

SPOT-5 HRG 1A stereo görüntülerinin geometrik doğruluğunun uydu yörünge bilgilerini kullanan parametrik modelle incelenmesi

Hüseyin TOPAN*, Derya MAKTAV

İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Geomatik Mühendisliği Programı, 34469, Ayazağa, İstanbul

Özet

Son yirmi yılda doğrusal dizi algılama teknolojisi sayesinde hava ve uzay bazlı görüntüleme sistemleri önemli ölçüde gelişmiş ve yer örnekleme aralığı 40 cm'ye kadar küçülmüştür. Böylece görüntüler yardımıyla konumsal uygulamaların gelişimi ve elde edilen konum doğruluğu da artmıştır. Bu makalede, öncelikle doğrusal dizi görüntüleme teknolojisi ve geometrik hataları hakkında kısaca bilgi verilmiş; sonra görüntü ve nesne (yer) koordinat sistemleri arasındaki geometrik ilişkiyi tanımlayan genel bir model tanımlanmıştır. Kullanılan görüntünün özellikleri göz önüne alınarak bu model değiştirilmiş ve basitleştirilmiştir. Dengeleme işlemi bilinmeyenli koşullu ölçüler dengelemesi ile ve ön ve demet dengeleme şeklinde iki aşamalı olarak gerçekleştirilmiştir. Bakış açılarının ve yörünge parametrelerinin doğruluğa etkisi analiz bölümünü oluşturmaktadır. Araştırmada, Zonguldak ve çevresini kapsayan 5 m yer örnekleme aralığına sahip stereo SPOT-5 HRG düzey 1A görüntüleri kullanılmaktadır. Noktaların yer koordinatları bağıl statik GPS yöntemiyle ölçülmüştür. Tüm hesaplamalar ve grafik gösterimler MATLAB ortamında geliştirilen GeoSpot-1.0 yazılımıyla gerçekleştirilmiştir. Görüntülerin analizi sonucunda yüksek geometrik doğruluğa ulaşmada en önemli etkenin iç yöneltmeyi tanımlayan bakış açıları olduğu görülmüştür. Dış yöneltme elemanları sabit kabul edilerek bakış açıları her bir görüntü için ayrı ayrı düzeltilmiştir. Doğruluk değerleri kontrol noktalarında ± 1 m'den daha iyi ve denetim noktalarında yaklaşık ± 5 m düzeyinde bulunmuştur. Dış yöneltme elemanlarının doğruluğa etkisi iç yöneltme elemanlarına oranla önemsiz düzeydedir. Ancak dış yöneltme elemanları arası olası korelasyon doğruluğu oldukça düşürmektedir. Analiz, farklı dış yöneltme elemanı grupları ve nokta dağılımları için gerçekleştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Geometrik analiz, geometrik doğruluk, parametrik model, uydu yörünge bilgileri, SPOT-5, HRG, düzey 1 A, koşullu ölçüler dengelemesi, demet dengeleme.

*Yazışmaların yapılacağı yazar: Hüseyin TOPAN. htopan@yahoo.com; Tel: (532) 586 30 30.

Bu makale, birinci yazar tarafından İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Geomatik Mühendisliği Programı'nda tamamlanmış olan "Geometric analysis of high resolution space images using parametric approaches considering satellite orbital parameters" adlı doktora tezinden hazırlanmıştır. Makale metni 03.12.2009 tarihinde dergiye ulaşıp, 16.12.2009 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 31.03.2011 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.

Bu makaleye "Topan, H., Taktav, D., (2010) 'SPOT-5 HRG 1A stereo görüntülerinin geometrik doğruluğunun uydu yörünge bilgilerini kullanan parametrik modelle incelenmesi', İTÜ Dergisi/D Mühendislik, 9: 6, 59-72" şeklinde atıf yapabilirsiniz.

Geometric accuracy assessment of stereo SPOT-5 HRG level 1A images using parametric approach considering satellite orbital parameters

Extended abstract

In the last two decades the imaging technology in aerial and space based missions grew up thanks to especially the imaging technology based on linear array sensors and reducing ground sampling distance. Now, high resolution space images with about 40 centimeter resolution are available. This improvement supports developments on geospatial applications of these images. Thus, the geometric accuracy increases thanks to the geometric resolution. This improvement causes that geometric correction process becomes more important now than in the past for this purpose. This article is focused on the geometric analysis of high resolution space images using parametric (rigorous) approaches ignoring non-parametric (deterministic) ones. Parametric approaches consider imaging geometry, orbital and attitude parameters of satellite, and define the real geometry between image and ground on contrary to the non-parametric ones. However parametric models are more complex and need many auxiliary coordinate systems defined between image and ground coordinate systems.

The analyzed images are only one set of stereo SPOT-5 HRG level 1A images acquired by linear array sensors in 5 m ground sampling distance, because the required orbital information is available only with this image on hand. So this technology, linear array sensors, and its distortions are subjected. The generic model which establishes the geometric relationship between image and ground coordinate systems is defined at first (Weser et al., 2008). The required auxiliary coordinate systems between image and ground coordinate systems, i.e. scanline, camera, payload and orbital coordinate systems are defined. Then the modification and simplification to generic model are explained taking into account the characteristics of image used in this study (SPOT Image, 2002; Fotev et al., 2005). The modification is based on the interior orientation via defining the look angles for each element of CCD line. These look angles are the major dominant component on the geometric accuracy. And the simplification is based on the rotation from payload coordinate system to orbit coordinate system performed by the attitude angles. The ground coordinates and their accuracies are attained by adjustment process requiring both pre-

and bundle adjustment stages. The adjustment is performed by the Gauss-Helmert model.

The test field covers mainly Zonguldak and partly its neighbors, Bartın, Bolu and Karabük located in the Western Karadeniz Region of Turkey. The test field called Zonguldak test site comes into prominence with its mountainous topography. The mountainous areas are very important to analysis geometric accuracy of images since many images and the mathematical models give very accurate results on the flat areas on the contrary the mountainous areas. Specifications of SPOT-5 HRG level 1A image and auxiliary data are briefly presented. All computations were performed programming in the MATLAB environment developing GeoSpot-1.0. Many point sets are established including different distribution of ground control points (GCPs) and independent check points (ICPs). The GCPs are needed for the adjustment of look angles and the parameters where the ICPs are required for the checking of adjustment. 47 points in total are measured by the static GPS observation by the team from Department of Geodesy and Photogrammetry Engineering in Zonguldak Karaelmas University. The points are obtained considering their homogeneous distribution both on planimetry and height.

The most important issue for the purpose of estimating the true ground coordinated via the stereo images is adjusting the interior orientation components, i.e. look angles to be corrected in the pre-adjustment process, in this thesis. However the effects of exterior orientation parameters on the accuracy evaluation have to be investigated establishing various sets of them. The adjustment requires selection of suitable set of these parameters. The results of geometric analysis are presented with the help of graphical figures and the tables at the end of this thesis.

The geometric accuracy achieved is about ± 1 m (± 0.2 pixel) for the GCPs and ± 5 m (± 1 pixel) for the ICPs. The accuracies are in trend that $m_z > m_x > m_y$. This can be expected since the accuracy in Z direction is generally less than the planimetry (X and Y). The accuracy in Y axis is better than in X since the Y is related to the look angles which are the most dominant component on the accuracy. The accuracy of ICPs can be acceptable considering 1 pixel is the key unit of an image.

Keywords: Geometric analysis, geometric accuracy, parametric model, satellite orbital parameter, SPOT-5, HRG, level 1A, Gauss-Helmert model, bundle adjustment.

Giriş

Uydu görüntülerinin geometrik çözünürlüğü ve konuma bağlı uygulamalardaki önemi gün geçtikçe artmaktadır. Bu görüntüler genellikle bazı bozulmalara sahiptir ve bu nedenle konuma bağlı uygulamalarda doğrudan kullanılamaz. Görüntülerden elde edilen konum bilgisinin doğruluğu arttıkça, bozulmalardan kaynaklanan hataların etkisi de artmaktadır (Toutin, 2003). Bu nedenle bu hataların giderilmesi gerekmektedir. Bu işleme geometrik düzeltme denilmektedir.

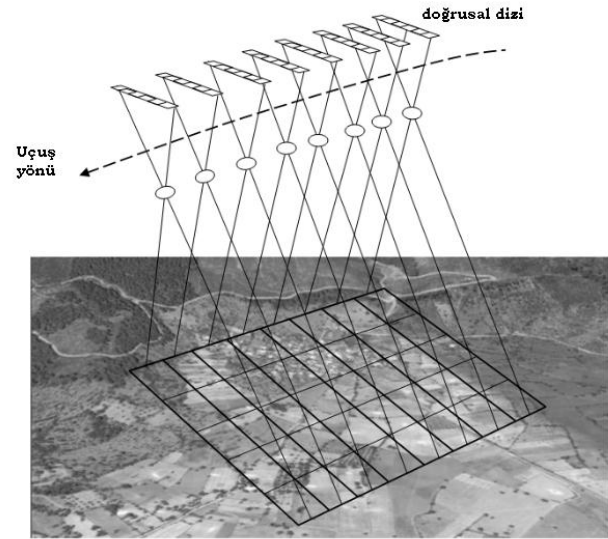
Geometrik düzeltme, görüntülerden konum bilgisi elde edilmesi işleminin bir parçasıdır. Görüntülerden konum bilgisi elde etme yöntemi ise genellikle ortogörüntü üretimi, georektifikasyon, geokonumlama, georeferanslama, doğrudan veya dolaylı algılayıcı yöneltmesi gibi isimler almaktadır. Burada temel amaç görüntü ve yer koordinat sistemleri arasındaki geometrik ilişkinin kurulmasıdır. Genellikle görüntü koordinatları ölçü, dış yöneltme elemanları (DYE) bilinmeyen, iç yöneltme elemanları ise sabit kabul edilir. Bu çalışmada ise, görüntü koordinatları yardımıyla hesaplanan iç yöneltme elemanları (bakış açıları) ölçü olarak kabul edilmiştir.

Görüntü ve yer koordinat sistemi arasındaki geometrik ilişkinin tanımlanması için öncelikle bu araştırma için geçerli olan görüntü algılama teknolojisi ve sonrasında neden olduğu bazı geometrik hatalara değinilecektir.

Doğrusal dizi algılayıcılar

Günümüzde optik uydu görüntülerinin çoğu doğrusal dizi algılayıcılar kullanılarak elde edilmektedir. Bunun başlıca sebebi bu sistemin çerçeve sistemlere nazaran daha kolay üretilmesidir. Doğrusal dizi algılayıcılar, bir dizi Yükten Bağlı Ayrık (CCD: Charge Coupled Device) veya Bütünleyici Metal-oksit Yarıiletken (CMOS: Complementary metal-oxide Semiconductor) elemanlardan oluşur (Şekil 1). CCD, CMOS'a göre daha çok tercih edilmektedir. Yeryüzü, uçuş yönüne dik olacak şekilde uyduya konumlandırılan bir CCD dizisi üzerine iz düşer ve nesneden gelen elektroman-

yetik enerjiye karşılık CCD elemanında bir elektrik yük üretilir. Böylece görüntüleme işlemi gerçekleşmiş olur. Elde edilen görüntü, anlık olarak yan yana elde edilen görüntülerin toplamıdır. Bu sistemde bir dizinin görüntüleme yapması oldukça kısa sürmektedir. Örneğin bu süre SPOT-5 HRG görüntüleri için 0.75210 mili saniye düzeyindedir. Görüntünün netliğini arttırmak için bu süre çeşitli yollarla atılmıştır. Bunlardan üçü Zaman Geciktirme ve Birleştirme (TDI: Time Delay and Integration), yavaşlatma ve ötelenmiş satırlar yöntemleridir (Topan, 2009).



Şekil 1. Doğrusal dizi görüntüleme sistemi

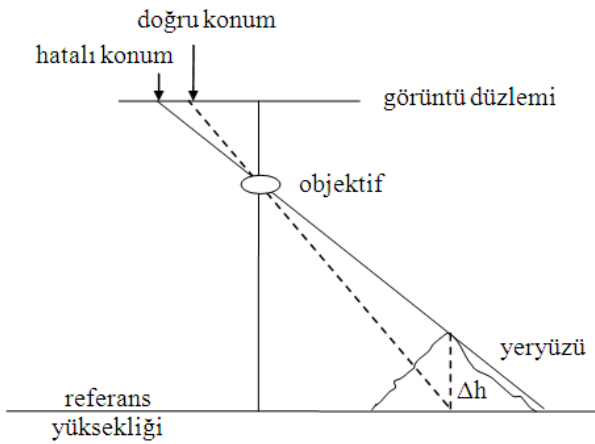
Görüntüler, gerek algılayıcıdan, gerekse algılanan nesnenin bulunduğu ortamdan kaynaklanan birtakım geometrik hatalara sahiptir. Bu hataların konumsal uygulamalarda bilinmesi ve giderilmesi gerekmektedir. Bu hatalar aşağıdaki bölümde özetle anlatılmaktadır.

Doğrusal dizi görüntülerinde geometrik hata kaynakları

Geometrik hatalar sistematik veya rastlantısal yapıda olabilir. Sistematik yapıda olanlar çoğunlukla uydu yörüngeye yerleştirilmeden önce laboratuvar ortamında belirlenir ve görüntünün dağıtımından/satışından önce düzeltilir. Ancak rastlantısal hataların düzeltilmesi için yeryüzüne ait bilgilere gereksinim vardır. Hata kaynaklarından bazıları aşağıda özetle sıralanmıştır (Topan, 2009);

- CCD elemanların boyutlarındaki değişim,
- CCD elemanların satır veya sütun yönündeki kayıklıkları,
- Dizinin esnemesi,
- Birden fazla diziden oluşan algılayıcılarda dizilerin optik sisteme göre farklı dönüklüklerle konumlandırılması,
- Algılayıcıyı taşıyan sistemin yüksekliğindeki ve hızındaki değişimler,
- Nesnenin nadirde değil nadir dışında görüntülenmesi,
- Yer eğriliği,
- Yer dönmesi,
- Yeryüzündeki yükseklik farkları.

Sonuncusu dışındaki tüm hata kaynakları uydunun yörüngesine yerleştirilmesi öncesinde test laboratuvarlarında ve sonrasında ise görüntüleme zamanına bağlı olarak uyduya ait bazı ek bilgilerle giderilebilir. Doğrusal dizi algılayıcılar çok dar bir açıyla görüntüleme yaptıklarından mercekle hataları göz ardı edilebilir. Bu hatalar genellikle sistematik yapıdadır. Ancak yükseklikten kaynaklanan hatalar sistematik değildir ve düzeltilmesi için sayısal yükseklik modeline (SYM) ve yer kontrol noktalarına (YKN) gereksinim vardır (Şekil 2).



Şekil 2. Yükseklik farkının görüntü üzerindeki konum etkisi

Doğrusal dizi görüntülerinin geometrik hatalarının düzeltilmesi

Doğrusal dizi sistemlerin sistematik yapıdaki hataları çeşitli yöntemler (matematik modeller)

kullanılarak düzeltilir. Ancak asıl sorun rastlantısal hataların düzeltilmesidir. Rastlantısal hataların belirlenmesinde iki tür matematik model kullanılır. Bunlar parametrik olan ve olmayan modellerdir. Parametrik olmayan modeller, parametrik modellerin aksine görüntüleme geometrisini dikkate almaz; dolayısıyla görüntü ve yer koordinat sistemleri arasındaki gerçek geometrik ilişkiyi yansıtmaz. Parametrik olmayan modeller sadece YKN'larına ihtiyaç duyarken parametrik modeller hem YKN'larına hem de bazı ek bilgilere ihtiyaç duyar. Polinom ve benzerlik dönüşümü, Doğrudan Doğrusal Dönüşüm (DLT: Direct Linear Transformation), yer bağımlı Rasyonel Polinom Modeli (RFM) gibi pek çok model parametrik olmayan modellere örnek verilebilir. Bu modeller sadece YKN'ları kullandıklarından, elde edilen konum doğruluğu ve duyarlılığı YKN duyarlılığına, doğruluğuna, dağılımına ve sayısına bağlıdır. Ancak karşılaştırıldığında, parametrik modellerle elde edilen konum doğruluğu ve duyarlılığı, parametrik olmayanlarınkine oranla YKN'larının az önce sıralanan özelliklerine daha az bağımlıdır. Günümüze dek pek çok parametrik model geliştirilmiştir. Parametrik modellerin ortak iki özelliği; 2 boyutlu görüntü koordinat sistemi ile 3 boyutlu yer koordinat sistemi arasındaki geometrik ilişkiyi tanımlayan izdüşüm eşitlikleri temeline dayanması ve Dış yöneltme elemanlarını polinom vb. modellerle modellemesidir.

Doğrusal dizi görüntülerinin uçuş (veya tarama) yönündeki her bir satırı farklı bir zamanda elde edildiğinden, her bir satıra ait dış yöneltme elemanları da zamana bağlı olarak değişmektedir. Örneğin bu çalışmada kullanılan SPOT-5 HRG görüntüsü 12000 satırdan oluşmaktadır ve 9 çeşit dış yöneltme elemanı bulunmaktadır. Bu durumda tüm görüntü için toplam $12000 \cdot 9 = 108000$ adet dış yöneltme elemanına ve $108000 \div 2 = 59000$ adet YKN'sına gereksinim vardır. Oysa, örneğin 2° polinom (afin) kullanılarak dış yöneltme elemanları modellenirse, eleman sayısı $9 \cdot 3 = 27$ 'ye ve YKN sayısı da $27 \div 2 = 14$ 'e düşürülebilir. Bu çalışmada da dış yöneltme elemanları 2° polinom modellerle modellenmiştir.

Matematik model

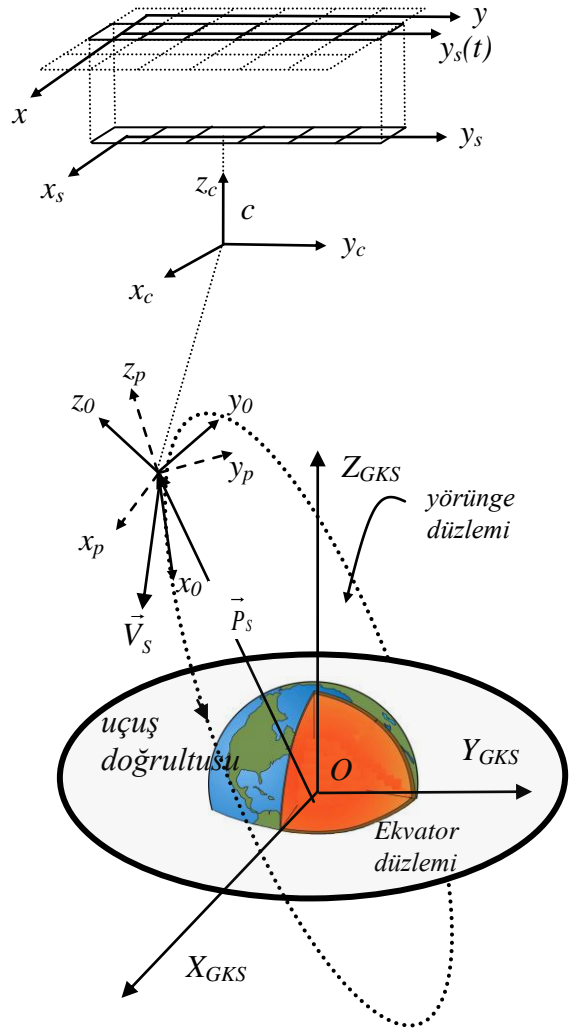
Görüntülerin geometrik analizinde kullanılan matematik model, görüntü ve yer koordinat sistemleri arasındaki en genel geometrik ilişkiyi tanımlayan bir modelin değiştirilmiş ve basitleştirilmiş biçimidir. Bu nedenle öncelikle genel matematik model (Weser vd., 2008) açıklanacak, sonrasında değiştirilmiş ve basitleştirilmiş model tanıtılacaktır.

Genel model

Görüntü ile yer koordinat sistemleri arasındaki geometrik ilişki, aslında bu iki koordinat sistemi arasında bulunan yardımcı koordinat sistemleri sayesinde gerçekleştirilir (Şekil 3). Bu koordinat sistemleri şunlardır:

1. Görüntü koordinat sistemi (GKS; xy): Kullanıcının üzerinde ölçüm yaptığı, başlangıcı görüntünün sol üst köşesi olan koordinat sistemidir. Herhangi bir nesnenin görüntü koordinatı o nesneyi tanımlayan satır (x) ve sütun (y) değerleri yardımıyla piksel biriminde elde edilir. x görüntüleme zamanıyla ilişkilidir.
2. Tarama satırı koordinat sistemi (TKS; $x_s y_s$): Doğrusal dizi tarafından tanımlanan tek boyutlu bir koordinat sistemidir. Başlangıcı doğrusal dizinin başlangıcındaki pikseldir ve $x_s = 0$ 'dır.
3. Kamera koordinat sistemi (KKS; $x_c y_c z_c$): Bir sağ el koordinat sistemidir. Başlangıcı izdüşüm merkezidir. y_c koordinatı y_s yönünde ve z_c koordinatı asal eksen yönündedir.
4. Uydu koordinat sistemi (UKS; $x_p y_p z_p$): Bu koordinat sistemi de bir sağ el koordinat sistemidir. Merkezi uydunun ağırlık merkezidir. Bu koordinat sistemi ile yörünge koordinat sistemi arasındaki ilişki durum açıları yardımıyla kurulur.
5. Yörünge koordinat sistemi (YKS; $x_o y_o z_o$): Yörünge koordinat sisteminin x_o eksenini uçuş doğrultusunda ve $x_o z_o$ düzlemi yörünge düzlemi üzerindedir. y_o üçüncü eksen olarak bir sağ el koordinat sistemi tanımlamaktadır.
6. Yersel koordinat sistemi (YeKS; $X_{GKS} Y_{GKS} Z_{GKS}$): Bu koordinat sisteminin başlangıcı Yer'in ağırlık merkezinde; Z_{GKS} eksenini yerin ortalama dönme eksenineyle çakışık ve

$X_{GKS} Z_{GKS}$ düzlemi başlangıç meridyeni düzlemi ile çakışık. Y_{GKS} eksenini bir sağ el koordinat sistemi oluşturur.



Şekil 3. Görüntü ve yer koordinat sistemleri arasındaki geometrik ilişki

Görüntüdeki herhangi bir nesnenin yer koordinatının belirlenebilmesi için bu altı koordinat sistemi arasındaki geçişin sağlanması gerekmektedir. Böylece elde edilen toplam dönüşüm:

$$\vec{P} = \vec{P}_s + R_{OG} \cdot R_{PO} \cdot \left[C_M + m \cdot R_{CP} \cdot (\vec{p}_s - \vec{c}_s + \delta \vec{x}) \right] \quad (1)$$

eşitliğiyle verilir. Burada:

- \vec{P} : Noktanın YeKS'deki konum vektörü,
- \vec{P}_s : Uydunun YeKS'deki konum vektörü,
- R_{OG} : YKS ile YeKS arasındaki dönme,

R_{PO} : UKS ile YKS arasındaki dönme,
 C_M : KKS'nin UKS içerisindeki konumu,
 m : ölçek,
 R_{CP} : KKS ile UKS arasındaki dönme,
 \vec{p}_s : TKS'deki konum vektörü,
 \vec{c}_s : KKS'ne ait iç yönelme vektörü,
 $\vec{\delta x}$: sistematik hata düzeltmelerine ait vektördür. Bu vektör SPOT-5 görüntüleri için göz ardı edilebilir (Weser vd., 2008).

Değiştirilmiş model

Genel model üzerinde SPOT Image (2002) tarafından yapılan değişiklikler şunlardır:

- İç yönelmeyi tanımlamak için bakış açıları (ψ_x ve ψ_y) tanımlanmıştır.
- UKS'ne benzer bir navigasyon koordinat sistemi (NKS) tanımlanmıştır ve bu koordinat sisteminden YKS'ne geçiş, UKS'den farklıdır.
- YKS'nden YeKS'ne geçiş de genel modelden farklıdır.

Bakış açıları, TKS ile UKS arasındaki dönüşümü, diğer bir deyimle iç yönelmeyi sağlar:

$$\vec{p}_p = \begin{bmatrix} -\tan(\psi_y) \\ \tan(\psi_x) \\ 1 \end{bmatrix} = C_M + m \cdot R_{CP} \cdot \vec{p}_c = s \cdot R_{CP} \cdot (\vec{p}_s - \vec{c}_s) \quad (2)$$

Burada $C_M = 0$ 'dır, yani uydu ve kamera koordinat sistemlerinin başlangıçları çakışmıştır. SPOT Image tarafından tanımlanan NKS yörünge koordinat sistemine geçişte a_r ve a_p durum açıları -1 ile çarpılır ve dönme matrisi:

$$R_{PO} = R_X^{-1}(a_p) \cdot R_Y^{-1}(a_r) \cdot R_Z^{-1}(a_y) \quad (3)$$

şeklinde oluşturulur. Durum açıları çok küçük olduklarından R_{PO} dönmesi Fotev vd. (2005) tarafından sadeleştirilerek:

$$R_{PO} \cong \begin{bmatrix} 1 & -a_y & +a_r \\ +a_y & 1 & -a_p \\ -a_r & +a_p & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

şekline getirilmiştir. Bu son eşitlikte trigonometrik terimler olmadığından durum açılarına göre doğrusallaştırılmış model daha sade olacaktır.

SPOT Image (2002) tarafından önerilen son değişiklik ise yörünge koordinat sisteminden yer koordinat sistemine geçişi sağlayan dönme matrisidir ($R_{OG} = [R_{OG}^X \ R_{OG}^Y \ R_{OG}^Z]$). Bu matrisin elemanları, genel modeldekinden farklı olarak;

$$R_{OG}^Z = \frac{\vec{P}_s}{\|\vec{P}_s\|}, R_{OG}^X = \frac{\vec{V}_s \times R_{OG}^X}{\|\vec{V}_s \times R_{OG}^X\|}, R_{OG}^Y = \frac{R_{OG}^Z \times R_{OG}^X}{\|R_{OG}^Z \times R_{OG}^X\|} \quad (5)$$

şeklinde tanımlanmıştır. Sonuç olarak nesneye ait yer koordinatları:

$$\vec{P} = \vec{P}_s + m \cdot \vec{u}_3 \quad (6)$$

eşitliği ile hesaplanabilir. Burada:

$$\vec{u}_3 = R_{OG} \cdot \vec{u}_2 \quad (7)$$

$$\vec{u}_2 = \frac{R_{PO} \cdot \vec{u}_1}{\|R_{PO} \cdot \vec{u}_1\|} \quad (8)$$

$$\vec{u}_1 = \frac{\begin{bmatrix} -\tan(\psi_y) \\ \tan(\psi_x) \\ 1 \end{bmatrix}}{\left\| \begin{bmatrix} -\tan(\psi_y) \\ \tan(\psi_x) \\ 1 \end{bmatrix} \right\|} \cong \begin{bmatrix} -\tan(\psi_y) \\ \tan(\psi_x) \\ 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

şeklinde ve $\| \cdot \|$ vektör normunu ifade etmektedir. Bu modelin dengeleme işleminde kullanılabilmesi için aşağıdaki şekilde düzenlenmesi gerekir:

$$\vec{u}_1 = \frac{1}{m} R_{PO}^{-1} \cdot R_{OG}^{-1} (\vec{P} - \vec{P}_s) \quad (10)$$

$$\begin{bmatrix} -\tan(\psi_y) \\ \tan(\psi_x) \\ 1 \end{bmatrix} = \frac{1}{m} \cdot R \cdot \begin{bmatrix} X - X_s \\ Y - Y_s \\ Z - Z_s \end{bmatrix} = \frac{1}{m} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X - X_s \\ Y - Y_s \\ Z - Z_s \end{bmatrix} \quad (11)$$

Burada $R = R_{PO}^{-1} \cdot R_{OG}^{-1}$ 'dır. Bu son eşitliğin ilk ve ikinci terimleri üçüncüye bölünerek aşağıdaki yeni eşitlik elde edilir:

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

$$= \frac{f_1}{f_3} + \tan(\psi_y) = 0 \quad (12)$$

$$F_{\psi_x} = \frac{r_{21}(X - X_s) + r_{22}(Y - Y_s) + r_{23}(Z - Z_s)}{r_{31}(X - X_s) + r_{32}(Y - Y_s) + r_{33}(Z - Z_s)} - \tan(\psi_x)$$

$$= \frac{f_2}{f_3} - \tan(\psi_x) = 0$$

Bu son eşitlik Kornus ve diğerleri (2006) tarafından SPOT-5 HRG ve HRS görüntülerinin değerlendirilmesi için kullanılmıştır.

Dengeleme

Dengelemede genel amaç ölçülere (L) getirilecek düzeltmeleri (v) ve parametrelere (P) getirilecek düzeltmeleri (veya dengeleme bilinmeyenlerini; dP) kestirmektir. Bunun için pek çok kestirim yöntemi kullanılabilir. Bu çalışmada en küçük kareler dengelemesi (EKK) tercih edilmiştir. Dengelemede $\underline{v}^T \underline{v} = \min$ koşulunun sağlanması gerekmektedir. Bu çalışmada ölçüler bakış açılarıdır (ψ_x ve ψ_y). Parametreler ise YKN'ları için DYE'ları, BDN'ları için ise hem DYE'ları hem de bu noktaların yaklaşık yer koordinatlarıdır. Bu çalışmada kullanılan 9 çeşit DYE'na ait toplam 27 katsayı parametre olarak kullanılmıştır. Dolayısıyla her bir noktanın satırına ait dış yöneltme elemanı 2° polinomla hesaplanabilir. Dolayısıyla kullanılan tüm parametreler şunlardır:

$$P = \begin{bmatrix} X_o & \dot{X} & \ddot{X} & Y_o & \dot{Y} & \ddot{Y} & Z_o & \dot{Z} & \ddot{Z} \dots \\ V_{Xo} & \dot{V}_X & \ddot{V}_X & V_{Yo} & \dot{V}_Y & \ddot{V}_Y & V_{Zo} & \dot{V}_Z & \ddot{V}_Z \dots \\ a_{ro} & \dot{a}_r & \ddot{a}_r & a_{po} & \dot{a}_p & \ddot{a}_p & a_{yo} & \dot{a}_y & \ddot{a}_y \dots \\ X & Y & Z \end{bmatrix}^T \quad (13)$$

Bu çalışmada bilinmeyenli koşullu ölçüler dengelemesi (Gauss-Helmert yöntemi) tercih edilmiştir ve fonksiyonel model:

$$\underline{A} \cdot \underline{dP} + \underline{B} \cdot \underline{v} + \underline{w} = \underline{0} \quad (14)$$

şeklinindedir. Burada \underline{A} ve \underline{B} sırasıyla parametrelere ve ölçülere ait katsayılar matrisini ve \underline{w} de kapanma artıklarını tanımlamaktadır. \underline{A} ve \underline{B} matrisleri (12) eşitliğiyle verilen ve doğrusal olmayan eşitliklerin uygun bir yöntemle doğrusallaştırılmasıyla elde edilir. Bu çalışmada doğrusallaştırma işlemi Taylor serisiyle gerçekleştirilmiştir. Dengeleme bilinmeyenleri (dP) aşağıdaki gibi hesaplanarak parametrelerin yaklaşık değerlerine ($P|_0$) eklenir ve böylece dengelenmiş parametreler bulunur:

$$\underline{dP} = -(\underline{A}^T (\underline{B}\underline{B}^T)^{-1} \underline{A})^{-1} \underline{A}^T (\underline{B}\underline{B}^T)^{-1} \underline{w} \quad (15)$$

$$\underline{\bar{P}} = \underline{P}|_0 + \underline{dP} \quad (16)$$

Ölçülere ait düzeltmeler de aşağıdaki şekilde hesaplanarak ölçülere eklenir ve böylece dengeli ölçüler elde edilir:

$$\underline{v} = \underline{B}^T (\underline{B}\underline{B}^T)^{-1} (\underline{A}\underline{dP} + \underline{w}) \quad (17)$$

$$\underline{\bar{L}} = \underline{L}|_0 + \underline{v} \quad (18)$$

Elde edilen dengeli parametrelerin ve ölçülerin (12) eşitliğiyle verilen koşulu sağlayıp sağlamadığının kontrol edilmesi gerekir. Bu şart sağlanıncaya dek dengeli parametreler ve ölçülerle yeniden dengeleme işlemine tabi tutulur.

Araştırmada dengeleme işlemi iki aşamalı olarak gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada bakış açıları bir ön dengeleme işlemiyle düzeltilmiş ve sonra demet dengeleme gerçekleştirilmiştir.

Ön dengeleme

Ön dengeleme işlemi, DYE'larının sabit (dengeli) kabul edilerek bakış açılarının (ψ_x ve ψ_y) dengelenmesi temeline dayanmaktadır. Bu durumda $\underline{dP} = \underline{0} \rightarrow \underline{A} \cdot \underline{dP} = \underline{0}$ olduğundan fonksiyonel model ve düzeltmeler ait eşitlikler:

$$\underline{B} \cdot \underline{v} + \underline{w} = \underline{0} \quad (19)$$

$$\underline{v} = -\underline{B}^T (\underline{B} \cdot \underline{B}^T)^{-1} \underline{w} \quad (20)$$

şeklinde yazılır.

Demet dengeleme

Demet dengelemede amaç birden fazla görüntüye ait ölçülerin ve parametrelerin birlikte dengelemesidir. Ayrıca bağlama veya denetim noktalarının yaklaşık yer koordinatları da o noktalara ait parametreler olarak kabul edilir ve bu koordinatlara ait düzeltme değerleri de hesaplanır. Bu durumda (14) eşitliği

$$\begin{bmatrix} \underline{A}_1 & \cdots & \underline{0} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \underline{0} & \cdots & \underline{A}_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{dP}_1 \\ \vdots \\ \underline{dP}_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \underline{B}_1 & \cdots & \underline{0} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \underline{0} & \cdots & \underline{B}_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{v}_1 \\ \vdots \\ \underline{v}_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \underline{w}_1 \\ \vdots \\ \underline{w}_m \end{bmatrix} = \underline{0} \quad (21)$$

şeklini alır. Burada m toplam görüntü sayısını ifade etmektedir. Bağlama veya denetim noktalarının yer koordinatlarının yaklaşık değerleri en az iki görüntüye ait dış yöneltme elemanları ve noktaların bu görüntülerdeki görüntü koordinatları yardımıyla hesaplanır.

Geometrik analiz

Zonguldak test alanı

Araştırmada kullanılan görüntüler Zonguldak ilinin büyük bir bölümünü ve Bartın, Karabük, Bolu illeri ile Karadeniz'in bir bölümünü kapsamaktadır. Bu test alanı genelde dağlık ve ormanlık bir yapıya sahiptir ve Zonguldak ve Ereğli gibi bazı kentler bu dağlık alanda kurulmuştur. Yükseklik deniz seviyesi ile 1800 m arasında değişmektedir. Görüntülerin gerçek geometrik potansiyelinin belirlenmesinde dağlık bölgeler önemli ve değerlidir. Bu nedenle Zonguldak da önemli bir test alanıdır.

Kullanılan görüntüler ve yardımcı veriler

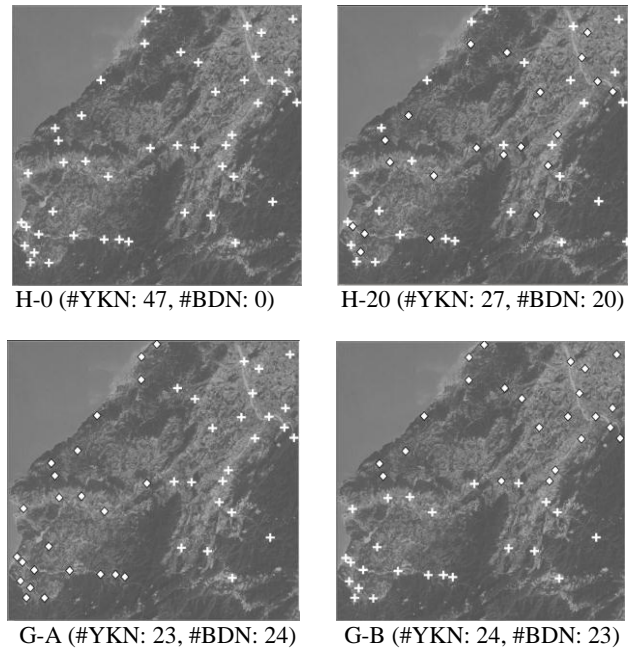
Araştırmada kullanılan görüntüler 5 m yer örnekleme aralığına (YÖA) sahip bir çift stereo SPOT-5 HRG düzey 1A görüntüsüdür. Düzey 1A, görüntülere sadece radyometrik düzeltme işleminin yapıldığı, geometrik bir düzeltmenin yapılmadığı ve dolayısıyla görüntülerin gerçek geometrisinin korunduğu anlamına gelmektedir. SPOT-5, Fransız SPOT serisi uyduların en sonucusudur ve 2002 yılından beri kullanımdadır. Yeryüzünden 832 km yükseklikte güneş uyumlu ve daireye yakın bir yörüngede hareket etmektedir. Stereo HRG görüntüleri, sağa-sola dönen bir ayna yardımıyla yan bakış yöntemiyle elde edilmektedir.

SPOT Image, SPOT görüntülerine ait yardımcı bilgileri ayrıntılı bir şekilde meta dosyasıyla sunmaktadır. Parametrik model kullanılarak görüntülerin analizi araştırmalarında SPOT görüntülerinin sıklıkla kullanılmasının başlıca nedeni budur. Bu araştırmada, görüntülere ait aşağıdaki bilgiler meta dosyasından alınarak kullanılmıştır:

- Her bir satırın görüntülenme süresi,
- Merkez satırın görüntülediği zaman,
- Her bir dizi elemanı için bakış açıları,
- Uydunun konumu, hızı, durum açısı ve bunların kaydedildiği zaman.

Yukarıdaki bilgiler yardımıyla her bir noktanın satırına ait görüntülenme zamanı, konum, hız ve durum açıları hesaplanmış; konum, hız ve durum açıları 2° polinom kullanılarak modellenmiştir.

Araştırmada, YKN veya BDN olarak kullanılan noktaların yer koordinatları, hem yatayda hem de düşeyde uygun dağılacak şekilde TOPCON TURBO-SII GPS alıcısı ile statik yöntemle ölçülmüştür. Her bir ölçüm 15 sn epokla 15 dk sürmüştür. Noktaların konum doğruluğu yatayda ± 0.06 m ve düşeyde ± 1.00 m düzeyindedir. Araştırmada uygun dağılıma (H) ve gruplandırılmış dağılıma (G) sahip YKN ve BDN'ler kullanılmıştır (Şekil 4).



Şekil 4. Çeşitli nokta dağılımları
(+: YKN, ◊: BDN)

Analiz sonuçları

Bu araştırmada sunulan analiz sonuçları, noktaların dengeleme işlemiyle elde edilen yer koordinatları ile bunların GPS ölçüleriyle elde edilen karşılıklarının karşılaştırılması temeline dayanmaktadır. Dolayısıyla analizde üç koordinat eksenine ait karesel ortalama hatalar (koh; m) hesaplanmıştır.

Öncelikle görüntülerin dış yöneltme elemanları sabit kabul edilerek sadece bakış açılarının sonuçlar üzerine etkisi araştırılmış ve ulaşılan bulgular Tablo 1'de ve Şekil 5'te verilmiştir. Görüntülerin bakış açılarına düzeltme getirilmeden yer koordinatları hesaplandığında her üç ekseninde büyük koh değerleri, diğer bir deyimle düşük doğruluk elde edilmiştir (Tablo 1). Tablo 1 incelendiğinde bakış açılarına ön dengeleme ile getirilen düzeltmenin sonuçlar üzerindeki etkisi açıkça görülmektedir. G-A hariç diğer nokta dağılımlarında kohlar YKN'ları için ± 1 m'den küçük, BDN'ler için ise ± 5 m (± 1 piksel) düzeydedir. Ancak G-A'daki BDN'lerinde doğruluk ± 1 pikselden oldukça büyüktür. Bunun nedeni noktaların dağılımıdır. Çünkü BDN'lerine ait bakış açıları, YKN'larının bakış açılarının dengelenmesi ve sonrasında 2° polinomla modellenmesiyle elde edilmektedir. G-A'da YKN'ları bir satırın tümünde dağılmamaktadır. Oysa bakış açıları görüntünün satırıyla ilgilidir. Dolayısıyla satırın bir yarısı dengeli bakış açılarına sahipken diğer tarafı sahip değildir. Demet dengeleme ise sonuçlar üzerinde herhangi bir iyileştirme yapmamıştır. Ancak demet dengeleme ile noktalarda elde edilen hataların yönü, ön dengelemedekinin aksine sistematik değil rastlantısaldır. Görüntünün geometrik

çözünürlüğünün 5 m olduğu düşünüldüğünde doğruluğun YKN'larında bu kadar yüksek olması modelin bu noktalara oldukça iyi uyduğunu göstermektedir. BDN'lerinin yer koordinatları ise ± 5 m (1 piksel) doğrulukla elde edilmektedir ki bu da kabul edilebilir bir sonuçtur. Ancak kontrol noktalarının dağılımının uygun olması ve mutlaka bir satırın tümüne yayılması gerekmektedir.

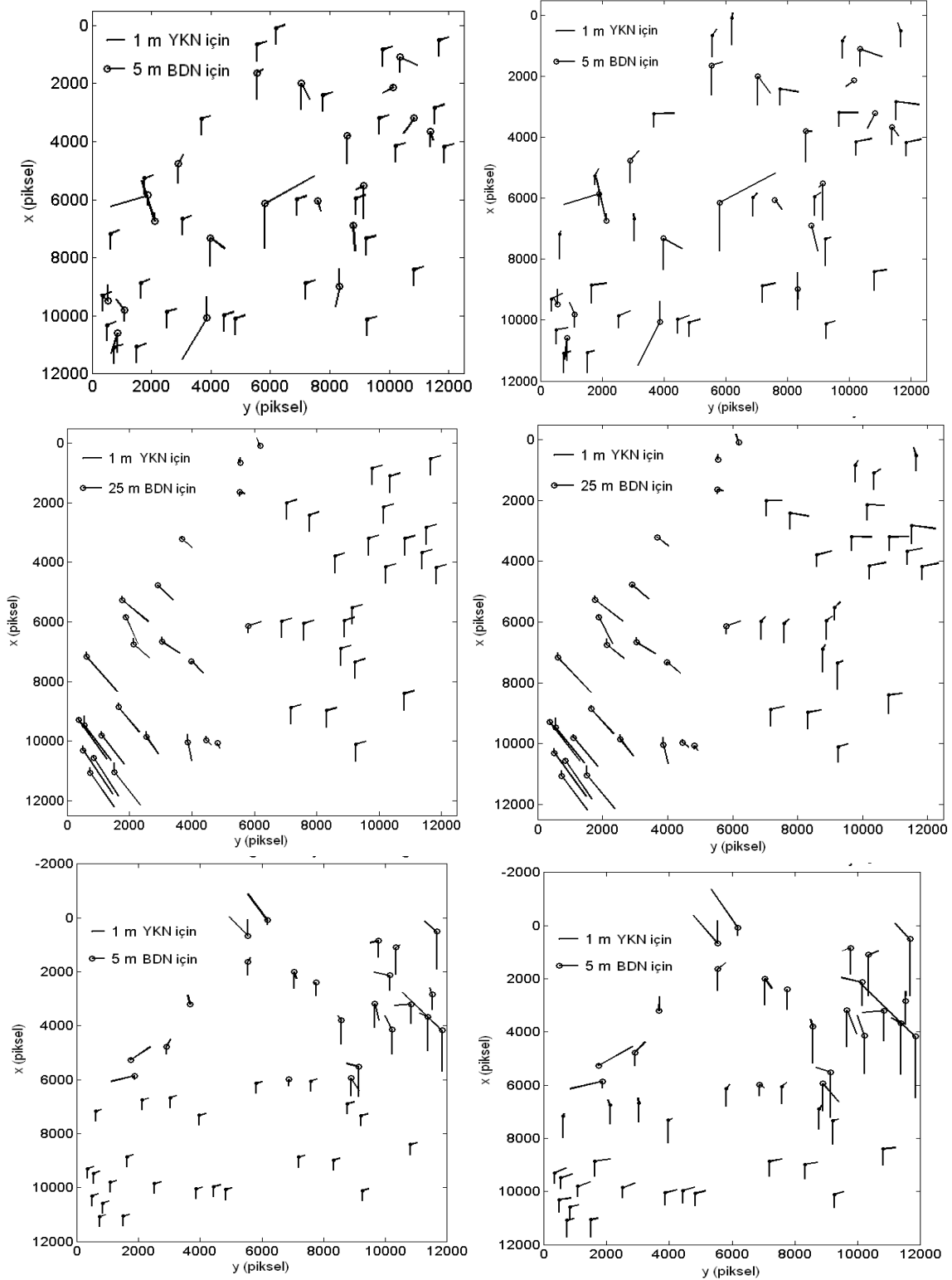
Şekil 5'te tüm dağılım türleri için ön dengelemede YKN'larına ait düzeltme vektörlerin sistematik ve benzer büyüklükte olduğu görülmektedir. Demet dengelemede ise bu sistematiklik bozulmakta, ancak değerlerin birbirine yakınlığı korunmaktadır. BDN'lerinde ise hata vektörleri her iki dengelemede de sistematik değildir; ancak değerler birbirine yakındır. Sadece G-A'da görüntünün alt kısmına doğru artan büyüklükte bir sistematiklik vardır.

Farklı dış yöneltme elemanları demet dengelemede parametre olarak kabul edilerek bunların sonuçlar üzerine etkisi araştırılmış ve sonuçlar Tablo 2'de sunulmuştur. Bu tabloda alt indislerle gösterilen 0, 1 ve 2 değerleri her konum (P_s), hız (V) ve durum açıları (A) için (18) eşitliğindeki sırasıyla P_0, \dot{P}, \ddot{P} katsayılarını ifade etmektedir. Sadece konum, hız ve durum açıları tek başlarına dengeleme parametresi olarak seçildiğinde, ön dengeleme sonuçlarına benzer, kabul edilebilir ve anlamlı sonuçlar elde edildiği görülmüştür. Ancak konum-hız, konum-durum açısı, hız-durum açısı veya her üçü birden dengeleme parametresi olarak tercih edildiğinde özellikle YKN'larında çok düşük doğruluk sonuçları elde

Tablo 1. Sadece bakış açıları kullanılarak elde edilen koh'lar (\pm m)

| Nokta | L | | | \bar{L} | | | B | | | | |
|-------|------|----|------------|-----------|------------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|
| | türü | # | m_x | m_y | m_z | m_x | m_y | m_z | m_x | m_y | m_z |
| H-0 | YKN | 47 | 1230150.23 | 762556.41 | 1260608.51 | 0.515 | 0.169 | 0.928 | - | - | - |
| H-20 | YKN | 27 | 1230372.88 | 762579.15 | 1260424.05 | 0.515 | 0.169 | 0.928 | 0.620 | 0.220 | 0.970 |
| | BDN | 20 | 1229849.58 | 762525.70 | 1260857.50 | 4.782 | 5.335 | 5.943 | 4.827 | 5.310 | 6.174 |
| G-A | YKN | 23 | 1226524.57 | 766698.58 | 1260566.64 | 0.530 | 0.157 | 0.937 | 0.678 | 0.194 | 0.925 |
| | BDN | 24 | 1233614.81 | 758565.60 | 1260648.63 | 24.751 | 33.251 | 7.079 | 25.643 | 32.499 | 6.921 |
| G-B | YKN | 24 | 1234135.02 | 760543.55 | 1258344.29 | 0.509 | 0.174 | 0.923 | 0.500 | 0.203 | 1.010 |
| | BDN | 23 | 1225978.37 | 764651.13 | 1262966.85 | 5.601 | 5.939 | 9.678 | 5.257 | 5.871 | 10.000 |

L : Düzeltilmemiş, \bar{L} : Ön dengelenmiş, B : Demet dengelenmiş



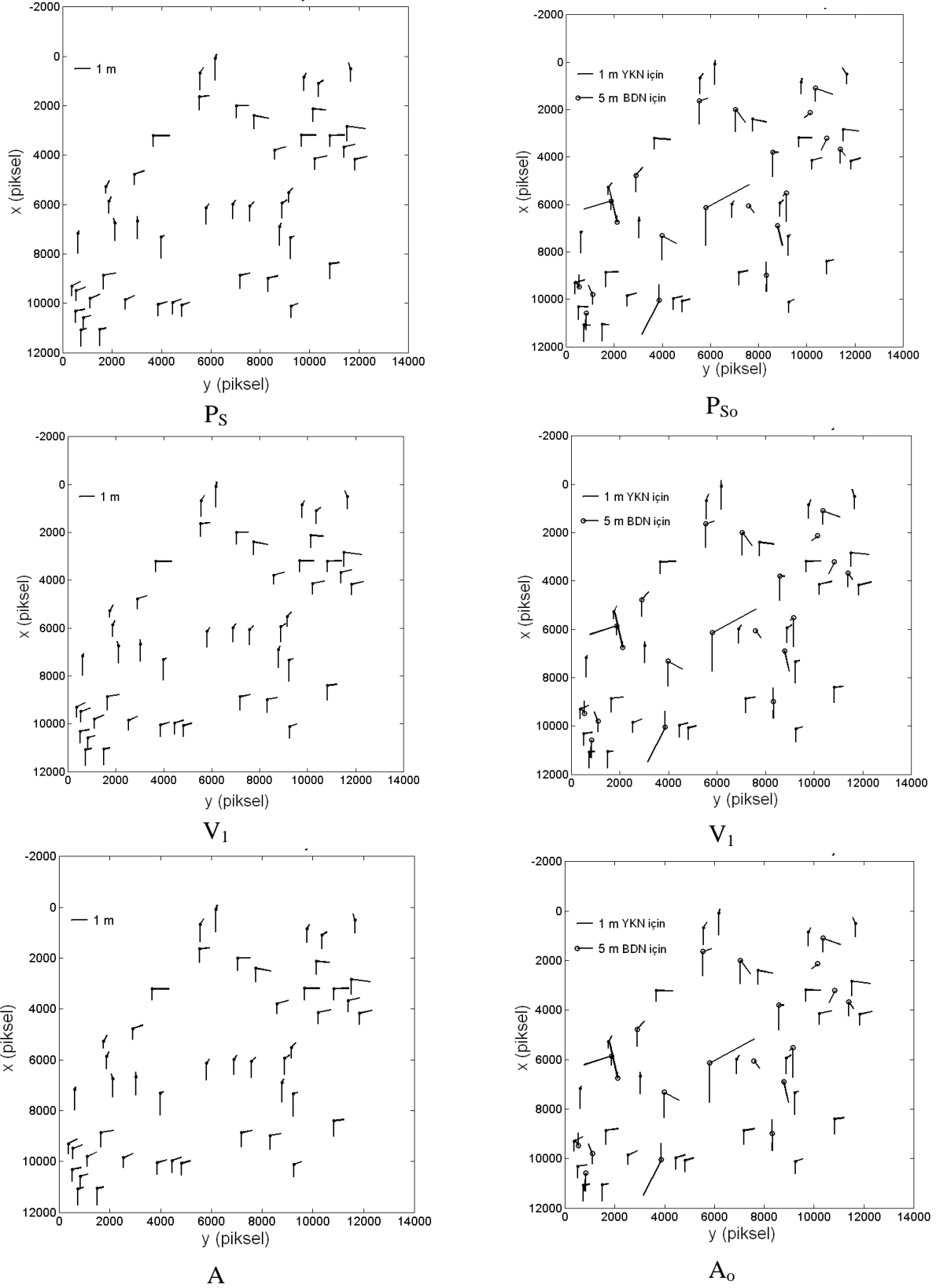
Şekil 5. Ön dengeleme (sol) ve demet dengeleme (sağ) sonrası elde edilen hata vektörleri
Nokta setleri (yukarıdan aşağıya): H-20, G-A, G-B

edilmektedir. Bunun nedeni parametreler arası olası korelasyondur. Benzer durum H-20 ve G-A için tüm hız parametreleri ve G-A için sabit

hız parametreleri (V_0) den-geleme parametresi olarak seçildiğinde sonuçlar kabul edilebilir düzeyde değildir. Ayrıca korelasyonlu parametre

Tablo 2. Farklı dış yöneltme elemanlarına göre demet dengeleme sonuçları

| Nokta | Tür | H-0 | | | H-20 | | G-A | | G-B | |
|--------------------------------------|-------|------------|-------------|-------|-------------|--------|------------|--------|-----|--|
| | | YKN | YKN | BDN | YKN | BDN | YKN | BDN | | |
| DYE | # | 47 | 27 | 20 | 23 | 24 | 24 | 23 | | |
| 1. P _S | m_X | 0.597 | 0.592 | 4.838 | 11.454 | 20.291 | 0.686 | 15.140 | | |
| | m_Y | 0.215 | 0.265 | 5.325 | 8.953 | 16.239 | 0.829 | 15.683 | | |
| | m_Z | 0.943 | 0.965 | 6.199 | 12.699 | 14.102 | 1.012 | 9.242 | | |
| 2. P _{S0} | m_X | 0.597 | 0.587 | 4.846 | 5.685 | 12.244 | 0.602 | 4.989 | | |
| | m_Y | 0.215 | 0.191 | 5.323 | 9.426 | 19.381 | 0.342 | 5.727 | | |
| | m_Z | 0.943 | 0.947 | 6.176 | 7.261 | 21.801 | 1.028 | 10.720 | | |
| 3. P _{S1} | m_X | 0.606 | 0.616 | 4.828 | 4.659 | 18.626 | 0.875 | 4.940 | | |
| | m_Y | 0.213 | 0.227 | 5.313 | 10.236 | 19.621 | 0.648 | 5.620 | | |
| | m_Z | 0.950 | 0.960 | 6.181 | 6.100 | 28.842 | 1.292 | 10.926 | | |
| 4. P _{S2} | m_X | 0.599 | 0.613 | 4.835 | 5.637 | 21.670 | 0.634 | 4.990 | | |
| | m_Y | 0.215 | 0.219 | 5.310 | 11.725 | 21.277 | 0.542 | 5.580 | | |
| | m_Z | 0.944 | 0.949 | 6.173 | 7.377 | 36.448 | 1.052 | 11.047 | | |
| 5. V | m_X | 0.735 | 857488.941 | 4.819 | 2788377.306 | 24.144 | 0.394 | 5.296 | | |
| | m_Y | 0.181 | 601294.331 | 5.305 | 1392198.459 | 32.283 | 0.348 | 5.298 | | |
| | m_Z | 1.091 | 881630.195 | 6.175 | 2736008.555 | 9.318 | 1.229 | 12.913 | | |
| 6. V ₀ | m_X | 0.637 | 1.873 | 4.819 | 1489.062 | 29.475 | 77.553 | 5.235 | | |
| | m_Y | 0.205 | 0.625 | 5.337 | 526.387 | 31.650 | 46.626 | 5.756 | | |
| | m_Z | 0.986 | 2.388 | 6.169 | 1460.937 | 6.132 | 79.687 | 9.686 | | |
| 7. V ₁ | m_X | 0.602 | 0.614 | 4.828 | 0.825 | 26.239 | 0.518 | 5.290 | | |
| | m_Y | 0.214 | 0.229 | 5.310 | 0.393 | 32.862 | 0.167 | 5.930 | | |
| | m_Z | 0.948 | 0.991 | 6.180 | 0.833 | 7.491 | 1.051 | 10.061 | | |
| 8. V ₂ | m_X | 0.613 | 0.630 | 4.826 | 0.714 | 26.023 | 0.513 | 5.474 | | |
| | m_Y | 0.211 | 0.229 | 5.311 | 0.228 | 32.900 | 0.221 | 5.931 | | |
| | m_Z | 0.960 | 0.986 | 6.174 | 0.868 | 7.147 | 1.045 | 10.378 | | |
| 9. A | m_X | 0.601 | 0.621 | 4.827 | 0.645 | 23.024 | 0.584 | 5.246 | | |
| | m_Y | 0.214 | 0.208 | 5.309 | 0.399 | 32.445 | 0.221 | 5.678 | | |
| | m_Z | 0.946 | 0.980 | 6.172 | 0.975 | 5.146 | 1.076 | 7.012 | | |
| 10. A ₀ | m_X | 0.601 | 0.617 | 4.824 | 0.451 | 25.632 | 0.473 | 5.271 | | |
| | m_Y | 0.214 | 0.215 | 5.309 | 0.432 | 32.788 | 0.268 | 5.882 | | |
| | m_Z | 0.946 | 0.968 | 6.169 | 0.623 | 6.907 | 0.974 | 10.040 | | |
| 11. A ₁ | m_X | 0.601 | 0.623 | 4.828 | 1.076 | 24.397 | 0.494 | 5.196 | | |
| | m_Y | 0.214 | 0.222 | 5.310 | 0.307 | 32.520 | 0.164 | 5.869 | | |
| | m_Z | 0.947 | 0.971 | 6.178 | 1.331 | 5.738 | 1.077 | 9.881 | | |
| 12. A ₂ | m_X | 0.601 | 0.623 | 4.828 | 0.611 | 24.741 | 0.510 | 5.208 | | |
| | m_Y | 0.214 | 0.223 | 5.310 | 0.412 | 32.565 | 0.238 | 5.871 | | |
| | m_Z | 0.946 | 0.963 | 6.171 | 1.110 | 6.010 | 0.970 | 9.857 | | |
| 13. P _S V | m_X | 94.687 | 2480619.438 | 4.850 | 2214311.619 | 19.880 | 35111.533 | 14.855 | | |
| | m_Y | 25.882 | 1358110.296 | 5.314 | 667503.266 | 28.373 | 25961.300 | 24.132 | | |
| | m_Z | 91.547 | 2457473.719 | 6.147 | 2135298.602 | 7.112 | 36660.399 | 20.767 | | |
| 14. (P _S V) ₀ | m_X | 0.331 | 1540.174 | 4.835 | 15111.947 | 25.055 | 1033.349 | 5.257 | | |
| | m_Y | 0.332 | 418.697 | 5.319 | 7559.826 | 32.487 | 288.964 | 5.907 | | |
| | m_Z | 0.454 | 1490.247 | 6.166 | 15147.503 | 7.293 | 995.090 | 9.823 | | |
| 15. P _S A | m_X | 6.614 | 86.367 | 4.817 | 6967.113 | 16.205 | 1476.484 | 51.142 | | |
| | m_Y | 2.311 | 423.180 | 5.298 | 10035.801 | 12.922 | 802.246 | 30.264 | | |
| | m_Z | 6.196 | 178.262 | 6.132 | 6705.377 | 19.952 | 916.408 | 62.691 | | |
| 16. (P _S A) ₀ | m_X | 1.762 | 42.951 | 4.814 | 1253.439 | 27.873 | 93.470 | 5.195 | | |
| | m_Y | 0.852 | 169.735 | 5.319 | 250.475 | 31.354 | 551.640 | 5.837 | | |
| | m_Z | 1.814 | 63.885 | 6.150 | 343.224 | 6.602 | 245.020 | 10.208 | | |
| 17. VA | m_X | 437352.820 | 1710947.167 | 4.855 | 378437.359 | 24.165 | 939513.405 | 25.168 | | |
| | m_Y | 547928.028 | 1269998.173 | 5.307 | 363825.969 | 50.175 | 598629.738 | 20.127 | | |
| | m_Z | 492436.992 | 1818760.336 | 6.176 | 397867.069 | 46.751 | 967996.618 | 17.352 | | |
| 18. (VA) ₀ | m_X | 0.324 | 31.407 | 4.827 | 2329.453 | 25.978 | 253.662 | 5.176 | | |
| | m_Y | 0.327 | 19.449 | 5.311 | 1439.783 | 31.855 | 278.665 | 5.845 | | |
| | m_Z | 0.532 | 34.412 | 6.166 | 2568.341 | 6.660 | 365.584 | 9.971 | | |
| 19. (P _S VA) ₀ | m_X | 6.472 | 55840.525 | 4.809 | 352592.286 | 7.633 | 116492.271 | 5.182 | | |
| | m_Y | 2.387 | 23043.296 | 5.320 | 268285.143 | 14.417 | 30460.778 | 5.753 | | |
| | m_Z | 6.596 | 52804.785 | 6.128 | 350676.991 | 24.954 | 109597.512 | 9.907 | | |

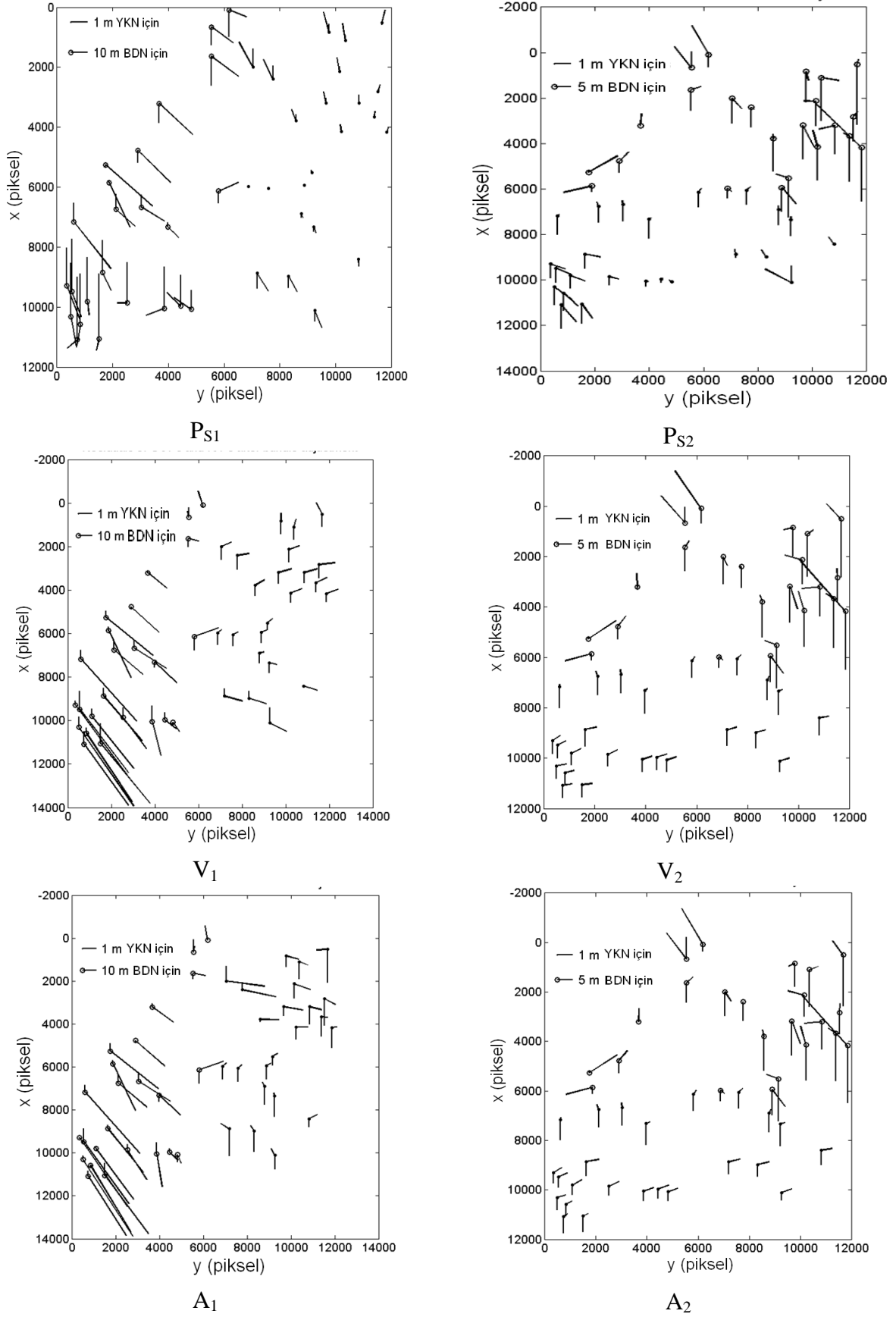


Şekil 6. Bazı parametre setlerine göre H-0 (sol) ve H-20 (sağ) nokta setleri için hata vektörleri

setlerinde demet dengeleme sonrasında YKN'larında elde edilen doğruluğun BDN'lerinde elde edilene oranla oldukça düşük olduğu görülmek-

tedir. Bunun nedeni, dengeleme işlemi sonrasında YKN'larına ait koordinatların hesaplanmasında düzeltilmiş parametrelerin kullanılması,

SPOT-5 HRG düzey 1A görüntülerinin konum doğruluğu



Şekil 7. Bazı parametre setlerine göre G-A (sol) ve G-B (sağ) nokta setleri için hata vektörleri

BDN'larına ait koordinatların düzeltmesinin ise dengeleme bilinmeyenini olarak kabul edilmesidir. Şekil 6'da ve Şekil 7'de bazı parametre setlerine göre elde edilen düzeltme vektörleri gösterilmiştir. Tüm noktaların YKN olarak kullanıldığı nokta setinde (H-0), seçilen parametreden bağımsız olarak hata vektörlerinin tüm parametre setlerinde aynı olduğu görülmektedir. Bu durum diğer setlerde farklıdır. G-A setinde özellikle BDN'larında sistematik bir etki görülmektedir. G-B'de ise V_2 ve A_2 ile elde edilen hata vektörleri aynı etkiye sahiptir.

Sonuçlar

Bu çalışmada elde edilen en önemli sonuç, kullanılan görüntülere özel olarak tanımlanan bakış açılarının doğru yer koordinatlarının elde edilmesinde en büyük paya sahip olduğudur. Bu nedenle bakış açıları, önce dış yöneltme elemanları sabit kabul edilerek ön dengelenmiş, sonra da demet dengeleme işleminde kullanılmıştır. Demet dengelemenin sonuçlar üzerinde bir iyileştirme yapmadığı görülmüştür. Dış yöneltme elemanlarının sonuçlar üzerindeki etkisinin belirlenebilmesi için bu elemanlar demet dengelemede dengeleme parametresi olarak kabul edilmiştir. Parametrelerin sonuçlar üzerinde anlamlı bir etkisi görülmemiştir. Sadece parametreler arası korelasyon çok düşük doğruluk değerleri üretmektedir.

YKN'ları için elde edilen koh değeri genelde ± 1 m'den (± 0.2 piksel) küçüktür ve eksenlere ait koh değerleri arasında $m_Z > m_X > m_Y$ ilişkisi vardır. Bunun olması normaldir. Çünkü stereogörüntülerden elde edilen koordinat bileşenlerinden Z yönündeki doğruluk değeri yatay (X ve Y) yöndekinden daha düşüktür. Y yönündeki doğruluğun X yönündekinden daha büyük olmasının nedeni ise Y yönünün bakış açısıyla ilgili olmasıdır. Hatırlanacak olursa sonuç doğrulukları üzerindeki bakış açılarının etkisi oldukça fazladır.

BDN'larında elde edilen doğruluk düzeyi ise yaklaşık ± 5 m (± 1 piksel) düzeyindedir. %99.7 ($\pm 3\sigma$) güven aralığı göz önüne alındığında bu

değerin ± 15 m'ye (± 3 piksel) kadar olması beklenebilir. Bu değer (± 3 piksel) aynı zamanda radyometrik kalitesi iyi bir görüntüde bir nesnenin (noktanın) işaret-lenme doğruluğudur (Srivastava vd., 1996). Dolayısıyla BDN'ları için elde edilen bu doğruluk düzeyi kabul edilebilir niteliktedir.

Teşekkür

Yazarlar, değerli katkılarından dolayı Dr. Orhan Kurt'a ve Prof.Dr. Filiz Sunar'a, arazi çalışmalarındaki yardımlarından dolayı Dr. M. Güven Koçak'a ve Murat Oruç'a teşekkür eder. Bu çalışmada kullanılan görüntüler TÜBİTAK ve JULICH'in (Almanya) desteği ile sağlanmıştır.

Kaynaklar

- Fotev, S., Georgiev, N. ve Nedkov, R., (2005). Viewing geometry model evaluation for spaceborne pushbroom imagery, *Proceedings, 2nd International Conference on Recent Advances in Space Technologies*, 540-544, Istanbul.
- 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**, 147-159.
- SPOT Image (2002), SPOT satellite geometry handbook.
- Srivastava, P.K., Gopala Krishna, B. ve Majumder, K.L., (1996). Cartography and terrain mapping using IRS-1C data, *National Natural Resources Management System, Current Science*, **70**, 7.
- Topan, H., (2009). Geometric analysis of high resolution space images using parametric approaches considering satellite orbital models, *Doktora tezi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Toutin, T., (2003). *Geometric correction of remotely sensed images* in Wulder, M.A. ve Franklin, S.E., eds, *Remote Sensing of Forest Environments: Concepts and Case Studies*, Kluwer Academic Publishers, 143-180.
- Weser, T., Rottensteiner, F., Willneff, J., Poon, J. ve Fraser, C., (2008). Development and testing of a generic sensor model for pushbroom satellite imagery, *The Photogrammetric Record*, **23**, 123, 255-274.