

## UYDU KAMERALARI İÇİN İLERİ HAREKET TELAFİSİ

Özgür SELİMOĞLU<sup>1</sup>

Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü,  
Mühendislik Fakültesi, Ankara Üniversitesi,  
Gölbaşı/ Ankara

Ümit YILMAZ<sup>2</sup>

Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Ve  
Doğa Bilimleri Fakültesi, Sivas Bilim ve  
Teknoloji Üniversitesi, Merkez/SİVAS

### ÖZET

*Yer gözlem uydularından yüksek çözünürlüklü ve kaliteli görüntü elde etmekte karşılaşılan en büyük zorluklardan birisi, uydunun yörünge hareketine bağlı olarak optik sistem odak düzleminde meydana gelen görüntü hareketidir. Yer gözlem amacı ile alçak dünya yörüngesine konumlandırılan gözlem uyduları, istenilen konumda kalabilmeleri için yörüngelerinde sürekli hareket etmek zorundadırlar. Uyduların yörünge hareketi, optik sistemlerin hareketli bir platform üzerinde görevlerini yerine getirmelerini gerektirmektedir. Bunun sonucu olarak elde edilen yer görüntülerinde kaymalar oluşmakta ve bu da görüntü kalitesini düşürmektedir. İstenilen bölgenin görüntülerinin kısa pozlama süresi içerisinde alınması bu olumsuzlukların önüne geçebilmektedir. Ancak, kısa pozlama sürelerinde görüntünün sinyal/gürültü oranı azalmakta, kontrastı düşmekte, gürültülü ve kalitesiz görüntüler ortaya çıkmaktadır. Odak düzleminde görüntü hareketini engelleyecek veya sınırlandıracak özel telafi teknikleri uygulamayan uydu kameralarının yer örnekleme mesafeleri 2 metrenin altına inememektedir. Uydu yörünge hareketi kaynaklı optik sistem odak düzleminde oluşan görüntü hareketi, İleri Hareket Telafisi yöntemleri ile çözülebilmektedir. Bu özel yöntem, hava aracının veya uyduların ileri yönlü hareketi kaynaklı odak düzlem görüntü hareketlerini sınırlandırarak yüksek kaliteli görüntülerin elde edilmesi mümkün olmaktadır. Çalışmamız kapsamında İleri Hareket Telafisi yöntemi olarak kullanılan TDI sensörlere alternatif olması beklenen mekanik telafi yöntemi olan eğim aynası yönteminin analizleri Zemax Opticstudio programında, Korsch Üç Aynalı Anastigmatik teleskop optik sistem tasarımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Elde edilen veriler incelendiğinde, tasarlanan optik sistemin 50 ark saniyeye kadar kasıtlı olarak eğim hareketine müsaade edebilir olduğu gösterilmiştir. Eğim hareketi için tasarlanacak piezo eyleyiciler ile kontrol edilen mikro mekanik yapının ve görüntüleme sensörünün senkronize çalıştırılması ile uydu kameralarında pozlama süreleri, optik sistemin ışık toplama kapasitesi ve sistem SNR'ı artırılmış olacak ve daha kaliteli yeryüzü görüntüleri elde edilebilecektir.*

*Anahtar kelimeler: ileri hareket telafisi, yüksek çözünürlüklü uydu kameraları, ayna eğim hareketi, SNR, MTF, TDI sensörler*

### GİRİŞ

Yeryüzü görüntüleme amacı ile uzay boşluğuna gönderilen gözlem uyduları özellikle savunma, sivil ve ticari amaçlı uygulamalar için büyük öneme sahiptir. Hızla gelişen teknoloji ile birlikte gözlem uydularının, yer örnekleme mesafelerinin özellikle 1 metrenin altında olması yani çözünürlüklerinin artırılması en önemli tasarım gereksinimlerinden birisidir. Literatürde, uydu kamerası çözünürlüğünün ve uydu kamerasından elde edilen görüntünün kalitesinin artırılmasına yönelik olarak birçok çalışma mevcuttur. Bunlardan birisi, uydu kameraları için kullanılan objektiflerin optik sistem tasarımlarında yapılan değişiklikler ve bunun sonucu elde edilen iyileştirmelerdir. Örneğin, Hubble Uzay

<sup>1</sup> Dr., Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, E-posta: oselimoglu@ankara.edu.tr

<sup>2</sup> Araştırma görevlisi, Makine Mühendisliği Bölümü, E-posta: uyilmaz@sivas.edu.tr

Teleskobu için iki aynalı Cassegrain tipi Ritchey-Chretien (RC) teleskop optik tasarımı kullanılmış iken, son olarak gönderilen James Webb Uzay Teleskobu'nda Üç Aynalı Anastigmatik (İng: Three-Mirror Anastigmat, TMA) optik tasarım tercih edilmiştir.

Optik sistem tasarımları istenilen çözünürlüğe ve statik ortamda yüksek görüntü kalitesine sahip olmaları dahi uyduların yörünge hareketi sonucu meydana gelen uydu ileri yönlü hareketi ile oluşan dinamik etki, istenilen kalitede görüntü alınmasını engelleyen en büyük etmendir (Huang vd. 2006). Yeryüzü görüntüleme amacı ile genellikle alçak dünya yörüngesinde konumlandırılan uydular, yörünge dışına çıkmamaları için yüksek hızlarda hareket (yörünge hareketi) etmek zorundadırlar. Bu yüksek hızlar, uydu kamerası odak düzleminde oluşan görüntünün hızlı bir şekilde akmasına ve bunun sonucu olarak elde edilen görüntülerde bulanıklaşma olmasına sebep olmaktadır. Görüntü bozukluklarını azaltmak için istenilen bölgenin görüntülerinin daha kısa pozlama süreleri kullanılarak alınması gerekmekte ve bu işlem için kamera pozlama süreleri kullanılmaktadır. Fakat kısa pozlama süreleri ile sinyal/gürültü oranı (SNR) azalmakta, kontrastı düşmekte, gürültülü ve kalitesiz görüntüler ortaya çıkmaktadır.

Gözlem uydularında görüntü hareketine neden olan etmenler hava aracının ileri uçuşunun (yörünge hareketi) neden olduğu ileri görüntü hareketi, dünyanın kendi etrafında dönüşü, uydunun yörünge-yönelim (pitch, roll, yaw) belirsizliklerinin neden olduğu görüntü hareketi ve sistemdeki hareketli parçaların oluşturduğu mekanik titreşimlerdir (Yan ve Wang, 2000; Pacey ve Fricker, 2005; Wang vd., 2008; Yan vd., 2008; Chengkang ve Qinghui, 2011). Hava aracının ileri hareketi çok yüksek mertebelere çıktığı için (yere göre yaklaşık  $7 \text{ km/s}$ ), optik sistem odak düzleminde görüntü hareketinin en büyük nedenidir (Huang vd. 2006).

Uydu yörünge hareketi kaynaklı görüntü kaymalarını engellemek amacı ile özel tasarımlar ve çözümler geliştirilmektedir. Bu çözümlerden biri de İleri Hareket Telafisi (FMC) yöntemidir. Yöntemin genel amacı uyduların veya hava araçlarının ileri yönlü hareketinden kaynaklanan odak düzleminde meydana gelen görüntü akmalarının pozlama süresi içerisinde dondurulması ve yüksek kaliteli görüntülerin elde edilmesidir (Zhang vd., 2010). Bu yöntem, uydu yörünge-yönelim belirsizliklerinden ve mekanik titreşimlerden kaynaklanan görüntü bozukluklarını da azaltmak için kullanılabilir.

Havadan görüntüleme sistemleri için yapılan çalışmalarda hava aracının ileri yönlü hareketi sonucu oluşacak odak düzlemindeki görüntü akması İleri Hareket Telafisi (FMC) yöntemleri ile giderilebilmektedir. Bu yöntemler arasında kameranın hava aracı hareket yönünün tersine hareket ettirilmesi (gimbal sistemleri), odak düzleminin hareket ettirilmesi ve TDI sensörünün kullanılması gibi konular bulunmaktadır (Pacey ve Fricker, 2005; Li vd., 2011; Collette vd., 2012). Bu yöntemlere ek olarak optik elemanlara hareket verilmesi yöntemi de ileri hareket telafisi amacı ile kullanılabilir. Optik sistemlerde bulunan optik elemanın bir tanesine hareket verildiğinde (özellikle eğim hareketi) hareket eden bir nesnenin görüntüsünün pozlama süresi içerisinde odak düzleminde dondurulabileceği bilinmektedir (Janschek vd., 2004; Janschek vd., 2005(a); Miller ve Rubinovich, 2007; Jo vd., 2015). CCD kameralar için görüntü hareket telafisi yöntemleri pozlama süresinin kısaltılması, TDI CCD kullanımı, tam çerçeve aktarımı / çerçeve aktarımı CCD telafisi ve opto mekanik (odak düzleminin hareket ettirilmesi veya tarama aynasının döndürülmesi gibi) telafi yöntemleridir (Zilei, 2005). Optik eleman ayna, prizma veya lense hareket verilerek sağlanan yavaşlatma, geniş ve dinamik hız aralığında daha iyi sonuçlar vermektedir. Opto-mekanik olarak yapılan işlemde, çok yüksek hareket hızına sahip bir nesnenin, odak düzlemindeki görüntüsü dondurularak optik sistemin net bir görüntü alması sağlanabilmektedir (Miller ve Rubinovich, 2007). TDI – CCD (Time Delay and Integration Charge-Coupled Devices) düşük aydınlatma koşullarında yüksek hassasiyet ve yüksek çözünürlükte görüntüler elde etmek için zaman gecikmeli entegrasyon teknolojisini kullanan özel bir lineer CCD cihazıdır (Wang vd., 2008). Yörünge hızı kaynaklı görüntünün odak düzleminde akması, TDI sensörler ile de çözülebilmektedir fakat TDI sensörlerin daha büyük piksellere sahip olması ve sisteme ek görüntü bulanıklığı getirmesi gibi birçok dezavantajları da bulunmaktadır. TDI sensörler ile titreşim ve uydunun yönelim hatalarından kaynaklı hareketler giderilememektedir (Janschek ve Tehernykh, 2001; Janschek vd., 2005(b); Janschek vd., 2007).

Walter ve Jörg Schönekeß (2000) mikro uydudaki CCD kameralarda görüntü hareketini kısıtlamak için elektronik TDI ve opto-mekanik telafi (eğim aynası) yöntemlerini araştırmıştır. Kamera objektifi ve CCD detektör arasına yerleştirilen ara optik elemana eğim hareketi sağlanarak hareket telafisi

kazandırılmıştır. Eğim hareketi piezo eyleyici kullanılan mikro mekanik yapılar tasarlanarak gerçekleştirilmiştir. TDI işlemi çoklu veri okuma ve işleme için yüksek işlemci gücü gerektirdiği için mikro uydularda kullanımının uygun olmadığını açıklamışlardır. Shengkai vd. (2011) objektif merceğinin önüne dönen bir ayna kullanarak uydu ve yer arasındaki bağıl hareketin neden olduğu görüntü hareketini telafi etmeye çalışmışlardır. Huang vd. (2009) insansız hava aracına yerleştirilen CMOS sensörüne sahip kamera ile görüntüleme sırasında oluşan görüntü hareketinin telafisi için tarama aynasından faydalanmışlardır.

Janschek ve Tehernykh (2001) ve Janschek vd. (2007) odak düzlemine yerleştirilen 2D matris (alan) görüntü sensörü ve bir optik eşleştirici ile uydu yönelim belirsizliğinden ve titreşimlerden kaynaklanan görüntü hareketini algılamışlardır. Görüntü hareketi bilgisi temelinde, odak düzlemi piezo eyleyiciler yardımı ile hareket ettirilerek görüntünün optik düzlemdeki hareketinin giderilmesi üzerine çalışmalar yapmışlardır. Benzer olarak Chen vd. (2008) odak noktasındaki hareketin tahmin edilmesi ve odak düzleminin piezo elektrik seramik eyleyiciler ile hassas bir şekilde hareket ettirilmesi üzerine çalışmışlardır.

Janschek vd. (2004), Janschek vd. (2005(a)); Janschek vd. (2005(b)) ve Jo vd. (2015) titreşimler ve mikro şokların neden olduğu odak düzlemindeki görüntü hareket düzensizliklerini, uydu fırlatma sırasında veya uzay ortamındaki titreşimler sonucu oluşan optik hizalama bozukluklarını aktif bir şekilde kontrol edilmesi için teleskop ikincil aynasına mekanik olarak eğim hareketi vererek düzeltilmesi üzerine çalışmalar yapmışlardır.

Wang vd. (2008) TDI – CCD hava kamerası ile görüntü alınması sırasında nesne ve optik sistem arasındaki bağıl hareketin neden olduğu problemleri telafi ederek görüntü çözünürlüğünü artırmak için, dijital telafi yöntemini araştırılmışlardır. Tarama aynasının opto mekanik olarak hareket ettirilmesi ile ileri hareket telafisi yöntemi incelenmiştir. Kontrol algoritmasını dijital olarak uygulamak için dijital sinyal işleme çipine dayalı gerçek zamanlı ileri hareket dengeleme sistemi tasarlanmıştır.

Huang vd. (2006) dijital havadan gözlem kamerası için yeni bir görüntü hareket telafisi yöntemi denemişlerdir. Bu yöntemde hava aracının ve yerin bağıl hızı kaynaklı görüntü kaymasını engellemek için KAM mekanizması tasarlanarak CCD sensöre hareket verilmiştir. Hui vd. (2012) yaptıkları benzer bir çalışmada, Alan Taramalı Renkli CCD kamerasına, hava aracının neden olduğu görüntü kaymalarının giderilmesi için sabit çaplı konjuge KAM mekanizması tasarlayarak CCD sensörüne hareket vermişlerdir.

Bu çalışmamızda, Zemax Opticstudio programı kullanılarak, Korsch tipi Üç Aynalı Anastigmat teleskop tasarımı gerçekleştirilmiş ve sistemde bulunan ikincil aynaya ileri hareket telafisi verilmesi sonucunda meydana gelecek görüntü kalitelerindeki değişimler MTF grafikleri, nokta diyagramları ve odak düzleminde meydana gelen görüntü hareketinin miktarı ile analiz edilmiştir.

## YÖNTEM

Görüntü Hareket Telafi teknikleri (Image Motion Compensation, IMC) (İleri Hareket Telafisi, Forward Motion Compensation (FMC) olarak da bilinmektedir), odak düzleminde oluşan görüntü hareketinin pozlama süresince dondurulması için geliştirilmiş yöntemlerdir (Zhang vd., 2010). Görüntü hareket telafi yöntemleri tasarlanırken aşağıdaki konuların dikkate alınması gerekmektedir.

- Telafi mekanizması, kameradaki diğer bileşenlerin çalışmasını ve performansını etkilememelidir.
- Resim kalitesini düşürmemelidir.
- Odak noktasının bozulmamasını sağlamalı, tekrar odaklamaya ihtiyaç oluşturmamalıdır.
- Kamera önüne ekstra engel oluşturmamalı, ışık geçirgenliğini azaltmamalıdır.
- Ek donanım olmaksızın uydu yörünge hareketinin oluşturduğu görüntü hareket hızı aralığında telafi işlemini gerçekleştirebilmelidir.

Uydunun dünya yörüngesindeki konumu yüksek hassasiyetli kontrol sistemleri tarafından takip edilmekte ve uydunun yörünge hızı ve yeryüzünden yüksekliği hesaplanabilmektedir. Uydu kamerasının

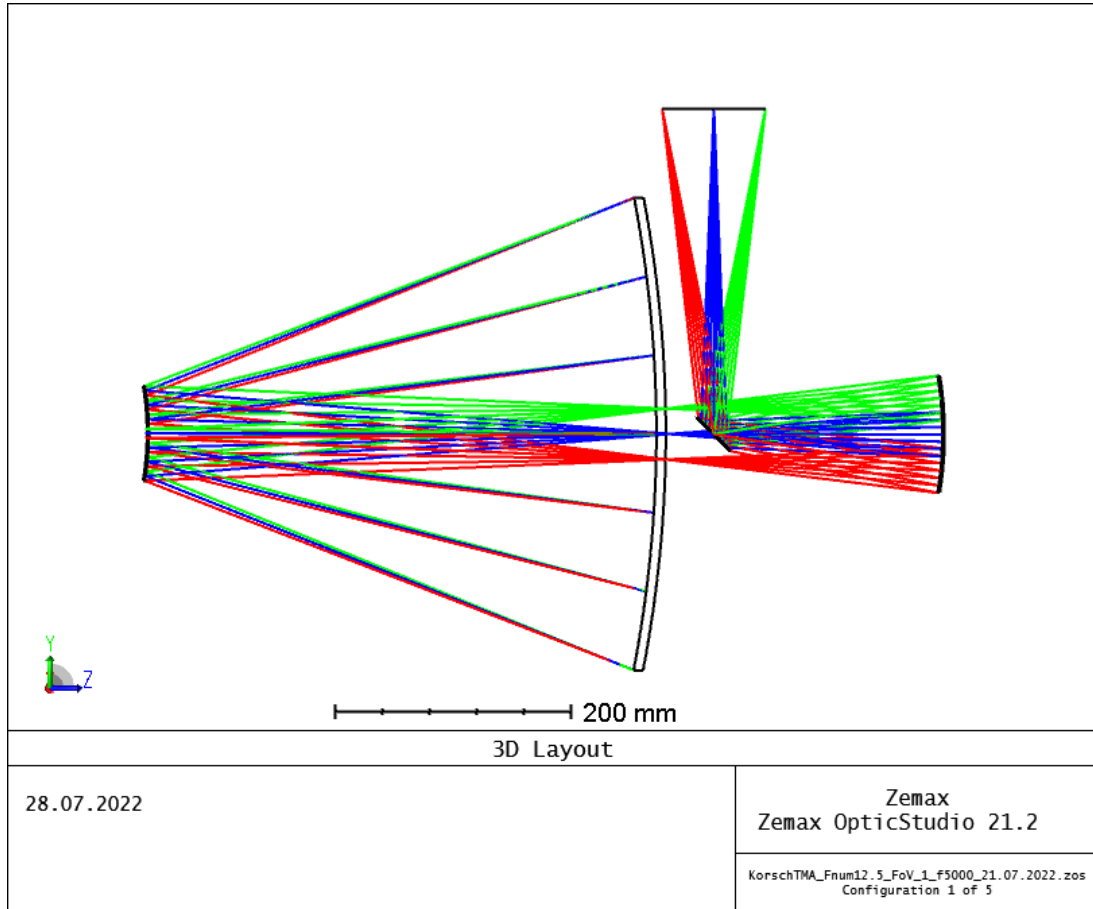
odak uzaklığı ( $f$ ), pozlama süresi ( $t$ ), hızı ( $v$ ) ve yeryüzünden yüksekliği ( $H$ ) bilindiği takdirde; görüntü düzleminde görüntü hareketinin miktarı ( $\delta$ ) nadir bakış durumu için hesaplanabilmektedir (Benyi, 1998; Jun, 1990; Sandau, 2009; Zhang vd., 2010).

$$\delta = \frac{f \cdot v \cdot t}{H} \quad (1)$$

Yeryüzünün topografyasından kaynaklı olarak dünya yüzeyinin yüksekliğinin sürekli değişimi, görüntüleme açısı ve uydu yörüngesinin eliptik özellikleri gerçek bir kamerada karşılaşılabilecek görüntü kayma hızını değiştirmektedir. Aynı zamanda kayma hızı hesaplamasında ( $v$ ), uydunun yörüngedeki hızı ve dünyanın kendi eksenini etrafındaki dönüş hızının bileşimi dikkate alınmalıdır (Jun, 1990).

### Optik Sistem Tasarımı

Bu çalışmada optik sistem tasarımı ve analizleri Zemax OpticStudio programı kullanılarak yapılmıştır. İlk etapta Korsch Üç Aynalı Anastigmatik teleskop optik sistem tasarımı kırınım sınırlı (İng: Diffraction Limited) olacak şekilde optik optimizasyonlar gerçekleştirilmiştir (Şekil 1). Tablo 1’de optik sistem tasarım parametreleri verilmiştir. MTF değerinin düşmemesi için, ikinci aynanın engel oranının mümkün olduğunca düşük tutulması gerekmektedir (Simonetti vd., 2006). Bu amaç ile engel oranı 0.2 olması için gerekli optimizasyonlar yapılmıştır. Aynı zamanda optik sistem uzunluğunun asgari tutulması optimizasyon için diğer bir sınır koşulu olarak kullanılmıştır.



Şekil 1: Uydu kamerası optik sistem tasarımı

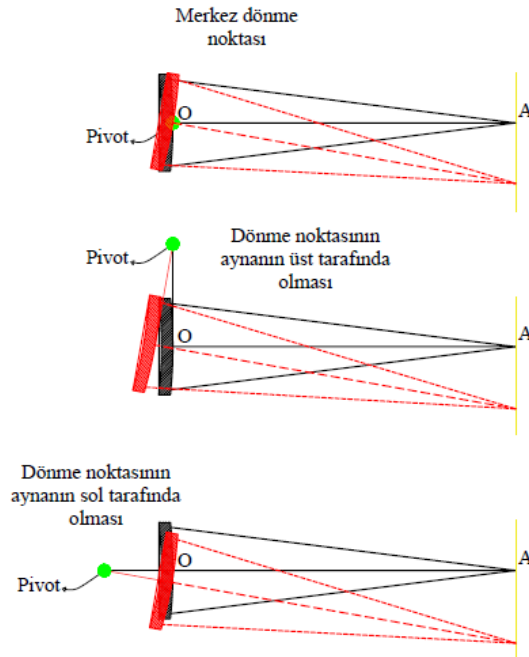
Tablo 1: Korsch Üç Aynalı Anastigmatik teleskop optik sistem tasarım parametreleri

Optik Sistem Odak Uzunluğu, $f$ (mm)	5000
Birincil aynanın çapı, $D_1$ (mm)	400
İkincil aynanın çapı, $D_2$ (mm)	80
Üçüncül aynanın çapı, $D_3$ (mm)	99,16
Optik sistem toplam uzunluk (mm)	754,8
Birincil aynanın eğrilik yarıçapı, $R_1$ (mm)	1049,87
İkincil aynanın eğrilik yarıçapı, $R_2$ (mm)	-239,99
Üçüncül aynanın eğrilik yarıçapı, $R_3$ (mm)	309,71
Birincil ayna ve ikincil ayna arası mesafe, $d_1$ (mm)	430,55
İkincil ayna ve üçüncül ayna arası mesafe, $d_2$ (mm)	673,12
Birincil aynanın konik sabiti	-0,981
İkincil aynanın konik sabiti	-2,184
Üçüncül aynanın konik sabiti	-0,584
Görüş alanı (H-FoV)	$\pm 0,5^\circ$
Piksel boyutu, $P_x$ ( $\mu m$ )	9
Uydunun yer örnekleme mesafesi, $GSD$ (m)	1,08
İkincil aynanın engel oranı, $k$	0,2
Nyquist frekansı, $F_{ny}$ (lp/mm)	55,5

Daha sonrasında optik bileşenlerden ikincil aynaya eğim hareketinin verilmesi için Zemax OpticStudio programında farklı konfigürasyonlar tanımlanarak, sistem kasıtlı olarak eğim hareketine müsaade edebilmesi için gerekli optimizasyonlar yinelenmiştir.

Kırınım sınırında tasarlanan optik sistemimizdeki aynanın dönme noktası, Şekil 2' de gösterilen merkez dönme noktası olacak şekilde analizler gerçekleştirilmiştir. Eğim hareketinin, odak düzleminde meydana getirdiği kayma miktarı, MTF değerlerindeki değişimler ve nokta grafiklerine olan etkileri gibi optik kaliteyi ortaya koyan çıktılar analiz edilmiştir.

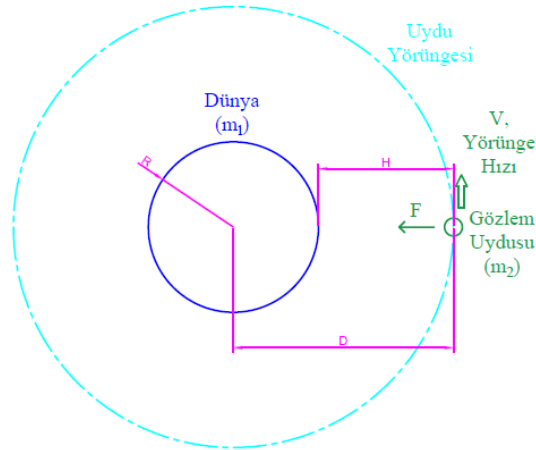
Şekil 2 incelendiğinde, merkez dönme noktasından eğim uygulandığında ayna merkezi değişmez iken, dönme noktası ayna üst kısmında veya ayna sol tarafında iken sistemde merkezden kaçıklık (De-Center) gözlenmektedir. Farklı dönme noktalarının analizleri bu çalışmamızın kapsamında değildir ancak, piezo eyleyiciler ile çalışan mikro mekanik eğim mekanizması tasarlanmadan önce farklı dönme noktalarının analizlerinin yapılmasının hem üretilebilirlik ve maliyet hem de optik sistem görüntü kalitesi açısından önemli olacağı düşünülmektedir.



Şekil 2 Cassegrain teleskobuna ait ikincil ayna için muhtemel dönme noktaları

### Dünya Yörüngesinde Hareket Eden Uyduların Hızlarının Ve Uyduya Etkiyen Kuvvetlerin Belirlenmesi

Newton'un evrensel kütle çekim yasası noktasal bir kütle için diğer noktasal kütleyle, ikisini birleştiren bir çizgi doğrultusundaki bir kuvvet ile çektiğini ifade etmektedir. Dünya yörüngesindeki bir uyduya etki eden kuvvetler Şekil 3'te gösterilmiştir.



Şekil 3: Dünya yörüngesindeki bir uyduya etki eden kuvvetler

$F$ , iki kütle arasındaki çekim kuvvetinin büyüklüğü olmak üzere,

$$F = G \frac{m_1 m_2}{D^2} \quad (2)$$

formülü kullanılarak hesaplanabilmektedir. Burada kullanılan

$G$ : Kütle çekimi sabiti  $6.674 \times 10^{-11} \frac{N \cdot m^2}{kg^2}$

$m_1$ : birinci kütle (Dünya) büyüklüğü,

$m_2$ : ikinci kütle (Uydu) büyüklüğü

$D$ : iki kütle arasındaki mesafe ve

Uydulara etkiyen bir diğerk kuvvet ise merkezci kuvvettir. Merkezci kuvvet,  $F_c$ , dñyanın uyduya uyguladığı çekim kuvvetini dengeleyerek, uydunun yörüngede kalmasını sağlamaktadır. Uyduya etkiyen merkezci kuvvet

$$F_c = m_2 \frac{V^2}{D} \quad (3)$$

formülü kullanılarak hesaplanabilmektedir. Uydunun yörüngede kalabilmesi için oluşan bu iki kuvvetin eşit olması gerekmektedir.

$$F_c = F$$

$$m_2 \frac{V^2}{D} = G \frac{m_1 m_2}{D^2} \quad (4)$$

Bu denklemden uydunun yörünge hızı,  $V$ ;

$$V = \sqrt{\frac{G * m_1}{D}} \quad (5)$$

olarak bulunabilmektedir.

Burada bulmuş olduğumuz hız değeri dñyanın merkezine göre hızı vermektedir. Yeryüzüne göre hızı,  $V_g$ , bulmak için üçgen benzerliği kullanılabilir.  $R$ : dñyanın yarıçapını olmak üzere:

$$\frac{V_g}{V} = \frac{R}{D} \quad (6)$$

Dñyanın kendi eksenini etrafında dönme hızını,  $V_r$  hesaplama için

$$V_r = \frac{2 * \pi * R}{t} \quad (7)$$

formülü kullanılmaktadır. Burada  $t$  dñyanın bir tam tur atması için geçen süre yani 24 saattir.

Uydunun yeryüzüne göre bağıl hızı,  $V_c$ , için yeryüzüne göre hızın  $V_g$ , ve dñyanın kendi eksenini etrafındaki teğet hızı,  $V_r$ , bileşkesini bulmak gerekmektedir.

$$V_c = \sqrt{V_g^2 + V_r^2} \quad (8)$$

**Uydu Yörünge Hareketi Sonucu Oluşan Hız Değerleri:** Bu çalışmada tasarlanan optik sistemin alçak dünya yörüngesinden 600 km yüksekliğe konumlandırılan gözlem uydusunda kullanılacağı varsayılarak ve ilgili denklemler (Denklem 5-8) kullanılarak uydu hızları hesaplanmıştır.

Uydunun yörünge hızı,  $V$ , denklem (5): 7559 m/s

Uydunun yeryüzü üzerindeki projeksiyon hızı,  $V_g$ , denklem (6): 6909 m/s

Dñyanın kendi eksenini etrafındaki dönme hızı,  $V_r$ , denklem (7): 463 m/s

Uydunun yeryüzüne göre bağıl hızı,  $V_c$ , denklem (8): 6925 m/s olarak hesaplanmaktadır.

### **Odak Düzlemde Uydu Yörünge Hareketi Kaynaklı Meydana Gelen Kayma Miktarının Belirlenmesi**

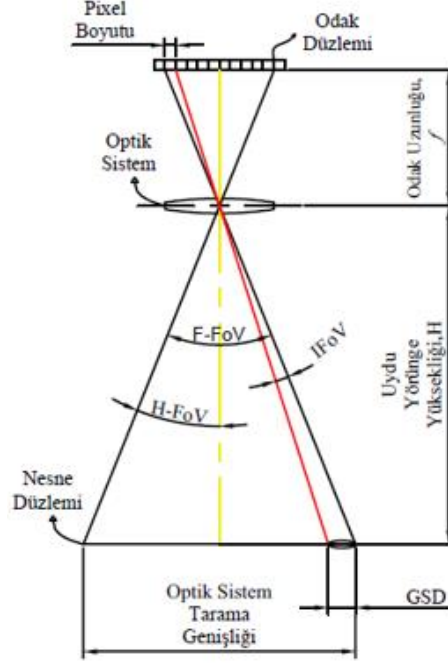
Optik sistemde kullanılması planlanan detektörün piksel boyutunun 9  $\mu m$  olduğu varsayılmıştır. 400 mm optik açıklığa ve 5000 mm odak uzunluğuna sahip görüntüleme sistemi için en küçük spot yarıçap değeri;

$$R_{Airy\ Disk} = 1,22 * \frac{f}{D} * \lambda \quad (9)$$

$$R_{Airy\ Disk} = 1,22 * \frac{5000}{400} * 588 * 10^{-3}$$

$$R_{Airy\ Disk} = 8,96 \mu m$$

olarak hesaplanmaktadır. Detektör piksel boyutunun  $9 \mu m$  olması durumunda tek bir spot 2 piksele karşılık gelmektedir.



Şekil 4: Optik sistemin özellikleri

Cassegrain teleskoplar için optik sistem parametreleri ve genel özellikleri Şekil 4' te gösterilmektedir.

İkincil aynanın engel oranı,

$$k = \frac{D_2}{D_1} = \frac{80}{400} = 0,2 \quad (10)$$

Uydunun yer örnekleme mesafesi,  $GSD$ ,

$$GSD = \frac{H * Px}{f} \quad (11)$$

$$GSD = \frac{600 * 10^3 * 5 * 10^{-6}}{1,370} = 1.08 m$$

Uydunun yeryüzüne göre bağlı hızı,  $V_c$ ,  $6925 m/sn$  olarak bir önceki bölümde hesaplamıştır.  $GSD$  ve  $V_c$ , değerlerini kullanarak bir pikselin ne kadar sürede hareket ettiğini hesaplayabiliriz.

$$Pixel\ kayma\ süresi = \frac{GSD}{V_c} \quad (12)$$

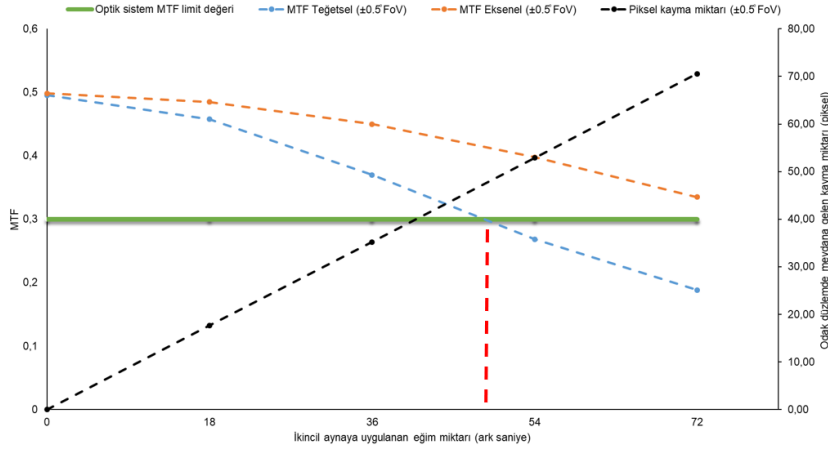
$$Pixel\ kayma\ süresi = \frac{1,08 m}{6925 m/s} = 155,95 \mu s$$

Hesaplamalardan elde edilen verilere göre,  $600 km$  yükseklikte dünya yörüngesinde görev yapan uydu için, optik sistemin odak düzleminde görüntünün bir piksel kayması için  $155,95 \mu s$  zaman geçmekte ve görüntü  $6412 px/sn$  hız ile kayarak odak düzleminde hareket etmektedir.



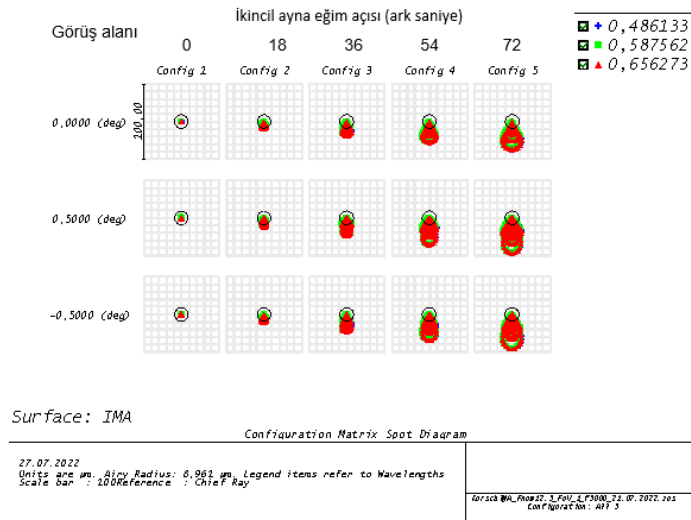
## UYGULAMALAR VE DEĞERLENDİRME

Çalışmamızda, uydu kameralarının odak düzleminde uydu yörünge hareketi kaynaklı meydana gelen görüntü kaymalarının sınırlandırılması amacı ile kullanılan mekanik ileri hareket telafisi yöntemi olan eğim aynası yönteminin optik analizleri yapılmıştır. Bu amaç ile uydu kameraları için sıklıkla kullanılan Korsch Üç Aynalı Anastigmatik teleskop optik sistem tasarımı Zemax OpticStudio programı kullanılarak yapılmıştır. Uydu kamerası için optik açıklık 400 *mm*, odak uzunluğu 5000 *mm* ve görüş alanı  $\pm 0.5^\circ$  olarak belirlenmiştir. Optik sistem görüntü kalitesi için tasarım isterimiz, bir spotun 2 piksel genişliğini doldurması ve MTF değerinin 0.3 ten büyük olması olmuştur. Korsch Üç Aynalı Anastigmatik teleskop optik sisteminde bulunan ikincil aynaya farklı açı değerlerinde uygulanan eğim hareketinin görüntü kalitesi üzerinde ne gibi değişimler meydana getirdiği simülasyon ortamında test edilmiştir.



Şekil 5: Korsch Üç Aynalı Anastigmatik teleskop optik sisteminde yer alan ikincil aynaya farklı miktarlarda eğim hareketi verildiğinde odak düzleminde meydana gelen görüntü hareketi ve MTF değerlerinde meydana gelen değişimlerin karşılaştırılması

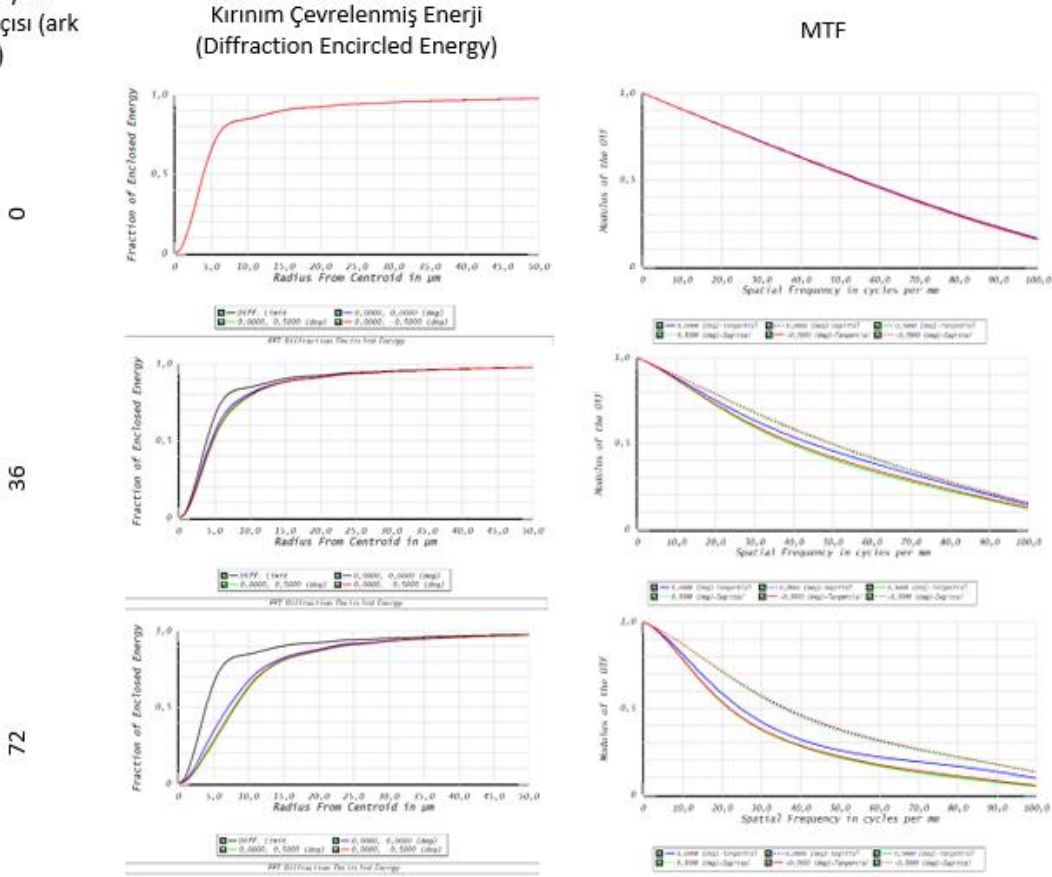
Şekil 5 incelendiğinde, optik sistemimizde yer alan ikincil aynanın 50 ark saniyeye kadar kasıtlı olarak eğim hareketine müsaade edebilir seviyede olduğu görülmektedir. Bu eğim açısına kadar olan bölümde, görüntü kalitesi değerlendirmenin en önemli ölçütü olan MTF değerleri incelendiğinde, görüntü kalitesinin hala istenilen düzey olan 0.3'ün üzerinde kaldığı görülmektedir. İkincil aynaya 50 ark saniye eğim hareketi uygulandığında, optik sistem odak düzleminde yaklaşık olarak 50 piksellik kayma meydana geldiği görülmektedir. Şekil 6' da yer alan spot diyagramları incelendiğinde odak düzleminde meydana gelen görüntü hareket miktarları elde edilmiştir.



Şekil 6: Farklı eğim açısı değerlerinde elde edilen optik sistem spot diyagramları

İkincil aynaya 50 ark saniye üzerinde uygulanacak eğim hareketinin görüntü kalitesinde önemli bir oranda düşüş meydana getireceği Şekil 7' de verilen MTF ve Kırınım Çevrenmiş Enerji grafiklerinden görülebilmektedir. Kırınım Çevrenmiş Enerji grafikleri incelendiğinde optik sistemimizin %80 enerjisinin yaklaşık 2 piksele denk geldiği görülebilmektedir.

İkincil ayna  
eğim açısı (ark  
saniye)



Şekil 7: Farklı eğim açısı değerlerinde elde edilen optik sistem MTF ve Kırınım Çevrenmiş Enerji grafikleri

## SONUÇ

Çalışmamız kapsamında İleri Hareket Telifisi yöntemi olarak kullanılan TDI sensörlere ve odak düzleminin hareket ettirilmesi gibi zor, pahalı ve dezavantajları bulunan çözümlerin yerine kullanılabilir eğim aynası yöntemi incelenmiştir. Korsch Üç Aynalı Anastigmatik teleskop optik sistem tasarımı Zemax OpticStudio programı kullanılarak yapılmış ve optik sistemde yer alan ikincil aynaya kasıtlı eğim hareketi verilmesi sonucunda görüntü kalitesinde meydana gelen değişimler MTF grafikleri, spot diyagramları ve odak düzleminde meydana gelen görüntü hareket miktarları hesaplanarak analiz edilmiştir. Elde edilen veriler incelendiğinde, tasarlanan optik sistemin 50 ark saniyeye kadar kasıtlı eğim hareketine müsaade edebilir olduğu gösterilmiştir. Çalışmamız, uydu yörünge hareketi nedeniyle odak düzleminde oluşan görüntü hareketinin telifisini ülkemiz için ihraç kısıntısına tabi olan TDI sensörler kullanmadan sağlayacak bir teknoloji geliştirilmesini hedeflenmektedir. Geliştirilecek teknoloji, uydu kameralarında, pozlama sürelerini, optik sistemin ışık toplama kapasitesini ve sistem SNR'ını artırarak daha kaliteli yeryüzü görüntülerinin elde edilmesini mümkün kılacaktır. Bundan sonraki aşamada, tasarlanan optik sistem ve eğim hareketi için piezo eyleyici kullanan elektro-mekanik yapılar üretilerek tüm sistem optik masa üzerinde bir araya getirilecek ve metodun işlevselliği laboratuvar ortamında gösterilecektir.

**Kaynaklar**

- Benyi, C. (1998). Forward motion compensation for digital aerial photogrammetric camera [J]. *Journal of the PLA Institute of Surveying and Mapping*, 15(2), 105-108.
- Chen, Y., Xu, Z., Li, Q., Feng, H. (2008). Image stabilization using motion estimation and micro-mechanical compensation. Paper presented at the 2008 Congress on Image and Signal Processing.
- Chengkang, Y., Qinghui, L. (2011). Motion compensation realization for satellite borne camera [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 40(6), 1090-1097.
- Collette, F., Gline, S., Losseau, J., Lecharlier, L. (2012). Geometric properties of mechanical forward motion compensation system controlled by a piezoelectric drive. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 39(B5), 321-325.
- Huang, J., Wang, D., Gao, X.-d., Yang, S.-h. (2006). Image motion compensation realization of large resolution digital aerial survey camera. *Opto-Electronic*, 33(5), 27-28.
- Hui, S., Yuan, G., Liu, L. (2012). Design and Accuracy Analysis of Area Scan Color CCD Camera's Image Motion Compensation Device [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 39(3), 7-11.
- Janschek, K., Tcherynykh, V. (2001). Optical correlator for image motion compensation in the focal plane of a satellite camera. *IFAC Proceedings Volumes*, 34(15), 378-382.
- Janschek, K., Tcherynykh, V., Dyblenko, S., Flandin, G., Harnisch, B. (2004). Compensation of focal plane image motion perturbations with optical correlator in feedback loop. Paper presented at the Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites VIII.
- Janschek, K., Tcherynykh, V., Dyblenko, S., Flandin, G. (2005). A Visual Feedback Approach for Focal Plane Stabilization of a High Resolution Space Camera (Ein Ansatz zur Bildgestützten Regelung für die Fokalebeneinstabilisierung einer Hochauflösenden Satellitenkamera).
- Janschek, K., Tcherynykh, V., Dyblenko, S. (2005). Integrated camera motion compensation by real-time image motion tracking and image deconvolution. Paper presented at the Proceedings, 2005 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics.
- Janschek, K., Tcherynykh, V., Dyblenko, S. (2007). Performance analysis of opto-mechatronic image stabilization for a compact space camera. *Control Engineering Practice*, 15(3), 333-347.
- Jo, J.-B., Hwang, J.-H., Bae, J.-S. (2015). Optical design for satellite camera with online optical compensation movements. *Journal of the Korean Society for Aeronautical & Space Sciences*, 43(3), 265-271.
- Jun, Y. P. (1990). A image-motion compensation system of high precision space camera. Retrieved from <https://a-a-r-s.org/proceeding/ACRS1990/Papers/PS190-31.htm>.
- Li, J., Liu, X., Fang, J., Sun, T., Xu, C.-p. (2011). External swing method for forward motion compensation of airborne digital camera. Paper presented at the MIPPR 2011: Multispectral Image Acquisition, Processing, and Analysis.
- Miller, B., Rubinovich, E. Y. (2007). Image motion compensation at charge-coupled device photographing in delay-integration mode. *Automation and Remote Control*, 68(3), 564-571.
- Pacey, R., Fricker, P. (2005). Forward motion compensation (FMC)-is it the same in the digital imaging world? *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 71(11), 1241-1242.
- Sandau, R. (2009). *Digital airborne camera: introduction and technology*: Springer Science & Business Media.
- Shengkai, L., Yinnian, L., Xiaowen, C., Jianyu, W. (2011). High frequency motion compensation system based on PZT actuator. *Infrared and Laser Engineering*.
- Simonetti, F., Romoli, A., Mazzinghi, P., & Bratina, V. (2006). Reflecting telescopes for an orbiting high-resolution camera for Earth observation. *Optical Engineering*, 45(5), 053001.

- Walter, I., Schönekeß, J. (2000). Application of micro-mechanic devices for motion compensation of space-borne CCD-imaging systems. *Acta Astronautica*, 46(2-6), 269-277.
- Wang, D., Kuang, H., Cai, X., Liu, Z.-m., & Zhang, X.-f. (2008). Digital implementation of forward motion compensation in TDI CCD panoramic aerial camera. *Opt. Precision Eng*, 16(7), 2465-2472.
- Yan, D., Xu, S., Han, C. (2008). Effect of aircraft attitude on image motion compensation of space camera [J]. *Optics and Precision Engineering*, 16(11), 2199-2203.
- YAN, C., WANG, J.-Q. (2000). Method of coordinate transformation for IM&IMC calculation in aerospace camera system. *Optics and Precision Engineering*, 8(3), 203-207.
- Zhang, Y., Liu, Y., Ge, W. (2010). Development and prospect of image motion compensation technology. *Chinese Journal of Optics and Applied Optics*, 3(2), 112-118.
- Zilei, T. (2005). Compensation technology for the image motion of CCD camera. *Laser & Infrared*, 35(9), 628-632.