

Üçlü Bindirmeli Göktürk-1 Uydu Görüntülerinin Konum Doğruluğunun Zonguldak Test Alanında Algılayıcıya Bağımlı Yönelme Modeli ile Belirlenmesi

(Determination of Georeferencing Accuracy of Göktürk-1 Tri-Stereo Satellite Images by Sensor Dependent Orientation Model in Zonguldak Test Site)

Gürsu AYTEKİN¹ , Hüseyin TOPAN² 

¹Milli Savunma Üniversitesi Hava Harp Enstitüsü, İstanbul

²Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi Geomatik Mühendisliği Bölümü, Zonguldak
gaytekin@msu.edu.tr

Geliş Tarihi (Received): 16.04.2022

Kabul Tarihi (Accepted): 27.07.2022

ÖZ

Günümüzde gerek askeri gerekse sivil kullanım alanlarıyla rekabet alanı haline gelen uzay, uydu teknolojilerindeki gelişmeler sayesinde stratejik bir seviyeye ulaşmıştır. Özellikle uydu görüntüleri aracılığı ile yapılan uygulamalar, uzaktan algılama biliminin de temel konusu haline gelerek insanlığı derinden etkilemektedir. Bunun yanında konumsal verilerin ve hizmetlerin kaynağını da oluşturan uzaktan algılama görüntülerinin, başta Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) olmak üzere konuma bağlı uygulamalar açısından anahtar rol oynamaktadır. Konuma bağlı uygulamalarda uydu görüntülerinin başarısı, algılayıcıların yöneltilmesi ile ilişkili olup, özellikle algılayıcıya bağımlı yönelme modeli ile elde edilen konumsal doğrulukların en üst seviyede gerçekleştiği görülmektedir. Bunun yanında bazı yetenekli uyduların çevik ve esnek yapıları sayesinde elde ettikleri üçlü bindirmeli görüntüler, Yeryüzünün üç boyutlu olarak gerçeğe en yakın şekilde tasvir edilebilmesine yardımcı olmaktadır. Yeryüzüne ait üçüncü boyut bilgisi konuma bağlı uygulamalarda oldukça değerli olup, bindirmeli görüntülerin uygun yöntemlerle yöneltilmesini gerektirmektedir. Bilsat, Rasat ve Göktürk-2 deneyiminden sonra Türkiye'nin ilk metre altı çözünürlüklü uydusu Göktürk-1 görüntülerinin de gerek askeri ve gerekse sivil kullanım alanlarında konum doğruluğu açısından kritik öneme sahip olduğu değerlendirilmektedir. Yapılan çalışmada Türkiye'nin ilk metre altı elektro-optik uzaktan algılama uydusu olan Göktürk-1 uydusuna ait üçlü bindirmeli olarak alımı yapılmış pankromatik görüntülerin algılayıcıya bağımlı yönelme modeli kullanılarak yöneltilmesi ve bu kapsamda elde edilen üç boyutlu konum doğruluğunun değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Zonguldak test alanında yapılan uygulama neticesinde doğrudan yönelme doğruluğunun ($\pm 6-12$ m aralığında) uydu üreticisi Telespazio firması tarafından hedeflenen doğruluk değeri (± 10 m) ile uyumlu olduğu, ön ve demet dengeleme ile elde edilen doğrulukların ise Yer Kontrol Noktaları (YKN) için mm seviyesinde, Bağımsız Denetim Noktaları (BDN) için ± 1 piksel (~ 50 cm) civarında olduğu görülmüştür. Elde edilen konum doğruluğu değerlerinin gerek ulusal gerekse uluslararası standartlar ile uyumlu olduğu ve bu kapsamda Göktürk-1 görüntülerinin yüksek konum doğruluğu beklenen çalışmalarda rahatlıkla kullanılabileceği değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Göktürk-1, Üçlü Bindirme, Algılayıcıya Bağımlı Yönelme, Konumsal Doğruluk, Zonguldak Test Alanı.

ABSTRACT

Today, space has become a competitive area with both military and civilian uses, and also has reached a strategic position thanks to advances in satellite technologies. Especially the applications of satellite images become the major topic of remote sensing and it affect the humanity deeply. As a source of geospatial data and services, the remote sensing images plays a key role in geospatial applications, especially in Geographic Information Systems (GIS). The success of satellite imagery in geospatial applications is associated with the orientation of sensors, and it is seen that the georeferencing accuracy obtained especially by the sensor-dependent orientation model desired at the highest level. In addition, the tri-stereo images obtained by the satellite's agile and flexible structures help to depict the Earth in three dimensions as real as possible. Third dimensional information of the Earth is very valuable in geospatial applications, and it requires that tri-stereo images be oriented by appropriate methods. Following the Bilsat, Rasat and Göktürk-2 experiences, images of Göktürk-1, the first sub-meter resolution satellite of Turkey, are also considered as critical for high georeferencing accuracy in both military and civilian applications. In this study, it was aimed to orient the panchromatic images obtained as tri-stereo of Göktürk-1 satellite using the sensor-dependent oriented model, and to assess its 3D georeferencing accuracy potential. As a result of the study made in Zonguldak test site, it is seen that the direct georeferencing accuracy ($\pm 6-12$ m) is compatible with the accuracy value (± 10 m) targeted by the manufacturer Telespazio, while the accuracy achieved by pre and bundle adjustment was around mm level for Ground Control Points (GCP) and ± 1 pixel (~ 50 cm) for Independent Check Points (ICP). It was assessed that the georeferencing accuracy in this study are compatible with both national and international standards, and Göktürk-1 images are suitable to use if the high geospatial accuracy is required.

Keywords: Göktürk-1, Tri-stereo, Sensor Dependent Orientation, Georeferencing Accuracy, Zonguldak Test Site.

1. GİRİŞ

Savunma amaçlı olarak başta askeri istihbarat faaliyetleri olmak üzere birçok sivil kullanım alanına da hizmet edecek şekilde geliştirilen

Göktürk-1 uydusu, Avrupa Uzay Ajansına ait VEGA sistemi ile Fransız Guyanası'ndan 05 Aralık 2016 tarihinde fırlatılarak yörüngeye yerleştirilmiştir. Türkiye'nin ilk metre altı elektro optik uydusu olan Göktürk-1 uydusu için, yer sistemlerinin geliştirilmesinde ana yüklenici firma Telespazio (İtalya), uydunun üretimi ve faydalı yük yönetimi için ise Thales (Fransa) firmaları görev yapmış, ayrıca yerel sanayi firmaları TUSAŞ, Aselsan A.Ş., TÜBİTAK BİLGEM, Roketsan A.Ş ve TR Teknoloji firmaları proje kapsamında alt yüklenici olarak çalışmalara katılmıştır (Telespazio, 2022). Hâlen Türk Hava Kuvvetleri Komutanlığı personeli tarafından Ankara'da bulunan yer kontrol istasyonu aracılığı ile yönetilen Göktürk-1 uydusuna yönelik teknik özellikler Tablo 1'de sunulmuştur.

Yoğun olarak askeri amaçlarla etkin bir şekilde kullanılan ve konum doğruluğu açısından başarılı sonuçlar elde edilen Göktürk-1 görüntülerine yönelik kısıtlı sayıda da olsa bugüne kadar çeşitli bilimsel araştırmalar yapılmıştır. Fırlatma öncesi test faaliyetleri kapsamında; Yavaş ve Akgül (2019) tarafından uydu ve fırlatma sistemi arasındaki elektromanyetik uyumluluğa yönelik test çalışması ile Tarçın ve diğerleri (2019) tarafından uydunun tahrik alt sistemi tasarımı, entegrasyon, test ve fırlatma kampanyası faaliyetlerine yönelik çalışmalar yürütülmüştür. Uydunun kabul işlemleri sırasında ise Polat ve diğerleri (2019) tarafından, Göktürk-1 görüntülerine ait radyometrik kalibrasyon ve görüntü kalitesi değerlendirmesi, Gültekin, Atak, Ayaz ve Arı (2019) tarafından ise ileri seviye görüntü işleme sonunda elde edilen ürünlere yönelik yatay ve düşey doğruluk araştırmaları yapılmıştır. Benzer şekilde ortogörüntü ve sayısal yükseklik modeli ürünlerine yönelik doğruluk çalışması, Arasan ve diğerleri (2020) tarafından gerçekleştirilmiştir. Bunların dışında, Roma (İtalya) test alanında; Göktürk-1 görüntülerinin yükseklik doğruluğuna yönelik çalışma Boccardo, Sandu, Ajmar ve Perez (2019) tarafından, ortogörüntü doğruluğuna yönelik çalışma Ravanelli, Lastilla ve Crespi (2019) tarafından, arazi kullanımı ve sınıflandırılması ise Ottaviano, Sertel ve Marchetti (2019) tarafından ele alınmıştır. Ankara'ya ait Göktürk-1 görüntüsü üzerinden pankeskinleştirme performansının incelenmesi Ünal ve Yıldız (2022) tarafından, Çaycuma/Zonguldak'a ait Göktürk-1 görüntüsü ile piksel ve nesne tabanlı sınıflandırma performansı analizi Çetin ve Köksal (2020) tarafından gerçekleştirilmiştir. Ayrıca Zonguldak test sahasında Göktürk-1 görüntülerine yönelik algılayıcıdan bağımsız yönelme modelleri kullanılarak iki boyutlu konum doğruluğu çalışması

Aytekin, Topan, Elkar, Kişi ve Erişik (2019) tarafından yapılmıştır.

Tablo 1. Göktürk-1 teknik özellikleri (Polat ve diğerleri, 2019; Arasan ve diğerleri, 2020).

Fırlatılma Zamanı	05 Aralık 2016
Yörünge	Güneş Eş Zamanlı
Yükseklik	686 km
Ekvator Geçiş Zamanı	10:30 (Yerel)
Yörünge Eğiklik Açısı	98,112 ° Polar
Algılayıcı Çeşidi	Optik Doğrusal Dizin
Optik Sistem	Korshe Tipi Teleskop, Odak Uzaklığı: 18140 mm
Geometrik Çözünürlük	Pankromatik: 0,5m, Çok Bandlı: 2m
Zamansal Çözünürlük	2-3 gün ($\pm 30^\circ$ Yalpa Açısı)
Radyometrik Çözünürlük	12 bit
Tayfsal Bandlar (μm)	0.450-0.845 μm Pankromatik
	0.435-0.554 μm Mavi
	0.493-0.607 μm Yeşil
	0.606-0.717 μm Kırmızı
	0.691-0.933 μm Yakın Kızılötesi
Dedektör Boyutu	Pankromatik 6 dizi, toplam 31600 piksel
	Çok Bandlı 6 dizi, toplam 7900 piksel
NIIRS Sınıf	6
Tekrar Döngü Zamanı	21 gün
Yalpa/Yunus Açısı	$\pm 45^\circ / \pm 30^\circ$
Görüntü Boyutu	15 km (Nadir)
Günlük Görüntü Kapasitesi	902 Tek Görüntü
En Fazla Bindirmeli Görüntü Genişliği	410 km Tek Geçiş
Konum Doğruluğu	Yatay Doğruluk: 10 m (CE90) YKN olmadan
	Yatay Doğruluk: 2 m (CE90) YKN ile
	Düşey Doğruluk: 20 m (LE90) YKN olmadan
	Düşey Doğruluk: 3 m (LE90) YKN ile

Bu çalışmanın amacı ise, Türkiye'nin ilk metre altı elektro-optik uzaktan algılayıcıya ait üçlü bindirmeli olarak Göktürk-1 uydusuna ait üçlü bindirmeli olarak alımı yapılmış pankromatik görüntülerin algılayıcıya bağımlı yönelme modeli kullanılarak yöneltilmesi ve bu kapsamda elde edilen üç boyutlu konum doğruluğunun değerlendirilmesidir. Söz konusu çalışmada diğer çalışmalardan farklı olarak, algılayıcının fiziksel özelliklerini dikkate alarak gerçeğe yakın görüntüleme geometrisinin

oluşturulabildiği algılayıcıya bağımlı yöneltme modeli uygulanmıştır. Ayrıca üçlü bindirmeye yönelik matematiksel model, ikili bindirmeli görüntüler için Topan (2022) tarafından geliştirilen model temel alınarak, yazarlar tarafından MATLAB ortamında Geo3o1 modülü içinde geliştirilmiştir.

2. ÜÇLÜ BİNDİRMELİ GÖRÜNTÜ ALIMI

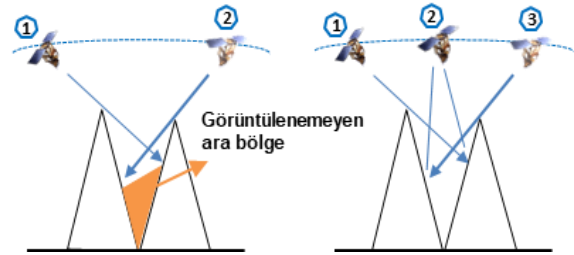
Uydu görüntülerinin, özellikle yükseklik verisinin de göz önüne alındığı, yüksek doğruluklu konuma bağlı uygulamalar amacıyla kullanılabilmesi için aynı noktanın farklı bakış açılarıyla görüntülediği bindirmeli görüntü alımına ihtiyaç duyulmaktadır. Uzaktan algılama kapsamında ilk kez 1973 yılında Eugene E. Derenyi tarafından bindirmeli görüntülerin iki ayrı algılayıcı ya da uygun şekilde yerleştirilmiş iki doğrusal dizin tarafından elde edilebileceği incelenmiş, sonrasında bindirmeli görüntülerin üçlü olarak doğrusal dizin algılayıcılarla elde edilmesine yönelik çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Ancak ilk kez 1984 yılında Otto Hofmann ve Nave, doğrusal dizin algılayıcılarla üçlü bindirmeli görüntü elde edilmesine yönelik yeni bir fotogrametrik işlem geliştirmiştir. Bu yapıyla otomatik görüntü korelasyonu ve ortofoto ürünlerin güvenilirlik ve hassasiyetlerinin gelişeceği belirtilmiştir. (Zhang, 2005).

Bu çalışmaların devamında üçlü bindirmeli görüntü alabilen hava algılayıcıları yanında, birçok uydu/uzay sistemi de geliştirilmiştir. Bu kapsamda ilk üçlü bindirmeli görüntü alabilme yeteneğine sahip uzay sistemi MOMS-02 olup, bu sistem çoklu optik sistemle üçlü boyuna bindirmeli görüntü alabilen bir yapı olarak kısa süre de olsa görev yapmıştır. Bu sistemin doğruluk incelemesi sonunda tatmin edici değerlere ulaşılmıştır (Ebner, Hofmann, Konus, Müller ve Stlunz, 1991).

Bundan sonra IKONOS, SPOT-5, QuickBird, ALOS-PRISM gibi uydular üçlü bindirmeli görüntü alabilme kabiliyetleri ile ortaya çıkmış ve birçok üçlü bindirmeye yönelik uygulama yapılmıştır. Üçlü bindirmeli görüntü alımı bu sürecin devamında özellikle uyduların çevik ve esnek yapıya kavuşmaları ile daha da yaygınlaşmış ve günümüzde birçok uydu bu yeteneğe sahip olarak görev yapmaya başlamıştır. Bu aşamada örneğin Çin uydusu Zi-Yuan 3 (ZY-3) gibi ileri, nadir ve geri bakış doğrultusuna sahip çoklu optik sistemle üçlü bindirmeli görüntü alabilen uydular yanında, Cartosat-2, Kompsat-2, WorldView-1/2/3, GeoEye-1, Pleiades-1A/1B gibi tekli optik sistem dâhilinde üçlü bindirmeli görüntüleme yapabilen uydular da ortaya çıkmıştır (Poli ve Toutin, 2012).

Türkiye'nin yüksek çözünürlüklü ilk milli uydusu Göktürk-1 de bu yeteneğe sahip bir uydudur (Aytekin ve diğerleri, 2019).

İkili bindirmeli görüntü alımında yüksek baz/yükseklik (B/H) oranının, konum doğruluğunu özellikle düz alanlarda ve alçak binaların olduğu bölgelerde artırdığı Li (2010) tarafından yapılan çalışmada bildirilmiş olup, doğruluğun istenen düzeyde olabilmesi için 0.6 ile 1 arası bir B/H oranı ile bindirmeli görüntü alımının gerçekleştirilmesi gerektiği belirtilmiştir. Ancak bu kapsamda ikili bindirme ve yüksek B/H oranı ile özellikle yüksek dağ ve binaların birbirine yakın olduğu bölgelerde görüntü alımı yapılamayan ara bölgeler oluşabilmektedir. Dolayısıyla yüksek B/H oranı ile ikili bindirmeli görüntüler üzerinde özellikle bu ara bölgelerde görüntü eşleme yapılamamaktadır. Bu sorunu gidermek amacıyla üçlü bindirmeli görüntü alımı söz konusu olabilmektedir (Şekil.1). Üçlü bindirmeli çekimlerde her bir çift için yaklaşık 0.25 B/H oranı ile görüntü alımı yapılması tavsiye edilmektedir (Airbus Defence and Space, 2012).



Şekil 1. İkili bindirmeli (yüksek B/H) ve üçlü bindirmeli görüntü (Airbus Defence and Space, 2012).

Joseph (2015) tarafından ikili bindirmeli görüntülere oranla üçlü bindirmeli görüntülerden elde edilecek Sayısal Yükseklik Modeli (SYM) doğruluğunun yüksek olacağı ve özellikle gölge etkisi ile görüntülenemeyen ara bölgelerden kaynaklı eşleme hatalarının üçlü bindirmeli görüntülerle azaltılabileceği belirtilmektedir. Giribabu, Srinivasa ve Murthy (2013) tarafından Cartosat-1 görüntüleri ile Himalaya Dağı'nda üçlü bindirmeli görüntülerle yapılan çalışmada ikili bindirmeli görüntülerde meydana gelen gölge ve görülemeyen bölge sorunlarının ortadan kalktığı, SYM düzeltme işleminin azaldığı ve görüntü eşlemenin daha doğru şekilde yapılabildiği belirtilmektedir. Poli, Remondino, Angiuli ve Agugiaro (2015) tarafından dağlık, ormanlık ve yoğun yerleşimin bir arada olduğu Trento/İtalya'da SYM üretimine yönelik yapılan çalışmada; ikili bindirmeli GeoEye-1 ve WorldView-2 görüntüleri ile üçlü bindirmeli Pléiades-1A görüntüleri karşılaştırılmıştır. Buna göre yoğun yerleşim ve

yükseklik farkının fazla olduğu bu bölgede üçlü bindirmeli Pléiades-1A görüntülerinden elde edilen SYM doğruluğunun daha yüksek olduğu bildirilmiştir.

Üçlü bindirmeli görüntü alımı aynı uyduya ait görüntüler aracılığı ile elde edilebileceği gibi farklı uyduların aynı bölgeye ait görüntülerinin çeşitlemesi olarak da elde edilebilmektedir. Bu kapsamda Li, Zhou, Niu ve Kaichang (2007) tarafından farklı uyduların (QuickBird-IKONOS) birleşimi ile elde edilen bindirmeli görüntülere yönelik doğruluk araştırması yapılmış, ayrıca hava ve uydu görüntüsü birleşimi de denenerek 3B doğruluk değerlendirmelerine ulaşılmıştır. Aynı şekilde Jeong, Yang ve Kim (2015) tarafından iki ayrı uyduya ait ikili çiftler ile elde edilen bindirmeli görüntüler arasında yatay ve düşey doğruluk karşılaştırması yapılmıştır. Ayrıca QuickBird, IKONOS ve Komsat-2 uydularına ait ikili bindirmeli görüntülere farklı çözünürlüklü üçüncü bir uyduya ait görüntü ilave edilerek üçlü bindirmeli görüntü birleşimi elde edilmiş ve yine ikili bindirmeli görüntülerle doğruluk karşılaştırması yapılmıştır. Tüm bu uygulamalarda yönelme işlemi Orantısız İşlev Modeli (Rational Function Model-RFM) kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Üçlü bindirmeli görüntülerin yöneltilmesine yönelik olarak ise literatürde merkezi izdüşüm etkisinin giderilmesi temeline dayanan fotogrametrik bakış açısı ve izdüşümsel geometri kurallarının geçerli olduğu bilgisayarlı görme bakış açısı olmak üzere iki yaklaşım söz konusudur. Üçlü bindirmeli görüntülerin yöneltilmesine ilişkin olarak en kapsamlı analizlerden birisi Förstner ve Wrobel (2016) tarafından yapılmış ve özellikle hava görüntülerine uygulanabilen çeşitli avantajları ortaya konulmuştur. Bunun yanında Hartley ve Zisserman (2003) tarafından üçlü bindirmeli görüntülerin yöneltilmesine ilişkin doğruluk değerlendirmelerinin de yapıldığı çeşitli yöntemler önerilmiştir. Ressel (2003) tarafından ise üçlü bindirmeli görüntülerin yöneltilmesinde Gauss-Helmert modeli ve demet dengeleme ile üçlü görüntülerin yöneltilmesi esas alınmıştır.

3. ALGILAYICIYA BAĞIMLI YÖNELTME MODELİ

Algılayıcı yöneltilmesindeki ana amaç görüntü ve nesne koordinat sistemleri arasındaki geometrik dönüşüm ilişkisinin kurulmasıdır. Bu ilişki, algılayıcıya bağımlı yönelme modeli ile algılayıcıların gerçeğe en yakın geometrik özelliklerini dikkate alarak kurulabileceği gibi, algılayıcının gerçek geometrik özelliklerini dikkate almayan algılayıcıdan bağımsız modellerle de

kurulabilmektedir. Konum doğruluğu açısından bakıldığında algılayıcıya bağımlı modellerle çalışmak uygun olsa da görüntüleme geometrisi, algılayıcı sistem ve platformun fiziksel özellikleri gibi bilgilere hâkim olmayı gerektiren zorlu bir süreç gerektirmektedir. Bu amaçla genelleştirilmiş modeller ortaya çıkmış ve bunlardan RFM, OGC (1999) tarafından algılayıcı yöneltilmesi çalışmaları için tavsiye edilmiştir. RFM yönteminde görüntüye ait metaveri dosyasında yer alan Orantısız Polinom Katsayıları (Rational Polynomial Coefficients-RPC) kullanılarak algılayıcı yönelme işlemi gerçekleştirilebilmektedir. İlk bölümde özetlenen Göktürk-1 görüntülerinin konumsal doğruluğunun belirlenmesine yönelik yapılan çalışmalarda özellikle ortogörüntü ve sayısal yükseklik modeli oluşturulması aşamalarında RFM yönteminin kullanıldığı görülmüştür.

Bu çalışma kapsamında ise algılayıcıya bağımlı model kullanılmıştır. Algılayıcıya bağımlı modeller oluşturulurken görüntü koordinat sistemi ile Yer koordinat sistemi arasındaki ilişki, yardımcı koordinat sistemleri kullanılarak bir dizi koordinat dönüşümü yapılmasını gerektirir ki bu da öteleme, ölçek ve dönme öğeleriyle gerçekleştirilebilir. Bu kapsamda Weser, Rottensteiner, Willneff, Poon ve Fraser (2008) tarafından düzenlenen dönüşüm fonksiyonu SPOT-5, ALOS-PRISM ve QuickBird uydu görüntülerinin yöneltilmesinde başarılı bir şekilde kullanılmıştır. Aynı temelde Pléiades 1A/1B ve SPOT 6/7 görüntüleri için Airbus Defence and Space (2012, 2013) tarafından geliştirilen algılayıcıya bağımlı model Göktürk-1 uydu görüntülerine uyarlanmıştır. Burada özellikle Pléiades 1A/1B ve SPOT 6/7 görüntülerinde beş parçalı çoklu doğrusal dizinlerin bir birleşimi olarak oluşturulan sanal gerçek algılayıcı dizini (Virtual Perfect Sensor Array), benzer şekilde Göktürk-1 için altı parçanın birleşiminden oluşmakta ve bu da Göktürk-1 ikinci seviye görüntüye (L2A) karşılık gelmektedir. Dolayısıyla görüntü ile Yer koordinat sistemi arasındaki dönüşüm, bu sanal görüntü kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Aynı zamanda Göktürk-1'e ait metaveri dosyası incelendiğinde Pléiades 1A/1B ve SPOT 6/7'ye benzer şekilde, bakış açılarının (ψ_x, ψ_y) ikinci derece polinom katsayılarını destekleyecek şekilde verildiği ve ayrıca uydu koordinat sisteminden yer koordinat sistemine geçişin metaveri dosyasında bulunan ve üçüncü derece polinom olarak modellenebilen dördeyler (kuaterniyonlar) aracılığı ile ifade edildiği tespit edilmiştir. Bu durumda görüntü koordinat sisteminden Yer koordinat sistemine dönüşüm;

$$\vec{P} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \vec{p}_u - s \underline{R} \begin{bmatrix} -\tan \psi_y \\ \tan \psi_x \\ -1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

ile hesaplanabilmektedir. Burada X, Y, Z yer koordinatlarını, \vec{p}_u Lagrange kestirimi ile hesaplanan uyduya ait konum vektörünü, s ölçeği, \underline{R} dördeyler aracılığı ile hesaplanan dönme matrisini, (ψ_x, ψ_y) ise bakış açılarını göstermektedir. \underline{R} dönme matrisi dördeyler aracılığı ile ifade edildiğinde

$$\begin{aligned} r_{11} &= (Q_0^n)^2 + (Q_1^n)^2 - (Q_2^n)^2 - (Q_3^n)^2 \\ r_{12} &= 2(Q_1^n Q_2^n - Q_0^n Q_3^n) \\ r_{13} &= 2(Q_1^n Q_3^n + Q_0^n Q_2^n) \\ r_{21} &= 2(Q_1^n Q_2^n + Q_0^n Q_3^n) \\ r_{22} &= (Q_0^n)^2 - (Q_1^n)^2 + (Q_2^n)^2 - (Q_3^n)^2 \\ r_{23} &= 2(Q_2^n Q_3^n - Q_0^n Q_1^n) \\ r_{31} &= 2(Q_1^n Q_3^n - Q_0^n Q_2^n) \\ r_{32} &= 2(Q_2^n Q_3^n - Q_0^n Q_1^n) \\ r_{33} &= (Q_0^n)^2 - (Q_1^n)^2 - (Q_2^n)^2 + (Q_3^n)^2 \end{aligned} \quad (2)$$

elde edilir. Burada,

$$Q_j^n = \frac{Q_j}{\sqrt{\underline{Q}^T \underline{Q}}}, \quad j = 0,1,2,3 \quad \underline{Q} = [Q_0 Q_1 Q_2 Q_3]^T \quad (3)$$

$$Q_j = \sum_{i=0}^3 (Q_j)_i t_{MN}^i$$

dir. t_{MN} görüntü merkezi için normleştirilmiş zaman değeri olmak üzere,

$$t_{MN} = \frac{t - t_{öteleme}}{t_{ölçek}} \quad (4)$$

$$t = t_{referans} + t_{aralık}(x - x_{referans})$$

ile hesaplanır. Bakış açılarının oluşturduğu vektör ise

$$\tan \psi_y = \sum_{i=0}^n (\psi_y)_i (y - y_{referans}) \quad (5)$$

$$\tan \psi_x = \sum_{i=0}^n (\psi_x)_i (y - y_{referans})$$

ile hesaplanmaktadır. Uyduya ait konum verisi ve

elde edilme zamanları, $(Q_j)_i$, $t_{öteleme}$, $t_{referans}$, $t_{aralık}$, $t_{ölçek}$, $x_{referans}$, $y_{referans}$, $\tan(\psi_y)_i$, $\tan(\psi_x)_i$ değerleri metaveri dosyasından doğrudan alınabilmektedir (Tablo 2).

Tablo 2. Göktürk metaverilerinden doğrudan alınan değerler

Değerler	Açıklama
t_başlangıç	Görüntünün çekilmeye başladığı zaman
t_bitiş	Görüntü çekiminin tamamlandığı zaman
t_aralık	Bir satırın görüntülenme zamanı
Uydu (P), (V), (t)	Uyduya ait konum, hız ve zaman bilgisi
t_öteleme	Zamansal öteleme
t_ölçek	Zamansal ölçek
Q	Dördey katsayıları (Q0, Q1, Q2, Q3) (Her biri için dörder adet)
PsiX (ψ_x)	Enine bakış açısı
PsiY (ψ_y)	Boyuna bakış açısı
t_referans	Referans pikselin görüntülenme zamanı
x_referans y_referans	Referans satıra ait görüntü koordinatları (varsayılan değer: 1)

Bu hesap sonucunda uyduya ait ham değerler aracılığıyla hesap yapılması durumunda, yöneltme işlemi doğrudan yöneltme olarak anılmaktadır. Doğrudan yöneltme sonucu elde edilmesi hedeflenen konum doğrulukları Pléiades 1A için $\pm 8,5$ m., Göktürk-1 için ise ± 10 m. olarak bildirilmiştir (Airbus Defence and Space, 2012; Arasan ve diğerleri, 2020).

Ancak daha yüksek bir konum doğruluğuna ulaşabilmek için elbette algılayıcı yöneltmenin en önemli adımlarından biri olan dengeleme işlemi yapılmalıdır. Çünkü söz konusu değerler sistematik olmayan (düzensiz, rastgele) hatalar ile yüklüdür. Dengeleme genel olarak, gereğinden fazla sayıda yapılan ölçümler aracılığı ile bilinmeyenlerin en uygun (olasılıklı) değerlerinin belirlenmesi ile ölçümlerin, kesin değerlerin ya da bunların fonksiyonlarının duyarlılıklarının saptanmasıdır (Öztürk ve Şerbetçi, 1995). Özellikle bakış açıları gibi (ψ_x, ψ_y) doğrusal olmayan ölçülerin söz konusu olduğu durumlarda Gauss-Helmert modeli aracılığıyla demet dengeleme işlemi yapılabilmektedir. Bu model özellikle doğrusal dizin görüntüler için Kornus, Alamus, Ruiz ve Talaya (2006), Weser ve diğerleri (2008) ve Topan ve Maktav (2014) tarafından

kullanılmıştır. Bu durumda görüntüden Yer koordinat sistemine dönüşümü sağlayan (1) bağıntısı yeniden düzenlenerek yer koordinat sisteminden görüntü koordinat sistemine dönüşümü sağlayacak şekilde düzenlenirse,

$$F_{\psi_y} = \frac{R_{11}^T(X_s - X) + R_{12}^T(Y_s - Y) + R_{13}^T(Z_s - Z)}{R_{31}^T(X_s - X) + R_{32}^T(Y_s - Y) + R_{33}^T(Z_s - Z)} - \tan(\psi_y) = 0$$

$$F_{\psi_x} = \frac{R_{21}^T(X_s - X) + R_{22}^T(Y_s - Y) + R_{23}^T(Z_s - Z)}{R_{31}^T(X_s - X) + R_{32}^T(Y_s - Y) + R_{33}^T(Z_s - Z)} + \tan(\psi_x) = 0 \quad (6)$$

fonksiyonel modeli elde edilmektedir. Burada \underline{R} matrisi ortogonal matris olduğu için $\underline{R}^{-1} = \underline{R}^T$ olmaktadır. (6) bağıntısında doğrusal olmayan değerler Taylor serisi gibi uygun bir yöntemle doğrusal hale getirildikten sonra

$$\underline{AdP} + \underline{Bv} + \underline{w} = 0 \quad (7)$$

şeklinde oluşturulan Gauss-Helmert modelinin uygulanmasına geçilir. Burada \underline{A} ve \underline{B} Katsayılar (Jakobiyen) matrisleri ve \underline{w} kapanma artıkları olmak üzere, \underline{A} Katsayılar matrisi; dış yönelme öğeleri (DYÖ) ve BDN'lere getirilecek düzeltmelerden, \underline{B} Katsayılar matrisi ise bakış açılarından oluşturulur. Bu durumda öncelikle DYÖ ve BDN'lere getirilecek düzeltmeler;

$$\underline{dP} = (\underline{A}^T(\underline{BB}^T)^{-1}\underline{A})^{-1}\underline{A}^T(\underline{BB}^T)^{-1}(\underline{\ell} - \underline{\ell}_0) \underline{w} \quad (8)$$

ile hesaplanır. Daha sonra

$$\underline{v} = \underline{B}^T(\underline{BB}^T)^{-1}(\underline{AdP} + \underline{w}) \quad (9)$$

ile de ölçülere getirilecek düzeltmeler hesaplanarak bakış açılarına düzeltme olarak getirilir. Dengeli öğelerin ve ölçülerin ($\underline{\bar{P}}$ ve $\underline{\bar{\ell}}$) (6) bağıntısı ile verilen koşulu sağlayıp sağlamadığı $F(\underline{\bar{P}}, \underline{\bar{\ell}}) \stackrel{?}{=} 0$ ile kontrol edilerek, gerekirse bu şart sağlanana kadar dengeli öğelerle dengeleme işlemine dögüsel olarak devam edilir.

Edmundson ve Fraser (1998) ile Wang ve Clarke (2001) tarafından yapılan çalışmalarda dengelemede işlem yoğunluğunu azaltarak hızlı ve pratik çözüme ulaşılması maksadıyla dengelemenin bölümlere ayrılarak yapılmasının kullanışlı bir yöntem olacağı bildirilmiştir. Bu kapsamda Jung ve Won (2008) ile Topan ve Maktav (2014) yapmış oldukları çalışmada en büyük hata kaynağının bakış açılarından (ψ_x, ψ_y) kaynaklandığını belirterek öncelikli olarak bakış

açıların ön dengeleme ile dengelenmesinin uygun olacağını değerlendirmiştir. Bu kapsamda DYÖ'ler dengeli kabul edilip öncelikle bakış açıların ön dengelemeye tabi tutulması durumunda (7) numaralı bağıntıda; $\underline{dP} = 0$ ve dolayısıyla $\underline{AdP} = 0$ olduğundan,

$$\underline{Bv} + \underline{w} = 0 \quad (10)$$

olarak işlem yapılacaktır. Böyle bir durumda öncelikle her bir bindirmeli görüntüye ait bakış açıları dengelenecek ve sonrasında dengelenmiş bakış açıları ile ham DYÖ'ler bir arada demet dengeleme işlemine tabi tutulacaktır. Ayrıca her bir yer kontrol noktasına ait dengelenmiş bakış açıları yardımı ile BDN'lere ait bakış açıları kestirilecektir.

Son olarak demet dengeleme sonunda elde edilen dengelenmiş bakış açıları ve DYÖ'ler kullanılarak (1) bağıntısı yardımıyla dengelenmiş nesne koordinatları (X_e, Y_e, Z_e) hesaplanır. Bu koordinatlarla, Küresel Navigasyon Uydu Sistemleri (Global Navigation Satellite Systems-GNSS) ölçümleri ile elde edilen yüksek doğruluklu nesne koordinatları ($\underline{\bar{X}}, \underline{\bar{Y}}, \underline{\bar{Z}}$) arasındaki farklar,

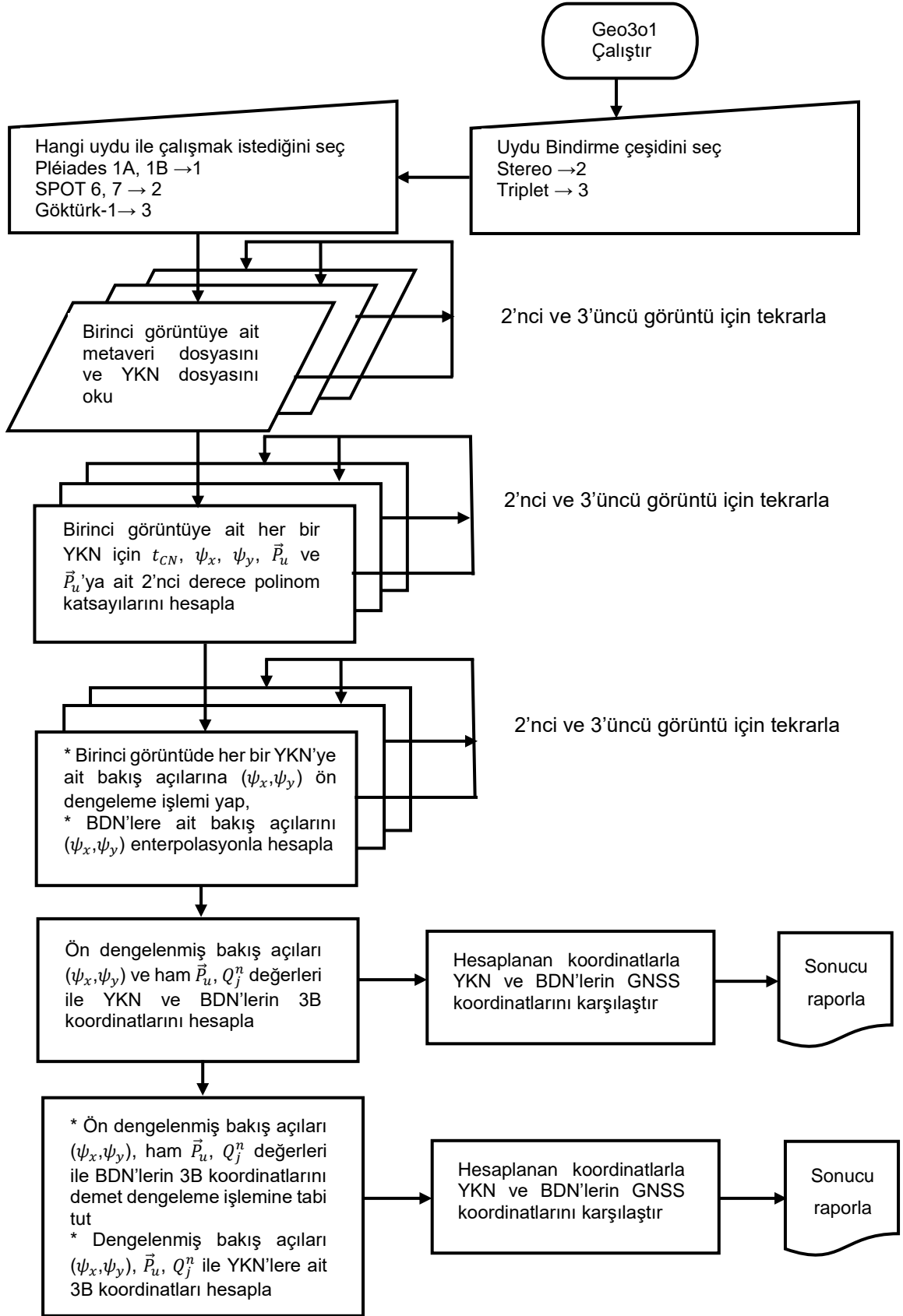
$$\begin{aligned} \underline{\Delta X} &= \underline{\bar{X}} - X_e \\ \underline{\Delta Y} &= \underline{\bar{Y}} - Y_e \\ \underline{\Delta Z} &= \underline{\bar{Z}} - Z_e \end{aligned} \quad (11)$$

ile hesaplanır. Karesel ortalama hatalar (KOH) ise, p YKN/BDN nokta sayısı olmak üzere;

$$\begin{aligned} m_x &= \pm \sqrt{\frac{[\Delta X \Delta X]}{p}} \\ m_y &= \pm \sqrt{\frac{[\Delta Y \Delta Y]}{p}} \\ m_z &= \pm \sqrt{\frac{[\Delta Z \Delta Z]}{p}} \end{aligned} \quad (12)$$

ile hesaplanır ve doğruluk değerlendirmesi (12) bağıntısıyla bulunan KOH değerlerine göre yapılır.

Yukarıda ifade edilen tüm adımlar ve hesaplamalar, Göktürk-1 görüntüleri için ilk versiyonu Topan (2022) tarafından Pléiades 1A görüntüleri için MATLAB ortamında geliştirilen Geo3o1 modülünde kodlanmıştır. Bu kapsamda Geo3o1 modülünde, ön ve demet dengelemeyi kapsayan iş akış diyagramı Şekil 2'de sunulmuştur.



Şekil 2. Geo3o1 iş akış diyagramı (Topan, 2022)

4. UYGULAMA

Bu bölümde, Göktürk-1 uydu görüntüleri ile Zonguldak test alanında yapılan uygulamaya yer verilmiştir. Söz konusu çalışma kapsamında üçlü bindirmeli olarak alımı yapılan görüntülerin algılayıcı bağımlı yönelme modeli ile GeoEtrim yazılımı (Geo3o1 modülü) kullanılarak yöneltilmesi ve üç boyutlu konum bilgisinin elde edilmesi sağlanmıştır. GeoEtrim yazılımına ilişkin kodlara GeoEtrim (2022)'den ulaşılabilmektedir.

a. Test Alanı, Yardımcı Veriler ve Görüntüler

Uygulama kapsamında, Zonguldak test alanına ait 2018 tarihli üçlü bindirmeli olarak alımı yapılmış Göktürk-1 uydu görüntüleri kullanılmıştır. Bu görüntüler altı ayrı dizine ait görüntünün sanal olarak birleştirilmesi sonucu elde edilen ve metaveri açısından da en zengin içeriğe sahip gerçek görüntüye en yakın Seviye 2A (L2A) görüntülerdir. Ayrıca metaveri dosyası, Uluslararası Standardizasyon Kuruluşu (International Organization for Standardization-ISO) 19115 temel standartına uygun olarak üretilerek Sayısal Görüntü Dosyası (Digital Image Map-DIMAP) yapısında, Genişletilebilir İşaretleme Dili (EXTensible Markup Language-XML) formatlı olarak görüntüyle birlikte kullanıcıya sunulmaktadır. 01.11.2018 tarihli Göktürk-1 L2A görüntülere ilişkin özellikler Tablo 3'te sunulmuştur.

Tablo 3. Üçlü bindirmeli Göktürk-1 görüntülerine ait özellikler

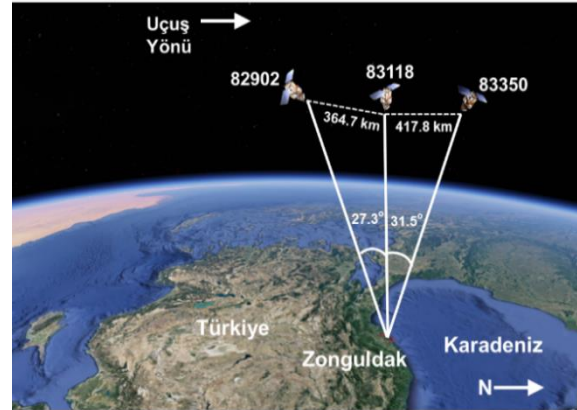
Görüntü Çiftleri	Zaman farkları (sn)	Baz (km)	Baz/Yükseklik (B/H)
82902-83118	48	364.7	0.53
83118-83350	55	417.8	0.61
82902-83350	103	782.5	1.14

Zonguldak test alanı konumsal doğruluk çalışmaları dâhil birçok konuma bağlı uygulamada farklı uydu görüntüleri kullanılarak, çeşitli analizlerin yapıldığı bir test alanıdır. Konum doğruluğu çalışmaları açısından Zonguldak test alanının; dağlık ve engebeli bir arazi yapısına sahip olması, bu arazi üzerinde yoğun yerleşim, orman ve tarım arazilerinin bir arada olması, deniz, nehir ve baraj gibi çeşitli su yapılarını barındırması önemlidir (Bayık ve diğerleri, 2016). Bu tür alanlarda özellikle konum doğruluğu

testlerinin yapılması uyduların gerçek yeteneklerini ortaya koyabilmekte, bunun gibi doğal özelliklere sahip olmayan düz ve çıplak alanlarda konum doğruluğu testleri kısıtlanmış sonuçlar verebilmektedir. Zonguldak test alanına ait Göktürk-1 görüntüleri kaplaması Şekil 3'te, Göktürk-1 görüntüleme durumu ise Şekil 4'te sunulmuştur.

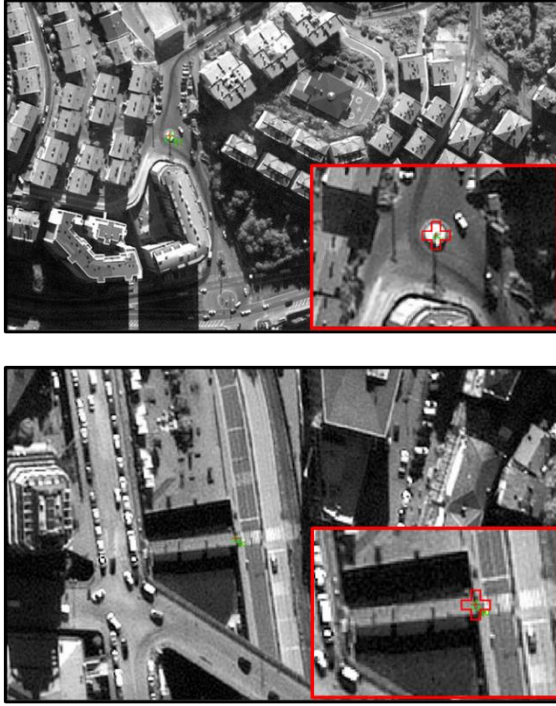


Şekil 3. Zonguldak test alanına ait üçlü bindirmeli Göktürk-1 görüntüleri kaplaması



Şekil 4. Üçlü bindirmeli görüntüleme durumu

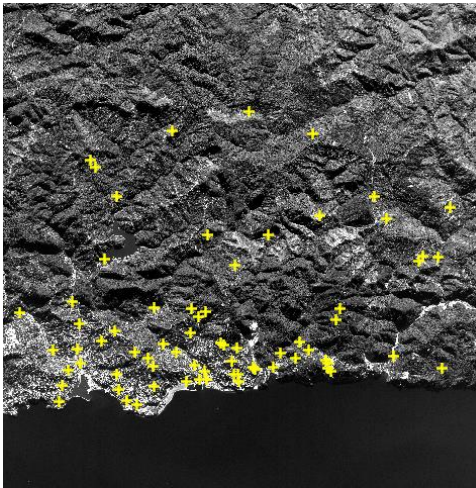
Uygulamada Topan ve diğerleri (2019) tarafından bildirilen Zonguldak test alanı içerisinde belirlenmiş 171 adet YKN'den 70 adedi kullanılmıştır. YKN'ler GNSS ölçümleri ile belirlenmiş olup doğrulukları ± 4 mm ile ± 283 mm arasında değişmektedir. Noktaların birçoğu Kapnias, Milenov ve Kay (2008) tarafından bildirilen şarta uymaktadır. Ayrıca YKN'lerin Topan, Oruç ve Koçak (2007) tarafından tavsiye edildiği gibi yüksekliği yer seviyesinde olacak şekilde, dar yol kavşakları, döner kavşaklar, küçük köprüler gibi simetrik nesnelerin ortasından, ayrıca düşey ve yatay dağılımı homojen olacak şekilde, arazi üzerinde kolay kaybolmayacak, yeri değişmeyecek noktalar olmasına dikkat edilmiştir (Şekil.5).



Şekil 5. YKN örnekleri

b. Uygulama Sonuçları

Arazi üzerinde GNSS ölçüleriyle belirlenen YKN'ler, her bir görüntü üzerinde hassas olarak tespit edilerek ilgili YKN'lere ait görüntü koordinatları bulunmuştur. YKN'lerin nadir görüntü üzerindeki dağılımı Şekil 6'da gösterilmiştir.



Şekil 6. YKN'lerin nadir görüntü üzerindeki dağılımı (70 adet YKN)

Yöneltme işleminin ilk aşaması doğrudan yöneltme olarak da adlandırılmakta olup, ham bakış açıları ve ham DYÖ'ler ile herhangi bir dengeleme işlemine başlamadan Geo3o1

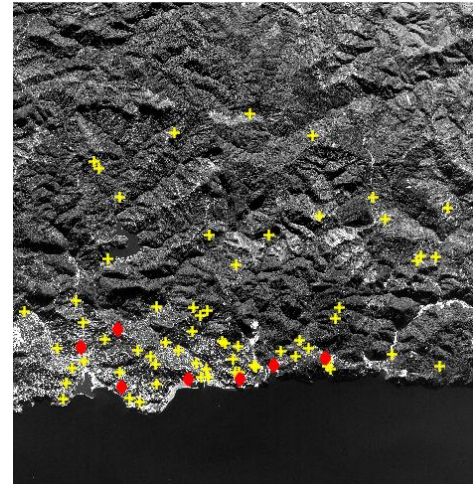
modülü aracılığı ile gerçekleştirilmiştir. İkili ve üçlü bindirmeli olarak hesap yapıldığında elde edilen doğruluk değerleri Tablo 4'te sunulmuştur.

Tablo 4. Doğrudan yöneltme sonuçları

Bindirme Çeşidi	Görüntü No	Doğrudan Yöneltme Doğruluğu ($\pm m$)	$m_p (\pm m)$
İkili Bindirme	83118-82902	$m_x = \pm 1.99$ $m_y = \pm 10.18$ $m_z = \pm 7.22$	$m_p = \pm 12.63$
	83118-83350	$m_x = \pm 4.28$ $m_y = \pm 4.23$ $m_z = \pm 1.90$	$m_p = \pm 6.31$
	82902-83350	$m_x = \pm 3.26$ $m_y = \pm 5.54$ $m_z = \pm 5.55$	$m_p = \pm 8.49$
Üçlü Bindirme	82902-83118-83350	$m_x = \pm 2.14$ $m_y = \pm 6.61$ $m_z = \pm 4.23$	$m_p = \pm 8.13$

$$m_p = \pm \sqrt{m_x^2 + m_y^2 + m_z^2}$$

Ham değerlerle yapılan doğrudan yöneltme işleminden sonra ön ve demet dengeleme faaliyetine geçilmiştir. Bu işlemde YKN'lerin bazıları BDN olarak seçilmiştir. BDN'lerin nadir görüntü üzerindeki dağılımı Şekil 7'de gösterilmektedir.

Şekil 7. BDN'lerin nadir görüntü üzerindeki dağılımı (63 adet YKN, 7 adet BDN) (+: YKN, \diamond : BDN)

Daha önce 2'nci bölümünde ayrıntılı olarak anlatıldığı gibi uydu görüntülerinin yöneltmesinde en büyük hata kaynağı bakış açıları (ψ_x, ψ_y)

olarak belirlendiği için demet dengeleme öncesi DYÖ'ler dengeli kabul edilerek bakış açılarının ön dengelemesi yapılmıştır. Bu noktada öncelikle her bir YKN'ye ait bakış açıları ön dengeleme ile dengelendikten sonra, dengelenmiş bu değerlerle BDN'lere ait bakış açıları enterpolasyonla iç-kestirimle hesaplanmıştır. Daha sonra her bir YKN ve BDN'lere ait 3B koordinatlar dengelenmiş bakış açıları ve ham DYÖ'ler aracılığı ile hesaplanarak noktaların GNSS koordinatları ile karşılaştırılması yapılmıştır.

Ön dengeleme işleminden sonra dengelenmiş bakış açıları, ham DYÖ'ler ve BDN'lere ait koordinatlar demet dengeleme işlemine tabi tutulmuştur. Demet dengelemede özellikle DYÖ'lerin hesaplanmasında kullanılan temel parametreler Tablo 5'te sunulmuştur. Demet dengeleme sırasında bu öğeler seçilirken en az öge ya da öge seti ile hesap yapılması tercih edilmiştir. Bu işlemde özellikle bir önceki aşamada ön dengeleme ile elde edilen koordinatların yüksek doğruluklu olması etkili olmuştur.

Tablo 5. Demet dengelemede kullanılan öğeler

Sıra No	Ögenin adı	Ögenin simgesi
1	Referans pikselin görüntülenme zamanı	$(t_{referans})$
2	Bir satırın görüntülenme zamanı	$(t_{aralık})$
3	Zamansal öteleme	$(t_{öteleme})$
4	Zamansal ölçek	$(t_{ölçek})$
5	Dördey katsayıları	(Q0, Q1, Q2, Q3)
6	Uyduya ait konum verisi (2'nci derece polinom katsayıları)	\vec{P}_u
7	BDN'lere ait yaklaşık koordinatlar	$\sim X, \sim Y, \sim Z$

Ön ve demet dengelemeye ilişkin sonuçlar Tablo 6'da sunulmuştur.

Yapılan uygulama sonunda öncelikle herhangi bir dengeleme işlemine başvurmadan ham bakış açıları ve ham DYÖ'ler ile yapılan ve doğrudan yönelme olarak adlandırılan işleme ait sonuçlar irdelendiğinde gerek ikili ve gerekse üçlü bindirmeli görüntülerin yöneltilmesi sonucunda

ortaya çıkan doğruluk değerlerinin $\pm 6-12 m$ aralığında olduğu ve Göktürk-1 uydu üreticisi Telespazio firması tarafından hedeflenen doğruluk değeri ($\pm 10 m$) ile uyumlu olduğu görülmektedir. Ayrıca Şekil-8'de hata vektörleri incelendiğinde yukarı yönde (görüntünün güneyine doğru) sistematik bir hatanın varlığından söz edilebilir. Bu durum, nokta konumlarının uydudan gelen ham değerlerle hesaplanması neticesinde ortaya çıkan ve beklenen bir durum olarak yorumlanmalıdır (Topan ve Maktav, 2014).

Ön ve demet dengeleme sonuçları açısından incelediğimizde ise, YKN'ler için mm altı seviyede yüksek bir doğruluğa, BDN'ler için ise 1 piksele yakın ($\sim 50 cm$) doğruluk değerlerine erişildiği görülmektedir. Bu değerlerin gerek American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS, 2015) ve Büyük Ölçekli Harita ve Harita Bilgileri Üretim Yönetmeliği (BÖHNBÜY, 2018) standartları, gerekse Leprince, Barbot, Ayoub ve Avouac (2007) tarafından bildirilen doğruluk değerleri içinde kaldığı tespit edilmiştir. Ayrıca ön ve demet dengelemeye ilişkin hata vektörleri Şekil-9 ve 10'da sunulmuş olup, dengeleme işleminden dolayı dağılımın rastgele olduğu görülmektedir.

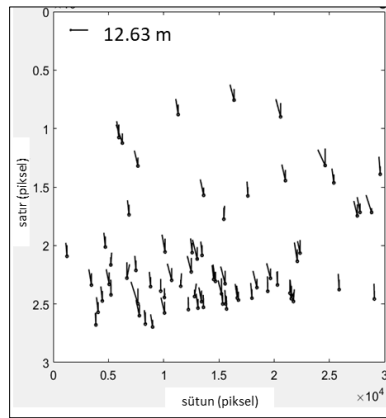
5. SONUÇ

Bu çalışmada, Türkiye'nin ilk metre altı elektro-optik uzaktan algılama uydusu olan Göktürk-1'e ait görüntülerin konum doğruluğunun belirlenmesine yönelik bir araştırma yapılmıştır. Bu amaçla Zonguldak test alanında üçlü bindirmeli olarak alınan pankromatik görüntüler kullanılmış ve görüntülerin yöneltilmesinde algılayıcıya bağımlı yönelme modeli uygulanmıştır. Ayrıca bu çalışmada yazarlar tarafından özgün olarak geliştirilen yazılım kullanılmıştır. Bu kapsamda elde edilen üç boyutlu konum doğruluğu değerleri incelendiğinde gerek ulusal ve gerekse uluslararası konum doğruluğu standartlarının karşılandığı tespit edilmiştir. Dolayısıyla yüksek konum doğruluğu beklenen çalışmalarda, Göktürk-1 görüntülerinin rahatlıkla tercih edilebileceği değerlendirilmektedir.

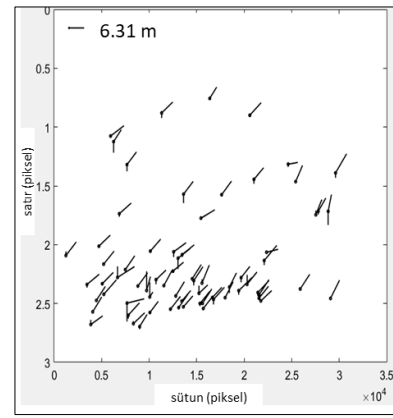
Çalışma her ne kadar güvenilir ve uluslararası öneme sahip bir test alanında gerçekleştirilmiş olsa da farklı test alanlarında uygulama yapılarak kapsamının genişletilmesinin de uygun olacağı kıymetlendirilmektedir.

Tablo 6. Ön ve demet dengelemeye ilişkin sonuçlar

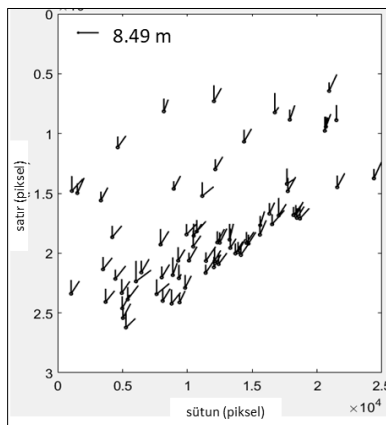
DYÖ	Bindirme Çeşidi	Görüntü Numaraları	YKN/BDN Nokta Sayısı	Nokta Türü	Ön Dengeleme $\pm m$ (YKN'ler için $\times 10^{-4}$)			Demet Dengeleme $\pm m$ (YKN'ler için $\times 10^{-3}$)		
					m_x	m_y	m_z	m_x	m_y	m_z
$(t_{referans})$	İkili Bindirme	83118-82902	63/7	YKN	1.94	2.34	1.76	2.71	3.02	6.30
				BDN	1.01	0.83	1.23	0.99	0.84	1.23
		YKN		0.60	0.76	1.97	0.07	1.88	0.39	
		BDN		0.45	0.56	0.77	0.44	0.56	0.77	
		YKN		0.41	0.66	1.20	6.14	7.79	9.85	
		BDN		0.49	0.49	1.02	0.49	0.49	1.03	
	Üçlü Bindirme	82902-83118-83350	YKN	0.65	0.92	0.95	2.81	5.24	13.1	
			BDN	0.52	0.52	0.89	0.48	0.51	0.92	



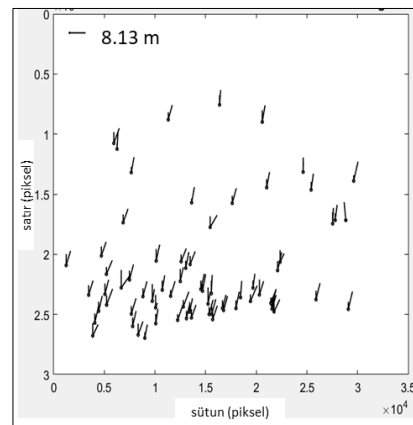
83118-82902



83118-83350

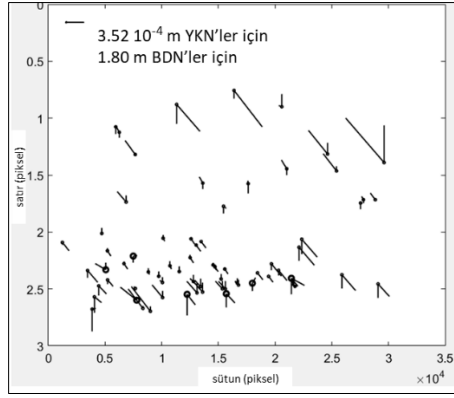


82902-83350

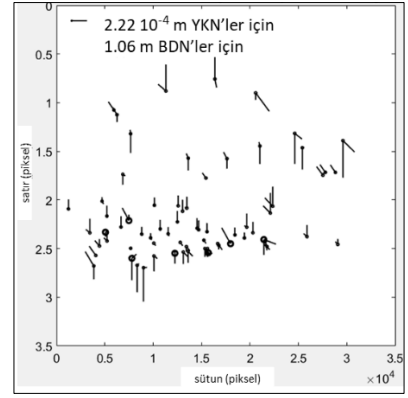


83118-82902-83350

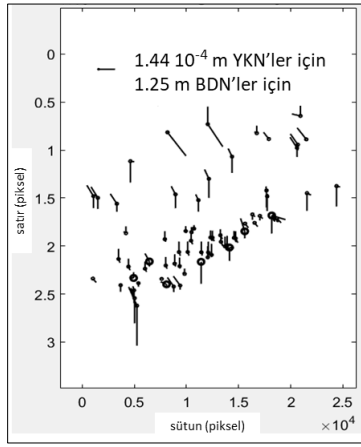
Şekil 8. Doğrudan yöneltme hata vektörleri (YKN) (Köşegen: XY, yukarı-aşağı: Z yönünde hatalar)



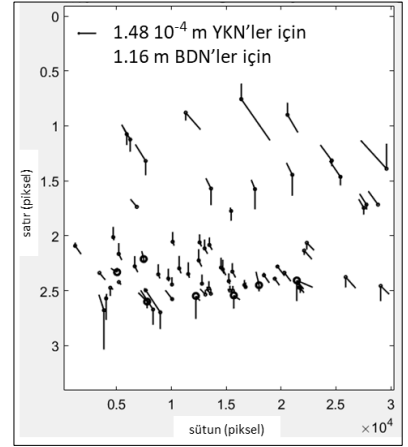
83118-82902



83118-83350

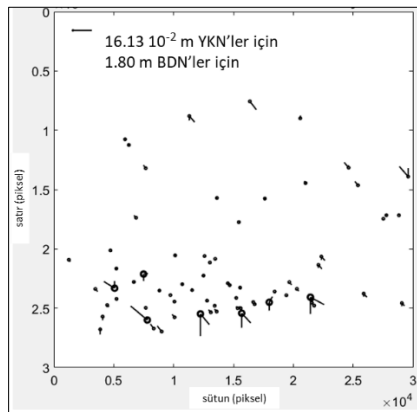


82902-83350

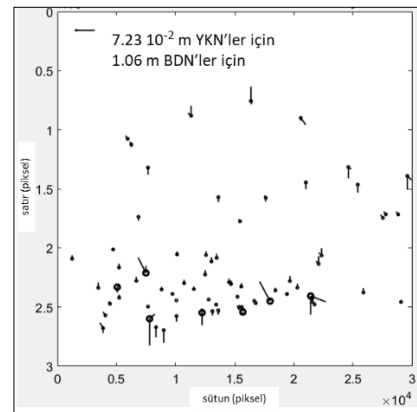


83118-82902-83350

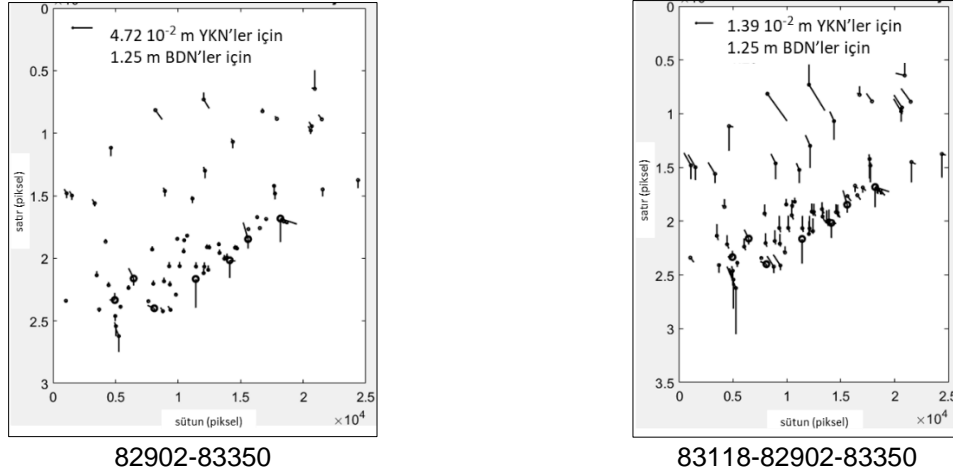
Şekil 9. Ön dengeleme hata vektörleri (YKN/BDN)



83118-82902



83118-83350





Şekil 10. Demet dengeleme hata vektörleri (YKN/BDN)

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, ikinci yazarın danışmanlığında yürütülen birinci yazara ait devam eden doktora tezindeki araştırmalara dayanmaktadır. Göktürk-1 görüntülerinin temini dolayısıyla Hava Kuvvetleri Komutanlığı'na, yer kontrol noktalarının üretilmesindeki katkılarından dolayı TÜBİTAK (Proje No: 114Y380) ve Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi'ne (Proje No: 2014-47912266-01) teşekkür ederiz.

ORCID

Gürsu AYTEKİN  <https://orcid.org/0000-0001-7285-6826>

Hüseyin TOPAN  <https://orcid.org/0000-0001-8195-9333>

KAYNAKLAR

Airbus Defence and Space. (2012). *Pléiades imagery user guide, V 2.0 ed.*

Airbus Defence and Space. (2013). *SPOT 6 & SPOT 7 imagery user guide, SI/DC/13034-v1.0 ed.*

Arasan, G., Yılmaz, A., Fırat, O., Avşar, E., Güner, H., Aygün, K., ve Yüce, D. (2020). Accuracy assessments of Göktürk-1 satellite imagery. *International Journal of Engineering and Geosciences*, 5(3), 160-168. doi: 10.26833/ijeg.650899.

ASPRS, (2015). ASPRS Positional accuracy standards for digital geospatial data. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 81, A1-A26.

Aytekin, G., Topan, H., Elkar, Y.E., Kişi, M. ve Erişik, O. (2019, Haziran). *2D orientation accuracy of Göktürk-1 panchromatic imagery*. 9th International Conference on Recent Advances in Space Technologies (RAST) 2019, İstanbul, Türkiye. doi: 10.1109/RAST.2019.8767879

Bayık, Ç., Topan, H., Özendi, M., Oruç, M., Cam, A. ve Abdikan, S. (2016). Geospatial analysis using remote sensing images: Case studies of Zonguldak test field. *International Archives of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Copernicus Publications, Prague (Czech Republic)*, pp. 435-442. doi:10.5194/isprs-archives-XLI-B1-435-2016

Boccardo, P., Sandu, C., Ajmar, A. ve Perez, F. (2019, Haziran). *Digital surface models extraction by Göktürk-1 satellite stereo pairs*. 9th International Conference on Recent Advances in Space Technologies (RAST) 2019, İstanbul, Türkiye. doi: 10.1109/RAST.2019.8767887

Büyük Ölçekli Harita ve Harita Bilgileri Üretim Yönetmeliği. (2018). No: 2018/11962, Tertibi: 5, Cilt 59. *Fotogrametrik Çalışmalar*. Erişim adresi: <https://www.mevzuat.gov.tr/MevzuatMetin/3.5.201811962.pdf>

Çetin, M. ve Köksal, E. (2020). *Göktürk-1 uydusunun sınıflandırma kapasitesinin alternatif uydu görüntü verileri ile karşılaştırılması*. (Yüksek Lisans Tezi). Erişim adresi: <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezDetay.jsp?id=cMZYR-tObQax07-afG9L3Q&no=bzl5c-f1Zs60k-G-hQ3ZnQ>

- Ebner, H., Hofmann, O., Konus, W., Muller, R. ve Stlunz, G. (1991). A simulation study on point determination using MOMS-02/D2 imagery. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 57 No:10. Erişim adresi: http://www.asprs.org/wp-content/uploads/pers/1991journal/oct/1991_oct_1315-1320.pdf
- Edmundson, K. ve Fraser, C.S. (1998). A practical evaluation of sequential estimation for vision metrology. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 53 (5):272-85. doi: [https://doi.org/10.1016/S0924-2716\(98\)00014-8](https://doi.org/10.1016/S0924-2716(98)00014-8).
- Förstner, W. ve Wrobel, B.P. (2016). *Photogrammetric Computer Vision: Statistics, Geometry, Orientation and Reconstruction*. İsviçre: Springer. doi: 10.1007/978-3-319-11550-4
- GeoEtrim (Geospatial evaluation and training of images). (2022). Erişim adresi: www.github.com/geoetrim
- Giribabu, D., Srinivasa, S.R. ve Murthy, Y.V.N.K. (2013). Improving Cartosat-1 DEM accuracy using synthetic stereo pair and triplet. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 77, 31-43. Erişim adresi: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2012.12.005>
- Gültekin, F.G., Atak, V.O., Ayaz, M. E. ve Arı, M. (2019, Haziran). *Geometric accuracy in satellite imagery: Test methods & Göktürk-1 performance evaluation*. 9th International Conference on Recent Advances in Space Technologies (RAST) 2019, İstanbul, Türkiye. doi: 10.1109/RAST.2019.8767793
- Hartley, R. ve Zisserman, A. (2003). *Multiple view geometry in computer vision*. İngiltere: Cambridge University Press.
- Jeong, J., Yang, C. ve Kim, T. (2015). Geopositioning accuracy using multiple-satellite images: IKONOS, QuickBird, and KOMPSAT-2 Stereo Images. *Remote Sensing* 7, 4549-4564. doi:10.3390/rs70404549.
- Joseph, G. (2015). *Building Earth Observation Cameras*. Florida, USA: CRC Press.
- Jung, H.S., ve Won, J.S. (2008). Formulation of distortion error for the line-of-sight (LOS) vector adjustment model and its role in restitution of SPOT imagery. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 63 (6): 610-20. doi: DOI10.1016/j.isprsjprs.2008.03.002.
- Kapnias, D., Milenov, P. ve Kay, S. (2008). Guidelines for best practice and quality checking of ortho Imagery, *European Commission, Joint Research Centre, Institute for the Protection and Security of the Citizen*. doi: 10.2788/36028.
- Kornus, W., Alamús, R., Ruiz, A. ve Talaya, J. (2006). DEM generation from SPOT-5 3-fold along track stereoscopic imagery using autocalibration. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 60 (3):14759. doi: 10.1016/j.isprsjprs.2005.12.004.
- Leprince, S., Barbot, S., Ayoub, F. ve Avouac, J.P. (2007). Automatic and precise orthorectification, coregistration, and subpixel correlation of satellite images, application to ground deformation measurements. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 45, 1529-1558. doi:10.1109/Tgrs.2006.888937
- Li, R., Zhou, F., Niu, X. ve Kaichang, D. (2007). Integration of Ikonos and QuickBird imagery for geopositioning accuracy analysis. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 73 No:9. Erişim adresi: <https://www.researchgate.net>
- Li, H. (2010, Haziran). *Multi-view structure computation without explicitly estimating motion*. 2010 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Canberra, Avustralya. doi:10.1109/CVPR.2010.5540005.
- OGC. (1999). *The OpenGIS abstract specification Topic 6: The Coverage Type and its Subtypes Version 4*. Erişim adresi: <https://www.ogc.org/docs/as>
- Ottaviano, M., Sertel, E. ve Marchetti M. (2019, Haziran). *Turkish Satellite Göktürk-1 at work: applications for artificial, natural and semi-natural resources, mapping and inventory*. 9th International Conference on Recent Advances in Space Technologies (RAST) 2019, İstanbul, Türkiye. doi: 10.1109/RAST.2019.8767465

- Öztürk, E. ve Şerbetçi, M. (1995). Dengeleme Hesabı Cilt II. Trabzon: Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Yayını.
- Polat, H.C, Atak, V.O., Kocabıçak, İ.E., Gürçay, E., Gültekin F.G., ve Yanteri, E.E. (2019, Haziran). *Satellite imagery calibration and quality assessment tests: GÖKTÜRK-1 case study*. 9th International Conference on Recent Advances in Space Technologies (RAST) 2019, İstanbul, Türkiye. doi: 10.1109/RAST.2019.8767436
- Poli, D. ve Toutin, T. (2012). Review of developments in geometric modelling for high resolution satellite pushbroom sensors. *The Photogrammetric Record* 27, 58-73. doi: 10.1111/j.1477-9730.2011.00665.x.
- Poli, D., Remondino, F., Angiuli, E. ve Agugiaro, G. (2015). Radiometric and geometric evaluation of GeoEye-1, WorldView-2 and Pléiades-1A stereo images for 3D information extraction. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 100, 35–47. doi: 10.1016/j.isprsjprs.2014.04.007.
- Ravanelli, R. Lastilla, L., ve Crespi, M. (2019, Haziran). *Orthoimage generation by GÖKTÜRK-1: A test case in Rome*. 9th International Conference on Recent Advances in Space Technologies (RAST) 2019, İstanbul, Türkiye. doi: 10.1109/RAST.2019.8767878.
- Ressl, C. (2003). *Geometry, constraints and computation of the trifocal tensor*, faculty of science and computer science. (Doktora Tezi). Erişim adresi: <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.128.9482&rep=rep1&type=pdf>
- Tarçın, A. Ç., Poyraz, Ü., Bayramoğlu, M., Şahin, D. Ö., Yalçınkaya, E., ve Çelebioğlu, O. (2019, Haziran). *GÖKTÜRK-1 satellite propulsion subsystem design, integration, test and launch campaign activities*. 9th International Conference on Recent Advances in Space Technologies (RAST) 2019, İstanbul, Türkiye. doi: 10.1109/RAST.2019.8767822.
- Telespazio. (2022). Gökürk-1. Erişim adresi: <https://www.telespazio.com/en/programmes/gokturk>
- Topan, H., Oruç, M. ve Koçak, M.G. (2007, Nisan). *Ortogörüntü üretiminde yer kontrol noktası seçimi ve sonuçlara etkisi*. 11. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı, Ankara. Erişim adresi: https://obs.hkmo.org.tr/show-media/resimler/ekler/CBCF_bf12cb74e96e67_e_ek.pdf
- Topan, H. ve Maktav, D. (2014). Efficiency of orientation parameters on georeferencing accuracy of SPOT-5 HRG Level-1A stereoisimages. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 52, 3683-3694. doi: 10.1007/s12524-013-0273-4
- Topan, H., Jacobsen, K., Cam, A., Ozendi, M., Oruç, M., Bakioğlu, O., ... Taşkanat T. (2019). Comprehensive evaluation of Pléiades-1A bundle images for geospatial applications. *Arabian Journal of Geosciences* 12 (7:223):1-16. doi: 10.1007/s12517-019-4353-9.
- Topan, H. (2022). 3D Georeferencing Accuracy Assessment of Pléiades-1A Stereo Panchromatic Images by Sensor Dependent Orientation Model. *Journal of Applied Remote Sensing*. (Under review).
- Ünal, A. ve Yıldız, F. (2022). Gökürk-1 uydu görüntülerinin pankeskinleştirme performansının incelenmesi. *Geomatik* 6 (2):148-64. doi: 10.29128/geomatik.731816.
- Wang, X. ve Clarke, T.A. (2001). Separate adjustment in close-range photogrammetry. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* 55, 289–298. Erişim adresi: [https://doi.org/10.1016/S0924-2716\(01\)00021-1](https://doi.org/10.1016/S0924-2716(01)00021-1)
- Weser, T., Rottensteiner, F., Willneff, J., Poon, J. ve Fraser, C.S. (2008). Development and testing of a generic sensor model for pushbroom satellite imagery. *The Photogrammetric Record* 23, 255-274. doi:10.1111/j.1477-9730.2008.00489.x.
- Yavaş, G. ve Akgül, S. (2019, Haziran). *GÖKTÜRK-1 satellite system level radiated emission and radiated susceptibility tests*. 9th International Conference on Recent Advances in Space Technologies (RAST) 2019, İstanbul, Türkiye. doi: 10.1109/RAST.2019.8767824.
- Zhang, L. (2005). *Automatic digital surface model (DSM) generation from linear array images*. (Doktora Tezi). Erişim adresi: https://ethz.ch/content/dam/ethz/special-interest/baug/igp/igp-dam/documents/PhD_Theses/88.pdf