçuş Süresi	Çalışma Sıcaklık Aralığı	Kamera Sensörü	Kamera Lensi	Pil Kapasitesi
1388 gr	10 m/s	Yaklaşık 30 dk	32°-104°F (0°- 40°C)	1'' CMOS Etkin pikseller: 20M	FOV 84° 8.8 mm/24 mm (35 mm biçim eşdeğeri) f/2.8 - f/11 otomatik odaklama 1 m - ∞	5870 mAh



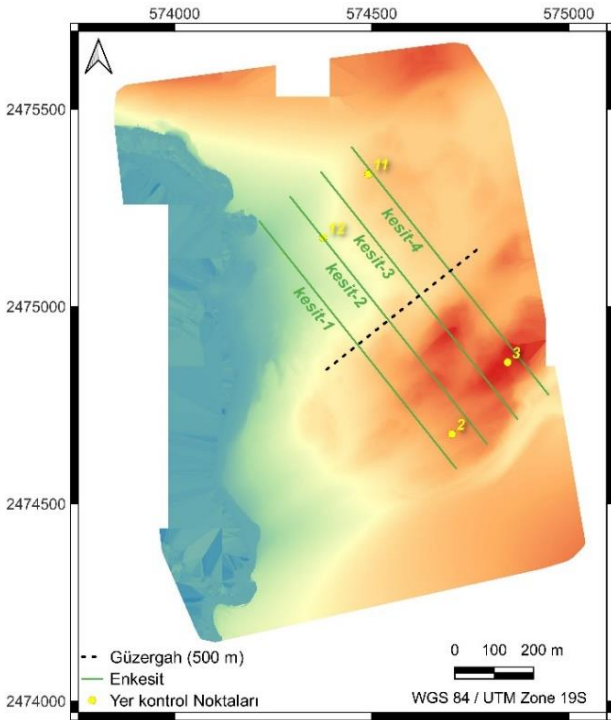
Şekil 6. İHA fotogrametrisi ile üretilen ortofoto ve SYM

Benzer bir hesaplama mevcut YKN'lerden üçü rektifikasyon amaçlı kullanılarak üretilen ürünler için de yapılmış olup; 3B yatay (X, Y) ve düşey (Z) koordinatları için sırasıyla 0.22 cm, 0.85 cm ve 5.77 cm olarak bulunmuştur (Tablo 3).

Tablo 3. PPK ve YKN ile rektifikasyon yöntemlerinin konum doğruluğunun karşılaştırılması

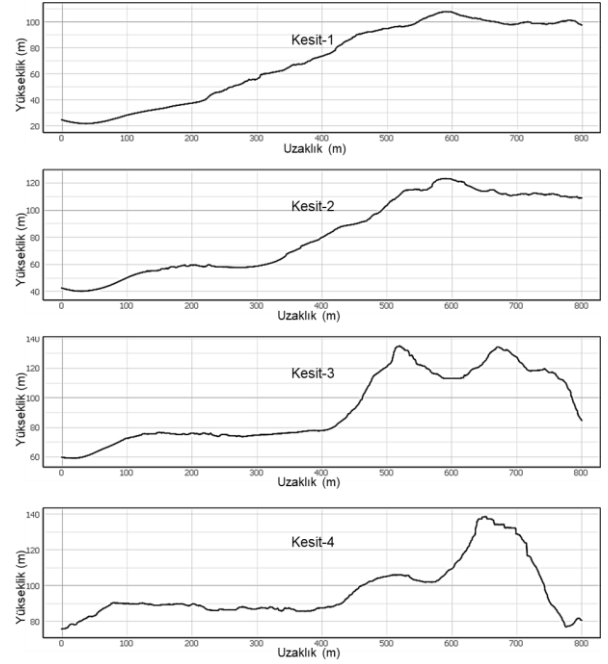
Yöntem	YÖA (cm)	Coğrafi referanslama	RMSE (cm) [X, Y, Z]
PPK	2.74	4 adet KN	1.05, 0.52, 11.33
YKN ile rektifikasyon	2.74	1 adet KN 3 adet YKN	0.22, 0.85, 5.77

Üretilen SYM üzerinde belirlenen 500 m uzunluğundaki güzergâh boyunca her 100 m'de bir enkesitler alınmıştır (Şekil 7).



Şekil 7. SYM'den alınan kesitlerin güzergahları

Alınan bu enkesitler üzerinde yükseklik değerlerini gösteren grafikler Şekil 8'de sunulmuştur. Bu grafiklerin, özellikle YKN'lerin bulunduğu bölgelerdeki yükseklik değişimlerini daha iyi anlamak adına önemli olduğu düşünülmektedir. 800 m uzunluğa sahip enkesitlerin profilleri her bir kesitin en kuzeydeki başlangıç noktasından en güneydeki bitiş noktasına doğru olacak şekilde oluşturulmuştur.



Şekil 8. SYM'den alınan kesitlere ait grafikler

6 Sonuçlar

Küresel iklim değişikliği etkilerinin gözle görülür derecede olduğu kutup bölgelerinde yapılan bilimsel araştırmalar için İHA teknolojileri oldukça kullanışlıdır. Yüksek mekansal çözünürlük ve kolaylıkla tekrarlanabilirlik özellikleriyle kar ve buzul alanların morfolojilerini ve dinamiklerini izleme çalışmalarında kullanılabilmektedir. Yüksek mekansal çözünürlüğe sahip görüntülerden üretilen fotogrametrik ürünler analiz edilerek, kıyı alanlardaki değişiklikler, kar ve buzul alanlarda alansal ve hacimsel değişiklikler analiz edilebilir. Ancak bu bölgelerde çoğu zaman zorlu çevresel koşullar ve zamansal kısıtlamalar nedeniyle yer kontrol noktası tesis edilmesi önemli bir zorluktur. Bu noktada doğrudan coğrafi referanslama yöntemlerinin kullanımı ön plana çıkmaktadır. Dünya'da orta enlemlerde yapılan birçok çalışma İHA fotogrametrisinde RTK ve PPK yöntemlerinin konumsal doğruluğunu sunmaktadır. Ancak Antarktika'da özellikle PPK yönteminin kullanıldığı sadece birkaç çalışma mevcuttur. Bu çalışma uçuş parametrelerinin belirlenmesine, bu gibi bölgelerde dikkat edilmesi gereken durumlara ve konumsal doğruluğunu etkileyen faktörlere odaklanılmasıyla ön plana çıkmaktadır. Antarktika Yarımadası'nda Horseshoe Adası'nda belirlenen bir test alanında gerçekleştirilen çalışmada PPK konum belirleme yönteminin konumsal doğruluğu araştırılmış olup bu yöntemin uygulanabilirliği test edilmiştir.

Uçuş bölgesi belirlenirken, adadaki vahşi yaşamın rahatsız edilmemesi ve çevreye herhangi bir zarar verilmemesine özen gösterilmiştir. Bölgedeki zamansal ve mekansal kısıtlamalar göz önünde bulundurularak en optimum şekilde uçuş planı hazırlanmıştır. 0 ila -10 °C arasında değişen hava sıcaklığı ve şiddetli rüzgarların

etkisinin, bataryaların orta enlemlerde sahip olduğu performansa göre %10-%20 daha az performans gösterdiği görülmüştür. Ayrıca bu koşullarda İHA'nın çalışabilmesi için bataryaların sıcak tutulması ve uçuşların vakit kaybedilmeden hemen gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Bu doğrultuda bataryaların uçuş sürecinde kullanımının yeterliliğine ve zamansal kısıtlamalara dikkat edilerek planlama yapılmıştır. Ayrıca benzer nitelikte yüzey özelliklerinin hakim olduğu bir bölge için örtü oranlarının yüksek tutulmasına ve optimum uçuş yüksekliğinde uçuşların gerçekleştirilmesine dikkat edilmiştir. Uçuş esnasında İHA'da mevcut GNSS alıcısı ile uydu gözlemleri gerçekleştirilirken eş zamanlı olarak referans istasyonunda mevcut GNSS alıcısı ile de uydu gözlem verileri toplanmıştır. Elde edilen görüntülerin ofis ortamında değerlendirilmesi sonrası fotoğraf merkezi koordinatları hassas bir şekilde hesaplanmış görüntü verileri bir dizi fotogrametrik işleme tabi tutulmuştur. Farklı noktalardan ve açılardan alınan 2B görüntülerden 3B model oluşturulmasını sağlayan güçlü SfM algoritmasına dayalı olarak ortofoto ve SYM ürünleri elde edilmiştir. Üretilen fotogrametrik ürünlerin ortalama YÖA 2.74 cm'dir. 3B koordinatlar için konumsal doğruluğu ise RTK yöntemiyle birkaç cm doğrulukta konumları belirlenmiş YKN koordinatlarıyla kıyaslanarak hesaplanmıştır. Çalışmada PPK yönteminin konumsal doğruluğu RMSE hesaplanarak sunulmuş olup yatay koordinat bileşenleri için bu değerler 1.05 cm ve 0.52 cm'dir. Düşey koordinat bileşeni için hesaplanan RMSE değeri 11.33 cm'dir. Referans istasyonu ve gezici arasındaki mesafelerin maksimum 1-1.5 km arasında olduğu göz önünde bulundurulduğunda yatay koordinat bileşenleri için elde edilen sonucun orta enlemlerde yapılan çalışmaların konum doğruluğuna ulaştığı görülmektedir. Çalışmada benzer bir iş akışı yer kontrol noktalarından bazıları rektifikasyon amaçlı kullanılarak da uygulanmış olup, fotogrametrik ürünlerin konumsal doğruluğunda hem yatay hem de düşey koordinat bileşenleri için cm mertebesine ulaşılmıştır.

Kutup bölgelerinde benzer çalışmalar uçuş görevlerine hazırlık aşamasında;

- İklim koşulları ve çevresel şartlara (soğuk, şiddetli rüzgar, yükseklik değişimi, kar/buzul alanlar, derin buzul yarıkları vb.) dikkat edilerek İHA ekipmanlarının seçilmesi,
- Soğuk havanın batarya performanslarını önemli oranda düşürmesi nedeniyle önlem alınması (yedek bataryalar, bataryaların devamlı şarj edilmesi vb.)
- Bataryaların uçuş öncesi sıcak tutulması ve uçuşa en uygun anda hemen uçuş görevinin başlatılması,
- YKN tesis edilecekse kaya vb. sağlam noktalara tesis edilmesi,
- Her an şiddetli kar yağışı olabileceğinden optimum koşullarda uçuş görevinin başlatılması,

önerilmektedir. Ayrıca sinyal bağlantı problemlerinin sıklıkla yaşanabileceği bu gibi bölgelerde PPK yöntemi, uçuş esnasında İHA ve referans istasyonu arasında veri iletişimi gerektirmemesi açısından kolaylık sağlamıştır. Bu çalışmada elde edilen konumsal doğruluk göz önünde bulundurularak, arazide sağlam olduğu bilinen birkaç

noktaya yer kontrol noktası tesis edilmesi önerilmektedir. Kutup bölgelerde gerçekleştirilecek benzer çalışmalarda bu yöntem kullanılarak uzun periyotlarda buzul bölgelerdeki ve kıyı alanlarındaki değişiklikler izlenebilir. Kar/buzul alanlarındaki ve hacimlerindeki değişiklikler ortaya koyulabilir. Ayrıca buzul yarıkları izlenerek hareket hızları takip edilebilir. Kar/buzul dinamiklerini anlamak, iklim değişikliği ve çevresel değişikliklerin etkilerini daha iyi anlamak için önemli olduğu düşünülmektedir.

Teşekkür

Bu çalışma 121N033 numaralı TÜBİTAK projesi desteğiyle gerçekleştirilmiştir. Çalışmada kullanılan insansız hava aracı verileri, T.C. Cumhurbaşkanlığı himayelerinde, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı uhdesinde, TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi Kutup Araştırmaları Enstitüsü koordinasyonunda düzenlenen 6. Ulusal Antarktika Bilim Seferi sürecinde elde edilmiştir.

Bu çalışma, Prof. Dr. Burak AKPINAR danışmanlığında, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Harita Mühendisliği Anabilim Dalı, Uzaktan Algılama ve Coğrafi Bilgi Sistemleri Programı, Yüksek Lisans öğrencisi Esra GÜNAYDIN tarafından gerçekleştirilen "Buzul Alanlarda İnsansız Hava Aracı Verileri ile Üretilen Fotogrametrik Ürünlerin Konumsal Doğruluğunun İncelenmesi" başlıklı ve 807023 Tez No'lu yüksek lisans tezinden üretilmiştir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %10

Kaynaklar

- [1] J. Turner and G. J. Marshall, Climate change in the polar regions. Cambridge University Press, UK, 2011.
- [2] IPCC, IPCC Sixth Assessment Report: Impacts, Adaptation and Vulnerability. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/>, Accessed 5 May 2024.
- [3] D. Jayaram, Geopolitics, Environmental Change and Antarctic Governance: A Region in Need of a Transformative Approach to Science Diplomacy. in Assessing the Antarctic Environment from a Climate Change Perspective, N. Khare, Ed., Earth and Environmental Sciences Library., Cham: Springer International Publishing, 2022, pp. 1-17. https://doi.org/10.1007/978-3-030-87078-2_1
- [4] J. Turner and J. Overland, Contrasting climate change in the two polar regions, Polar Res., 28(2), 146-164, 2009. <https://doi.org/10.1111/j.1751-8369.2009.00128.x>
- [5] A. Bhardwaj, P. K. Joshi, L. Sam and Snehmani, Remote sensing of alpine glaciers in visible and infrared wavelengths: a survey of advances and prospects, Geocarto Int., 31 (5), 557-574, 2016. <https://doi.org/10.1080/10106049.2015.1059903>
- [6] R. Ramsankaran, P. J. Navinkumar, A. Dashora and A. V. Kulkarni, UAV-Based Survey of Glaciers in Himalayas: Challenges and Recommendations. J.

- Indian Soc. Remote Sens., 49 (5), 1171-1187, 2021. <https://doi.org/10.1007/s12524-020-01300-7>
- [7] K. Lamsters, J. Karušs, M. Krievāns and J. Ješkins, High-resolution orthophoto map and digital surface models of the largest Argentine Islands (the Antarctic) from unmanned aerial vehicle photogrammetry. *J. Maps*, 16 (2), 335-347, 2020. <https://doi.org/10.1080/17445647.2020.1748130>
- [8] A. Lucieer, D. Turner, D. H. King and S. A. Robinson, Using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) to capture micro-topography of Antarctic moss beds. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinformation*, 27, 53-62, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2013.05.011>
- [9] P. Pina and G. Vieira, UAVs for science in Antarctica, *Remote Sens.*, 14 (7), 1610, 2022. <https://doi.org/10.3390/rs14071610>
- [10] M. Dałbski, A. Zmarz, P. Pabjanek, M. Korczak-Abshire, I. Karsznia and K. J. Chwedorzewska, UAV-based detection and spatial analyses of periglacial landforms on Demay Point (King George Island, South Shetland Islands, Antarctica). *Geomorphology*, 290, 29-38, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.03.033>
- [11] G. Tarca, M. Guglielmin, P. Convey, M. R. Worland and N. Cannone, Small-scale spatial-temporal variability in snow cover and relationships with vegetation and climate in maritime Antarctica. *Catena*, 208, 105739, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105739>
- [12] J. Tomašík, M. Mokroš, P. Surový, A. Grznárová and J. Merganič, UAV RTK/PPK method—an optimal solution for mapping inaccessible forested areas?. *Remote Sens.*, 11 (6), 721, 2019. <https://doi.org/10.3390/rs11060721>
- [13] T. Tarık ve T. ÖCALAN, PPK GNSS sistemine sahip insansız hava araçları ile elde edilen fotogrametrik ürünlerin doğruluğunun farklı yaklaşımlarla irde lenmesi, *Türkiye Fotogram. Derg.*, (1), 22-28, 20 20.
- [14] P. Martínez-Carricondo, F. Agüera-Vega and F. Carvajal-Ramírez, Accuracy assessment of RTK/PPK UAV-photogrammetry projects using differential corrections from multiple GNSS fixed base stations. *Geocarto Int.*, 38 (1), 2197507, 2023. <https://doi.org/10.1080/10106049.2023.2197507>
- [15] D. P. Bliakharskii and I. V. Florinsky, Unmanned aerial survey for modelling glacier topography in Antarctica: first results. *Proceedings of the 4th International Conference on Geographical Information Systems Theory, Applications and Management*, 319-326, 2018.
- [16] T. R. Chudley, P. Christoffersen, S. H. Doyle, A. Abellan, ve N. Snooke, High-accuracy UAV photogrammetry of ice sheet dynamics with no ground control, *The Cryosphere*, 13(3), 955-968, 2019. <https://doi.org/10.5194/tc-13-955-2019>
- [17] Belloni vd., High-resolution high-accuracy orthophoto map and digital surface model of Forni Glacier tongue (Central Italian Alps) from UAV photogrammetry”, *J. Maps*, 19(1), 2217508, 2023. <https://doi.org/10.1080/17445647.2023.2217508>
- [18] L. Tang, G. Qiao, B. Li, X. Yuan, H. Ge and S. Popov, GNSS-supported direct georeferencing for UAV photogrammetry without GCP in Antarctica: a case study in Larsemann Hills. *Mar. Geod.*, 1-28, 2024. <https://doi.org/10.1080/01490419.2024.2316089>
- [19] I. Owens ve P. Zawar-Reza, *Weather and Climate, içinde Exploring the Last Continent: An Introduction to Antarctica*, D. Liggett, B. Storey, Y. Cook, ve V. Meduna, Ed., Cham: Springer International Publishing, 91-114, 2015.
- [20] NSF, Ice Sheets, <https://www.nsf.gov/geo/opp/antarct/science/icesheet.jsp>, Accessed 19 Sep 2024.
- [21] N. Mölg ve T. Bolch, Structure-from-Motion Using Historical Aerial Images to Analyse Changes in Glacier Surface Elevation, *Remote Sens.*, 9(10), 10, 2017. <https://doi.org/10.3390/rs9101021>
- [22] C. Yıldırım, Geomorphology of Horseshoe Island, Marguerite Bay, Antarctica. *J. Maps*, 16(2), 56-67, 20 20. <https://doi.org/10.1080/17445647.2019.1692700>
- [23] A. E. Frazier and K. K. Singh, *Fundamentals of capturing and processing drone imagery and data*. CRC Press, USA, 2021
- [24] E. Ferrer-González, F. Agüera-Vega, F. Carvajal-Ramírez and P. Martínez-Carricondo, UAV photogrammetry accuracy assessment for corridor mapping based on the number and distribution of ground control points. *Remote Sens.*, 12 (15), 2447, 2020. <https://doi.org/10.3390/rs12152447>
- [25] B. Ruzgienė, T. Berteška, S. Gečyte, E. Jakubauskienė and V. Č. Aksamitauskas, The surface modelling based on UAV Photogrammetry and qualitative estimation. *Measurement*, 73, 619-627, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2015.04.018>
- [26] A. S. Pillai, S. Mahato, M. Goswami, P. Banerjee and A. Bose, Potential of GNSS Post Processing Kinematic (PPK) Technique for Test Range Surveying Applications using Compact, Low Cost GNSS Modules. 2022 URSI Regional Conference on Radio Science (USRI-RCRS), 1-4, 2022. <https://doi.org/10.23919/URSI-RCRS56822.2022.10118459>
- [27] S. Del Pizzo, A. Angrisano, P. Aucelli, G. Cappello, G. Mattei and S. Troisi, Coastal monitoring assessment using a low-cost PPK-UAV setup for photogrammetric survey. 2023 IEEE International Workshop on Metrology for the Sea; Learning to Measure Sea Health Parameters (MetroSea), 187-191, 2023. <https://doi.org/10.1109/MetroSea58055.2023.10317484>
- [28] Emlid, How PPK works. <https://docs.emlid.com/reach/tutorials/basics/ppk-introduction/>, Accessed 10 May 2024.
- [29] Dji, <https://www.dji.com/global/support/product/phantom-4-pro>, Accessed 19 Sep 2024.

