

Yer Kontrol Nokta (YKN) Sayısı ve Dağılımının Harita Üretim Hassasiyetine Etkisinin Araştırılması

Volkan İzci¹, Ali Ulvi^{2*}, Abdurahman Yasin Yiğit²

*¹ Mersin Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Uzaktan Algılama ve CBS Anabilim Dalı, MERSİN
² Mersin Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Harita Mühendisliği, MERSİN

(Alınış / Received: 07.05.2024, Kabul / Accepted: 01.08.2024, Online Yayınlanma / Published Online: 30.08.2024)

Anahtar Kelimeler

YKN,
SfM,
Fotogrametri,
İHA fotogrametrisi,

Öz: Bu çalışma, İHA fotogrametrisi kullanılarak harita üretiminde YKN sayısı ve dağılımının doğruluk üzerindeki etkilerini incelemektedir. Çalışmada, dört farklı YKN dağılım senaryosu (kenar, merkez, homojen ve köşegen) değerlendirilmiştir. Her bir senaryoda YKN sayısının 4'ten 40'a kadar değiştiği toplam 52 alt senaryo uygulanmıştır. SfM algoritması kullanılarak üretilen ortofoto ve SYM doğruluğu, GNSS Cors yöntemi ile ölçülen 30 yer kontrol noktası kullanılarak analiz edilmiştir. Doğruluk değerlendirmesinde RMSE_{xy} ve RMSE_z değerleri hesaplanmış ve YKN sayısı ile dağılımının planimetrik (xy) ve yükseklik (z) doğruluğuna etkileri incelenmiştir. Elde edilen bulgular, en iyi planimetrik doğruluğun kenar ve homojen dağılımlarla sağlandığını, en düşük RMSE_{xy} değerinin 3.2 cm ile kenar dağılımda ve 4.0 cm ile homojen dağılımda elde edildiğini göstermektedir. Yükseklik doğruluğunda ise en düşük RMSE_z değeri 4.0 cm ile homojen dağılımda ve 4.7 cm ile kenar dağılımda tespit edilmiştir. Merkezi dağılım senaryolarında doğruluk oranlarının diğer senaryolara göre daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Çalışmanın bulguları, YKN sayısının artırılmasının doğruluk oranlarını artırdığını, ancak belirli bir noktadan sonra bu artışın sınırlı kaldığını ortaya koymaktadır. Özellikle 24-30 YKN aralığında hata oranlarının durağan hale geldiği tespit edilmiştir.

Investigation of the Effect of the Number and Distribution of Ground Control Point (GCP) on Map Production Accuracy

Keywords

GCP,
SfM,
Photogrammetry,
UAV Photogrammetry

Abstract: This study examines the impact of varying the number and distribution of GCPs on the precision of map production via UAV photogrammetry. In the study four distinct GCP distribution scenarios were evaluated. In each scenario, a total of 52 sub-scenarios were applied, with the number of GCPs varying from 4 to 40. The accuracy of the orthophoto and DSM produced using the SfM algorithm was evaluated through the analysis of 30 check points, which were measured using the GNSS cors method. To assess the accuracy, the RMSE_{xy} and RMSE_z values were calculated. Furthermore, the impact of the number and distribution of the GCPs on the planimetric (xy) and elevation (z) accuracy was analyzed. The findings indicate that the optimal planimetric precision is attained with edge and homogeneous distributions. The lowest RMSE_{xy} value was observed to be 3.2 cm with edge distribution and 4.0 cm with homogeneous distribution. About the accuracy of the elevation data, the lowest RMSE_z value was observed for the homogeneous distribution, at 4.0 cm, while the lowest value for the edge distribution was 4.7 cm. It was observed that the accuracy rates were lower in the central distribution scenarios in comparison to the other scenarios. The findings of the study indicate that an increase in the number of GCPs results in enhanced accuracy rates; however, this improvement is observed to plateau at a certain point. Within the range of 24-30 GCPs, the error rates were observed to reach a point of stabilization.

*İlgili Yazar, email: aliulvi@mersin.edu.tr

1. Giriş

Ortofotolar ve sayısal yüzey modelleri (SYM) dahil olmak üzere yüksek çözünürlüklü topografik verilerin erişilebilirliği, topografik özelliklerin kapsamlı bir şekilde anlaşılmasını gerektiren çok sayıda mühendislik disiplini için giderek daha önemli hale gelmektedir [1]. Topografik haritaları oluşturmak için fotoğrafların kullanılması ile fotografik görüntülerin analizi ve ölçülmesi yoluyla coğrafi bilgi elde etme süreci olan fotogrametri yöntemi de kullanılmaya başlanılmıştır [2, 3]. Fotogrametrik yöntemin sürekli gelişmesi ve çeşitlenmesiyle ürün üretiminde süre, maliyet ve doğruluğun hassasiyeti bakımından önemli bir avantaj sağlanmıştır. Klasik hava fotogrametrisinde, başta hava kameraları olmak üzere kullanılan ekipmanlar açısından, ürün meydana gelinceye kadarki süreç oldukça maliyetlidir [3, 4].

Harita üretiminde her ne kadar zaman ve maliyet çok önemli kriter olsa da konum doğruluğu hepsinden önemlidir. İHA fotogrametrisinde de konum doğruluğunu olumlu ya da olumsuz etkileyen bazı etkenler bulunmaktadır. Yer kontrol noktası (YKN) sayısı ve dağılımı, uçuş yapılacak yükseklik, yer örnekleme aralığı (YÖA), meteorolojik koşullar ve kamera özellikleri bu etkenlerin başında gelmektedir [2-5]. İnsansız hava araçları (İHA'lar), geleneksel hava ve uydu sensörlerine kıyasla daha düşük maliyetleri, yüksek zamansal ve mekânsal çözünürlükleri ve görüntü alımındaki esneklikleri nedeniyle uygun bir alternatif olarak ortaya çıkmıştır [6-8]. İHA'lardan elde edilen görüntülerin işlenmesine yönelik mevcut yazılım uygulamalarının çoğu hareket tabanlı yapısal algılama (Structure from Motion/SfM) yaklaşımına dayanmaktadır [9-11]. Bu yaklaşım, herhangi bir kontrol noktasına ihtiyaç duymadan kolinearite denklemlerini çözmesi ve böylece keyfi bir koordinat sisteminde seyrek nokta bulutu ve tam bir kamera kalibrasyonu sağlamasıyla geleneksel dijital fotogrametriden farklıdır [11, 12]. Bu, görüntü özelliklerinin korelasyonu, benzerliği ve tekdüzeliğinin analizi yoluyla "anahtar noktalar" olarak adlandırılan benzer görüntü öğelerini otomatik olarak tanımlayan görüntü eşleştirme algoritmaları ile mümkün olmaktadır [13]. SfM, yoğun bir nokta bulutu elde etmek için eşleşen anahtar noktaların seyrek kümesini genişletmek için yinelemeli bir süreç kullanan çoklu görüntü stereo (Multi View Stereo/MVS) algoritmaları ile birleştirilir. YKN'ler, görüntülerin düzeltilmesi sırasında hem fotogrametride hem de uzaktan algılamada görüntü koordinat sistemi ile yer koordinat sistemi arasındaki bağlantıyı sağlar. Bu amaçla görüntülerin çekildiği kameraların kalibrasyon bilgilerinden ve YKN'lerden yararlanır [9, 10, 12]. Bu YKN'ler kalıcı yer özellikleri veya uçuştan önce araştırılacak alana dağıtılmış referans hedefler olabilir. Bu noktaların ham görüntülerde doğru bir şekilde konumlandırılması ve tanımlanması çok önemlidir [4-7]. Üretilen harita veya yükseklik modellerinin gerçek dünya koordinat sistemi ile uyumlu hale getirilmesini ifade eden coğrafi referanslama veya coğrafi konumlandırma işlemi tamamlamak için en az üç YKN gereklidir [9-12, 17]. Ancak, elde edilen fotogrametrik ürünlerin hassasiyetini artırmak için daha fazla sayıda YKN kullanılması şiddetle teşvik edilmektedir [11-13]. YKN kullanımının fotogrametrik ürünlerin doğruluğunu doğrudan etkilediği göz önüne alındığında, yıllar içerisinde birçok araştırmacı YKN sayısını değiştirerek İHA görüntülerinden elde edilen ürünlerin doğruluğunu değerlendirmek için çeşitli çalışmalar gerçekleştirmişlerdir.

Erdoğan ve Mutluoğlu [14], nokta konum doğruluğunu DJI Phantom 3 Pro ile çekilen fotoğraflardan nokta bulutu ve ortofoto üretirek araştırmışlardır. Çalışma alanında İHA kullanılarak 50m ve 80m yüksekliklerden %70-%80 oranında bindirmeli görüntüler elde edilmiştir. Görüntüler fotogrametrik olarak değerlendirilmiş, sonuçta elde edilen noktaların konum değerleri ile, RTK-GPS ölçme tekniğiyle elde edilmiş olan nokta konum değerlerini karşılaştırmışlardır. Kurban ve arkadaşları [15], standartlara uygun döner kanatlı, konumlandırma sistemli ve oto pilot destekli bir hava aracı kullanarak (600m x 800m) çalışma alanının 100m irtifadan bindirmeli olarak yüksek çözünürlüklü görüntüsünü almışlardır. Görüntüler SfM algoritması ile fotogrametrik olarak işlenmiş ve çalışma alanının çok yüksek konumsal çözünürlüğü olan ortofoto ve sayısal arazi modeli (SAM) verisi oluşturulmuştur. Yapılan kontrollerin sonucunda, oluşturulan ortofotoya ait 2B konumsal doğruluk 6cm ve SAM verisinin yüksekliğine ait doğruluk ise 8cm mertebesinde olduğu gösterilmiştir. Agüera-Vega ve arkadaşları [16] uçuş yüksekliğinin, arazi morfolojisinin ve YKN sayısının bir SYM ve ortofoto doğruluğu üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Çalışmaları için, beş arazi morfolojisi, dört uçuş yüksekliği (50, 80, 100 ve 120 m) ve üç farklı YKN'yi (3, 5 ve 10) hesaba katan 60 fotogrametrik proje yürütmüşlerdir. Uçuş yüksekliği ve YKN sayısının en doğru kombinasyonunun sırasıyla 50 m ve 10 YKN olduğunu bulmuşlardır. Çalışmanın sonunda, RMSE değerleri x,y,z için sırasıyla 0.038, 0.035, 0.049 m olarak bulunmuştur.

Özcan [18], İHA kullanılarak yapılan çalışmada farklı yüksekliklerden ile alınan hava görüntülerin ve elde edilen SYM'nin konum doğruluklarının bulunması amaçlamıştır. Yer kontrol noktalarının koordinatları DGPS ile belirlenerek konumsal doğrulama için kullanılmıştır. Çalışmada ayrıca üretilen yoğun nokta bulutlarının doğrulukları arazi ölçmeleri ile karşılaştırılmıştır. Düşeyde İHA ve DGPS ile yapılan ölçümlerde ortalama olarak santimetre seviyesindeki fark dikkat çekmektedir. Yüzeydeki ani değişimlerin olduğu bölgelerde ise daha büyük değerler olduğu gözlenmiştir. Öztürk ve arkadaşları [19], çalışma alanının ortofotolarını üretebilmek için 60m,

80m ve 100m olarak farklı yüksekliklerde uçuşlar gerçekleştirmişler ve 60m ve 80m yükseklik için 90°, 100m yükseklik için 45°, 60° ve 90° olmak üzere farklı kamera açıları kullanarak yüksek çözünürlüklü görüntüler elde etmişlerdir. Sonrasında çalışma alanında önceden jeodezik yöntemle tesis etmiş oldukları 5 yer kontrol noktası ile ortofotoların doğruluklarını kontrol etmişlerdir. Martinez-Carricondo ve arkadaşları [20], İHA fotogrametrisi sonucu ortaya çıkan ürünlerin doğruluğunu etkileyen birçok faktör olduğu ve YKN sayısının ve çalışma alanındaki dağılımının etkisinin özellikle önemli olduğunu vurgulayarak, çalışmalarında İHA fotogrametrisi ile elde edilen ürünleri optimize etmeye çalışmak için farklı YKN dağılımları incelemiştir. Test edilen tüm dağılımlar arasında en iyi sonuçlar kenar dağılımı ve tabakalı dağılım ile elde edildiği sonucuna varmışlardır. Oniga ve arkadaşları [21], yüksek hassasiyetli sonuçlar elde etmek için kaç yer kontrol noktasının gerekli olduğu sorusuna cevap bulmayı amaçlamışlardır. Sonuçları elde etmek için, yaklaşık 1 hektarlık bir alan düşük maliyetli bir İHA ile yerden 28 m ve 35 m olmak üzere iki farklı yükseklikten hava fotoğrafları çekilmiştir. Nihai ürünlerde yüksek doğruluk elde etmek için 1 YKN/200 m²'lik bir yoğunluğun gerekli olduğu sonucuna varmışlardır. Ferrer-Gonzalez ve arkadaşları [22] çalışmalarını, YKN sayısının ve dağılımının koridor şeklindeki bir çalışma sahasında İHA fotogrametri projelerinin doğruluğunu nasıl etkilediğini değerlendirmek için yapmıştır. Bu amaçla, 2,1 km'lik bir yol üzerinde farklı konfigürasyonlara sahip birkaç proje gerçekleştirilmiş ve YKN olarak kullanılmak üzere 47 nokta ölçülmüştür. Doğruluğu değerlendirmek için, referanslama sürecinden elde edilen Karesel Ortalama Hata (Root Mean Squared Error/RMSE) değerleri kullanılmıştır. İncelenen tüm dağılımlar için, YKN sayısındaki artışla birlikte yatayda ve düşeyde doğruluk artmış ve planimetrik (yatay) doğruluk her zaman dikey doğruluktan daha iyi olduğunu belirtmişlerdir.

Ayrıca, Martínez-Carricondo ve arkadaşları [23], 22 hektarlık bir yüzeyde İHA fotogrametrisi ile elde edilen ürünlerin kalitesi üzerinde YKN'lerin değişen sayı ve dağılımlarının etkisi araştırılmıştır. Bulgular, çalışma alanı çevresinde yer alan YKN'lerin bu alan içinde tabakalı bir dağılımla birleştirilmesiyle daha hassas sonuçlar elde edildiğini göstermiştir. Tahar [24], YKN sayısı ve dağılımının 150 hektarlık bir alanın SYM ve ortofotosunun hassasiyeti üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Yukarıda bahsedilen çalışmalarda benzer sonuçlara ulaşılmış ve en uygun YKN oranı olarak 0,5 ila 1 YKN ha⁻¹ konsantrasyonu önerilmiştir. Reshetyuk ve Mårtensson [25], 2,73 hektarlık bir alana dağıtılan farklı YKN konfigürasyonlarının İHA fotogrametri çıktılarının hassasiyeti üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Optimum konsantrasyon, tüm yüzey boyunca eşit olarak dağıtılan hektar başına 1,8 YKN olarak belirlenmiştir. Sanz-Ablanado ve arkadaşları [26] tarafından, kabaca kare şeklinde olan 1225 hektarlık bir kömür madeni bölgesinde YKN'lerin sayısının ve konumlandırılmasının etkisini belirlemek için kapsamlı bir çalışma yürütülmüştür. Çalışmaya 3465 farklı kombinasyon dahil edilmiştir. Sonuçlar, YKN sayısı arttıkça doğruluğun ne ölçüde iyileştiğinin YKN'lerin konumuna bağlı olduğunu göstermektedir. James ve Robson [27], 50 × 3 m boyutlarındaki bir kıyı uçurumunun erozyonunu incelemek için SfM ve MVS tekniklerini kullanmışlardır. Ölçek referanslama amacıyla 8 YKN kullanmışlar, ancak YKN sayısının veya dağılımının SYM doğruluğu üzerindeki etkisini araştırmamışlardır. Ayrıca, yazarlar doğruluğu değerlendirmek ve YKN'lerin potansiyel etkisini tespit etmek için kontrol noktaları (KN) kullanmamışlardır. Bu yaklaşım, doğruluğu tahmin etmek ya da YKN sayısından etkilenip etkilenmediğini belirlemek için uygun değildir.

Yukarıda bahsedilen çalışmalar, İHA fotogrametrisi yoluyla elde edilen SYM ve ortofotoların doğruluğunun, kullanılan YKN sayısına ve bunların çalışma alanı boyunca dağılımına bağlı olduğu konusunda hemfikirdir. Ayrıca, optimum bir şekilde dağıtılmaları koşuluyla, YKN sayısı arttıkça elde edilen modelin doğruluğu da artmaktadır. Bununla birlikte, kullanılabilir YKN sayısında bir sınır vardır ve bunun ötesinde doğrulukta daha fazla gelişme sağlanamaz. Ayrıca, saha çalışmasıyla ilgili maliyetlerin kullanılan YKN sayısı ile arttığı göz önüne alındığında, istenen doğruluk düzeyini minimum saha çalışması maliyetiyle dengelemek gerekir. Fakat çalışmalara bakıldığında birçoğunun gayri meskûn sahalarda veya boş kullanılan arazilerde yapıldığı görülmektedir. Her ne kadar üretilen haritaların doğruluğunu etkileyen parametreler yukarıda detaylı olarak verilse de kentsel alanlardaki çevresel ve fiziksel etkenler de doğruluğu etkilemektedir. Bu yüzden bu çalışmanın amacı, meskûn bir alanda fotogrametrik projede doğruluk ve saha çalışması arasındaki dengeyi optimize eden YKN sayısını ve dağılımını belirlemektir. Bu amaca ulaşmak için, 722 saha üzerinde bir İHA fotogrametri projesi yürütülmüştür. 40 noktanın koordinatları GNSS alıcısı kullanılarak bir santimetre hassasiyetle ölçülmüştür. Her biri farklı sayıda ve dağılımda YKN içeren toplam 4 senaryo geliştirilmiştir.

2. Materyal ve Metot

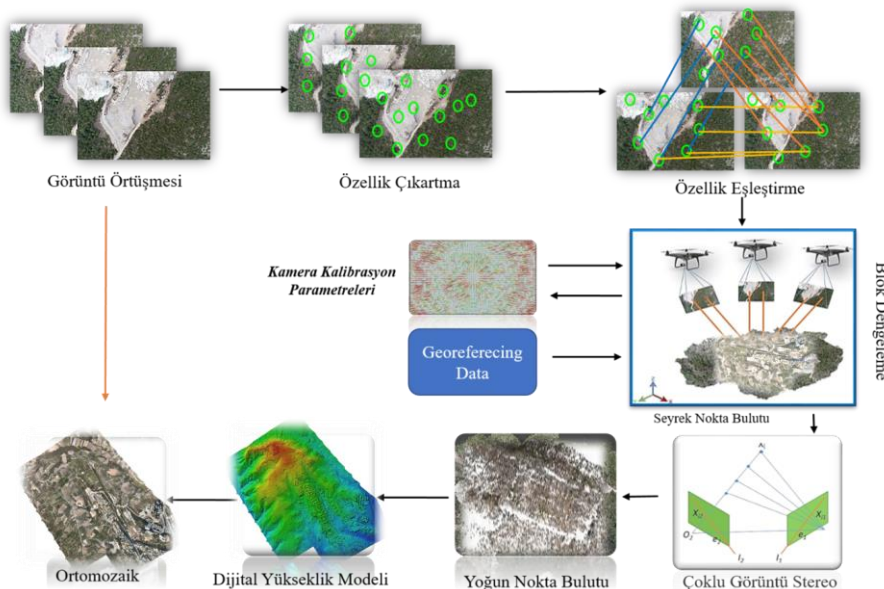
Çalışmanın bu bölümünde ilk olarak dijital çıktılarının oluşturulduğu SfM algoritması ile fotogrametrik süreç hakkında bilgiler verilecektir. Daha sonra çalışma alanı, kullanılan donanımlar, YKN ve KN dağılımı ve verilerin işlenmesi, uçuş planlaması verilmiştir.

2.1. Structure-from-Motion (SfM) Fotogrametri

Uzun yıllardır kullanılan fotogrametri tekniği temelde fotoğraf çekim konumuna göre hava fotogrametrisi ve yersel fotogrametri olmak üzere ikiye ayrılmaktadır [24, 28-]. Hava fotogrametrisi genellikle çok büyük alanların topografik haritalarının yapılması için tercih edilirken yersel fotogrametri daha çok objelerin 3B modellenmesi üzerine kullanılmaktadır. Zaman içerisinde hava fotogrametrisi ve yersel fotogrametri yönteminin boşluklarını doldurmak için farklı alternatif veri toplama teknikleri araştırılmaya yönelim olmuştur [28-30]. Bu yönelim özellikle zaman ve maliyet konusunda avantaj sağlayan İHA'ların fotogrametriye adaptasyon sürecini hızlandırmıştır. Buna bağlı olarak İHA fotogrametrisi literatürde yer almaya başlamıştır [30-32]. İHA fotogrametrisi, genel olarak içerisinde herhangi bir insan taşımadan otonom veya manuel olarak kontrol edilebilen bir hava aracına entegre edilen kamera ile çekilmiş fotoğraflar kullanılarak yapılan fotogrametrik sürecin genel tanımıdır [28]. Bu bağlamda İHA fotogrametrisi ile özellikle yeni gelişen fotoğraf işleme teknikleri birçok disiplin tarafından farklı çalışmalarının gözdesi haline gelmiştir ([32, 33]. Gelişen veri toplama yöntemlerinin yanından dijitalleşme ile birçok fotogrametrik yazılımlarda kullanılmaya başlanılan SfM gibi özel algoritmalar İHA'lardan elde edilen fotoğrafların fotogrametride kullanılmasında hızlı pratik ve yüksek hassasiyette sonuçlar alınmasında önemli katkılar sağlamıştır.

SfM, fotoğrafların kamera parametrelerini, pozisyonları ve görüntülerdeki nesnenin üç boyutlu (3B) geometrilerinin otomatik olarak düzenlenmesini sağlayarak 3B model oluşturulmasını mümkün kılan görüntü temelli bir modelleme tekniğidir [29]. Geleneksel fotogrametri teknikleri, geometrik model oluşturabilmek için kamera ile YKN hassasiyeti yüksek 3B konum ve yönlendirme bilgilerine ihtiyaç duyar. [32] Oysa hareket tabanlı yapısal algılama yönteminde model geometrisi, kamera pozisyonu ve yönlendirme bilgisi aynı anda ve otomatik olarak çözülmektedir [32]. Üç boyutlu uzayda bir noktanın kesin konumunun belirlenmesi için gerekli hesaplamaların tam otomatik yapılması ve kameraların hassas bir şekilde konumlandırılmasına duyulan ihtiyacın ortadan kalkması [28, 32] geleneksel stereoskopik fotogrametri ile SfM yöntemi arasındaki temel fark olarak söylenebilir.

SfM algoritmasının kullanılması ile geleneksel kameralarla çekilen fotoğraflardan 3B modellerin oluşturulması ve yüzeylerin yeniden yapılandırılması önemli ölçüde basitleşmiştir [34]. Algoritma, üst üste binen görüntülerdeki standart özellikleri tanımlayıp hizalayarak 3B yapılar oluşturmaktadır. SfM algoritması, stereoskopik fotogrametride kullanılanlara benzer fikirlere dayansa da [35] 3B uzaydaki noktaların kesin koordinatlarının hesaplanmasını otomatikleştirerek stereoskopik fotogrametriden ayrılır. Stereoskopik fotogrametrisinin aksine, SfM algoritması için mükemmel bir kamera kurulumuna gerek yoktur [32, 35]. SfM algoritması kullanan yazılımlar, çok sayıda fotoğraftan ortak noktaları otomatik olarak çıkararak ve seyrek bir nokta bulutu oluşturan yöntemler üzerine kuruludur [37]. Radyometrik piksel değerlerini kullanan ölçekten bağımsız özellik dönüşüm (Scale Invariant Feature Transform/SIFT) algoritması, bu işlem için birincil algoritma olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [38, 39]. SfM sürecinde ilk olarak üretilen seyrek nokta bulutunda sonra ek bir aşama olarak yoğun nokta bulutu oluşturulur. Bu aşamada yoğun çoklu görüntü stereo (Dense Multi View Stereo/DMVS) tekniği uygulanmaktadır [40]. Burada, haritalanan pikseller ve bunlara karşılık gelen 3B koordinatlar nokta bulutlarına dönüştürülür. Daha sonra, bu nokta bulutları bir ağ modeli oluşturmak için kullanılır. Perry vd. [41] göre, fotoğraflar modele özgün bir doku kazandırır. Son olarak isteğe bağlı olarak yüksek çözünürlüklü ortofoto ve yükseklik haritaları üretilir. SfM algoritması genel iş akışı Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. SfM İşlem Adımları ([45]'ten dizayn edilmiştir).

2.2. Materyal

Çalışmada hava fotoğraflarının çekilmesi için Matrice 300 RTK İHA kullanılmıştır. DJI Matrice 300 RTK, Temmuz 2021'de piyasaya sürülen dört eksenli bir İHA platformudur. Üreticinin özelliklerine göre platformun net ağırlığı 8,37 kg ve boyutları 810 × 670 × 430 mm (U × G × Y) ve pil ömrü 55 dakikadır. Üreticinin özelliklerine göre platformun net ağırlığı 8,37 kg ve boyutları 810 × 670 × 430 mm'dir (U × G × Y). İHA, GPS Navstar, Glonass, BeiDOU ve Galileo sistemleriyle uyumlu bir GNSS RTK alıcısıyla donatılmıştır. İki GNSS RTK anteni kanatlara yerleştirilmiştir ve İHA'nın konumu sanal referans istasyonlarının kullanımıyla belirlenir. DJI MATRICE 300 RTK, D-RTK modunda $\pm 0,1$ m'lik dikey ve yatay gezinme doğruluğuna (rüzgârsız veya esintili) sahiptir [42]. Çalışmada kullanılan İHA Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. Matrice 300 RTK Görseli [43]

İHA, Zenmuse P1 drone kamerası 3 eksenli stabilize bir gimbal üzerinde değiştirilebilir sabit odaklı lensler ile tam çerçeve sensörü entegre eden bir cihazdır. Aynı zamanda fotogrametri uçuş görevleri adına tasarlanmış olup performansı ve doğruluğu çok yeni bir düzeye taşımaktadır. P1, uçuş esnasında her 0.7 saniyede bir fotoğraf çekebilen ve tek bir uçuşta 3 km² kapsayan tam çerçeve, az gürültülü yüksek hassasiyetli bir sensör içermektedir. Kullanılan İHA'nın fotogrametrik amaçlı son teknoloji donanımları kullanılması çalışmada İHA seçiminde etkilemiştir.

YKN ve KN'lerin ölçülmesi ve koordinatlandırılması işleminde TOPCON SR GNSS kullanılmıştır (Şekil 3). Kullanılan GNSS alıcısının Tablo 1'de konumsal doğruluk değerleri verilmiştir.

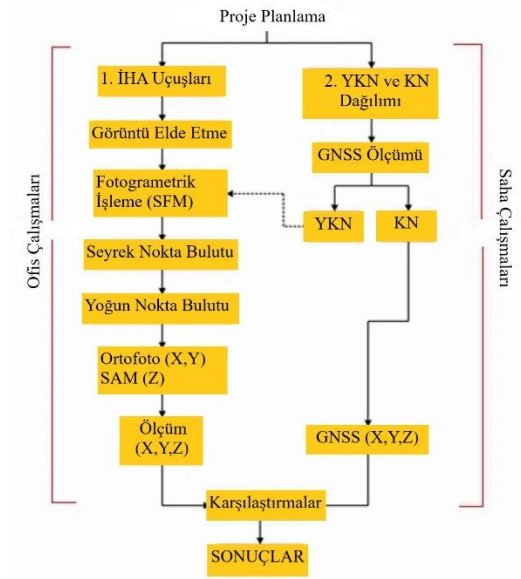


Şekil 3. Topcon SR GNSS alıcısı [44]

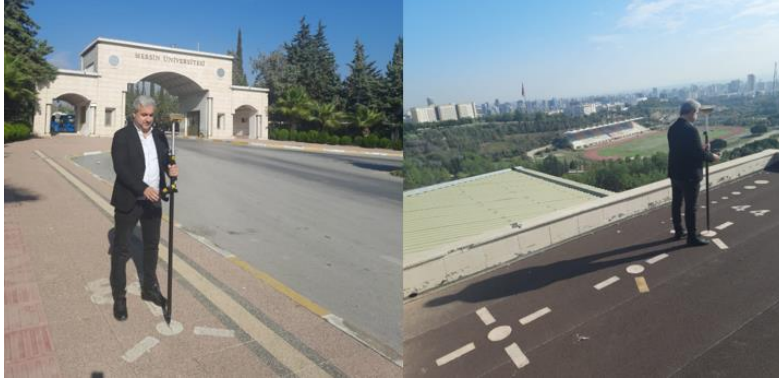
Tablo 1. Topcon SR GNSS konum doğruluk kriterleri

Özellik	Değer
RTK (L1 + L2)	H: 10 mm + 1.0 ppm V: 15 mm + 1.0 ppm
Hızlı Statik (L1 + L2)	H: 3 mm + 0.5 ppm V: 5 mm + 0.5 ppm
DGPS	H: 0.4 m, V: 0.6 m
SBAS	H: 1.0 m, V: 1.5 m

Çalışma iki aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada YKN ve KN'lerin araziye tesis edilmesi, ölçümleri ve uçuş operasyonlarından oluşan saha çalışması. İkinci aşama olarak ise ofis çalışmalarında uçuş görüntülerinin bilgisayara aktarılarak fotogrametrik yazılımla işlenmesi, nokta bulutu oluşturulması, ortofoto ve yükseklik haritalarının üretilmesi işlemleri gerçekleştirilerek analizlerinin yapılmasıdır. Araziye ölçülen KN koordinatları kullanılarak doğruluk analizi ve karşılaştırılması ile çalışma sonlandırılmıştır (Şekil 4). Çalışma alanına tesis edilmiş olan 40 adet YKN ve 30 adet KN, Topcon Hiper SR cihazı kullanılarak GNSS CORS yöntemi ile ölçümleri yapılmıştır (Şekil 5). Uçuş öncesi uçuş planı hazırlanmış ve DJI Matrice 300 RTK İHA'ya DJI Zenmuse P1 kamera monte edilmiştir. Gölge alanlarından kaçınmak için öğle saatlerinde ve rüzgâr etkisinden kaçınmak için elverişli bir günde uçuş gerçekleştirilmiştir. Çalışmamız da YKN sayısı ve dağılımını test etmek istediğimiz için uçuş yüksekliği değiştirilmemiştir.



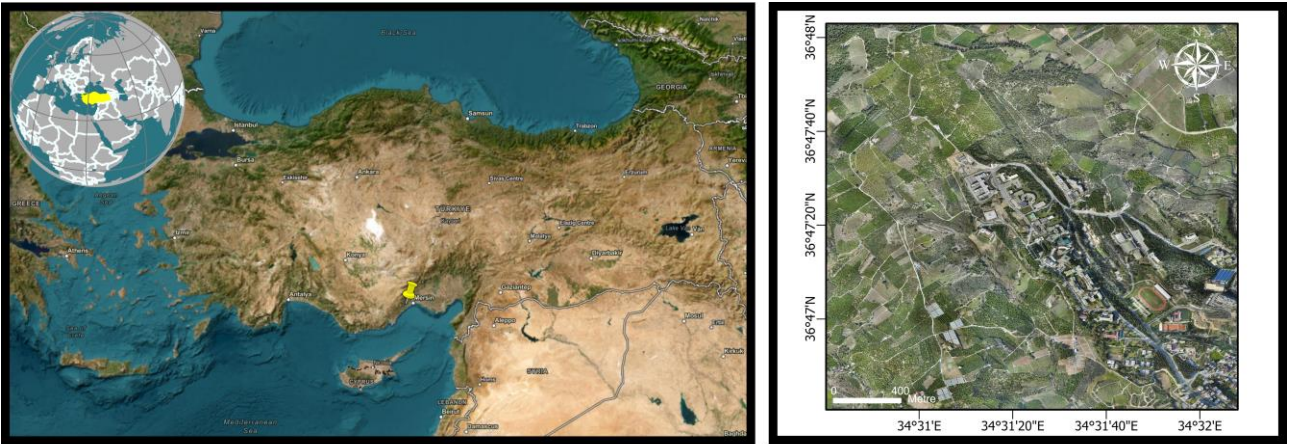
Şekil 4. Yapılan çalışmanın metodolojisi ([4]'ten dizayn edilmiştir)



Şekil 5. YKN çalışma alanına tesisi ve ölçülmesi.

2.3. Çalışma alanı ve YKN/KN Dağılımı

Mersin Üniversitesi Çiftlikköy Kampüsü çalışma alanı olarak seçilmiştir (Şekil 6). Mersin merkez ilçelerinden Yenişehir İlçesi sınırları içerisinde olan Çiftlikköy kampüsü Mersin Üniversitesinin merkez kampüsü olup, yaklaşık 722 ha yüz ölçüme sahiptir.



Şekil 6. Mersin Üniversitesi Kampüsü genel görünümü.

YKN'lerin çalışma alanındaki dağılımında dört senaryo ile test edilmiştir. Her senaryo için tüm YKN ve KN'ler kullanılmıştır. Senaryoların tamamında Şekil 9'da gösterilen KN'ler analiz için kullanılmış olup dengelemede kullanılmamıştır. Yöntemimiz daha net anlaşılması için her senaryo ayrı ayrı anlatılacaktır.

Senaryo 1: İlk senaryo, çalışma alanının kenarlarına yerleştirilen YKN'lerin, merkez alanına yerleştirilen YKN'ler ile desteklenmesidir (Şekil 7 sol).

Senaryo 2: İkinci senaryo, çalışma alanının merkezine yerleştirilen YKN'lerin, çalışma alanının kenarlarına yerleştirilen YKN'ler ile desteklenmesidir (Şekil 7 sağ).

Senaryo 3: Üçüncü senaryo, YKN'lerin çalışma alanına homojen olarak yerleştirilmesidir (Şekil 8 sol).

Senaryo 4: Dördüncü senaryo ise köşeden merkeze çapraz dağılımdır (Şekil 8 sağ).

İlk senaryo için öncelikle 30 adet YKN çalışma alanı çevresine homojen bir şekilde dağıtılmıştır. Fakat kenarlara yapılan bu dağıtım bir bütün olarak değil kademeleri olarak gerçekleştirilmiştir. Kenarlara YKN'lerin eklenmesi sonucunda 8 adet alt senaryo oluşturulmuştur. Daha net bir ifade ile çalışma alanının etrafında sırasıyla 4, 8, 12, 16, 20, 24, 28, 30 adet YKN kullanılmıştır. Daha sonra geriye kalan 10 YKN ise merkez alana ikişer artırarak desteklenmiştir. Toplamda ilk senaryo için 13 alt senaryo oluşturulmuştur.

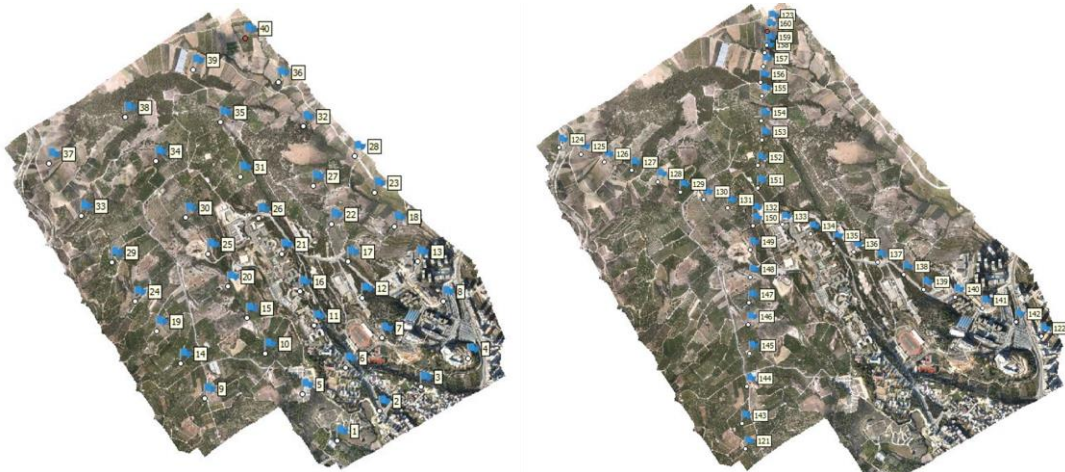
İkinci senaryo için çalışma alanının merkezine 30 adet YKN homojen bir şekilde, kenarlarına ise 10 adet YKN yerleştirilmiştir. Bu senaryo için tasarım ilk senaryonun tam tersidir. Yani 30 adet YKN merkeze kademeli olarak dağıtılmıştır. Daha sonra geriye kalan 10 YKN ikişer artırarak kenarlara yerleştirilmiştir. İkinci senaryo için de 13 alt senaryo oluşturulmuştur.

Üçüncü senaryo için 40 adet YKN çalışma alanına homojen bir şekilde dağıtılmıştır. Bu senaryoda ise ilk olarak 4 YKN ile süreç başlatıldı. Daha sonra ilk iki senaryo gibi artırım işlemi otuz YKN'ye kadar devam etmiştir. Bu YKN sayısından sonra diğer ilk iki senaryo ile uyumlu olması açısından kalan 10 YKN ikişer artırarak senaryo gerçekleştirilmiştir olup toplam 13 alt senaryo sağlanmıştır.

Dördüncü senaryo için ilk olarak arazinin köşegenlerine birer tane olmak üzere 4 YKN yerleştirilmiştir. Ardında her köşegenden başlanarak içeriye (merkeze doğru) dörder YKN artımı sağlanarak 30 YKN ilk iki senaryo gibi yerleştirilmiştir. Geriye kalan 10 YKN ise ikişerli olarak artırımı gerçekleştirilmiş ve bu senaryo içinde toplam 13 alt senaryo sağlanmıştır.



Şekil 7. Senaryo 1 (sol) ve senaryo 2 (sağ) için YKN dağılımı.



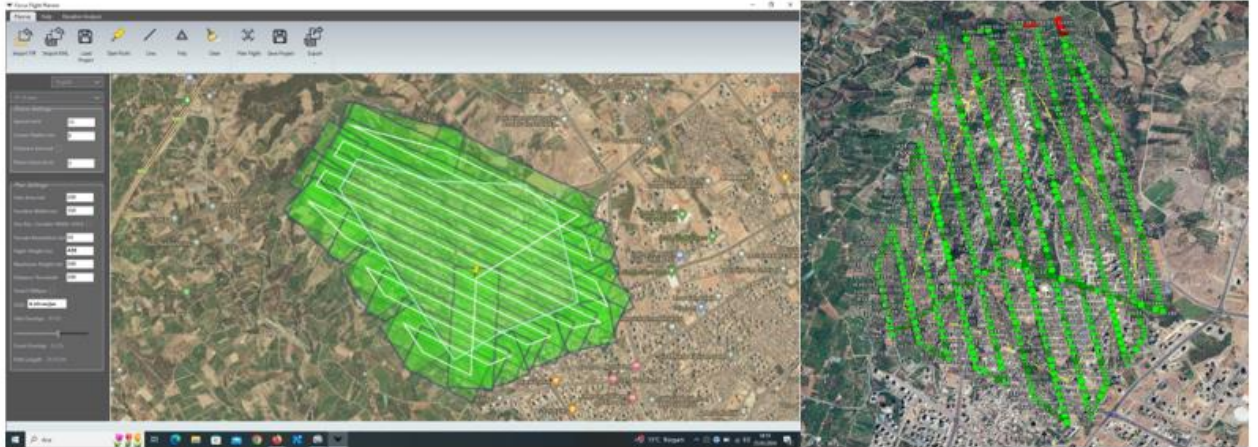
Şekil 8. Senaryo 3 (sol) ve senaryo 4 (sağ) için YKN dağılımı.



Şekil 9. Doğruluk analizi için kullanılan KN dağılımı.

2.4. Uçuş Planlama ve Verilerin İşlenmesi

Çalışma alanının büyüklüğü (722 ha) dikkate alınarak uçuş 5,13 cm/piksel Yer Örnekleme Aralığı (YÖA) olarak planlanmıştır. Uçuş yüksekliği YÖA' ya göre 428 m irtifaya denk gelmektedir. Arazinin büyük olmasından dolayı toplam 5 uçuş gerçekleştirilmiştir. Tüm uçuşlarda boyuna ve enine bindirme oranları sırasıyla %80 ve %60 olarak seçilmiştir. Her uçuş yaklaşık 30 dakika sürmüştür (Şekil 10). Yapılan tüm uçuşlar sonucunda 878 fotoğraf çekilmiştir. Uçuşlara ait bilgiler Tablo 2'de verilmiştir.



Şekil 10. Uçuş planlaması (sol) ve fotoğraf çekim noktaları (sağ).

Tablo 2. Uçuş bilgileri.

Uçuş Numarası	Fotoğraf Sayısı	YÖA (pix/cm)	Uçuş Yüksekliği (m)	Bindirme Oranı (boyuna/enine) %
1	30	5.13	428	80/60
2	31	5.13	428	80/60
3	317	5.13	428	80/60
4	315	5.13	428	80/60
5	185	5.13	428	80/60

2.5. Doğruluk Analizi

Çalışma alanında belirlenen 30 KN koordinatları (X, Y ve Z) GNSS Cors yöntemi ile ölçülmüştür. Bu koordinatlar referans koordinatları olarak kabul edilmiştir. Doğruluk analizinde oluşturulan dijital haritalarının konumsal, geometrik ve yükseklik hassasiyeti incelenmiştir. Bu analiz, çıktıların koordinatlarının KN'ye göre doğruluğunun değerlendirilmesini kapsamaktadır. Referans veriler dijital çıktıların koordinatlarıyla karşılaştırılır ve herhangi bir tutarsızlık hata olarak hesaplanır. Her çalışma için aynı sayıda KN doğruluk analizinde kullanılmıştır. Referans veri ile dijital çıktı haritalarından elde edilen veri arasındaki fark, model konumunun referans noktasından ne kadar uzakta olduğunu göstermektedir. Bu hatayı ölçmek için Karesel Ortalama Hata (Root Mean Squared Error/RMSE) hesaplanmıştır. RMSE değerini hesaplamak için X ve Y için Denklem 1 ve Z için Denklem 2 kullanılmıştır.

$$RMSE_{x,y} = \frac{\sum_{i=1}^n (X_0, Y_0 - X, Y_{GNSS})^2}{n} \quad (1)$$

$$RMSE_z = \frac{\sum_{i=1}^n (Z_0 - Z_{GNSS})^2}{n} \quad (2)$$

Bu denklemlerde

n, her proje için test edilen KN'lerin sayısıdır.

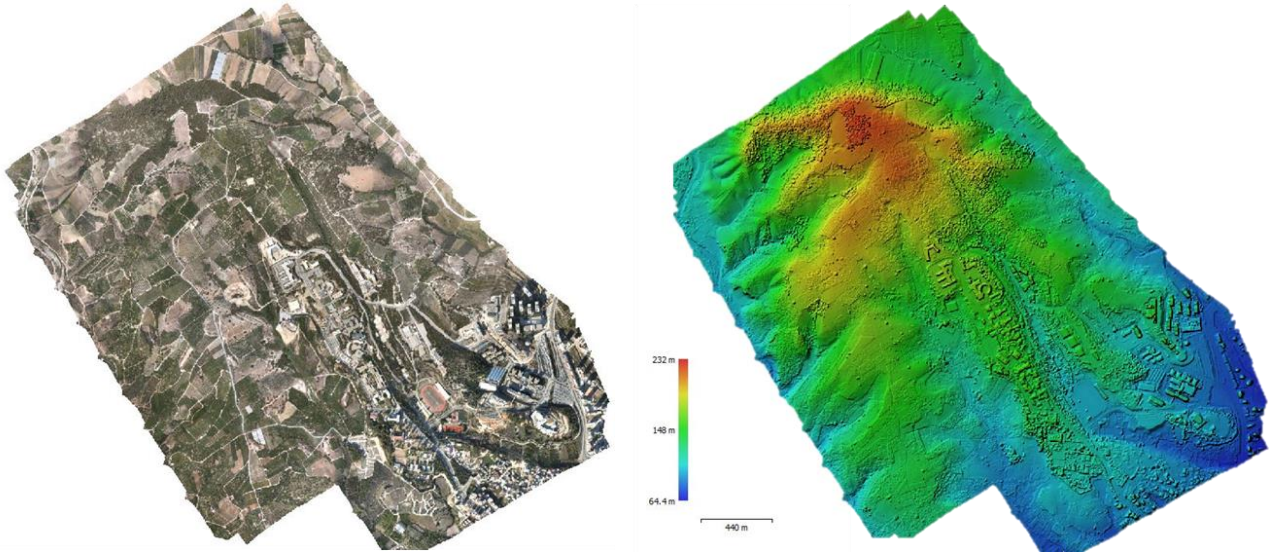
X_0 ve Y_0 sırasıyla x ve y ortofoto koordinatlarıdır.

X_{GNSS} ve Y_{GNSS} x ve y için GNSS Cors koordinatlarıdır.

Z_0 , yükseklik haritasından elde edilen i'nci KN üzerindeki yükseklik verisidir.

3. Bulgular ve Tartışma

Çalışmada fotogrametrik ürünlerin üretimi SfM algoritması ile çalışan Agisoft Metashape yazılımında gerçekleştirilmiştir. Senaryoların tamamı için hizalama işleminde parametreler aynı seçilmiştir. Tüm süreçte en yüksek parametreler ayarlanmıştır. Fotogrametrik süreç sonucunda alana ait üretilen örnek ortofoto ve yükseklik haritası Şekil 11'de verilmiştir. Tüm senaryolar için doğruluk analizleri Tablo 3 ve 4'te verilmiştir. Ayrıca bu senaryoların sonuçlarının grafik dağılımı Şekil 12 ve 13'te verilmiştir.



Şekil 11. Ortofoto harita (sol) ve yükseklik haritası (sağ).

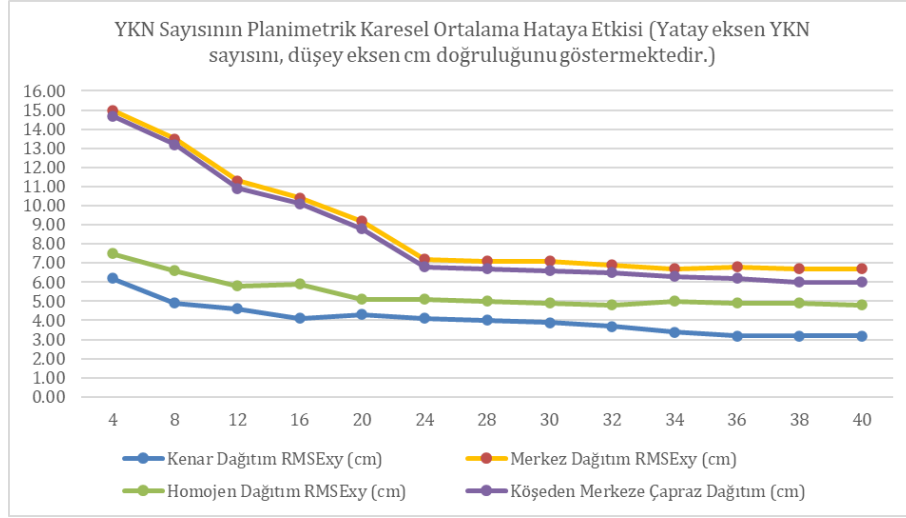
Tablo 3. YKN sayısının ve dağılımının RMSE x,y üzerindeki etkisinin cm olarak sonuçları.

YKN Sayısı	4	8	12	16	20	24	28	30	32	34	36	38	40
Kenar Dağıtım	6.2	4.9	4.6	4.1	4.3	4.1	4	3.9	3.7	3.4	3.2	3.2	3.2
Merkez Dağıtım	15	13.5	11.3	10.4	9.2	7.2	7.1	7.1	6.9	6.7	6.8	6.7	6.7
Homojen Dağıtım	7.5	6.6	5.8	5.9	5.1	5.1	5	4.9	4.8	5	4.9	4.9	4.8
Köşeden Merkeze Çapraz Dağıtım	14.7	13.2	10.9	10.1	8.8	6.8	6.7	6.6	6.5	6.3	6.2	6	6

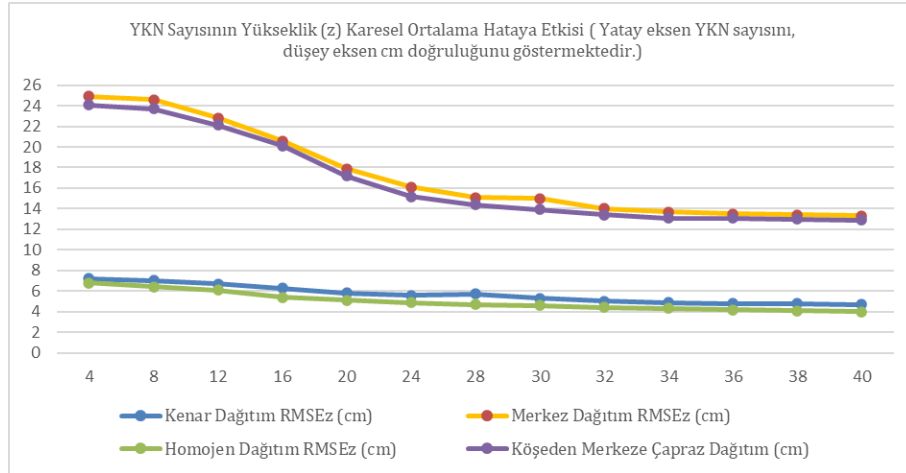
Tablo 4. YKN sayısına göre Yükseklik (z) hata değerleri cm olarak sonuçları.

YKN Sayısı	4	8	12	16	20	24	28	30	32	34	36	38	40
Kenar Dağıtım	7.2	7	6.7	6.3	5.8	5.6	5.7	5.3	5	4.9	4.8	4.8	4.7
Merkez Dağıtım	25	25	23	21	18	16	15	15	14	14	14	13	13

Homojen Dağıtım	6.8	6.4	6.1	5.4	5.1	4.9	4.7	4.6	4.4	4.3	4.2	4.1	4
Köşeden Merkeze Çapraz Dağıtım	24	24	22	20	17	15	14	14	13	13	13	13	13



Şekil 12. YKN sayısının planimetrik (x,y) karesel ortalama hataya etkisinin grafiksel gösterimi.



Şekil 13. YKN sayısının Yükseklik (z) karesel ortalama hataya etkisinin grafiksel gösterimi.

Tablo 3 incelendiğinde en yüksek RMSE değerlerinin 4 YKN alanında elde edildiği, en düşük değerlerin ise 40 YKN için belirlendiği görülmüştür. RMSE_{x,y} değerleri kenar dağılımda 6.20 ile 3.20 cm, merkezi dağılımda 15.00 ile 6.7 cm ve homojen dağılımda 7.5 ile 4.8 cm, köşeden merkeze doğru çapraz dağılımda 14.70 ile 6.00 cm arasında değişmektedir. Yine Tablo 4 incelendiğinde en yüksek RMSE değerlerinin 4 YKN alanında elde edildiği, en düşük değerlerin ise 40 YKN için belirlendiği görülmüştür. RMSE_z değerleri kenar dağılımda 7.20 ile 4.70 cm, merkezi dağılımda 24.90 ile 13.30 cm ve homojen dağılımda 6.80 ile 4.00 cm, köşeden merkeze doğru çapraz dağılımda 24.1 ile 12.90 cm arasında değiştiği görülmektedir. Şekil 12. ve 13'te gösterilen bu değerlere dayanarak, İHA fotogrametrik projelerinde elde edilen SYM'lerin ve ortofotoların doğruluğu üzerinde YKN'lerin sayısının ve dağılımının önemli bir etkiye sahip olduğu söylenebilir. Ortofoto ve SYM planimetrik değişikliklerini gözlemlemek için kenarlara yerleştirilenlere ek olarak merkezi dağılımdaki 10 (on) adet YKN kullanılmıştır. Şekil 12'den görülebileceği gibi 24 ve 30 YKN kullanıldığında hata oranı durağan hale gelmiştir. Çalışma alanının merkezine 2, 4, 6 YKN eklendiğinde hata oranı azalmıştır. Eklenen son 4 YKN de ise hata oranı tekrar durağan hale gelmiştir. Kenar dağılımındaki planimetrik değişimi test etmek için yapılan veri analizi, merkez dağılımdaki YKN'lerin (on YKN) üç katının kenar dağılımı desteğiyle en iyi planimetrik doğruluğun elde edildiğini ortaya konulmuştur. En kötü planimetrik doğruluk merkezi dağılımda gözlenmiştir. YKN 24 ve 30 arasında sabit hale gelen hata oranı, kenar dağılımındaki 10 YKN ile azaltılmıştır. Benzer şekilde ortofoto ve SYM Yükseklik (z) doğruluğundaki değişimi gözlemlemek için kenardakilere ek olarak merkezi dağılımdaki 10 YKN kullanılmıştır. Şekil 13 incelendiğinde YKN 28 ve 30 arasında sabit kalan hata oranının merkezi dağıtımda YKN kullanılmasıyla azaldığı görüldü. Merkezi dağılım analizi, en kötü Yükseklik (z) doğruluğun bu dağılımda gözlemlendiğini göstermiştir. Böylece 28. ve 30. YKN'ler arasında sabit hale gelen hata oranı, kenara yerleştirilen 10 YKN ile azaltılmıştır. Bu dört dağılımda en iyi Yükseklik (z) dağılımı homojen dağılımda elde edilmiştir. Her iki grafiğin incelenmesi, kenar dağılımının planimetrik ve Yükseklik (z) doğruluk üzerindeki etkisinin çok önemli olduğunu göstermiştir.

Literatürde YKN sayısı ve dağılımının İHA fotogrametrisi ile üretilen ortofotolar ve SYM'ler üzerindeki etkisinin analizine odaklanan bazı çalışmalara bakacak olursak; Tahar [24] benzer bir çalışmayı 150 hektarlık bir alanda yapmış ve çalışmada kullanılan YKN'lerin herhangi bir sayı ve dağılımı için planimetrik doğruluğun Yükseklik (z) doğruluktan daha iyi olduğunu bildirmiştir. Ayrıca YKN sayısı arttığında her iki doğruluk rakamının da arttığını belirledi (planimetrik doğruluk 0,49'dan 0,46 m'ye ve Yükseklik (z) doğruluk 0,830'dan 0,780 m'ye). Reshetyuk ve Mårtensson [25] yaptıkları çalışmada 2,73 hektarlık bir alanda farklı YKN varyasyonlarının İHA fotogrametri ürünlerinin doğruluğu üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Çalışmada beş YKN tüm alana eşit olarak dağıtılmış uçuşlar 81 m ve 163 m olmak üzere iki irtifada yapılmıştır. Bu uçuşlar için RMSE değerleri sırasıyla 0,030 m ve 0,080 m idi. Sonuç olarak bu doğruluğu elde etmek için hektar başına 1,8 YKN önermişlerdir. Sanz-Ablanedo vd. [26], büyük projelerde yüksek doğruluk istendiğinde 100 fotoğraf başına üçten fazla YKN kullanılması gerektiğini önermektedir. Önerilen YKN sayıları bu proje için uygulanırsa çok sayıda YKN'ye ihtiyaç duyulacaktır. Arazi araştırmalarında harcanan süreyi kısaltmak ve maliyetten tasarruf etmek amacıyla haritalamada İHA'lar kullanılmaktadır. Önceki çalışmalarda önerilen sayıda YKN'nin mevcut projede kullanılması, İHA'ların haritalamada kullanılma amacının dışına çıkacaktır. Bu çalışma sonucunda diğer benzer çalışmalarla karşılaştırıldığında benzer ve doğru sonuçlar elde edilmiştir.

5. Sonuç

İHA'larla fotogrametrik çalışmalar yapılırken saha çalışmasında en çok zaman alan ve kısıtlayıcı görevlerden biri YKN'lerin konumlandırılmasıdır. Çalışma öncesinde YKN'lerin yerleşimi ve olası hataların büyüklüğünün bilinmesi projeye katkı sağlayabilir. Bu çalışma ile optimum planimetrik doğruluğu elde etmek için YKN'lerin çalışma alanının kenarlarına yerleştirilmesi gerektiğini belirlenmiştir. Ancak bu dağılım, optimum Yükseklik (z) doğruluğa yol açmayabilir. Bu nedenle YKN'lerin bir kısmını çalışma alanının merkezine yerleştirerek güçlendirmek, böylece toplam hatayı en aza indirmek gerekmektedir.

Bu çalışmada, İHA fotogrametrisi ile harita üretiminde YKN sayısı ve dağılımının doğruluk üzerindeki etkisi incelenmiştir. Elde edilen bulgular, YKN sayısının ve dağılımının, üretilen ortofoto ve SYM doğruluğunu önemli ölçüde etkilediğini göstermektedir. Çalışma, farklı YKN senaryolarının kullanıldığı ve her senaryonun doğruluk analizi yapıldığı kapsamlı bir analiz sunmaktadır. En iyi sonuçların kenar ve homojen YKN dağılımıyla elde edildiği gözlenmiştir. Özellikle, 40 YKN kullanılarak yapılan homojen dağılımın, hem planimetrik (xy) hem de yükseklik (z) doğruluğunda en düşük hata oranlarını sağladığı tespit edilmiştir. Merkezi dağılım senaryolarında ise doğruluk oranlarının diğer senaryolara göre daha düşük olduğu belirlenmiştir. Bu durum, YKN'lerin çalışma alanı boyunca dengeli bir şekilde dağıtılmasının, doğruluk üzerindeki olumlu etkisini ortaya koymaktadır.

Araştırmanın sonuçları, İHA fotogrametrisi projelerinde YKN sayısının artırılmasının, doğruluk oranlarını artırdığı, ancak belirli bir noktadan sonra bu artışın sınırlı kaldığını göstermektedir. Bu nedenle, saha çalışmalarının maliyet etkinliği göz önünde bulundurularak, optimum YKN sayısının belirlenmesi ve doğru bir dağılım stratejisinin uygulanması önem arz etmektedir. Sonuç olarak, bu çalışma, İHA fotogrametrisi ile harita üretiminde YKN sayısı ve dağılımının optimizasyonunun, doğruluk ve maliyet etkinliği açısından kritik bir faktör olduğunu ortaya koymakta ve gelecekteki çalışmalar için önemli bir referans noktası sunmaktadır.

Teşekkür

Bu çalışma Mersin Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri tarafından **2021-2-TP2-4527** proje numarası ile desteklenmiştir.

Kaynakça

- [1] Yılmaz, A., Ulvi, H. 2022. Kentsel Hava Sahasında İnsansız Hava Aracı Sistemleri Trafik Yönetimi için Verilmesi Gereken Hizmetler ve Kullanılabilecek Bazı Teknolojiler. Turkey Unmanned Aerial Vehicle Journal 4(1), 8-18.
- [2] Ulvi, H. 2019. Arkeolojik Sit Alanlarında Yapılan Çevre Düzenleme Projelerinin Yürünebilirliğe Etkisinin Araştırılması Değle Ören Yeri Örneği. Journal of International Social Research 12(64), 383-402.
- [3] Ferrer-González, E., Agüera-Vega, F., Carvajal-Ramírez, F., Martínez-Carricondo, P. 2020. UAV photogrammetry accuracy assessment for corridor mapping based on the number and distribution of ground control points. Remote sensing, 12(15), 2447.

- [4] Ulvi, A. 2021. The effect of the distribution and numbers of ground control points on the precision of producing orthophoto maps with an unmanned aerial vehicle. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 20(6), 806-817.
- [5] Agüera-Vega, F., Carvajal-Ramírez, F., Martínez-Carricondo, P. 2017. Assessment of photogrammetric mapping accuracy based on variation ground control points number using unmanned aerial vehicle. *Measurement*, 98, 221-227.
- [6] Westoby, M.J., Brasington, J., Glasser, N.F., Hambrey, M.J., Reynolds, J.M. 2012. Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*, 179, 300-314.
- [7] Harwin, S. 2012. Lucieer, A. Assessing the Accuracy of Georeferenced Point Clouds Produced via Multi-View Stereopsis from Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Imagery. *Remote Sens.*, 4, 1573-1599.
- [8] Hugenholtz, C.H., Whitehead, K., Brown, O.W., Barchyn, T.E., Moorman, B.J., LeClair, A., Riddell, K., Hamilton, T. Geomorphological mapping with a small unmanned aircraft system (sUAS): Feature detection and accuracy assessment of a photogrammetrically-derived digital terrain model. *Geomorphology*, 194, 16-24.
- [9] Yiğit, A. Y., Kaya, Y., Şenol, H. İ. 2023. Açık Maden Ocaklarında İnsansız Hava Aracı (İHA) Kullanımı. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi* 11(1), 225-235.
- [10] Hamal, S.N.G., Ulvi, A. 2022. Türkiye Coğrafi Bilgi Sistemleri Dergisi, 3B Kent Modelleri oluşturma sürecinde İHA fotogrametrisi ve CBS Entegrasyonu: Mersin Üniversitesi Çiftlikköy Kampüsü Örneği, 4(2), 97-105,
- [11] Fonstad, M.A., Dietrich, J.T., Courville, B.C., Jensen, J.L., Carbonneau, P.E. 2013. Topographic structure from motion: A new development in photogrammetric measurement. *Earth Surf. Process. Landf.*, 38, 421-430.
- [12] Snavely, N., Seitz, S.M. 2008. Szeliski, R. Modeling the World from Internet Photo Collections. *Int. J. Comput. Vis.*, 80, 189-210.
- [13] Ao, T., Liu, X., Ren, Y., Luo, R., Xi, J. 2018. An Approach to Scene Matching Algorithm for UAV Autonomous Navigation. In *Proceedings of the 2018 Chinese Control and Decision Conference (CCDC)*, Shenyang, China, 9-11 June, 996-1001.
- [14] Erdoğan, A., Mutluoğlu, Ö. 2020. İnsansız Hava Araçları ile Harita Üretim Çalışmalarında Farklı Yüksekliklerde Yapılan Uçuşların Konum Doğruluğuna Etkisi, *Türkiye İnsansız Hava Araçları Dergisi*, 2(1); 28-35
- [15] Kurban, T., Karkınlı, A.E., Kesikoğlu, A. 2015. Düşük İrtifa Görüntüleme Sistemleri İle Üretilen Haritalarda Konumsal Doğruluğunun İncelenmesi, *Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi*.
- [16] Agüera-Vega, F., Carvajal-Ramírez, F., Martínez-Carricondo, P. 2017. Assessment of photogrammetric mapping accuracy based on variation ground control points number using unmanned aerial vehicle. *Meas. J. Int. Meas. Confed.*, 98, 221-227.
- [17] Marangoz, A. M., Karakiş, S., Numan, A. B. 2019. Geleneksel fotogrametri ile insansız hava aracı (İHA) verilerinin kullanılan kamera ve sonuç ürünleri bakımından karşılaştırılması. In *17th Turkey Scientific and Technical Conference*, 25, 27.
- [18] Özcan, O. 2017. İnsansız Hava Aracı (İHA) ile Farklı Yüksekliklerden Üretilen Sayısal Yüzey Modellerinin (SYM) Doğruluk Analizi, *Mühendislik ve Yer Bilimleri Dergisi*, 2, 1, 1-7.

- [19] Öztürk O., Bilgilioğlu B.B., Çelik M.F., Bilgilioğlu S.S., Uluğ R. 2017. İnsanz Hava Aracı (İHA) Görüntüleri ile Ortogörüntü Üretiminde Yükseklik ve Kamera Açısının Doğruluğa Etkisinin Araştırılması. *Geomatik Dergisi*, 2(3),135-141
- [20] Martínez-Carricondo, P., F. Agüera-Vega, F. Carvajal-Ramírez, F.-J. Mesas-Carrascosa, A. García-Ferrer, and F.-J. Pérez-Porras. 2018. Assessment of UAV-photogrammetric Mapping Accuracy Based on Variation of Ground Control Points. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 72, 1–10.
- [21] Oniga V. E., Breaban A. I., Statescu F. 2018. Determining the Optimum Number of Ground Control Points for Obtaining High Precision Results Based on UAS Images, *Proceedings 2018*
- [22] Ferrer-Gonzalez E., Agüera-Vega F., Carvajal-Ramirez F., Martínez-Carricondo P. 2020. UAV Photogrammetry Accuracy Assessment for Corridor Mapping Based on the Number and Distribution of Ground Control Points, *Remote Sensing*, 12, 2447.
- [23] Martínez-Carricondo, P., Agüera-Vega, F., Carvajal-Ramírez, F., Mesas-Carrascosa, F.J., García-Ferrer, A., Pérez-Porras, F.J. 2018. Assessment of UAV-photogrammetric mapping accuracy based on variation of ground control points. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* 2018, 72, 1–10.
- [24] Tahar, K.N. 2013. An Evaluation on Different Number of Ground Control Points in Unmanned Aerial Vehicle Photogrammetric Block. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci. ISPRS Arch.* 2013, XL-2/W2, 27–29.
- [25] Reshetyuk, Y., Mårtensson, S.G. 2016. Generation of Highly Accurate Digital Elevation Models with Unmanned Aerial Vehicles. *Photogramm. Rec.*, 31, 143–165.
- [26] Sanz-Ablanedo, E., Chandler, J.H., Rodríguez-Pérez, J.R., Ordóñez, C. 2018. Accuracy of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) and SfM photogrammetry survey as a function of the number and location of ground control points used. *Remote Sens.*, 10, 606.
- [27] James, M.R., Robson, S. 2012. Straightforward reconstruction of 3D surfaces and topography with a camera: Accuracy and geoscience application. *J. Geophys. Res. Earth Surf.*, 117, 1–18.
- [28] Kabadayı, A, Erdoğan, A. 2022 Application of Terrestrial Photogrammetry Method in Cultural Heritage Studies: A Case Study of Seyfeddin Karasungur. *Mersin Photogrammetry Journal*, 4(2), 62-67.
- [29] Kaya, Y, Şenol, H. İ., Polat, N. 2021. Three-dimensional Modeling and Drawings of Stone Column Motifs in Harran Ruins, *Mersin Photogrammetry Journal*, 3(2), 48-52.
- [30] Kaya, Y., Temel, D., 2022. Cep Telefonu Kameralarından Elde Edilen Görüntüler ile Kültürel Miras Eserlerinin Modellenmesi, *Türkiye Fotogrametri Dergisi*, 4(1), 17-22.
- [31] Kılınç, Ç., Uysal, M. 2021. Küçük Ölçekli Fotogrametrik Haritalarda Nokta Bulutu Filtreleme Yöntemleri ile Eşyükseklik Eğrisi Üretimi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 21(1), 167-178.
- [32] Polat, N. 2023. An Investigation of Ancient Water Collection and Storage Systems Near the Karahantepe Neolithic Site Using UAV and GIS, *Environmental Archaeology*, 28(6), 475-487.
- [33] Dörtbudak, E. B., Akça, Ş., Polat, N. 2023. Exploring structural deterioration at historical buildings with UAV photogrammetry, *Cultural Heritage and Science*, 4(2), 62-68.

[34] Fonstad, M. A., Dietrich, J. T., Courville, B. C., Jensen, J. L., Carbonneau, P. E. 2013. Topographic Structure from Motion: A New Development in Photogrammetric Measurement, *Earth Surface Processes and Landforms*, 38(4), 421-430.

[35] Javernick, L., Brasington, J., Caruso, B. 2014. Modeling the Topography of Shallow Braided Rivers Using Structure-from-motion Photogrammetry, *Geomorphology*, 213, 166-182.

[36] Dietrich, J. T. 2017. Bathymetric Structure-from-Motion: Extracting Shallow Stream Bathymetry from Multi-View Stereo Photogrammetry, *Earth Surface Processes and Landforms*, 42(2), 355-364.

[37] Akar, A. 2017. Evaluation of Accuracy of Dems Obtained from Uav-point Clouds for Different Topographical Areas, *International Journal of Engineering and Geosciences*, 2(3), 110-117.

[38] Zeybek, M. 2021. Classification of UAV Point Clouds By Random Forest Machine Learning Algorithm. *Turkish Journal of Engineering*, 5(2), 48-57.

[39] Zeybek, M., Kaya, A. 2020. Tarihi Yiğma Kiliselerde Hasarların Fotogrametrik Ölçme Tekniğiyle İncelenmesi: Artvin Tbeti Kilisesi Örneği. *Geomatik*, 5(1), 47-57.

[40] Ahmadabadian, A. H., Karami, A., Yazdan, R. 2019. An Automatic 3D Reconstruction System for Texture-less Objects, *Robotics and Autonomous Systems*, 117, 29-39.

[41] Perry, B. J., Guo, Y., Atadero, R., van de Lindt, J. W. 2020. Streamlined Bridge Inspection System Utilizing Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) and Machine Learning. *Measurement*, 164, Article number 108048.

[42] Czyża, S., Szuniewicz, K., Kowalczyk, K., Dumalski, A., Ogrodniczak, M., Zieleniewicz, Ł. 2023. Assessment of accuracy in unmanned aerial vehicle (uav) pose estimation with the real-time kinematic (rtk) method on the example of dji matrice 300 rtk. *Sensors*, 23(4), 2092.

[43] <https://www.ferntech.co.nz/dji-matrice-300-rtk-photogrammetry-combo> (Erişim Tarihi: 21.03.2024)

[44] <https://paksoytekNIK.com.tr/urun/topcon-hiper-sr/> (Erişim Tarihi: 21.03.2024)

[45] Oruc, M. 2023. Maden sahalarındaki deformasyonların İHA verileri ile izlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mersin Üniversitesi, 99s, Mersin, Türkiye