

YER GÖZLEM UYDULARINDA PARAMETRİK MODEL KULLANARAK COĞRAFI KONUM TAHMİNİ YAPILMASI

Almila KAHVECİ¹

Türk Havacılık ve Uzay Sanayii, Ankara

Okan DEMİREL²

Türk Havacılık ve Uzay Sanayii, Ankara

ÖZET

Bu çalışmada, bir elektro-optik yer gözlem uydusunun, uydu harici konum ve algılayıcı geometrik yerleşim bilgileri kullanılarak çekilen görüntünün coğrafi konumlanmasının yapılması amaçlanmıştır. Çalışmanın ilk fazında Sayısal Yükseklik Modeli (SYM) kullanmadan, WGS84'e göre tanımlanmış elipsoit ile kesişim koordinatları bulunacaktır. Açık kaynak kodlu yazılım kütüphaneleri kullanılarak geliştirilecek yer konumlama yazılımı, SPOT-5 uydusunun örnek bir görüntüsüyle test edilecektir. Öte yandan, birçok ticari ve açık kaynaklı GIS (Geographical Information System) yazılımlarında yer konumlama eklentileri bulunsa bile, özellikle bağımsız bir yazılım geliştirilerek hem uydu ve görev yükü tasarımı hem de yer istasyonu görüntü işleme birimi geliştirme çalışmalarında kullanılması hedeflenmiştir. Aynı şekilde, geliştirilecek yazılımın, konuyla ilgili çalışacak ve farklı disiplinlerden gelen uzmanların eğitimleri için kullanılabileceği öngörülmektedir.

GİRİŞ

Günümüzde 30 cm yer örnekleme mesafesine sahip uydu görüntülerinin kullanılmaya başlanması sonucunda, yer konumlama doğruluğu beklentileri de artmıştır. Bu nedenle geometrik düzeltme ve yer konumla işlemi daha önemli hale gelmiştir. Teleskop geometrisi ve uydunun yörünge ve yönelim parametrelerini kullanarak görüntü ile yeryüzü arasındaki gerçek geometrik ilişkiyi kullanan parametrik modellerin geliştirilmesi gerekmektedir [TOPAN, 2009]. Gerek akademi ve gerekse de sektörde faaliyet gösteren birçok kuruluş, konuyla ilgili olarak çeşitli yöntemler geliştirmiş olsalar bile, gelişen ihtiyaçlar doğrultusunda yeni çalışmaların yapılması gerekmektedir. Özellikle teleskop geometrisi düzeltme işlemlerinin üretici firmalar tarafından paylaşılmaması ve konunun ticari değeri yüzünden, ilgili alandaki çalışmalar ve bu alanda yetiştirilecek uzman kişiler için takip edilmesi önerilen adımlarda kimi boşluklar bulunduğu gözlenmektedir.

Parametrik model kullanarak yapılan coğrafi konum tahminlerinde, herhangi bir yer kontrol noktası kullanmadan belli bir performans değerinin sağlanması da ayrı bir öneme sahiptir. Bu performans değerinin uydu tasarımından, teleskop test ve ölçüm yöntemlerine, yer istasyonu görüntü işlemeden uydu harici konum parametrelerinin ilgili algoritmalarla iyileştirilmesine kadar birçok disiplinin birlikte çalışmasıyla ortaya çıkan bir performans olduğu da açıktır. Bu yüzden, uydu parametrik modeliyle coğrafi konum tahmini yapabilen bir temel yazılım geliştirme çalışmalarına başlanmış ve yazılımın mümkün olduğunca “kapalı” bir bileşen içermemesi hedeflenmiştir.

¹Stajyer, Uydu Yer Sistemleri Md., E-posta: almila.kahveci@stu.thk.edu.tr

²Müh., Uydu Yer Sistemleri Md., E-posta: okdemirel@tai.com.tr

YÖNTEM

Başlangıç noktası olarak literatür taraması yapılmış, mevcut çözümler incelenmiş ve bir yol haritası belirlenmiştir. Bu doğrultuda, SPOT-5 uydusunun geometri el kitabı referans alınmıştır [RIAZANOFF, 2004].

Bu çalışmada sadece SPOT-5 teleskop geometrisi ve uydu harici yörünge ve yönelim parametreleri olduğu gibi kullanılmış ancak daha detaylı model ve filtrelerin kullanımı için gerekli modüler yapıların oluşturulmasına karar verilmiştir. Yazılım, öncelikle konuyla ilgili uzmanlığın geliştirilmesi açısından mümkün olduğunca sade ve sadece temel yaklaşımları içerir şekilde geliştirilmesi hedeflenmiştir.

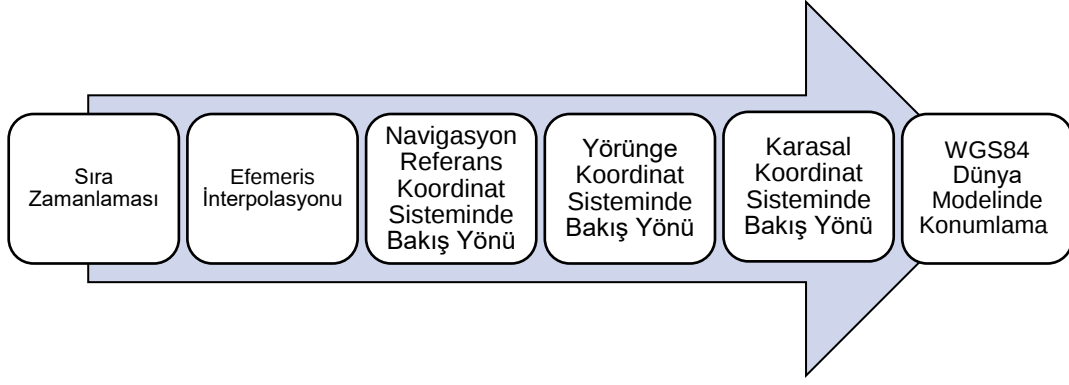
SPOT-5 uydusu nadir bakış açısıyla yörüngede görev yapmaktadır. Nadir izdüşümü dışından görüntü alabilmek için HRG-A (High Resolution Geometry) ve HRG-B PAN teleskoplarında yansıtıcı ayna bulunmaktadır. Bu teleskopların odak düzleminde 12k piksellik tek bir algılayıcı bulunmaktadır ve ortalama irtifada 5 m'lik yer örnekleme mesafesi sağlamaktadır. HRG-A ve HRG-B teleskopları uçuş yönüne paralel olarak 17.5 m ve uçuş yönünde dik olarak 2.5 m farkla dünyaya bakmaktadır. Bu bakış açısı farkı ve uydu üzerindeki ayarlanabilir satır örnekleme saati ayarlama özelliği sayesinde, her iki teleskoptan gelen PAN görüntü, sanki 2.5m'lik ve 24k piksellik tek bir görüntüleyiciden geliyormuş gibi yeniden örneklenebilmektedir. Öte yandan uydu işletmeci firma, yeniden örneklenmiş bu görüntü için test görüntüsü sağlamaktadır. Test görüntüsü, aynı zamanda uydu harici yörünge ve yönelim bilgileriyle birlikte sağlanmaktadır. HRG-A ve HRG-B'de bulunan off-nadir görüntüleme aynalarının nadir'e bakan durumunda çekilmiş bu test görüntüsü parametrik model kullanılarak coğrafi konumlama yazılımı geliştirilmesi için uygun olduğu değerlendirilmiştir.

SPOT-5 uydusunun yörünge bilgisi, her 30 s'de bir çözüm üretebilen DORIS alıcısından sağlanmaktadır. Görüntüleme süresi yaklaşık 9 s'dir. Görüntüleme süresince yörünge bilgisini oluşturmak için görüntüleme öncesi ve sonrası en az 4 noktada yörünge pozisyon ve hız bilgileri sağlanmaktadır. DORIS alıcısının sağladığı doğruluk yüksek olduğu için, elde edilen yörünge pozisyonu ve hızı bilgileri, filtrelenmeden doğrudan kullanılabilir. Görüntüleme sırasında her bir satır için hesaplanması gereken harici yörünge pozisyonu bilgisini oluşturabilmek için sadece ara değer hesabı kullanılmıştır.

SPOT-5 üzerinden bulunan yıldız izler ve jiroskop verileri 8 Hz'lik hızda kaydedilmektedir. Algılayıcıdan gelen ham veriler ve SPOT-5 yörünge yazılımıyla hesaplanmış değerler yine görüntü yardımcı veri dosyasında bulunmaktadır. Hesaplanmış uydu yönelim değerleri, herhangi bir filtreden geçirmeden aynen kullanılacaktır.

HRG-A ve HRG-B PAN teleskoplarının algılayıcıları için, uydu referans eksen takımına göre tüm bakış açıları üretici firma tarafından sağlanmıştır. Bu açılar kullanılarak her bir piksel, ilgili satır örnekleme anındaki uydu harici konum parametrelerine göre WGS84 elipsoidi ile nerede kesiştiği bulunabilir.

Yukarıda belirtilen aşamaları gerçekleştirebilmek için SPOT-5 uydusunun geometri el kitabında yer alan algoritmalar kullanılarak Java dilinde uygulanmıştır. Algoritma şeması aşağıdaki gibidir:



Şema 1: Yol Haritası

UYGULAMALAR

Yöntem kısmındaki şemada belirtilen algoritmalar parametrik model kullanarak coğrafi konum tahmini yapan bir Java yazılımı içerisinde geliştirilmiştir. Kullanılan algoritmalar ve açıklamaları aşağıdaki gibidir:

Sıra Zamanlaması

Görüntünün herhangi bir pikseli (l , p) ile çekim zamanı t arasında bir ilişki belirler.

$$t = t_c + I_{sp} \times (l - l_c) \quad (1)$$

t_c sahne merkez zamanı,

l_c sahne merkez sırası,

I_{sp} hat örnekleme periyodu.

Efemeris İnterpolasyonu

t zamanındaki uydunun $P(t)$ konumunu ve $V(t)$ hızını belirler.

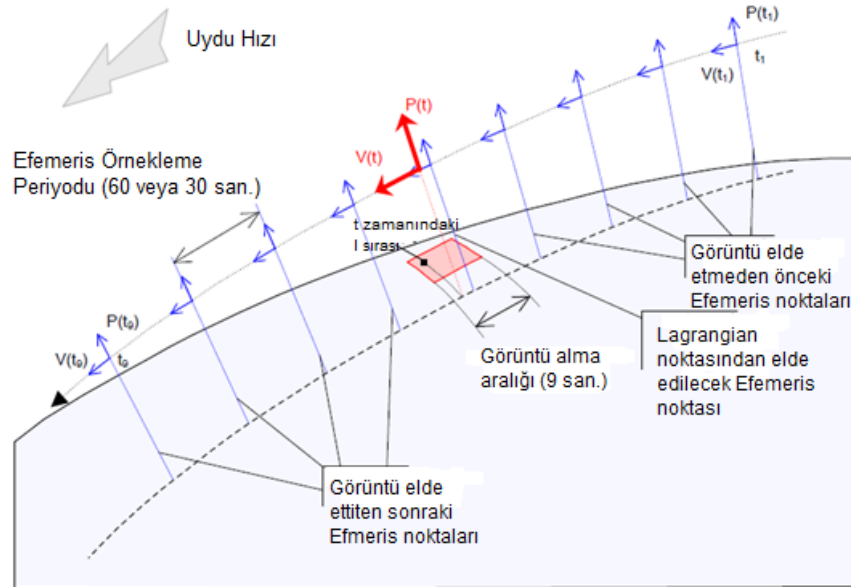
$$\vec{P}(t) = \sum_{j=1}^8 \frac{\vec{P}(t_j) \times \prod_{\substack{i=8 \\ i \neq j}}^8 (t - t_i)}{\prod_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^8 (t_j - t_i)} \quad (2)$$

$$\vec{V}(t) = \sum_{j=1}^8 \frac{\vec{V}(t_j) \times \prod_{\substack{i=8 \\ i \neq j}}^8 (t - t_i)}{\prod_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^8 (t_j - t_i)} \quad (3)$$

$P(t_i)$ uydu pozisyon bileşenleri,

$V(t_i)$ uydu hız bileşenleri.

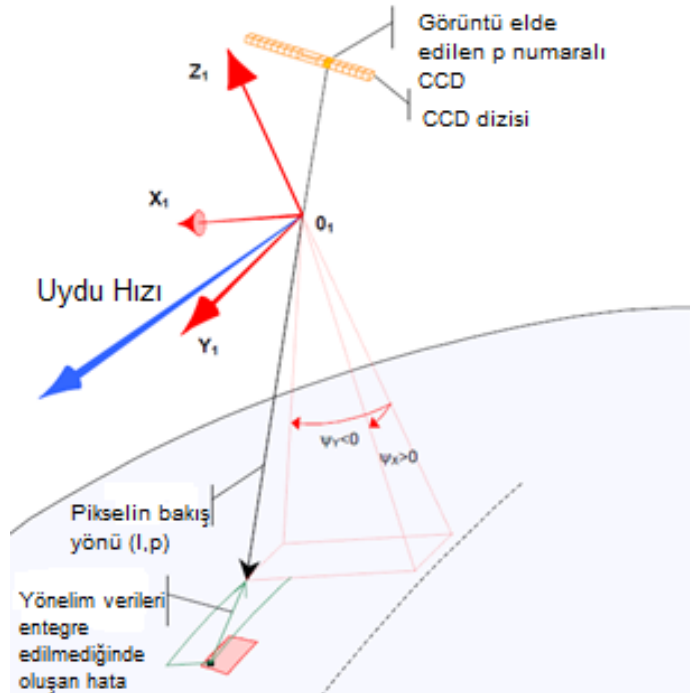
Bu algoritmayı gerçekleştirebilmek için hedeflenen t zamanından önce ve sonra dörder tane zaman alınmaktadır ($t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, t_6, t_7, t_8$). Alınan bu zamanlar görüntü elde edilen zamanı (9 saniye) kapsamamaktadır.



Şekil 1: Efemeris İnterpolasyonu [RIAZANOFF, 2004]

Navigasyon Referans Koordinat Sisteminde Bakış Yönü

Navigasyon Referans Koordinat Sistemi (NRKS), SPOT-5 uydusunun tutum belirleme ve kontrolü için kullanılan sabit gövde çerçeve sistemidir. Uzay aracı koordinat eksenleri, NRK çerçevesinin Yörünge Referans Koordinat Sistemi (YRKS) ile çakışmasını sağlayan yönelim kontrol sistemi (YKS) tarafından tanımlanır. Bu sayede uydu her zaman nadir bakış ile dünyaya bakmaktadır.



Şekil 2: Navigasyon Referans Koordinat Sistemi [RIAZANOFF, 2004]

Şekilde açıkça görüldüğü üzere, hız vektörü ve Y_1 koordinatı birbiriyle kesişmemektedir. Bu hatayı ortadan kaldırmak için veri dosyasında uydu tarafından gönderilen yönelim varyasyonları entegre edilmelidir. Böylece bakış yönü şu şekilde bulunabilmektedir:

Bakış açıları $[(\varphi_x)_i, (\varphi_y)_i]$ veri dosyasında her bir piksel için ($i = 1 \dots N$, $N = 12000$) uydu tarafından gönderilmektedir. Bir HRG-A sensörü 12000 piksele sahip olup HRG-A ve HRG-B sensörleri toplamda 24000 piksele sahiptir.

$$\varphi_X = (\varphi_X)_p \quad (4)$$

$$\varphi_Y = (\varphi_Y)_p \quad (5)$$

p ; Satır sayısını temsil etmektedir ($p = 1 \dots N$),

$(\varphi_X)_p$; p numaralı CCD için uçuş boyunca alınan bakış açısını temsil etmektedir ($p = 1 \dots N$),

$(\varphi_Y)_p$; p numaralı CCD için yol boyunca alınan bakış açısını temsil etmektedir ($p = 1 \dots N$).

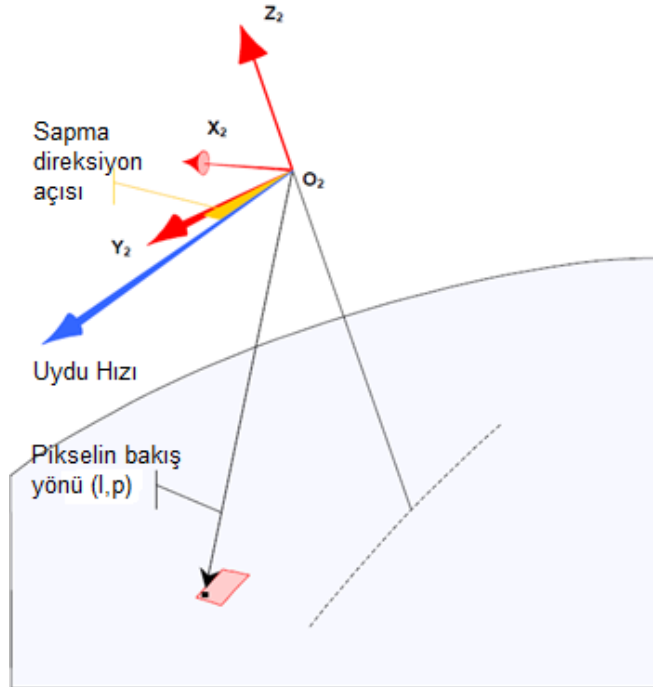
Bakış yönü ise aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır:

$$\vec{u}'_1 = \begin{matrix} -\tan(\varphi_Y) \\ +\tan(\varphi_X) \end{matrix} \quad (6)$$

$$\vec{u}_1 = \frac{\vec{u}'_1}{\|\vec{u}'_1\|} \quad (7)$$

Yörünge Koordinat Sisteminde Bakış Açısı

Yörünge Koordinat Sisteminin kökeni, uzay aracının kütesinin merkezinde yer alır. Z yönü daima Dünya kütle merkezinden uydu kütle merkezine işaret eder. X yönü, sistemin Z ve Y yönünün çapraz elementidir.



Şekil 3: Yörünge Koordinat Sistemi [RIAZANOFF, 2004]

Yönelim Verilerinin İnterpolasyonu:

Yönelim varyasyonları çok küçüktür ve çekim esnasında birçok örnek alınmaktadır. Bu sebeple doğrusal interpolasyon tam bakış anında uygulanabilecek en iyi seçenektir.

$$a_p(t) = a_p(t_i) + \left(a_p(t_{i+1}) - a_p(t_i) \right) \times \frac{t - t_i}{t_{i+1} - t_i} \quad (8)$$

$$a_r(t) = a_r(t_i) + \left(a_r(t_{i+1}) - a_r(t_i) \right) \times \frac{t - t_i}{t_{i+1} - t_i} \quad (9)$$

$$a_y(t) = a_y(t_i) + \left(a_y(t_{i+1}) - a_y(t_i) \right) \times \frac{t - t_i}{t_{i+1} - t_i} \quad (10)$$

i ; t zamanından hemen önceki yönelim değerinin zaman indeksidir ($t_i < t < t_{i+1}$),
 $a_p(t)$; t anında yunuslama eksenini etrafındaki dönüş açısıdır,
 $a_r(t)$; t anında yatış eksenini etrafındaki dönüş açısıdır,
 $a_y(t)$; t anında sapma eksenini etrafındaki dönüş açısıdır,
 $a_p(t_i)$; t_i anında veri dosyasında bulunan yunuslama eksenini etrafındaki dönüş açısıdır,
 $a_r(t_i)$; t_i anında veri dosyasında bulunan yatış eksenini etrafındaki dönüş açısıdır
 $a_y(t_i)$; t_i anında veri dosyasında bulunan sapma eksenini etrafındaki dönüş açısıdır,

Bakış Yönünü Hesaplama:

$$\vec{u}_2 = \frac{\vec{u}_2'}{\|\vec{u}_2'\|} \quad (11)$$

$$\vec{u}_2' = M_p \cdot M_r \cdot M_y \cdot \vec{u}_1 \quad (12)$$

$$M_p = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(a_p(t)) & \sin(a_p(t)) \\ 0 & -\sin(a_p(t)) & \cos(a_p(t)) \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$M_r = \begin{bmatrix} \cos(a_r(t)) & 0 & -\sin(a_r(t)) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(a_r(t)) & 0 & \cos(a_r(t)) \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$M_y = \begin{bmatrix} \cos(a_y(t)) & -\sin(a_y(t)) & 0 \\ \sin(a_y(t)) & \cos(a_y(t)) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

u_1 ; Navigasyon Koordinat Sistemindeki bakış yönüdür,
 $M_p, M_r, and M_y$; dönüş matrislerini temsil etmektedirler.

Karasal Koordinat Sisteminde Bakış Yönü

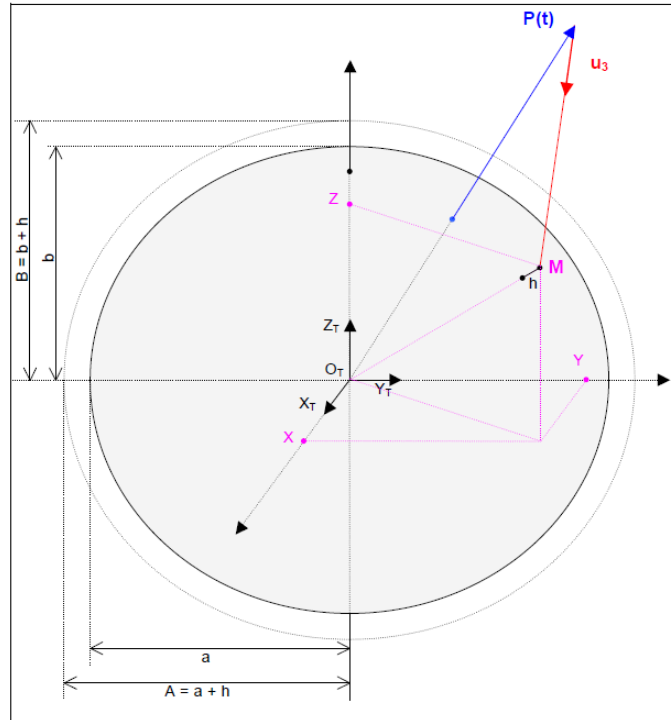
Bu algoritma, Yörünge Koordinat Sisteminden Karasal Koordinat Sistemine dönüşümü temsil eder. $P(t)$ konumu ve $V(t)$ hızı zaten ITRF'de (Uluslararası Karasal Referans Çerçevesi) bulunur, bu nedenle dönüşüm temel bir forma indirgenebilir:

$$\vec{u}_3 = \begin{bmatrix} (X_2)_X & (Y_2)_X & (Z_2)_X \\ (X_2)_Y & (Y_2)_Y & (Z_2)_Y \\ (X_2)_Z & (Y_2)_Z & (Z_2)_Z \end{bmatrix} \cdot \vec{u}_2 \quad (16)$$

u_3 ; Karasal Koordinat Sistemindeki bakış yönüdür,
 u_2 Yörünge Koordinat Sistemindeki bakış yönüdür,
 X_2 ; yunuslama eksenini temsil etmektedir,
 Y_2 ; yatış eksenini temsil etmektedir,
 Z_2 ; sapma eksenini temsil etmektedir.

Dünya Üzerinde Konum

u_3 bakış yönünü hesapladıktan sonra, şimdi kesişimin, standart ITRF elipsoidi olan bir Dünya elipsoidi ile hesaplanması gerekir. h yüksekliği 0 olarak kabul edilir. Bu kısımda, DYM (Dijital Yükseklik Modeli) olmadan coğrafi konumlandırma gerçekleştirilir ve ancak h yüksekliği 0 olarak ayarlanırsa kullanılabilir. Buna ek olarak, WGS84 modeli elipsoidi ITRF elipsoidinden farklıdır. WGS84 modeli, bir metreden daha az bir hata aralığına sahiptir, bu da dünya yüzeyine en yakın model olduğu anlamına gelir.



Şekil 4: Bakış Yönünün Dünya Modeli ile Kesişimi [RIAZANOFF, 2004]

Bulunacak jeodezik koordinatlar olan $M = (X, Y, Z)$ noktası için aşağıdaki iki denklem dikkate alınmalıdır:

$$\overrightarrow{O_3M} = \vec{P}(t) + \mu \times \vec{u}_3 \rightarrow \begin{cases} X = X_P + \mu \times (u_3)_X \\ Y = Y_P + \mu \times (u_3)_Y \\ Z = Z_P + \mu \times (u_3)_Z \end{cases} \quad (17)$$

Ve,

$$\frac{X^2 + Y^2}{A^2} + \frac{Z^2}{B^2} = 1, \begin{cases} A = a + h, \\ B = b + h \end{cases} \quad (18)$$

İkinci dereceden denklemi çözmek için:

$$\left[\frac{(u_3)_X^2 + (u_3)_Y^2}{A^2} + \frac{(u_3)_Z^2}{B^2} \right] \times \mu^2 + \left[\frac{X_P(u_3)_X + Y_P(u_3)_Y}{A^2} + \frac{Z_P(u_3)_Z}{B^2} \right] \times \mu + \left[\frac{X_P^2 + Y_P^2}{A^2} + \frac{Z_P^2}{B^2} \right] = 1 \quad (19)$$

Bu denklemin iki farklı çözümü (μ_1, μ_2) vardır. En küçük değer korunmalıdır. Bulunan değerler Denk. 17'ye yerleştirildiğinde, M noktasının jeosantrik koordinatlarını verir.

Java yazılımı tamamen yukarıdaki algoritmalar ve açık kaynaklı kütüphanelerle gerçekleştirilmiştir. Yörünge mekaniği ve koordinatlar arası geçiş hesaplamalarını uygulayabilmek için düşük seviyeli uzay dinamikleri kütüphanesi olarak tanımlanan Orekit kullanılmıştır. Üretici firma tarafından veri dosyası ile birlikte gönderilen örnek görüntü zaten sahip olunan aynaların nadir'e baktığı anda çekildiği için sensörlerin yanında konumlanan bu aynalar bu çalışmada dikkate alınmamış ve dosyadaki veriler rahatlıkla kullanılmıştır.

Yukarıda belirtilen algoritmaları özgün biçimde Java yazılımına aktardıktan sonra elde ettiğimiz sonuçlar tam olarak veri dosyasında uydu tarafından gönderilen değerler ile örtüşmektedir:

Çizelge 1: Yazılımdan elde edilen enlem bilgisi ile veri dosyasında yer alan değerlerin karşılaştırılması

Sıra Numarası	Piksel Numarası	Enlem (Çıktı)	Enlem (Veri Dosyası)
1	1	41.765629	41.765629
1	24000	41.600993	41.600993
24000	1	41.244229	41.244229
24000	24000	41.080596	41.080596
12001	12001	41.424417	41.424417

Çizelge 2: Yazılımdan elde edilen boylam bilgisi ile veri dosyasında yer alan değerlerin karşılaştırılması

Sıra Numarası	Piksel Numarası	Enlem (Çıktı)	Enlem (Veri Dosyası)
1	1	1.833191	1.833191
1	24000	2.579140	2.579140
24000	1	1.633764	1.633764
24000	24000	2.374067	2.374067
12001	12001	2.100964	2.100964

Çizelgelerde de belirtildiği üzere sonuçlar köşe pikseller ve ortadaki piksel için alınmıştır. Toplamda bir sahne için 24000 satır ve 24000 sütundan oluşan 576000000 sonuç elde edilebilmektedir. Yazılımdan elde edilen sonuç ile veri dosyası aracılığı ile gönderilen değerlerin birbiri ile bu derecede örtüşmesinin temel sebebi Yöntem kısmında da belirtilen ve uydu üzerinde bulunan DORIS cihazıdır.

SONUÇ

Yukarıda elde edilen ilk sonuçlara göre SPOT-5 uydusunun test görüntüsü için belirtilmiş köşe ve orta noktalarındaki enlem ve boylam bilgisi aynı bulunmuştur. Çalışmalar, daha yüksek yer konumlama doğruluğu sağlaması için devam etmektedir. Aynı zamanda ileride yapılacak çalışmalara farklı uydu görüntülerini test etmenin yanında Sayısal Yükseklik Modeli de dahil edilerek enlem ve boylam bilgisine ek olarak yükseklik bilgisine de erişim sağlanacaktır.

Kullanılan yazılım, üzerinde çalışılan uydunun yapısına, dinamiğine ve çalışma prensibine göre geliştirilmektedir. Dolayısı ile yazılım, uyduya göre değişim göstermekte ve uydunun sahip olduğu özelliklerin gereksinimlerini karşılamaya yönelik biçimlenmektedir.

Bu çalışma sadece bir başlangıç noktası oluşturması amacıyla yapılmıştır. Temel amaç sonuçların örtüşüp örtüşmediğini kontrol etmek olmuş ve amaca başarıyla ulaşılmıştır. İlerleyen zamanlarda yine özgün yazılımlarla farklı uydular üzerinde farklı çalışmalar yürütülecektir.

Kaynaklar

- Poli, D. (2005). *Modelling of Spaceborne Linear Array Sensors*. Ph.D. Thesis, ETH, Zurich.
- RIAZANOFF, S. (2004). *Spot 123-4-5 Geometry Handbook*.
- TOPAN, H. (2009). *Geometric Analysis Of High Resolution Space Images Using Parametric Approaches Considering Satellite Orbital Parameters*. Ph.D. Thesis, İTÜ
- Wolf, P. R., Dewitt, B. A., & Wilkinson, B. E. (2014). *Elements of Photogrammetry with Applications in GIS*. New York: McGraw Hill Education.