Göktürk-2 Uydusunun Bağıl ve Mutlak Çapraz Radyometrik Kalibrasyonu (Relative and Absolute Cross Radiometric Calibration of Göktürk-2 Satellite)

Mustafa TEKE¹, Can DEMİRKESEN¹, Onur HALİLOĞLU, Egemen İMRE¹ ¹TÜBİTAK Uzay Teknolojileri Araştırma Enstitüsü, Ankara, Türkiye mustafa.teke@tubitak.gov.tr

ÖZET

Radyometrik ve geometrik doğruluk tüm uzaktan alqılama uygulamalarında cok önemlidir. Geometrik konumsal hassasiyetle doăruluk ölçülürken, radyometrik doğruluk hedeften gelen gerçek ışınımın değerinin görüntüdeki benek (piksel) yeğinlik (intensity) değerleri kullanılarak ne kadar hassas bulunduğu ile ölçülür. Görüntünün kullanım alanına bağlı olarak radyometrik (örn. Tarım uygulamaları) veya geometrik (örn. Şehir ve planlama) doğruluk önem kazanmaktadır. Dolayısıyla, radyometrik ve geometrik kalibrasyon çalışmaları uydu üretimi ve işletmesi sürecinin vazgeçilmez bir parçasıdır.

Uydu devreye alındığında, uzay şartlarının etkisiyle (radyasyon, titreşim, elektronik gürültü vb.) ve fırlatma esnasındaki fiziksel şartlardan dolayı kalibrasyon bozulabilmektedir. Ayrıca uydunun yörüngede geçirdiği zamana bağlı olarak, sensör karakteristiği de değişmektedir. Dolayısıyla radyometrik kalibrasyon düzenli olarak gerçekleştirilmelidir.

Bu çalışma kapsamında, Türkiye'nin ilk milli yüksek cözünürlüklü ver gözlem uvdusu Göktürk-2'nin bağıl ve çapraz radyometrik kalibrasyonu yapılmış ve elde kalibrasyon parametreleriyle görüntülerin edilen radyometrik düzeltmesi gerçekleştirilmiştir. Bağıl kalibrasyon, Sahra Çölü gibi değişmez kabul edilen kalibrasyon alanlarından alınan veriler ile benek değerleri eşitlenerek bantlanma ve şeritlenmenin giderilmesidir. Bağıl kalibrasyon görüntüleri 90°derece sapma açısıyla çekilmektedir. Kalibrasyon parametreleri her benek için hesaplanır. Göktürk-2'nin çapraz radyometrik kalibrasyonunda, 2014 yılında gerceklestirilen kalibrasyon kampanyası kapsamında çekilen Tuz Gölü Landsat-8 görüntüleri kullanılmıştır. Aynı gün içerisinde kısa zaman aralıkları ile çekilen Landsat-8 ve Göktürk-2 görüntüleri çakıştırılmış, ofset değerleri farklı hesaplanan kazanç ve görüntülerle test edilmistir.

Bağıl radyometrik kalibrasyon sonuçları görsel muayene ile doğrulanmıştır. Nicel başarım metriği olarak benek ortalama ve değişintisi kullanılmıştır. Homojen bir bölgeden alınan bir görüntünün ortalama parlaklık değeri korunurken değişinti değerinin azalması sağlanmaktadır. Çapraz kalibrasyon başarımı Landsat-8 uydusuna göre %2.2 oranında hata ile kazanç ve ofset değerleri hesaplanmıştır.

Anahtar Kelime: Bağıl mutlak radyometrik kalibrasyon, Göktürk-2, Landsat-8.

ABSTRACT

Radiometric and geometric accuracies are crucial in any remote sensing application. Geometric accuracy is related to geolocation accuracy while radiometric accuracy translates in how close can the radiance coming from a target can be calculated from pixel intensities. Depending on the remote sensing application, radiometric (e.g. agriculture) or geometric (e.g. city planning) accuracy may be more crucial. Therefore, radiometric and geometric calibrations and corrections are indispensable operations in satellite image processing and remote sensing.

Due to the radiation and mechanical perturbations that affect the sensor and the spatial arrangement of the imaging system, not to mention the gradual change in sensor characteristics throughout the mission, sensor calibration has to be repeated after launch and regularly throughout the lifetime of the satellite regardless of the prelaunch calibration.

In this study, relative and cross radiometric calibration of Turkey's first national high resolution earth observation satellite, Göktürk-2, is described. Relative radiometric calibration includes pixel response equalization by using images of pseudo-invariant calibration sites in the Sahara. Relative calibration images are acquired at approximately 90° yaw angle and relative radiometric calibration parameters are computed for each pixel. Cross calibration of Göktürk-2 satellite is performed with Landsat 8 imagery acquired at 2014 Tuz Gölü (Salt Lake) cal/val campaign. As the Salt Lake has uniform BRDF values, both images are registered and samples are collected from Göktürk-2 and Landsat-8. Computed gain and offset values are validated in the same image as well as other images by Göktürk-2 and Landsat-8.

Results of relative radiometric calibrations are verified by visual inspection. As a quantitative performance metric pixel mean and variance values are used. Mean value of an image taken from a uniform area is preserved, variance of the same region is decreased. Performance of cross calibration is measured against Landsat-8. 2.2% error is committed with respect to gain and offset values.

Keywords: Relative radiometric calibration, absolute cross radiometric calibration, Göktürk-2, Landsat 8

1. GİRİŞ

a. Göktürk-2 ve RASAT Uyduları

Göktürk-2, TÜBİTAK UZAY ve TUSAŞ isbirliği ile Türk Hava Kuvvetleri için yerli imkânlarla tasarlanmış bir yüksek çözünürlüklü görüntüleme uydusudur. Türkiye'de geliştirilmiş ilk ver gözlem uydusu olan RASAT'a oranla daha yüksek görüntü cözünürlük depolama/iletim ve kapasitesine sahiptir. RASAT'ta 7,5 metre olan pankromatik bant yer örneklem mesafesi çıkartılmıştır. Göktürk-2'de 2,5 metreye RASAT'taki kırmızı-yeşil-mavi bantlara ek olarak yakın kızılötesi bandı da eklenmiştir. Bu iki uyduyla ilgili genel bilgiler Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Göktürk-2 ve RASAT genel özellikleri

	RASAT	Göktürk-2		
Yörünge	685 km irtifa Güneş'e eşzamanlı (Alçalan Nokta Yerel Zamanı 10:30)	685 km irtifa Güneş'e eşzamanlı (Yükselen Nokta Yerel Zamanı 10:30)		
Görüntüleme Bantları	Pankromatik, Kırmızı, Yeşil, Mavi	Pankromatik, Kırmızı, Yeşil, Mavi, Yakın Kızılötesi		
Pan çözünürlük	7,5 m	2,5 m		
Diğer bantlar çözünürlük	15 m	5 m		
Görüntü genişliği	30 km	20 km		
Azami şerit uzunluğu	960 km	640 km		

RASAT uydusu TÜBİTAK UZAY tarafından işletilmekte ve görüntüleri sivil amaçlı olarak paylaşılmaktadır. Göktürk-2 uydusu ise Türk Hava Kuvvetleri tarafından işletilmekte ve görüntüleri sivil ve askeri/kamu kurumları tarafından kullanılmaktadır.

b. Uydu Görüntülerinin Kalibrasyonu

Yeryüzünün sıcaklık, nem ve yansıma gibi fiziksel özeliklerini uydu görüntülerinden kestirebilmek için uydu üzerindeki sensörlerin radyometrik kalibrasyonunun yapılması şarttır. Sensörlerin ölçtüğü sayısal veriyi yeryüzünden gelen ışıma değerine dönüştürmek için gereken sabit katsayılar radyometrik kalibrasyon işlemi sonucunda elde edilir.

lşıma hedeften gelen ışımanın ölçüsüdür. Yansıma ise yüzeyin fiziksel özelliğidir. Işıma yüzeyin aydınlanmasıyla doğru orantılıdır. Yansıma ise aydınlanmadan bağımsız sabit bir özelliktir. Yüzeyden gelen ışımayı (radyans/radiance) hesaplamak için sensörde okunan sayısal değerin ışımaya dönüşümü, yüzeyi aydınlatan ışık miktarı (gelen enerji) ve atmosferin soğurduğu ve yansıttığı enerji miktarlarını bilmek gerekmektedir.

Ham değerlerden (digital number) ışıma ve yansıma (reflektans/reflectance) değerlerine dönüşüm için bağıl radyometrik düzeltme ve mutlak kalibrasyon işleminden elde edilecek kazanç ve ofset değerlerinin kullanılması gereklidir (1).

Radyans = SayısalDeğer * Kazanç + Ofset (1)

Kalibrasyon sonucu elde edilen parametreler ile radyometrik düzeltme işlemi gerçekleştirilebilir. Göktürk-2 uydusu görüntü işleme iş akışında radyometrik kalibrasyon, ham görüntüden temel seviyede görüntü üretimi faaliyetlerinde gerçekleştirilir (Teke M. , 2016). TÜBİTAK UZAY bünyesinde radyometrik ve geometrik kalibrasyon ile ilgili araştırma faaliyetleri Kalkınma Bakanlığı destekli GEOPORTAL projesi kapsamında gerçekleştirilmektedir (Teke, vd., 2015).

2. BAĞIL RADYOMETRİK KALİBRASYON

Bağıl radyometrik kalibrasyon (Pixel Response Non Uniformity correction) süpürçek (pushbroom) tarayıcının her beneği için yanıt (response) ve ofset (offset) değerlerini elde edilme işlemidir. Doğru bir bağıl radyometrik kalibrasyon için algılayıcı özelliklerinin bilinmesi gereklidir.

Digital Globe firması WorldView-2 uydusunda aercekleştirdiği radvometrik kalibrasvon işlemlerini anlatan detaylı bir teknik rapor yayınlamıştır (Digital Globe, 2010). (Gil, Romo, Moclán, & Pirondini, 2015) tarafından yapılan benzer bir calışmada da Deimos-2 uydusunun fırlatmadan sonra bağıl ve mutlak radyometrik faaliyetleri anlatılmıştır. kalibrasvon Bağıl radyometrik kalibrasyon yöntemlerine alternatif olarak serit ve bantlanma düzeltme vöntemleri de kullanılabilir Scheffler ve Karrasch, (2014) tarafından EO-1 uydusu Hyperion hiperspektral algılayıcısı için farklı şerit düzeltme algoritmaları karşılaştırılmış ve dalgacık (wavelet) temelli yöntemini (Pande-Chhetri ve Abd-WFAF Elrahman, 2011) en başarılı yöntem olarak belirlenmiştir. Ayrıca frekans uzayında filtreleme ile şeritler yüksek frekanslı gürültü olarak azaltılabilir (Gonzalez ve Woods, 2002).

uydusunun radyometrik Landsat 8 bağıl kalibrasyonu yersel ve algılayıcıda yer alan düzeltilmesinin kalibrasyon cihazı ile karşılaştırılması (Pesta, Helder, ve Ulmer, 2015) tarafından gerçekleştirilmiş, farklı bantlar ve algılayıcılar için yöntemler önerilmiştir. Yersel bağıl radvometrik düzeltmenin sensörden bulunan düzeltme sisteminden benzer veva daha ivi sonuclar verdiği görülmüstür. (Atak vd., 2015) tarafından yapılan çalışmada Göktürk-2 görüntü testleri detaylı olarak anlatılmış, bu makalede açıklanan düzeltmeler uygulanmamış görüntüler için yapılan analizlerde bağıl radyometrik kalibrasyonun istenilen düzevde olmadığı belirtilmiştir.

Bu bölümde; Göktürk-2 sensör modeli, gürültü kaynakları, kalibrasyon sahaları, radyometrik eşitleme yöntemleri, bağıl radyometrik kalibrasyon yöntemleri ve bağıl radyometrik kalibrasyon için gerekli uydu yönelimi hakkında bilgi verilmiştir.

a. Göktürk-2 Sensör Modeli

Göktürk-2 Ana Kamerasında 2 adet ana ve iki adet yedek olmak üzere toplam dört adet Detektör kullanılmıştır. Bu ana detektörlerden ilki kırmızı, yeşil, mavi ve pankromatik algılayıcı olarak ikincisi ise yakın kızılötesi algılayıcı olarak kullanılmıştır. Yakın kızılötesi algılayıcı için ikinci detektörün pankromatik sensörü sadece yakın kızılötesi ışığı geçirecek şekilde kaplanarak ve her iki benek birleştirilerek (x2 binning) kullanılmaktadır. Dolayısıyla ikinci ana detektörün kırmızı, yeşil, mavi sensörleri kullanılmamaktadır

Göktürk-2 Ana Kamerasında kullanılan doğrusal sensör dedektör çipinde kırmızı, yeşil, mavi ve pankromatik olmak üzere toplam dört adet algılayıcı bulunmaktadır. Kırmızı, yeşil ve mavi sensörler 10 µm benek boyutuna sahip 4134'er adet benekten (pikselden) oluşur. Pankromatik sensör ise 5 µm benek boyutuna sahip 8292 adet benekten oluşur. Detektörün icinde bulunan senörlerin yukarıdan asağı doğru dizilimi pankromatik, mavi, kırmızı, vesil şeklindedir. NIR algılayıcı farklı bir dedektör cipinde bulunmaktadır. Pankromatik ile mavi sensörün arasındaki mesafe 122.5um. renk sensörleri arasındaki mesafe ise 90µm'dir.

Renk sensörlerinde bulunan 4134 beneğin 4128 beneği efektif benektir. Geri kalan benekler boş benektir. 4128 efektif beneğin ise 4080 beneği aktif ışık alan benektir ve 48 benek koyu benek olarak adlandırılan ışık almayan beneklerdir. Pankromatik sensörde bulunan 8292 beneğin 8276 beneği efektif benektir. Geri kalan benekler boş benektir. 8276 efektif beneğin ise 8160 beneği aktif ışık alan benektir ve 116 benek koyu benek olarak adlandırılan ışık almayan beneklerdir. Boş ve koyu benekler sensörlerin başlarında ve sonlarında yer alır. Boş beneklerin tamamı ve koyu beneklerin bazıları detektörün dâhili test ve kontrol mekanizması için kullanılırken koyu beneklerin çoğu "dark noise" olarak adlandırılan detektörün ışık almadığı durumda çeşitli nedenlerle oluşan gürültüyü elemek için kullanılır.

Renk sensörleri tek çıkış kanalından okunurlar. Pankromatik sensörde ise sensörler sağ-sol ve tek-çift olmak üzere dört ayrı kanaldan okunur. Bu nedenle pankromatik sensörün her bir okuma kanalının okuma devresi gürültüsü farklıdır. Gürültü eleme yöntemleri kullanılırken bu hususun dikkate alınması gerekmektedir.

b. Gürültü Kaynakları

Görüntüleme sisteminde oluşan gürültü kaynaklarını temel olarak üç ana gruba ayırmak mümkündür. Bu gürültü kaynakları; foton gürültüsü, kara akım gürültüsü ve termal gürültü olarak adlandırılır (Fiete & Tantalo, 2001) (Holst & Lomheim, 2007).

Foton gürültüsü (photon shot noise), ışık algılayıcı sistemler üzerinde doğanın temel limitidir ve fotonların detektöre rasgele ulaşmasından kaynaklanır. Fotonların detektöre rasgele erişim zamanları Poisson dağılımı ile modellenmektedir. Bu nedenle foton gürültüsü detektöre ulaşan ve elektrona dönüşen fotonların kareköküne eşittir. Genelde en baskın gürültü kaynağı foton gürültüsüdür.

Kara akım gürültüsü (dark current noise), detektörün hiç ışık almadığı durumda oluşan gürültülerin tamamını kapsamaktadır. Dolayısıyla sensörlerin okuma devrelerinden kaynaklanan gürültüler, görüntüleme sistemi içinde yer alan diğer elektronik devrelerden ve sayısallaştırıcı devrelerden kaynaklanan gürültüler kara akım gürültüsü icinde kabul edilebilir. Kara akım gürültüsünü ölcmek ve elemek icin detektör üzerinde ver alan kovu beneklerden faydalanılabilir veya kameranın ışık alması tamamen engellenerek okunan görüntüler kara akım referansı olarak kullanılabilir.

Termal gürültü ise, genellikle optik elemanların bir kara cisim (black body) gibi davranarak radyasyon oluşturması ve bu radyasyonun detektörde elektron üretimine neden olmasıyla oluşur. Bu gürültü tipi kızılötesi bantta çalışan kameralar için çok daha önemli iken 400-1000nm tayfında çalışan kameralar için etkisi genellikle ihmal edilir.

c. Kalibrasyon Sahaları

Mutlak radyometrik kalibrasyon amacıyla kullanılacak test sahalarının seçimi için tanımlanan birçok kriter önerilmiştir (Gürbüz, vd., 2012). Bu kriterler özetle şöyle sıralanabilir:

- Yüksek mekânsal homojenlik,
- %30'dan büyük yüzey yansıtırlığı,
- Düz spektrum,

• Yüzeyin zamana bağlı değişiminin az olması,

• Yüzeyin yatay ve Lambert yansıtırlık özelliği göstermesi,

• Okyanus, yerleşim yeri ve endüstriyel alanlardan uzak olması,

- Yüksek rakım,
- Aerosol miktarı ve bulutluluğun az olması.

Bu kriterler "Committee on Earth Observation Satellites" (CEOS) "Working Group on Calibration and Validation (WGCV) Infrared and Visible Optical Sensors Group (IVOS)" tarafından kabul edilmiştir. Bu kriterlere uygun sahalar USGS tarafından "USGS Test Site Catalog"'da toplanmıştır. Bu sahaların arasından seçilen ve ölçüm cihazlarıyla düzenli olarak yer ölçümleri gerçekleştirilen sahalar belirlenmiş bu sahalar LANDNET sahaları olarak adlandırılmıştır. Bu şekilde LANDNET sahaları (Şekil 1) CEOS'un standart test sahaları olarak kabul görmüştür.



Şekil 1. CEOS standart test sahaları (CEOS, 2014)

Bu grupta yer alan Tuz Gölü bölgesi, ülkemizde yer alan tek radyometrik kalibrasyon sahasıdır (Gürol, vd., 2008; Gürol, vd, 2010). ESA desteği ile gerçekleştirilen CONTROLS 2010 projesinde Tuz Gölü'nde çeşitli uyduların kalibrasyonu gerçekleştirilmiştir (Özen,vd., 2011). Tuz Gölü'nün mekânsal ve zamansal radyometrik özellikleri (Odongo, vd., 2014) tarafından analiz edilmiştir

ç. Homojen Bölgelerden 0 Derece Sapma ile Bağıl Radyometrik Kalibrasyon ve Düzeltme

Bağıl radyometrik kalibrasyon için ilk çalışılan yöntemlerden birisi de çöl görüntülerinden gündüz ve gece görüntüleri çekilerek kalibrasyon yapılmasıdır. Çöllerde yapay ışık kaynağı olmadığı için ofset hesaplama için kullanılabilir. Homojen bölgelerden, örneğin kalibrasyon sahaları alınan görüntülerden ise her beneğin yanıt (response) değeri hesaplanabilir. Bu işlemin her kazanç modu için tekrarlanması gerekir.

Bu kapsamda algoritma adımları aşağıdaki gibi sıralanabilir:

• Gece görüntüsünden ofset değeri hesaplanır ve gündüz görüntüsünden çıkarılır.

- Gündüz görüntüsünden seçilen homojen bölgenin her sütununun ortalaması alınır.
- Sütun ortalamaları görüntü ortalamasına bölünerek sütun yanıt değerleri bulunur.

d. Nadirden Yaklaşık 90 Derece Sapma Açısı ile Görüntüleme

Bağıl radyometrik kalibrasyon için ideal olarak tüm beneklere aynı miktar fotonun düşmesi gerekmektedir. Bu durumda, beklenen ideal görüntüde tüm benekler aynı değerlere sahip olacak ve gerçekleşen görüntüde her bir benekteki farklı değerler kalibrasyon için gerekli girdiyi oluşturacaktır. Ancak örneğin 30x30 km genişliğinde bir sahadan homojen dağılımlı bir yansıma elde etmek pratikte imkânsızdır.

Öte yandan, doğrusal algılayıcılar için, algılayıcıdaki her bir beneğin aynı noktayı ardışık satırlarda görüntüleyebilmesi mümkündür. Bunun için uydunun nadir yönünde görüntü alırken yaklaşık 90 derecelik bir sapma açısına sahip olması gerekmektedir. Bu durumda sensörün yerdeki izdüşümü uydunun yerde takip ettiği yolu izleyecek ve aynı nokta ardışık satırlarda her bir benek tarafından görüntülenmiş olacaktır. Aynı aydınlanma ve yansıma miktarına sahip olması beklenen bu noktanın görüntüde karşılık geldiği noktalarda ise bir miktar değişen değerler elde edilecektir. Örneğin bir ortalama değere göre elde edilen bu sapmalar bağıl kalibrasyon dizisini oluşturur. Her bir beneğin ortalamadan farkını içeren bu kalibrasyon dizisi görüntünün her bir satırına uygulanarak benekler arası farklar qiderilir.

Bu durum Şekil 2 ile dört benekten oluşan bir lineer sensör için gösterilmektedir. 90 derecelik sapma açısı ile görüntüleme yapılırken çarpı işareti ile gösterilen nokta t_0 , t_1 , t_2 , t_3 anlarında ardışık satırlarda kaydedilmektedir. Oluşan görüntüde ise bu nokta 45 derece açıdaki bir çizgi şeklinde görülmektedir. Bu çizgi boyunca beneklerin değerleri kalibrasyon için kullanılmaktadır.





dönüşü olmasaydı Dünya'nın yukarıda açıklanan mekanizma uydunun sapma açısını tam olarak 90 dereceye ayarlayarak herhangi bir konumdaki bir kalibrasyon sahasında uygulanabilirdi. Ancak Dünya'nın dönüşü görüntüleme boyunca hedef noktanın uydunun izlediği yola belli bir açıyla hareket etmesine yol açmaktadır. Bu hareket enleme göre değişen Dünya'nın çizgisel hızına karşılık gelmektedir, açıktır ki bu hız tam kutup noktasında sıfırken ekvatorda 465m/s civarındadır.

Bu durumda uydu görüntü alırken sensörün yerdeki izdüşümünün uydunun yerdeki izdüşümünün hız vektörü ile aynı doğrultuda olması gerekmektedir. Bunu sağlayabilmek için uydunun yöneliminde sapma yönünde Dünya'nın görüntünün çekildiği enlemdeki çizgisel hızı ve uydunun yer izdüşüm hızının bileşkesine bağlı bir düzeltme gerçekleştirilir. Şekil 2'de verilen dört beneklik sensör için sapma açısında düzeltme yapılmadığı durumda oluşan görüntü Şekil 3 ile verilmektedir. Buna göre aynı noktanın ardışık benekler tarafından görüntülenmesi sağlanamamaktadır. Bunun için sensörü yer izdüşüm hızı ile yer çizgisel hızının bileşkesine hizalayacak bir sapma açı düzeltmesi yapılması gerekmektedir.





Bu düzeltme açısının büyüklüğü uydunun yer izdüşüm hızına (diğer bir deyişle irtifasına) ve görüntüleme enlemine bağlıdır. Bu durum, Göktürk-2 uydusu için ekvatorda 3,9 derece civarında bir düzeltme gerektirmektedir.

e. Dinamik Ofset Hesaplama

Göktürk-2 sensör modelini kullanarak her satır için dinamik ofset hesaplamak mümkündür.

Göktürk-2 Algılayıcıları Pan ve MS (multispektral) olarak iki ayrı bileşenden oluşur. MS kendi içerisinde dört farklı sensör bulundurmaktadır. Pan bandı ise sağ ve sol benekler ile tek ve çift benekler için 4 adet ayrı okuyucuya sahiptir.

Pan sensörü için sağ ve sol kapalı beneklerin değeri ilgili taraf için o satırın ofset değerinin hesaplanmasında kullanılır. Yarı kapalı benekler ise hesaplamaya dâhil edilmez. Tek ve çift benekler için ayrı ayrı ofset parametreleri hesaplanır.

Tablo 2 ile Sevive-0 (L0) ham görüntünün pankromatik bandının sol tarafı için kapalı, yarı kapalı ve acık benek sayısal değerleri görülmektedir. Tek ve çift benekler arasındaki değer farkları görülebilmektedir. Tablo 3 ile radyometrik olarak düzeltilmiş görüntünün sayısal değerleri verilmektedir. Ofset değerlerinin dinamik olarak hesaplanması bağıl radyometrik kalibrasyon işleminde önemli bir adımdır.

	Kapalı Benekler								Y.Kapalı			Açık Benekler											
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
30	23	29	23	29	25	28	24	30	25	31	25	29	37	62	202	796	895	918	916	911	893	917	920
28	23	30	23	29	23	29	22	28	23	29	21	37	35	63	200	790	892	916	907	918	919	910	928
28	24	30	21	30	21	31	22	30	22	28	23	30	35	63	203	775	897	903	910	910	903	916	923
30	24	30	26	29	26	30	20	31	24	28	26	36	33	61	199	781	888	892	929	916	895	910	923
29	25	31	24	22	24	31	19	30	22	28	25	31	35	60	207	781	900	910	917	924	918	918	924
30	24	31	26	29	23	29	22	29	25	29	26	31	35	68	203	781	898	916	910	918	907	900	918
31	25	31	24	31	24	28	26	28	25	31	25	30	37	62	198	783	895	909	914	919	912	934	926
30	25	29	25	29	27	31	25	31	25	31	25	36	34	62	196	780	897	895	914	916	919	916	916
31	25	29	19	30	26	30	27	31	24	31	26	30	37	63	197	782	885	910	913	925	914	925	933
30	26	31	22	28	25	28	25	28	29	28	27	30	37	63	200	782	889	892	920	935	915	925	933
28	26	30	25	29	24	30	27	31	24	31	26	31	36	63	203	789	901	910	928	917	914	917	934
31	27	29	22	31	22	29	22	31	26	28	27	30	33	69	205	782	887	908	910	916	914	925	927
30	25	30	25	31	25	31	22	31	25	28	24	29	37	62	206	790	895	911	920	927	933	917	927
28	26	29	26	30	24	31	25	30	27	28	24	31	36	70	207	789	907	917	927	940	932	940	933

Tablo 2. L0 Görüntü Pan Bandı Kapalı, Yarı Kapalı ve Açık Benekler
--

Tablo 3. L1 Görüntü Pan Bandı Kapalı, Yarı Kapalı ve Açık Benekle

	Kapalı Benekler										Y.Kapalı					Açık Benekler							
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	2	0	0	10	33	175	767	868	889	889	882	866	888	893
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7	10	33	175	760	867	886	882	888	894	880	903
0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	10	33	178	745	872	873	885	880	878	886	898
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	7	30	173	750	862	861	903	885	869	879	897
1	0	3	0	0	0	3	0	2	0	0	0	3	10	32	182	753	875	882	892	896	893	890	899
1	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	9	39	177	752	872	887	884	889	881	871	892
1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	10	32	171	753	868	879	887	889	885	904	899
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	7	30	169	748	870	863	887	884	892	884	889
1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	9	33	169	752	857	880	885	895	886	895	905
2	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	8	35	171	754	860	864	891	907	886	897	904
0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	9	33	176	759	874	880	901	887	887	887	907
1	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	7	39	179	752	861	878	884	886	888	895	901
0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	10	32	179	760	868	881	893	897	906	887	900
0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	9	40	180	759	880	887	900	910	905	910	906

Dinamik ofset hesaplama işlemi yapılmadığı zaman Pan bandında tek ve çift benekler ile görüntünün sağı ve solu arasında fark oluşacaktır.

f. Nadirden 90 derece sapma açısındaki veriler ile Bağıl Radyometrik Kalibrasyon ve Düzeltme

Bağıl Radyometrik kalibrasyon işleminin topoğrafyadan en az etkilenmesi için en uygun yöntem sensörün nadirden sapma açısının yaklaşık 90 derece çevrilerek (side-tethering) görüntü alınması yöntemi uygulanmalıdır. Bu şekilde alınmış pankromatik ve renkli görüntüler sırası ile Şekil 4. ve Şekil 5. ile gösterilmektedir.



Şekil 4. 90 derece sapma açısı ile alınmış pankromatik görüntü



Şekil 5. 90 derece sapma açısı ile alınmış renkli görüntü

Bu yöntemde her benek, yeryüzündeki aynı noktadan geçer. Dolayısı ile uydu yörünge ve yönelimi buna sağlayacak şekilde yüksek bir doğrulukta kontrol edilmelidir. Sensörün dikeyde yaklaşık 90 dereceye karşılık gelecek doğru yönelimde görüntü çekmesi bu yöntemin başarısı için çok önemlidir.

Bağıl kalibrasyon için en uygun görüntüler radyometrik kalibrasyon sahalarından alınabilmektedir. Testler için kullanılan görüntü koordinatları Cezayir'de bulunan 31.02° K, 2.23° D koordinatındaki bölgeden seçilmiştir. Bu kapsamda algoritma adımları aşağıdaki gibi sıralanabilir:

(1) Görüntünün ofset değerleri hesaplanarak görüntüden çıkarılır.

(2) 90 derece sapma açısı ile alınmış görüntüden çalışılmak istenilen bozulma olmayan bölge seçilir. Doğruluğun yüksek olması için 100'ün üzerinde satır seçilmesi uygundur.

(3) Kapalı ve geçiş benekleri arasında kalan görüntü sağ üst köşeden başlayarak, sol alt köşeye doğru 45 derece açı ile yeni görüntü oluşturulur.

(4) Her satırdaki benekler o satırın ortalamasına bölünür.

(5) Her sütun kendi içerisinde ortalama alınarak o satırın yanıt (response) değeri hesaplanır.

(6) Kapalı ve yarı kapalı beneklerin yanıt değeri 1 olarak atanır.

Veri işleme adımları görsel olarak Şekil 6. ile gösterilmektedir. Pankromatik bandın hesaplanan yanıt değerleri Şekil 7. ile grafiksel olarak gösterilmektedir. Tek ve çift pikseller zikzak şeklinde görülmekte iken görüntünün sağ ve sol tarafı arasında farklı yanıt değerleri oranlarının olduğu görülmektedir.



Şekil 6. Veri İşleme Adımları: (a) 90° sapma açısı ile çekilmiş görüntü, (b) 45 derece çevrilmiş görüntü (c) oluşturulmuş kalibrasyon görüntüsü.



Şekil 7. Pan bant benek yanıt Değeri

3. MUTLAK RADYOMETRIK KALIBRASYON

Spektral bilgi gerektiren herhangi bir bilimsel çalışma için mutlak radyometrik kalibrasyon işlemi gerçekleştirilmelidir. Mutlak kalibrasyon için izlenen adımlar Şekil 8. ile gösterilmiştir. Yer ölçümleri özetle; meteorolojik verileri (sıcaklık, basınç, nem), atmosferdeki aerosol miktarı ve karakteristiğini (metreküpteki aerosol kütlesi ve aerosollerin geometrik şekillerini tarif eden dağılım fonksiyonlarının parametre kestirimi), hedef sahanın spektral özelliklerini (dalga boylarına göre yansıtırlık eğrisi) kapsamaktadır. Ölçümler sonucunda elde edilen veriler 6S ışınım transfer benzetimine (Vermote, vd., 1997) girdi olarak kullanılır. Benzetime girdi olan bir diğer husus uydunun hedefi gözlemleme geometrisidir. Bu geometri toplam dört açı değeriyle tarif edilir. Bunlar uydunun ve güneşin azimut ve zenit açılarından ibarettir. Benzetim sonucunda atmosferin üstündeki ışıma değeri kestirilmiş olur. Uyduda bulunan elektro-optik sensörün ölçmesi gereken ışıma değeri bu değerdir. Buna göre sahanın görüntüsünden gelen benek değerlerini (DN) ısımaya dönüstürmek icin gerekli katsayılar (kazanç ve ofset) hesaplanır. Mutlak kalibrasyon işlemi sonucunda elde edilen iki değer kazanç ve ofset değeridir. Bu değerler tüm algılayıcılar için geçerlidir. Algılayıcıların aralarındaki fiziksel farklılıklar ise bağıl kalibrasyon işlemi ile hesaplanır.



Şekil 8. Mutlak kalibrasyon için izlenen akış seması

(Slater, vd., 1987) "Coastal Zone Color Scanner" ve Landsat 4 platformu üzerinde bulunan "Thematic Mapper" (TM) sensörünün yörüngede kalibrasyon değerlerindeki değişim incelemis ve rapor etmistir, Landsat 5 üzerindeki TM sensörünün yörüngede kalibrasyon adımları tarif edilmiştir. Bu çalışmada ayrıca beş farklı mutlak radyometrik kalibrasyon sonucu, firlatma öncesi değerler ve sensörün dahili kalibrasvon ürettiăi değerlerle kıvaslanmıs. cihazının White Sands kalibrasyon sahasında tekrarlanan 16 farklı mutlak radyometrik kalibrasyon sonucu elde edilen kazanç değerlerinin ±2.8% oranında benzerlik gösterdiği belirtilmiş ve belirsizlik değeri bu şekilde nicelenmiştir.

(Thome, 2001)'de, dolaylı (vicarious) mutlak radyometrik kalibrasyon yöntemlerinden biri olan yansıtırlık tabanlı yöntem ile Landsat 7 platformunun üzerinde bulunan "Enhanced Thematic Mapper Plus" (ETM+) sensörünün kalibrasyonu tarif edilmiş, dört farklı tarihte çekilen görüntülerle bulunan kazanç değerleri kendi içlerinde en fazla %5 farklılık gösterirken, öncesi laboratuvar ortamında fırlatma hesaplanan kazanc değerlerinde en fazla %7 farklılık gösterdiği rapor edilmiştir. Yazar, bulunan kazanç değerlerinin bazı bantlar için fırlatma öncesi değerlerinde yüksek olurken diğer bantlar için daha düşük olduğunu rapor etmiştir. Bu sonuç varsayılan ışınım (irradyans/irradiance) değerindeki belirsizlik ve atmosferik aerosol miktarının ölçümünde yapılan hatalara bağlanmaktadır.

(Chander, vd., 2009) Landsat "Multispectral Scanner" (MSS), TM, ETM+, ve EO-1 platformu üzerindeki "Advanced Land Imager" (ALI) sensörlerinin kalibre edilmiş DN değerlerinden, sensör seviyesi spektral ışıma, atmosfer-üstü yansıtırlık ve sensör seviyesi parlaklık sıcaklığı gibi değerlerin hesaplanabilmesi için gerekli denklemleri ve kalibrasyon değerlerini özetlenmişti.

Çapraz radvometrik mutlak kalibrasvon işleminde, kalibrasyonu yapılmış bir uydu ile radyometrik kalibrasyon gerçekleştirilir. Landsat 8 uydusu yer gözlem çalışmalarının (Roy, vd., 2014) yanı sıra, uydu görüntülerinin kalibrasyonu için kullanılmaktadır (Chander, vd., 2004) Landsat 7 ETM ve EO-1 ALI sensörlerinin capraz kalibrasyonunu gerceklestirmislerdir. (Chander, vd., 2009) vaptıkları calısma Landsat 5, 7 ve EO-1 uvdularının kazanc ve ofset değerlerini tespit etmislerdir. (Finn, vd., 2012) vaptıkları calısmada Landsat 5, Landsat7, EO-1 ve ASTER uvduları için ışıma ve yansıma(reflectance) hesaplama yöntemlerinden bahsetmişlerdir. Landsat 8'in radyometrik kalibrasyon tutarlılığı (Markham, vd., 2014) tarafından sunulmuştur. (Shin, vd., 2015) ve diğerleri tarafından Kompsat-3 uydusunun capraz mutlak kalibrasyonu Landsat 8 uydusu kullanılarak gercekleştirilmiştir. GF-1 uyduşunun radyometrik kalibrasyonu Landsat 8 ve ZY-3 uyduları kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Yang, vd., 2015).

Göktürk-2 uydu görüntülerinin çapraz radyometrik kalibrasyonu için Landsat 8 uydusundan faydalanılmıştır. Landsat-8 yüksek bir radyometrik kalibrasyon doğruluğuna sahip olmakla birlikte 30 metrelik, cok yüksek olmayan örnekleme mesafesine sahiptir. bir ver Kalibrasvon amacıvla Göktürk-2 ve Landsat 8 uyduları ile 29 Ağustos 2014 tarihinde Tuz gölü üzerinden görüntü almıştır. Göktürk-2 görüntüleri Landsat 8 görüntüsü ile en yakın komşu yineleme eslenmistir. Çapraz vöntemi kullanılarak kalibrasyon icin kullanılan Göktürk-2 ve Landsat 8 uydu görüntülerinin özellikleri Tablo 4 ile gösterilmektedir. Şekil 9. ile 185x185 km²'lik Landsat çerçevesi ve Göktürk-2'nin aynı gün cekilmiş görüntüsü gösterilmektedir. Bölgenin detay görüntüsü Şekil 10. ile gösterilmektedir.

Tablo 4.	Çap	oraz	kalik	oras	syon	için	kullanılan
Göktürk-2	ve	Land	dsat	8	uydu	gör	üntülerinin
ozeilikien							

Uydu	Tarih	Zaman	Roll Açısı	Güneş Zenith	Güneş Azimuth	
Landsat 8	29.08.2014	10:27	0	34.65	142.61	
Göktürk-2	29.08.2014	10:58	-3.71	38.38	132.87	



Şekil 9. Landsat 8 çerçevesi (185x185km²) ve Göktürk-2 görüntüsü



Şekil 10 Landsat 8 ve Göktürk-2 29 Ağustos 2014 tarihinde alınmış görüntüleri

Çapraz Mutlak radyometrik kalibrasyon için gereken Atmosfer Üstü Yansıma (ToA Reflectance) aşağıdaki eşitlik ile bulunur. (2)

$$\rho = \frac{\pi * L * d^2}{E_{SUN} * \cos \theta} \tag{2}$$

ρ: Atmosferin Üstündeki Yansıma

L: Spektral Işıma

d: Dünya-Güneş uzaklığının Astronomik Birim cinsinden değeri

 E_{SUN} : Güneşten gelen aydınlanma/ışınım (irradiance)

 θ : Güneşin dikey ile yaptığı açı (zenith = 90 – elevation)

Tuz gölünün yansıması görüş açısından bağımsız olduğu için (BRDF – Bi-directional Reflectance Distribution Function etkileri) aşağıdaki eşitlik elde edilir. (3)

$$\frac{L_{L8}}{E_{SUN_{L8}} * \cos \theta_{L8}} = \frac{L_{GK2}}{E_{SUN_{GK2}} * \cos \theta_{GK2}}$$
(3)

Göktürk-2 uydusunun her bandı için ışıma değeri (4) eşitliğinden bulunur.

$$L_{GK2} = L_{L8} * \frac{\cos \theta_{GK2}}{\cos \theta_{L8}} * \frac{E_{SUN_{GK2}}}{E_{SUN_{L8}}}$$
(4)

Tuz Gölü'nün homojen bölgelerinden örnekleme yapılarak Landsat 8 ışıma ve Göktürk-2 sayısal değerleri (3) eşitliğini çözmek için kullanılmıştır. Eşitlikte ofset değeri 0 alındığında sayısal değerlerin aşağıdaki formda olduğu görülmüştür. (5)

$$Radyans = SayısalDeğer * Kazanç$$
 (5)

Hesaplanan kazanç ve ofset değerlerini doğrulamak için ToA Yansıma (Reflectance) eşitliği her bandın orta dalga boyunun atmosfer dışı radyasyon (ETR, extraterrestrial radiation) değerleri E_{SUN} olarak kullanılarak hesaplanır. Göktürk-2 spektral özellikleri Tablo 5. ile verilmektedir ve Landsat 8'de yer alan aynı bantların spektral özellikleri ise Tablo 6. ile verilmektedir.

Tablo 5. Göktürk-2 Uydusunun Spektral Özellikleri

Bant	Daygaboyu Merkez (nm) Dalgaboyu		FWHM (nm)	E _{SUN}	
Mavi	0.450 - 0.520	485	74.7	1979	
Yeşil	0.520 - 0.600	560	73.5	1857	
Kırmızı	0.630 - 0.690	660	133.2	1558	
NIR	0.760 - 0.900	830	117.1	1056.3	
Pan	0.450 - 0.900	675	300	1499	

Tablo 6. Landsat 8 Uydusunun Spektral Özellikleri

Bant	Daygaboyu (nm)	Merkez Dalgaboyu	FWHM (nm)	E _{SUN}
Mavi	450 - 515	482.6	60	2043.50
Yeşil	525 - 600	561.3	57	1863.30
Kırmızı	630 - 680	654.6	37	1543.80
NIR	845 - 885	864.6	28	980.15
Pan	500 - 680	592	180	1794.30

Göktürk-2 uydusu DubaiSat-1 ve RazakSat ile aynı kamera sistemini kullanmaktadır (Gunter's Space Page, 2015). Göktürk-2 uydusunun Kırmızı ve NIR bantları daha geniş aralıktan ışık Landsat rağmen toplamaktadır, buna 8 uvdusunda bantların aralıkları avnı Göktürk-2'deki eş bantların 4'te biri kadardır. Şekil 11. ile Göktürk-2 uydusunun spektral özellikleri verilmektedir. Bu farklılık özellikle bitkilerin analizinde kullanılan bitki indeksinin hesaplanmasında farklılıklara sebep olacaktır. sağlıklı bitkiler NIR bandındaki radyasyonun büyük kısmını yansıtmaktadırlar.



Şekil 11. Göktürk-2/DubaiSat-1Spektral Özellikleri (Choi, Harmoul, Kang, Al Dhafri, & Kim, 2009)

Landsat uydusu 8 adet multispektral banda sahiptir. Göktürk-2 ile aynı olan bantların spektral özellikleri Şekil 12. ile gösterilmektedir.



Şekil 12. Landsat 8 Spektral Özellikleri

Göktürk-2'nin en düşük kazanç modu ayarında hesaplanan kazanç ve Ofset değerleri Tablo 7. ile verilmektedir.

	Pan	Kırmızı	Yeşil	Mavi	NIR
Kazanç	0.2772	0.2153	0.3671	0.2538	0.1643
Ofset	-4.9899	-21.9798	-13.202	8.235354	1.1333

Kırmızı ve NIR bantların kazanç değerleri bant aralıkları daha geniş olduğu için daha düşük değerlere sahiptir.

4. RADYOMETRİK DÜZELTME

Radyometrik düzeltme, radyometrik kalibrasyon ile tespit edilmiş kalibrasyon parametrelerinin uygulanması sonucu elde edilir. Bu bölümde Bölüm 2 ve Bölüm 3'te bahsedilen vöntemlerle elde edilen radyometrik kalibrasyon parametrelerinin uvgulanması sonucu gerçekleştirilen radyometrik düzeltme işlemlerinden bahsedilmektedir.

a. Radyometrik Eşitleme

Görüntülerde gözlemlenen şeritlerin giderilmesi radyometrik eşitleme olarak da adlandırılır. Radyometrik eşitleme için literatürde öne çıkan yöntemler değerlendirilmiş ve bu çalışmada önerilen yaklaşımla karşılaştırma ve analiz yapılmıştır. Şeritlenmenin giderilmesinde şu iki temel yaklaşım dikkate alınmıştır:

- (1) Frekans uzayında filtreleme,
- (2) Görüntü tabanlı istatistiksel yöntemler.

Fourier uzayında süzgeçleme görüntü işleme alanında kullanılan basit ama etkin bir yöntemdir. Bilindiği üzere bir spektrumun bileşenleri görüntüyü oluşturan sinüs dalgalarının genliğini belirler. DFT (Discrete Fourier Transform) spektrumundaki herhangi bir frekansta yüksek genlik değeri o frekanstaki bir sinüs dalgasının görüntüde baskın olduğunu gösterir.



Şekil 13. Frekans filtreleme akış şeması

Periyodik şeritlenme gürültüsü ya da satranç örüntü gürültüsü görüntünün tahtası spektrumunda yüksek bir tepe olarak gözlemlenir. Bu frekansı bastıracak bir süzgecin frekans uzayında uygulanması gürültünün görüntüden kaldırılmasını sağlamaktadır.

İdeal alçak geçiren süzgeçleme (Şekil 14. birinci satır) uygulandığında görüntüde 'ringing' olarak bilinen bir bozulma göze carpmaktadır. Kuvvetli kenarların etrafında dalgalanma olarak gözlemlenen bu bozulmayı önlemek için süzgeç ile gösterildiği denklem (6) ve (7) gibi tasarlanmıstır (Şekil 14. ikinci satır). Denklemlerde H filtrenin kendisi, u ve v ise uzamsal değişkenlerdir. Şeritlenme yalnızca dikey eksende gözlemlenmektedir. Bu yapı Fourier spektrumunda yatay eksendeki bileşenlere karşılık geldiğinden süzgeç dikey bir yapıda tasarlanmıştır. Böylece dikeydeki yüksek frekanslar bastırılırken görüntüde yatay öznitelikler ve kenarlar yumuşatılmamış olur. Örnek sonuçlar Şekil 15'te gösterilmiştir.

$$H(u,v) = \frac{1}{1 + (\sqrt{2} - 1) \left[\frac{D(u,v)}{D_0} \right]^{2n}}$$
(6)

$$D(u,v) = \sqrt{u^2 + v^2}$$
 (7)



Şekil 14. Birinci satır: ideal alçak geçiren süzgeç; ikinci satır Butterworth süzgeci



Şekil 15. Orijinal, ideal alçak geçiren, Butterworth

b. Bağıl Radyometrik Kalibrasyon

radyometrik Bağıl kalibrasyonda temel prensip, bütün dedektörlerin aynı hedefe bakması durumunda hepsinin avnı DN değerini üretmesidir. Eğer homoien bir hedef bulunur ve aörüntülenirse tüm dedektörlerin üretmesi gereken değer sahnenin ortalama parlaklık değeri olacaktır.

Örneğin aranan kazanç değerleri g_i olsun. Görüntüde i'nci dedektörün ürettiği her bir benek değeri şu şekilde yazılabilir (8):

$$c_i = g_i \times s \tag{8}$$

Homojen bir bölgede tüm benek değerlerinin eşit olması gerektiğinden bu değer de sahnenin ortalama parlaklık değerine eşit olacağından değerleri aşağıdaki gibi hesaplanır (9):

$$g_i = \frac{c_i}{\mu} \tag{9}$$

Formülde μ bölgenin ortalama parlaklık değeridir.

Şekil 17. ile farklı bağıl radyometrik kalibrasyon karşılaştırılması vöntemlerinin görsel verilmektedir. laboratuvar Yerde yapılan kalibrasyonu daha sonuçları da cizgilendirmektedir. Frekans filtreleme ve WFAF şeritlenmeyi azaltmakla vöntemleri birlikte bantlanmava vol acmaktadır. Sapma acısı 0 derece ile cöllerden gerceklestirilen kalibrasvon sonucu seritlenmeler temizlenmektedir fakat vapay bantlanmalar ortaya cıkmaktadır. Yaklasık

90 derece sapma açısı ile gerçekleştirilen bağıl radyometrik düzelme ise görsel olarak en iyi sonucu vermektedir. Tablo 8. ile gösterilen Arabistan

yarımadasından çekilmiş homojen çöl bölgesinin ham görüntü ve farklı yöntemler ile işlenmiş seviye 1 görüntülerin ortalama ve standart sapma sonuçları gösterilmektedir. Frekans filtreleme (FF) ve WFAF L0 görüntünün ortalama değerlerini korumakla birlikte statik ofsetli Sapma 0° ve dinamik ofsetli Sapma 90° görüntülerde ofset değerleri çıkarıldığı için ortalama düşmektedir. Dinamik ofsetli Sapma 90° en düşük standart sapma değerine sahip görüntü üretmektedir. Dinamik ofsetli sapma 90° yönteminin sonucu Şekil 16 ile gösterilmektedir. Şekil 18. ile L0, 0 derece düzeltilmiş, 90 derece ile düzeltilmiş görüntülerin seçilen homojen bir satırının tepki değerleri gösterilmektedir. L0 satırının sağ ve sol tarafları arasında oran farkı görülmektedir. 0 ve 90 derece sapma ile düzeltilmiş satırlarda ise daha homojen tepki değerleri görülmektedir. 0 ve 90 satır benek değerleri karşılaştırıldığında ise 0 derece satır değerlerinde bölgesel dalgalanma olmakla birlikte 90 derece satırda bu etki görülmemektedir.

Yapılan karşılaştırmalar sonucu dinamik ofset ile düzeltilmiş 90 derece sapma bağıl radyometrik düzeltmenin en iyi sonucu verdiği görülmektedir. Göktürk-2 uydu görüntülerinin bağıl radyometrik kalibrasyonu icin bu yöntemin kullanılmasının en basarılı sonucları üreteceği sonucuna varılmıştır. 2014 yılı görüntülerinden elde edilmiş bağıl radyometrik kalibrasyon parametrelerinin 2014 ve 2015 yılına ait Tuz Gölü görüntülerinin pan bantlarını herhangi bir şeritlenme veya bantlanma üretmeden düzeltebildiği 19. Şekil ile gösterilmektedir.



Şekil 16. Arabistan'a ait (a) L0 görüntüler (b) düzeltilmiş görüntüler



Şekil 17. Farklı Bağıl Radyometrik Düzeltme yöntemlerinin görsel karşılaştırılması

M.TEKE vd.



Şekil 18. Aynı satırda L0 Görüntü, 0° Sapma ve 90° Sapma ile düzeltilmiş görüntülerin benek değerleri

46







Şekil 20. Bağıl radyometrik kalibrasyonun farklı pan keskinleştirme yöntemlerine etkisi, (a) Optimized HPF yöntemi, (b) HCS yöntemi

Son olarak bağıl radyometrik düzeltmenin pan keskinleştirme yöntemlerinin görsel kalitesine etkisi

Şekil 20 ile gösterilmektedir. Yüksek Geçirgen Süzgeçleme (YGS, Optimized HPF (Gangkofner, vd., 2008)) ile Hiperküre Renk Uzayı dönüşümü (HCS (Padwick, vd., 2010)) yöntemleri karşılaştırılmıştır. Optimized HPF yönteminde bağıl kalibrasyonun etkileri Seviye 0 (L0) ve Seviye 1 (L1) görüntüler karşılaştırıldığında görülebilmektedir. HCS yönteminde ise bağıl radyometrik kalibrasyonun etkisi daha kısıtlıdır.

Tablo 8. Arabistan L0 görüntü test sonuçları

Görüntü	L0	FF	WFAF	Sapma 0°	Sapma 90°
Ort.	762.42	764.59	764.60	750.00	755.22
Std. Sapma	26.78	25.81	26.40	23.11	21.46

c. Mutlak Radyometrik Kalibrasyon

Tuz Gölü'nden Göktürk-2 uydusunun Landsat gerçekleştirilen çapraz radvometrik 8 ile kalibrasyonu farklı özelliklere sahip alanlarda test edilmiştir. Farklı bölgelerden 4'er adet örnek seçilerek gerçekleştirilen testlerin bantlara göre ortalama sonuçlar Tablo 9 ve ortalama hataları Tablo 10 ile gösterilmektedir. En yüksek hata oranı NIR bandında görülmektedir. Elde edilen radyometrik hata değerleri Landsat 8'in kalibrasyon belirsizliklerini de içermektedir. En doğru radyometrik kalibrasyon parametreleri yersel ölçümler (spektral, meteorolojik ve atmosferik) kullanılarak gerçekleştirilen mutlak kalibrasyon ile elde edilebilir.

Tablo 9. Göktürk-2 Çapraz Mutlak Kalibrasyon Sonuçlarının farklı bantlara göre doğrulanması

. T		Landsat-8	Göktürk-2	Hata	
öli	Kırmızı	0.5383	0.5218	0.0165	
ы	Yeşil	0.4482	0.4466	0.0039	
Τu	Mavi	0.4047	0.4032	0.0053	
	NIR	0.5758	0.5675	0.0108	
		Landsat-8	Göktürk-2	Hata	
ц.	Kırmızı	0.1291	0.1118	0.0173	
3 it k	Yeşil	0.1444	0.1414	0.0057	
ш	Mavi	0.1679	0.1347	0.0332	
	NIR	0.5071	0.5389	0.0319	
		Landsat-8	Göktürk-2	Hata	
ak	Kırmızı	0.2615	0.2665	0.0050	
pr	Yeşil	0.2079	0.2124	0.0045	
Ĕ	Mavi	0.2050	0.1858	0.0192	
	NIR	0.3569	0.3639	0.0075	

Tablo	10	Göktürk-2	Çapraz	Mutlak
Kalibrasyon		ortalama doğr	ulukları	

Bölge	Tuz Gölü	Bitki	Toprak	
Hata	%0,9109	%2,2012	%0,9036	

Bitkilerdeki farklılığın temel nedeni Göktürk-2 ve Landsat uydularının Kırmızı ve Kızılötesi bant genişlikleri arasında 4 kat farklılık olması ile açılardan bakıldığında bitkilerde farklı yansımanın değişmesine sebep olan homojen olmayan BRDF(Bi-directional Reflectance Distribution Function) özelliğidir. BRDF fonksiyonu yarı küre üzerinde nesnelerin bakış açısına göre gelen ışımayı hangi oranda ilettiklerini tanımlayan bir fonksiyondur, ideal olarak yarı küre üzerinde her nesne için sabit homojen bir değer olması beklenir.

Göktürk-2 görüntülerinin Landsat 8 uydu görüntüleri ile bitki indeksi değerlerinin (NDVI – Normalized Difference Vegetation Index) karşılaştırıldığı çalışmada her iki uydu arasında 0.06 (%3) fark çıkmıştır (Kalkan, vd., 2015).

ç. Kazanç Modlarının Doğrulanması

Dünyadaki herhangi bir yerin aydınlanması bölgesel ve mevsimsel olarak değişebilmektedir. Bu farklı aydınlanma şartlarına uygun görüntü çekimi için Göktürk-2 uydusu 7 farklı kazanç modunda görüntü çekebilmektedir. Çalışılacak kazanç moduna göre o bandın kazanç ve ofset değerleri hesaplanabilir. Her kazanç modu için kullanılan katsayılar Tablo 11 ile verilmektedir.

Tablo 11. Göktürk-2 kazanç modları ve katsayıları

Kazanç Mod	-2	0	2	4	6	8	10
Kazanç Katsayısı	0.99	1.48	2	2.5	3	3.5	4

İstenilen bir kazanç modunun kazanç değeri her bant için o bandın ilgili kazanç modunda ki kazanç katsayısı değerine bölünerek elde edilir(10):

$$Bant Kazanci = \frac{Kazanc}{Kazanc Katsayısı}$$
(10)

Uydunun görüntü çektiği farklı modların doğrulanması için Cezayir kalibrasyon sahasından farklı kazanç modu ayarlarında görüntüler alınmıştır (Tablo 12 ve Şekil 21). Tabloda uydunun yuvarlanma ekseninde dönüşü ve aydınlanma değeri (Güneş'in dik geldiği noktada %100 olacak şekilde) gösterilmiştir. Bu görüntülerin benek değerleri kazanç modlarına ait kazanç katsayıları kullanılarak normalleştirilmiştir.

Tablo 12. Kazanç Modu Test Görüntüleri Çekim Bilgileri

Kazanç Çekim Zamanı Modu (UTC)		Yuvarlanma (Roll) Açısı	Aydınlanma	
-2	2014-01-07 10:06	0.60°	%36,6	
0	2014-01-29 10:05	3.47°	%41,4	
2	2014-02-09 10:04	5.24°	%45,6	
4	2014-02-20 10:03	7.25°	%50,8	
6	2014-02-23 10:11	-9.73°	%54,2	

Her banda ait sayısal değer o bandın kazanç katsayısı'na (Tablo 11) bölünerek ilgili değerler karşılaştırılmıştır. -2, 0, 2, 4 ve 6 kazanç moduna sahip bantların sayısal değerleri ve normalleştirilmiş değerleri Tablo 13 ile verilmektedir.

Şekil 21 ile kazanç modu 4 ile çekilen görüntünün normalleştirildiğinde kazanç modu -2 ile çok yakın renk değerlerine sahip olduğu gösterilmektedir. Şekil 21 ile gösterilen görüntülerin pan bantlarının normalleştirilmeden önce her sütunun ortalama değeri ve normalleştirilmiş değerleri sırasıyla Şekil 22 ve Şekil 23 ile gösterilmektedir. Gain 2 kazanç modu ile çekilen görüntüde ince bulutlar olduğu için ortalama değerleri bazı sütunlarda yüksek çıkmıştır. Ayrıca L1 görüntüler ile çalışıldığı için görüntülerin konum farkları görüntülerin sayısal değerlerinde küçük farklılıklara sebep olmuştur.

Tablo 13. Farklı kazanç modlarına ait benek sayısal değerleri ve normalleştirilmiş değerler

Sayısal Değer					Ν	lorma	alleşti	rilmi	ì
-2	0	2	4	6	-2	0	2	4	6
306	423	585	726	956	309	286	293	290	319
311	429	593	734	968	314	290	297	294	323
316	436	603	748	986	319	295	302	299	329
316	436	603	747	985	319	295	302	299	328
315	435	602	745	983	318	294	301	298	328
316	435	601	744	980	319	294	301	298	327
318	440	609	754	994	321	297	305	302	331
318	440	607	751	989	321	297	304	300	330
317	438	606	750	989	320	296	303	300	330
318	439	606	750	987	321	297	303	300	329
320	441	611	756	994	323	298	306	302	331
318	439	607	751	985	321	297	304	300	328
317	438	606	750	984	320	296	303	300	328





Şekil 21. Göktürk-2 Kazanç Modlarının Karşılaştırılması



Şekil 22. Çöl görüntülerine ait ortalama sayısal değerler





Yukarıdaki analize dayanarak, Tablo 7 ile verilen kazanç değerleri kullanılarak alınan görüntülerin ışıma değerlerinin doğal renklere yakın olması için Tablo 14'deki kazanç modları kullanılarak görüntü alınması önerilmektedir.

Tablo 14. Farklı mevsimler için önerilen kazanç modları

Bant	Yaz	Bahar	Kış
Pan	0	0 2	
Kırmızı	-2	0	2
Yeşil	4	6	10
Mavi	0	2	8
NIR	-2	0	4

5. SONUÇ

Bu çalışmada Göktürk-2 uydusu için ayrıntılı radyometrik kalibrasyon araştırmalarının analizleri sunulmaktadır. (Atak, vd., 2015) tarafından gerçekleştirilen çalışmada belirtildiği üzere çizgilenme görüntü kalitesini olumsuz olarak etkilemektedir. Bağıl radyometrik kalibrasyon için çeşitli yöntemler karşılaştırılmış, Göktürk-2 sensör modelini kullanan her satır için dinamik ofset hesaplayan bir yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntemde her beneğin tepki değeri, sapma açısı 90 derece ile elde edilmiş özel yörünge ayarlarında çekilmiş görüntüler ile hesaplanmıştır. Elde edilen değerlerinin 2014 ve 2015 yıllarında farklı kazanç modlarında elde edilmiş Tuz Gölü görüntülerine uygulandığında düzeltmenin başarılı olduğu görülmüştür.

Göktürk-2 uydusu için geliştirilen mutlak radyometrik kalibrasyon işlemi, Landsat 8 uydusunun çapraz radyometrik kalibrasyon bilgileri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Böylece atmosferik modelleme ve yersel verilere ihtiyaç olmadan Landsat 8 uydusunun kalibrasyonuna göre %2.2 doğruluk ile Göktürk-2 uydusunun mutlak radyometrik kalibrasyonu gerçekleştirilmiştir.

BILGILENDIRME VE TEŞEKKÜR

Onur Haliloğlu bu çalışmanın yapıldığı tarihte TÜBİTAK UZAY'da çalışmıştır.

Dr. Müh. Albay Okan Atak'a verdiği değerli yorumlar için, görüntü taleplerimizi olabildiğince hızlı işleme alan Ayhan Bulut'a, kalibrasyon görüntülerinin çekilmesinde bizlere yardımcı olan Giray Filiz, Göksel Gürgenburan, Emrah Çınar, Ferdi Büyükgüral, Hasan Şen, Ersan Batur, Önder Karagöz, Taner Gündoğdu ve ismini sayamadığımız Keşif Uydu Tabur Komutanlığı personeline teşekkür etmeyi borç biliriz.

KAYNAKLAR

- Atak, V. O., Erdoğan, M., & Yılmaz, A. (2015, Ocak). Göktürk-2 Uydu Görüntü Testleri. Harita Dergisi, 81(2), 18-33.
- CEOS. (2014). CEOS Cal/Val Portal. 23 Nisan 2014, from http://calvalportal.ceos.org/
- Chander, G., Markham, B. L., & Helder, D. L. (2009). Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. *Remote Sensing of Environment, 113*(5), 893-903. http://www.sciencedirect.com/science/article/p ii/S0034425709000169
- Chander, G., Meyer, D., & Helder, D. (2004, Dec). Cross calibration of the Landsat-7 ETM+ and EO-1 ALI sensor. Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, 42(12), 2821-2831.

- Choi, Y.-W., Harmoul, A., Kang, M., Al Dhafri, S., & Kim, E.-E. (2009). DubaiSat-1 Camera: Pre-launch Performance Characterization. Proceedings of the 60th IAC (International Astronautical Congress). Daejeon, Korea.
- Digital Globe. (2010). Radiometric Use of WorldView-2 Imagery. Tech. rep.
- Fiete, R. D., & Tantalo, T. (2001). Comparison of SNR image quality metrics for remote sensing systems. *Optical Engineering*, 40(4), 574-585. http://dx.doi.org/10.1117/1.1355251
- Finn, M. P., Reed, M. D., & Yamamoto, K. H. (2012). A Straight Forward Guide for Processing Radiance and Reflectance for EO-1 ALI, Landsat 5 TM, Landsat 7 ETM+, and ASTER. Unpublished Report from USGS/Center of Excellence for Geospatial Information Science, 8.
- Gangkofner, U. G., Pradhan, P. S., & Holcomb, D. W. (2008). Optimizing the high-pass filter addition technique for image fusion. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 74(9), 1107-1118.
- Gil, J., Romo, A., Moclán, C., & Pirondini, F. (2015). Deimos-2 Post-launch radiometric calibration. JACIE 2015 (Joint Agency Commercial Imagery Evaluation) Workshop, Tampa, Florida, USA,.
- Gonzalez, R. C., & Woods, R. E. (2002). Digital Image Processing. ed: Prentice Hall Press, ISBN 0-201-18075-8.
- Gunter's Space Page. (2015, Kasım 19). Göktürk-2 Sayfası : http://space.skyrocket.de/doc_sdat/gokturk-2.htm
- Gürbüz, S., Özen, H., & Chander, G. (2012). A Survey of Landnet Sites Focusing on Tuz Gölü Salt Lake, Turkey. International Archives of the Photogrammetry, Australia, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 39, B1.
- Gürol, S., Behnert, I., Özen, H., Deadman, A., Fox, N., & Leloğlu, U. M. (2010). **Tuz Gölü: new CEOS reference standard test site for infrared visible optical sensors.** *Canadian Journal of Remote Sensing, 36*(5), 553-565. http://dx.doi.org/10.5589/m10-086 adresinden alındı

- Gürol, S., Özen, H., Leloğlu, U., & Tunalı, E. (2008). **Tuz Gölü:** New absolute radiometric calibration test site. *ISPRS Congress, Beijing, China*, (pp. 3-11).
- Holst, G. C., & Lomheim, T. S. (2007). *CMOS/CCD* sensors and camera systems (Vol. 408). JCD Publishing.
- Kalkan, K., Orhun, Ö., Filiz, B., & Teke, M. (2015, June). Vegetation Discrimination Analysis from Göktürk-2. Recent Advances in Space Technologies (RAST), 2015 7th International Conference on, (pp. 171-176).
- Markham, B., Barsi, J., Kvaran, G., Ong, L., Kaita, E., Biggar, S., . . . Helder, D. (2014). Landsat-8 operational land imager radiometric calibration and stability. *Remote Sensing*, 6(12), 12275-12308.
- Odongo, V. O., Hamm, N. A., & Milton, E. J. (2014). Spatio-temporal assessment of Tuz Gölü, Turkey as a potential radiometric vicarious calibration site. *Remote Sensing*, 6(3), 2494-2513.
- Ozen, H., Fox, N., Leloglu, U., Behnert, I., & Deadman, A. (2011, July). **The 2010 Tuz Gölü field campaign - An overview.** *Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2011 IEEE International,* (pp. 3867-3870).
- Padwick, C., Deskevich, M., Pacifici, F., & Smallwood, S. (2010). WorldView-2 pansharpening. Proceedings of the ASPRS 2010 Annual Conference, San Diego, CA, USA, 2630.
- Pande-Chhetri, R., & Abd-Elrahman, A. (2011). De-striping hyperspectral imagery using wavelet transform and adaptive frequency domain filtering. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 66*(5), 620-636. http://www.sciencedirect.com/science/article/p ii/S0924271611000530
- Pesta, F., Helder, D., & Ulmer, J. (2015). Landsat 8 OLI Relative Radiometric Correction Comparison between On-Board and Vicarious Techniques. JACIE 2015 (Joint Agency Commercial Imagery Evaluation) Workshop, Tampa, Florida, USA,.

- Roy, D., Wulder, M., Loveland, T., C.E., W., Allen, R., Anderson, M., . . . Zhu, Z. (2014). Landsat-8: Science and product vision for terrestrial global change research. *Remote Sensing of Environment*, 145, 154-172. http://www.sciencedirect.com/science/article/p ii/S003442571400042X
- Scheffler, D., & Karrasch, P. (2014). Destriping of hyperspectral image data: an evaluation of different algorithms using EO-1 Hyperion data. Journal of Applied Remote Sensing, 8(1), 083645. http://dx.doi.org/10.1117/1.JRS.8.083645
- Shin, D., Jin, C., Ahn, H., & Choi, C. (2015). Radiometric cross-calibration of KOMPSAT-3 AEISS with Landsat-8. Radiometric cross-calibration of KOMPSAT-3 AEISS with Landsat-8, 9644, 96441T-96441T-6. http://dx.doi.org/10.1117/12.2195643
- Slater, P., Biggar, S., Holm, R., Jackson, R., Mao, Y., Moran, M., . . . Yuan, B. (1987).
 Reflectance- and radiance-based methods for the in-flight absolute calibration of multispectral sensors. *Remote Sensing of Environment*, 22(1), 11-37. http://www.sciencedirect.com/science/article/p ii/0034425787900265
- Teke, M. (2016, Ocak). Satellite Image Processing Workflow for RASAT and Göktürk-2. Havacilik ve Uzay Teknolojileri (Huten) Dergisi, 9(1).
- Teke, M., Tevrizoglu, I., Oztoprak, A., Demirkesen, C., Acikgoz, I., Gurbuz, S., . . . Avenoglu, B. (2015, June).
 GEOPORTAL:TUBITAK Uzay satellite data processing and sharing system. Recent Advances in Space Technologies (RAST), 2015 7th International Conference on, (pp. 233-238).
- Thome, K. (2001). Absolute radiometric calibration of Landsat 7 ETM+ using the reflectance-based method. *Remote Sensing* of *Environment*, 78(1-2), 27-38. http://www.sciencedirect.com/science/article/p ii/S0034425701002474

- Vermote, E., Tanre, D., Deuze, J., Herman, M., & Morcette, J.-J. (1997, May). Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum, 6S: an overview. Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, 35(3), 675-686.
- Yang, A., Zhong, B., Lv, W., Wu, S., & Liu, Q. (2015). Cross-Calibration of GF-1/WFV over a Desert Site Using Landsat-8/OLI Imagery and ZY-3/TLC Data. *Remote Sensing*, 7(8), 10763-10787.