

ÇOK BANTLI BİLSAT-1 GÖRÜNTÜLERİNİN SELF-KALİBRASYONU VE ORTOREKTİFİKASYONU

A. Ö. Ok¹, M. Türker²

¹Ortadoğu Teknik Üniversitesi, Jeodezi ve Coğrafi Bilgi Teknolojileri EABD, Ankara, oozgun@metu.edu.tr

²Hacettepe Üniversitesi, Jeodezi ve Fotogrametri Müh. Bölümü, Beytepe, Ankara, mturker@hacettepe.edu.tr

ÖZET

Bu çalışmada, çok-bantlı Bilsat-1 görüntüleri için geliştirilmiş olan fotogrametrik model ile üretilen ortogörüntülerin doğrulukları test edilmiştir. Geliştirilen model Türkiye'nin farklı bölgelerinden seçilen dört alanda test edilmiştir. Test alanlarının tamamında Yer Kontrol Noktaları (YKN)'nin koordinat bilgileri 1:25000 ölçekli sayısal topoğrafik haritalardan toplanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, yeterli sayıda YKN bulunması halinde istenilen ortorektifikasyon doğruluklarına rahatlıkla ulaşılabileceği gözlenmiştir. Ayrıca, self-kalibrasyon parametrelerinin fotogrametrik modele eklenmesi ile üretilen ortogörüntülerin analizleri sonucunda self-kalibrasyon parametrelerinin önemi ortaya çıkmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, yana bakış açısıyla çekilen Bilsat-1 görüntülerinde, fotogrametrik modele self-kalibrasyon parametrelerinin eklenmesinin daha çok önem taşıdığı ve oluşturulan ortogörüntülerin doğruluklarında yarım piksele yaklaşan düzeyde iyileştirme sağladığı tespit edilmiştir.

Anahtar Sözcükler: Fotogrametri, Uzaktan Algılama, Self-Kalibrasyon, Ortoektifikasyon, Bilsat-1.

ABSTRACT

SELF-CALIBRATION AND ORTHORECTIFICATION OF BILSAT-1 XS IMAGERY

In this study, the accuracies of the orthoimages generated from the Bilsat-1 XS images using the developed photogrammetric model were tested. Four test sites, selected from different parts of Turkey, were used to test the developed model. For all test sites, the Ground Control Points (GCPs) were collected using 1:25,000- scale digital topographic maps. The results revealed that, if a reasonable number of GCPs are provided, the required orthorectification accuracies could be easily reached. In addition, based on the analysis of the orthoimages generated using the photogrammetric model revealed that the use of self-calibration parameters in the photogrammetric model was important. It was also found that, the integration of the self-calibration parameters into the photogrammetric model is more important for the Bilsat-1 XS images that were acquired with larger incidence angles and for the generated orthoimages, nearly half a pixel size accuracy improvements was computed.

Keywords: Photogrammetry, Remote Sensing, Self-Calibration, Orthorectification, Bilsat-1.

1. GİRİŞ

Bilsat-1 uydusu, 27 Eylül 2003 yılında başarıyla yörüngesine oturtulmuş bir mikro-uydu olup Dünya'ya 686 km mesafe uzaklıkta güneşe eşzamanlı dairesel bir yörüngede bulunmaktadır. Uydunun ana görüntüleme sistemi, 12,6 m konumsal çözünürlüğe sahip pankromatik kamera ve 27,6 m çözünürlüğe sahip mavi, yeşil, kırmızı ve yakın kızıl-ötesi görüntüleme yapan dört adet birbirinden bağımsız kameradan oluşmaktadır. Bu görüntüleme kameralarına ek olarak düşük çözünürlüklü bir kamera sistemi olan ÇOBAN da (Çok BANTlı kamera) uydu platformunda bulunmakta ve sekiz bant dilimini kapsayan görüntü çekimi yapabilmektedir. Çok-bantlı görüntüleme kameraları, görüntü çekimleri için 2048 x 2048 hücresel çerçeve CCD sistemi kullanmakta ve 8 bitlik görüntü sağlamaktadır (Yuksel vd., 2004). Ayrıca, Bilsat-1 uydusu üç ekseninde kontrol mekanizması sayesinde istenilen herhangi üç eksen etrafında ± 30 dereceye kadar dönüş yapabilmekte ve bu sayede istenen herhangi bir alanı dört gün ara ile görüntüleyebilmektedir. Diğer taraftan, Bilsat-1 uydusu beş küçük uydudan ve çeşitli yer istasyonlarından oluşan Afet Görüntüleme Takımı'nında (DMC – Disaster Monitoring Constellation) bir üyesidir.

Bu çalışmada, çok-bantlı Bilsat-1 görüntüleri için geliştirilmiş olan fotogrametrik model ile oluşturulan ortogörüntülerin doğrulukları test edilmiştir. Geliştirilen model Bilsat-1'in görüntü çekim tekniğini ortaya koyması açısından fotogrametrinin temel denklemlerinden olan kolineer denklemlerine dayanmaktadır. Ayrıca, görüntü çekimi anında oluşabilecek diğer hataların etkilerinin azaltılabilmesi amacıyla, kolineer denklemlerinin doğasında varolan iç ve dış yönelme parametrelerine ek olarak, modele self-kalibrasyon parametreleri de eklenmiştir. Self-kalibrasyon parametrelerinin fotogrametrik modele sağladığı katkının tam olarak anlaşılabilmesi amacıyla, Bilsat-1 görüntüleri önce self-kalibrasyon parametreleri fotogrametrik modele dahil edilmeden ortorektifiye edilmiştir. Sonra, self-kalibrasyon parametreleri fotogrametrik modele eklenmiş ve ortorektifikasyon işlemi tekrar edilmiştir. Böylece, fotogrametrik modele eklenmesi durumunda self-kalibrasyon parametrelerinin oluşturulacak ortogörüntülerin doğruluklarını ne derecede etkilediği tespit edilmiştir.

Geliştirilen model Türkiye'nin farklı bölgelerinden seçilen dört adet çalışma alanında test edilmiştir. Test alanlarının tamamında Yer Kontrol Noktaları (YKN)'nin yatay koordinatları 1:25000 ölçekli topoğrafik haritalardan seçilmiştir. YKN'lerin yükseklik bilgileri ise yine 1:25000 ölçekli sayısal topoğrafik haritalarda varolan eşyüksekti eğrilerinden oluşturulan hücre tabanlı sayısal yükseklik modelinden alınmıştır. Toplanan noktalar YKN ve bağımsız denetim noktaları (BDN) olmak üzere iki gruba ayrılmış ve değişik sayıdaki YKN ve BDN ler kullanılarak ortorektifikasyon işlemi yapılmış ve elde edilen ortogörüntülerin doğrulukları araştırılmıştır.

2. FOTOGRAMETRİK MODEL

Görüntü çekim anında güvenilir bir dönüklük ve pozisyon bilgisi elde etmek amacıyla, Bilsat-1 uydusu platformunda dört adet güneş algılayıcısı, dört adet hız algılayıcısı, iki adet magnetometre, iki adet yıldız kamerası ve bir adet SGR-10 Küresel Konum Belirleme (KKB) cihazı bulunmaktadır. Platforma yerleştirilen bu yükler sayesinde, yörüngesine oturtulmadan önce uydunun tahmini dönüklük kontrol hassasiyeti ± 0.02 derece, dönüklük bilgi hassasiyeti ± 0.006 derece ve yörünge pozisyon hassasiyeti ± 50 m olarak tahmin edilmiştir (Bradford et. al., 2002). Fakat, uydunun fırlatılmasından sonra yıldız kamerasında oluşan problemler nedeniyle, görüntü çekimi anındaki dönüklük bilgisi sadece güneş algılayıcıları tarafından sağlanabilmektedir. Bu nedenle, görüntü çekim anındaki dönüklük bilgisinin doğruluğunda ciddi bir düşüş yaşanmıştır. Buna ek olarak, fırlatmadan sonra platformda bulunan KKB cihazının da pozisyon bilgisini tahmin edilen hassasiyette sağlamadığı kuşkusuna oluşmuştur.

Bilsat-1 uydusunun çok bantlı görüntüleme sistemi dört farklı kamera tarafından gerçekleştirilmektedir. Bu kameralar fiziksel olarak birbirinden ayrı olup herbiri mavi, yeşil, kırmızı ve yakın kızıl-ötesi bantlarda çekim yapmaktadır. Bu kameraların uçuş öncesi laboratuvar ortamındaki kalibrasyon bilgileri mevcut değildir. Bu nedenle, kameraların iç yöneltme elemanlarının değerleri bilinmemektedir. Ayrıca, uydu üzerindeki yüklerin geometrik pozisyon bilgileri de mevcut değildir.

Yukarıdaki bilgiler ışığında, Bilsat-1 algılayıcılarından yüksek doğrulukta bir direkt geometrik düzeltme, başka bir deyişle, dış yöneltme bilgisi beklenmemelidir. Bu nedenle, Bilsat-1 uydusunun görüntü çekim anındaki hassas dış yöneltme bilgisi yine görüntü üzerinden toplanacak YKN'ler kullanılarak hesaplanacaktır (endirekt geometrik düzeltme). Devamında, görüntünün iç yöneltme parametreleri ve diğer kamera kaynaklı hatalar fotogrametrik modelde tanımlanacak ek parametreler kullanılarak hesaplanabilecektir. İç ve dış yöneltme parametrelerinin YKN'ler yardımıyla hesaplanmasından sonra bu veriler uydudan gelen verilerle karşılaştırılabilir ve Bilsat-1 uydusundan elde edilebilecek direkt geometrik düzeltmenin doğruluğu ortaya konulabilecektir.

Yukarıda da belirtildiği üzere, Bilsat-1 çok bantlı görüntüleme kameraları görüntü çekimlerini 2048 x 2048 hücresel çerçeve CCD sistemi ile anlık çekimler şeklinde yapmaktadır. Bu nedenle, çekilen her görüntünün dış yöneltme parametreleri zamana bağlı olmaktan çıkmakta ve sabit hale gelmektedir. Dolayısı ile, literatürde sıkça verilen fotogrametrik modelde herhangi bir değişiklik yapmadan kolineer denklemleri yardımıyla görüntü ve yer uzayı birbirleriyle ilişkilendirilir (Manual of Photogrammetry, 2004):

$$x - x_0 = -f \frac{R_1}{R_3} = F_1 \quad (1)$$

$$y - y_0 = -f \frac{R_2}{R_3} = F_2$$

$$\begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ R_3 \end{bmatrix} = R \times \begin{bmatrix} X - X_L \\ Y - Y_L \\ Z - Z_L \end{bmatrix} \quad (2)$$

Yukarıdaki denklemlerde, x ve y bir noktanın görüntü uzayı koordinatlarını, X , Y ve Z aynı noktanın yer uzayı koordinatlarını, X_L , Y_L ve Z_L kameranın perspektif merkezinin yer uzayında koordinatlarını, f kameranın odak uzaklığını, x_0 ve y_0 temel nokta koordinatlarını tanımlamaktadır. R ise ω , ϕ ve κ açıları ile tanımlanan dönüklük matrisidir.

$$R = \begin{bmatrix} \cos \varphi \cos \kappa & \cos \varphi \sin \kappa & \sin \omega \\ \sin \omega \sin \varphi \cos \kappa + \cos \omega \sin \kappa & -\sin \omega \sin \varphi \sin \kappa + \cos \omega \cos \kappa & -\sin \omega \cos \varphi \\ -\cos \omega \sin \varphi \cos \kappa + \sin \omega \sin \kappa & \cos \omega \sin \varphi \sin \kappa + \sin \omega \cos \kappa & \cos \omega \cos \varphi \end{bmatrix} \quad (3)$$

Eşitlik (1) deki yer ve görüntü uzayını ilişkilendirme işlemi kusursuz ve hatasız bir ilişki varsayımına dayanmaktadır. Ancak, görüntü çekim anında bir takım etkenlerden dolayı sistematik hatalar oluşabilmektedir. Bu sistematik hatalar kolineer denklemlere eklenecek self-kalibrasyon parametreleri yardımıyla düzeltilebilir. (Novak, 1992; Fraser, 1997; Habib vd., 2002; Manual of Photogrammetry, 2004; Jacobsen, 2006). Self-kalibrasyon parametrelerinin kolineer denklemlere eklenmesi halinde fotogrametrik model 4 numaralı eşitlikteki halini alır:

$$\begin{aligned} x - x_0 + \Delta x &= -f \frac{R_1}{R_3} \\ y - y_0 + \Delta y &= -f \frac{R_2}{R_3} \end{aligned} \quad (4)$$

Yukarıdaki eşitlikte, diğer parametrelere ek olarak Δx ve Δy parametreleri de bulunmaktadır. Bu iki parametre sistematik hatalardan oluşan yanlış görüntü koordinatlarının düzeltilmesi için gerekli olan self-kalibrasyon parametrelerini içerir. Diğer araştırmacılar tarafından yapılmış olan çalışmalarda, en iyi parametre birlikteliğini bulmak için çeşitli modeller önerilmiştir. Genelde, self-kalibrasyon modelleri üçe ayrılmakla beraber, fiziksel self-kalibrasyon modeli en çok kullanılan ve güvenilen model olarak kabul edilmektedir. Bu model, fiziksel olarak yorumlanabilen dört temel sistematik hata kaynağını düzeltmek için en uygun parametre yapılandırmasını içermektedir. Bu hatalar simetrik radyal lens, decentering lens, görüntü düzlemi düzgünsüzlüğü ve düzlem içi görüntü hatalarını içermektedir (Fraser, 1997). Görüntü üzerindeki herhangi bir noktadaki net hata ise adı geçen bu hataların toplamı kadar olmaktadır (Manual of Photogrammetry, 2004). Bu nedenle, 4 numaralı eşitlikte verilen Δx ve Δy parametreleri 5 nolu eşitlikteki gibi tanımlanır:

$$\begin{aligned} \Delta x &= \Delta x_r + \Delta x_d + \Delta x_u + \Delta x_f \\ \Delta y &= \Delta y_r + \Delta y_d + \Delta y_u + \Delta y_f \end{aligned} \quad (5)$$

Yukarıdaki eşitlikte, r radyal lens hatasını, d decentering lens hatasını, u görüntü düzlemi düzgünsüzlüğü ve f düzlem içi görüntü hatasını göstermektedir. Bu hataların kaynakları ve formülleri çeşitli kaynaklarda detaylı olarak verilmektedir (Fraser, 1997; Manual of Photogrammetry, 2004; Poli, 2005). Bu nedenle, burada, yalnız bu çalışmada kullanılan ve self-kalibrasyon parametrelerinin yanısıra iç yöneltme parametrelerini de içeren model verilmiştir (Formül 6).

$$\begin{aligned} \Delta x &= -x_0 - \frac{\bar{x}}{f} \Delta f + \bar{x} r^2 K_1 + \bar{x} r^4 K_2 + (2\bar{x}^2 + r^2) P_1 + 2P_2 \bar{x} \bar{y} - A_1 \bar{x} + A_2 \bar{y} \\ \Delta y &= -y_0 - \frac{\bar{y}}{f} \Delta f + \bar{y} r^2 K_1 + \bar{y} r^4 K_2 + (2\bar{y}^2 + r^2) P_2 + 2P_1 \bar{x} \bar{y} + A_1 \bar{y} \\ r^2 &= \bar{x}^2 + \bar{y}^2 = (x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 \end{aligned} \quad (6)$$

Yukarıdaki eşitlikte, f kamera odak uzaklığı, x_0 ve y_0 temel nokta koordinatları, Δf odak uzaklığına getirilecek olan düzeltme, K_1 ve K_2 simetrik radyal lens hatası, P_1 ve P_2 decentering lens hatası, A_1 ve A_2 düzlem içi görüntü hatası parametreleridir.

Yukarıda da bahsedildiği üzere, oluşabilecek sistematik hatalar modele eklenecek self-kalibrasyon parametreleri yardımıyla düzeltilebilmekte ve sonuçta doğruluklarda önemli oranda artma sağlanabilmektedir. Fakat, bazı durumlarda, modele eklenen self-kalibrasyon parametreleri doğruluk arttırımını istenilen düzeyde sağlamayabilirler. Bu nedenle, self-kalibrasyon parametrelerinin öneminin tam olarak anlaşılabilmesi için bu çalışmada, çok-bantlı Bilsat-1 görüntüleri öncelikle self-kalibrasyon parametrelerinin dahil edilmediği fotogrametrik modelle ortorektifiye edilmiştir. Sonra, self-kalibrasyon parametreleri fotogrametrik modele eklenmiş ve ortorektifikasyon işlemi tekrar edilmiştir. Böylece, fotogrametrik modele eklenmesi olası self-kalibrasyon parametrelerinin oluşturulacak ortogörüntülerin doğruluklarını ne derecede etkilediği de tespit edilmiştir.

3. FOTOGRAMETRİK MODELİN UYGULANMASI

Geliştirilmiş olan fotogrametrik modelin uygulaması MATLAB® v. 6.5 programlama dili kullanılarak yapılmıştır. Geliştirilen program Bilsat-1 uydusunun algılayıcıları için temel bir geometrik model içermektedir. Programın ilk girdisi *UTM* projeksiyonu ve *WGS-84* datumu referansında olan YKN'lerin koordinatlarıdır. Fakat, fotogrametri açısından baktığımızda, yatay eksenlerdeki ölçek farklılığından dolayı *UTM* projeksiyon sistemi kullanılamamaktadır. Diğer taraftan, modelin temelini oluşturan kolineer denklemler birbirlerine dik koordinat sistemlerinin kullanılmasını gerektirmektedir. *Yer Merkezli* (Geocentric) koordinat sistemi birbirlerine dik eksenlerden oluşmaktadır. Ancak, yatay ve dikey koordinat bileşenlerinin karışması nedeniyle bu sistem tercih edilmemektedir. Ayrıca, *Yer Merkezli* koordinat sisteminin kullanılması durumunda, sistemin koordinat bileşenlerine, yüksek doğruluk değerleri için uygun ağırlıklar verilmesi de zordur (Jacobsen, 2002). Bu nedenlerden dolayı, geliştirilmiş olan program içerisinde *Yerel* koordinat sistemi (Local Space Rectangular) kullanılmıştır. Bu durumda, programın ilk aşamasında okutulan YKN'lerin obje uzayı koordinatlarının *UTM* projeksiyon sisteminden *Yerel* koordinat sistemine dönüştürülmesi gerekmektedir. Bu dönüşüm, birbirinden bağımsız üç farklı koordinat dönüşümü ile yapılmaktadır: (i) *UTM* projeksiyon sisteminden *Jeodezik* koordinat sistemine, (ii) *Jeodezik* koordinat sisteminden *Yer Merkezli* koordinat sistemine ve (iii) *Yer Merkezli* koordinat sisteminden *Yerel* koordinat sistemine. Bu dönüşümler için ilgili açıklamalar ve dönüşüm formülleri Mikhail vd. (2001)'de detaylı olarak verilmektedir. Benzer şekilde, *Yerel* koordinat sisteminden *UTM* projeksiyon sistemine dönüşüm de, belirtilen sıranın tersi şeklinde yapılabilir.

Yerel koordinat sisteminde orijin Dünya üzerinde tanımlanacak herhangi bir yer olabilmektedir (Manual of Photogrammetry, 2004). Dolayısıyla, *Yer Merkezli* koordinat sisteminden *Yerel* koordinat sistemine dönüşüm için gerekli olan en önemli parametre *Yerel* koordinat sisteminin merkez noktasıdır. Bu çalışmada, merkez noktanın koordinatları, her görüntü için, ayrı ayrı toplanmış ve fotogrametrik modelin 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 olarak kabul edilmiştir (Jacobsen, 2005). Sonra, görüntü çekim anında *Yer Merkezli* koordinat sisteminde tanımlanmış olan uydu pozisyon koordinatları da aynı merkez nokta kullanılarak *Yerel* koordinat sistemine dönüştürülmüştür. Yapılmış olan dönüşümlerin sonuçları dikkatlice analiz edilmiş ve her dönüşüm sonucunda elde edilen değerler, NGA tarafından üretilmiş olan GEOTRANS adı verilen bağımsız bir coğrafi dönüşüm programı yardımıyla hesaplanan değerlerle karşılaştırılmıştır (URL 2). Elde edilen sonuçlardan, bu çalışmada geliştirilmiş olan programın dönüşüm sonuçlarıyla GEOTRANS arasında herhangi bir farkın olmadığı görülmüştür.

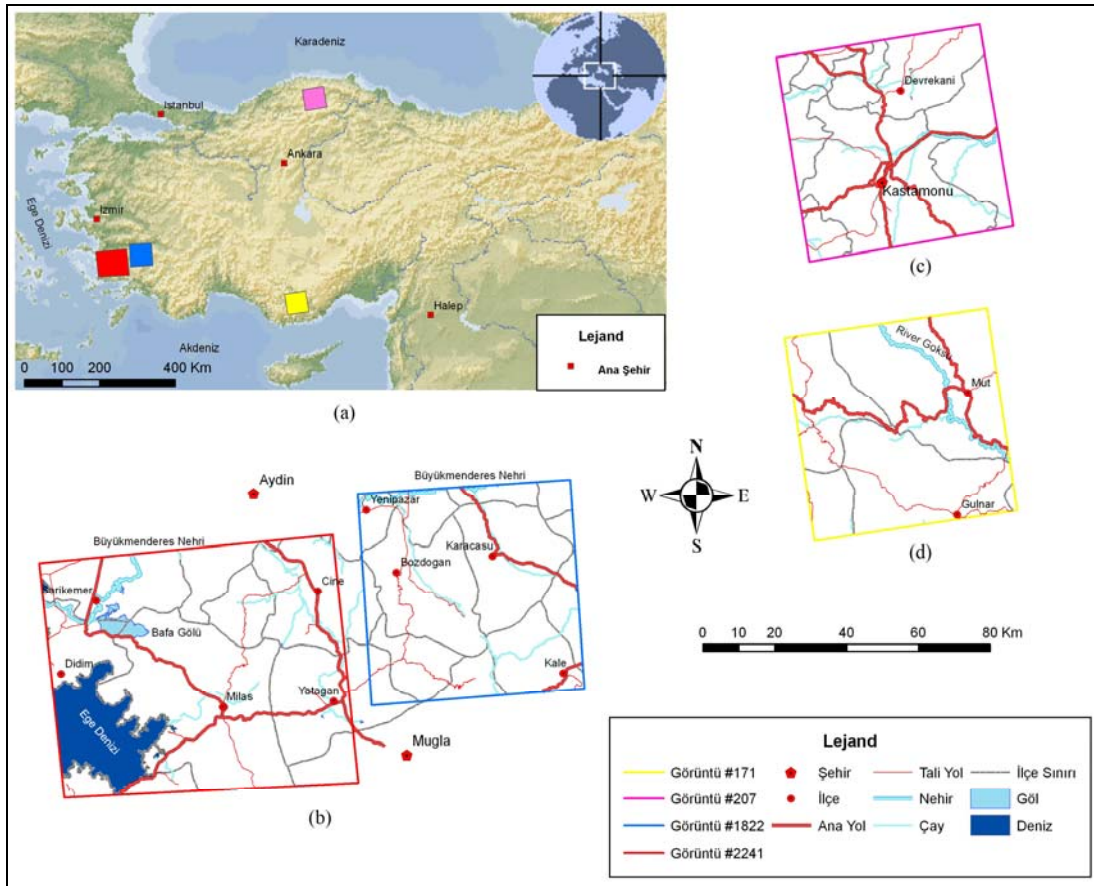
Fotogrametrik modele eklenen parametrelerin değerlerinin tahmin edilmesi için en küçük kareler metodu kullanılmıştır. Eşitlik (1) ve (4)' den kolayca anlaşılacağı üzere, denklemlerde parametreler ile gözlemler arasında lineer olmayan bir ilişki mevcuttur. Bu nedenle, öncelikle ilgili denklemler lineer hale getirilmiştir. Bu çalışmada, Poli (2005)'in yaptığı çalışmaya benzer şekilde dış yöneltme parametreleri ve iç yöneltme parametreleri ayrı ayrı hesaplanmıştır. İlk olarak, dış yöneltme parametreleri, en küçük kareler metodu kullanılarak hesaplanmıştır. Bu esnada, dış yöneltme parametrelerinden olan kameranın perspektif merkezinin yer uzayındaki koordinatlarını belirten X_L , Y_L ve Z_L parametreleri için *Yerel* koordinat sistemine dönüştürülmüş olan uydu konum koordinat bilgileri ilk değer olarak atanmıştır. Diğer dış yöneltme parametrelerinin (ω , ϕ ve κ) ilk değerleri ise sıfır olarak alınmıştır. Sonra, hesaplanan dış yöneltme parametreleri sabit tutulmuş ve iç yöneltme parametreleri ile ek parametreler hesaplanmıştır. Bu işlem için en küçük kareler metodunda ilk değer olarak odak uzaklığına (f) 180 mm verilmiş ve diğer tüm ek parametre değerleri sıfır alınmıştır. En küçük kareler metodu işlemi sırasında hesaplanan parametre değerleri her sonraki iterasyonda yeni tahmini değerlerin hesaplanması için kullanılmış ve bu değerler yardımıyla lineer hale getirme işlemi için hayati önem taşıyan kısmi türev matrisi değerleri yeniden hesaplanmıştır. Bu işlem, en küçük kareler metodunda bilinmeyen parametreler için hesaplanan ardışık iki iterasyonun değerleri arasındaki farkın belirli bir eşik değerinin altına düştüğünde durdurulmuştur. Bu çalışmada, eşik değeri olarak 10^{-5} alınmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, bu eşik değeri, dış yöneltme parametreleri için beşinci, ek parametreler için ise ikinci iterasyonlarda rahatlıkla sağlanmıştır.

4. VERİLER

4.1 Çok-Bantlı Bilsat-1 Görüntü Verileri

Çok-bantlı Bilsat-1 görüntülerinin ortorektifikasyon doğrulukları Türkiye'nin farklı yerlerinden seçilmiş dört çalışma alanında test edilmiştir (Şekil 1). Test alanları ve çok-bantlı Bilsat-1 görüntüleri hakkındaki bilgiler aşağıda verilmiştir:

- İlk test alanı (#171) Çankırı ilinin yaklaşık olarak 70 km güneyinde bulunmaktadır. Alanın düzlük kısımlarında yükseklik 70 m iken, kuzey batısındaki dağlık kısımlarda yükseklik yaklaşık 2010 metreyi bulmaktadır. Dolayısıyla, görüntü içerisindeki toplam yükseklik farkı 1940 m civarlarındadır. Bu test alanı



Şekil 1: Çalışma alanı. (a) Çalışma alanlarının genel görünümü, (b–sol) #2241 numaralı çalışma alanı, (b–sağ) #1822 numaralı çalışma alanı, (c) #207 numaralı çalışma alanı ve (d) #171 numaralı çalışma alanı.

için Bilsat–1 görüntüsü “20040730073227_171” ($36^{\circ}33' N$, $33^{\circ}13' E$ – görüntü merkezi) 2004 yılının Temmuz ayında çekilmiş olup 56.9×56.8 km’lik bir alanı kapsamaktadır.

- İkinci test alanı (#207) Türkiye’nin batı karadeniz bölgesinde bulunmakta ve Kastamonu ilini içine almaktadır. Alandaki yükseklik 560 m ile 1940 m arasında değişmektedir. Bu test alanı için Bilsat–1 görüntüsü “20040804072344_207” ($41^{\circ}28' N$, $33^{\circ}48' E$ – görüntü merkezi) 2004 yılının Ağustos ayında çekilmiş olup 57.3×57 km’lik bir alanı kapsamaktadır.
- Üçüncü test alanı (#1822) Ege bölgesinde olup Denizli ilinin 50 km güney batısında yer almaktadır. Alandaki arazi yükseklikleri 44 m ile 1907 m arasında değişmektedir. Bu test alanı için Bilsat–1 görüntüsü “20050426074931_1822” ($37^{\circ}37' N$, $28^{\circ}32' E$ – görüntü merkezi) 2005 yılının Nisan ayında çekilmiş olup 59.1×58.2 km’lik bir alanı kapsamaktadır.
- Dördüncü test alanı (#2241) Ege bölgesinin güneyinde kalmakta ve Güllük körfezinin bir kısmını da içine almaktadır. Aydın iline 46 km uzaklıkta olan alanın kuzey batısında Bafa gölü bulunmaktadır. Test alanındaki yükseklik deniz seviyesinden 1420 metreye kadar çıkmaktadır. Bu test alanı için Bilsat–1 görüntüsü “20050626081629_2241” ($37^{\circ}24' N$, $27^{\circ}41' E$ – görüntü merkezi) 2005 yılının Haziran ayında çekilmiş olup 81.7×69.3 km’lik bir alanı kapsamaktadır.

Uydu görüntülerine ek olarak, görüntü çekim günündeki uydunun dönüklük ve pozisyon bilgileri de mevcuttur. Yukarıda belirtildiği üzere, çok bantlı Bilsat–1 kameraları birbirinden fiziksel olarak bağımsız durumda görüntü çekmektedir. Dolayısıyla, her bir kamera tarafından çekilen görüntü de fiziksel ve radyometrik özellikler bakımından diğerlerinden farklılıklar göstermektedir. Bu nedenle, bu çalışmada, geometrik kalibrasyon ve ortorektifikasyon işlemi, en iyi radyometrik özelliğe sahip olan yeşil bant çekiminde kullanılan kamera için yapılmıştır. Yeşil bant kamerasının geometrik kalibrasyonu ve ortorektifikasyon işlemlerinin tamamlanmasından sonra diğer üç bant tarafından çekilen görüntüler ile yeşil bant arasında bağlantı noktaları belirlenerek 7-parametrelili Helmert transformasyonu (ölçek, dönüşüm, kaydırma) kullanılarak diğer bantların yeşil banta göre dönüşüm işlemi rahatlıkla yapılabilir.

4.2 Referans ve YKN Verileri

Test alanlarını kapsayan ve Harita Genel Komutanlığı tarafından üretilen 154 adet 1:25000 ölçekli topoğrafik harita referans veri olarak kullanılmıştır. Topoğrafik haritaların çoğu 15 yıldır yenilenmemiş olup UTM projeksiyonu ve 1950 yılına ait Avrupa Datumu (ED50) referanslıdır. 1:25000 ölçekli topoğrafik haritalardaki ortalama yatay doğruluk (σ_x, σ_y) ± 5 m dir (URL 1). Öncelikle topoğrafik haritaların jeoreferanslama işlemi, PCI Geomatica v. 10.00 görüntü işleme programının Orthoengine® modülü kullanılarak yapılmıştır. Jeoreferanslama işlemi sırasında geometrik düzeltme metodu olarak ikinci dereceden polinom ve yeni radyometrik değerler için de en yakın uzaklık yeniden örnekleme metodu uygulanmıştır. Jeoreferanslama işleminde, her pafta için, homojen dağılmış en az 12 adet kontrol noktası kullanılmıştır. Karesel Ortalama Hatası (KOH) 1 pikselin ($\approx 3,04$ m) altında olan paftalar kabul edilmiş, bu kriteri sağlamayan paftalar için ise kontrol noktaları yeniden toplanmış ve/veya yeni noktalar eklenerek jeoreferanslama işlemi tekrar edilmiştir. Sonuç olarak, jeoreferanslama işlemi yapılan bütün topoğrafik haritalar için ortalama doğruluk değeri ± 3 m olarak hesaplanmıştır.

Test alanları için gerekli olan yükseklik referans verisi yine 1:25000 ölçekli sayısal eşyükselti eğrilerinden üretilmiştir. Sayısal eşyükselti eğrileri üzerinde bulunan yükseklik değerleri ortalama deniz seviyesini göstermekte ve yükseklik değerlerinin ortalama düşey doğruluğu $\pm 2,5$ m olarak verilmektedir (URL 1). Sayısal eşyükselti eğrilerinden hücre bazlı bir Sayısal Yükseklik Modeli (SYM) üretmek için çok sayıda yöntem geliştirilmiş veya önerilmiştir (Carrara vd., 1997). Bu çalışmada, hücre tabanlı SYM ler PCI Geomatica v. 10.00 görüntü işleme programının Orthoengine® modülü kullanılarak üretilmiştir. Bu modül hücre tabanlı SYM üretmek için “Sonlu Farklar” enterpolasyon metodunu kullanmakta ve enterpolasyonu üç aşamada gerçekleştirmektedir. İlk aşamada, eşyükselti eğrileri üzerindeki değerler hücre tabanlı SYM’nin ilgili hücrelerine atanmaktadır. İkinci aşamada, boş kalan hücreler için değerler “Mesafe Dönüşüm” algoritması kullanılarak enterpole edilmektedir. Son aşamada ise, “Sonlu Farklar” metodu hücre tabanlı SYM’yi filtrelemektedir (Orthoengine User Guide, 2003).

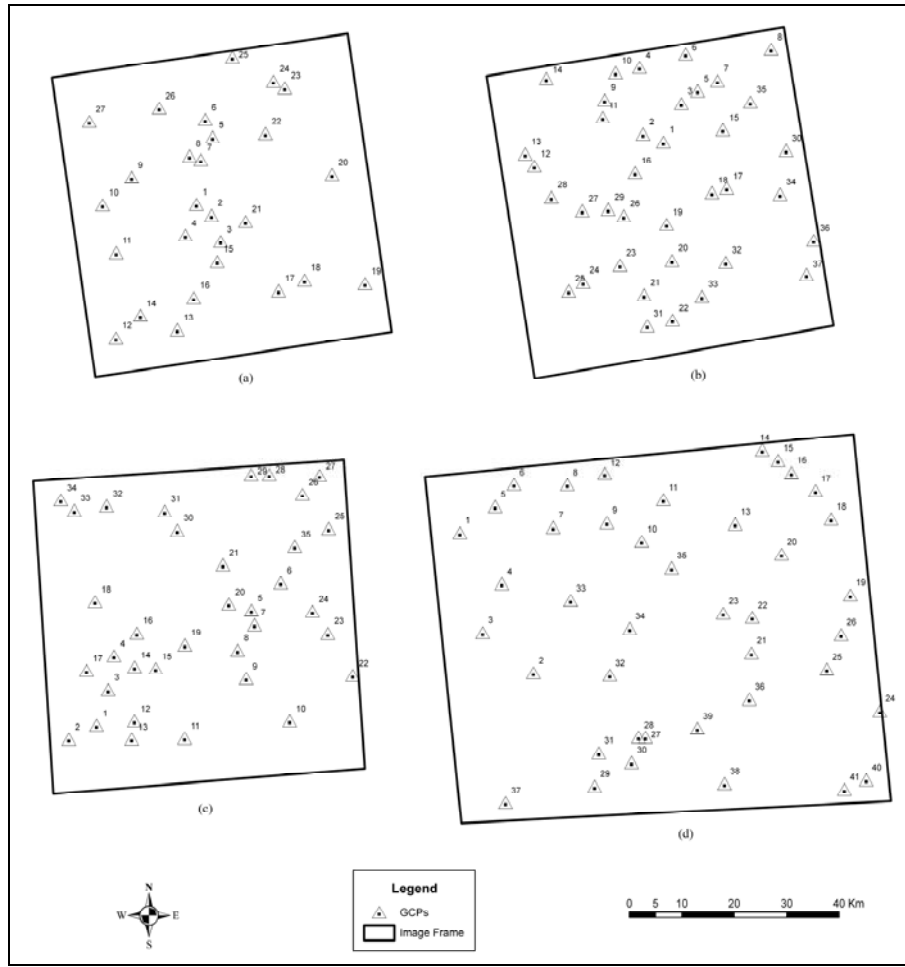
Sayısal eşyükselti eğrilerinden hücre tabanlı SYM üretilirken enterpolasyon hatalarının oluşması kaçınılmazdır. Bu nedenle, üretilen hücre tabanlı SYM’nin doğruluk testi için 8’i kenar noktası ve 20’si iç kısımda olmak üzere en az 28 adet test noktası kullanılarak üretilen SYM’nin yükseklik KOH’u hesaplanmalıdır (USGS, 2004). Bu çalışmada, üretilen her hücre tabanlı SYM için, standartlarda belirtilen sayıdan çok fazla sayıda test noktası kullanılarak KOH ayrıntılı bir şekilde hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre enterpolasyon hataları, dört test alanında, ± 0.793 m ve ± 1.624 m aralığında değişmektedir (Tablo 1).

Test Alanı	Yükseklik Test Noktası Sayısı	Hata (m)	
		Ortalama	St. Sapma (σ)
#171	1000	-0.1242	± 1.6238
#207	1000	0.0007	± 0.7925
#1822	1000	-0.0520	± 1.0913
#2241	1000	-0.1513	± 1.5742

Tablo 1: Sayısal eşyükselti eğrilerinden hücre tabanlı SYM üretilmesinde oluşan enterpolasyon hata değerleri.

Her test alanı için, toplanan yer kontrol noktalarının (YKN) yatay koordinatları, jeoreferanslaması yapılmış 1:25000 ölçekli topoğrafik haritalardan alınmıştır. Bu noktaların yükseklik bilgileri ise yine 1:25000 ölçekli sayısal eşyükselti eğrilerinden üretilmiş olan 5 m çözünürlüğe sahip hücre bazlı SYM’lerden alınmıştır. YKN’lerin toplanması ve yükseklik değerlerinin hücre bazlı SYM’lerden alınması işlemleri ERDAS IMAGINE® v. 9.0 görüntü işleme programı kullanılarak yapılmıştır. YKN’lerin toplanması sırasında, her test alanı için, alana ait Bilsat-1 görüntüsü ve 1:25000 ölçekli topoğrafik haritalar ekranda yan yana açılmıştır. Topoğrafik haritaların üretim tarihi ile görüntülerin çekim tarihleri arasındaki zaman farkının 15 yıl ve üzeri olması nedeniyle YKN’lerin toplama işlemi güçlükle yapılmıştır. Ayrıca, Bilsat-1 renkli görüntülerin yersel çözünürlüğünün 27,6 m olması da YKN’lerin toplanması işlemini zorlaştırmıştır. Bu zorluklara rağmen, her görüntü için, yeterli sayıda YKN bulunmuş ve dört test alanı için toplam 140 YKN toplanmıştır. Her test alanı için toplanmış olan YKN’lerin dağılımı Şekil 2’de verilmiştir.

Yukarıda da belirtildiği üzere topoğrafik haritalar UTM projeksiyonu ve 1950 yılına ait Avrupa Datumu (ED50) referanslıdır. Bu nedenle, topoğrafik haritalardan toplanan tüm YKN’lerin projeksiyonu UTM ve datumu ED50’dır. Fakat geliştirilen program koordinat değerleri yalnız UTM projeksiyonu ve WGS-84 datumu referanslı olan YKN’leri okuyabilmektedir. Bu nedenle, toplanmış olan YKN’lerin koordinatları yine ERDAS IMAGINE® programı kullanılarak ED50 datumundan WGS84 datumuna dönüştürülmüştür. Diğer taraftan, toplanan YKN’lerin yükseklik değerlerinin ortalama deniz seviyesinden referanslı olması nedeniyle, geoid sapmasını dikkate alan bir dönüşüm de geliştirilen programa eklenmiştir.



Şekil 2: Test alanlarında ((a) #171, (b) #207, (c) #1822 ve (d) #2241) toplanmış olan YKN'ler ve dağılımları.

5. TARTIŞMA

Yapılan iki farklı ortorektifikasyon testinde YKN ve BDN'ler için hesaplanmış olan KOH'lar Tablo 2'de verilmektedir. İlk testte, her çalışma alanı için 9 adet iyi dağılmış YKN seçilerek fotogrametrik modelin bilinmeyen parametreleri tahmin edilmiş ve geri kalan noktalar BDN olarak tanımlanmıştır. Tablo 2'den görüleceği üzere, 9 adet YKN kullanıldığında, YKN'ler için KOH'lar sırasıyla X ve Y yönlerinde (ΔX ve ΔY) 0.44 ve 0.71 piksel arasında hesaplanmıştır. YKN'ler için hesaplanan en kötü ortalama KOH değeri (ΔXY) 0.92 pikseldir. Ortorektifikasyon sonuçlarının daha güvenilir bir değerlendirmesini yapabilmek için BDN'lerin KOH'ları hesaplanmış ve Tablo 2'nin son kolonunda görüldüğü üzere, fotogrametrik model BDN'lerde bir piksel civarlarında doğruluk değerleri hesaplanmıştır. Dokuz adet YKN kullanılması durumunda BDN'ler için hesaplanmış olan KOH değerleri, geliştirilen fotogrametrik modelin sağlamlığını göstermektedir. İkinci teste, ilk testten farklı olarak, her çalışma alanı için, varolan tüm noktalar YKN olarak kullanılmış ve ortalama KOH (ΔXY) değerleri bir piksel altı olarak hesaplanmıştır (Tablo 2).

Test Alanı	YKN / BDN	YKN KOH (piksel)			BDN KOH (piksel)		
		ΔX	ΔY	ΔXY	ΔX	ΔY	ΔXY
#171	9 / 18	0.64	0.63	0.90	0.76	0.79	1.10
	27 / -	0.68	0.62	0.92	-	-	-
#207	9 / 28	0.54	0.44	0.70	0.75	0.89	1.16
	37 / -	0.65	0.69	0.95	-	-	-
#1822	9 / 26	0.57	0.62	0.84	0.78	0.76	1.09
	35 / -	0.59	0.57	0.82	-	-	-
#2241	9 / 32	0.58	0.71	0.92	0.73	0.63	0.97
	41 / -	0.58	0.57	0.81	-	-	-

Tablo 2: İki farklı ortorektifikasyon testi için YKN ve BDN'lerde hesaplanan KOH değerleri.

Self-kalibrasyon parametrelerinin fotogrametrik modele dahil edildiği ortorektifikasyon işlemi sonucunda hesaplanmış olan KOH'lar Tablo 2' de verilmektedir. Dolayısıyla, her çalışma alanı için, hesaplanan KOH değerleri o alan için belirtilen YKN sayıları kullanılarak ulaşılabilecek en iyi ortorektifikasyon sonuçlarıdır. Fakat, bu çalışmada, self-kalibrasyon parametrelerinin öneminin ve sonuca etkisinin tam olarak anlaşılabilmesini sağlamak amacıyla ek bir test daha yapılmıştır. Öncelikle, Bilsat-1 görüntüleri self-kalibrasyon parametrelerinin dahil edilmediği fotogrametrik model kullanılarak ortorektifiye edilmiştir. Sonra, self-kalibrasyon parametreleri fotogrametrik modele eklenmiş ve ortorektifikasyon işlemi tekrar yapılmıştır. Bu işlemin sonuçları Tablo 3'te verilmektedir.

Test Alanı	Self-Kalibrasyon	YKN Sayısı	KOH (piksel)			Gözlenen gelişme (piksel)
			ΔX	ΔY	ΔXY	
#171	Yok	27	0.66	0.69	0.95	0.03
	Var		0.68	0.62	0.92	
#207	Yok	37	0.72	0.72	1.01	0.06
	Var		0.65	0.69	0.95	
#1822	Yok	35	0.69	0.62	0.93	0.11
	Var		0.59	0.57	0.82	
#2241	Yok	41	0.87	0.80	1.18	0.37
	Var		0.58	0.57	0.81	

Tablo 3: Self-kalibrasyon parametrelerinin fotogrametrik modele dahil edildiği ve edilmediği durumlar için KOH değerleri.

Tablo 3'te görüleceği üzere #171 numaralı çalışma alanı için ortalama KOH (ΔXY) self-kalibrasyon parametrelerinin dahil edilmediği durum için 0.95 piksel olarak hesaplanırken, self-kalibrasyon parametrelerinin dahil edildiği durumda 0.92 piksel olarak hesaplanmıştır. Dolayısıyla, #171 numaralı test alanı için self-kalibrasyon parametrelerinin fotogrametrik modele dahil edilmesi ortorektifikasyon doğruluğunda yalnız 0.03 piksellik bir iyileşme sağlamıştır. #207 numaralı test alanında self-kalibrasyon parametrelerinin dahil edilmemesi durumunda ortorektifikasyonun ortalama KOH değeri 1.01 piksel olarak hesaplanırken, self-kalibrasyon parametrelerinin dahil edilmesi durumunda bu değer 0.95 piksel olarak hesaplanmıştır. Bu alan için KOH değerleri incelendiğinde 0.06 piksel değerinde bir iyileşme görülmektedir. Üçüncü test alanında (#1822) self-kalibrasyon parametreleri dahil edilmeden KOH değeri 0.93 piksel olarak hesaplanırken, bu değer self-kalibrasyon parametrelerinin eklenmesinden sonra 0.82 piksel değerine düşmüştür. Dolayısıyla, bu test alanı için hesaplanmış olan ortalama KOH değerindeki iyileşmenin 0.11 piksel olduğu görülmektedir. #2241 numaralı test alanında self-kalibrasyon parametrelerinin modele eklenmediği durum için ortorektifikasyon ortalama KOH değeri 1.18 piksel, self-kalibrasyon parametrelerinin modele eklendiği durum için ise ortorektifikasyon ortalama KOH değeri 0.81 piksel olarak hesaplanmıştır. Dolayısıyla, #2241 numaralı test alanı için hesaplanan KOH değerindeki iyileşme 0.37 piksel olarak hesaplanmıştır. Bu değer, diğer test alanları için hesaplanmış KOH değerlerindeki iyileşme ile kıyaslandığında, self-kalibrasyon parametrelerinin fotogrametrik modele eklendiği durum için elde edilecek olan ortorektifikasyon doğruluğunda önemli bir gelişmeyi göstermektedir.

#2241 numaralı test alanında, diğer alanlara nazaran ortorektifikasyon doğruluğunda daha önemli oranda iyileşme olmasının nedeninin tam olarak anlaşılabilmesi amacıyla bu test alanı diğer test alanları (#171, #207 ve #1822) ile karşılaştırılarak incelenmiştir. Test alanlarının arazi yapıları, arazideki yükseklik farklılıkları, kullanılan görüntülerinin kaliteleri, toplanan YKN sayıları, dağılımları ve toplandıkları kaynak gibi parametreler incelendiğinde, bu oranda bir iyileşmeyi açıklayacak kadar bir farklılığın bulunmadığı sonucuna varılmıştır. Ancak, test alanlarına ait görüntülerin ortorektifikasyon işlemi sonucunda hesaplanan dış yöneltme parametre değerleri incelendiğinde, Tablo 3'te verilen ortorektifikasyon doğruluk değerlerindeki iyileşmeleri açıklayacak önemli bir ilişki bulunmuştur.

Dış Yöneltme Parametresi	Test Alanı			
	#171	#207	#1822	#2241
X (m)	35117.449	39782.765	115146.155	-411475.394
Y (m)	22201.454	17426.114	66024.932	-49512.994
Z (m)	675892.939	678825.761	686959.791	660362.146
ω (deg)	-1.88828	-2.42113	-3.85204	2.83461
ϕ (deg)	2.56450	3.40449	7.97257	-34.18500
κ (deg)	8.38809	8.78871	7.03844	9.31990
Gözlenen gelişme (piksel)	0.03*	0.06*	0.11*	0.37*

Tablo 4: Görüntülerin ortorektifikasyon işlemi sonucunda hesaplanan dış yöneltme parametre değerleri.

Tablo 4'te, her test alanı için, çekilen görüntülerin geliştirilen fotogrametrik model ile hesaplanmış olan dış yöneltme parametre değerleri ($X, Y, Z, \omega, \phi, \kappa$) görülmektedir. Bu tabloda pozisyon (X, Y, Z) ve dönüklük (ω, ϕ, κ) değerleri yukarıda detaylı olarak açıklanan ve fotogrametrik modelde parametre tahmini için kullanılan *Yerel* koordinat sistemi cinsinden verilmiştir. Tablo 4'te bütün test alanlarının dönüklük değerleri incelendiğinde Kappa (κ) değerlerinin birbirine çok yakın olduğu görülmektedir. Görüntülerin ne derece yana bakılarak çekildiğini gösteren Omega (ω) ve Phi (ϕ) değerleri birlikte incelendiğinde #171 numaralı görüntünün nadir görüntü çekimine en yakın görüntü olduğu anlaşılmaktadır. Bu görüntünün Omega (ω) ve Phi (ϕ) değerleri sırasıyla -1.888 ve 2.564 derece olarak hesaplanmıştır. #171 numaralı görüntüden sonra nadir görüntü çekimine en yakın görüntü, Omega (ω) değeri -2.421 derece ve Phi (ϕ) değeri 3.404 derece olan #207 numaralı görüntüdür. Bu görüntüyü, Omega (ω) değeri -3.852 derece ve Phi (ϕ) değeri 7.972 derece olan ve biraz daha yana bakılarak çekilmiş #1822 numaralı görüntü izlemektedir. Son görüntü olan #2241'in ise diğerlerinden çok farklı bir Omega (ω) ve Phi (ϕ) birleşimi olan -34.185 derece ve 2.834 derece değerlerine sahip olduğu görülmektedir. Tablo 4'te ayrıca, Tablo 3'te yer alan, her çalışma alanı için, hesaplanmış olan iyileşme değerleri de en alt satırda kalın ve yıldızlı bir şekilde verilmiştir.

Bu veriler ışığında, görüntülerin Omega (ω) ve Phi (ϕ) değer birleşimleri ile bu görüntülerin ortorektifikasyonu sonucu elde edilen iyileşme değerleri arasında açık bir ilişki olduğu görülmektedir. Tablo 3 ve 4'te görüldüğü üzere çekim açısı nadire en yakın olan #171 numaralı görüntüde self-kalibrasyon parametrelerinin fotogrametrik modele dahil edildiği ve edilmediği durumlar arasındaki ortorektifikasyon doğruluk farkı sadece 0.03 piksel olarak hesaplanmıştır. #171 numaralı görüntüden çok az daha fazla yana bakılarak elde edilen #207 numaralı görüntüde bu değer 0.06'ya yükselmiştir. #171 ve #207 numaralı görüntülerden daha fazla yana bakılarak elde edilen #1822 numaralı görüntünün ortorektifikasyon doğruluğundaki iyileşme ise 0.1 pikselin üzerine çıkarak 0.11 piksel olarak hesaplanmıştır. Diğer görüntülerden çok farklı Omega (ω) ve Phi (ϕ) birleşim değerine sahip olan ve önemli derecede yana bakılarak elde edilen #2241 numaralı görüntüde ise self-kalibrasyon parametrelerinin fotogrametrik modele dahil edildiği ve edilmediği durumlar arasındaki ortorektifikasyon doğruluk farkı 0.37 piksel gibi kayda değer bir değere ulaşmıştır. Bu sonuçlara göre, Bilsat-1 görüntülerinin ortorektifikasyonu sırasında self-kalibrasyon parametrelerinin fotogrametrik modele dahil edilmesi nadire yakın olarak elde edilen Bilsat-1 görüntülerinde ortorektifikasyon doğruluğunu az da olsa arttırmaktadır. Yüksek yana bakış açılarıyla ($>30^\circ$) çekimi yapılan Bilsat-1 görüntülerinde ise self-kalibrasyon parametrelerinin fotogrametrik modele dahil edilmesi, oluşturulacak ortogörüntülerin doğruluğunu önemli derecede arttırmaktadır. Fotogrametrik model ile hesaplanan ve Tablo 4'te verilen pozisyon (X ve Y) değerleri de hesaplanan dönüklük (ω ve ϕ) değerlerini doğrulamaktadır. Ayrıca, Şekil 1'de görülebileceği üzere her görüntünün kapsadığı alanın büyüklüğü de Tablo 4'te hesaplanan dış yöneltme değerleriyle tam bir uyum göstermektedir.

6. SONUÇ

Bu çalışmada, çok-bantlı Bilsat-1 uydu görüntülerinin ortorektifikasyonu için bir fotogrametrik model geliştirilmiştir. Geliştirilen modelin doğruluk testleri farklı bölgelerde seçilmiş dört alanda yapılmıştır. Ortorektifikasyon işlemi için gerekli olan YKN'ler test alanlarının tamamını kapsayan mevcut 1:25000 ölçekli sayısal topoğrafik haritalardan toplanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, geliştirilen fotogrametrik model, iyi dağılmış dokuz adet YKN kullanıldığında, oluşturulacak Bilsat-1 ortogörüntülerinde bir piksel civarında doğruluk sağlamaktadır. Ayrıca, yeterli sayıda YKN olması halinde, geliştirilen modelin ortorektifikasyon doğruluğunun bir pikselin altında kalacağı gözlenmiştir.

Bu çalışmada ayrıca fotogrametrik modele dahil edilmesi olası self-kalibrasyon parametrelerinin ortorektifikasyon sonucuna etkisini ve önemini tam olarak anlayabilmek amacıyla ek bir test daha yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar self-kalibrasyon parametrelerinin fotogrametrik modele dahil edilmesinin önemini ortaya koymaktadır. Test alanlarının tamamında, self-kalibrasyon parametrelerinin fotogrametrik modele dahil edilmesi durumunda, ortorektifikasyon doğruluğunda piksel altı değerler elde edilmiştir. Ayrıca, sonuçlar göstermiştir ki, self-kalibrasyon parametrelerinin fotogrametrik modele dahil edilmemesi durumunda, çok-bantlı Bilsat-1 görüntülerinden elde edilecek olan ortogörüntüler için piksel altı doğruluk değerleri garanti edilememektedir. Bütün çalışma alanları için sonuçlar ayrı ayrı analiz edildiğinde, self-kalibrasyon parametrelerinin fotogrametrik modele dahil edildiği durumda elde edilen ortorektifikasyon doğruluğunda, dahil edilmediği duruma göre değişik oranlarda iyileşmeler gözlenmiştir. Bu iyileşme oranlarını açıklamak için yapılan çalışmalar sonucunda, self-kalibrasyon parametrelerinin fotogrametrik modele dahil edilmesi ile elde edilen ortorektifikasyon doğruluğu iyileşme değerleri ile kullanılan görüntülerin dış yöneltme parametre değerleri arasında önemli bir ilişki bulunmuştur. Elde edilen iyileşme değerleri incelendiğinde, çekim açısı nadire yakın olan Bilsat-1 görüntülerinde self-kalibrasyon parametrelerinin fotogrametrik modele dahil edilmesi, oluşturulacak ortogörüntülerin doğruluğunu az da olsa arttırmaktadır. Diğer taraftan, yüksek yana bakış açısıyla ($>30^\circ$) çekilen Bilsat-1 görüntülerinde ise self-kalibrasyon parametrelerinin fotogrametrik modele dahil edilmesi oluşturulacak ortogörüntülerin doğruluğunu önemli derecede arttırmaktadır. Özetle, yüksek yana bakış açısı ile çekilmiş Bilsat-1 görüntülerinin ortorektifikasyonu sırasında yüksek bir ortorektifikasyon doğruluk değeri elde etmek için geliştirilmiş olan fotogrametrik modele self-kalibrasyon parametrelerinin dahil edilmesi zorunludur.

Yeterli sayıda YKN olması halinde, geliştirilen fotogrametrik modelin çok-bantlı Bilsat-1 görüntüleri için ortorektifikasyon doğruluğunu piksel altında rahatlıkla sağladığı söylenebilir. Fakat genelde, çok-bantlı Bilsat-1 görüntülerinin çoğu için yeterli YKN sayısına ulaşmak kolay olmayacaktır. Bu nedenle, geliştirilen fotogrametrik modelde, çok-bantlı Bilsat-1 görüntülerinden toplanabilecek az sayıdaki YKN'lerin kullanılması durumunda bile, oluşturulacak ortogörüntülerin doğruluk değerinin bir piksel civarında olacağı tespit edilmiştir.

TEŞEKKÜR

Yazarlar, TÜBİTAK Uzay Teknolojileri Araştırma Enstitüsüne Bilsat-1 görüntülerini sağladığı için teşekkür eder. Ayrıca, özellikle görüntünün alınması sırasındaki yardım ve katkılarından dolayı Sayın Oktay Algün, Önder Belce ve Ramazan Küpçü'ye teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

Bradford, A., Gomes, L. M., Sweeting, M., Yuksel, G., Ozkaptan C., Orlu, U., 2002. *BILSAT-1: A Low Cost, Agile, Earth Observation Microsatellite for Turkey*. 53rd International Astronautical Congress, Houston, Texas, USA.

Carrara, A., Bitelli, G., Carla, R., 1997. *Comparison of techniques for generating digital terrain models from contour lines*. International Journal of Geographical Information Science, sayı: 11(5), sayfa: 451-473.

Fraser, C. S., 1997. *Digital Camera Self-calibration*. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, sayı: 52, sayfa: 149-159.

Habib, A. F., Morgan, M., Lee, Y.R., 2002. *Bundle Adjustment with Self-Calibration using Straight Lines*. Photogrammetric Record, sayı: 17, sayfa: 635-650.

URL 1, Harita Genel Komutanlığı (HGK) İnternet sitesi, *1:25,000 Topoğrafik Harita Teknik Özellikleri*, <http://www.hgk.mil.tr/urunler/haritalar/yurticiuretim/topografik/topotek25.html>, 24 Ağustos 2007.

Jacobsen, K., 2002. *Calibration Aspects in Direct Georeferencing of Frame Imagery*. Int. Arch. Photogramm. Remote Sensing sayı: 34(1) sayfa: 82-88.

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

Jacobsen, K., 2006. *Calibration of Imaging Satellite Sensors*. Int. Arch. Photogramm. Remote Sensing. Band XXXVI 1/ W41. Ankara.

Manual of Photogrammetry Fifth Edition, 2004. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, ASPRS, Bethesda, Maryland, USA.

Mikhail, E. M., Bethel, J. S., and McGlone, J. C., 2001. *Introduction to Modern Photogrammetry*, John Wiley & Sons, USA.

URL 2, National Geospatial Intelligence Agency (NGA) İnternet sitesi, *Geographic Translator (GEOTRANS)*, <http://earth-info.nga.mil/GandG/geotrans/>, 24 Ağustos 2007.

Novak, K., 1992. *Rectification of Digital Imagery*. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, sayı: 58(3) sayfa: 339-344.

OrthoEngine User Guide, PCI Geomatics, 2003.

Poli, D., 2005. *Modeling of Spaceborne Linear Array Sensors*. Phd Thesis, Zürich.

USGS, 2004. *Standards for Digital Elevation Models, Part 2 – Specifications*, USGS National Mapping Program Technical Instructions.

Yuksel, G., Belce, O., Urhan, H., Gomes, L., Bradford, A., Bean, N., Curiel, A. S., 2004. *BILSAT-1: First Year in Orbit-Operations and Lessons Learned*. The 18th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites, Logan, Utah, USA.