

Stereo Görüntü Yöneltilmesinde Duyarlılık Analizi (Precision Analysis of The Stereo Image Orientation)

Ali Coşkun KİRACI¹, Gönül TOZ²

¹Harita Genel Komutanlığı, Fotogrametri Dairesi, Ankara,

²İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Geomatik Mühendisliği, İstanbul

alicoskun.kiraci@hkg.msb.gov.tr, gtoz@itu.edu.tr

ÖZ

GPS/IMU (Global Positioning System/Inertial Measurement Unit) sistemi, uçuş sırasında gerçekleştirilen ölçümler ile dış yöneltilme elemanlarını doğrudan sağlayabilmektedir. Ancak özellikle doğrudan yöneltilme yapılacaksa konum doğruluğunun bilinmesi önem taşımaktadır. Fotogrametrik projelerde konum duyarlılığı genelde ampirik olarak YKN (Yer Kontrol Noktası) kullanılarak belirlenmektedir. Ancak YKN inşaatı maliyetlidir ve her proje için yeterli sayıda bulunması her zaman mümkün olmamaktadır. Bu durumda konum duyarlılığını hata yayılma yasası ile hesaplamak mümkündür. Bu çalışmada fotogrametrik matematik modeli incelenmiş, izdüşüm denklemlerine hata yayılma yasası uygulanarak konum duyarlılığı hesaplanmıştır. Bunun yanında her bir yöneltilme parametresinin konum duyarlılığına etkisi incelenmiş ve yorumlanmıştır. Bu kapsamda 10 cm YÖA (Yer Örnekleme Aralığı)'na sahip stereo görüntüler üzerinde hesapsal bir uygulama ile YKN olmadan konum hassasiyeti belirlenmiş ve dengeleme sonuçlarından elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılarak yapılan duyarlılık analizinin kullanılabilirliği test edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: GPS/IMU entegrasyonu, hata yayılma yasası, konum duyarlılığı

ABSTRACT

GPS/IMU system can provide orientation parameters directly by measurements performed during the flight. However especially if direct georeferencing is performed, knowledge of the positional accuracy would be important. Positional sensitivity is determined generally by using GCP (Ground Control Point) in photogrammetric projects. But GCP construction is cost and it is not possible to find in enough number anytime. Thus situated it is possible to compute positional sensitivity by error propagation. In this study, photogrammetric mathematical model is viewed, positional sensitivity is computed by implementing error propagation on collinearity equations. In this context positional sensitivity is determined on 10 cm GSD (Ground Sample Distance) stereo images by computational practice without GCP and tested the validity of performed sensitivity analysis by comparing with the results obtained by adjustment. Effect of each orientation parameter to positional sensitivity is examined and interpreted by implementing error propagation.

Keywords: GPS/IMU integration, error propagation, positional accuracy

1. GİRİŞ

IMU ve GPS'in birlikte kullanılmasıyla oluşturulan GPS/IMU sistemi ile uçuş sırasında gerçekleştirilen ölçümler sonucunda dış yöneltilme elemanlarını doğrudan sağlayabilmektedir. Böylece fotoğrafların yöneltilmesi için gerekli olan dış yöneltilme parametreleri, hava triangulasyonuna ihtiyaç duyulmaksızın uçuş sonrasında yapılan GPS/IMU entegrasyonu sonucunda elde edilebilmektedir.

Yöneltilme parametrelerinin elde edilmiş olması, hesapsal olarak hava triangulasyonu ve dolayısıyla Yer Kontrol Noktası (YKN) ihtiyacını ortadan kaldırmış olarak görünse de doğrudan coğrafi konumlandırma ile elde edilen geometrik doğruluk göz önünde bulundurularak hangi projelerde kullanılabilirliğinin belirlenmesi gerekmektedir. Bununla birlikte GPS/IMU destekli hava triangulasyonunda dış yöneltilme parametrelerinin başlangıç değerleri olarak kullanılması blok dengeleme doğruluğunu arttırmakta ve bağlama noktalarının otomatik belirlenmesinde hız ve hassasiyet sağlamaktadır. GPS ve IMU'nun kendi hata kaynakları ve ölçüm duyarlılıkları bilinmektedir. GPS ve IMU'in GPS/IMU entegrasyonu ile elde edilen yöneltilme doğruluğu GPS ve IMU doğruluğu ile ilişkilidir. Bu yüzden GPS ve IMU hatası ve GPS/IMU entegrasyonu sonucunda alınan yöneltilme parametreleri ile belirlenen konum doğruluğu bilinmelidir (Kiracı vd., 2016).

Fotogrametrik uygulamalarda oldukça sık kullanılan GPS/IMU sistemi maliyeti ve hızı dolayısıyla oldukça avantaj sağlamakla birlikte elde edilecek konum doğruluğu tecrübelerine dayanarak belirlenebilmekte ya da koordinatları bilinen YKN noktalarına yapılan ölçümlerle deneysel olarak belirlenmektedir. "Kiracı vd., 2016" çalışmasında 45 cm YÖA görüntüler ve doğrudan yöneltilme parametreleri kullanılmıştır. Bu çalışmada 10 cm YÖA stereo görüntüler üzerinde dengelenmiş yöneltilme parametreleri kullanılarak hesapsal bir uygulama ile YKN olmadan konum duyarlılığı belirlenmiştir. Bu kapsamda ışın demetleri ile dengeleme sonucunda elde edilen yöneltilme parametreleri ve duyarlılıkları kullanılarak stereo görüntü çiftinde konum

duyarlılıkları hesaplanmış ve bu hesaplanan değerler, dengeleme sonucunda elde edilen YKN konum hataları ile karşılaştırılmıştır. Yönelme parametrelerinin duyarlılıkları 0 ile belirli değer arasında artırılarak, konum duyarlılığına etkisi incelenmiş ve yorumlanmıştır.

2. GPS/IMU HATA KAYNAKLARI

Dış yönelme parametreleri günümüzde GPS/IMU ile belirlenerek doğrudan veya ışın demetleri ile blok dengeleme için başlangıç değerleri olarak kullanılmaktadır. GPS/IMU ölçümleri hem GPS hem de IMU' dan gelen hataları içermektedir. GPS hataları; Anten Faz Kayıklığı, Atmosferik Gecikme, Sinyal Yansımaları, Uydu Geometrisi olarak sıralanabilir.

“Uydu saat hataları ve uydu yörünge hataları”, “alıcı saat hataları” ve “başlangıç faz belirsizlikleri” kullanılan fark teknikleri ile en aza indirilmektedir.

Alıcı hataları teknolojik gelişme ile birlikte azalmıştır. Devreye sokulan yeni uydularla geometri yani uydu dağılımı da yeterli olmaktadır. Ölçmelerde aynı antenlerin kullanılmasıyla anten faz kayıklıkları da ortadan kalkar. Çift frekansta ölçü olarak ionosferik gecikmeyi de ortadan kaldırmalıdır. Sinyal yansımaları ve troposferik gecikme hataları en önemli hata kaynaklarıdır ve uydu eğim açısı küçüldükçe artarlar. Sinyal yansımaları etkisini azaltmak için, bu amaçla hazırlanmış antenler kullanılması ve dikkatli yer seçimi gerekir. Troposferik gecikme ise meteorolojik verilere ya da matematiksel yöntemlere dayalı olarak modellenmeye çalışılmaktadır (Grewal vd., 2007).

IMU hataları; *Başlangıç (Initialization) Hataları; Hizalama (alignment) Hataları; Sensör Dengeleme Hataları; Gravite Modeli Hataları;* olarak sıralanabilir. (Kıracı vd., 2016)

3. STEREO GÖRÜNTÜ YÖNELTİMİNDE HATA YAYILMASI

Stereo görüntü yönelmesinin matematiksel modeli (1) -(11) eşitlikleri ile ifade edilir. (Derenyi, 1996)

c odak uzaklığı (mm),

x_0, y_0 asal nokta koordinatları,

X_L, Y_L, Z_L İzdüşüm merkezi koordinatları (arazi koordinat sisteminde),

ω, φ, κ Görüntü Koordinat sistemi ve Yersel Koordinat sistemi arasındaki dönüklük,

M (3 x 3) dönüklük matrisi,

$$M = M_{\kappa} * M_{\varphi} * M_{\omega} \quad (1)$$

$$M = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Resim koordinatlarından arazi koordinatlarına dönüşüm için;

$$r = dx * m_{11} + dy * m_{21} - c * m_{31} \quad (3)$$

$$s = dx * m_{12} + dy * m_{22} - c * m_{32} \quad (4)$$

$$q = dx * m_{13} + dy * m_{23} - c * m_{33} \quad (5)$$

Sol görüntü;

$$X = X_{01} + (Z - Z_{01}) \frac{r_1}{q_1} \quad (6)$$

$$Y = Y_{01} + (Z - Z_{01}) \frac{s_1}{q_1} \quad (7)$$

Sağ görüntü;

$$X = X_{02} + (Z - Z_{02}) \frac{r_2}{q_2} \quad (8)$$

$$Y = Y_{02} + (Z - Z_{02}) \frac{s_2}{q_2} \quad (9)$$

X'leri eşitlesek;

$$X_{01} + (Z - Z_{01}) \frac{r_1}{q_1} = X_{02} + (Z - Z_{02}) \frac{r_2}{q_2} \quad (10)$$

$$Z = \frac{\left(X_{02} \cdot q_1 \cdot q_2 - X_{01} \cdot q_1 \cdot q_2 \right)}{\left(+Z_{01} \cdot r_1 \cdot q_2 - Z_{02} \cdot r_2 \cdot q_1 \right)} \Bigg/ \left(r_1 \cdot q_2 - r_2 \cdot q_1 \right) \quad (11)$$

(12) numaralı eşitlikte X fonksiyonun φ_1 (sol resme ait φ açısı) parametresine göre birinci dereceden türevi gösterilmiştir. Örnekte olduğu gibi X, Y ve Z fonksiyonlarının birinci dereceden türevleri alınmalıdır.

$$\frac{\partial X}{\partial \varphi_1} = \frac{\Delta Z}{q^2} \left[(-dx \cdot \cos \kappa \cdot \sin \varphi + dy \cdot \sin \varphi - c \cdot \cos \varphi) \cdot q + (dx \cdot \cos \kappa \cdot \cos \varphi \cdot \cos \omega - dy \cdot \sin \kappa \cdot \cos \varphi \cdot \cos \omega - c \cdot \sin \varphi \cdot \cos \omega) \cdot r \right] \quad (12)$$

Yukarıda verilen eşitlikler yardımı ile hesaplanan kovaryans (C_f) matrisinin (eşitlik (13)) köşegenlerinin karekökü (eşitlik (14)) bize konum bileşenlerinin duyarlılığını verecektir (Koch, 1987).

$$C_f = A C_l A^T \quad (13)$$

$$m_x = \sqrt{\text{diag}(C_f)} \quad (14)$$

Eşitlik (13)'ün hesaplanabilmesi için fonksiyonlar vektörü katsayılar matrisi (A) ve ölçülerin varyans kovaryans matrisi (C_l)'nin oluşturulması gerekmektedir. Buna göre A matrisi;

Sağ görüntü için;

$$K_1 = \begin{bmatrix} \frac{\partial X}{\partial \omega_1} & \frac{\partial X}{\partial \varphi_1} & \frac{\partial X}{\partial \kappa_1} & \frac{\partial X}{\partial X_{01}} & \frac{\partial X}{\partial Y_{01}} & \frac{\partial X}{\partial Z_{01}} & \frac{\partial X}{\partial x_1} & \frac{\partial X}{\partial y_1} & \frac{\partial X}{\partial x_{01}} & \frac{\partial X}{\partial y_{01}} & \frac{\partial X}{\partial c} \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$M_1 = \begin{bmatrix} \frac{\partial Y}{\partial \omega_1} & \frac{\partial Y}{\partial \varphi_1} & \frac{\partial Y}{\partial \kappa_1} & \frac{\partial Y}{\partial X_{01}} & \frac{\partial Y}{\partial Y_{01}} & \frac{\partial Y}{\partial Z_{01}} & \frac{\partial Y}{\partial x_1} & \frac{\partial Y}{\partial y_1} & \frac{\partial Y}{\partial x_{01}} & \frac{\partial Y}{\partial y_{01}} & \frac{\partial Y}{\partial c} \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$N_1 = \begin{bmatrix} \frac{\partial Z}{\partial \omega_1} & \frac{\partial Z}{\partial \varphi_1} & \frac{\partial Z}{\partial \kappa_1} & \frac{\partial Z}{\partial X_{01}} & \frac{\partial Z}{\partial Y_{01}} & \frac{\partial Z}{\partial Z_{01}} & \frac{\partial Z}{\partial x_1} & \frac{\partial Z}{\partial y_1} & \frac{\partial Z}{\partial x_{01}} & \frac{\partial Z}{\partial y_{01}} & \frac{\partial Z}{\partial c} \end{bmatrix} \quad (17)$$

Sol görüntü için;

$$K_2 = \begin{bmatrix} \frac{\partial X}{\partial \omega_2} & \frac{\partial X}{\partial \varphi_2} & \frac{\partial X}{\partial \kappa_2} & \frac{\partial X}{\partial X_{02}} & \frac{\partial X}{\partial Y_{02}} & \frac{\partial X}{\partial Z_{02}} & \frac{\partial X}{\partial x_2} & \frac{\partial X}{\partial y_2} & \frac{\partial X}{\partial x_{02}} & \frac{\partial X}{\partial y_{02}} & \frac{\partial X}{\partial c} \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$M_2 = \begin{bmatrix} \frac{\partial Y}{\partial \omega_2} & \frac{\partial Y}{\partial \varphi_2} & \frac{\partial Y}{\partial \kappa_2} & \frac{\partial Y}{\partial X_{02}} & \frac{\partial Y}{\partial Y_{02}} & \frac{\partial Y}{\partial Z_{02}} & \frac{\partial Y}{\partial x_2} & \frac{\partial Y}{\partial y_2} & \frac{\partial Y}{\partial x_{02}} & \frac{\partial Y}{\partial y_{02}} & \frac{\partial Y}{\partial c} \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$N_2 = \begin{bmatrix} \frac{\partial Z}{\partial \omega_2} & \frac{\partial Z}{\partial \varphi_2} & \frac{\partial Z}{\partial \kappa_2} & \frac{\partial Z}{\partial X_{02}} & \frac{\partial Z}{\partial Y_{02}} & \frac{\partial Z}{\partial Z_{02}} & \frac{\partial Z}{\partial x_2} & \frac{\partial Z}{\partial y_2} & \frac{\partial Z}{\partial x_{02}} & \frac{\partial Z}{\partial y_{02}} & \frac{\partial Z}{\partial c} \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$A = \begin{bmatrix} K_1 & K_2 \\ M_1 & M_2 \\ N_1 & N_2 \end{bmatrix} \quad (21)$$

C_l ölçüler varyans kovaryans matrisi ölçülerin önceden bilinen duyarlılıklarından (σ) oluşmaktadır. Stereo görüntü yöneltilmesi için uygulanacak olursa;

$$C_{l1} = \text{diag}[\sigma_{\omega_1}^2, \sigma_{\varphi_1}^2, \sigma_{\kappa_1}^2, \sigma_{X_{01}}^2, \sigma_{Y_{01}}^2, \sigma_{Z_{01}}^2, \sigma_{x_1}^2, \sigma_{y_1}^2, \sigma_{x_{01}}^2, \sigma_{y_{01}}^2, \sigma_c^2] \quad (22)$$

$$C_{l2} = \text{diag}[\sigma_{\omega_2}^2, \sigma_{\varphi_2}^2, \sigma_{\kappa_2}^2, \sigma_{X_{02}}^2, \sigma_{Y_{02}}^2, \sigma_{Z_{02}}^2, \sigma_{x_2}^2, \sigma_{y_2}^2, \sigma_{x_{02}}^2, \sigma_{y_{02}}^2, \sigma_c^2] \quad (23)$$

Fonksiyonlardaki parametreler birbirinden bağımsız oldukları kabul edildiğinden C_l matrisinin köşegenleri dışındaki elemanlar sıfır olmaktadır. Böylece C_l ölçüler varyans kovaryans matrisi (4.28) eşitliği ile ifade edilebilir.

$$C_l = \begin{bmatrix} C_{l1} & 0 \\ 0 & C_{l2} \end{bmatrix} \quad (24)$$

C_l ve A matrisi oluşturulduğuna göre (14) eşitliği ile X , Y ve Z konum bileşenlerine ait duyarlılıklar (m_x) hesaplanabilir. Bu çalışmada bu metodoloji ile X , Y ve Z konum bileşenlerine ait duyarlılıklar hesaplanmıştır. Bunun yanında her bir parametrenin duyarlılıkları 0 ve belirlenen bir değer aralığında artırılarak, her bir parametrenin

konum bileşenlerinin duyarlılıklarına etkisi grafiklere çizdirilerek analiz edilmiştir.

Yukarıda açıklanan matematiksel model doğrultusunda MATLAB yazılımı ile örnek bir projede bir stereo model üzerinde her bir ölçünün konum duyarlılığına etkisi incelenmiş ve beklenen yatay ve düşey konum duyarlılığı hesaplanmıştır.

4. UYGULAMA ve DEĞERLENDİRME

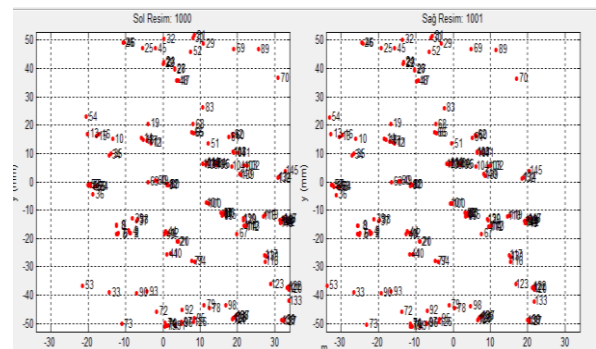
Uygulamada Ultracam Eagle Sayısal Hava Kamerası ile yer örnekleme aralığı 10 cm olarak gerçekleştirilmiş bir projeden elde edilen değerler kullanılmıştır ($f=80$ mm, pixel çözünürlüğü 4,6 Mikron). GPS/IMU entegrasyonu sonucunda elde edilen GPS/IMU değerleri ve duyarlılıkları Tablo 1'de sunulmuştur.

Tablo 1. Dış Yöneltilme Parametreleri ve Duyarlılıkları.

Fotoğ.	X0 (m)	Y0 (m)	Z0 (m)
Sol	518978.36	4337762.65	1750.412
Sağ	518818.61	4337557.33	1751.091
Fotoğ.	ω (°)	φ (°)	κ (°)
Sol	1.28849	-0.27803	-127.6469
Sağ	2.4934	-0.24216	-128.0309
Fotoğ.	σX_0 (m)	σY_0 (m)	σZ_0 (m)
Sol	0,01	0,01	0,01
Sağ	0,01	0,01	0,01
Fotoğ.	$\sigma \omega$ (°)	$\sigma \varphi$ (°)	$\sigma \kappa$ (°)
Sol	0,0001	0,0001	0,0001
Sağ	0,0001	0,0001	0,0001

Bunun yanında Asal Nokta koordinatları (x_0, y_0) duyarlılığı 0.1 Mikron, nokta ölçüm duyarlılığı 1 Mikron ve odak uzaklığı (f) ise sıfır olarak kabul edilerek duyarlılık hesabına dahil edilmiştir.

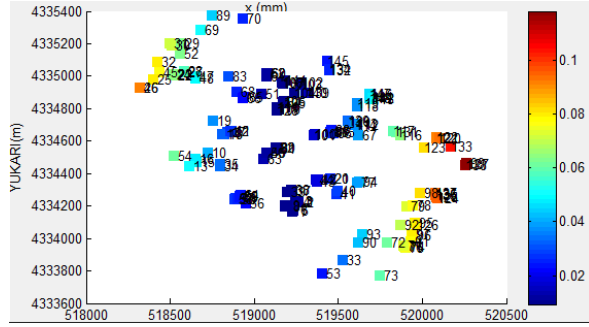
Toplam 80 adet noktanın her iki görüntüde de koordinatları ölçülmüştür. Şekil 1'de stereo model alanında yapılan bağlama noktaları ölçümlerinin dağılımı görülmektedir.



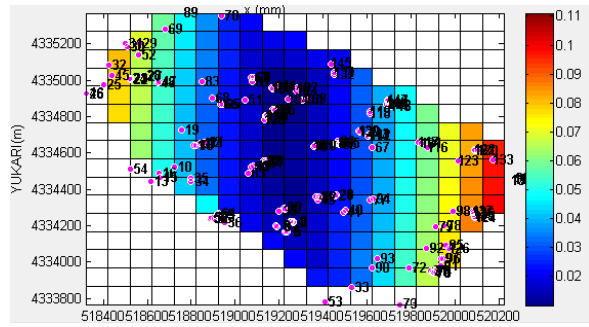
Şekil 1. Stereo model alanında resim koordinatlarının dağılımı.

Projeye ait model için gerçekleştirilen uygulama sonucunda yatay konum duyarlılığı $\sigma_{xy}=0,062$ m, düşey konum duyarlılığı ise $\sigma_z=0,096$ m olarak belirlenmiştir.

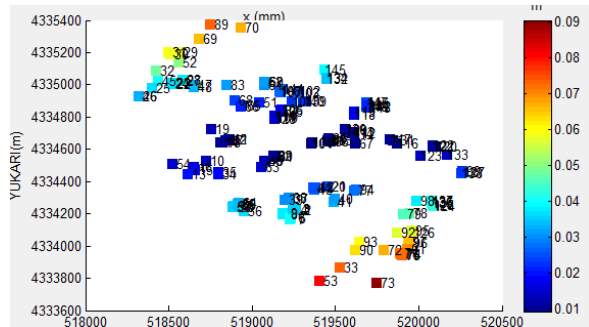
Şekil 2 - 4'de ölçülen her bir noktaya ait X, Y ve Z bileşenlerine ait konum duyarlılığı ve bu noktalardan enterpolasyon ile oluşturulmuş renk yüzeyleri ile model üzerinde konum duyarlılığı dağılımları grafik olarak gösterilmiştir.



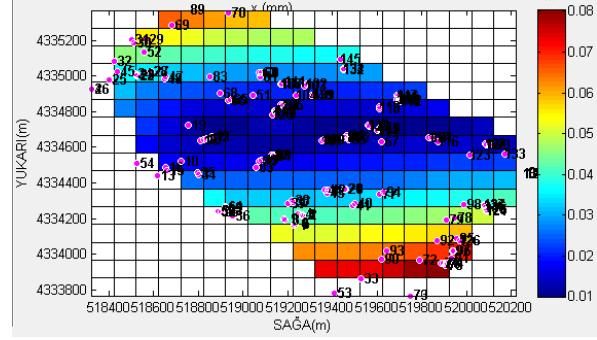
Şekil 2a. X koordinat bileşeni nokta konum duyarlılığı grafiği.



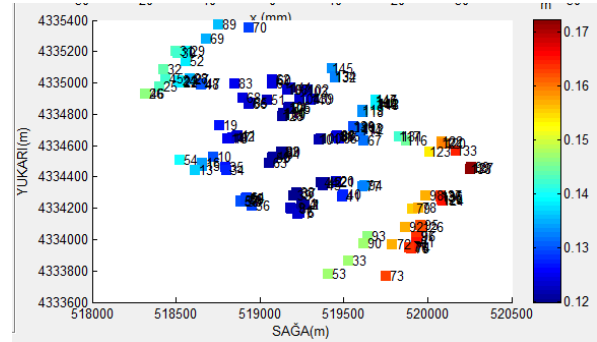
Şekil 2b. X koordinat bileşeni konum duyarlılığı dağılımı grafiği



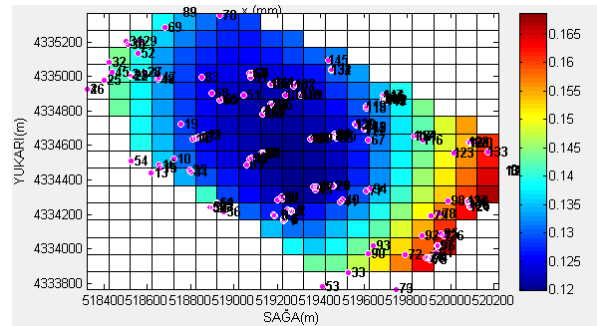
Şekil 3a. Y koordinat bileşeni nokta konum duyarlılığı grafiği.



Şekil 3b. Y koordinat bileşeni konum duyarlılığı dağılımı grafiği.



Şekil 4a. Z koordinat bileşeni nokta konum duyarlılığı grafiği.

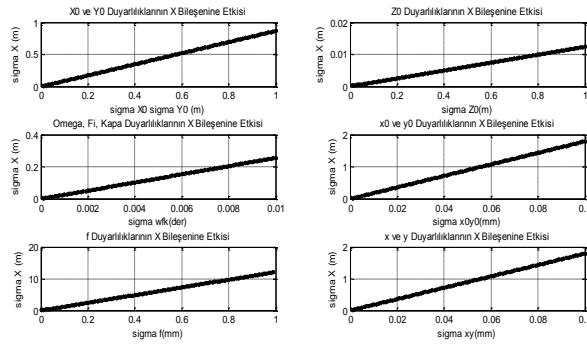


Şekil 4b. Z koordinat bileşeni konum duyarlılığı dağılımı grafiği

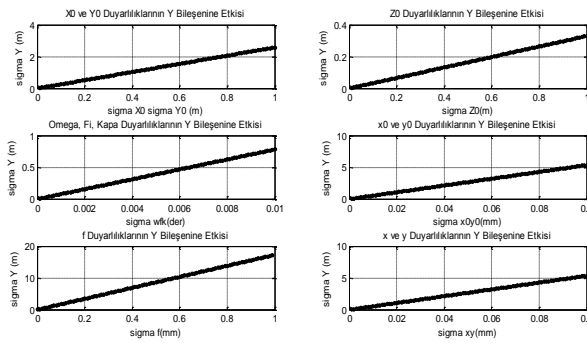
Şekil 4'de sunulan grafikler incelendiğinde konum duyarlılıkları; X konum bileşeni için 0.02 - 0.1 m arasında, Y konum bileşeni için 0.01 - 0.08 m arasında, Z konum bileşeni için ise 0.12 - 0.17 m arasında olduğu görülmektedir.

Her bir parametrenin ayrı ayrı izdüşüm denklemlerinde konum duyarlılığına etkisi incelenmiştir. Burada hangi parametrenin duyarlılığı incelenecekse onun duyarlılığı sıfıra yakın bir değerden belirli aralıklarla artırılırken diğer parametreler hatasız ve sabit olarak kabul edilerek grafikleri oluşturulmuştur. Şekil 5'de

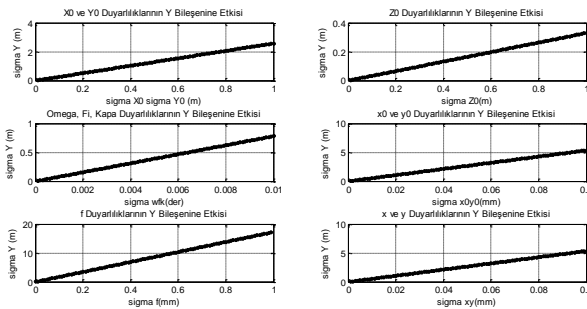
sunulan grafikler her bir parametrenin X, Y ve Z bileşenine etkisini göstermektedir.



Şekil 5a. Yöneltilme Parametrelerinin X Bileşenine Etkisi



Şekil 5b. Yöneltilme Parametrelerinin Y Bileşenine Etkisi



Şekil 5c. Yöneltilme Parametrelerinin Z Bileşenine Etkisi

Şekil 5'de sunulan grafikler incelendiğinde X ve Y konum bileşenleri yöneltilme parametrelerinden birbirine yakın ve aynı oranda etkilendiği görülmektedir. Buna göre X_0 ve Y_0 parametresinin X ve Y konum bileşenlerini bire bir oranda etkilemekte ve lineer bir artış göstermektedir. Z_0 bileşeninin ise X ve Y konum duyarlılığına etkisinin yok denecek az olduğu görülmektedir. Dönüklük parametrelerinin duyarlılığı ise $0^\circ - 0.01^\circ$ aralığında 0.3 m ye varan konum hatasına neden

olmaktadır ve lineer artış göstermektedir. Asal nokta kayıklığı ve nokta ölçüm duyarlılığının da yatay konum duyarlılığını oldukça fazla etkilediği görülmektedir.

Yöneltilme parametrelerinin Z konum bileşenine etkisi incelendiğinde; X_0 , Y_0 'ın 0 - 1 m aralığındaki duyarlılığı 1 m'ye kadar, $0^\circ - 0.01^\circ$ aralığında dönüklük duyarlılığının Z konum duyarlılığını 2-3 m'ye kadar etkilediği görülmektedir. Z_0 parametresi Z konum bileşenini bileşenini yaklaşık bire bir oranda etkilemektedir. Asal nokta kayıklığı ve nokta ölçüm duyarlılığının da Z konum duyarlılığını oldukça fazla etkilemektedir. Buradaki tüm bileşenler için duyarlılık, Z konum bileşenini lineer artış göstererek arttırmaktadır.

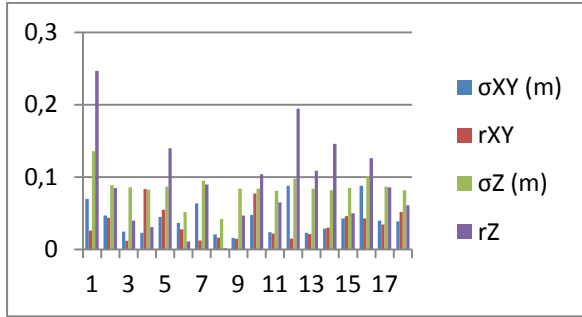
Şekil 5'de grafikler incelendiğinde, yöneltilme parametrelerinin konum bileşenlerine etkisinin lineer olduğu görülmektedir. Yöneltilme parametrelerinin konum bileşenleri duyarlılıkları ile lineer ilişkisi regresyon doğrusu ile ifade edildiğinde Tablo 2'de sunulan katsayılar elde edilmiştir ($y = a_0 + a_1 * x$). Yapılan hesaplamada $a_0=0$ olarak bulunduğu için tabloda yer almamaktadır.

Tablo 2. Regresyon katsayıları

Katsayılar (a_1)	σ_X (m)	σ_Y (m)	σ_Z (m)
$a_{\sigma_{X_0, Y_0}}$ (m)	0.868	0.868	0.868
$a_{\sigma_{Z_0}}$ (m)	0.012	0.012	0.012
$a_{\sigma_{\omega, \phi, \kappa}}$ (m/deg)	25.601	25.601	25.601
$a_{\sigma_{x_0, y_0}}$ (m/mikron)	17.98	17.98	17.98
a_{σ_f} (m/mm)	12.146	12.146	12.146
$a_{\sigma_{x, y}}$ (m/mm)	17.98	17.98	17.98

Tablo 2'de belirlenen katsayılar bu çalışmada kullanılan stereo çiftine ait yöneltilme parametrelerine aittir. Yöneltilme parametreleri değiştiğinde katsayılar da değişiklik gösterecektir.

Söz konusu proje içinde 20 adet YKN dengeleme sonucunda hesaplanan düzeltmeler (r) ile YKN görüntü noktalarına ait hata hesapları (σ) karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar Tablo 3. ve Şekil 6'da sunulmuştur. (σ hata yayılması ile hesaplanan değer, r ise dengeleme sonucunda elde edilen değeri temsil etmektedir.)



Şekil 6. Hesapsal Yöntem ve Dengeleme Sonuçlarının Karşılaştırması

Tablo 3. Hesapsal Yöntem ve Dengeleme Sonuçlarının Karşılaştırması

YKN Nu	10cm YÖA			
	σ_{XY} (m)	rXY	σ_Z (m)	rZ
1	0.07	0.026	0.136	0.247
2	0.047	0.044	0.089	0.085
3	0.025	0.012	0.086	0.040
4	0.023	0.084	0.083	0.031
5	0.045	0.055	0.087	0.140
7	0.037	0.028	0.052	0.011
8	0.064	0.013	0.095	0.090
9	0.021	0.017	0.042	0.002
10	0.016	0.015	0.084	0.047
11	0.048	0.078	0.084	0.104
13	0.024	0.022	0.081	0.065
14	0.088	0.015	0.098	0.195
15	0.023	0.022	0.084	0.109
16	0.029	0.030	0.082	0.146
17	0.043	0.046	0.085	0.050
18	0.088	0.043	0.102	0.126
19	0.04	0.035	0.087	0.086
20	0.039	0.052	0.082	0.061

Şekil 6 ve Tablo 3 incelendiğinde, hesapla bulunan duyarlılıkların dengeleme sonucunda elde edilen değerlerle yakın olduğu ve gerçek durumu yansıttığı görülmektedir.

5. SONUÇ

GPS/IMU verilerini fotogrametrik çalışmalarda kullanmak, maliyet ve hız açısından oldukça ekonomiktir. GPS ve IMU ölçümlerinin içerdiği hatalar özellikle doğrudan kullanılacaksa

yöneltilme sonrasında elde edilecek konum doğruluğunu da etkilemektedir. Bununla birlikte GPS/IMU'nun doğrudan kullanıldığı durumlarda elde edilen konum doğruluğunun YKN olmadığı için test edilememesi halen bir problem olarak bulunmaktadır. Ancak konum duyarlılığı, hata yayılma yasası çerçevesinde ele alınarak belirlenebilmektedir. "Kiracı vd., 2016" çalışmasında doğrudan yöneltilme parametreleri test edilmiş ve sonuçlar 4 adet YKN noktasında karşılaştırılmış ve belirlenen değerlerin gerçeğe yakın olduğu belirtilmiştir. Bu çalışmada söz konusu duyarlılık hesabı dengelenmiş parametreler kullanılarak, hesapsal olarak konum duyarlılığı incelenmiş ve 10 cm YÖA görüntü çiftlerinde yatay ve düşey konum bileşenleri hesaplanmıştır. Gerçekleştirilen testte dengelenmiş yöneltilme parametreleri kullanılmış ve 20 adet YKN'da yine dengeleme sonucunda elde edilen konum hataları ile karşılaştırılmıştır. Burada yapılan çalışma ve bulunan sonuçlar belirtilen yöneltilme parametre değerleri ve duyarlılıklar için geçerlidir. Bulunan sonuçlar aynı duyarlılıkların geçerli olacağı projeler için genellenebilecek olsa da yöneltilme parametrelerinin kendisi de bu hesapta yer aldığından her proje için ayrı hesap yapılması gerekmektedir. Bunun yanında bulunan sonuçlar hesapsal olarak beklenen konum duyarlılığını temsil etmekte ve bilinmeyen hata kaynaklarını içermemektedir. Bu çalışmada, tüm parametrelerin birbirinden bağımsız olduğu kabul edilmiştir. Parametreler arasındaki korelasyonun ayrı bir çalışmada incelenmesinin, hata modeline dahil edilebilecek parametrelerin (yazılım/donanım, yazılımın ölçme duyarlılığı, monitör çözünürlüğü ve frekansı, vb.) araştırılmasının faydalı olacağı düşünülmektedir. "Kiracı vd., 2016" ve bu çalışma ile elde edilen değerlerin, hata yayılması ile yapılan duyarlılık analizinin gerçeği yansıttığı, hem doğrudan yöneltilme hem de dengelenmiş yöneltilme parametreleri için kullanılabilir olduğu değerlendirilmektedir.

KAYNAKLAR

- American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (2004), **Manual of Photogrammetry Fifth Edition**.
- Burman, H., (2002), **Image Orientation By GPS And IMU**, Department Of Geodesy And Photogrammetry, The Royal IMUtitute Of Technology, Stockholm, Sweden, Commission III, Working Group 1 (2002)

- Chiang, K., Duong, T. T., Liao, J., (2011), **The Performance Analysis of a Real-Time Integrated IMU/GPS Vehicle Navigation System with Abnormal GPS Measurement Elimination.**
- Derenyi, E. E., (1996), **Photogrammetry: The Concepts.**
- Ellum, C., El-Sheimy, N., (2005), **The Common Adjustment of GPS and Photogrammetric Measurements,** From Pharaohs to Geoinformatics FIG Working Week 2005 and GSDI-8.
- Ellum, C., (2012), **Integration Of Raw Gps Measurements Into A Bundle Adjustment,** Mobile Multi-sensor Systems Research Group, Department of Geomatics Engineering, University of Calgary, Calgary, AB, Canada.
- Fournier, H., Ms.Thesis July (2009), **Automated Processing of GPS/MEMS-IMU Data for Position, Velocity and Attitude Determination**
- Grewal, M. S., Weill, L. R., Andrews, A. P., (2007), **Global Positioning Systems, Inertial Navigation and Integration,** 2nd Edition, Wiley
- Honkavaara, E., (2004), **In-Flight Camera Calibration For Direct Georeferencing,** Finnish Geodetic IMUtitute, Department of Remote Sensing and Photogrammetry, Finland.
- Kim, Y. S., Lee, Dong Min Hong, Soon, H., Chung, C., Sik, L., Kang, W., (2008), **Coastline Change Analysis Using RTK-GPS And Aerial Photo, The International Archives of the Photogrammetry,** Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXVII. Part B8.
- Kiraci, A. C., Toz, F. G., (2016), **Theoretical Analysis Of Positional Uncertainty In Direct Georeferencing,** 2016 XXIII ISPRS Congress, 12–19 July 2016, Prague, Czech Republic
- Koch, K. R., (1987), **Parameter Estimation and Hypothesis Testing in Linear Models,** Berlin: Springer.
- Kruck, E., (2001), **Benefit Of Rigorous Modeling Of GPS In Combined AT/GPS/IMU–Bundle Block Adjustment,** OEEPE Workshop “Integrated Sensor Orientation”.
- Kutoğlu, H., Görmüş, S., **Dengeleme Ders Notları,** http://jeodezi.beun.edu.tr/gormus/files/2013/02/dengeleme_hesab%C4%B1_1_ders_notlar%C4%B1.pdf (08.10.2015)
- Lee, I. S., Ge, L., (2006), **The performance of RTK-GPS for surveying under challenging environmental conditions,** Earth Planets Space, 58, 515–522
- Legat, K., Skaloud, J., Schaer, P., (2013), **Real-Time Processing Of GPS/IMU Data For On-The-Fly Quality Control In Airborne Mobile Mapping.**
- Legat, K., Skaloud, J., Schaer, P., (2006), **Real-time processing of GPS/IMU data for on-the-fly quality control in airborne mobile mapping** ENC-GNSS, Manchester.
- Legat, K., Skaloud, J., (2006), **Reliability of Direct Georeferencing –A Case Study On Practical Problems And Solutions,** Report to EuroSDR Commission 1.
- Legat, K., Skaloud, J., Schaer, P., (2013), **Real-Time Processing Of GPS/IMU Data For On-The-Fly Quality Control In Airborne Mobile Mapping.**
- Mostafa, M. R., Canada (2005), **Precise Airborne GPS Positioning Alternatives for the Aerial Mapping Practice.**
- Schaer, P., Skaloud, J., Tomé, P., (2008), **“Towards In-Flight Quality Assessment Of Airborne Laser Scanning”** XXI ISPRS Congress, Beijing, China, July 3-11.
- Passini, R., Jewell, D., Jacobsen, K., (2002), **An Accuracy Study On A Large Airborne Gps Aero Triangulation Block,** ASPRS Annual Convention Washington.
- Stebler, Y., (2008), **GPS/IMU Integrity in Airborne Mapping,** , Swiss Federal IMUtitute of Technology, Lausanne Geodetic Engineering Laboratory.

Talaya, J., (2000), International Archives Of Photogrammetry And Remote Sensing. Vol. XXXIII, Part B2., **Robust Gps Kinematic Positioning For Direct Georeferencing.**

Tsai, V. J. D., (2006) “**On Gps And Gps-Rtk Assisted Aerotriangulation**” ,ASPRS 2006 Annual Conference, Reno, Nevada.

Wolf, P. R., Dewit, B. A., (2000), **Elements of Photogrammetry with Applications in GIS.**