

GÖKTÜRK-2’NİN RADYOMETRİK KALİBRASYONUNDA RADCALNET VERİLERİNİN KULLANILMASI

İsmail Hakkı DEMİRHAN¹, Kaan KALKAN¹

¹TÜBİTAK Uzay Teknolojileri Araştırma Enstitüsü, Uzaktan Algılama Grubu, ODTÜ Yerleşkesi, 06800, Çankaya, Ankara,
(hakki.demirhan, kaan.kalkan@tubitak.gov.tr)

ÖZET

Multispektral uydu görüntülerinin atmosferik düzeltilmesi ile elde edilen atmosfer üstü (AÜ) ve atmosfer altı (AA) yansıtım ürünleri, bilimsel uygulamalarda sıklıkla kullanılmaktadır. Radyometrik kalibrasyon ve atmosferik düzeltme gibi uzaktan algılama uygulamalarında, yüksek çözünürlüklü uydu görüntüleri kullanılarak hesaplanan AÜ ve AA/yüzey yansıtım sonuçlarının saha ölçüm verileriyle doğrulanması gerekir. Bu çalışma, AÜ yansıtım görüntülerini ve kalibrasyon katsayılarını elde etmek için kullanılan, dört multispektral bant ve 5 m uzaysal çözünürlüğe sahip Göktürk-2 görüntülerini ele almaktadır. İlgili görüntülerden sayısal değerlerin (DN) toplanması ve radyometrik kazançların analiz edilmesi için açık kaynak kodlu Python kütüphaneleri kullanılmıştır. Yer koordinatları bilinen ve RadCalNet Portalı ile servis edilen Railroad Valley Playa (RVUS) sahasından toplanan spektral ve atmosferik ölçümler, 6S (Second Simulation of a Satellite Signal in the Solar Spectrum) ve MODTRAN ((MODerate resolution atmospheric TRANsmission) ışıyım transfer kodları ile AÜ spektral veriye dönüştürülmüş ve Göktürk-2’nin kalibrasyon katsayıları elde edilmiştir. RadCalNet verileri ile elde edilen AÜ yansıtım değerleri, Landsat 9 uydu görüntüsü ile doğrulanmıştır. Elde edilen kalibrasyon katsayıları ve farklı zamanlardaki veri setlerine dayalı olarak sahaların AÜ yansıtımlarını karşılaştıran doğrulamalar gerçekleştirilmiştir. Deneyisel sonuçlar, Göktürk-2’nin genel doğrulama eğiliminin RadCalNet sahası ile iyi bir şekilde uyumunu ve sensör stabilitesinin oldukça sabit kaldığını göstermiştir.

Anahtar Sözcükler: Göktürk-2, Landsat 9, Mutlak ve Çapraz Radyometrik Kalibrasyon, RadCalNet, 6S

ABSTRACT

USING RADCALNET DATA IN THE RADIOMETRIC CALIBRATION OF GÖKTÜRK-2

Top of the atmosphere (TOA) and bottom of atmosphere (BOA) reflectance products obtained by atmospheric correction of multispectral satellite images are frequently used in scientific applications. For remote sensing applications such as radiometric calibration and atmospheric correction, TOA and BOA/surface reflectance results calculated using high-resolution satellite images need to be validated with field measurement data. This study deals with Göktürk-2 images with four multispectral bands and 5 m spatial resolution, which are used to obtain TOA reflectance images and calibration coefficients. Open source python libraries collected digital numbers (DN) from related images and analysed radiometric gains. Spectral and atmospheric measurements collected from Railroad Valley Playa site with known ground coordinates served by RadCalNet Portal were converted into TOA spectral data 6S and MODTRAN radiative transfer codes, and the calibration coefficients of Göktürk-2 were determined. TOA reflectance values obtained with RadCalNet data were validated with Landsat 9 image. Validations were performed comparing TOA reflectance values of the sites based on the obtained calibration coefficients and the data sets at different times. The experimental results showed that the overall trend of validation of Göktürk-2 was well fitted in the RadCalNet site, and the sensor stability remained reasonably constant.

Key words: Göktürk-2, Landsat 9, Absolute and Cross Radiometric Calibration, RadCalNet, 6S

1. GİRİŞ

Yerli imkânlarla tasarlanmış olan Göktürk-2 uydusu, yüksek çözünürlüklü bir yer gözlem uydusudur. Görüntüleri, inceleme ve araştırma amaçlı Türk Silahlı Kuvvetleri ve kamu kurum/kuruluşları tarafından kullanılmaktadır. 2012 yılında Çin’deki Jiuquan Fırlatma Üssü’nden uzaya fırlatılan Göktürk-2 uydusu aktif olup görevini başarıyla sürdürmektedir. TÜBİTAK Uzay Teknolojileri Araştırma Enstitüsü tarafından bağlı, çapraz ve mutlak radyometrik kalibrasyon olmak üzere üç kapsamda devam eden Göktürk-2 uydusunun radyometrik kalibrasyon araştırma geliştirme faaliyetlerine Türkiye’deki tek radyometrik kalibrasyon test sahası olan Tuz Gölü kullanılarak başlanmıştır (Gürol vd., 2008). Göktürk-2’nin mutlak radyometrik kalibrasyonunun ön araştırma sonuçlarını içeren (Demirhan ve Sakarya, 2016) çalışması, Göktürk-2’nin mutlak radyometrik kalibrasyonunun NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) temelli yapıldığı (Sakarya vd., 2016) çalışması, Göktürk-2’nin Landsat 8 ile çapraz radyometrik kalibrasyonu üzerine yapılan (Demirhan vd., 2017) çalışması, 2015, 2016 ve 2017 Tuz Gölü kampanya verilerini kullanarak Göktürk-2 bantlarına ait radyometrik kazançların tespit edilerek kıyaslanması üzerine yapılan (Demirhan ve Telatar, 2018), (Deveci ve Demirhan, 2018) çalışmaları TÜBİTAK UZAY’da VIII. UZAKTAN ALGILAMA-CBS SEMPOZYUMU (UZAL-CBS 2022), 17-19 Kasım 2022, Ankara

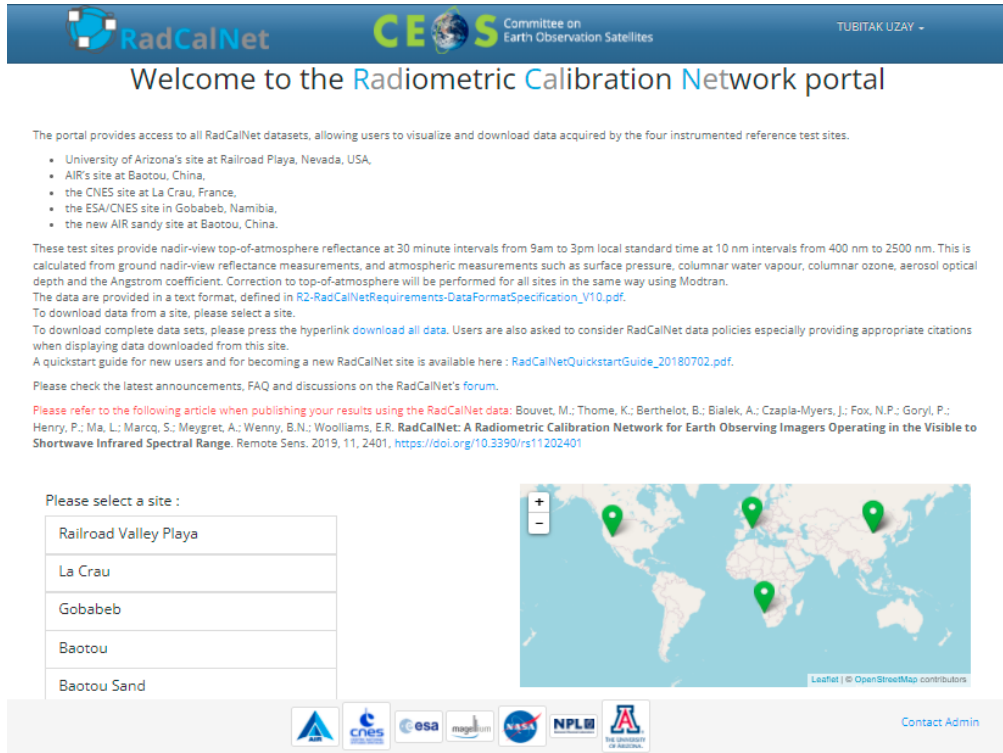
gerçekleştirilmiş mutlak ve çapraz radyometrik kalibrasyon çalışmalardan bazıları olup yapılan araştırma geliştirme çalışmaları devam etmektedir. (Kim ve Lee, 2020) ve (Kim ve Lee, 2021) çalışmaları KOMPSAT-3A uydusunun RadCalNet verileri ve açık kaynak kodlu bir yazılım servisi (SaaS) aracılığıyla AA/AÜ yansıtım verilerinin NDVI analizi ile değerlendirildiği çalışmalardandır. Ayrıca (Ma vd., 2022) çalışması Landsat8, Sentinel-2A, Worldview-3 uydusu ve RadCalNet verileri ile AA ve AÜ yansıtım analizlerinin gerçekleştirilip belirsizlik analizinin yapıldığı kapsamlı çalışmalardandır.

Uydu görüntüleri için kalibrasyon ve doğrulama, temel ön işleme süreçlerindendir. Uydu sensörlerinin kalibrasyonu için kullanılan bir kalibrasyon sahası olmadığı durumda veya geçmiş döneme ait görüntülerden elde edilen yansıtım değerleri için bir doğrulama gerekiyorsa, (Bouvet vd., 2019) çalışması ile sunulan RadCalNet verilerinin kullanımı en pratik yaklaşımlardan biridir. Bu çalışmada, radyometrik kalibrasyon ağ portalı aracılığıyla servis edilen Railroad Valley Playa sahasına ait spektral ve atmosferik veriler ile ilgili sahalardan çekilen Göktürk-2 görüntüleri kullanılarak mutlak radyometrik kalibrasyonun uygulanması sonunda kalibrasyon katsayılarının elde edilmesi ve AÜ yansıtım değerlerinin kıyaslanması amaçlanmaktadır. AÜ yansıtım doğrulaması, kalibrasyon katsayılarının doğruluğu açısından gereklidir. Dolayısıyla, yansıtım değerlerini doğrulamak için RadCalNet verileri kullanılmıştır. Bu nedenle yapılan çalışma, Göktürk-2 ile Tuz Gölü'nde gerçekleştirilen mutlak radyometrik kalibrasyon çalışmaları kapsamında analiz edilen kalibrasyon parametrelerinin farklı sahalarla doğrulanması açısından referans olarak değerlendirilebilir.

Uzaktan algılama çalışmaları kapsamında kullanılan kalibrasyon/doğrulama portalı (RadCalNet), radyometrik kalibrasyon ve doğrulamayı desteklemek için kullanılan dünya çapında dört referans sahayı işleten Yer Gözlem Uyduları Komitesi (CEOS)'ne ait Kalibrasyon ve Doğrulama Çalışma Grubu'nun bir girişimidir. RadCalNet verileri, optik görüntüleme sensörlerinin radyometrik kararlılığını ve doğruluğunu değerlendirmek ve birden fazla sensörün birbirleri arasındaki radyometrik tutarlılığını belirlemek için ücretsiz olarak hizmete açılmıştır. Bu kapsamda RadCalNet verileri, Göktürk-2'nin mutlak radyometrik kalibrasyonu ile kalibrasyon katsayılarının temini için ilk defa uygulanmıştır.

2. UYGULAMA

Atmosferik ölçüm cihazları olmayan kalibrasyon sahalarında, uydu görüntülerinin çekim zamanındaki atmosferik koşullarla ilgili girdi verilerini elde etmek zordur. RadCalNet portalı, hava durumu ya da ölçüm cihazları ile alakalı olumsuz bir durum olmaması kaydı ile ilgili parametreleri 30 dk. aralıklarla sağlamaktadır. İlgili veriler, uydunun ölçüm sahasından geçiş anında ara değerlendirme yapılarak elde edilmektedir. Ayrıca RadCalNet portalı AÜ yansıtım ürünleri için belirsizlik verileri de sağlayabilmektedir. RadCalNet portal arayüzü Şekil 1 ile görülmektedir.

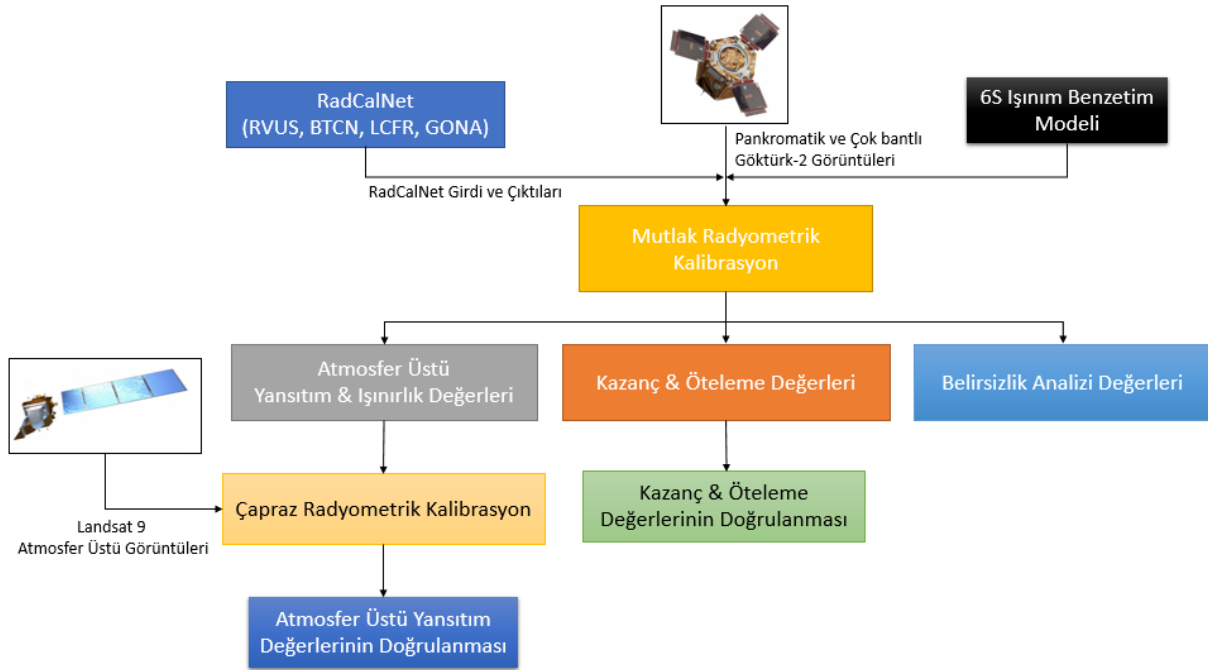


Şekil 1. Radyometrik Kalibrasyon Ağ Portalı Arayüzü (Bouvet vd., 2019)

RadCalNet'in kullanımı ile sensörler arası karşılaştırmalar, ışınım benzetim modellerinin değerlendirilmesi ve yüzey yansıtım değerlerinin doğrulanması gibi çalışmalar periyodik olarak gerçekleştirilerek mutlak ve çapraz radyometrik kalibrasyon çalışmaları beklenen seviyenin oldukça ötesine geçmiştir. RadCalNet portalında yer alan dört saha şu şekildedir: ABD'deki Railroad Valley Playa (RVUS), Fransa'daki La Crau (LCFR), Çin'deki Baotou (BTCN) ve Güney Afrika'daki Gobabeb (GONA) sahalarıdır. RVUS sahası 2013'ten beri veri sağlarken, LCFR, BTCN ve GONA sahaları sırasıyla 2015, 2016 ve 2017'den beri veri sağlamaktadır. Çalışmada Göktürk-2 uydusunun RVUS sahasından geçtiği güne ait veriler kullanılmış GONA sahasından birkaç gün farkla alınan görüntü ve veriler ile doğrulama analizi yapılmıştır.

RadCalNet verileri girdi ve çıktı olarak iki türlü sunulmaktadır. Standart bir RadCalNet girdi dosyası, 30 dakikada bir (yerel saat 09:00 ile 15:00 arasında) ve 400-2500'nm aralığında 10'nm'de bir ölçülen yüzey yansıtım verilerinden, RadCalNet çıktı dosyası ise MODTRAN 6 simülatörünün kullanılmasıyla elde edilen AÜ yansıtım verilerinden oluşmaktadır. Belirsizlik bilgisi, girdi ve çıktıya ait her iki veriden de elde edilebilmektedir.

Çalışmada; Railroad Valley Playa sahası üzerinden geçen Göktürk-2 uydusu ile Landsat 9 uydusundan (USGS) yakın zamanlı alınan görüntü çiftleri, RadCalNet verileri ile 6S ve MODTRAN Işınım Benzetim Modelleri kullanılarak mutlak radyometrik kalibrasyon yöntemi uygulanmıştır. Aynı zamanda yersel spektral ölçümlerin 6S (v.4.1 - 6S Model) ışınım benzetim modeline girdisi ile elde edilen AÜ yansıtım değerleri ve RadCalNet (MODTRAN v.6) AÜ yansıtım değerleri, 1 gün ara ile aynı bölgeden geçen Landsat 9 AÜ görüntüleri ile karşılaştırılarak çapraz radyometrik kalibrasyon uygulanmıştır. Bölgeden geçen Göktürk-2 uydusu ile Landsat 9 uydusunun geçiş tarihlerinin yakın tarihli olması ve RadCalNet portalı ile aynı güne ait spektral ve atmosferik veriler sağlanması sebebiyle görüntülerin çekim tarihi bu doğrultuda belirlenmiştir. Bu kapsamda uygulanan işlem adımları Şekil 2 ile görülmektedir.



Şekil 2. Mutlak ve çapraz radyometrik kalibrasyon için uygulanan işlem adımları

AÜ yansıtım görüntülerini doğrulamak için Göktürk-2 görüntülerinin deneysel saha ölçümlerinin RadCalNet verileriyle eşleştirilmesi gereklidir. Görüntünün girdi olarak kullanıldığı yansıtım ürünlerini elde etmek için spektral ve atmosferik parametreler gibi çok miktarda bilgi gereklidir. Örneğin, AÜ yansıtımı elde etmek için sensör ve güneş ışınımalarının kazanç/öteleme (bant özellikli) değerleri, görüntü çekim günü/ayı, güneş-dünya uzaklığı ve yerden alınan spektral ölçüm parametreleri girdi olarak kullanılırken ozon ve su buharı miktarı, aerosol optik kalınlığı (AOT), güneş zenit ve güneş azimut açıları, uydu zenit ve azimut açıları gibi atmosferik ve uydu/güneş konum değerlerinin kullanılması gerekir.

2.1. 2022 yılı Verileri ile Göktürk-2'nin Mutlak Radyometrik Kalibrasyonu

Göktürk-2 uydu görüntüleri; Railroad Valley Playa için 16:40 (UTC) saatinde atmosferik/mevsimlik farklılıkları minimize edebilmek için Ağustos ve Eylül ayları içerisinde ilgili sahaları kapsayacak şekilde çekilmiştir.

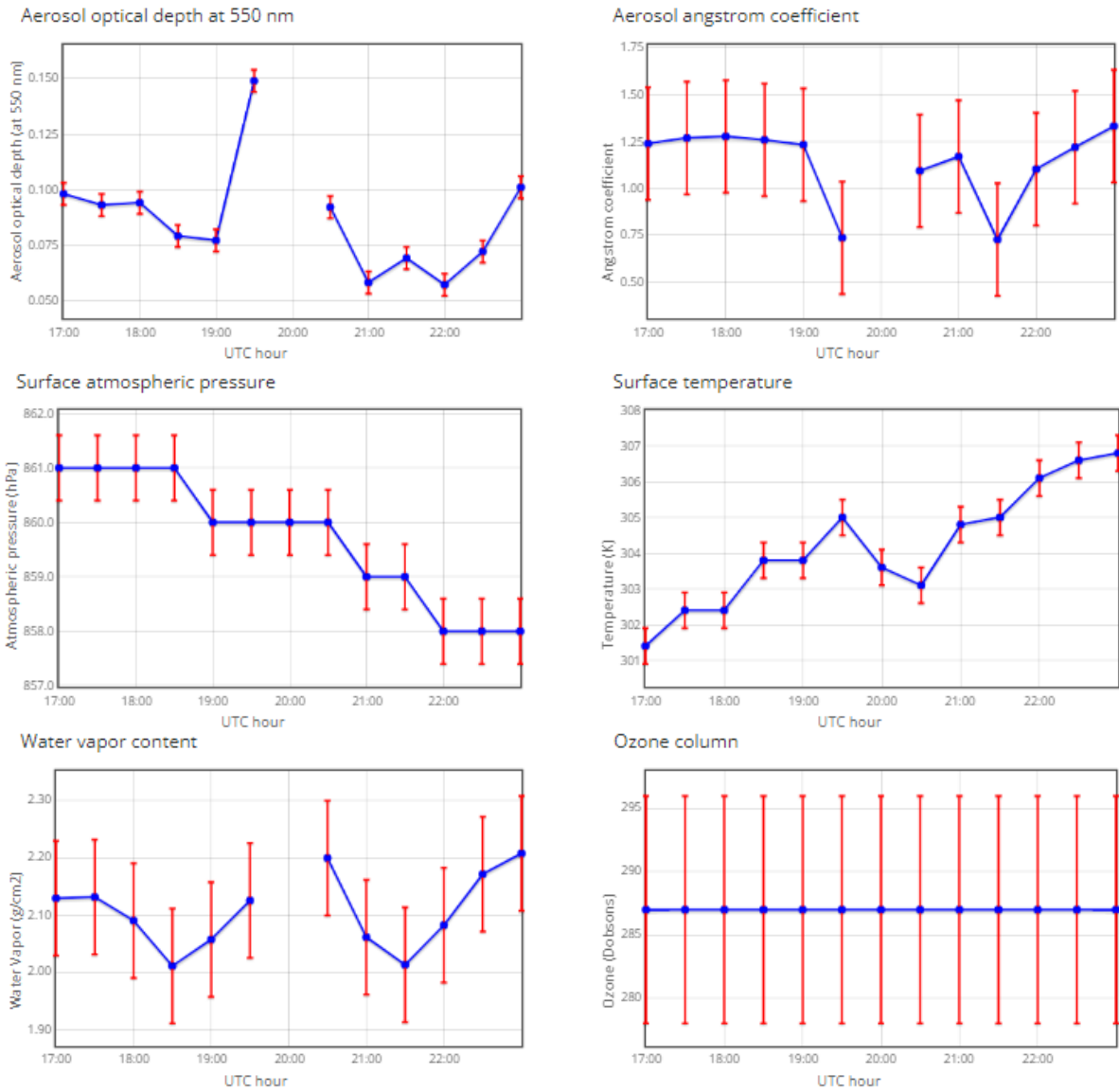
Kalibrasyon ve AÜ yansıtım parametreleri doğrulama amaçlı kullanılmak ve aynı tarihlere (uydu geçiş ve spektral) ölçümleri denk getirmek üzere ilgili sahadan 2 adet görüntü çekilmiştir. Çekilen görüntülerin tarihleri ve hedef gözleme geometrisi ölçümleri Çizelge 1 ile görülmektedir. Çalışmaya ait spektral ve atmosferik ölçümlerinin tamamına RadCalNet aracılığıyla erişilmiştir.

Çizelge 1. Göktürk-2 uydusunun test sahalarından geçiş tarihleri ve hedef gözleme geometrisi ölçümleri

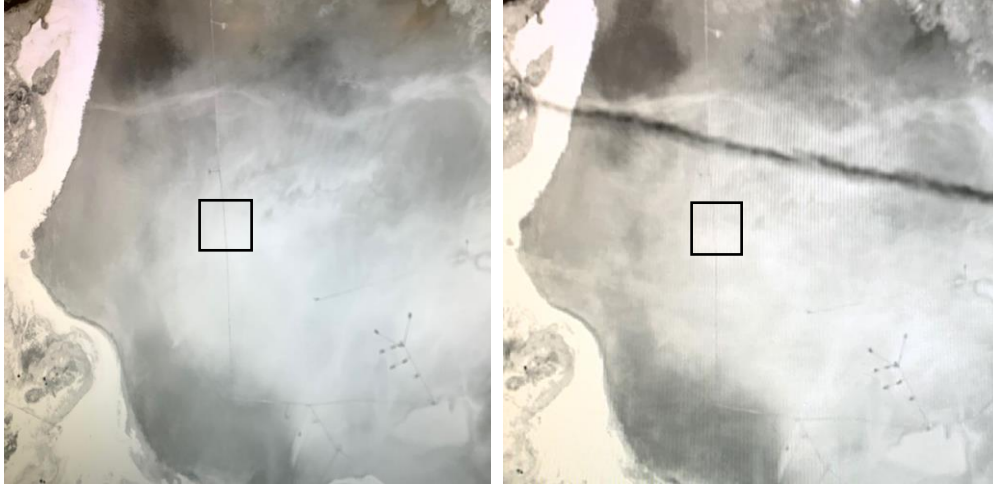
GK-2	Tarih	Zaman (UTC)	Güneş Zenit	Güneş Azimut	Uydu Zenit	Uydu Azimut
RVUS	12.08.2022	16:40	47.44°	106.76°	0.9°	95°
RVUS	06.09.2022	16:40	52.04°	116.44°	3.3°	255°

Göktürk-2'nin sahalardan geçiş tarihi belirlenirken uydu zenit açısının olabildiğince 0°'ye yakın olanı (Nadir) tercih edilmiştir. İlgili parametre ışıınım benzetim modelleri tarafından kullanıldığından dolayı kalibrasyon katsayılarını ciddi oranda etkileyebilmektedir.

Railroad Valley Playa test sahasından 12.08.2022 tarihinde alınan aerosol optik kalınlık, angstrom, sıcaklık, basınç, su buharı, ozon değerleri Şekil 3 ile RVUS sahasında çekilen Göktürk-2 ve Landsat 9 görüntüleri Şekil 4 ile görülmektedir.



Şekil 3. 12.08.2022 tarihli atmosferik ölçüm değerleri (Bouvet vd., 2019)



Şekil 4. Railroad Valley Playa sahasından çekilen Göktürk-2 (solda) ve Landsat 9 (sağda) görüntüleri

2022 yılı Ağustos ve Eylül ayları içerisinde ilgili test sahalarından Göktürk-2'nin geçişi esnasında toplanan yersel spektral ölçümler kullanılarak uydu geçiş zamanına göre ara değerlemesi yapılmıştır. Test sahalarından toplanan atmosferik ölçümler ile her spektral ölçümün AÜ yansıtım ve ışınlılık değerleri, 6S ve MODTRAN ışınlım benzetim modelleri çalıştırılarak hesaplanmıştır. Hesaplanan AÜ ışınlılık değerleri kullanılarak (1) denkleminde Göktürk-2 uydusunun her bandının kazanç ve öteleme değerleri hesaplanmıştır.

$$\text{Işınlılık} = \text{Kazanç} * \text{Sayısal Değer (DN)} + \text{Öteleme} \quad (1)$$

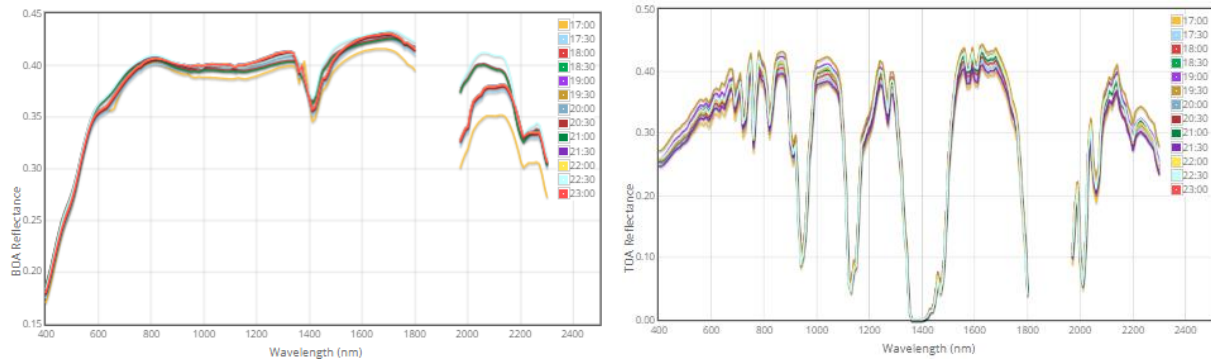
Göktürk-2'nin pan, kırmızı, yeşil, mavi ve NIR bantlarına ait tüm görüntüler sırasıyla 4-2-4-4-2 kazanç faktörleri ile çekilmiştir. Bu mod, Göktürk-2 uydusunun 2018 yılında yapılan mutlak radyometrik kalibrasyon çalışmasında (Deveci 2021) ilgili kazanç faktörleri kullanıldığından dolayı optik sensör stabilitesini test etmek amacıyla tercih edilmiştir. Göktürk-2'nin geçişi ile elde edilen multispektral sensörün bant kazançlarına ait veriler baz alındığında yapılan analiz, bu dizilimdeki kazanç faktörleri ile elde edilen bant kazançlarını ortaya koyması açısından önemlidir. Göktürk-2'nin kazanç faktörlerine karşılık gelen kazanç katsayıları Çizelge 2 ile verilmiştir.

Çizelge 2. Göktürk-2 için kazanç faktörlerine denk gelen kazanç katsayıları

Kazanç Faktörü	-2	0	2	4	6	8	10
Kazanç Katsayısı	0,99	1,48	2	2,5	3	3,5	4

Bu kapsamda Göktürk-2 görüntülerine ait sayısal değerler (DN) ile AÜ ışınlılık değerleri çalışmada kullanılmış, öteleme değeri sıfır alınarak tüm bantlara ait kazanç değerleri hesaplanmıştır. Bu değerler, kazanç faktörlerine karşılık gelen kazanç katsayıları ile ((2) denklemini kullanarak) her bir banda ait bant kazançları analiz edilmiştir. Öteleme değerlerinin sıfır alınmasındaki amaç, test sahasından Göktürk-2 geçişi esnasında tek bir spektral ölçüm alınması ve tek bilinmeyen olarak kazanç değerini elde etmektir. Bu doğrultuda 2 farklı tarihteki spektral ve atmosferik ölçümler için radyometrik kazanç değerleri kestirilmiştir. Elde edilen değerler Çizelge 3 ile verilmiştir.

$$\text{Bant Kazancı} = \text{Kazanç Katsayısı} * \text{Kazanç} \quad (2)$$



Şekil 5. 12.08.2022 tarihli AA ve AÜ Yansıtım Değerleri (Bouvet vd., 2019)

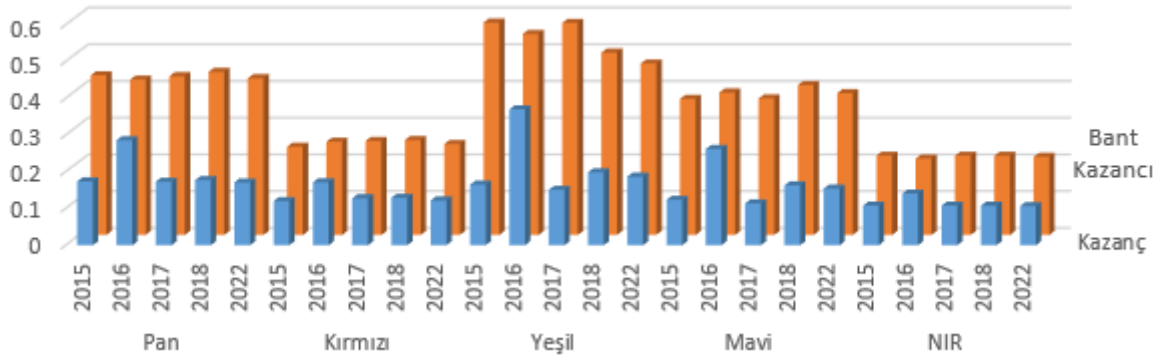
Çizelge 3. Göktürk-2'nin mutlak radyometrik kalibrasyonu sonucu elde edilen tüm bantlara ait kazanç değerleri

		Uydu Geçiş	AÜ Yansıtım	AÜ Işınrlık	Kazanç Faktörü	Kazanç	Bant Kazancı
Pan	MODTRAN	12/8/2022	0.3148	119.5	4	0.170912	0.42728
		6/9/2022	0.3170	111.6	4	0.172276	0.43069
	6S	12/8/2022	0.3114	118.9	4	0.170020	0.42505
		6/9/2022	0.3122	110.4	4	0.170526	0.42631
Kırmızı	MODTRAN	12/8/2022	0.3336	113.3	2	0.122051	0.24410
		6/9/2022	0.3400	107.0	2	0.121353	0.24270
	6S	12/8/2022	0.3368	115.4	2	0.124315	0.24863
		6/9/2022	0.3400	108.0	2	0.122402	0.24480
Yeşil	MODTRAN	12/8/2022	0.3081	125.0	4	0.186937	0.46734
		6/9/2022	0.3078	115.8	4	0.184573	0.46143
	6S	12/8/2022	0.3038	124.6	4	0.186331	0.46582
		6/9/2022	0.3032	115.2	4	0.183691	0.45922
Mavi	MODTRAN	12/8/2022	0.2812	123.5	4	0.154424	0.38606
		6/9/2022	0.2781	113.3	4	0.153933	0.38483
	6S	12/8/2022	0.2718	118.2	4	0.147723	0.36930
		6/9/2022	0.2695	108.6	4	0.147565	0.36891
NIR	MODTRAN	12/8/2022	0.3589	86.08	2	0.106529	0.21305
		6/9/2022	0.3667	81.54	2	0.105615	0.21123
	6S	12/8/2022	0.3699	90.06	2	0.111460	0.22292
		6/9/2022	0.3742	84.44	2	0.109382	0.21876

Farklı kazanç faktörleri ile görüntü çekiminde bant kazançlarının birbirine yakın ve tutarlı olması istenen bir durum olup Göktürk-2'nin geçmiş yıllarda yapılan mutlak radyometrik kalibrasyon çalışmaları farklı kazanç faktörü ile çekildiği için değerlendirmesi bant kazançları üzerinden gerçekleştirilmiştir. (Demirhan ve Telatar, 2018), (Deveci ve Demirhan, 2018), (Deveci 2021) çalışmaları ile 2015, 2016, 2017, 2018 ve 2022 yıllarında elde edilen kazanç ve bant kazancı bilgileri Çizelge 4 ile verilmektedir.

Çizelge 4. Göktürk-2'nin 2015-2022 yılları arası kazanç faktörüne denk gelen bant kazançları

Bant	Yıl	Kazanç Faktörü	Kazanç	Bant Kazancı
Pan	2015	4	0.1739	0.43475
	2016	0	0.286	0.42328
	2017	4	0.173	0.4325
	2018	4	0.1776	0.444
	2022	4	0.1709	0.427
Kırmızı	2015	2	0.1203	0.2406
	2016	0	0.1716	0.2540
	2017	2	0.128	0.2560
	2018	2	0.1292	0.2584
	2022	2	0.1220	0.248
Yeşil	2015	8	0.1653	0.57855
	2016	0	0.370	0.5476
	2017	8	0.151	0.5775
	2018	4	0.1987	0.49675
	2022	4	0.1869	0.467
Mavi	2015	6	0.1236	0.3708
	2016	0	0.2622	0.38805
	2017	6	0.114	0.372
	2018	4	0.1633	0.40825
	2022	4	0.1544	0.386
NIR	2015	2	0.108	0.216
	2016	0	0.1408	0.20838
	2017	2	0.108	0.216
	2018	2	0.1077	0.2154
	2022	2	0.1065	0.213



Şekil 6. Göktürk-2'nin 2015-2022 yılları arası elde edilen kalibrasyon parametreleri

Sensörler arasındaki elektronik tutarlılık ve sensör karakteristiğindeki değişimi gözlemlemek adına 2018 yılında aynı kazanç faktörü ile Tuz Gölü'nde çekilen ve (Deveci, 2021) çalışması kapsamında elde edilen kazanç değerleri ile 10.08.2022 tarihli spektral ve atmosferik ölçümlerin MODTRAN simülatorüne girdisi ile hesaplanan bu çalışma kapsamında analiz edilen parametreler kıyaslanmıştır. Her iki çalışma ile elde edilen sonuçların tüm bantlar için ortalama %5'lik bir dilimde olduğu görülmüştür (Çizelge 5). 2018-2022 yılları arası 4 yıl boyunca gözlenen bu sapma tutarlı olup elde edilen sonuç Göktürk-2 uydusunun kalibrasyon stabilitesini göstermesi açısından büyük öneme sahiptir.

Çizelge 5. Göktürk-2'nin 2018 ve 2022 yılı elde edilen kazanç ve yüzde fark değerleri

	Pan	Kırmızı	Yeşil	Mavi	NIR	Ortalama
2018 Kazanç (Deveci, 2021)	0.1776	0.1292	0.1987	0.1633	0.1077	-
2022 Kazanç (RVUS)	0.1709	0.1220	0.1869	0.1544	0.1065	-
Yüzde Fark (%)	3.77	5.57	5.93	5.45	1.11	4.36

Göktürk-2 uydusunun kırmızı ve NIR bantları daha geniş aralıktan foton topladığı için kazanç değerleri daha düşük elde edilmiştir.

2015, 2016, 2017 ve 2018 yıllarında Tuz Gölü'nde gerçekleştirilen (Demirhan ve Telatar, 2018), (Deveci ve Demirhan, 2018), (Deveci 2021) çalışmaları ile Railroad Valley Playa sahasının kullanıldığı bu çalışma sonucu elde edilen Göktürk-2'nin tüm bantlarına ait kalibrasyon parametreleri kendi içerisinde tutarlıdır (Çizelge 4). Bu sonuç, geçmiş yıllarda Tuz Gölü'nde gerçekleştirilen kalibrasyon faaliyetlerinin RadCalNet Portalı ile servis edilen sahalardan kullanılarak yapılabilmesine zemin hazırlamıştır. Dolayısıyla yapılan bu çalışma, ciddi bir emek ve iş gücü harcanarak sahada gerçekleştirilen mutlak kalibrasyon faaliyetlerinin ücretsiz bir servis aracılığıyla otomatize edilebilmesini mümkün kılmıştır. Aynı zamanda uyduların mutlak radyometrik kalibrasyon faaliyetlerinin, 4 farklı RadCalNet sahası (Railroad Valley Playa, Gobabeb, La Crau ve Baotou) aracılığı ile yıl içerisinde düzenli periyotlarda birkaç kez yapılabilmesini sağlamıştır.

2.2. Göktürk-2'nin Landsat 9'a göre Çapraz Radyometrik Kalibrasyonu

Optik uyduların yörüngedeki durumları değişkendir ve hedef bölgedeki uygulamalar için yansıtım değerleri ve gerekli çevresel değişkenleri elde etmek zordur. Kalibrasyon/doğrulama sahaları mevcut olmayan ve kalibrasyon için sabit alanlara gereksinim duyan optik uydular sensör kalitesini test etmek için AÜ yansıtım değerlerinin periyodik olarak oluşturulması ve bunların referans uydular kullanılarak karşılaştırılması gerekir. Kalibrasyonu gerçekleştirecek uydu ile referans uydunun AÜ yansıtımlarının kıyaslanması ile yapılan yansıtım temelli çapraz radyometrik kalibrasyon işlemi mutlak kalibrasyon gibi düzenli ve periyodik olarak gerçekleştirilmelidir.

Sensörlerin çalışma prensipleri, filtre geçirgenliklerine ve bant yapısına göre farklılık gösterebilir. Uyduların bantlarına ait spektral yapıların farklı olması, radyometrik kalibrasyon işlemi yapılırken meydana gelebilecek sistematik hatayı oluşturmaktadır. Bu hata, uyduların kalibrasyon kalitesine yansarak uydunun sensör kalitesini düşürmektedir. Bu açıdan, uydu sensörlerine bağlı ve özel olarak gelişen bağıl spektral tepkiden (RSR) kaynaklı farklılıklar düzeltilmelidir. Bu yöntem spektral bant ayarlama faktörü (SBAF) olarak adlandırılır (Chander vd., 2013). SBAF yöntemi ile çapraz radyometrik kalibrasyonu yapılan uyduların bağıl spektral tepkileri birbirleri ile dengelenir. Her iki uydunun sensörünün her bir bandına ait spektral aralıklar dikkate alınarak, sensörün bantları arasındaki farklılıktan kaynaklı bozulma ve yan etkiler giderilir. SBAF, (3b) eşitliği ile hesaplanmaktadır.

$$\overline{\rho_{\lambda}} = \frac{\int \rho_{\lambda} \times RSR_{\lambda} d\lambda}{\int RSR_{\lambda} d\lambda} \quad (3a)$$

$$SBAF = \frac{\overline{\rho_{\lambda}}(A)}{\overline{\rho_{\lambda}}(B)} \quad (3b)$$

$$\overline{\rho_{\lambda}}(A^*) = \frac{\overline{\rho_{\lambda}}(A)}{SBAF} \quad (3c)$$

RSR_{λ} = Sensörün bağıl spektral tepkisi

ρ_{λ} = Hiperspektral AÜ yansıtım imzası

$\overline{\rho_{\lambda}}(A)$ = A sensörü için simüle edilmiş AÜ yansıtım

$\overline{\rho_{\lambda}}(B)$ = B sensörü için simüle edilmiş AÜ yansıtım

$\overline{\rho_{\lambda}}(A^*)$ = SBAF kullanılarak A sensörü için kompanse edilmiş AÜ yansıtım

Çapraz radyometrik kalibrasyon çalışması için Railroad Valley Playa sahasından geçen Göktürk-2 ve Landsat 9 uydu görüntüleri kullanılmıştır. Göktürk-2 görüntüsünün Landsat 9'a coğrafi referanslaması yapılarak ölçüm noktalarına ait sayısal değerler (DN) python yazılımı ile dinamik olarak toplanmıştır. Landsat 9 metaverisi ile sağlanan kalibrasyon verileri ve RadCalNet portalı tarafından sağlanan spektral veriler, 6S ve MODTRAN ışınlam benzetim modellerinden geçirilerek AÜ yansıtım değerleri hesaplanmıştır. SBAF değeri hesaplanırken (3a) eşitliğindeki hiperspektral AÜ yansıtım değeri yerine, Railroad Valley Playa sahasından toplanan yersel yansıtım ölçümlerinin MODTRAN ışınlam benzetim modeli aracılığı ile atmosfer üstüne taşınan AÜ yansıtım değerleri kullanılmıştır. Aynı zamanda, ilgili eşitlikte RSR ve AÜ yansıtım değeri olarak, her bandın spektral aralığındaki değerlerin ara değer kestirimi yapılarak her 1 nm deki karşılığı kullanılmıştır.

Çalışmada iki uyduya ait tüm kıyaslamalar yansıtım temelli yapılmış ve aynı bölgenin sensör seviyesinde elde edilen ışınlırlıklarına göre AÜ yansıtımlarına geçilmiştir. Bu kapsamda her iki uydu görüntüsünden elde edilen AÜ yansıtım değerleri kullanılarak, yansıtım temelli çapraz radyometrik kalibrasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar Çizelge 6 ile görülmektedir.

Çizelge 6. Göktürk-2'nin çapraz radyometrik kalibrasyonu sonucu elde edilen AÜ Yansıtım Farkları

Bant	GK-2 AÜ Yansıtım	Landsat 9 AÜ Yansıtım	GK-2 Simüle Edilmiş AÜ Yansıtım	Landsat 9 Simüle Edilmiş AÜ Yansıtım	SBAF	SBAF Sonrası Düzeltilmiş GK-2 AÜ Yansıtım	SBAF Öncesi AÜ Yansıtım Yüzde Fark	SBAF Sonrası AÜ Yansıtım Yüzde Fark
Pan	0.3148	0.3404	0.3150	0.3413	0.9231	0.3410	8.13	0.179
Mavi	0.2812	0.2911	0.2813	0.2911	0.9663	0.2909	3.52	-0.037
Yeşil	0.3081	0.3328	0.3068	0.3347	0.9166	0.3361	8.01	0.995
Kırmızı	0.3336	0.3635	0.3331	0.3657	0.9108	0.3662	8.96	0.754
NIR	0.3589	0.4098	0.3584	0.4117	0.8705	0.4122	14.18	0.603

Göktürk-2'nin Landsat 9 uydusuna göre 6S ve MODTRAN simülatörleri kullanılarak elde edilen AÜ yansıtım değerleri kendi içerisinde tutarlıdır. Göktürk-2'nin tüm bantları kapsamında elde edilen iki simülatör arasındaki yüzde fark ortalama %1.5 seviyesindedir. Bu fark belirsizlik analizine de yansıtılmıştır. SBAF yöntemi uygulanmadan önce Göktürk-2'nin tüm bantlarının AÜ yansıtımına ait yüzde farkın %14'lük bir dilimde kaldığı ve SBAF yöntemi uygulanması sonucu ise tüm bantlarda %1'in içerisinde girdiği görülmektedir. Tüm bantlar kapsamında görülen AÜ yansıtım farkı, en düşük mavi bantta gözlenmekte ve bu durum iki uydu sensörünün bağıl spektral tepkilerinin (RSR) birbiri ile yakın bir bant genişliğinde olduğunu göstermektedir. Diğer bantlarda gözlenen %8 ve üstü yüzde fark, iki uydunun mavi dışındaki diğer bantlara ait RSR farklılığını göstermektedir.

Elde edilen sonuç, Göktürk-2 uydusunun Landsat 9 uydusuna göre tüm bantlardaki sapma miktarını ortaya koyması ve RadCalNet verileri kullanılarak MODTRAN simülatörü ile analiz elde edilen Göktürk-2'nin AÜ yansıtım değerlerinin doğruluğunu göstermesi açısından önemlidir. Bu durum 6S simülatörüne veya herhangi bir CBS yazılımına gerek kalmadan AÜ yansıtım verilerinin RadCalNet çıktı verileri (Şekil 5) ile elde edildiğini ortaya koymuştur.

3. SONUÇ

Yüksek çözünürlüklü görüntülerden elde edilen yansıtım değerlerinin, saha ölçüm verileri kullanılarak doğrulanması gerekir. Çalışmada, pankromatik ile dört multispektral bantlı Göktürk-2 görüntülerine ve bunların AÜ yansıtım ve bant kazançlarına odaklanılmıştır. Açık kaynak kodlu python kütüphaneleri kullanılarak kodlanan ve dinamik halde elde edilen AÜ yansıtım değerleri ve kalibrasyon parametreleri, RadCalNet sahalarından birisi olan Railroad Valley Playa aracılığı ile analiz edilmiştir. Daha önceki yıllarda yapılan çalışmalarda kazanç-bant kazancı ilişkisi tespit edilememiş ilk defa bu çalışma kapsamında doğrulanmıştır. Görüntü tabanlı yansıtım değerlerini doğrulamak için, uydunun kapsadığı ve aynı konumlarda bulunan RadCalNet AA ve AÜ yansıtım verileri kullanılmıştır. Elde edilen analiz sonuçlarının ve kullanılan sahaya ait veri kümelerinin oldukça tutarlı olduğu gözlemlenmiştir. Çalışmada özellikle iki deneysel veri seti arasındaki minimum ve maksimum farklar dikkate alınmıştır. Analiz sonuçları Göktürk-2 uydu görüntülerinin AÜ yansıtım değerlerinin doğruluğunu onaylamıştır.

Göktürk-2'nin kalibrasyon parametrelerin derlendiği bu çalışma, geçmiş yıllarda Tuz Gölü sahasına ait spektral ve atmosferik veriler kullanılarak elde edilen kalibrasyon parametrelerinin farklı bir saha kullanılarak sensör stabilitesinin gözlenmesi açısından önemlidir. Kalibrasyon parametrelerinin kendi içerisinde tutarlı olması, RadCalNet portalı tarafından sağlanan veriler kullanılarak gerçekleştirilebilecek mutlak ve çapraz radyometrik kalibrasyon mimarisinin temelini oluşturacaktır. Bu durum gelecekte uzaya gönderilecek uyduların mutlak kalibrasyonu için (Tuz Gölü kampanyası gibi) herhangi bir saha çalışması gerektirmeden ücretsiz olarak gerçekleştirilebilmesini mümkün kılmıştır.

TEŞEKKÜR

Spektral ve atmosferik verileri sağlayan RadCalNet ekibine ve Göktürk-2 görüntülerini çeken Hava Kuvvetleri Komutanlığı personeline teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

6S Model, <http://6s.ltdri.org/pages/run6SV.html>, [Erişim Tarihi: 05.10.2022].

USGS, <https://earthexplorer.usgs.gov/>, [Erişim Tarihi: 26.09.2022].

RadCalNet, <https://www.radcalnet.org/#/>, [Erişim Tarihi: 25.09.2022].

Gürol, S., Ozen, H., Leloglu, U.M., Tunali, E., 2008. Tuz Gölü : New Absolute Radiometric Calibration Test Site. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXVII. Part B1. Beijing.

Chander, G., Mishra, N., Helder, D. L., Aaron, D. B., Angal, A., Choi, T., Xiong, X., Doelling, D. R., 2013. Applications of Spectral Band Adjustment Factors (SBAF) for Cross-Calibration. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 3, 51, 1267-1281.

Sakarya, U., Demirhan, İ.H., Deveci, H.S., Teke, M., Demirkesen, C., Küpçü, R., Öztoprak, A.F., Efendioğlu, M., Şimşek, F.F., Berke, E., Gürbüz, S.Z., 2016. Absolute Radiometric Calibration of the GÖKTÜRK-2 Satellite Sensor Using Tuz GÖLÜ (landnet Site) from NDVI Perspective. ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 373-377.

Demirhan, İ. H., Sakarya, U., 2016. Hiperspektral Uydu Kamerasının Yerden Mutlak Radyometrik Kalibrasyonu İçin Ön Araştırma Sonuçları. UZAL-CBS, Adana.

Demirhan, İ. H., Deveci, H. S., Sakarya, U., 2017. Radiometric Cross-calibration of Göktürk-2 with Landsat 8. Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), 2017 25th, (s. 1-4).

Deveci, H. S., Demirhan, İ. H., 2018. 2015 ve 2017 Tuz Gölü Kampanya Verilerini Kullanarak Göktürk-2 Bantlarına Ait Radyometrik Kazançların Kıyaslanması. UZAL-CBS, Eskişehir.

Deveci, H. S., 2021. Göktürk-2 Uydusunun Radyometrik Kalibrasyonu ve Toplam Belirsizlik Bütçesinin Belirlenmesi. *Doktora tezi*. Eskişehir Teknik Üniversitesi, Eskişehir. 140 sayfa.

Demirhan, İ. H., Telatar, Z., 2018. Göktürk-2'nin Mutlak ve Çapraz Radyometrik Kalibrasyon Katsayılarının Belirlenmesi. UZAL-CBS, Eskişehir.

Bouvet, M., Thome, K., Berthelot, B., Bialek, A., Czapla-Myers, J., Fox, N.P., Goryl, P., Henry, P., Ma, L., Marcq, S., Meygret, A., Wenny, B.N., Woolliams, E.R., 2019. RadCalNet: A Radiometric Calibration Network for Earth Observing Imagers Operating in the Visible to Shortwave Infrared Spectral Range. *Remote Sens.*, 11, 2401, <https://doi.org/10.3390/rs11202401>.

Kim, K., Lee, K., 2020. A Validation Experiment of the Reflectance Products of KOMPSAT-3A Based on RadCalNet Data and Its Applicability to Vegetation Indexing, *Remote Sensing* 12, no. 23: 3971. <https://doi.org/10.3390/rs12233971>.

Kim, K.; Lee, K. 2021. An Implementation of Open Source-Based Software as a Service (SaaS) to Produce TOA and TOC Reflectance of High-Resolution KOMPSAT-3/3A Satellite Image. *Remote Sens.*, 13, 4550. <https://doi.org/10.3390/rs13224550>.

Ma, L., Wang, N., Liu, Y., Zhao, Y., Han, Q., Wang, X., Woolliams, E.R., Bouvet, M., Gao, C., Li, C., Tang, L., 2022. An In-Flight Radiometric Calibration Method Considering Adjacency Effects for High-Resolution Optical Sensors Over Artificial Targets," in *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 60, pp. 1-13, Art no. 5600913, doi: 10.1109/TGRS.2020.3040866.