

FOTOGRAMETRİK NİRENGİ VE GPS/IMU İLE DOĞRUDAN COĞRAFI KONUMLANDIRMA TEST SONUÇLARI

A.C. Kiracı^a, O. Eker^a, L.İşcan^a, A.Akabalı^a

^a Harita Genel Komutanlığı, Fotogrametri Dairesi, Dikimevi Ankara, Türkiye –(alicoskun.kiraci, oktay.eker, levent.iscan, atila.akabali)@hgk.mil.tr

ANAHTAR KELİMELER: Doğrudan Coğrafi Konumlandırma, GPS/IMU, Fotogrametrik Nirengi, Borelight Kalibrasyonu

ÖZET:

Harita Genel Komutanlığında dış yöneltme elemanları fotogrametrik nirengi yöntemi ile, kamera bilgileri, yer kontrol noktalarının arazi ve resim koordinatları, bağlama noktaları kullanılarak ışın demetleri ile blok dengeleme yöntemiyle belirlenmektedir. Kinematik GPS yöntemi ile uçuş sırasında GPS ölçülerinin yapılması ve bu ölçmelerin proses edilmesiyle resim orta nokta koordinatları çok yaklaşık olarak hesap edilerek yer kontrol noktası ihtiyacı önemli ölçüde azaltılmıştır. Bununla birlikte dış yöneltme elemanlarının diğer bilinmeyenleri olan dönüklük açılarının hesaplanabilmesi için bir blok içerisinde en az 4 adet yer kontrol noktasına ihtiyaç duyulmaktadır. Sayısal hava kamerası ile tedarik edilen IMU (Inertial Measurement Unit) ve DGPS (Diferential Global Positioning System)'in birlikte kullanılmasıyla oluşturulan GPS/IMU sistemi kullanılarak, uçuş sırasında gerçekleştirilen ölçümler sonucunda dış yöneltme elemanları doğrudan hesaplanarak elde edilebilmektedir. Dolayısıyla; resimlerin yöneltmesi için gerekli olan iç ve dış yöneltme bilinmeyenlerinin tamamı uçuş sırasında, doğrudan elde edilebilmekte ve yer kontrol noktasına (YKN) teorik olarak ihtiyaç kalmamaktadır. Ancak, bu durumda elde edilen sonuç verilerinin kontrolünün yapılabilmesi veya datum dönüşümünün gerçekleştirilmesi mümkün değildir. GPS/IMU ile doğrudan coğrafi konumlandırma doğruluğu üzerine yapılan araştırmaların sonucu, yer kontrol noktası ihtiyacının yapılacak fotogrametrik çalışmanın amacı ve doğruluk kriterine göre belirlenmesi gerektiği üzerinde yoğunlaşmıştır. Bu kapsamda, Harita Genel Komutanlığı envanterine yeni dahil edilen GPS/IMU destekli sayısal hava kamerası sisteminin doğrudan coğrafi konumlandırma imkân ve yetenekleri ile bu yöntemlerin doğruluklarının araştırılması amacıyla test çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bu makale, gerçekleştirilen test uçuşları sonrasında elde edilen sonuçları ve bu sonuçlara ilişkin görüşleri içermektedir. Yapılan testlerin amacı, doğrudan coğrafi konumlandırma için kullanılan boresight kalibrasyon değerlerinin hesaplanması, ve kamera ile gerçekleştirilecek çalışmalar için çözünürlük (yer örnekleme aralığı), ölçek ve doğruluk kriterlerinin belirlenmesidir. Bu kapsamda Gölbaşı bölgesinde 1:8.000, 1:20.000, 1:50.000, 1:70.000 ölçeklerinde bir test uçuşu gerçekleştirilmiş ve 1:25.000 ölçekli topoğrafik harita üretimi için uygun fotoğraf ölçeği ve yer örnekleme aralığı tespit edilmiştir. Ayrıca, her ölçek için GPS/IMU değerleri ile doğrudan coğrafi konumlandırma yapılmış ve blok dengeleme sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Daha sonra, ilk test uçuşunda elde edilen sonuçlara göre Ankara bölgesinde 1:60.000 ölçeğinde test uçuşu gerçekleştirilmiştir. Test bölgesinde yapılan çalışmaların doğruluğunu belirleyebilmek için 24 adet yer kontrol noktası kullanılmıştır. Öncelikle, GPS/IMU değerleri başlangıç değerleri olarak kullanılmış ve fotogrametrik nirengi işlemleri tam otomatik olarak gerçekleştirilmiştir. GPS/IMU değerleri ile dengeleme sonuçları kullanılarak boresight kalibrasyon değerleri hesaplanmıştır. GPS/IMU değerlerine boresight kalibrasyon değerleri ile düzeltme getirilerek doğrudan coğrafi konumlandırma yapılmıştır. Fotogrametrik nirengi işlemleri farklı sayıda nirengi kullanılarak yapılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda, GPS/IMU 'nun maliyeti önemli ölçüde azalttığı, doğrudan coğrafi konumlandırmanın veya fotogrametrik nirengi yöntemlerinden hangisinin kullanılacağına amaç ve istenen konum doğruluğu göz önünde bulundurularak karar verilmesinin uygun olacağı değerlendirilmiştir.

1. GİRİŞ

Resim yöneltmesi, fotogrametrinin en temel fakat en zaman alan işlemlerinden biridir. Yöneltme işleminin tam ve doğru olarak yapılabilmesi, resimlerin radyometrisine, çözünürlüğüne ve yöneltme parametrelerinin doğruluğuna bağlıdır. Kinematik GPS ve ışın demetleri ile blok dengeleme, ihtiyaç duyulan yer kontrol noktası sayısını önemli ölçüde azaltmıştır. Bu metod için blok köşelerinde birer adet yer kontrol noktası, dış yöneltme parametrelerinin kestirimi için yeterli olmaktadır. Ayrıca bağlama noktaları otomatik olarak belirlenebilmekte ve maliyet azaltılabilmektedir. Ancak günümüzde GPS/IMU sisteminin kullanılmasıyla birlikte resimlerin doğrudan yöneltmesi mümkün olmaktadır. GPS ve IMU değerleri Kalman Filtresi yöntemi ile birleştirilerek resim orta noktası koordinatları ve dönüklük değerleri

iyileştirilebilmektedir. Dış yöneltme parametreleri bilindiğinden, teorik olarak herhangi bir dengeleme işlemine ihtiyaç bulunmamaktadır. Kamerası yerleştirilen IMU'nun eksenlerinin kamera eksenlerine olan paralellığı fiziksel olarak sağlanamamaktadır. Bunun için iki sistemin eksenleri arasındaki dönüklük ve mesafenin boresight kalibrasyonu ile hesaplanması gerekmektedir. Hassas Nokta Konumlama yöntemi ile Kinematik GPS yöntemi için uçuş esnasında yerde yapılan GPS ölçüsüne de teorik olarak ihtiyaç bulunmamaktadır. Bunun yanında GPS/IMU değerleri ışın demetleri ile blok dengelemede başlangıç değerleri olarak kullanıldığında fotogrametrik nirengi işlemleri hızlanmakta ve maliyeti önemli ölçüde azalmaktadır. Bu kapsamda Harita Genel Komutanlığında kullanılmakta olan GPS/IMU destekli UltracamX sayısal hava kamerası ile testler yapılmış ve sonuçlar değerlendirilmiştir.

2. DOĞRUDAN COĞRAFİ KONUMLANDIRMA

Blok dengeleme, her bir resme ait dış yöneltme parametrelerinin belirlenmesi amacı ile yapılmaktadır. Bunun için blok köşelerinde yeterli sayıda nirengilere ihtiyaç duyulmaktadır. Nirengilerden izdüşüm denklemleri ile uzaysal geriden kestirme yapılarak resim orta noktası koordinatları (X_0, Y_0, Z_0) ve dönüklükleri (ω, ϕ, κ) hesaplanmaktadır. Daha sonra dönüklükleri bilinen bindirmeli resim çiftlerinden model oluşturularak arazi koordinatları elde edilmektedir. GPS/IMU'nun kullanılması ile birlikte dış yöneltme parametreleri, dengeleme yapılmaksızın GPS/IMU entegrasyonu ile belirlenmektedir. Dolayısıyla stereo model oluşturmak için gerekli olan dış yöneltme parametreleri doğrudan elde edilebilmektedir. Doğrudan GPS/IMU verileri kullanılarak arazi koordinatlarının elde edilmesi "Doğrudan Coğrafi Konumlandırma" olarak adlandırılmaktadır. Teorik olarak nirengi ihtiyacı ortadan kalkmış olarak görünse de GPS/IMU verilerinin sağladığı geometrik doğruluğun bilinmesi ve hangi projelerde doğrudan coğrafi konumlandırma yapılabileceğinin belirlenmesi gerekmektedir.

2.1 Boresight Kalibrasyonu

IMU ve kamera sensörü arasındaki mesafe, IMU fiziksel olarak kameraya yerleştirilirken ölçülmektedir. Normal koşullarda IMU ve kamera sensörü arasında dönüklük olmaması beklenir. Ancak bunun sağlanması ya da fiziksel olarak ölçülmesi mümkün değildir. Kamera ile IMU arasındaki dönüklük boresight kalibrasyonu ile belirlenir. Boresight hesabı blok dengeleme sonuçları ile GPS/IMU entegrasyonu sonucunda elde edilen sonuçlar arasındaki farklardan ya da blok dengelemeye bilinmeyen olarak eklenerek elde edilmektedir. Bu işlem sonucunda dönüklük açı farkları ($d\omega, d\phi, d\kappa$) ve GPS drift parametreleri (dx, dy, dz) elde edilebilmektedir.

3. HASSAS NOKTA KONUMLANDIRMA

Resim orta nokta koordinatları (X_0, Y_0, Z_0), kinematik GPS yöntemiyle çözümlenmektedir. Kinematik GPS ile çözüm, yerde kurulan bir sabit GPS ile uçakta bulunan GPS'in kinematik diferensiyel çözümü ile gerçekleştirilmektedir. Burada aynı anda iki GPS ölçümü ile uydu yörünge ve saat hatalarının giderilmesi amaçlanmaktadır. Yerde ölçü yapan GPS, ölçü esnasında uyduların yayınladığı efemeris dosyasını otomatik olarak indirmektedir. Diferensiyel çözümde, sabit GPS, uçakta bulunan GPS verileri ve efemeris dosyası kullanılarak baz çözümü yapılmaktadır. Buna alternatif olarak Hassas Nokta Konumlandırması (Precise Point Positioning) da yapılabilmektedir. Bu çözümde konsept daha sonra yayınlanan hassas efemeris verisi kullanılarak resim orta noktalarına ait koordinatların çözülmesidir. Hassas efemeris dosyasında düzeltilmiş uydu koordinatları ve uydu saat hataları yayınlanmaktadır. Böylece teorik olarak oldukça hassas sonuçlar elde edilebilmektedir. PPP çözümünün avantajı, uçuş esnasında yerde GPS ölçüsüne ihtiyaç olmamasıdır.

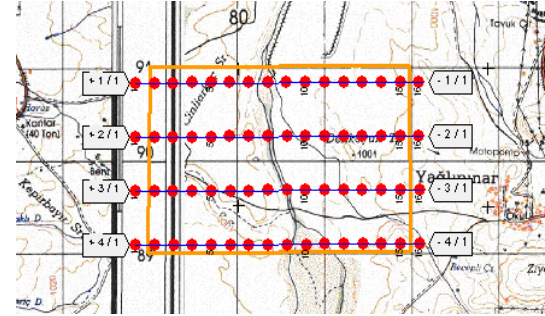
4. GERÇEKLEŞTİRİLEN TEST ÇALIŞMALARI

4.1 1'inci Test Uçuşu

İlk test uçuşu, Ankara Gölbaşı bölgesinde 6 km² lik bir alanı kapsayan bölgede, dört farklı ölçekte (1:8.000, 1:20.000, 1:50.000, 1:70.000) gerçekleştirilmiştir. Harita Genel Komutanlığı revizyon amaçlı, kamu kurum ve kuruluşlarına ve özel şirketlere yapılacak uçuşlarda istenecek olan doğruluk ve çözünürlüğün (yer örnekleme aralığı) ölçekle olan ilişkisini belirlemek amacıyla 4 farklı ölçekte uçuş planlanmıştır (Şekil 1.). Bloğun dengelenmesi ve sonuçların kontrolü için blok köşelerinde Jeodezi Daire Başkanlığı tarafından 4 adet YKN (Yer Kontrol Noktası) inşa edilmiştir.

İlk test uçuşunda elde edilen resimler ve kinematik GPS/IMU değerleri kullanılarak; blok dengeleme, boresight kalibrasyonu ve doğrudan coğrafi konumlandırma yapılmış olup, elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

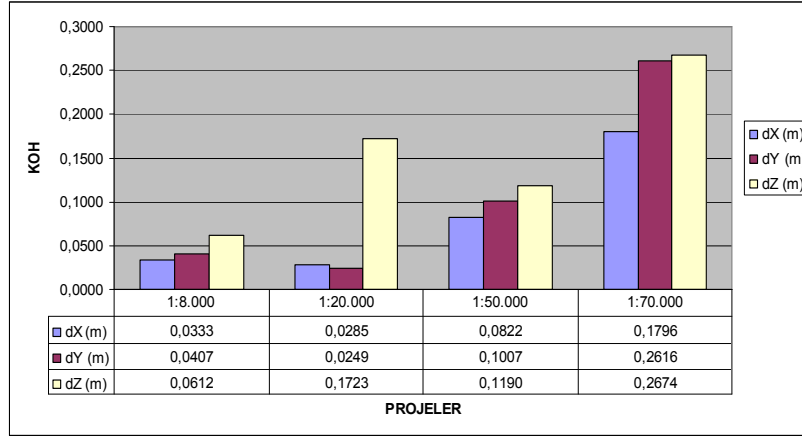
İlk olarak yerde bulunan sabit GPS ve uçaktan alınan GPS verileri GrafNav yazılımı ile işlenmiş (post process) ve kinematik çözümü yapılmıştır. Daha sonra AeroOffice programı ile GPS ve IMU verileri birleştirilmiş ve her resme ait dış yöneltme parametreleri elde edilmiştir. Bu aşamada; sayısal kamera sisteminin tedarik aşamasında yapılan ilk test uçuşlarında elde edilen boresight değerleri kullanılmıştır.



Şekil 1. 1'inci Test Alanı

4.1.1 Blok Dengeleme

GPS/IMU entegrasyonu ile elde edilen yöneltme elemanları, blok dengelemede başlangıç değerleri olarak kullanılmıştır. GPS/IMU verileri ve blok köşelerindeki YKN'ları kullanılarak bağlama noktaları Inpho Match-AT yazılımı ile otomatik olarak elde edilmiş ve blok dengelemesi yapılmıştır. Elde edilen dengeleme sonuçları ile stereo modeller oluşturulmuş ve blok köşelerindeki nirengilerin stereo modeller üzerinde arazi koordinatları ölçülmüş ve jeodezik olarak belirlenmiş koordinatlar ile olan farkları, ortalama hata ve KOH'ları hesaplanmıştır (Şekil 2). Bu işlemler dört farklı ölçek için ayrı projeler oluşturulup hepsi için gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2. Stereo modellerde okunan koordinat farklarının karesel ortalama hataları.

4.1.2 Boresight Kalibrasyonu:

AeroOffice yazılımı ile dengeleme sonucunda elde edilen dış yönelme parametreleri ve GPS/IMU verileri karşılaştırılarak boresight kalibrasyon değerleri belirlenmiştir. Bu işlem sonucunda dönüklük açı farkları ($d\omega$, $d\phi$, $d\kappa$) ve GPS drift parametreleri (dx , dy , dz) elde edilmiştir (Tablo 1).

AEROFFICE BORESIGHT SONUÇLARI						
ÖLÇEK	ROLL (derece)	PITCH (derece)	YAW (derece)	YUKARI DEĞER (m)	SAĞA DEĞER (m)	YÜKSEKLİK (m)
1:8000	0,3752	-0,019	-0,1046	2,4470	0,787	-37,1850
1:20000	0,3873	-0,0148	-0,0848	1,8660	0,712	-37,3210
1:50000	0,3806	-0,0062	-0,0915	-1,7300	0,0570	-37,9580
1:70000	0,4075	-0,0188	-0,1121	-2,3810	-0,8050	-37,3740
TÜM PROJELER	0,3894	0,0060	-0,1124	0,0840	-0,0490	-37,8230

Tablo 1. Boresight Kalibrasyon Sonuçları

4.1.3 Doğrudan Coğrafi Konumlandırma (Direct Georeferencing)

Teorik olarak nirengi ihtiyacı ortadan kalkmış olarak görülmektedir. Ancak GPS/IMU verilerinin sağladığı geometrik doğruluğun bilinmesi ve hangi projelerde doğrudan coğrafi konumlandırma yapılabileceğinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu amaçla GPS/IMU entegrasyonu yapılan verilere, hesaplanan boresight değerleri eklenerek dış yönelme parametreleri elde edilmiştir. Daha sonra bu parametreler ile stereo modeller oluşturulmuş ve blok köşelerindeki yer kontrol noktalarının oluşturulan stereo modeller üzerinde arazi koordinatları ölçülmüş ve jeodezik olarak belirlenmiş koordinatlar ile olan farkları, ortalama hata ve karesel ortalama hataları (KOH) hesaplanmıştır (Şekil 3.).

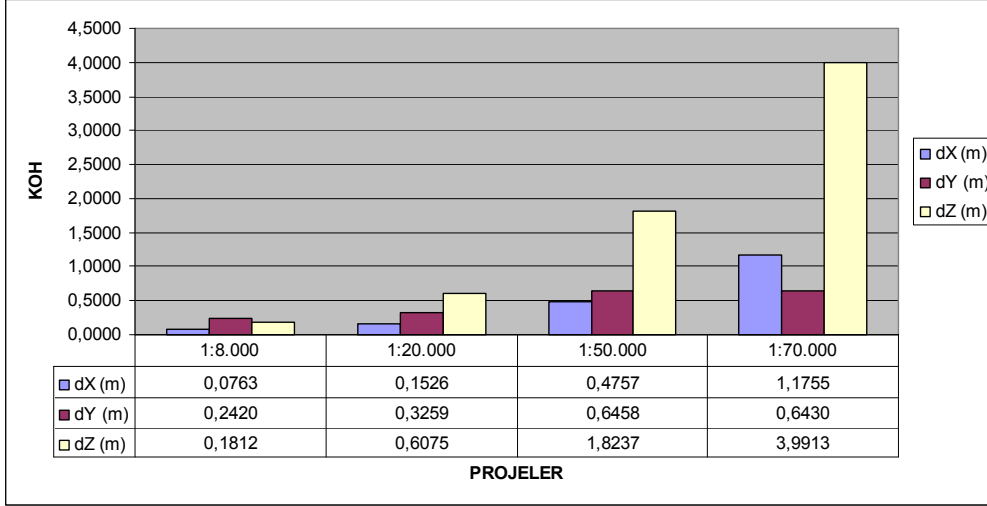
4.2 1'inci Test Uçuşu Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Elde edilen sonuçlar doğrultusunda GPS/IMU değerleri ile doğrudan coğrafi konumlandırma sonuçlarının ortalama hatasının ölçeğe göre yatay bileşende 10 cm ile 1,5 m arasında, dikey bileşende ise 20 cm ile 4 m arasında değiştiği belirlenmiştir. Burada koordinat farkları tek tek incelendiğinde, bazılarının aşırı yüksek olduğu görülmektedir. Bunun sebebi, her ölçekte çekilen resim sayısının farklı olmasıdır. Örneğin 1:8000 ölçekli projede 100 adet resim bulunurken, 1:70000 ölçekli projede 3 adet resim bulunmaktadır. Dolayısıyla 1:70000 ölçekli proje için hesaplanan boresight değerleri gerçeği yansıtmamaktadır. Ayrıca uçuş yüksekliği arttıkça dikey bileşendeki farkların da arttığı gözlenmektedir. Boresight kalibrasyon değerlerinin hesabı ikinci test uçuşunda tekrar yapılmış ve optimum çözüm bulunmuştur.

İlk test uçuşunun bir amacı da çeşitli ölçeklerde harita yapımı için gerçekleştirilen optimum resim ölçeklerinin veya başka bir deyişle yer örnekleme aralığının (ground sample distance-GSD) belirlenmesiydi. Bu kapsamda her bir ölçek için stereo modeller oluşturulmuş detay seçilebilirliği, uçuş yüksekliği ve model sayısı dikkate alınarak revizyon uçuşlarının 1:60.000 ölçeğinde (43 cm yer örnekleme aralığında) yapılmasının uygun olacağı değerlendirilmiştir. Klasik kamera ve sayısal kamera arasındaki ölçek ve yer örnekleme aralığı ilişkisi Tablo 2'de sunulmuştur.

Harita Ölçeği	Analog Fotoğraf Ölçeği	Tarama (mikron)	GSD (cm)	Sayısal Kamera Ölçeği
1:1000	1:4000	15	6	1:10000
1:5000	1:16000	15	25	1:35000
1:25000	1:35000	15	50	1:70000

Tablo 2. Ölçek Yer Örnekleme Aralığı İlişkisi

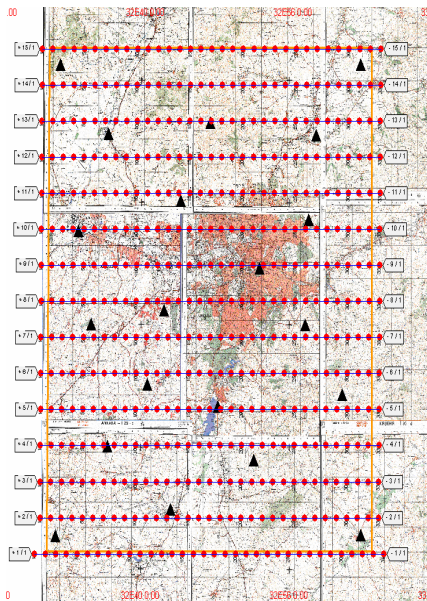


Şekil 3. Stereo modellerde okunan koordinat farklarının karesel ortalama hataları (Doğrudan coğrafi konumlandırma ile).

4.2 2'nci Test Uçuşu

İlk test uçuşu sonucunda 1:25.000 ölçekli topoğrafik harita üretimi için optimum ölçek 1:60.000 (43 cm yer örnekleme aralığı) olarak belirlenmiştir. GPS/IMU kullanılarak doğrudan coğrafi konumlandırmanın geometrik doğruluğunun belirlenmesi ve fotogrametrik nirengi işlemlerinde ne kadar katkı sağlayacağını tespit edilebilmesi için 1:60.000 ölçeğinde bir test uçuşu daha gerçekleştirilmiştir. Test alanı, Ankara'yı kapsayan 3600 km² lik bir bölge olarak seçilmiştir (Şekil 4). Blok köşelerinde birer adet olmak üzere bölgeye homojen olarak dağılmış 20 adet nirengi planlanmış ve Jeodezi Daire Başkanlığı tarafından tesisi sağlanmıştır.

Bu test uçuşu için blok dengeleme, boresight kalibrasyonu ve doğrudan coğrafi konumlandırma yapılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Ayrıca GPS prosesi diferensiyel ve hassas nokta konumlandırma (PPP) olarak gerçekleştirilmiş ve sonuçlar değerlendirilmiştir.



Şekil 4. 2'nci Test Alanı

4.2.1 Doğrudan Coğrafi Konumlandırma

Uçaktan alınan GPS/IMU ve yerde ölçülen GPS verilerinden, öncelikli olarak GPS verileri işlenmiş (post process) ve daha sonra GPS/IMU entegrasyonu gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara ilk test uçuşunda elde edilen boresight düzeltmeleri getirilerek dış yöneltme parametreleri hesaplanmıştır. Bu parametreler ile stereo modeller oluşturulmuş ve kontrol için inşa edilmiş 20 adet YKN'na ait koordinatlar stereo modellerden ölçülmüş, jeodezik olarak belirlenmiş koordinatlar ile olan farkları alınmış, ortalama hataları ve KOH'ları hesaplanmıştır (Tablo 3).

KARESEL ORTALAMA HATA (KOH)			ORTALAMA HATA (OH)		
X (m)	Y (m)	Z (m)	X (m)	Y (m)	Z (m)
1.681	0.855	0.644	1.521	0.693	0.375

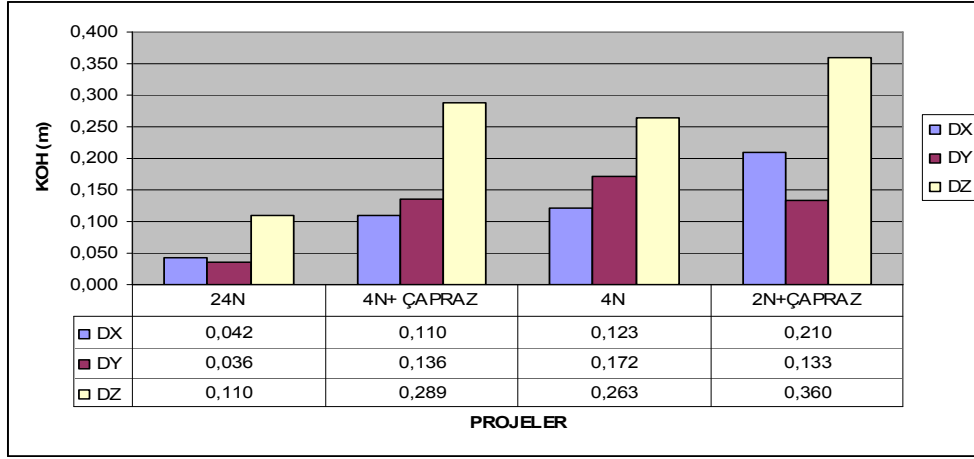
Tablo 3. İlk boresight değerleri ile elde edilen doğrudan coğrafi konumlandırma sonuçları

4.2.2 Blok Dengeleme

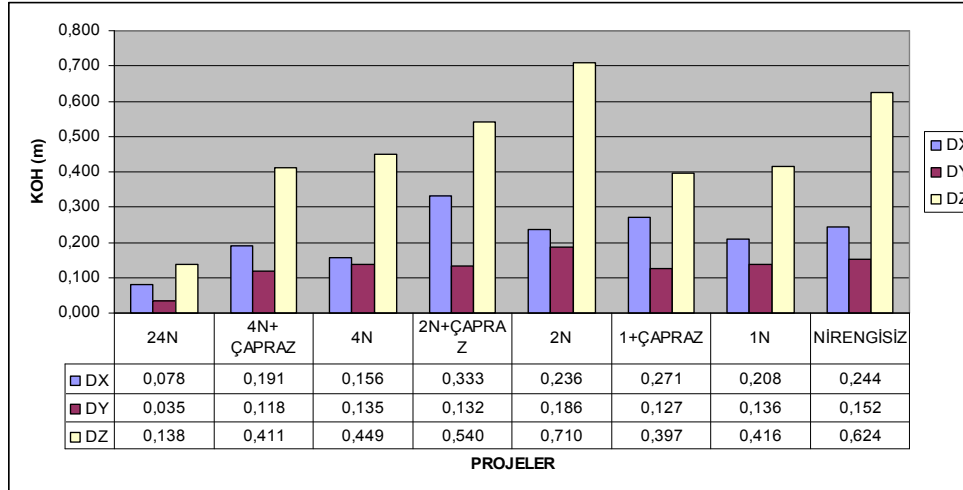
GPS/IMU entegrasyonu ile elde edilen ve boresight düzeltmeleri getirilen parametreler, blok dengelemede başlangıç değerleri olarak kullanılmıştır. GPS/IMU verileri ve blok köşelerindeki YKN'ları kullanarak bağlama noktaları İnpho Match-AT yazılımı ile otomatik olarak elde edilmiştir. Nirengi sayısının ve çapraz kolonların dengeleme sonuçlarına etkisini araştırmak için 8 ayrı blok dengelemesi yapılmıştır (Tablo 4). Ayrıca self kalibrasyonun sonuca etkisini görmek amacıyla kalibrasyonlu ve kalibrasyonsuz olarak bu işlem iki kez yapılmıştır. Az sayıda yer kontrol noktası kullanarak self kalibrasyon yapmanın anlamlı olmayacağı değerlendirilerek 24, 4 ve 2 yer kontrol noktası kullanılarak dengeleme sırasında 20 adet YKN kontrol noktası (check point) olarak programa hesaplatılmış ve jeodezik olarak belirlenmiş koordinatlar ile olan farkları alınmış, ortalama hataları ve KOH'ları hesaplanmıştır (Şekil 5, Şekil 6).

PROJE	YKN	ÇAPRAZ KOLON
24 N	24 ADET	VAR
4 N+ÇAPRAZ	4 ADET	VAR
4 N	4	YOK
2 N+ÇAPRAZ	2	VAR
2 N	2	YOK
1 N+ÇAPRAZ	1	VAR
1 N	1	YOK
NİRENGİSİZ	-	VAR

Tablo 4. Blok Dengeleme Projeleri



Şekil 5. Yer Kontrol Noktalarının ve Çapraz Kolonların Yöneltmeye Etkisi (Self Kalibrasyonlu)



Şekil 6. Yer Kontrol Noktalarının ve Çapraz Kolonların Yöneltmeye Etkisi (Self Kalibrasyonsuz)

4.2.3 Boresight Kalibrasyonu

İlk test uçuşunda yapılan boresight kalibrasyonunun kontrolü ve güvenilirliğinin tespiti için proje alanında küçük bir bölgede 4 YKN'ni kapsayacak bir alanda boresight parametreleri belirlenmiştir. Boresight kalibrasyonu, 4 YKN ile dengeleme sonucunda elde edilen dış yöneltme parametreleri ve GPS/IMU entegrasyonu ile elde edilen parametreler kullanılarak yapılmıştır. Elde edilen boresight parametreleri Tablo 5'de sunulmuştur. Daha sonra bu sonuçlar kullanılarak elde edilen düzeltilmiş değerler ile stereo modeller oluşturulmuş ve kontrol için inşa edilmiş 20 adet YKN'nin koordinatları okunmuş, jeodezik olarak belirlenmiş koordinatlar ile olan farkları, ortalama hataları ve KOH'ları hesaplanmıştır (Tablo 6).

AEROOFFICE BORESIGHT SONUÇLARI						
ÖLÇEK	ROLL (derece)	PITCH (derece)	YAW (derece)	YUKARI DEĞER (m)	SAĞA DEĞER (m)	YÜKS. (m)
1:60.000	0.3874	-0.0352	-0.1155	-0.03	-0.014	-37.329

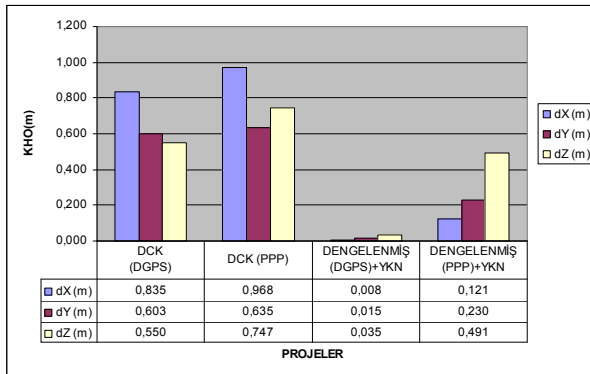
Tablo.5 (Boresight Kalibrasyon Sonuçları)

KARESEL ORTALAMA HATA (KOH)			ORTALAMA HATA (OH)		
X (m)	Y (m)	Z (m)	X (m)	Y (m)	Z (m)
0.835	0.603	0.550	0.699	0.426	0.412

Tablo.6 Yeni boresight değerleri ile Doğrudan Coğrafi Konumlandırma.

4.2.4 GPS verilerinin PPP ile Çözümü:

Hassas Nokta Konumlandırma çözümünün doğruluğu ve kullanılabilirliğinin tespiti amacıyla, projeye ait uçak GPS verileri ve hassas efemeris verileri kullanılarak PPP çözümü yapılmıştır. Elde edilen GPS verileri ile GPS/IMU entegrasyonu yapılmış ve boresight düzeltmeleri getirilmiştir. Elde edilen veriler için hem blok dengeleme hem de doğrudan coğrafi konumlandırma yapılmış ve ikisi için de stereo modeller oluşturulmuş ve kontrol için inşa edilmiş 20 adet nirengiye modellerde yansılarak koordinatlar okunmuş, jeodezik olarak belirlenmiş koordinatlar ile olan farkları, ortalama hataları ve KOH'ları hesaplanmıştır. (Şekil 7).



Şekil 7. Doğrudan Coğrafi Konumlandırma ve Blok Dengeleme ile Ölçülen Koordinat Farklarının Karesel Ortalama Hataları Karşılaştırması.

4.3 2'nci Test Uçuşunun Değerlendirmesi

İlk test uçuşunda belirlenen boresight kalibrasyon değerleri ikinci test projesinde denenmiş ve doğrudan coğrafi konumlandırma için ortalama hatanın yatayda 1,5 m düşeyde ise 50 cm nin altında olduğu belirlenmiştir. Yeniden hesaplanan boresight değerleri kullanıldığında ise doğrudan coğrafi konumlandırma ortalama hatası yatayda 70 cm ve düşeyde 41 cm nin altında olduğu belirlenmiştir. PPP çözümü ile yapılan doğrudan coğrafi konumlandırma ve fotogrametrik nirengi çözümlerinin de oldukça hassas sonuçlar verdiği gözlenmiştir.

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Yapılan ilk test uçuşunda 1:25.000 ölçekli topoğrafik haritaların revizyon uçuşlarının 1:60.000 ölçeğinde (43 cm yer örnekleme aralığı) olmasının uygun olacağı değerlendirilmiş ve ikinci test uçuşu bu ölçekte gerçekleştirilmiştir. Boresight kalibrasyon değerleri belirlenmiş ve doğrudan coğrafi konumlandırma sonuçları incelenmiştir. Boresight kalibrasyonu yapılan projede doğrudan coğrafi konumlandırma sonuçları oldukça hassas iken, farklı projelerde kullanıldığında farklılık göstermektedir. Bu yüzden revizyon amaçlı projelerde doğrudan coğrafi konumlandırmanın uygun olmayacağı ancak sayısal ortofoto sunum sistemi için yapılacak uçuşlarda doğrudan coğrafi konumlandırma kullanılabileceği değerlendirilmektedir. Böylece ortofoto yapımı için yapılacak uçuşlarda istenen konum doğruluğu da göz önüne alınarak, yer kontrol noktasına ihtiyaç duyulmayacaktır. Ancak revizyon uçuşları için yer kontrol noktasından vazgeçmek mümkün değildir. Revizyon uçuşlarının önemi ve alan olarak büyüklüğü göz önüne alındığında, kontrol açısından blok köşelerinde yer kontrol noktasına ihtiyaç duyulmaktadır. Ancak daha önce kullanılan çapraz kolonlar, GPS/IMU'nun kullanılması ile birlikte çözüme sağladığı katkının bu ölçek için ihmal edilebilir olduğu gözlenmiştir. Dolayısıyla bu sonuçlar ışığında çapraz kolon kullanılmasına gerek kalmadığı değerlendirilmektedir. Özellikle büyük göllerin ve ormanlık alanların uçuş planlaması ve fotogrametrik nirengi işlemlerinde oldukça fayda sağlayacağı ve maliyeti azaltacağı değerlendirilmektedir.

PPP çözüm doğruluğunun 1:25.000 ölçekli topoğrafik harita üretimi için hassas olduğu, ancak kontrollü olması için diferensiyel çözümün uygun olacağı değerlendirilmiştir. Yapılan test çalışmalarında fotogrametrik nirengi işlemleri esnasında bağlama noktaları GPS/IMU değerleri girilerek otomatik olarak belirlenmiştir ve elde edilen sonuçlar doğrultusunda fotogrametrik nirengi işlemlerinin otomatik yapılmasının uygun olacağı değerlendirilmiştir. Daha önce bağlama noktalarının belirlenmesi işlemi iki hafta süren bir projenin GPS/IMU değerleri ile otomatik olarak iki günde belirlendiği göz önüne alınırsa zaman/maliyet açısından oldukça fayda sağladığı değerlendirilmektedir.

Self kalibrasyon, yöneltmede modellenemeyen parametrelerin hataların (odak uzaklığı, distorsiyon hataları vb.) dengeleme sırasında hesaplanarak düzeltmelerin sonuca yansıtılması işlemidir. İkinci test uçuşu için yapılan self-kalibrasyonlu ve self-kalibrasyonsuz dengeleme sonuçları incelendiğinde self

kalibrasyonunun konum doğruluğunu arttırdığı gözlenmektedir.

Harita Genel Komutanlığının diğer kamu kurumlarına ve özel şirketlere yapacağı uçuşlarda, doğrudan coğrafi konumlandırma ve fotogrametrik nirengi yöntemlerinden hangisinin kullanılacağı, projenin amacı ve istenen konum doğruluğu göz önüne alınarak belirlenmesinin uygun olacağı değerlendirilmektedir.

Kaynakça:

Cramer M. *“Performance of GPS/Inertial Solutions in Photogrammetry”* Photogrammetric Week, Heidelberg 2000.

Cramer M. and Stallmann D. *“System Calibration For Direct Georeferencing”* Stuttgart/Germany, 2002.

Heipke C., Jacobsen K., Wegmann H. Andersen Q., Nilsen B. *“Test Goals And Test Set Up For The Oeepe Test (Integrated Sensor Orientation)”* Hannover 2002.

Jacobsen K. *“Calibration Aspects In Direct Georeferencing Of Frame Imagery”*, Pecora 15/Land Satellite Information Iv/Isprs Commission I/Fieos Conference Proceedings, 2002.

Legat K., Skaloud J. *“Reliability of Direct Georeferencing –A Case Study On Practical Problems And Solutions”*, Report to EuroSDR Commission 1, 2006

Toth C., *“Experiences With Frame CCD Arrays And Direct Georeferencing”*, Photogrammetric Week Heidelberg, 1999.