

Bolu Yeniçağa'da evapotranspirasyonun Landsat uydu görüntüleri ve trapezoid model ile izlenmesi

Ali Levent Yağcı *¹

¹Gebze Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, Kocaeli, Türkiye

Anahtar Kelimeler

Uzaktan Algılama
Buharlaşma
Terleme
Trapezoid model
Yer yüzeyi sıcaklığı
NDVI

Araştırma Makalesi

Geliş:24.02.2022
Revize:21.03.2022
Kabul: 25.03.2022
Yayınlanma:10.08.2022



Öz

Evapotranspirasyon (ET), hidrolojik su döngüsünün yağıştan sonra gelen en önemli bileşenlerinden biridir ve topraktan buharlaşan su ile bitkilerden terleme yoluyla kaybolan suyun toplamına eşittir. ET, havzalarda su ve enerji bütçelerinde, tarımsal kuraklığın belirlenmesi ve tarımsal su tüketimini izleme gibi çalışmalarda kullanılmaktadır. Bu çalışmada, ET'yi Landsat 5 ve Landsat 8 uydu görüntüleri ve trapezoid model kullanarak izlenmesi amaçlanmaktadır. Bu model ilk aşamada yeryüzündeki enerjinin buharlaşmaya dönüşme fraksiyonunu (EF) hesaplamaktadır. Daha sonra, güneş ışımasını (R_n) verisini kullanarak ET'yi hesaplamaktadır. Model çıktıları, Bolu Yeniçağa'da 2010-2014 yılları arasında eddy kovaryans yöntemi ile gözlem toplayan akı kulesindeki yersel veriler ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlara göre, model ile yersel verilerden hesaplanan EF'lar arasında hem yüksek ilişki hem de düşük hata görülmüştür. Ancak, modellenen ET değerleri, yersel verilerden hesaplanan ET değerlerine göre daha düşüktür. Bu durum, R_n verisinden kaynaklanmaktadır. Bundan dolayı trapezoid model EF'yi düşük bir hata ile hesaplayabildiği için başka bir R_n verisi kullanılarak, model ile uydu verilerinden yüksek doğrulukla ET haritaları üretilebilir.

Monitoring Evapotranspiration in Yenicaga Bolu from Landsat images in a trapezoidal framework

Keywords

Remote sensing
Evaporation
Transpiration
Trapezoid model
Land surface temperature
NDVI

Research Article

Received:24.02.2022
Revised: 21.03.2022
Accepted:25.03.2022
Published:10.08.2022

Abstract

Evapotranspiration (ET), defined as the sum of soil evaporation and plant transpiration, is the second important term in hydrological water cycle. ET can be employed to balance the water and energy budgets in basins, monitor droughts and agricultural water consumption. The objective of this study is to estimate ET from Landsat 5 and Landsat 8 satellite products in a trapezoidal framework. The model first calculates the evaporative fraction (EF) and then ET using the net radiation (R_n) products. The model outputs were validated against the ground observations collected at an eddy covariance flux tower in Yeniçağa, Bolu between 2010 and 2014. The results indicate that the model was able to estimate EF very accurately, and modeled EFs were highly correlated with the ground EFs. However, there was an underestimation of ET by the model because R_n products underestimated R_n values observed at the flux tower. In summary, since the model can produce EFs with small errors, it is possible to estimate ET accurately with different R_n datasets from space.

1. Giriş

Evapotranspirasyon (ET), topraktan buharlaşma ile bitkilerden terleme yoluyla kaybolan suyun toplamını ifade etmektedir. Su döngüsünün yağıştan sonra gelen en önemli parametrelerinde birisidir. ET miktarı, yüzeyde bulunan enerji miktarı, topraktaki su miktarı ve atmosfer ve bitkiler tarafından su buharı taşınmasına uygulanan direnç tarafından düzenlenmektedir (Monteith, 1965).

ET miktarının belirlenmesi birçok uygulamada kullanılmaktadır. Bir havza için enerji ve su bütçelerinin oluşturulması, tarımsal kuraklığın belirlenmesi, yer yüzeyi ile atmosfer arasındaki nem değişiminin modellenmesi ve tarımsal su tüketiminin belirlenmesi gibi birçok kullanım alanı bulunmaktadır.

Yaygın kullanımından dolayı ET hesaplamaları için birçok model bulunmaktadır. Bunlar, kullanılan model fiziklerine göre yer yüzeyi modelleri ve diagnostik modeller olarak ikiye ayrılabilir (Mueller ve ark., 2013; Yılmaz ve ark., 2014). Yer yüzeyi modelleri bütün enerji ve su bütçesi terimlerini hesaplamaya yönelik geliştirilmiştir ve diagnostik modellere göre çok karmaşık bir yapısı vardır. Buna karşın, diagnostik modeller daha basit bir yapıdadır ve genellikle sadece bir tane enerji veya su bütçesi (örneğin, ET) teriminin hesaplanması için geliştirilmiştir (Jiménez ve ark., 2011).

Ülkemizde daha önce uydu verileri kullanılarak yapılan çalışmalarda basit olmasından dolayı daha çok diagnostik modeller kullanılmıştır. Gizil (diğer adı ET) ve hissedilir ısı akıları, Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL) modeli kullanılarak Gediz Nehri aşağı havzasında hesaplanmış ve çalışma alanında kurulan ışınım ölçeri (scintillometer) ile toplanan yersel veriler ile karşılaştırılmıştır (Bastiaanssen, 2000). SEBAL modeli kullanılarak Kayseri’de ET’nin Landsat 8 uydu görüntülerinden haritalanması çalışmaları yapılmıştır ve sonuçlar yersel veriler yerine başka bir ET yöntemi olan bitki katsayısı yöntemi ile karşılaştırılmıştır (Atasever ve ark., 2016). Aynı şekilde, SEBAL modeli Çukurova bölgesindeki ET haritalanması için kullanılmıştır ve sonuçlar bitki katsayısı yöntemi ile kontrol edilmiştir (Atasever ve Ozkan, 2018). Diğer bir ET çalışması ise Büyük Menderes Havza’sında Mapping EvapoTranspiration at high Resolution with Internalized Calibration (METRIC) modeli ve Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) uydu görüntüleri kullanılarak yapılmıştır ve sonuçlar zeytin tarlasında bitki katsayısı yöntemi ile kontrol edilmiştir (Aksu ve Arıkan, 2017). METRIC modelinden elde edilen ET sonuçları, Çakıt havzasında kurulan akı kulesinde eddy kovaryans metodu ile toplanan yersel ET değerleri ile karşılaştırılmıştır (Yanmaz, 2019). Son olarak, SEBAL modeli ve Landsat 5 uydusu verileri kullanılarak Adana’da soya fasulyesi ekili tarlada ET hesapları yapılmıştır ve sonuçlar yersel lizimetre metodu ile toplanan ET verileri ile karşılaştırılmıştır (Sawadogo ve ark., 2020).

Yukarıda verilen diagnostik model çalışmalarının yanı sıra, Türkiye’de yer yüzeyi modelleri ile ET çalışmaları yapılmıştır. 2000-2014 yılları arasında tüm Türkiye üzerinde NOAH yer yüzeyi modelinden üretilen 0.25° çözünürlükteki ET verileri ile kuraklık analizi yapılmıştır (Yılmaz ve Bulut, 2016). Diagnostik model

çalışmalarının aksine bu çalışmada elde edilen ET değerleri yersel ET gözlemleri ile karşılaştırılmamıştır.

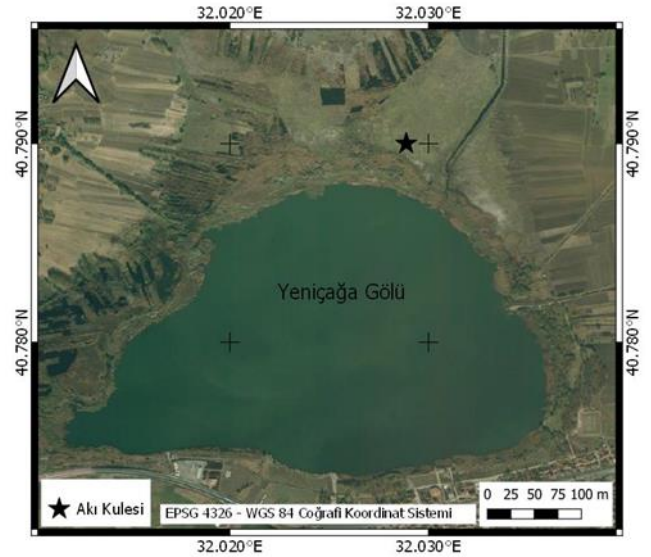
Bu çalışmada, Landsat 5 ve Landsat 8 uydu verileri ile uzaktan algılama-tabanlı trapezoid model ile ET hesapları yapılacaktır. Model çıktıları, Bolu Yeniçağa’da kurulan akı kulesinde toplanan yersel veriler ile karşılaştırılacaktır ve modelin doğruluğu test edilecektir.

2. Çalışma Alanı, Yöntem ve Materyal

Trapezoid model, Landsat 5 ve Landsat 8 uydu görüntüleri ve yardımcı veriler kullanılarak Bolu Yeniçağa çalışma alanında çalıştırılmıştır. Çalışma alanı, model ve kullanılan veri ile ilgili detaylı bilgiler aşağıda verilmiştir.

2.1. Çalışma Alanı

Bolu Yeniçağa ilçesi, burada daha önce eddy kovaryans yöntemi ile gözlem toplayan bir akı kulesi kurulduğu için çalışma alanı seçilmiştir (Şekil 1). Yeniçağa havzası Bolu ili sınırları içerisinde yer almaktadır. Havza, deniz yüzeyinden 995m yükseklikte bulunmaktadır. Çalışma alanında, kış ayları soğuk ve yağmurlu, yazları ise sıcak ve kuru bir iklim hakimdir. Köppen-Geiger sınıflandırmasına göre çalışma alanının iklim kodu Dsb’dir (Beck ve ark., 2018). Çalışma alanının arazi kullanımı ve bitki örtüsü yapısı tarlalar, hayvan otlatılan çayır ve meralar ve turbalık alanlardan oluşmaktadır.



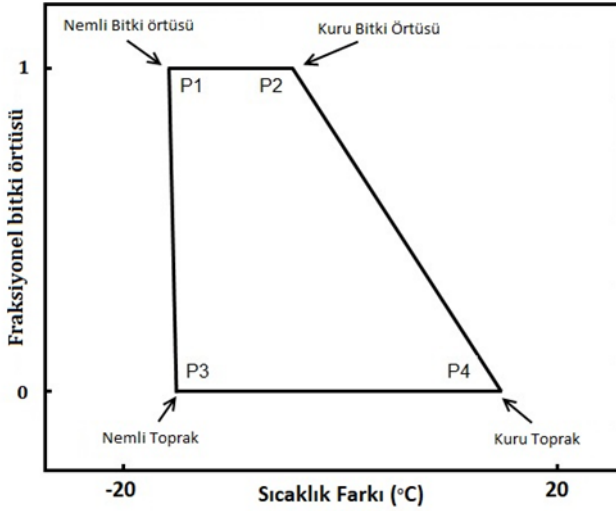
Şekil 1. Çalışma alanında kurulan akı kulesinin konumu

2.2. Trapezoid Model

Diagnostik modellerden biri olan trapezoid model ampirik teoriye dayanmaktadır. Daha karmaşık ve sofistike yeryüzü modellerine göre daha basit ve daha az veri setiyle çalışmasına rağmen, yeryüzü üzerinde mekânsal olarak devamlı ve yüksek doğrulukla ET haritaları üretebilme kabiliyetine sahiptir.

Bu yöntemde, Şekil 2’de gösterildiği gibi yer yüzeyi sıcaklığı (T_s) ile hava sıcaklığı (T_a) arasındaki sıcaklık farkı ($T_s - T_a$) ile fraksiyonel bitki örtüsünün (F_r) ilişkisinden, teorik bir trapezoid şekil oluştuğu

varsayımına dayanmaktadır (Moran ve ark., 1994). Bu trapezoid şekilde soldan sağa gidildiğinde toprak nemi koşulları ıslak durumdan kuru duruma geçmektedir. Bu şeklin sol ve sağ kenarı, hidrolojik olarak nemli ve kurak uç koşulları ifade etmektedir.



Şekil 2. Fraksiyonel bitki örtüsü ile sıcaklık farkı ($T_s - T_a$) arasındaki teorik ilişki ve trapezoid içindeki kuru ve nemli bitki örtüsü ve toprağı temsil eden kritik noktaların konumu

Günümüze kadar bu yöntemin uygulamaları birkaç yerel çalışma ile sınırlı kalmıştır (Moran ve ark., 1994; Yang ve ark., 2011; Yang ve ark., 1997). Bunun en önemli nedeni ise, Şekil 2'te gösterilen P1, P2, P3 ve P4 ile trapezoid köşe noktaları çalışma alanında toplanmış yersel veriler yardımıyla bulunmasıdır ve bu durum operasyonel olarak bu yöntemin yaygınlaşmasının önüne geçmiştir. Ancak, son yıllardaki çalışmalarda, bu köşe noktaları yersel veri kullanılmadan uydu görüntülerinden elde edilen T_s ve Normalize Edilmiş Fark Bitki Örtüsü İndeksi (NDVI) ürünleri kullanılarak hesaplanabilmektedir (Yagci ve Santanello, 2018; Yagci ve ark., 2017). Bu çalışmalarda, Fr yerine aralarındaki kuvvetli lineer ilişkiden dolayı NDVI kullanılmıştır (Santanello ve Carlson, 2001).

Trapezoid şekilden kritik köşe noktaları otomatik şekilde Python programlama dilinde yazılan açık kodlu program ile bulunmaktadır. Modelin kritik köşe noktalarının bulunmasından sonra, Priestley-Taylor yaklaşımı kullanılarak ET hesaplanır (Priestley & Taylor, 1972). Sırasıyla aşağıdaki (1), (2), (3), (4) ve (5) no'lu denklemler takip edilerek önce Priestley-Taylor katsayısı (α), sonra yüzeydeki bulunan toplam enerjinin ($R_n - G$) buharlaşmada kullanılan kısmının fraksiyonu (EF) ve en son aşamada gerçek ET miktarı bulunur.

İlk aşamada, ıslak ve kuru uçlardan geçen doğruların katsayıları aşağıdaki denklemler kullanılarak bulunur.

$$(T_s - T_a)_{wet} = \frac{NDVI_m - b_{wet}}{\alpha_{wet}} \quad (1)$$

$$(T_s - T_a)_{dry} = \frac{NDVI_m - b_{dry}}{\alpha_{dry}} \quad (2)$$

a ve b ıslak ve kuru uçlardaki lineer denklemlerin sırasıyla eğim ve kesme noktalarıdır. T_s , NDVI, T_a ve $T_s - T_a$ sırasıyla yeryüzü sıcaklığı, Normalize Edilmiş Fark Bitki Örtüsü İndeksi, günlük ortalama sıcaklık ve yeryüzü ile hava sıcaklığı arasındaki farkı ifade etmektedir. Alt simgeler, m, dry ve wet, sırasıyla hesap yapılan pikseli, kuru ve ıslak uçları ifade etmektedir. $(T_s - T_a)_{wet}$ ve $(T_s - T_a)_{dry}$ sırasıyla ıslak ve kuru uçta hesaplanan $T_s - T_a$ değerlerini göstermektedir.

Doğruların eğim ve kesme noktaları belirlendikten sonra her piksel için α değeri aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\alpha_m = \frac{(T_s - T_a)_{dry} - (T_s - T_a)_m}{(T_s - T_a)_{dry} - (T_s - T_a)_{wet}} \quad (3)$$

α_m birimsiz Priestley-Taylor katsayısını ifade etmektedir ve $(T_s - T_a)_m$ hesaplanan piksel için gözlemlenen $T_s - T_a$ değerini ifade etmektedir. Genellikle, α , 0 ile 1.26 arasında bir değer alır (Priestley ve Taylor, 1972). Bu aşamalardan sonra, Priestley-Taylor denklemi (6) kullanılarak önce EF (birimsiz) sonra LE ve ET hesaplanır.

$$EF_m = \alpha_m \cdot \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \quad (4)$$

Δ ($kPa \text{ } ^\circ C^{-1}$) ve γ ($kPa \text{ } ^\circ C^{-1}$) sırasıyla gözlemlenen hava sıcaklığında doymuş buhar basıncı eğrisinin eğimi ve psikometrik sabittir. Bu iki parametrenin T_a ve deniz yüzeyinden yükseklik (z) kullanılarak hesaplanmaktadır (Allen ve ark., 1998).

En aşamada, ET aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanabilir.

$$ET_m = LE_m = EF_m \cdot (R_n - G) \quad (5)$$

R_n ve G sırasıyla yeryüzündeki gözlemlenen net güneş ışınlamı ve toprak ısı akısını W/m^2 biriminden ifade etmektedir. İstenildiği takdirde W/m^2 biriminden hesaplanan LE kolaylıkla mm cinsinden ET'ye dönüştürülebilir ($1 W/m^2 = 0.03525 mm/gün$). Python dilinde yazılan bir programla vasıtasıyla çalışma kapsamında yapılan tüm işlem adımlarının otomasyonu sağlanmıştır.

2.3. Materyal

Modelde kullanılan uydu görüntüleri, yardımcı model verileri ile modeli doğrulamak için kullanılan yersel istasyon verileri bu bölümde detaylı olarak açıklanacaktır.

2.3.1. Yersel doğrulama verileri

Akı kulesi Yeniçağa gölünün kuzey tarafında (Şekil 1) 13 Temmuz 2010 tarihinde kurulmuştur ve 19 Şubat 2014 tarihine kadar eddy kovaryans tekniği (Baldochi, 2003) ile yersel gözlem toplamıştır (Evrendilek, 2015). Yüzeydeki enerji dengesi eşitliği aşağıdaki gibi kurulabilir.

$$R_n - G \approx LE + H \quad (6)$$

R_n , G , LE ve H sırasıyla net güneş ışınlamı, toprak ısı akısı, gizil ısı akısı ve hissedilir ısı akısını ifade etmektedir. Akı istasyonu tün bu enerji dengesi terimlerini birbirinden bağımsız bir şekilde direk ölçebilmektedir.

Gaz analizör vasıtasıyla Denklem 6'daki LE ve H terimleri, 1 saatlik aralıklarla toplamıştır. Aynı şekilde istasyona takılı net radyometre vasıtasıyla eş zamanlı olarak 1 saat aralıklarla Denklem 7'deki R_n hesabında kullanılan tüm enerji terimleri toplanmıştır. Yüzeydeki net güneş ışınlamı aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$R_n = SW \downarrow - SW \uparrow + LW \downarrow - LW \uparrow \quad (7)$$

$SW \downarrow$, $LW \downarrow$, $SW \uparrow$ ve $LW \uparrow$ sırasıyla yüzeye gelen kısa ve uzun dalga ışınlamı ile yüzeyden giden kısa ve uzun dalga ışınlamı ifade etmektedir.

Bu akı istasyonun kurulma amacı turbalık alanda karbon akısı gözlemleri toplamak olduğu için denklem 6'da verilen G toplanmamıştır. G gözlemleri için toprağın içerisine toprak ısı akı plakası kurulmalıdır. Akı kulesinde toprak ısı akıları olmadığı için ET hesabı denklem 5 yerine Denklem 8 kullanılarak yapılmıştır.

$$ET_m = LE_m = EF_m \cdot R_n \quad (8)$$

Yersel doğrulama verisi ile paralellik göstermesi açısından trapezoid modelinden ET hesabında da Denklem 8 kullanılarak yapılacaktır.

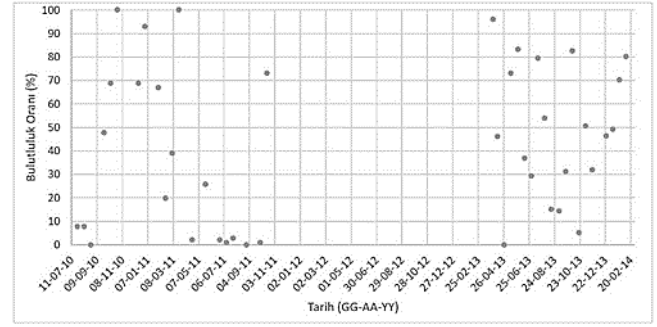
2.3.2. Landsat uydu verileri

Diagnostik ET modellerinde kullanılacak olan uydu misyonu, elektromanyetik spektrumun termal (TIR) ve görünür-kısa dalga (VSWIR) bölgelerinde eş zamanlı olarak gözlem toplamış olması gerekmektedir (Anderson ve ark., 2021). Bahsedilen her iki bölgede de veri toplayan Landsat serisi uydu misyonları bulunmaktadır. Bu misyonlar, spektrumun aynı bölgelerinde farklı bant genişlikleri ile görüntü toplamaktadır. Örneğin, Landsat 8 uydusunun üzerindeki sensörler Landsat 5'e göre daha dar bant genişliklerinde gözlem toplamaktadır.

Çalışma alanında 13 Temmuz 2010 ile 19 Şubat 2014 tarihleri arasındaki toplanmış 178 yol ve 32 sıra numaralı tüm Landsat 5 ve 8 uydu görüntüleri indirilmiştir. Landsat 7 uydu verilerinde tarama çizgisi hatasından kaynaklanan sistematik boşluklar olduğu için bu görüntülerde model çalıştırılmamıştır. Özet olarak, çalışma alanının üzerinde toplamda 20 tane Landsat 5 TM ve 20 tane Landsat 8 OLI/TIRS verisi bulunmaktadır. Toplanan her bir uydu görüntüsünün metaverisinden alınan yer yüzeyi üzerindeki bulutluluk oranları Şekil 3'deki gibi verilmiştir. Tablo 1'de ise tüm görüntülerin bulutluluk oranının özeti verilmiştir.

Araştırma kapsamında indirilen Koleksiyon 2'ye ait Level-2 seviyesindeki Landsat görüntüleri, atmosferin etkilerinden arındırılmıştır. Proje kapsamında, bu veriseti içerisindeki bulunan yüzey yansımaya katmanı, yüzey sıcaklık katmanı ve bu iki katmanlar hakkında piksel-bazlı bulut ve kalite bilgileri içeren katmanlar (QA_RADSAT, QA_PIXEL) kullanılmıştır. Yüzey yansımaya değerleri kullanılarak NDVI hesabı yapılmıştır. İş

akışındaki tüm hesaplamalar Python dilinde yazılan bir program vasıtasıyla tam otomasyonu sağlanmıştır.



Şekil 3. Çalışma alanı üzerindeki Landsat uydu görüntülerinin tarihleri ve bulutluluk oranları

Tablo 1. Çalışma alanı üzerinde toplanan Landsat 5 ve Landsat 8 görüntülerinin bulutluluk oranları

| Bulut Oranı (%) | Landsat 5 | Landsat 8 | Toplam |
|-----------------|-----------|-----------|-----------|
| 0 -25 | 10 | 5 | 15 |
| 25 -50 | 3 | 7 | 10 |
| 50 -75 | 4 | 4 | 8 |
| 75 -100 | 3 | 4 | 7 |
| Toplam | 20 | 20 | 40 |

İş akışının başında Landsat görüntüleri okunduktan sonra filtreleme işlemi yapılmıştır. Bu filtreleme işleminde, "QA_PIXEL" katmanında bulut, bulut gölgesi, kar ve cirrus olarak işaretlenen pikseller çıkarılmıştır. Ayrıca, "QA_RADSAT" katmanının NDVI hesabında kullanılan bantlarda bulunan piksellerin doygunluğa ulaşmış olanları da çıkarılmıştır. Uydu görüntülerinin filtrelenmemesi trapezoid köşe noktalarının bulunmasında hatalar oluşturduğu için iş akışının en önemli adımlarından biridir (Yagci ve ark., 2017). Bu kısımda Python'da yazılan bir kod sayesinde yapılmaktadır.

2.3.3. Yardımcı veriler

Modeldeki T_s ve NDVI değişkenleri Landsat uydu görüntülerinde elde edilmektedir. Geriye kalan T_a , z ve R_n değişkenleri için veri gerekmektedir. Yersel veride G gözlemi bulunmadığı için EF hesabı için Denklem 5 yerine Denklem 8 kullanılacaktır. Bundan dolayı G verisi indirilmemiştir.

T_a değişkeni için veri European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) tarafından tarım meteorolojisi göstergeleri (AgERA5) verisetinde bulunan 2m yüksekliğindeki günlük ortalama hava sıcaklığı verisi kullanılmıştır. Bu verisetinin mekânsal çözünürlüğü 0.1° olduğu için 30m çözünürlüğe yeniden örneklendirilmiştir.

Δ ile γ hesaplarında kullanılmak üzere gerekli olan z verisi ALOS uydusu üzerinde bulunan PRISM sensörü tarafından toplanmıştır ve AW3D30 adlandırılmaktadır. Bu veriseti 30m mekânsal çözünürlüğündedir ve versiyon 3.1 olan ürün ücretsiz olarak sitesinde indirilmiştir.

R_n verisi için Global Land Data Assimilation System (GLDAS) projesi kapsamında NOAA yer yüzeyi modelinin çıktıları kullanılmıştır. Bu proje kapsamında, her 3 saatte bir 0.25° mekânsal çözünürlüğünde R_n ve G ürünleri

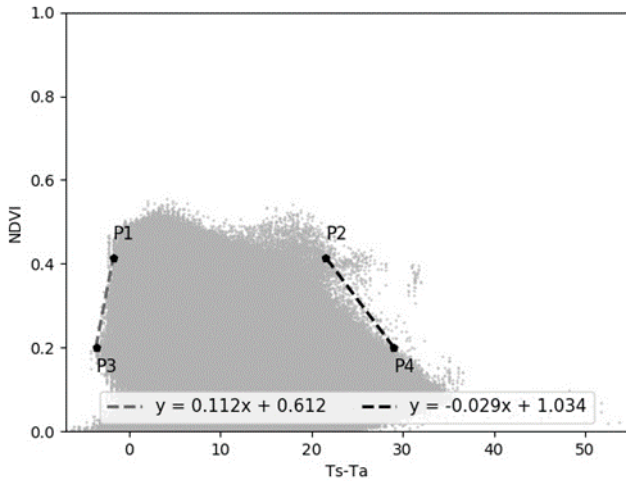
üretilmektedir. Her gün için 8'er tane ürün indirilmiştir ve gün ortalaması bu 8 ürünün aritmetik ortalamasından hesaplanmıştır. En sonra olarak, ürünler ET hesaplarında kullanılabilmesi için 30m çözünürlüğe yeniden örneklendirilmiştir.

3. Bulgular

3.1. Bulut etkisinin model üzerine etkisinin incelenmesi

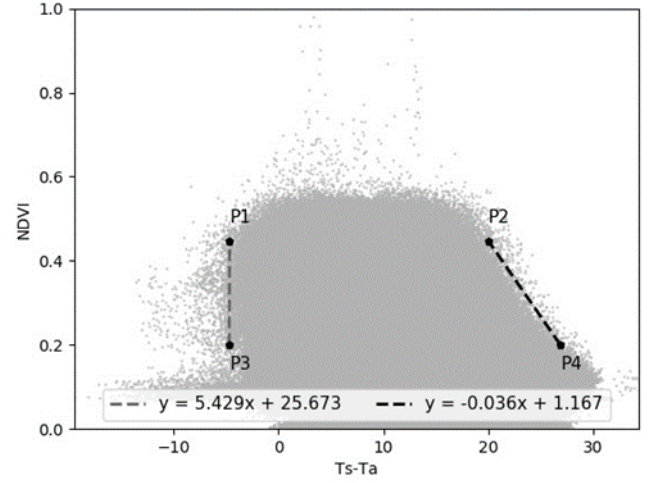
Üçgen, trapezoid, SEBAL ve METRIC gibi tüm diagnostik modeller esas olarak bulutsuz günler için geliştirilmiştir ve genelde bulutsuz olan günlerde çalıştırılmaktadır (Allen ve ark., 2007). Bulutlu kısımlar model hesaplarına girmeden maskelenmesi gerekmektedir.

Bu çalışma kapsamında trapezoid model tüm görüntülerde çalıştırılmıştır. Bulutluluk oranı %90'ın üzerinde olan görüntülerde, maskelemeden sonra trapezoid şekli oluşturacak yeterli sayıda piksel kalmadığı için model hiç çıktı vermemiştir. Şekil 3'te de görüldüğü gibi %90 bulutluluk oranı olan 4 gün olduğu için model sadece 40 günün 36'sında çıktı vermiştir.



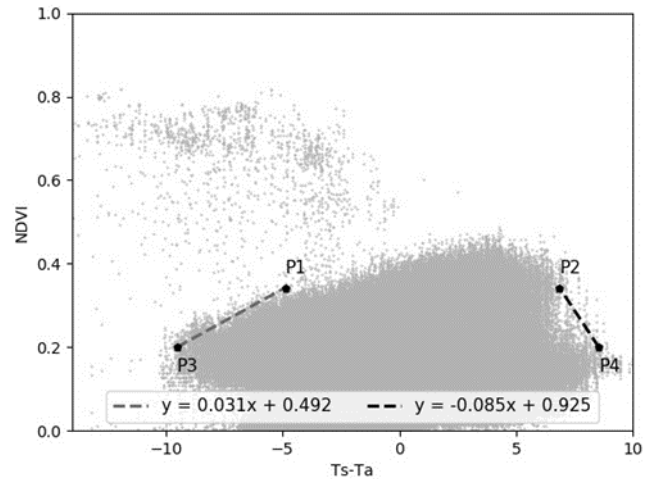
Şekil 4. 09 Ağustos 2010 tarihinde NDVI ile sıcaklık farkı (T_s-T_a) arasında gözlemlenen ilişki. Bu tarihteki Landsat 5 görüntüsünü %8,0 bulutluluk oranına sahiptir.

Modelin çalıştığı diğer günlerde trapezoid şekiller görsel olarak incelenmiştir. 09 Ağustos 2010 tarihinde %8,0 bulutlu olan Landsat 5 görüntüsünden elde edilen NDVI ile T_s-T_a arasındaki ilişki Şekil 4'te görülmektedir. Benzer şekilde, 18 Eylül 2013 tarihindeki %31,4 bulutluluk oranına sahip Landsat 8 görüntüsünde gözlemlenen NDVI ile T_s-T_a arasındaki ilişki Şekil 5'te verilmiştir. Her iki tarihte de çalışma alanında trapezoid şekil başarılı bir şekilde görülmüştür. Bundan dolayı modelin hesap ettiği ile yersel veriden hesaplanan EF değerleri arasında çok küçük farklar vardır. Örneğin, model ve yersel EF değerleri arasında 09 Ağustos 2010 ve 18 Eylül 2013 tarihlerinde sırasıyla -0,02 ve 0,05 farklar görülmüştür. 09 Ağustos 2010 ve 18 Eylül 2013 tarihlerinde, modelin hesap ettiği EF değerleri sırasıyla 0,61 ile 0,36 iken, yersel veriden EF için sırasıyla 0,63 ve 0,31 değerleri hesaplanmıştır.



Şekil 5. 18 Eylül 2013 tarihinde NDVI ile sıcaklık farkı (T_s-T_a) arasında gözlemlenen ilişki. Landsat 8 görüntüsünü %31,4 bulutluluk oranına sahiptir.

%69 bulutluluk oranına sahip 15 Aralık 2010 tarihindeki Landsat 5 görüntüsünden elde edilen NDVI ile T_s-T_a ilişkisi Şekil 6'da verilmiştir. Gözlemlenen ilişki Şekil 2'de verilen teorik ilişkiye benzemediği gibi çalışma alanı üzerinde Şekil 4 ve Şekil 5'te görülen trapezoid şekillere de benzememektedir. Bu tarihteki trapezoid köşe noktaları hesaplanmış olmasına rağmen yersel akı istasyonu buluttan görünmediği için model ile yersel EF değerleri karşılaştırılamamıştır. Ancak, çalışma alanında trapezoid şekil görülmediği için bu tarihte elde edilen model çıktıları doğru sonuçlar vermesi beklenmemektedir. Böylelikle, yoğun bulutlu (>%50 bulutluluk oranı) günlerde çalışma alanında trapezoid şekil oluşmama durumu olduğu EF ve ET haritalarına şüphe ile yaklaşmak gereklidir. Bundan dolayı, SEBAL ve METRIC gibi diğer diagnostik modeller sadece bulutsuz günlerde çalıştırılmaktadır (Bhattarai ve ark., 2016).

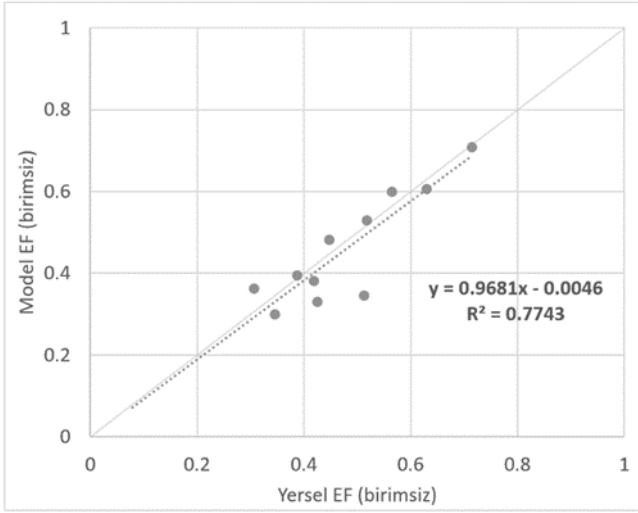


Şekil 6. 15 Aralık 2010 tarihinde NDVI ile sıcaklık farkı (T_s-T_a) arasında gözlemlenen ilişki. Bu tarihteki Landsat 5 görüntüsünü %69,0 bulutluluk oranına sahiptir.

3.2. Modelin yersel veriler ile karşılaştırılması

Model, çalışma alanı üzerinde 36 kez çalıştırılmıştır ve çalışma alanı için 36 tane EF ve ET haritası

üretimiştir. Bu 36 görüntüden akı istasyonu üzerinde sadece 19 kez EF ve ET değerleri elde edilmiştir. Geriye kalan 17 günde akı istasyonun olduğu bölge bulutla kaplı olduğu için bu kısımda model hesap yapmamıştır ve haritalarda bu kısımlar boş kalmıştır. Diğer taraftan, akı istasyonunda hava yağışlı olduğu veya çeşitli nedenlerden dolayı 8 günde eksik veri toplamıştır. Bilhassa yağmurlu olan günlerde akı istasyonunda toplanan veri yüzey enerji eşitliği karmaşıklaştırdığı bu günler maskelenmektedir (Nichols ve Cuenca, 1993). Böylelikle model, geriye kalan 11 gün için yersel veriler ile kontrol edilecektir. Bu günler toplanan Landsat görüntülerinin ürün belirleyicileri ile tarihleri Tablo 2’de verilmiştir. Yalnızca, GLDAS verilerinde boşluk olmadığı için NOAH modelinden elde edilen Rn gözlemleri yersel veriler ile 32 gün için karşılaştırılacaktır. Karşılaştırmada biyas (B), mutlak ortalama hata (MAE), karesel ortalama hata (RMSE) ve belirleme katsayısı (R²) gibi istatistik hata ölçütleri kullanılacaktır.



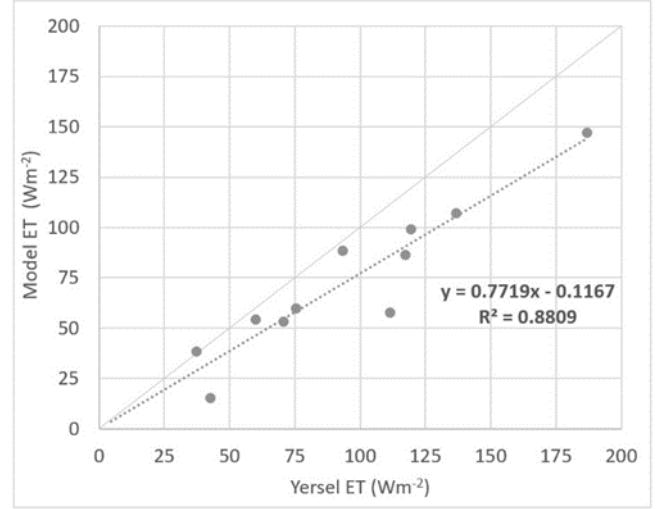
Şekil 7. Modelden elde edilen ile yersel verilerden hesaplanan EF (birimsiz) değerlerinin karşılaştırılması.

Tablo 2. Modellenin yersel veriler ile kontrol edildiği tarihler ve bu tarihlerde toplanan Landsat uydu görüntülerinin belirleyicileri ve tarihleri. Belirleyicinin başındaki LT05 ve LC08 ifadeleri sırasıyla Landsat 5 ve 8 misyonları ifade etmektedir.

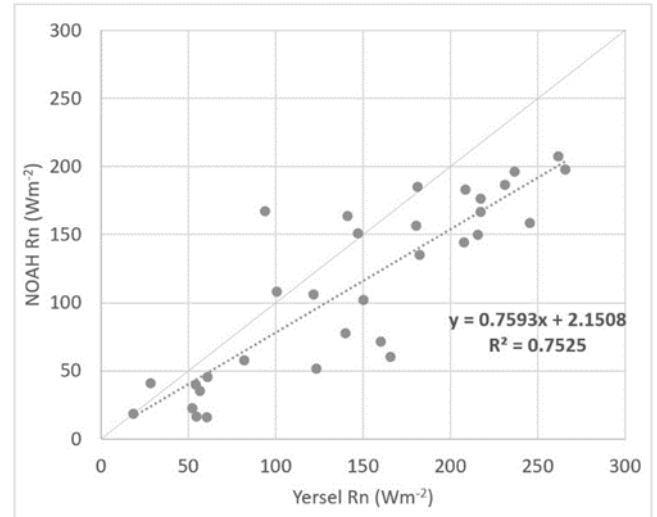
| Landsat Level-2 Ürün Belirleyicisi | Tarih |
|--|----------|
| LT05_L2SP_178032_20100724_20200824_02_T1 | 24-07-10 |
| LT05_L2SP_178032_20100809_20200823_02_T1 | 09-08-10 |
| LT05_L2SP_178032_20100825_20200823_02_T1 | 25-08-10 |
| LT05_L2SP_178032_20110625_20200822_02_T1 | 25-06-11 |
| LC08_L1TP_178032_20130427_20200912_02_T1 | 27-04-13 |
| LC08_L1TP_178032_20130630_20200912_02_T1 | 30-06-13 |
| LC08_L1TP_178032_20130801_20200912_02_T1 | 01-08-13 |
| LC08_L1TP_178032_20130817_20200913_02_T1 | 17-08-13 |
| LC08_L1TP_178032_20130902_20200913_02_T1 | 02-09-13 |
| LC08_L1TP_178032_20130918_20200912_02_T1 | 18-09-13 |
| LC08_L1TP_178032_20131020_20200912_02_T1 | 20-10-13 |

Modelden hesaplanan EF ile yersel verilerden elde edilen günlük ortalama EF değerlerinin karşılaştırılması Şekil 7’de ve günlük ortalama ET değerlerinin karşılaştırılması Şekil 8’de gösterilmiştir. Denklem 8’deki ET hesabında kullanılan Rn değerlerinin yersel verilerden hesaplanan günlük ortalama Rn ile

kiyaslaması ise Şekil 9’da verilmiştir. Son olarak, EF, ET ve Rn değişkenlerinin yersel verilere göre hata ölçütleri de Tablo 3’de verilmiştir.



Şekil 8. Modelden elde edilen ile yersel verilerden hesaplanan ET (Wm⁻²) değerlerinin karşılaştırılması.



Şekil 9. GLDAS projesi kapsamında NOAH modelinden elde edilen ile yersel verilerden hesaplanan Rn değerlerinin karşılaştırılması

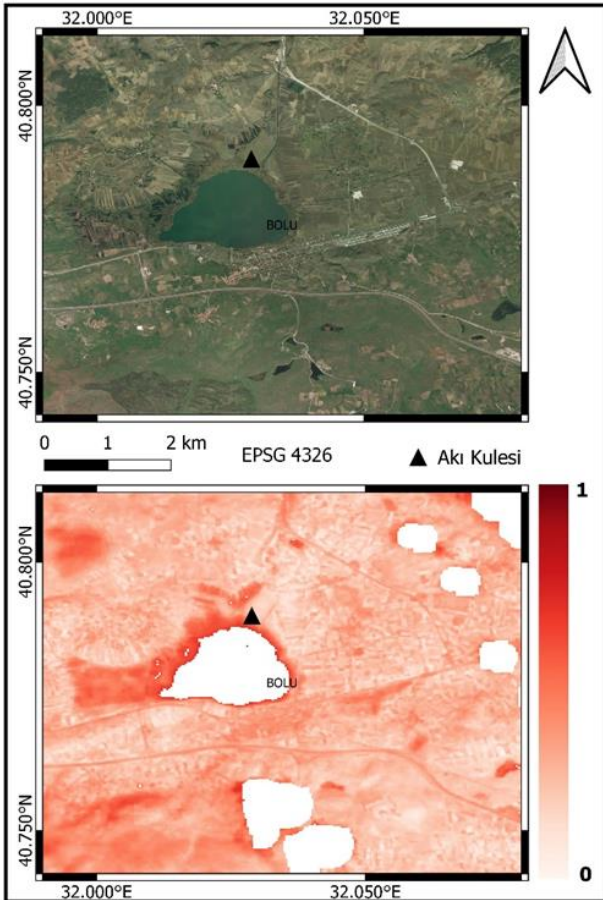
Tablo 3. Modellenmiş ile yersel gözlemlerden hesaplanmış günlük ortalama EF, ET ve Rn değişkenlerinin birbirleri ile karşılaştırılmasından elde edilen biyas (B), mutlak ortalama hata (MAE) ve karesel ortalama hata (RMSE) değerleri

| | EF | ET | Rn |
|-------------|----------|------------------|------------------|
| | Birimsiz | Wm ⁻² | Wm ⁻² |
| n | 11 | 11 | 32 |
| B | -0,02 | -21,88 | -32,88 |
| MAE | 0,05 | 22,13 | 40,85 |
| RMSE | 0,06 | 26,79 | 48,83 |

Doğrulama sonuçlarına göre modellenen EF’ler ile yersel verilerden hesap edilen EF’ler arasında kuvvetli bir ilişki görülmektedir (R² = 0,77) ve model EF’yi çok düşük bir hata ile hesaplayabilmektedir (Tablo 3). Model ve yersel ET’ler arasında EF’ye göre daha yüksek bir ilişki olmasına rağmen (R² = 0,88), ET’de hata oranı EF’ye göre daha yüksektir. Modellenen ET, yersel ET’ye göre daha

azdır, diğer bir değişle B neredeyse MAE kadar negatif değer almaktadır. ET’de görülen bütün hata ET’nin düşük modellenmesinden kaynaklanmaktadır. Ancak, bu durum kullanılan R_n verisinde kaynaklanmaktadır (Şekil 9). GLDAS projesinde yüzeydeki enerji miktarı sistematik olarak yersel veriye göre daha az hesaplanmaktadır (Tablo 3). Eğer B’si düşük bir R_n verisi kullanılırsa ET’de de EF gibi hem yüksek ilişki hem de düşük hata görülecektir.

13 Nisan 2013 tarihli Landsat 8 görüntüsünden hesaplanan bir EF haritası (alt harita) akı kulesi ve çevresine yakınlaştırılarak Şekil 10’da verilmiştir. Ayrıca, Şekil 10’a kolaylık olması bakımından çalışma alanının doğal renkli görüntüsü de eklenmiştir (üst harita). Bu haritada EF’nin mekânsal değişimi görülmektedir. Yeniçağa gölünün etrafında EF değerleri diğer arazi örtüsüne göre daha yüksek değerleri almaktadır. Bu alanlar göl suyuna yakın olduğu için buharlaşmanın burada yüksek olması beklenmektedir. Daha sonra orman alanlarının etrafındaki arazi örtüsüne göre daha yüksek EF değerleri aldığı da görülmektedir. Bulut etkisinin gösterilmesi açısından bu tarih özenle seçilmiştir. Akı kulesinin etrafındaki bulutlu kısımlarda hesap yapılmadığı için o bölgelerde EF değerleri üretilmemiştir. Ayrıca, Landsat 8’in bulut algoritması gölü yanlışlıkla bulut olarak işaretlediği için gölün üzeri EF haritasında maskelenmiştir.



Şekil 10. Akı istasyonu ve çevresini gösteren doğal renkli görüntü (üst harita) 13 Nisan 2013 tarihinde Landsat 8 görüntülerinden elde edilen EF haritası (alt harita)

4. Sonuçlar

Bu çalışmada Landsat uydu görüntüleri ve trapezoid model kullanılarak EF ve ET haritaları üretilmiştir. Bu üretilen haritalar, Bolu Yeniçağa çalışma alanında kurulan yersel akı istasyonda toplanan gözlemler ile doğrulanmıştır.

Doğrulama sonuçlarına göre uydudan hesap edilen EF değerleri ile yersel EF değerleri arasında hem düşük hata hem de yüksek bir ilişki bulunmuştur. Modelden hesap edilen EF değerleri daha sonra GLDAS projesinden indirilen R_n değerleri ile çarpılarak ET değerleri üretilmiştir. Model ET değerleri ile yersel ET değerleri arasında yüksek ilişki olmasına rağmen model ET’yi düşük tahmin etmiştir. Bu durum GLDAS projesinden indirilen R_n gözlemlerinden kaynaklandığı için doğruluğu daha yüksek R_n verisi kullanılarak veya mevcut R_n verisi düzelterek modelin ET’yi gerçeğe yakın şekilde tahmin etmesi sağlanabilir.

Uydu verilerinden ET haritaları üretme çalışmalarını olumsuz etkileyen iki faktör vardır. Birincisi T_s parametresi toplayan uydu misyonu azlığı diğeri ise buluttur. Örneğin, çalışma alanı üzerinde yaklaşık 2 sene boyunca toplam 40 adet Landsat 5 ve Landsat 8 görüntüsü bulunmuştur ve bu görüntülerden 4’ü %90’dan yüksek olduğu için model hiç çalıştırılmamıştır. Geriye kalan 36 görüntüden akı istasyonu üzerinde sadece 19 kez EF ve ET değerleri elde edilebilmiştir.

Termal kanalda veri toplayan sensörlerin sayıca azlığı, senelik veya dönemlik ET hesaplamalarını büyük sekteye uğratmaktadır. Yeni uzaya fırlatılan Landsat 9 uydusunun veri toplaması başlamasıyla beraber yeryüzü üzerinde aynı anda 3 Landsat uydusu gözlem toplayacaktır. Böylelikle ilk olumsuz faktör kısmen çözülecektir, ancak bulut etkisi gelecekteki çalışmaları etki etmeye devam edecektir. Bundan dolayı, EF ve ET haritalarında bulutlardan dolayı oluşan irili ufaklı boşlukların doldurulması ile Landsat 7 görüntülerindeki boşlukların doldurulması çalışmaları önem arz etmektedir.

Bilgilendirme/Teşekkür

Bu çalışma TÜBİTAK 3501 - Kariyer Geliştirme Programı (Proje No: 120Y050) tarafından 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 çok teşekkür ederim.

Çatışma Beyanı

Herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Kaynakça

- Aksu, H., & Arikan, A. (2017). Satellite-based estimation of actual evapotranspiration in the Buyuk Menderes Basin, Turkey. *Hydrology Research*, 48(2), 559-570. <https://doi.org/10.2166/nh.2016.226>
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). *Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements*. Rome, Italy: FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. Geliş tarihi gönderen <http://www.kimberly.uidaho.edu/water/fao56/fao56.pdf>
- Allen, R. G., Tasumi, M., Morse, A., Trezza, R., Wright, J. L., Bastiaanssen, W., Kramber, W., Lorite, I., & Robison, C. W. (2007). Satellite-Based Energy Balance for Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration (METRIC)—Applications. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 133(4), 395-406. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2007\)133:4\(395\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2007)133:4(395))
- Anderson, M. C., Yang, Y., Xue, J., Knipper, K. R., Yang, Y., Gao, F., Hain, C. R., Kustas, W. P., Cawse-Nicholson, K., Hulley, G., Fisher, J. B., Alfieri, J. G., Meyers, T. P., Prueger, J., Baldocchi, D. D., & Rey-Sanchez, C. (2021). Interoperability of ECOSTRESS and Landsat for mapping evapotranspiration time series at sub-field scales. *Remote Sensing of Environment*, 252, 112189. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112189>
- 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. <https://doi.org/10.1007/s12524-018-0816-9>
- 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.
- 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. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.2003.00629.x>
- Bastiaanssen, W. G. M. (2000). SEBAL-based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey. *Journal of Hydrology*, 229(1-2), 87-100. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(99\)00202-4](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(99)00202-4)
- Beck, H. E., Zimmermann, N. E., McVicar, T. R., Vergopolan, N., Berg, A., & Wood, E. F. (2018). Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolution. *Scientific Data*, 5(1), 180214. <https://doi.org/10.1038/sdata.2018.214>
- Bhattarai, N., Shaw, S. B., Quackenbush, L. J., Im, J., & Niraula, R. (2016). Evaluating five remote sensing based single-source surface energy balance models for estimating daily evapotranspiration in a humid subtropical climate. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 49, 75-86. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2016.01.010>
- 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. <https://doi.org/10.1002/eco.1592>
- Jiménez, C., Prigent, C., Mueller, B., Seneviratne, S. I., McCabe, M. F., Wood, E. F., Rossow, W. B., Balsamo, G., Betts, A. K., Dirmeyer, P. A., Fisher, J. B., Jung, M., Kanamitsu, M., Reichle, R. H., Reichstein, M., Rodell, M., Sheffield, J., Tu, K., & Wang, K. (2011). Global intercomparison of 12 land surface heat flux estimates. *Journal of Geophysical Research*, 116(D2), D02102. <https://doi.org/10.1029/2010JD014545>
- Monteith, J. L. (1965). *Evaporation and environment*. Symposia of the Society for Experimental Biology, 19, 205-234. Geliş tarihi gönderen <https://repository.rothamsted.ac.uk/item/8v5v7/evaporation-and-environment>
- Moran, M. S., Clarke, T. R., Inoue, Y., & Vidal, A. (1994). Estimating crop water deficit using the relation between surface-air temperature and spectral vegetation index. *Remote Sensing of Environment*, 49(3), 246-263. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(94\)90020-5](https://doi.org/10.1016/0034-4257(94)90020-5)
- Mueller, B., Hirschi, M., Jimenez, C., Ciais, P., Dirmeyer, P. A., Dolman, A. J., Fisher, J. B., Jung, M., Ludwig, F., Maignan, F., Miralles, D. G., McCabe, M. F., Reichstein, M., Sheffield, J., Wang, K., Wood, E. F., Zhang, Y., & Seneviratne, S. I. (2013). Benchmark products for land evapotranspiration: LandFlux-EVAL multi-data set synthesis. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(10), 3707-3720. <https://doi.org/10.5194/hess-17-3707-2013>
- Nichols, W. E., & Cuenca, R. H. (1993). Evaluation of the evaporative fraction for parameterization of the surface energy balance. *Water Resources Research*, 29(11), 3681-3690. <https://doi.org/10.1029/93WR01958>
- Priestley, C. H. B., & Taylor, R. J. (1972). On the Assessment of Surface Heat Flux and Evaporation Using Large-Scale Parameters. *Monthly Weather Review*, 100(2), 81-92. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1972\)100<0081:OTAOSH>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1972)100<0081:OTAOSH>2.3.CO;2)
- Santanello, J. A. & Carlson, T. N. (2001). Mesoscale Simulation of Rapid Soil Drying and Its Implications for Predicting Daytime Temperature. *Journal of Hydrometeorology*, 2(1), 71-88. [https://doi.org/10.1175/1525-7541\(2001\)002<0071:MSORSD>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1525-7541(2001)002<0071:MSORSD>2.0.CO;2)
- 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. <https://doi.org/10.26833/ijeg.573503>
- Yagci, A. L., & Santanello, J. A. (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.
<https://doi.org/10.1109/JSTARS.2017.2753723>
- Yagci, A. L., Santanello, J. A., Jones, J. W., & Barr, J. (2017). Estimating evaporative fraction from readily obtainable variables in mangrove forests of the Everglades, U.S.A. *International Journal of Remote Sensing*, 38(14), 3981-4007.
<https://doi.org/10.1080/01431161.2017.1312033>
- Yang, X., Smith, P. L., Yu, T., & Gao, H. (2011). Estimating evapotranspiration from terrestrial groundwater-dependent ecosystems using Landsat images. *International Journal of Digital Earth*, 4(2), 154-170.
<https://doi.org/10.1080/17538947.2010.491561>
- Yang, X., Zhou, Q., & Melville, M. (1997). Estimating local sugarcane evapotranspiration using Landsat TM image and a VITT concept. *International Journal of Remote Sensing*, 18(2), 453-459.
<https://doi.org/10.1080/014311697219196>
- Yanmaz, D. D. (2019). Estimating evapotranspiration by METRIC model over Çakıt basin. Yüksek Lisans Tezi. Middle East Technical University.
<https://hdl.handle.net/11511/44788>
- Yılmaz, M. T., & Bulut, B. (2016). Türkiye'deki 2000-2015 yılları arasındaki buharlaşma ve terlemenin NOAA hidrolojik modeli ile incelenmesi. *DÜMF Mühendislik Dergisi*, 7(2), 225-235.
- Yılmaz, M. T., Anderson, M. C., Zaitchik, B., Hain, C. R., Crow, W. T., Ozdogan, M., Chun, J. A., & Evans, J. (2014). Comparison of prognostic and diagnostic surface flux modeling approaches over the Nile River basin. *Water Resources Research*, 50(1), 386-408.
<https://doi.org/10.1002/2013WR014194>



© Author(s) 2023 This work is distributed under <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>