

GÖKTÜRK-2 STEREOSKOPIK GÖRÜNTÜLERİNDEN SAYISAL YÜZEY MODELİ ÜRETİMİ

Ali Özgün Ok

Nevşehir H.B.V. Üniversitesi, Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği Bölümü, 50300, 2000 Evler, Nevşehir
ozgunok@nevsehir.edu.tr, ozguneo@gmail.com

Komisyon III

ANAHTAR SÖZCÜKLER: Göktürk-2; Stereo Görüntü; Sayısal Yüzeysel Modeli; SIFT-Akış; Pozisyon-Dönüklük Modeli

ÖZET:

Bu çalışmada 2.5 m çözünürlüklü pankromatik Göktürk-2 stereo görüntülerinden otomatik sayısal yüzeysel modeli (SYM) üretimi konusu ele alınmıştır. Göktürk-2 stereo verileri özelinde farklı nedenlerden dolayı piksel-altı düzeyde epipolar görüntüsünü operasyonel olarak üretmek mümkün gözükmemektedir. Bu nedenle Göktürk-2 verilerinden herhangi bir kullanıcı girdisi olmadan eşlemeyi doğrudan ham geometrideki stereo veriler üzerinden yapabilecek SIFT-akış yöntemi adapte edilmiştir. Devamında Göktürk-2 pankromatik verileri için pozisyon-dönüklük geometrik modeli geliştirilmiş ve stereo eşlemesi yapılan görüntülerden SYM üretilmiştir. Test alanı olarak Bergama alanı seçilmiş ve bu stereo veri için Harita Genel Komutanlığı tarafından sağlanan Yer Kontrol Noktaları (YKN) geometrik modelin oluşturulması amacıyla oluşturulmuştur. Elde edilen sonuçlara göre geometrik model manuel olarak yeterli sayıda ve iyi dağılmış olarak toplanmış YKN'ler için yatayda 4 piksel civarında bir genel KOH değeri üretebilmektedir. Bunun yanı sıra üretilen SYM'de YKN'ler için düşeyde ise yaklaşık olarak 6 m civarında bir KOH elde edilmiştir. YKN'ler için maksimum hata ise 15 m civarında hesaplanmıştır. Ortalama hatanın ise sıfır değerine yakın olduğu gözlenmiş ve bu da düşeyde sistematik bir hatanın bulunmadığına işaret etmiştir. Elde edilen tüm sonuçlar Göktürk-2 stereo pankromatik verilerinden SIFT-Akış eşleme ve pozisyon-dönüklük fiziksel modeli kullanılarak kabul edilebilir düzeyde SYM elde edilebileceğine işaret etmektedir.

ABSTRACT:

In this study, automated digital surface model (DSM) generation from 2.5 m resolution panchromatic Göktürk-2 stereo images is discussed. It seems impossible to operationally produce sub-pixel epipolar images due to different reasons for the Göktürk-2 stereo data. For this reason, the SIFT-flow method has been adapted to the Göktürk-2 data, which can perform the mapping directly on stereo data in raw geometry without requiring any user input. Thereafter, geometric model of position-rotation for the Göktürk-2 panchromatic data was developed and DSM was generated from stereo-matched images. As the test area, the Bergama region was chosen, and the Ground Control Points (GCPs) provided by the General Command of the Mapping of Turkey was used to form the geometric model. According to the results computed, the geometric model can produce an overall RMS around 4 pixels horizontally for the manually collected GCPs which are in sufficient number and well scattered through the stereo images. Besides, an RMS of about 6 m was obtained vertically for the GCPs in the DSM generated. The maximum error for computed for the GCPs was around 15 m. The average error was found to be close to zero, indicating that there was no systematic error in the vertical direction. All the results indicate that an acceptable level of DSM can be obtained from the Göktürk-2 stereo panchromatic data using the SIFT-flow matching and position-rotation physical model.

1. GİRİŞ

Milli Savunma Bakanlığı, TÜBİTAK Başkanlığı ve TÜBİTAK UZAY – TUSAŞ İş Ortaklığıyla geliştirilen Göktürk-2 elektro-optik yer gözlem uydusu 18 Aralık 2012 tarihinde yaklaşık 685 km.'deki yörüngesine fırlatıldığından bu yana çoğunlukla askeri amaçlı kullanıma sunulmuş olsa da mümkün olduğunca sivil amaçlı çalışmalara da hizmet verebilen yüksek yersel çözünürlüğe sahip 4-bantlı görüntü sağlanabilen operasyonel bir platformdur. Platform üzerinde bulunan pankromatik algılayıcı görüntü merkezinde 2.5 m./piksel; çok bantlı algılayıcı ise merkezde 5 m./piksel yer örnekleme aralığında algılama yapabilmektedir. Her iki algılayıcı da 11 bit (2048 kademe) radyometrik derinliğe sahiptir. Platformda bulunan algılayıcıların operasyonel olarak $\pm 30^\circ$ yönlendirilebilmesi ihtiyaç halinde aynı alanın ortalama 2-3 gün aralıkla tekrar görüntülenebilmesini sağlamaktadır.

Platform üzerinde yer alan pankromatik kamera doğrusal dizi CCD-algılayıcı şeklinde oluşturulmuş olup toplamda 8192 piksele sahiptir. Pankromatik kameradaki CCD-algılayıcı

boyutu ise 5 mikron ve kameranın efektif odak uzaklığı ise 1416.24 mm.'dir (Küpçü vd., 2014). Benzer şekilde platformdaki çok-bantlı algılayıcı her biri kendi içerisinde 4 farklı spektral aralığa (Mavi, Yeşil, Kırmızı ve Yakın Kızılötesi) duyarlı doğrusal dizi CCD-algılayıcı içermektedir. Çok-bantlı kameradaki CCD-algılayıcı boyutu ise 10 mikron ve her spektral aralığa duyarlı 4 kameranın efektif odak uzaklığı ise 1413 ve 1422 mm. arasında değişmektedir. Bu algılayıcılar ile taranan yersel iz düşüm genişliği merkez bakış açısı ile 20 km.'dir (Teke, 2016).

Uydu görüntülerinden bir bölgenin sayısal yüzeysel modelini elde edebilmek için en az iki farklı konumdan farklı bakış açıları ile çekilmiş stereo görüntülere ihtiyaç vardır. Göktürk-2 platformu, stereo görüntüleri uydu platformunun yunuslama açısını ileri ve geri yönde değiştirerek aynı yörüngede almaktadır. Boyuna-iz stereoskopisi adı verilen bu teknik aynı zamanda ve IKONOS, Pleiades, WorldView gibi çeşitli uydularda da kullanılmaktadır. Bu stereo çekim tekniği temel olarak radyometrik değişikliklerin minimum seviyede kalması açısından büyük avantaj sağlar (Toutin, 2001). Stereo görüntü saniiyeler veya

dakikalar içinde çekilebildiğinden elde edilen görüntüler tutarlılık ve kalite bakımından oldukça iyidir. Bu nedenle, bu yöntemle elde edilen stereo görüntü çiftleri otomatik görüntü eşleme işlemi için en uygun stereo görüntülerdir ve topoğrafik haritalama için uygun olan baz yükseklik (B/H) oranları kolayca elde edilebilir.

Bölgeye ait 3-B koordinatları elde edebilmek için bir görüntü üzerindeki her bir pikselin paralaks değerlerinin (veya eşlenik piksellerin) bulunması gereklidir. Görüntülerdeki eşlenik piksellerin bulunmasının ardından bir sensör modeli (örn. pozisyon-dönüklük) ve 3-B stereo kesişim yöntemi yardımıyla mutlak yükseklik değerleri elde edilmektedir. Göktürk-2 stereo görüntülerinden sayısal yüzey modeli (SYM) üretimi üzerine yapılan çalışmalar oldukça sınırlıdır. Yapılan ilk çalışmada ticari bir yazılım kullanılmış ve İzmir iline ait stereo görüntü üzerine yapılan testler sonucunda eşlemenin genel olarak kaba hatalar içerdiği gözlenmiştir (Atak vd., 2015). İkinci çalışmada ise Diyarbakır iline ait bir görüntü kullanılmış ve kısa mesafelerde epipolar doğrusu üzerinde korelasyon tabanlı bir eşleme gerçekleştirilmiştir (Kozal ve Leloğlu, 2015). Bir diğer çalışmada ise Ok (2016) Göktürk-2 pankromatik görüntüleri için SIFT-akış algoritması temelinde bir eşleme stratejisi önermiştir. Fakat literatürde henüz Göktürk-2'den elde edilebilecek SYM hassasiyeti hakkında net bir sonuç veren bir çalışma bulunmamaktadır.

Bu çalışmada 2.5 m çözünürlüklü pankromatik Göktürk-2 stereo görüntülerinden sayısal yüzey modeli (SYM) üretimi konusu ele alınmıştır. Göktürk-2 stereo verileri özelinde farklı nedenlerden dolayı piksel-altı düzeyde epipolar görüntüsünü operasyonel olarak üretmek mümkün gözükmemektedir. Bu nedenle Göktürk-2 verilerinden herhangi bir kullanıcı girdisi olmadan eşlemeyi doğrudan ham geometrideki stereo veriler üzerinden yapabilecek SIFT-akış yöntemi adapte edilmiştir (Ok, 2016). Devamında Göktürk-2 pankromatik verileri için pozisyon-dönüklük geometrik modeli geliştirilmiş ve stereo eşlemesi yapılan görüntülerden SYM üretilmiştir. Test alanı olarak Bergama alanı seçilmiş ve bu stereo veri için sayısal sonuçlar üretilmiştir.

Bildiride ilk olarak stereo görüntülerin otomatik eşlenmesi konusu ele alınmış ve bu konuda adapte edilen SIFT-akış yöntemi açıklanmıştır (Bölüm 2). Devamında Göktürk-2 için geliştirilmiş olan pozisyon-dönüklük geometrik modeli tanıtılmış (Bölüm 3) ve SYM üretimi hakkında detaylar verilmiştir (Bölüm 4). Bergama test alanına ait bilgiler ve SYM sonuçları 5. Bölümde sunulmuştur. Son bölümde (Bölüm 6) bu çalışmada elde edilen sonuçlar özetlenmiştir.

2. GÖRÜNTÜ EŞLEME

Stereoskopik paralaks (aynı zamanda görüntü paralaksı olarak da adlandırılır) uydü hareketi ve/veya her bir stereo görüntü merkez noktasına göre görüş açısı farklılıkları ile ortaya çıkan belirli bir nesnenin konumunun zahiri olarak tanımlanabilir. Stereoskopik paralaks toplamda iki türlü ortaya çıkar; (i) uçuş ekseninde oluşan x paralaksı ve (ii) uçuş eksenine dik olan y paralaksı. Uydü platformunun hareketinin doğal bir sonucu x paralaks olarak tanımlanır ve gözlemlenen nesnelerin yükseklik bilgilerinin oluşturulması için kilit bilgiyi oluşturur. Öte yandan, y paralaksı genellikle stereo görüntülerin çekim esnasında oluşan yönelim farklılıklarının bir sonucudur.

Sayısal stereo görüntülerdeki paralaksları elde edebilmek için (i) lokal, (ii) yarı-global ve (iii) global olmak üzere üç ana yöntem bulunmaktadır (Ok, 2016). Fakat bu yöntemlerden yüksek performans elde edebilmek için ham stereo görüntülerin öncelikle epipolar görüntü düzlemine dönüştürülmesi gerekliliği

bulunmaktadır. Fakat bu hassas dönüşüm için gereken yöre ve yönelim bilgilerinin Göktürk-2 için yeterli düzeyde olmaması ve bu dönüşümün başarılı bir şekilde gerçekleştirilebilmesi için stereo olarak tanımlanmış çok sayıda (>10) ve hassas (yatayda ve düşeyde < 1 piksel) Yer Kontrol Noktası (YKN) ihtiyacı nedeniyle operasyonel anlamda Göktürk-2 stereo görüntülerinden epipolar görüntü üretmek mümkün gözükmemektedir. Bu nedenle çok farklı görüntüler üzerinde bile çalışabilen ve temelinde görüntü hizalama problemi için geliştirilmiş olan SIFT-akış yöntemi (Liu vd., 2011) Göktürk-2 stereo eşleme problemine adapte edilmiştir.

SIFT-akış, iki görüntü arasında yoğun olarak piksel bazında eşlemeye izin veren optik akış yöntemlerinden esinlenilerek geliştirilen ve temelinde ham piksel değerleri yerine SIFT betimleyicisi üzerinde eşlemeyi gerçekleştiren bir yöntemdir. Bir SIFT betimleyicisi yerel görüntü yapılarını ortaya çıkarmak ve bağlamsal bilgileri kodlamak için her piksel için tanımlanır. Devamında süreksizlik koruyan bir akış tahmini algoritması iki görüntü arasında SIFT tanımlayıcıları eşleştirmek için kullanılır. SIFT yerel gradyan bilgilerini karakterize eden bir betimleyicidir (Lowe, 2004). Bir görüntüdeki her pikselin komşuluğu (örn. 16×16) 4×4 hücreli diziye bölünür, ve her hücredeki gradyan yönelimi 8 bin'e bölünür ve her piksel için $4 \times 4 \times 8 = 128$ boyutlu bir vektör elde edilir. Bu vektör stereo görüntülerdeki tüm pikseller için oluşturulur ve stereo görüntülerden SIFT görüntüleri elde edilir.

SIFT-akış için optik-akış ile aynı yöntem kullanılmış fakat eşleme için stereo görüntülerdeki sayısal değerlerin yerine SIFT betimleyicileri kullanılmaktadır. Bu nedenle, SIFT-akışın amaç fonksiyonu optik akış fonksiyonuna çok benzemektedir. $\mathbf{p}=(x,y)$ görüntü piksel koordinatını, $\mathbf{w}(\mathbf{p})=(u(\mathbf{p}),v(\mathbf{p}))$ ise \mathbf{p} pikselindeki akış vektörünü, s_1 ve s_2 ise eşlemek istenilen iki SIFT görüntüsünü ve ϵ bir pikselin 4-komşuluğunu tanımlar ise SIFT-akışın enerji denklemi Eş. 1'teki gibi yazılabilir (Liu vd., 2011):

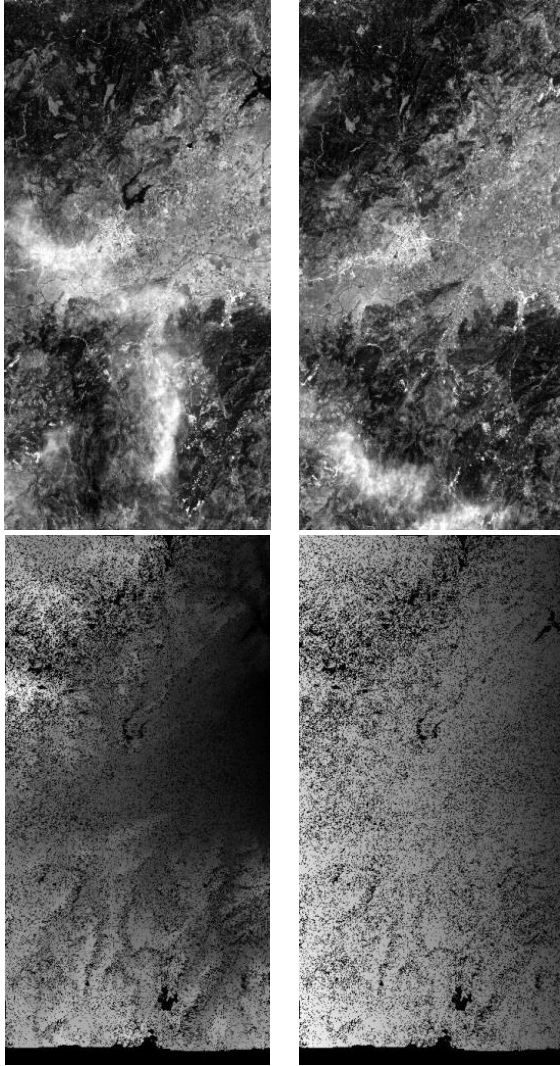
$$E(\mathbf{w}) = \sum_{\mathbf{p}} \min \left(\|s_1(\mathbf{p}) - s_2(\mathbf{p} + \mathbf{w}(\mathbf{p}))\|_1, t \right) + \sum_{\mathbf{p}, \mathbf{q} \in \epsilon} \eta(|u(\mathbf{p})| + |v(\mathbf{p})|) + \sum_{(\mathbf{p}, \mathbf{q}) \in \epsilon} \min(\alpha|u(\mathbf{p}) - u(\mathbf{q})|, d) + \min(\alpha|v(\mathbf{p}) - v(\mathbf{q})|, d) \quad (1)$$

Eş. 1, veri terimi, küçük yer değiştirme terimi ve pürüzsüzlük terimi olmak üzere 3 farklı terimin birleşiminden meydana gelmektedir. Veri terimi akış vektörü boyunca eşleştirilecek SIFT betimleyicileri kısıtlamakta, küçük yer değiştirme terimi başka bir bilgi olmadığında mümkün olduğunca küçük akış vektörleri oluşmasını sağlamakta ve pürüzsüzlük terimi komşu piksellerin akış vektörlerinin benzer olmasını garanti etmektedir. t ve d ise sırasıyla veri terimi ve pürüzsüzlük terimleri için eşik değerlerini tanımlamaktadır.

Yöntemin çözümünde Eş. 3'teki enerji denklemini optimize etmek için bir çift katmanlı döngülü inanç yayılımı algoritması (Liu vd., 2011) kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra yöntemin performansını hem hız hem de eşleme doğruluğu bakımından arttırmak için düşük çözünürlükten yüksek çözünürlüğe doğru giden ve SIFT görüntülerinden oluşturulan görüntü piramitleri kullanılmış ve kabadan detaya doğru eşleme yapabilen bir strateji de uygulanmıştır. Göktürk-2 Bergama test görüntüsünün SIFT-akış yöntemi sonucunda elde edilen paralaks görüntüleri Şekil 1'de sunulmuştur (Ok, 2016).

3. GEOMETRİK MODEL

Bu çalışmada Göktürk-2 pankromatik verileri için pozisyon-dönüklük (P-D) geometrik modeli geliştirilmiş ve stereo



Şekil 1. (ilk satır) Göktürk-2 Bergama stereo test görüntüsü, (ikinci satır) ilk görüntü için SIFT-akış yöntemi ile elde edilen sırasıyla x ve y paralaks görüntüleri. Siyah kısımlar stereo veride ortak olmayan (kenar pikseller) veya paralaks tutarlılık testi sonucunda hatası > 2 piksel olan alanları belirtmektedir.

eşlemesi yapılan görüntülerden SYM üretilmiştir. P-D modelinin temeli kolinear denklemlere dayanmaktadır (Kim ve Dowman, 2006):

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ -f \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ y \\ -f \end{pmatrix} = \lambda [\mathbf{R}^i]^T \begin{pmatrix} X - X_L^i \\ Y - Y_L^i \\ Z - Z_L^i \end{pmatrix} \quad (2)$$

Eş. 2'de x ve y sensör koordinatlarını, f odak uzaklığını, λ ölçek katsayısını, \mathbf{R}^i sensör düzleminde direk olarak yer referans düzlemine geçişi sağlayan ve üç (omega, phi, kappa) açının oluşturduğu toplamda dokuz elemandan oluşan dönüşüm matrisini, X , Y ve Z yer koordinatlarını ve X_L^i , Y_L^i ve Z_L^i ise sensör düzlemi merkezinin koordinatlarını tanımlamaktadır. P-D modelinde tek bir dönüşüm matris kullanılması farklı uydular ve sensörler için farklı matematiksel yaklaşımlar zorunluluğunu ortadan kaldırmaktadır. Fakat yine çizgisel tarayıcı sensörün doğası gereği, dış yöneltme parametrelerinin (X_L^i , Y_L^i ve Z_L^i , omega, phi, kappa) zamana bağlı olarak modellenmesi gerekmektedir. Bu çalışmada, dış yöneltme parametrelerinin zamana (t_i) göre değişimi, parametreler arası korelasyonlar da

dikkate alınacak şekilde Orun ve Natarajan (1994) tarafından önerilen şekilde alınmıştır:

$$\begin{aligned} X_L^i &= X_L + a_1 \times t_i + b_1 \times t_i^2 & \omega^i &= \omega_L \\ Y_L^i &= Y_L + a_2 \times t_i + b_2 \times t_i^2 & \phi^i &= \phi_L \\ Z_L^i &= Z_L + a_3 \times t_i + b_3 \times t_i^2 & \kappa^i &= \kappa_L + a_4 \times t_i + b_4 \times t_i^2 \end{aligned} \quad (3)$$

Eş. 3'te a_1 - a_4 ve b_1 - b_4 olmak üzere toplamda 8 bilinmeyen katsayı bulunmaktadır. Bu çalışmada P-D modelindeki bilinmeyen tüm parametreler sağlanan YKN'ler yardımıyla en küçük kareler yöntemi ile her iki stereo görüntü için ayrı ayrı tahmin edilmiştir. Bu işlem sırasında iç yöneltme parametreleri (f , x_0 , y_0) sabit olarak alınmış ve hatasız olarak kabul edilmiştir. Parametrelerin tahmini sırasında *Yerel* koordinat sistemi kullanılmıştır. *Yerel* koordinat sisteminde orijin Dünya üzerinde tanımlanacak herhangi bir yer olabilmektedir (Manual of Photogrammetry, 2004). Dolayısıyla, dönüşüm için gerekli olan en önemli parametre *Yerel* koordinat sisteminin merkez noktasıdır. Bu çalışmada, merkez noktanın koordinatları, her görüntü için, ayrı ayrı toplanmış ve P-D modelinin bilinmeyenlerinin tahmin edilmesi için gerekli olan YKN noktalarından ilk noktanın koordinatları olarak tanımlanmış ve bu koordinatlar her görüntü için oluşturulacak olan *Yerel* koordinat sisteminin merkez nokta koordinatları (Jacobsen, 2005) olarak kabul edilmiştir.

4. SYM ÜRETİMİ

Görüntü eşleme sonucunda elde edilen paralaks değerlerinin yükseklik değerlerine dönüştürülmesi gerekmektedir. 3B stereo keşişim yöntemi, Bölüm 2'de elde edilen paralaks değerlerini P-D modeli kullanılarak mutlak yükseklik değerlerine dönüştürmek için kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntem stereo görüntüde aynı nesneye karşılık gelen eşlenik noktalardan geçen ışınların uzayda keşişmesi gerektiği gerçeğini kullanır.

Bir noktanın bilinmeyen yer koordinatlarını (X , Y ve Z) bulmak için yine Eş. 2'de verilen kolinear denklemlerden faydalanılır. Bu durumda iki denklem sol görüntü ve iki denklem sağ görüntü için paralaks bilgisi de kullanılarak yazılabilir. Toplamda elde edilen dört denklem üç bilinmeyenli bir problemi en küçük kareler kestirimi ile çözmek için yeterlidir. Bu aşamada en küçük kareler metodundaki iterasyonlar bilinmeyenler (aranan noktanın yer koordinatları) için sonuçlar tatmin edici ve düzeltmeler önemsiz olana kadar sürdürülmektedir. Bu hesaplamalar için bilinmeyenlere ait başlangıç değerlerinin önceden belirlenmesi gerekmektedir ve yöntemde *Yerel* koordinat sistemi kullanıldığı için tüm noktalar için başlangıç değerleri X , Y ve Z 'de 0 olarak alınmıştır.

Paralaks çıkarımı aşamasında bulunan tüm eşlenik noktalar stereo keşişim yöntemi kullanılarak mutlak yükseklik değerlerine dönüştürülmüştür. Devamında elde edilen tüm noktalara ait yer koordinatları bir SYM oluşturulacak şekilde yeniden örneklenmiştir. Son aşamada, yeniden örnekleme sonrasında SYM'de oluşan boşluklar lineer enterpolasyon yöntemi ile doldurulmuş ve SYM üretimi sonlandırılmıştır.

5. TEST ALANI VE SONUÇLAR

Bu çalışmada 2.5 m yer örnekleme aralığına sahip Göktürk-2 pankromatik kamerası ile çekilen Bergama (16,320x8,192 piksel) stereo görüntüsü kullanılmıştır (Şekil 1 - ilk satır). Görüntüler 1B düzeyinde olup radyometrik düzetmesi (Teke

vd., 2016; Teke, 2016) yapılmış fakat herhangi bir geometrik düzeltme uygulanmamıştır.

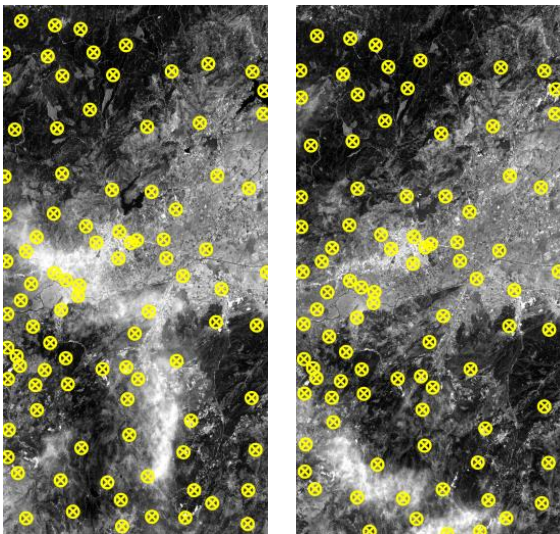
Bergama stereo verisi için Harita Genel Komutanlığı tarafından sağlanan YKN'ler (Şekil 2) kullanılarak P-D geometrik modeli oluşturulmuştur. YKN'lerin konumsal koordinatları (X ve Y) 30 cm çözünürlüğe sahip ortogörüntülerden, yükseklik bilgisi (Z) ise 1:25,000 ölçekli topoğrafik haritalardan toplanmıştır.

SIFT-akış yönteminin uygulanması sırasında her iki stereo görüntüye ayrı ayrı 2-ölçekli SIFT uygulanmış (1 ve 4 piksel) ve çıkarılan öznelik bilgileri eşleme öncesinde her görüntü için bitleştirilmiştir. Aynı zamanda görüntülerin boyutlarının büyük olması nedeniyle hafıza ve hız problemlerinin önüne geçebilmek amacıyla görüntü adım aralığı 2 piksel olarak seçilmiş ve tüm eşleme bindirmeli bloklar tanımlanarak paralel işleme stratejisi ile mümkün olan en hızlı şekilde gerçekleştirilmiştir. SIFT görüntü piramitleri ise her görüntü için mümkün olan en üst düzeyden tanımlanarak eşleme başlatılmıştır. Eş. 3'te yer alan parametreler için ise (α, d, η) en uygun değerler araştırılarak Göktürk-2 pankromatik görüntüleri için en iyi sonucu veren değerler kullanılmıştır.

Bunlardan başka olarak paralaks görüntüleri son işleme adımında otomatik olarak kaba hatalardan arındırılmıştır. Bu işlem için ilk görüntü için hesaplanan paralaks, ayrıca ikinci görüntü içinde bağımsız olarak hesaplanmaktadır. Bu da elde edilen paralaks değerlerinin doğruluğunun test edilebildiği sol-sağ paralaks tutarlılık testinin yapılmasına imkân vermektedir. Bu sayede görüntülerdeki kaba hatalar da otomatik olarak büyük oranda temizlenmiştir (Şekil 1).

Sağlanan tüm noktalar YKN olarak verildiğinde Bergama bölgesine ait ilk görüntünün P-D modelinin X yönündeki genel KOH değeri 3.30 piksel, Y yönündeki genel KOH değeri 2.70 piksel ve genel KOH değeri 4.26 piksel olarak hesaplanmıştır. İkinci görüntünün P-D modelinin ise X yönündeki genel KOH değeri 3.31 piksel, Y yönündeki genel KOH değeri 2.78 piksel ve genel KOH değeri 4.32 piksel olarak bulunmuştur (Tablo 1).

Tablo 1'den de anlaşılacağı üzere her iki görüntünün de X ve Y yönlerindeki genel KOH değeri uyum göstermekte ve toplamda YKN'lerde yaklaşık olarak 4 piksellik genel KOH değeri ile dış yöneltme işlemi gerçekleştirilebilmektedir. O-N modelinin hassas YKN'ler kullanıldığında toplamda 1 pikselden daha iyi



Şekil 2. Harita Genel Komutanlığı tarafından sağlanan YKN'ler.

Stereo Görüntü ID	Toplam YKN	Genel YKN KOH (piksel)		
		X	Y	Toplam
#1	93	3.30	2.70	4.26
#2	91	3.31	2.78	4.32

Tablo 1. Bergama stereo verisi için Harita Genel Komutanlığı tarafından sağlanan YKN'ler için P-D modeli sonuçları (X, Y).

sonuçlar üretebileceği daha önceki çalışmalarda kanıtlanmıştır (Ok, 2005). Bu nedenle 4 piksellik genel KOH değerinin bir kısmının YKN'lerin yükseklik verilerinin yeterince hassas olmayan 1:25,000 ölçekli topoğrafik haritalardan toplanması nedeniyle oluştuğu düşünülmektedir. Bunun yanı sıra kullanılan model sadece dış yöneltme parametrelerini modellemekte, iç yöneltme parametrelerini hatasız ve diğer algılayıcı tabanlı hata kaynaklarını sıfır kabul etmektedir. Bu varsayımların da 4 piksellik genel KOH değerinin bir kısmını oluşturduğu tahmin edilmektedir.

Tablo 2'den görüleceği üzere Z yönünde genel KOH hatası 6.07 m olarak hesaplanmıştır. YKN yükseklik değerlerinin 1:25,000 ölçekli topoğrafik haritalardan toplandığı düşünüldüğünde bu değer oldukça başarılı olduğu düşünülmektedir. Yine sıfır değerine yakın ortalama hata ve 5.22 m düzeyindeki ortalama mutlak hata sonuçlarının başarısını ortaya koymaktadır. 91 stereo YKN ele alındığında en yüksek mutlak hata değeri ise 15.82 m olarak hesaplanmıştır. Yatayda elde edilen 4 piksellik KOH değeri düşünüldüğünde bu sonucunda normal olarak kabul edilebileceği düşünülmektedir.

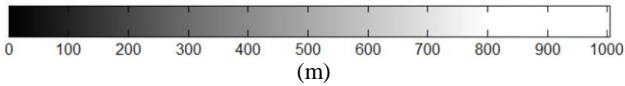
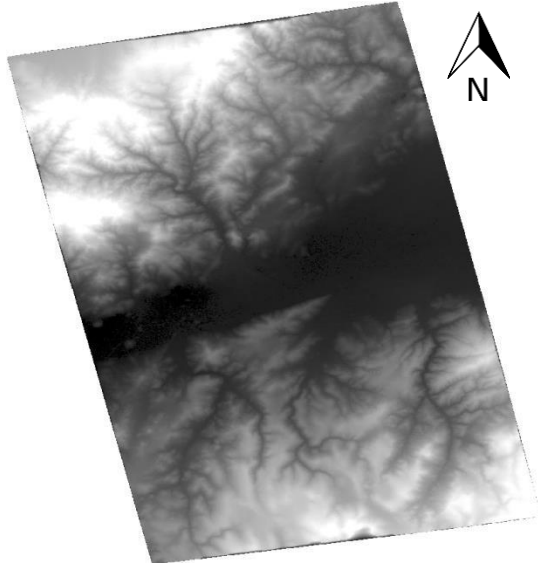
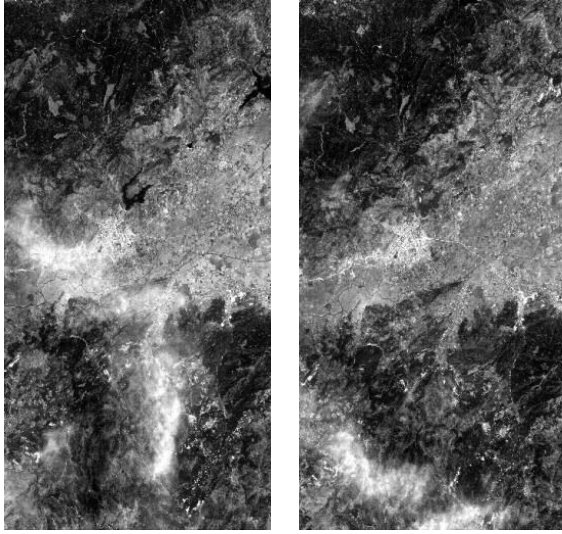
Stereo YKN Sayısı	KOH _Z (m)	Ortalama Hata (m)	Ortalama Mutlak Hata (m)	En Yüksek Mutlak Hata (m)
91	6.07	0.09	5.22	15.82

Tablo 2. Bergama stereo verisi için Harita Genel Komutanlığı tarafından sağlanan YKN'ler için P-D modeli sonuçları (Z).

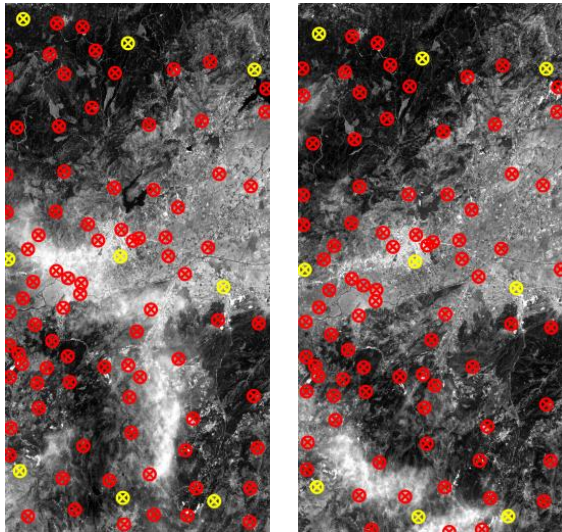
Şekil 3'de Bergama stereo verisinden elde edilen ve 2.5 m Yer Örnekleme Aralığına (GSD) sahip SYM sunulmuştur. Bu çalışmada ayrıca verilen tüm noktalardan 9 adet iyi dağılım YKN seçilerek P-D modelin bilinmeyen parametreleri tahmin edilmiş ve geri kalan noktalar bağımsız denetim noktası (BDN) olarak tanımlanmıştır (Şekil 4). Tablo 3'den görüleceği üzere, 9 adet YKN kullanıldığında, YKN'ler için ilk görüntünün P-D modelinin X yönündeki genel KOH değeri 2.10 piksel, Y yönündeki genel KOH değeri 1.45 piksel ve genel KOH değeri 2.55 piksel olarak hesaplanmıştır. İkinci görüntünün P-D modelinin ise X yönündeki genel KOH değeri 1.51 piksel, Y yönündeki genel KOH değeri 0.67 piksel ve genel KOH değeri 1.66 piksel olarak bulunmuştur (Tablo 3). Daha güvenilir bir değerlendirme yapabilmek için BDN'lerin KOH'ları hesaplanmış ve P-D modeli için BDN'lerde toplamda 5-6 piksel civarında doğruluk değerleri hesaplanmıştır (Tablo 3). Dokuz adet YKN kullanılması durumunda BDN'ler için hesaplanmış olan KOH değerleri, tüm noktaların YKN olarak tanımlandığı

ID	YKN/BDN	YKN KOH (piksel)			BDN KOH (piksel)		
		X	Y	Toplam	X	Y	Toplam
#1	9 / 84	2.10	1.45	2.55	3.94	3.58	5.32
#2	9 / 82	1.51	0.67	1.66	4.59	4.40	6.35

Tablo 3. Seçilmiş YKN ve BDN'ler için P-D modeli sonuçları (X, Y).



Şekil 3. Bergama stereo verisinden üretilen 2.5 m yer örnekleme aralığına sahip SYM (lineer enterpolasyon uygulanmış)



Şekil 4. Seçilen YKN (sarı) ve BDN'ler (kırmızı).

durumdan 1-2 piksel civarında daha kötü sonuç üretmiştir ve P-D modeli için bu değerin kabul edilebilir düzeyde olduğu düşünülmektedir.

Tablo 4 ve 5'te YKN ve BDN'ler için Z yönünde elde edilen sonuçlara yer verilmiştir. 9 YKN için genel KOH değeri 1.88 m ve en yüksek mutlak hata 4.38 m olarak hesaplanmıştır. 82 BDN'de ise genel KOH değeri 8.14 m ve en yüksek mutlak hata yaklaşık 20 metredir. Tablo 2 ve Tablo 5'te verilen sonuçlar karşılaştırıldığında sonuçların genel olarak birbirleriyle uyumlu olduğu düşünülmektedir. Sadece ortalama hata değerinde belirgin bir farklılık göze çarpmaktadır ve sadece 9 YKN seçilmesinin YKN'lerde olmasa da BDN'lerde belirli seviyede sistematik bir hataya sebebiyet verdiği görülmektedir.

Stereo YKN Sayısı	KOH _Z (m)	Ortalama Hata (m)	Ortalama Mutlak Hata (m)	En Yüksek Mutlak Hata (m)
9	1.88	< 10 ⁻⁶	1.35	4.38

Tablo 4. Seçilen 9 YKN için P-D modeli sonuçları (Z).

Stereo BDN Sayısı	KOH _Z (m)	Ortalama Hata (m)	Ortalama Mutlak Hata (m)	En Yüksek Mutlak Hata (m)
82	8.14	-1.92	6.78	19.91

Tablo 5. 82 BDN için P-D modeli sonuçları (Z).

6. SONUÇ

Bu çalışmada 2.5 m çözünürlüklü pankromatik Göktürk-2 stereo görüntülerinden SYM üretimi konusu ele alınmıştır. Göktürk-2 stereo verileri özelinde farklı nedenlerden dolayı piksel-altı düzeyde epipolar görüntüsünü operasyonel olarak üretmek mümkün gözükmemektedir. Bu nedenle Göktürk-2 verilerinden herhangi bir kullanıcı girdisi olmadan eşlemeyi doğrudan ham geometrideki stereo veriler üzerinden yapabilecek SIFT-akış yöntemi adapte edilmiştir. Devamında Göktürk-2 pankromatik verileri için pozisyon-dönüklük geometrik modeli geliştirilmiş ve stereo eşlemesi yapılan görüntülerden SYM üretilmiştir. Test alanı olarak Bergama alanı seçilmiş ve bu stereo veri için sayısal sonuçlar üretilmiştir.

Elde edilen sonuçlara göre P-D modeli YKN'ler için (> 90 adet) yatayda 4 piksel civarında bir genel KOH değeri üretebilmektedir. Bunun yanı sıra YKN'ler için düşeyde ise yaklaşık olarak 6 m civarında bir KOH elde edilmiştir. YKN'ler için maksimum hata ise 15 m civarında hesaplanmıştır. Ortalama hatanın ise sıfır değerine yakın olduğu gözlenmiş ve bu da düşeyde sistematik bir hatanın bulunmadığına işaret etmiştir. YKN'ler iyi dağılmış olarak 9 adet seçildiğinde ise BDN'lerde sonuçların noktaların tamamının YKN olarak atandığı duruma göre 1-2 piksel civarında kötüleştiği bulunmuştur. Elde edilen tüm sonuçlar Göktürk-2 verilerinden P-D fiziksel modeli kullanılarak tatmin edici düzeyde SYM elde edilebileceğini göstermektedir.

Gelecek çalışmalarda Bergama test alanı için Harita Genel Komutanlığı tarafından hazırlanan LiDAR verisi kullanılarak üretilen SYM ile Göktürk-2 stereo verisinden üretilen SYM karşılaştırılarak sonuç hassasiyeti alan bazında da ortaya konulacaktır. Bir diğer çalışmada ise iç yöneltme

parametrelerinin de tahmin işlemine katılarak sonuçların daha ileri seviyeye taşınabileceği düşünülmektedir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma MİYEG (Milli Yer İstasyonu Geliştirme) Projesi kapsamında T.C. Kalkınma Bakanlığı'nın desteği ile gerçekleştirilmiştir. Yazar, bu çalışmada kullanılan Göktürk-2 uydu test görüntülerini sağlayan Hava Kuvvetleri Komutanlığı'na, TÜBİTAK Uzay Teknolojileri Araştırma Enstitüsü'ne ve ayrıca görüntülerin hazırlanmasında emeği geçen Mustafa Teke, Feray Öztoprak ve H. Seda Deveci'ye teşekkürlerini sunar. Ayrıca yazar, Bergama görüntüsü için SİU2016 yarışması kapsamında yer kontrol noktalarını sağlayan Harita Genel Komutanlığı'na da teşekkürlerini iletir.

REFERANSLAR

Atak, V.O, Erdoğan, M., Yılmaz, A., 2015. Göktürk-2 uydu görüntü testleri, *Harita Dergisi*, 153(1), pp. 18-33.

Jacobsen, K., 2005. *BLTRA User Manual*. Institute for Photogrammetry and GeoInformation University of Hannover.

Kim, T., Dowman, I., 2006. Comparison of two physical sensor models for satellite images: position-rotation model and orbit-attitude model, *The Photogrammetric Record*, 21(114), pp. 110-123.

Kozal, A. Ö., Leloğlu, U. M., 2015. Göktürk-2 görüntülerinden üçboyutlu geriçatım. TUFUAB VIII. Teknik Sempozyumu, 21-23 Mayıs, Konya, pp. 376-379.

Küpçü, R., Teke, M, Çabuk, A., 2014. RASAT ve Göktürk-2 görüntülerinin ortorektifikasyon başarımına referans ve sayısal yükseklik modeli seçiminin etkisi. 5. Uzaktan Algılama-CBS Sempozyumu, 14-17 Ekim, İstanbul.

Liu, C., Yuen, J., Torralba, A., 2011. SIFT Flow: dense correspondence across scenes and its applications, *IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence*, 33(5), pp. 978-994.

Lowe, D. G., 2004. Distinctive image features from scale-invariant keypoints, *International journal of computer vision*, 60(2), pp. 91-110.

Manual of Photogrammetry, 2004. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Fifth Edition.

Ok, A. Ö., 2005. Accuracy Assessment of the DEM and Orthoimage Generated from ASTER, Yüksek Lisans Tezi, ODTÜ, Ankara.

Ok, A. Ö., 2016. Göktürk-2 stereoskopik görüntülerinin otomatik eşlenmesi. IEEE 24. Sinyal İşleme ve İletişim Uygulamaları Kurultayı, 16-19 Mayıs, Zonguldak.

Orun, A. B., Natarajan, K., 1994. A modified bundle adjustment software for spot imagery and photography: tradeoff, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 60(12), pp. 1431-1437.

Teke, M., Demirkesen, C., Haliloğlu, O., İmre, E., 2016. Göktürk-2 uydusunun bağıl ve mutlak çapraz radyometrik kalibrasyonu, *Harita Dergisi*, 155(1), pp. 1-22.

Teke, M., 2016. Satellite image processing workflow for RASAT and Göktürk-2, *Journal Of Aeronautics and Space Technologies*, 9(1), pp. 1-13.

Toutin, T., 2001. Review article: elevation modelling from satellite visible and infrared (VIR) data, *International Journal of Remote Sensing*, 22(6), pp. 1097-1125.