

Gerçek Evapotranspirasyonun Landsat Uydu Görüntüleri Kullanarak SEBAL Modeli ile Hesaplanması: Bolu/Yeniçağa Örneği

The Estimation of Actual Evapotranspiration by the SEBAL Model Using the Landsat Satellite Images: A Case Study of Yenicaga, Bolu

Atahan Evcen¹, Ali Levent Yağcı^{1*}

¹Gebze Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 41400, Kocaeli.

ARAŞTIRMA MAKALESİ

*Sorumlu yazar:

Ali Levent Yağcı
alyagci@gtu.edu.tr

doi: 10.48123/rsgis.1126221

Yayın süreci

Geliş tarihi: 05.06.2022
Kabul tarihi: 07.08.2022
Basım tarihi: 18.09.2022

Özet

Su yönetiminin en önemli basamaklarından biri, su bütçesinin yüksek doğruluklu bir şekilde hesaplanmasıdır. Su bütçesinde yağıştan sonraki en önemli parametre gerçek evapotranspirasyondur (ET). ET, bitki yüzeyinden terleme ve toprak yüzeyinden buharlaşma ile kaybolan su miktarının toplamıdır. Bu çalışmada ET'nin Landsat 5 ve Landsat 8 uydu görüntüleri kullanarak SEBAL modeli ile hesaplanması ve modelin doğruluğunun yersel veriler kullanarak test edilmesi amaçlanmıştır. SEBAL modeli ile üretilen ET haritaları, 2010-2014 yılları arasında Bolu Yeniçağa Gölü'nün kuzey tarafında kurulan yersel akı kulesinde eddy kovaryans yöntemi ile toplanan gözlemler ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, uydu görüntülerinden SEBAL modelinden hesaplanan ET değerleri ile yersel verilerden hesaplanan günlük ET değerleri arasında güçlü bir ilişki bulunmuştur ($R^2=0.83$). Ayrıca, model yersel veriye göre günlük toplam ET değerlerini 0.04 mm fazla (pozitif bias) hesaplamıştır. Modelin yersel verilere göre mutlak ortalama ve karesel ortalama hata değerleri sırasıyla günlük 0.63 mm ve 0.71 mm bulunmuştur.

Anahtar kelimeler: Uzaktan algılama, Gerçek evapotranspirasyon, SEBAL, Eddy kovaryans yöntemi, Landsat

Abstract

One of the most prominent steps in water management is the accurate estimation of the water budget terms. Evapotranspiration (ET) is the second most important parameter after precipitation in terrestrial water budgets. ET is the sum of water loss through transpiration from plants and evaporation from soils. The objective of this study is to compute ET rates by the SEBAL model using Landsat 5 and Landsat 8 satellite images and to determine the accuracy of the model against ground observations. The ET maps produced by the SEBAL model were compared against the observations collected by the flux tower equipped with the eddy covariance system around Yenicaga Lake in Bolu, Turkey between 2010 and 2014. The results indicated that there was a strong correspondence between the model and ground ET estimates ($R^2=0.83$). The model overestimated the daily total ET values only by 0.04 mm (positive bias). The validation of the model against ground data yielded relatively small errors. The daily mean absolute and root mean square errors were 0.63 mm and 0.71 mm, respectively.

Keywords: Remote sensing, Actual evapotranspiration, SEBAL, Eddy covariance method, Landsat

1. Giriş

İnsan nüfusunun hızla artışına paralel olarak besin ve su ihtiyaçları da artmaktadır. Bu ihtiyaçların karşılanabilmesi için de tarımsal üretiminin artırılması gerekmektedir. Ekilen arazilerin artması ile sulanan tarım arazilerinin alansal artması, yeraltı ve yerüstü su kaynakları üzerinde büyük bir baskı oluşturmaktadır. Ülkemizde, tarım alanlarındaki su kaynaklarının bilinçsiz ve aşırı miktarda tüketilmesi hem yeraltı sularının ve hem yeryüzü üzerindeki baraj ve göllerdeki suların azalmasına yol açmıştır (Ormeci ve Ekercin, 2007). Bununla birlikte, tarımsal kuraklık global tarıma, gıda güvenliğine ve ekonomiye ciddi bir tehdit oluşturmaktadır. Bu sebeple su kaynaklarının yönetimi ve etkin bir biçimde kullanımı geçmiş zamanlarla karşılaştırıldığında çok önemli hale gelmiştir.

Su yönetiminin en önemli basamaklarından biri su bütçesinin duyarlı bir şekilde hesaplanmasıdır. Su bütçesi, sınırları tanımlanan bir yeryüzü veya yeraltı suyu sisteminde belirli bir zaman aralığı dikkate alınarak sisteme giren ve sistemden çıkan su kütlesi ile depolamada oluşan değişimi gösteren süreklilik denklemini ifade eder. Su miktarındaki kayıpta ve su bütçesi hesaplamasında yağıştan sonraki en önemli parametre hiç kuşkusuz gerçek evapotranspirasyondur (ET). ET, bitkilerden terleme ve toprak yüzeyinden buharlaşma ile kaybolan su miktarının toplamıdır (Monteith, 1965). ET miktarının operasyonel olarak izlenmesi, su kaynaklarının sürdürülebilir kullanımının sağlanması, tarımsal su tüketiminin izlenmesi, yeraltı ve yerüstü su kaynaklarının yönetimi, su ve enerji bütçelerinin oluşturulması, atmosfer ile yeryüzü arasında enerji değişiminin izlenmesi ve bilinçsiz olarak aşırı sulama yapılan yerlerin belirlenmesi açısından önemlidir. Bu amaçlar ancak, yeryüzü üzerinde periyodik olarak mekânsal gözlem toplayan uzaktan algılama uydularının görüntüleri ile gerçekleştirilebilir.

ET, yersel mikro-meteorolojik cihazlardan veya toprak içindeki su neminin değişiminin direkt olarak ölçülmesiyle elde edilebilir. ET miktarını, yüzeye gelen güneş enerjisi, toprak nemi, rüzgar, atmosferdeki buhar basıncı açığı gibi etkileyen birçok faktör olduğu için direkt ölçülmesi zordur (Monteith, 1965). Bu yüzden teknolojinin de gelişimiyle birlikte birçok tahmin ve ölçüm yöntemi geliştirilmiştir. Buna rağmen, ülkemizde gerçek ET'yi ölçebilen sistemler çok yaygın değildir (Atasever vd. 2016). Yakın zamana kadar ET, Lizimetre, Eddy Kovaryans (ECOR) metodu ve Enerji Dengesi Bowen Oranı metodu gibi teknikler ile yersel olarak arazide belirlenebildiği gibi Penman-Monteith ve Blaney-Criddle gibi modeller ile noktasal olarak hesaplanabiliyordu (Çaldag, 2019). Örneğin 1980'li yıllarda Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü, ülkemizdeki suların planlama ve işletme işlerinde gerekli olan su kaybı miktarını (buharlaşma) Blaney-Criddle yöntemine göre kestirebilmekteydi. (Beyribey vd. 1997)

Yersel ET ölçüm yöntemleri her ne kadar yüksek doğrulukta noktasal ölçümler yapsa da su kaynaklarının izlenmesi için bölgesel ET haritalarına ihtiyaç duyulmaktadır. Köy, ilçe veya il ölçeğinde ET haritalarının ölçülmesi ancak uzaktan algılama verileri ve görüntü işleme teknikleriyle mümkündür (Yağcı & Santanello, 2018). Yersel veriler ise bu uydu verisi tabanlı haritalarının doğrulanmasında kullanılmaktadır. Bu amaçla, ET hesabı için uzaktan algılama tabanlı birçok yöntem geliştirilmiştir (Li vd., 2009; Mohan vd., 2020). Bu çalışmada, tüm yöntemlerden bahsetmek mümkün olmadığı için ülkemizde daha önce ET hesabı için kullanılan yöntemlerden bahsedilecektir.

Ülkemizde daha önce Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL), Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration (METRIC), Trapezoid model ve NOAA yer yüzeyi modeli gibi modeller ile ET hesabı yapılmıştır (Yılmaz ve Bulut, 2016; Aksu ve Arıkan, 2017). SEBAL modeli Gediz Nehri havzasında, Kayseri ilinde ve Adana ilinin Çukurova ilçesinde ET hesabı için kullanılmış ve elde edilen sonuçlar lizimetre ve bitki katsayısı yöntemi ile elde edilen yersel veriler ile karşılaştırılmıştır (Atasever ve Ozkan, 2018; Atasever vd. 2016; Bastiaanssen, 2000; Sawadogo vd. 2020). METRIC modeli Çakıt havzasında ET hesabı için kullanılmış ve elde edilen sonuçlar ECOR metodu ile elde edilen yersel veriler ile karşılaştırılmıştır (Yanmaz, 2019). Benzer şekilde Trapezoid model, Bolu'nun Yeniçağa ilçesinde ET hesabı için kullanılmış ve elde edilen sonuçlar ECOR metodu ile elde edilen yersel veriler ile karşılaştırılıp modelin doğruluğu araştırılmıştır (Yağcı, 2023).

Ülkemiz üzerinde SEBAL modeli daha önce çalıştırılmasına rağmen, model çıktıları gerçek ET'yi direk ölçebilen yersel ECOR gözlemleri ile henüz karşılaştırılmamıştır. Bu çalışma kapsamında, SEBAL modeli kullanılarak Türkiye üzerinde Landsat 5 ve Landsat 8 uydu görüntülerinden ET haritaları üretilmesi ve doğruluğunun belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda, üretilen ET haritaları Bolu Yeniçağa bölgesinde 2010-2014 yılları arasında yersel gözlem toplamış bir akı kulesinin verileri ile karşılaştırılıp SEBAL modelinin doğruluğu araştırılmıştır. Böylece, uydu verileri ile çalıştırılan SEBAL modelinin, Türkiye üzerinde tarımsal su tüketiminin belirlenmesi ve su kaynaklarını izleme çalışmalarında kullanılabilirliği ortaya konulacaktır.

2. Materyal ve Yöntem

2.1. Arazi İçin Yüzey Enerji Dengesi Algoritması (SEBAL)

SEBAL, uydu görüntülerinin görünür, yakın kızılötesi ve termal (uzun dalga kızılötesi) bantlarını kullanarak iteratif bir şekilde gerçek ET haritası üretebilen, piksel bazlı görüntü işleme algoritmasıdır (Bastiaanssen vd., 1998).

Bu yöntemde toprak veya arazi kullanımıyla ilgili herhangi bir bilgiye gerek yoktur (Atasever vd., 2016). SEBAL tekniğinde yüzey enerji dengesi uydu görüntüsünün her bir pikseline uygulanarak gerçek ET değeri tahmin edilmektedir. Temel enerji dengesi denklemi ise şu şekilde tanımlanır;

$$LE = R_{net} - H - G \quad (1)$$

Bu eşitlikte LE , gizil ısı akısını (W/m^2); R_{net} , net radyasyon (W/m^2); H , hissedilebilir ısı akısını (W/m^2); G ise toprak ısı akısını (W/m^2) ifade etmektedir. SEBAL modelinde, (1)'de geçen tüm bileşenler hesaplanır (Bastiaanssen vd., 1998). Daha sonra LE (W/m^2) aşağıdaki denklem kullanılarak ET'ye ($mm/gün$) dönüştürülebilir.

$$ET_{mm/gün} = 0.0352 \times LE_{W/m^2} \quad (2)$$

Bu eşitlikte LE günlük ortalama gizil ısı akısını ve ET ise günlük toplam topraktan buharlaşan ve bitkilerden terleyen su miktarını ifade eder.

2.1.1. Net Radyasyonun Hesabı

Net radyasyon, yeryüzüne gelen radyasyondan yer yüzeyinden giden radyasyonun çıkarılması ile aşağıdaki şekilde hesaplanır;

$$R_{net} = R_{S\downarrow} - R_{S\uparrow} + R_{L\downarrow} - R_{L\uparrow} - (1 - \epsilon_s) \times R_{L\downarrow} \quad (3)$$

Eşitlikte $R_{S\downarrow}$, gelen kısa dalga radyasyon (W/m^2); $R_{S\uparrow}$, giden kısa dalga radyasyon (W/m^2); $R_{L\downarrow}$, gelen uzun dalga radyasyon (W/m^2); $R_{L\uparrow}$ giden uzun dalga radyasyon (W/m^2); ve ϵ_s normalleştirilmiş fark indeksi kullanılarak hesaplanan yüzey emissivite değeridir (Atasever vd., 2016; Bastiaanssen vd., 1998).

2.1.2. Hissedilebilir Isı Akısı Hesabı

Yer yüzeyi ve hava arasındaki sıcaklık farkından kaynaklanan ısı transferinin genel adıdır. Hissedilebilir ısı akısının hesabında şu denklem kullanılabilir.

$$H = \rho_a \times C_p \times \left(\frac{dT}{r_{ah}} \right) \quad (4)$$

Eşitlikte, H , hissedilebilir ısı akısı (W/m^2); ρ_a , hava yoğunluğu (kg/m^3); C_p , havanın ısı kapasitesi ($J/kg \times K$); dT , hava ve yer yüzeyi arasındaki sıcaklık farkı; r_{ah} ise ısı transferine karşı aerodinamik dirençtir.

2.1.3. Toprak Isı Akısı Hesabı

Toprak ısı akısı, toprağın ısınmasına veya soğumasına neden olan enerji miktarı olarak tanımlanır ve şu şekilde hesaplanır;

$$G = R_{net} \times \left(\frac{T_s - 273}{\alpha} \right) \times (0.0032 \times (c1 \times \alpha) + 0.0062 \times (c1 \times \alpha)^2) \times (1 - 0.97 \times NDVI^4) \quad (5)$$

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (6)$$

Eşitlikte R_{net} , net radyasyon (W/m^2); T_s , yüzey sıcaklığı (Kelvin); $NDVI$, normalleştirilmiş fark bitki indeks değeri Denklem (5); $c1$, düzeltme parametresi (sıklıkla 1.1 kullanılır); α , yüzey albedosudur (Bastiaanssen vd., 1998). Albedo, yüzeylerin ışığı yansıtabilirliğini tanımlayan bir sabittir ve toprak ısı akısının hesaplanması sırasında en önemli parametrelerden biridir (Li vd., 2009).

2.1.4. Gerçek Evapotranspirasyon Hesabı

Net radyasyon, toprak ısı akısı ve hissedilebilir ısı akısı hesaplandıktan sonra gerçek ET aşağıdaki denklemler yardımıyla hesaplanır;

$$EF = \frac{LE}{R_{net} - G} \quad (7)$$

$$ET = \frac{86400 \times EF \times (R_{net24} - G)}{\lambda - \rho_w} \quad (8)$$

Eşitlikte EF , buharlaşma fraksiyonu; R_{net24} , günlük ortalama net radyasyon (W/m^2); λ , gizil buharlaşma ısısı (J/kg) ve ρ_w , suyun yoğunluğudur (kg/m^3) (Singh vd., 2008).

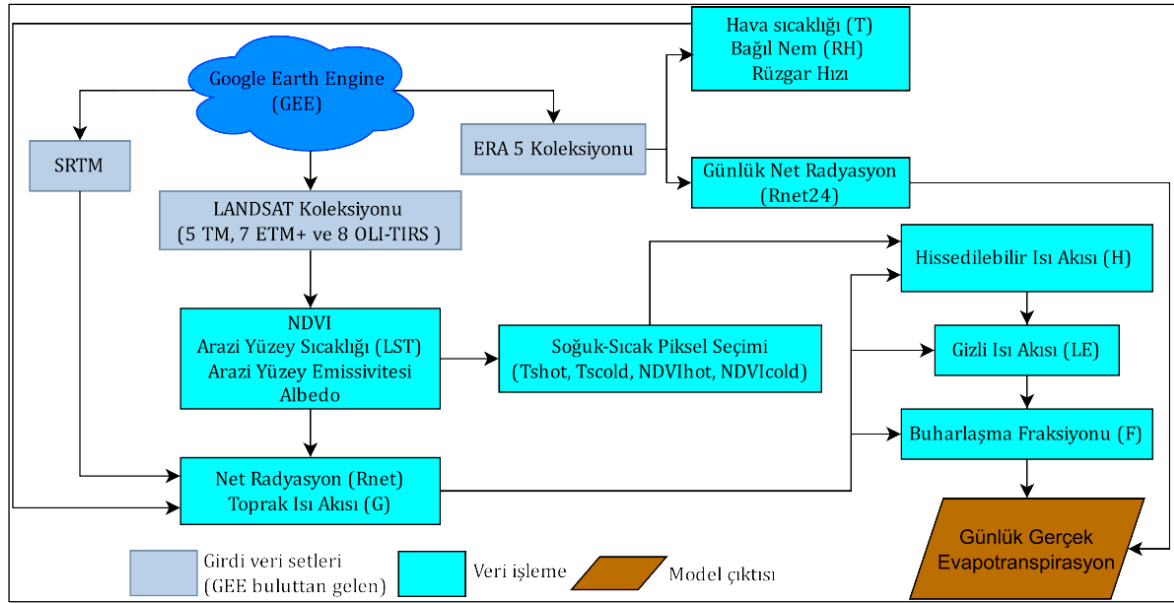
2.2. geeSEBAL

geeSEBAL modeli tüm LANDSAT uydu programları verilerini ve saatlik ERA5-Land meteorolojik verilerini kullanarak SEBAL tekniğinin dünyanın farklı bölgelerinde yüksek performanslı olarak uygulanmasına imkan sağlamaktadır (Laipelt vd. 2021). SEBAL modeli, Laipelt vd. (2021) tarafından hem JavaScript ve hem de Python API (sürüm 3.6 ve üstü) programlama dilinde yazılmış, kodları Google Earth Engine (GEE) platformuna yüklenmiş ve geeSEBAL olarak adlandırılmıştır. GEE platformundaki modelin girdilerini kullanıcıdan alan grafik arayüzlü bir web uygulaması (<https://etbrasil.users.earthengine.app/view/geesebal>) geliştirilmiştir ve kullanıcılar bu uygulamayı kullanarak ilgili Landsat görüntüsünü kutucuk içinden seçerek model çıktısı üretebilmektedir. Ayrıca, modelin kodları, github platformuna (<https://github.com/gee-hydro/geeSEBAL>) yüklenmiştir ve kullanıcılar bu kodları bilgisayarına indirip modeli kendi bilgisayarları üzerinde çalıştırabilmektedir. Bu versiyonda kullanıcılar Landsat görüntülerinin ürün ID'si modelin koduna elle girmesi gerekmektedir.

geeSEBAL aracının *image*, *image collection* ve *time series* adlı 3 tane modülü vardır. Bunlardan *image* modülü, kullanıcı tarafından grafik arayüz kullanılarak belirlenen bir görüntüden gerçek ET hesabı yapan fonksiyonları içermektedir, *ImageCollection modülü* grafik arayüz kullanılmadan verilen bir tarih periyodu içinde bulunan tüm uydu görüntülerinden gerçek ET haritalarını toplu bir şekilde üreten fonksiyonları içermektedir. Son olarak, *timeseries* modülü ise, kullanıcı belirlediği bir noktanın ET değerlerini, üretilen ET haritalarından çekmek için kullanılan fonksiyonları içermektedir.

geeSEBAL'deki tüm iş akışı Şekil 1'de yer almaktadır. Model, üç farklı veriseti kullanarak günlük gerçek ET'yi hesaplamaktadır (Şekil 1). İlk aşamada, Landsat uydu görüntülerinden RGB, NIR ve TIR bantlarını çekerek, NDVI, yüzey sıcaklığı, emissivite ve albedo değişkenlerini üretmektedir. SRTM verisetinden yükseklik verisi çekmektedir. Ayrıca, ERA-5 verisetinden rüzgâr hızı, hava sıcaklığı ve bağıl nem gibi meteorolojik değişkenleri çekilmektedir ve R_{net24} değişkenini hesaplamaktadır. İkinci aşamada yükseklik verisi kullanılarak yüzey sıcaklığını düzeltilmektedir ve NDVI verisi ile düzeltilen yüzey sıcaklığı kullanılarak çalışma alanının sıcak ve soğuk pikselleri bulunmaktadır. Üçüncü aşamada, Landsat girdilerinden R_{net} değişkeni ve G hesaplanmaktadır. En son aşamada, sıcak ve soğuk pikseller ile önceki aşamalarda hesaplanan G ve R_{net24} değişkenleri kullanılarak EF ve ET hesabı yapılmaktadır.

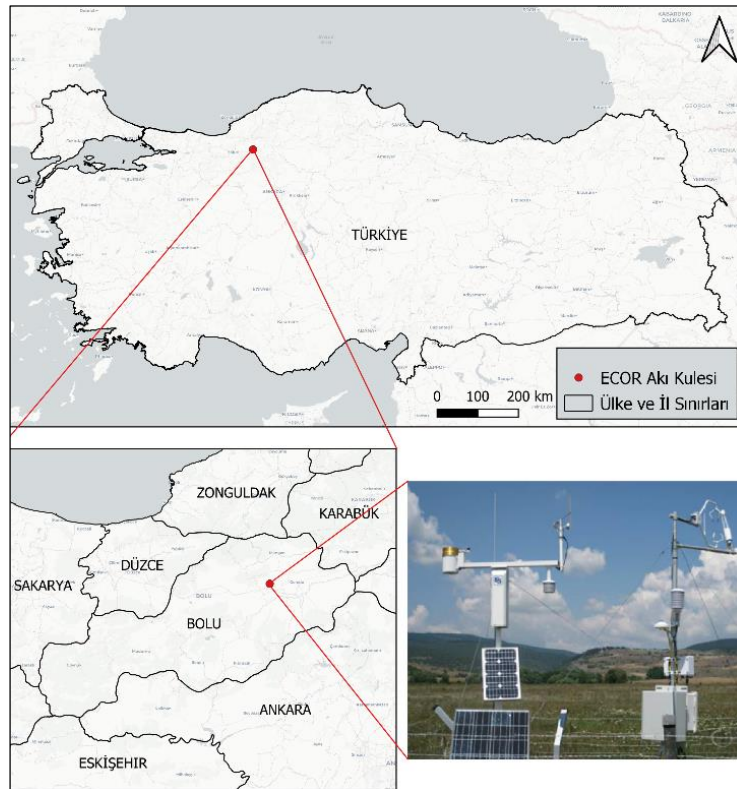
Bu çalışmada, geeSEBAL grafik arayüzlü web uygulaması çok yavaş çalıştığı için modelin Python dilindeki kodu github üzerinden indirilerek bilgisayara yüklenmiştir. Landsat verilerinin ID'leri modele elle girilerek lokal bilgisayar üzerinde çalıştırılmıştır. İlk aşamada, geeSEBAL'in *ImageCollection* modülündeki fonksiyonlar yardımı ile ET haritaları üretilmiştir. İkinci aşamada ise, *timeseries* modülü içerisindeki fonksiyona yersel istasyon noktasının koordinatları girilerek istasyon üzerinde SEBAL ile hesaplanan ET değerleri haritalardan çekilmiştir. Projedeki çalışma alanına ve yersel verinin toplandığı ilgili yıllara ait gerçek ET değerlerinin zaman serileri *timeseries* fonksiyonu kullanılarak elde edilmiştir.



Şekil 1. geeSEBAL'deki iş akışı

2.3. Çalışma Alanı

Bu çalışma kapsamında, SEBAL modelinin doğruluğunu belirlemek için Bolu ilinin Yeniçağa ilçesinde 13 Temmuz 2010 ile 19 Şubat 2014 tarihleri arasında ECOR metodu ile yersel veri toplayan akı kulesinin verileri kullanılmıştır. Bu bölge deniz seviyesinden yaklaşık 995 m yüksekte bulunur. Yeniçağa torf yatakları bakımından zengindir ve esas olarak nemli, soğuk ve besin açısından fakir koşullar altında, yeraltı suyunun etkisi olmaksızın oluşan bitkilerin lifli kalıntılarından oluşur. Akı kulesi 2010 yılında 2x2 km²lik bir turbalık üzerine kurulmuştur ve burada faaliyetlerini 2014 yılına kadar sürdürmüştür (Evrendilek, 2015). Şekil 2'de akı kulesinin çalışma alanı içerisindeki konumu yer almaktadır.



Şekil 2. ECOR akı kulesi konum haritası (Yeniçağa Turbalığı, Bolu, Türkiye)

2.4. Yersel Veriler

Bolu Yeniçağa'da kurulan yersel akı istasyonu ECOR tekniği ile ölçüm yapan ekipmanlar içermektedir. Benzer olarak, ülkemizde daha önce aynı yöntem ile Kırklareli (Şaylan vd., 2018) ve Çakıt havzasında (Yanmaz, 2019) yersel veri toplanmıştır. Bu yöntem atmosferik sınır katmanları içindeki dikey türbülanslı akıları ölçmek ve hesaplamak için önemli bir yersel ölçüm tekniğidir. Yöntem, yüksek frekanslı rüzgâr ve atmosferik zaman serilerini, sıcaklık, nem, yağış ve momentumunu analiz eder ve havadaki su buharı ve karbon akılarının değerlerini verir. Meteoroloji ve oşinografi, hidroloji, tarım bilimleri ve endüstriyel uygulamalarda kullanılan Denklem (1)'de verilen enerji eşitliğindeki tüm terimleri direkt ve birbirinde bağımsız olarak hesaplayabilmektedir. Bundan dolayı bu yöntem ile yersel olarak direkt ET verisi toplanabilir (Baldocchi, 2003).

Bolu Yeniçağa'da kurulan akı kulesi, gaz analizör, anemometre, net radyometre, sıcaklık ve nem sensörleri içermektedir. Akı kulesi karbon akısı toplamak amacıyla kurulduğu için toprak plakası içermemektedir. Bundan dolayı akı kulesinde Denklem (1)'de verilen terimlerden H, LE ve Rnet değişkenleri için gözlem toplanmasına rağmen G değişkeni için gözlem toplanmamıştır (Evrendilek, 2015). Ancak, ECOR sisteminde G, H, LE ve Rnet farklı sensörler ile birbirinden bağımsız toplanmaktadır. Bundan dolayı, G toplanmaması doğrulama sonuçlarını olumsuz etkilememektedir.

Doğrulama kapsamında, ilk olarak yersel istasyonda toplanan LE gözlemleri Denklem (2) kullanılarak ET'ye çevrilmiştir. Daha sonra SEBAL modelinden üretilen istasyon üzerindeki pikselde elde edilen ET değerleri ile karşılaştırılmıştır.

2.5. Uydu Görüntüleri

Uydu üzerinden SEBAL modeli kullanılarak ET hesabının yapılabilmesi için görünür (RGB), yakın kızılötesi (NIR) ve termal (termal kızılötesi, TIR) bantlarına sahip uydu görüntüleri kullanılmalıdır. Bu işlem için en uygun uydu görüntüleri LANDSAT uydu programına aittir. Bu program ile toplanılan tüm görüntülere kullanıcılar ücretsiz olarak erişebilmektedir. Çalışma alanında 13 Temmuz 2010 ile 19 Şubat 2014 tarihleri arasında akı kulesinden yersel veriler toplandığından dolayı bu yıllar arasındaki tüm LANDSAT uydu görüntüleri çalışma kapsamında incelenmiştir. Çalışma alanı üzerinde, 13 Temmuz 2010 ile 11 Şubat 2013 tarihleri arasında Landsat 5 uydusunun üzerindeki TM sensörü ile 15, Landsat 7 uydusunun üzerindeki ETM+ sensörü ile 52 ve 11 Şubat 2013 ve 19 Şubat 2014 tarihleri arasında Landsat 8 uydusunu üzerindeki OLI ve TIRS sensörleri ile uydusu ile 18 tane olmak üzere toplamda 85 uydu görüntüsü toplanmıştır. Mayıs 2003'ten sonra Landsat 7 ETM+ uydu misyonuyla toplanan uydu görüntüleri tarama çizgisi hatasından kaynaklanan sistematik boşluklar içermektedir. Bu boşluklar SEBAL modelinde çalışma alanının sıcak ve soğuk piksellerinin bulunmasını etkilediği için çalışma kapsamında kullanılmamıştır.

3. Bulgular

3.1. Modelden Elde Edilen Günlük ET Değerlerinin Yersel Veriler ile Karşılaştırılması

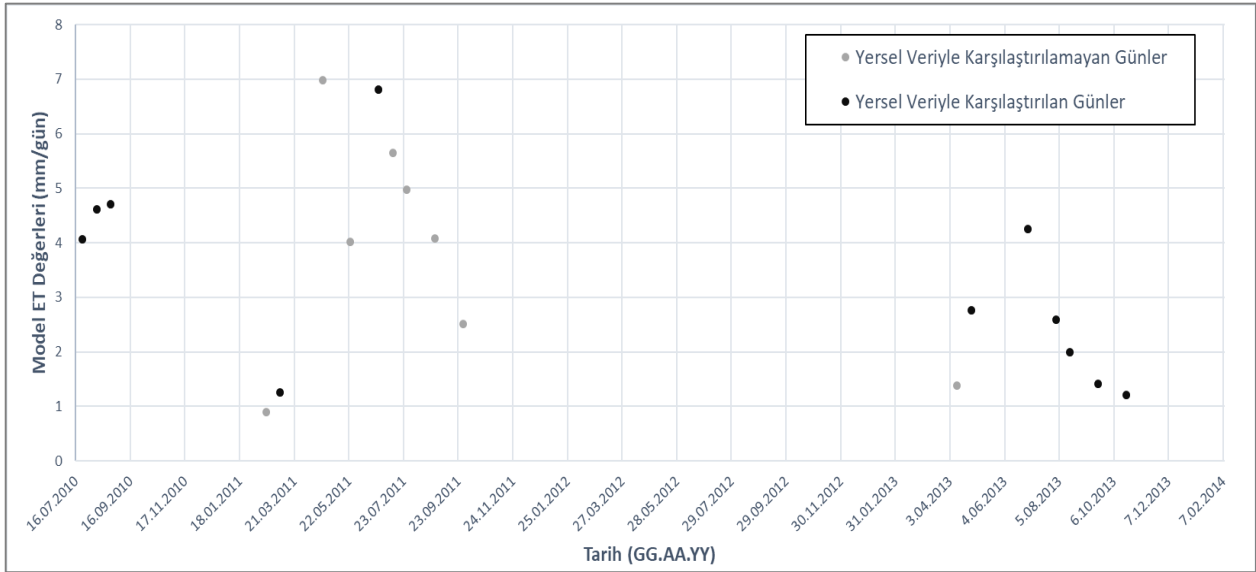
SEBAL modeli, geeSEBAL platformuna ait Python API üzerinde Bolu/Yeniçağa'daki çalışma alanını kapsayan toplam 33 Landsat 5 TM ve Landsat 8 OLI-TIRS uydu görüntüleri için çalıştırılmıştır ve 33 tane SEBAL modeliyle ET haritası üretilmiştir. Bu 33 haritanın 14'ünde bulutlardan dolayı model akı kulesi pikselinde ET hesabı yapılmamıştır. Bundan dolayı, sadece 19 ET haritası yersel veriler ile karşılaştırılacaktır.

SEBAL modeli ile hesaplanan ET değerleri, ECOR tekniği ile toplanan LE gözlemlerinden Denklem (2) kullanılarak hesaplanan ET değerleri ile karşılaştırıldığından ilgili günlerde yersel verinin de bulunması gerekmektedir. Yağmurlu günlerde akı kulesi üzerindeki ET değerini toplayan gaz sensörü ıslandığı için yersel veriler doğrulamada kullanılmamaktadır (Sun vd., 2008). Ayrıca, yersel verilerde boşluklar bulunduğu için gün ortalamaları hesaplanamamaktadır. Bunlardan dolayı 19 günün 8'inde karşılaştırma yapılamamıştır. Özetle, akı kulesi üzerinde hem yersel verinin eksiksiz toplandığı hem de SEBAL modelinin ET değeri ürettiği 11 tane görüntü bulunmaktadır. Bu çalışma kapsamında yersel veriyle karşılaştırılan uydu görüntülerin toplanma tarihi, ürün ID'si ve bulutluluk oranları gibi bilgileri Tablo 1'de verilmiştir.

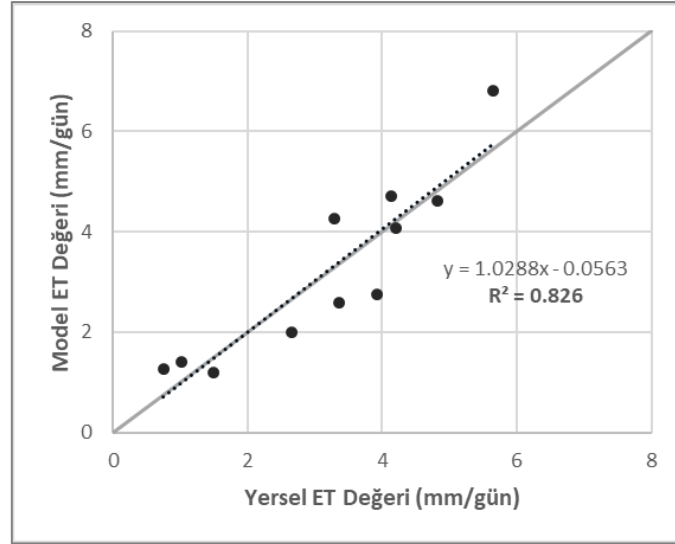
Tablo 1. Doğulamada kullanılan Landsat 5 ve 8 uydu görüntülerinin toplanma tarihi, ürün ID'si ve bulutluluk oranları

Tarih (gg.aa.yy)	Landsat Ürün ID	Bulutluluk Oranı (%)
24.07.2010	LT51780322010205MOR00	8.00
09.08.2010	LT51780322010221MOR00	8.00
25.08.2010	LT51780322010237MOR00	0.00
05.03.2011	LT51780322011064MTI00	39.00
25.06.2011	LT51780322011176MOR01	2.00
27.04.2013	LC81780322013117LGN02	0.16
30.06.2013	LC81780322013181LGN01	29.54
01.08.2013	LC81780322013213LGN01	54.09
17.08.2013	LC81780322013229LGN01	15.46
18.09.2013	LC81780322013261LGN01	31.42
20.10.2013	LC81780322013293LGN01	5.33

SEBAL modeli ile akı kulesi pikselinde elde edilen ET değerleri Şekil 3'te verilmiştir. Koyu siyah renkte verilen ET değerleri yersel veriler ile karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmada belirleme katsayısı (R^2), biyas (B), ortalama mutlak hata (MAE), karesel ortalama hata (RMSE) gibi istatistikî ölçütler kullanılmıştır ve modelin çalışma alanındaki performansı belirlenmiştir.



Şekil 3. SEBAL modeli ile akı kulesi üzerinde elde edilen ET değerlerinin zamansal değişimi (koyu siyahla gösterilen ET değerlerinde yersel veriler ile doğrulama yapılmıştır)



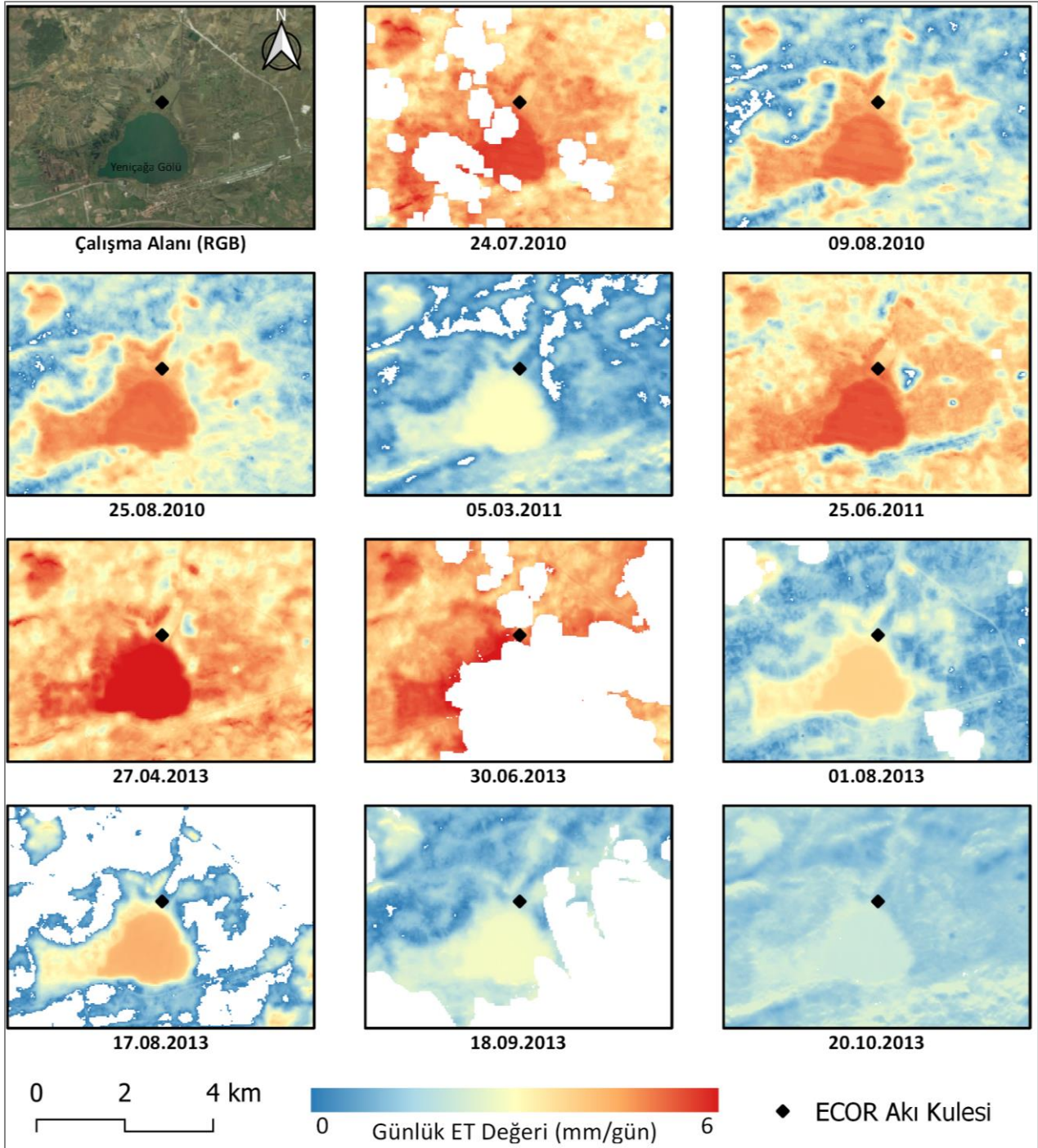
Şekil 4. Modelden elde edilen ve yersel verilerden hesaplanan günlük ET (mm/gün) değerlerinin karşılaştırılması

Tablo 2. Modellenen ve yersel verilerden hesaplanan günlük ET (mm/gün) değerlerinin karşılaştırılması sonucu elde edilen hata ölçütü değerleri

	ET (mm/gün)
n	11
B	0.04
MAE	0.63
RMSE	0.71
R²	0.83

Modelden elde edilen ve yersel verilerden hesaplanan günlük ET (mm/gün) değerlerinin karşılaştırılması Şekil 4'te verilmiştir. Ayrıca yersel verilere göre hesaplanan hata ölçütü değerleri Tablo 2'de yer almaktadır. Karşılaştırma sonuçlarına göre SEBAL modelinden elde edilen gerçek ET değerleri ile yersel verilerden hesaplanan ET değerleri arasında güçlü bir ilişki görülmektedir ($R^2=0.83$). Model, yersel veriye göre günlük toplam ET değerlerini sadece 0.04 mm fazla (pozitif bias) hesaplamıştır. Model ile yersel verilerin karşılaştırılması sonucunda MAE ve RMSE sırasıyla günlük 0.63 mm ve 0.71 mm hata ile hesaplamıştır (Tablo 2).

Tablo 1'de verilen uydu görüntülerinden elde edilen ve yersel veriyle karşılaştırılan akı kulesine yakınlaştırılan gerçek ET haritaları Şekil 5'te verilmiştir. Sol üstteki ilk harita çalışma alanının doğal renkli (RGB) görüntüsüdür. Diğer haritalar ET miktarının çalışma alanı üzerindeki mekânsal dağılımını göstermektedir. Beklendiği gibi, tüm tarihlerde en yüksek ET değerleri Yeniçağa gölünün üzerinde görülmüştür. Yeniçağa gölünün etrafındaki tarım alanları ve gölün kuzeybatısında yer alan ormanlık alanda ET değerleri diğer alanlara göre daha yüksek ET değerleri göstermektedir. Ormanlık alan ile tarım alanları, 9 Ağustos 2010 ve 25 Ağustos 2010 tarihli ET görüntülerinde belirgin bir şekilde diğer arazi örtüsü sınıflarından çok rahat bir şekilde ayırt edilebilmektedir. Bu tarihlerde, ormanlık alan ile etrafındaki arazi örtüsü arasında yüksek ET farkı bulunmaktadır. Aynı şekilde, göl etrafındaki tarım alanları diğer alanlar arasında da yüksek ET farkı bulunmaktadır. Diğer yandan, ilkbaharda (5 Mart 2010) ve sonbaharda (20 Ekim 2010) elde edilen ET haritalarda, göl, ormanlık alan ve tarım alanları ile diğer alanlar arasında çok belirgin ET kontrastı görülmemektedir. Haritalarda görülen ET değerleri beklendiği gibi tüm bölgeler için soğuk aylara göre sıcak aylarda daha yüksek değerler almaktadır. Bu durum Şekil 3'teki akı kulesi ET zaman serisinde de görülmektedir. Şekil 5'te verilen haritalar yer yer boşluklar içermektedir. Örneğin, 30 Haziran 2013 tarihli ET haritasının neredeyse yarısında ET değerleri hesaplanamamıştır. Bunun nedeni bulut ve bulut gölgesinden dolayı yeryüzü üzerinde veri toplanamadığı için bu bölgeler ET modellerinin çalışması sırasında maskelenmektedir. Bulutlu bölgelerin hesaplardan çıkarılması ET modellerinin en önemli aşamalarından biridir. Eğer bulutlu bölgeler modelden çıkarılmazsa, ET modelleri yanlışlıkla bulutlu bölgeleri soğuk piksel olarak seçmektedir ve ET haritasındaki tüm ET değerlerinin hatalı hesaplanmasına yol açmaktadır. Özetle, bulutlu bölgeler üzerinde ET hesabı yapılamadığı için bu bölgeler ET haritalarında boş olarak görülmektedir.



Şekil 5. Çalışma kapsamında üretilen gerçek ET haritaları ve çalışma alanının RGB görüntüsü (görüntü tarihleri haritaların altına yazılmıştır. Beyaz alanlarda bulutlardan dolayı ET hesabı yapılamamıştır)

4. Sonuç

Bu çalışmada, uydu görüntüleri ve SEBAL modeli kullanılarak yüksek doğruluklu mekânsal ET haritalarının üretilip üretilmeyeceği araştırılmıştır. SEBAL modeli ile üretilen ET haritaları, Bolu Yeniçağa gölünün kuzey tarafında kurulan yersel akı kulesinde toplanan gözlemler ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, uydudan hesaplanan ET değerleri ile yersel günlük ET değerleri arasında yüksek ilişki ve düşük hata değerleri bulunmuştur. Bundan dolayı SEBAL modelini uydu görüntüleri kullanarak çalıştırarak yüksek doğruluklu ET haritaları üretmek mümkündür. Bu yöntem ile yeni atılan uydu misyonlarından elde edilen (ECOSTRESS ve Landsat 9) görüntüler ile çalıştırılması durumunda daha sıklık ile ET haritaları üretilme kabiliyetine sahiptir.

SEBAL, Trapezoid ve METRIC gibi ET modelleri sadece termal görüntü toplayan uydu misyonları ile çalışabildiği için zamansal olarak düşük çözünürlükte ET haritaları üretebilmektedir. Ayrıca, bulutlardan dolayı üretilen sonuçların sıklığı daha da düşmektedir. Yersel akı kulesi toplamda 1317 gün Bolu Yeniçağa'da kurulu kalmış ve gözlem toplamıştır. Çalışma alanı üzerinde Landsat 5, 7 ve 8 uydusu ile toplanan toplam 85 tane görüntü bulunmuştur. Ancak, bunlardan 52'si Landsat 7 ile toplandığı için modelde kullanılamamıştır. Geriye kalan 33 görüntüden ET haritası üretilmiştir. İstasyon üzerindeki bulutlar ve yersel verideki boşluklardan dolayı 11 günde doğrulama yapılmıştır. Ayrıca, bulutlar nedeniyle üretilen 33 haritada büyük boşluklar bulunmaktadır. Özetle, sadece RGB, NIR ve TIR bölgelerinde gözlem toplayan uydu görüntüleri ile çalışması, yoğun bulutlu olan günlerde modelin çalışmaması ve bulutlu olan bölgeler için ET değeri hesaplayamaması gibi özellikleri modelin dezavantajları arasında bulunmaktadır. Yersel istasyonlarda toplanan gözlemleri kullanmadan sadece uydu tabanlı girdiler ile yüksek doğruluklu ET hesabı yapması modelin en önemli avantajıdır.

ET konusunda ileri araştırma olarak, bulutlardan dolayı görüntülerde bulunan boşlukların doldurulması ile Landsat 7 görüntülerindeki tarama çizgisi hatasından kaynaklanan boşlukların doldurulması önem arz etmektedir. Böylelikle, ET haritalarının sıklığı daha da arttırılarak tarımsal su tüketimi çalışmalarında dönemsel analizlere imkân sağlamak mümkün olacaktır.

Teşekkür

Bu çalışma TÜBİTAK 3501 - Kariyer Geliştirme Programı (Proje No: 120Y050) ve TÜBİTAK 2209-A Üniversite Öğrencileri Araştırma Projeleri Destekleme Programı (Proje Adı: Gerçek Evapotranspirasyonun Uydu Görüntüleri Kullanarak SEBAL Modeli ile Hesaplanması) kapsamında desteklenmiştir. Modelin doğrulanmasında kullanılan Bolu Yeniçağa'da kurulan akı kulesinde toplanan yersel gözlemleri paylaştığı için Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi Çevre Mühendisliği Öğretim Üyesi Prof. Dr. Fatih Evrendilek'e teşekkür ederim.

Kaynaklar

- Atasever, Ü. H., Çobaner, M., Çetin, M., Özkan, C., & İnan, H. İ. (2016). SEBAL tekniği ve Landsat 8 uydu görüntüsü kullanılarak gerçek evapotranspirasyonun haritalanması: Kayseri örneği. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 7(2), 237-245.
- Atasever, U. H., & Ozkan, C. (2018). A New SEBAL Approach Modified with Backtracking Search Algorithm for Actual Evapotranspiration Mapping and On-Site Application. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 46(8), 1213-1222.
- Aksu, H., & Arikian, A. (2017). Satellite-based estimation of actual evapotranspiration in the Buyuk Menderes Basin, Turkey. *Hydrology Research*, 48(2), 559-570.
- Baldocchi, D. (2003). Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems: Past, present and future. *Global Change Biology*, 9(4), 479-492.
- Bastiaanssen, W. G. M. (2000). SEBAL-based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey. *Journal of Hydrology*, 229(1), 87-100.
- Bastiaanssen, W. G. M., Menenti, M., & Feddes, R. A. (1998). A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). 1. Formulation. *Journal of Hydrology*, 212-213(1998), 198-212.
- Beyribey, M., Çakmak, B., Sönmez, F. K., & Oğuz, M. (1997). Sulama Şebekelerinde Blaney Criddle ve Penman o Monteith Yöntemlerine Göre Sulama Suyu ihtiyacının Karşılaştırılması. *Tarım Bilimleri Dergisi*, 3(1), 74-78.
- Çaldag, B. (2019). Bitki Yüzeyi Üzerinde Enerji Dengesi Bileşenlerinin Belirli Fenolojik Aşamalarda Analizi. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 21(61), 97-105.
- Evrendilek, F. (2015). Assessing CO2 sink/source strength of a degraded temperate peatland: Atmospheric and hydrological drivers and responses to extreme events. *Ecohydrology*, 8(8), 1429-1445.
- Laipelt, L., Henrique Bloedow Kayser, R., Santos Fleischmann, A., Ruhoff, A., Bastiaanssen, W., Erickson, T. A., & Melton, F. (2021). Long-term monitoring of evapotranspiration using the SEBAL algorithm and Google Earth Engine cloud computing. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 178(2021), 81-96.
- Li, Z.-L., Tang, R., Wan, Z., Bi, Y., Zhou, C., Tang, B., Yan, G., & Zhang, X. (2009). A Review of Current Methodologies for Regional Evapotranspiration Estimation from Remotely Sensed Data. *Sensors*, 9(5), 3801-3853.
- Mohan, M. M. P., Kanchirapuzha, R., & Varma, M. R. R. (2020). Review of approaches for the estimation of sensible heat flux in remote sensing-based evapotranspiration models. *Journal of Applied Remote Sensing*, 14(4), 041501. doi: 10.1117/1.JRS.14.041501
- Monteith, J. L. (1965). Evaporation and environment. *Symposia of the Society for Experimental Biology*, 19, 205-234.
- Ormeci, C., & Ekercin, S. (2007). An assessment of water reserve changes in Salt Lake, Turkey, through multi-temporal Landsat imagery and real-time ground surveys. *Hydrological Processes*, 21(11), 1424-1435.

- Sawadogo, A., Tim, H., Gündoğdu, K. S., Demir, A. O., Ünlü, M., & Zwart, S. J. (2020). Comparative analysis of the pysebal model and lysimeter for estimating actual evapotranspiration of soybean crop in Adana, Turkey. *International Journal of Engineering and Geosciences*, 5(2), 60-65.
- Singh, R. K., Irmak, A., Irmak, S., & Martin, D. L. (2008). Application of SEBAL Model for Mapping Evapotranspiration and Estimating Surface Energy Fluxes in South-Central Nebraska. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 134(3), 273-285.
- Sun, G., Noormets, A., Chen, J., & McNulty, S. G. (2008). Evapotranspiration estimates from eddy covariance towers and hydrologic modeling in managed forests in Northern Wisconsin, USA. *Agricultural and Forest Meteorology*, 148(2), 257-267.
- Şaylan, L., Özkoca, Y., Çaldağ, B., & Bakanoğulları, F. (2018). Comparison of Micrometeorological Methods used for the Determination of Actual Evapotranspiration. *International Journal of Crop Science and Technology*, 4(1), 13-22.
- Yagci, A., & Santanello, J. (2018). Estimating Evapotranspiration From Satellite Using Easily Obtainable Variables: A Case Study Over the Southern Great Plains, USA. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 11(1), 12-23.
- Yağcı, A. L. (2023) Bolu Yeniçağa'da evapotranspirasyonun Landsat uydu görüntüleri ve trapezoid model ile izlenmesi. *Geomatik*, 8(1), 18-26.
- Yanmaz, D. D. (2019). *Estimating evapotranspiration by METRIC model over Çakit basin* (Master thesis). Middle East Technical University, Ankara, Turkey.
- Yılmaz, M. T., & Bulut, B. (2016). Türkiye'deki 2000-2015 yılları arasındaki buharlaşma ve terlemenin NOAA hidrolojik modeli ile incelenmesi. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 7(2), 225-235.