

Araştırma Makalesi

Global Gerçek Evapotranspirasyon (ETa) Haritalarından Arazi Kullanım Sınıflarına Ait ETa Kayıplarının Tahmini

Fırat Peker^{1,*}  Hürrem Bayhan²  Atilla Akkoyunlu³ 

¹ Çevre Mühendisliği Bölümü, Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora Öğrencisi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye

² Çevre Mühendisliği Bölümü, İnşaat Fakültesi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye

³ İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Boğaziçi Üniversitesi, İstanbul, Türkiye

Geliş: 13.05.2021

Kabul: 25.05.2021

Özet: Günümüzde uydu görüntüleri kullanılarak gerçek evapotranspirasyon kayıplarının hesaplandığı çeşitli modeller geliştirilmiştir. Amerika Birleşik Devletleri Jeoloji Araştırmaları Kurumu tarafından Operasyonel Basitleştirilmiş Yüzey Enerji Dengesi Modeli kullanılarak üretilen global gerçek evapotranspirasyon haritaları bunlara örnektir. Uzamsal çözünürlüğü 1x1 km olan bu haritaların pikselleri içerisinde birden fazla arazi kullanım sınıfının yer aldığı durumlarda, bu haritalar kullanılarak arazi kullanım sınıflarına ait gerçek evapotranspirasyon kayıplarının hassas bir şekilde belirlenmesi güçleşmektedir. Bu çalışmada; piksel boyutu kısıtlanmasına bağlı kalmadan, global gerçek evapotranspirasyon haritalarından arazi kullanım sınıflarına ait gerçek evapotranspirasyon kayıplarının tahmini amacıyla, çoklu regresyon analizine dayalı bir model geliştirilmiştir. İstanbul İli Terkos su havzası kapsamında geliştirilmiş bu modelde; alt havzalara ait aylık gerçek evapotranspirasyon değerleri ile alt havzalardaki arazi kullanım sınıflarına ait aylık referans evapotranspirasyon değerleri arasında bir bağıntı kurulmuştur. Alt havzaların aylık gerçek evapotranspirasyon değerleri global gerçek evapotranspirasyon haritalarından elde edilmiştir. Aylık referans evapotranspirasyon değerleri Penman-Monteith yöntemine göre hesaplanmıştır. Arazi kullanım sınıfları Landsat uydu görüntüleri kullanılarak belirlenmiştir. Model sonucunda ölçüm ve tahmin değerleri arasında kök ortalama kare hata 11.4 olarak, R^2 katsayısı ise 0.963 olarak bulunmuş ve modelden elde edilen çoklu regresyon bağıntısı kullanılarak Terkos havzasındaki arazi kullanım sınıflarına ait aylık gerçek evapotranspirasyon kayıpları belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Evapotranspirasyon, Penman-Monteith, IDW enterpolasyon, regresyon analizi, arazi kullanım sınıfı.

Actual Evapotranspiration (ETa) Estimation For Land Use Classes From Global ETa Maps

Abstract: Today, various models have been developed in which real evapotranspiration losses are calculated using satellite images. Global actual evapotranspiration maps produced by the United States Geological Survey using Operational Simplified Surface Energy Balance Model are examples of these. In cases where more than one land use class is included in the pixels of these maps with a spatial resolution of 1x1 km, it becomes difficult to accurately determine the actual evapotranspiration losses of land use classes using these maps. In this study; a model based on multiple regression analysis was developed in order to estimate the actual evapotranspiration losses belonging to land use classes from global actual evapotranspiration maps without being bound by the pixel size limitation. In this model developed within the scope of Istanbul Province Terkos water basin; a relation was established between monthly actual evapotranspiration values of sub-basins and monthly reference evapotranspiration values of land use classes in sub-basins. Monthly actual evapotranspiration values of sub-basins were obtained from global actual evapotranspiration maps. Monthly reference evapotranspiration values were calculated according to the Penman-Monteith method. Land use classes were determined using Landsat satellite images. As a result of the model, the root mean square error between the measurement and prediction values

* Sorumlu yazar.

E-posta adresi: firatpeker@gmail.com (F. Peker)

was found as 11.4 and the R^2 coefficient as 0.963. Monthly actual evapotranspiration losses for land use classes in the Terkos basin were determined using the multiple regression relation obtained from the model.

Keywords: *Evapotranspiration, Penman-Monteith, IDW interpolation, regression analysis, land use class.*

1. Giriş

Bir arazide buharlaşma yoluyla toprak yüzeyinden ve terleme yoluyla bitki bünyesinden meydana gelen su kayıplarının toplamı evapotranspirasyon (ET) olarak adlandırılır. ET su döngüsünün temel bir bileşenidir ve hidrolojik çevrim için son derece önemlidir [1]. Hidrolojik döngüde önemli bir su bütçesi bileşeni olan ET, kara yüzeyleri ve atmosfer arasında kütle ve enerji alışverişinden sorumludur ve toplam karasal yağışların %60-75'ini atmosfere geri dönüştürür [2]. Belirli bir bölge için ET kayıplarının bilinmesi hidrolojik, tarımsal ve çevresel sistemlerin tasarımında, geliştirilmesinde ve izlenmesinde önemli bir bileşendir [3].

ET ile ilgili olarak referans evapotranspirasyon (ET_o), bitki türüne bağlı evapotranspirasyon (ET_c) ve gerçek evapotranspirasyon (ET_a) adı altında farklı tanımlar söz konusudur. ET_o; tamamı kısa boylu çim bitkisi ile kaplı bir alanda su kısıtı veya başka herhangi bir kısıtlama olmadığı durumdaki su kaybını, ET_c tamamı bitki ile kaplı bir alanda su kısıtı veya başka herhangi bir kısıtlama olmadığı durumda o bitki türüne bağlı olarak meydana gelen su kaybını ifade eder. ET_a ise bitki ile kaplı bir alanda bitki türüne, bitkinin alanı kapladığı yoğunluğa ve su kısıtı veya başka herhangi bir kısıta bağlı olarak meydana gelen gerçek su kaybını ifade eder [4].

ET kayıplarının tahmini amacıyla birçok yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntemlerden bir tanesi Birleşmiş Milletler Gıda ve Tarım Örgütü (FAO) tarafından FAO Sulama ve Drenaj Raporu No:56 (FAO56) kapsamında geliştirilmiş FAO Penman-Monteith (PM) yöntemidir. PM yöntemi dünyanın çoğu bölgesinde ET_o kayıplarını tahmin etmenin en iyi yolu olarak kabul edilmektedir [5]. Gerekli iklim verileri sağlandığı takdirde PM yöntemi ET_o'yu tahmin etmek için standart yöntem olarak tavsiye edilmiş [6,7] ve FAO ve Dünya Meteoroloji Örgütü (WMO) tarafından standart potansiyel evapotranspirasyon yöntemi olarak önerilmiştir [8]. Öyle ki yapılan birçok çalışmada PM yöntemi referans alınarak evapotranspirasyon tahmininde kullanılan diğer yöntemlerin birbiri ile kıyaslaması yapılmıştır [9, 10, 11, 12].

PM yönteminde ilk olarak ET_o hesabı yapılır. Daha sonra ET_c hesabına geçilir. ET_c'nin hesaplanabilmesi için bir bitki türüne ait su tüketim katsayısının (k_c) bilinmesi gerekir. ET_o değeri ile k_c çarpılarak bitki türü için ET_c hesaplanır. Dolayısıyla PM yöntemindeki iki kilit nokta; ET_o ve k_c değerleridir. ET_o'nun ve tarımsal bitkiler için k_c katsayılarının hesaplanmasına ilişkin yönerge FAO56'da verilmiştir. Ancak tarım alanlarında bu hesapların yapılabilmesi için alanda yer alan bitki türlerinin bilinmesi gerekmektedir. Ayrıca ET hesabı yapılmak istenen arazide tarım alanlarının yanı sıra orman alanı, sulak alan, kentsel alan gibi farklı arazi kullanım sınıfları yer alıyorsa, bu durumda ET hesaplarının yapılması daha da güçleşmektedir.

Günümüzde uydu teknolojilerinin gelişmesi ile karışık arazi örtüsü sınıflarına ait alanlarda ET_a kayıplarının hesaplandığı, enerji dengesine dayalı çeşitli modeller geliştirilmiştir. SEBAL (Arazi Yüzey Enerji Dengesi Algoritması), S-SEBI (Basitleştirilmiş Yüzey Enerji Dengesi Endeksi), SEBS (Yüzey Enerji Dengesi Sistemi), METRIC (İçselleştirilmiş Kalibrasyon ile Yüksek Çözünürlükte Evapotranspirasyonu Haritalama) ve SSEBop (Operasyonel Basitleştirilmiş Yüzey Enerji Dengesi) modelleri ET_a tahminlerinin yapılması kapsamında geliştirilmiş modellerden bazılarıdır [13]. Uzaktan algılama teknolojisi ve enerji dengesine dayalı bu modeller ET_a için doğru ve tekrarlanabilir tahminler sağlayabilmektedir [14].

SSEBop modeli enerji dengesine dayalı ET_a tahminlerinin yapıldığı çalışmalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. ABD'de ülke çapında yapılmış bir çalışmada SSEBop modeli tahminleri ile ölçüm değerlerinin karşılaştırılması sonucunda R^2 katsayıları 0.7 ile 0.97 arasında bulunmuştur [15]. ABD'de yapılmış başka bir çalışmada SSEBop modelinden elde edilen tahminler ölçüm verileri ile karşılaştırılmış ve model sonuçlarının farklı arazi örtüsü sınıflarında güçlü bir doğrusal ilişki gösterdiği ve korelasyon katsayılarının odunsu savanalarda 0.75, otlaklarda 0.81, orman alanlarında 0.82, tarım alanlarında 0.84, çalılık alanlarında 0.89 ve kentsel alanlarda 0.95 olarak hesaplandığı belirtilmiştir [16]. ABD Teksas eyaletinde yer alan yüksek ovalık bölgelerde yapılan bir çalışmada SSEBop modelinden elde edilen ET_a tahminleri ile lizimetre ölçümlerinin sonuçları karşılaştırılarak, gözlemlenen ve modellenen ET_a değerleri arasında 0,87 ile 0,97 arasında değişen R^2 katsayıları elde edilmiştir [17]. ABD Colorado Su Havzası için yapılmış başka bir çalışmada SSEBop modeli aylık ET_a tahminleri ile iki ayrı ölçüm istasyonuna ait ölçüm değerlerinin karşılaştırılması sonucunda R^2 katsayıları 0.85 ve 0.91 olarak bulunmuştur [18]. Yine ABD çapında yapılmış bir çalışmada SSEBop modeli aylık ET_a tahminleri ile 42 adet ölçüm istasyonu verisi karşılaştırılmış ve R^2 katsayıları tarım alanları için 0.92, çayır ve otlaklar için 0.88, orman alanları için 0.84, odunsu savanalarda için 0.88 olarak hesaplanmıştır [19]. Soya fasulyesi ekili bir alanda yapılmış bir çalışmada SSEBop modeli tahminleri ile ölçüm verileri karşılaştırıldığında R^2 katsayısı 0.88 olarak bulunmuş ve modelin bu bitki türü için ET_a kayıplarının tahmininde kullanılabilir olduğu belirtilmiştir [20]. ABD ve Meksika'da yer alan Yukarı Rio Grande Havzası tarım alanlarında yer alan 6 adet ölçüm istasyonunun 2007-2014 yılları arasındaki 8 yıllık ET_a ölçüm değerleri ile SSEBop modeli tahmini ET_a değerlerinin karşılaştırıldığı bir çalışmada, 0.83 ile 0,98 arasında değişen yüksek korelasyon katsayıları elde edilmiştir [21]. Mısır Nil Nehri havzasında yer alan tarım alanlarında sulama verimliliğinin değerlendirilmesi kapsamında yapılmış bir çalışmada, içerisinde SSEBop modelinin de yer aldığı 3 farklı modelin performansı ölçülmüş ve aylık ET_a tahminleri açısından en iyi

performansı SSEBop modelinin gösterdiği belirtilmiştir [22].

Günümüzde, Amerika Birleşik Devletleri Jeoloji Araştırmaları Kurumu (USGS) Kıtık Erken Uyarı Sistemi Ağı (FEWS NET) tarafından, SSEBop modeli ve MODIS uydu görüntüleri kullanılarak tüm dünya arazilerini kapsayacak şekilde Global ETa (GETa) haritaları üretilmekte ve kuraklık izleme ve erken uyarı amacıyla kullanılmaktadır. USGS FEWS NET Data Portal (<https://earlywarning.usgs.gov/fews>) kaynağından ücretsiz olarak kullanıma sunulan GETa haritaları, 2003 yılından günümüze kadar dünya ölçeğinde aylık ve yıllık ETa tahminleri sunmaktadır. GETa haritaları ile 6 kıtadan 12 ölçüm sahası verilerinin karşılaştırıldığı bir çalışmada bazı bölgelerde bazı sapmalar olmasına rağmen, genel olarak makul sonuçların elde edildiği bildirilmiştir [23].

USGS GETa Haritaları 1x1km piksel boyutuna sahip olup, karışık arazi kullanım sınıflarını içeren kompleks alanlar için ETa tahminleri sunmaktadır. Ancak bir piksel içerisinde birden fazla arazi kullanım sınıfının yer aldığı durumlarda, bu haritalardan arazi kullanım sınıflarına ait ETa kayıplarının hassas bir şekilde belirlenmesi güçleşmektedir. Bu çalışmada; piksel boyutu kısıtlamasına bağlı kalmadan, GETa haritalarından farklı arazi kullanım sınıflarına ait ETa kayıplarının belirlenmesi amacıyla, çoklu regresyon analizine dayalı bir model geliştirilmiştir. İstanbul İli Terkos su havzası kapsamında geliştirilmiş bu modelde; alt havzalara ait aylık ETa değerleri ile alt havzalardaki arazi kullanım sınıflarına ait aylık referans evapotranspirasyon (ETo) değerleri arasında bir çoklu regresyon bağıntısı kurulmuş ve bu bağıntı kullanılarak Terkos havzasındaki farklı arazi kullanım sınıflarına ait aylık ETa kayıpları belirlenmiştir.

2. Materyal ve Yöntem

2.1. Çalışma Alanı

İstanbul'un içme ve kullanma suyu ihtiyacının karşılandığı yüzeysel su kaynaklarından biri olan Terkos barajına ait su toplama havzası çalışma alanı olarak seçilmiştir. Terkos Barajı yıllık 142 milyon m³'lük kapasiteye ve 619 km²'lik havza alanına sahiptir. Çalışma alanının sınırları, Şekil 1'de verilmektedir.

2.2. Kullanılan Veriler

Çalışmada kullanılan 2003-2015 yılları arası aylık GETa haritaları USGS FEWS NET Data Portal (<https://earlywarning.usgs.gov/fews>) kaynağından temin edilmiştir. Terkos su havzası ve alt havza alanları sınırları ile referans evapotranspirasyon hesaplarının yapılmasında kullanılan sayısal yükseklik modeli (DEM) haritası İstanbul Büyükşehir Belediyesi Planlama Ajansı'ndan (Önceki adı: İstanbul Metropolitan Planlama Merkezi) temin edilmiştir. Arazi kullanım sınıflarının belirlenmesinde kullanılan Landsat uydu görüntüleri USGS Earth Explorer (<https://earthexplorer.usgs.gov/>) kaynağından temin edilmiştir. 2003-2015 yılları arası aylık maksimum ve minimum sıcaklık, ortalama rüzgâr hızı, maksimum ve minimum nispi nem ve toplam güneşlenme süresi ölçüm verileri Meteoroloji Genel Müdürlüğü Meteorolojik Veri Bilgi Sunum ve Satış Sistemi'nden (MEVBIS) temin edilmiştir.

2.3. Arazi Kullanım Sınıfı Haritalarının Oluşturulması

Terkos havzası arazi kullanım sınıflarının belirlenmesi kapsamında Landsat uydu görüntüleri kullanılmıştır. Uydu görüntüleri üzerinde örnekleme dosyaları (signature file) oluşturulmuş ve bunlar ile denetimli sınıflamalar (supervised classification) yapılarak arazi kullanım sınıfları belirlenmiştir. Çalışmada her ne kadar 2003-2015 yılları arasındaki aylık GETa Haritaları kullanılmış olsa da arazi kullanım sınıflarının oluşturulmasında kullanılan Landsat uydu görüntüleri 2003-2015 yılları arasındaki tüm ay ve yıllara ilişkin olmayıp, sadece belirli dönemleri temsil edecek şekilde seçilmiştir. Bunun başlıca nedeni; uydu görüntülerinin alındığı bazı tarihlerde meydana gelmiş fırtına olayları veya yüksek bulutluluk oranlarından dolayı görüntü kalitesindeki bozulmalardır. Bu nedenle; Landsat 5, Landsat 7 ve Landsat 8 uydularından çekilmiş olan bulutluluk oranı düşük görüntüler seçilmiş ve 2003-2015 yılları arasını temsil etmek üzere 8 farklı tarihli Landsat uydu görüntüsü kullanılarak arazi kullanım sınıfı haritaları oluşturulmuştur. Ancak çalışmada kullanılan Terkos havzası arazi kullanım sınıfı haritaları bu 8 adet uydu görüntüsü ile sınırlandırılmamıştır. Çalışmada yapılan kabule dayanarak; uydu görüntülerinden elde edilen arazi kullanım sınıfı haritalarının, görüntünün alındığı tarihten 3 ay öncesinde ve 3 ay sonrasında önemli bir değişime uğramamış olduğu varsayılmıştır. Bu varsayıma dayanarak 8 farklı uydu görüntüsünden toplam 48 adet arazi kullanım sınıfı haritası elde edilmiştir. Tablo 1'de çalışmada kullanılan Landsat uydu görüntülerinin tarihleri ve bunlara göre oluşturulan arazi kullanım sınıfı haritalarının dönemleri yer almaktadır.

Tablo 1. Çalışmada kullanılan Landsat uydu görüntüleri tarihleri ve bunlardan elde edilen arazi kullanım sınıfı haritası dönemleri

Landsat Uydu Görüntüsü Tarihi	Arazi Kullanım Sınıfı Haritası Dönemleri
31.Ara.2002	Ocak 2003/Şubat 2003/Mart 2003
03.Tem.2003	Nisan 2003/Mayıs 2003/Haziran 2003/Temmuz 2003/Ağustos 2003/Eylül 2003/Ekim 2003
12.Haz.2007	Mart 2007/ Nisan 2007/Mayıs 2007/Haziran 2007/ Temmuz 2007/Ağustos 2007/Eylül 2007
14.Oca.2008	Ekim 2007/Kasım 2007/Aralık 2007/Ocak 2007/Şubat 2007/Mart 2007/Nisan 2007
07.Şub.2011	Kasım 2010/Aralık 2010/Ocak 2011/Şubat 2011/Mart 2011
22.May.2011	Nisan 2011/Mayıs 2011/Haziran 2011/ Temmuz 2011/Ağustos 2011
26.Şub.2015	Kasım 2014/Aralık 2014/Ocak 2015/Şubat 2015/Mart 2015/Nisan 2015/Mayıs 2015
06.Eyl.2015	Haziran 2015/ Temmuz 2015/Ağustos 2015/Eylül 2015/Ekim 2015/Kasım 2015/Aralık 2015

2.4. Referans Evapotranspirasyon Hesapları

Terkos havzası için referans evapotranspirasyon (ETo) değerlerinin hesaplanmasında FAO Penman-Monteith (PM) yöntemi kullanılmıştır. ETo hesapları Tablo 1'de verilen her bir arazi kullanım sınıfı haritası dönemi için ayrı ayrı yapılmıştır. PM yöntemine göre ETo hesaplarının yapılmasında, aşağıda verilen (1) no'lu eşitlik kullanılmıştır.

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{(T + 273)} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (1)$$

Denklem (1)'de; ET_0 : referans evapotranspirasyon [mm gün^{-1}], R_n : net güneş radyasyonu [$\text{MJ m}^{-2} \text{gün}^{-1}$], G : toprak ısı akısı [$\text{MJ m}^{-2} \text{gün}^{-1}$], T : ortalama sıcaklık [$^{\circ}\text{C}$], u_2 : yüzeyden 2 metre yükseklikteki ortalama rüzgâr hızı [m s^{-1}], e_s : ortalama doymuş buhar basıncı [kPa], e_a : gerçek buhar basıncı [kPa], Δ : doymuş buhar basıncı-sıcaklık eğrisinin eğimi [$\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$], γ : psikrometrik sabit [$\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$] olarak tanımlanmaktadır. Denklemde yer alan tüm parametrelerin hesaplanması PM yönteminde belirtildiği şekilde yapılmıştır. ET_0 hesapları için gerekli iklim verileri olan aylık maksimum ve minimum sıcaklık, aylık maksimum ve minimum nispi nem, aylık ortalama rüzgâr hızı ve aylık toplam güneşlenme süresi verileri meteorolojik ölçüm istasyonlarına ait ölçüm verileridir. Diğer parametrelerin hesaplanmasında FAO56 Raporunda yer alan denklemler kullanılmıştır. ET_0 hesabında kullanılan tüm denklemler makale ekinde verilmiştir.

ET_0 hesapları DEM haritası temel alınarak piksel bazında yapılmış, böylelikle çalışma alanı için aylık ET_0 haritaları oluşturulmuştur. Piksel bazında hesaplamalar için meteoroloji ölçüm istasyonlarına aylık ortalama ölçüm verilerinden çalışma alanını kapsayacak şekilde iklim haritaları oluşturulmuştur. İklim haritalarının elde edilmesinde ters mesafe ağırlıklı enterpolasyon (IDW) yöntemi kullanılmıştır.

Çok değişkenli enterpolasyon için kullanılan IDW yönteminde temel yaklaşım; değeri bilinmeyen bir tahmin noktasına etrafındaki değeri bilinen noktaların ağırlıklı ortalaması alınarak değer atanmasıdır. Bilinen noktaların ağırlıklandırılması tahmin noktası ile aralarındaki mesafenin tersine bağlıdır [24]. IDW yönteminde tahmin noktasına en yakın ölçümlerin tahmin edilen değer üzerindeki etkileri uzaktakilere göre daha fazladır. Dolayısıyla IDW yönteminde ölçülen her noktanın mesafe ile azalan yerel bir etkiye sahip olduğu varsayılır [25]. Yağış gibi iklimsel ölçüm verilerinin enterpolasyonunda sıklıkla kullanılan IDW yöntemi, nispeten basit olup az girdi verisi gerektirmekte ve genellikle küçük ve orta ölçekli havzalar için kullanılmaktadır [26].

İklim haritaları için yapılan IDW enterpolasyon işlemi öncesinde ölçüm verileri üzerinde gerekli analizler yapılarak bölgesel homojenliğin sağlandığı görülmüş, bazı istasyonlardaki eksik ölçümler tamamlanmıştır. ArcGIS Geostatistical Analyst Tools modülü içerisinde yer alan IDW fonksiyonu kullanılarak Bahçeköy, Kumköy, Florya, Çorlu, Tekirdağ-Saray, Çatalca-Radar ve Silivri meteoroloji ölçüm istasyonlarına ait 2003-2015 yılları arası aylık ortalama ölçüm verilerinden aylık maksimum sıcaklık, minimum sıcaklık, ortalama rüzgâr hızı, maksimum nem, minimum nem ve toplam güneşlenme süresi haritaları oluşturulmuştur. Şekil 1'de çalışma alanı ve iklim haritalarının oluşturulmasında kullanılan iklim verilerinin alındığı meteoroloji ölçüm istasyonlarının konumları verilmiştir. Çalışma alanı içerisinde ve yakın çevresinde başka ölçüm istasyonları da mevcuttur. Ancak yeterli ölçüm verisi temin edilemediğinden dolayı bu istasyonlara çalışmada yer verilmemiştir.



Şekil 1. Çalışma alanı ve iklim verilerinin alındığı meteoroloji ölçüm istasyonlarının konumları

2.5. Çoklu Regresyon Analizine Dayalı Modelleme

Çoklu regresyon analizine dayalı geliştirilen modelde bağımlı değişken aylık GETa haritalarından elde edilmiş olan alt havza aylık ortalama ETa değerleridir. GETa haritaları 1×1 km piksel boyutuna sahip olduklarından bazı durumlarda bir piksel içerisinde birden fazla arazi kullanım sınıfı yer alabilmektedir. Piksel boyutundan kaynaklanan bu kısıtlamayı aşmak için alt havza alanları en küçük harita birimleri olarak kullanılmıştır. Regresyon analizinde kullanılan bağımsız değişkenler ise alt havza alanları içerisindeki her bir arazi kullanım sınıfına ait aylık ET_0 değerleri, alt havza alanları içerisindeki her bir arazi kullanım sınıfının kapladığı alan ve aylık ortalama ETa katsayısı olarak sıralanmaktadır. Aylık ortalama ETa katsayısı; çalışmada kullanılan GETa haritalarının tümüne göre hesaplanan aylık genel ortalama ETa değerlerinin, yine çalışmada kullanılan GETa haritalarının tümüne göre hesaplanan Terkos havzası genel ortalama ETa değerine bölünmesiyle elde edilen katsayıdır. Modelde kullanılan çoklu regresyon bağıntısı (2) no'lu eşitlikte verilmiştir.

$$ET_{ma} = a + b_1X_1 + b_2X_2 + \dots + b_nX_n + c_1W_1 + c_2W_2 + \dots + c_nW_n + dY \quad (2)$$

Denklem (2)'de; ET_{ma} : GETa haritalarından elde edilen alt havza aylık ETa değeri, a : regresyon sabiti, $b_{1,2,\dots,n}$: farklı arazi kullanım sınıfları için ET_0 katsayıları, $X_{1,2,\dots,n}$: alt havza alanı içerisindeki farklı arazi kullanım sınıflarına ait aylık ET_0 değerleri, $c_{1,2,\dots,n}$: farklı arazi kullanım sınıfları için alan katsayısı, $W_{1,2,\dots,n}$: alt havza alanı içerisindeki farklı arazi kullanım sınıflarının kapladığı alan, d : aylık periyot katsayısı, Y : aylık ortalama ETa katsayısı olarak tanımlanmaktadır.

Çoklu regresyon modeli sonuçlarının değerlendirilmesinde; ölçüm ve tahmin değerleri arasındaki kök ortalama kare hata (RMSE) ve determinasyon katsayısına (R^2) bakılmıştır. Ölçüm değerleri GETa haritalarından elde edilen alt havza aylık ETa değerleridir. Tahmin değerleri ise regresyon denkleminde dayanarak hesaplanan alt havza aylık ETa değerleridir.

3. Sonuçlar

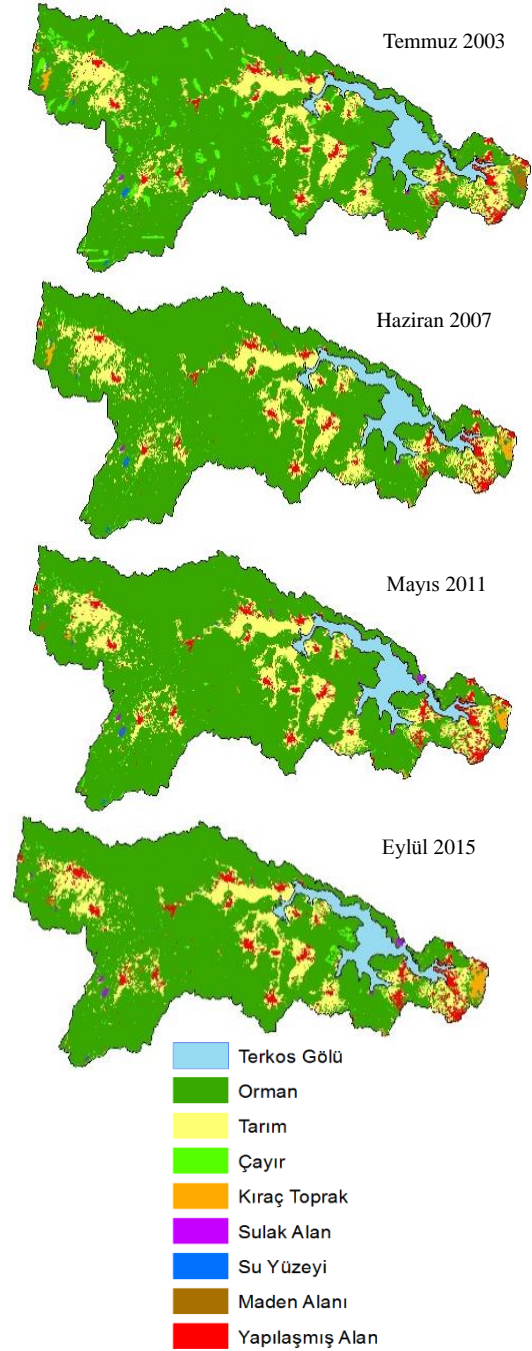
3.1. Terkos Havzası Arazi Kullanım Sınıfları

Landsat uydu görüntüleri kullanılarak Terkos havzası için 8 farklı arazi kullanım sınıfı belirlenmiştir. Bu arazi kullanım sınıfları; tarım alanları, orman alanları, çayır alanları, su yüzeyleri, sulak alanlar, kıraç alanlar, maden alanları ve yapılaşmış alanlar olarak sıralanmaktadır. Yukarıda açıklandığı üzere; çalışmada 8 farklı Landsat uydu görüntüsü temel alınarak 48 adet arazi kullanım haritası oluşturulmuştur. Temel olarak alınan bu 8 farklı tarihli Landsat uydu görüntüsünden elde edilen arazi kullanım sınıflarının alansal bilgileri Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Landsat uydu görüntüleri kullanılarak elde edilen arazi kullanım sınıfları ve alanları

Landsat Uydu Görüntüsü	Arazi Kullanım Sınıfları Alanları (ha)							
	Orman Alanı	Tarım Alanı	Çayır Alanı	Su Yüzeyi (Göl Hariç)	Sulak Alan	Kıraç Alan	Maden Alanı	Yapı Alanı
31.Ara.02	53 654	11 345	2 981	60	70	228	329	744
03.Tem.03	53 654	11 341	2 981	60	70	228	329	749
12.Haz.07	55 350	11 247	1 259	82	67	456	91	859
14.Oca.08	55 350	11 244	1 258	82	67	456	91	863
07.Şub.11	55 543	11 210	1 074	57	154	346	132	895
22.May.11	55 543	11 198	1 073	57	154	346	132	909
26.Şub.15	55 038	10 881	1 261	19	184	576	191	1 262
06.Eyl.15	55 033	10 832	1 255	19	184	576	191	1 322

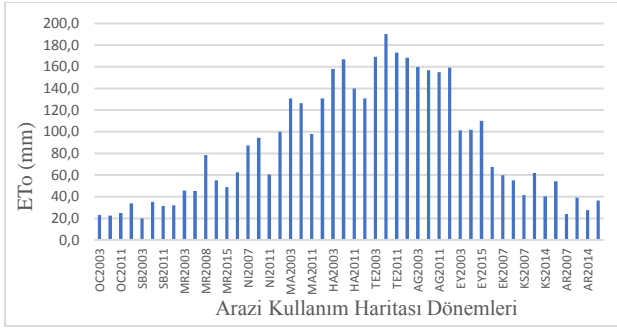
Arazi kullanım sınıflarında meydana gelen değişimler incelendiğinde havzadaki en fazla alanı kaplayan orman alanlarında %2,6’lık bir artış olduğu, ikinci sırada gelen tarım alanlarında ise %4,5’lik bir azalma olduğu görülmektedir. Çayır alanları ve su yüzeylerinde azalma olurken, sulak alanlarda artış olmuştur. Maden alanları azalırken kıraç alanlar artmıştır. Artış görülen diğer bir arazi kullanım sınıfı ise yapılaşmış alanlardır. Terkos havzasındaki 2003-2015 yılları arasındaki arazi kullanımını değişimlerinin görsel olarak izlenmesi amacıyla, 03 Temmuz 2003, 12 Haziran 2007, 22 Mayıs 2011 ve 06 Eylül 2015 tarihlerine ait Landsat uydu görüntülerinden elde edilen arazi kullanım sınıfı haritaları Şekil 2’de verilmiştir.



Şekil 2. Terkos havzası arazi kullanım sınıfları haritaları

3.2. Aylık Referans Evapotranspirasyon (ET₀) Kayıpları

Terkos havza alanında Tablo 1’de verilen aylık arazi kullanım haritası dönemleri için hesaplanan aylık ET₀ kayıpları Şekil 3’te verilmiştir. Buna göre en yüksek ET₀ kaybı aylık 190 mm ile Temmuz 2007 dönemi için hesaplanmıştır. En düşük ET₀ kaybı ise aylık 20 mm ile Şubat 2003 dönemi için hesaplanmıştır. Tüm dönemlerden elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde; kış aylarından yaz aylarına doğru ET₀ miktarlarında genel olarak bir artış görüldüğü, yaz aylarından kış aylarına doğru ise azalma görüldüğü izlenmektedir.



Şekil 3. Terkos havzası aylık ETo kayıpları

Tüm dönemlere göre aylık ETo ortalamaları Tablo 3'te verilmiştir. Buna göre en yüksek ortalama temmuz ayı için, en düşük ortalama ise ocak ayı için hesaplanmıştır.

Tablo 3. Terkos havzasında tüm dönemlere göre aylık ortalama ETo değerleri

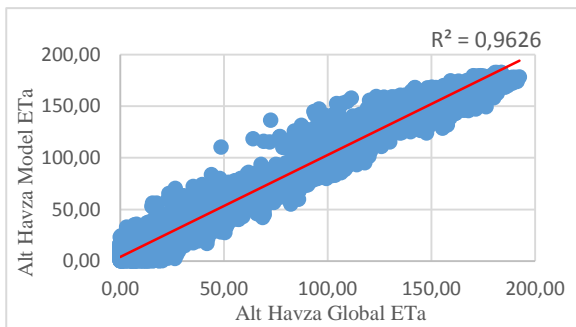
Aylar	ETo (mm)
Ocak	26.15
Şubat	29.65
Mart	54.69
Nisan	81.00
Mayıs	121.40
Haziran	148.87
Temmuz	175.24
Ağustos	157.71
Eylül	104.33
Ekim	60.79
Kasım	49.49
Aralık	31.79

3.3. Çoklu Regresyon Analizi Sonuçları

Çoklu regresyon analizi sonucundan elde edilen istatistiksel göstergeler Tablo 4'te verilmiştir. Tablo incelendiğinde tahmin ve ölçüm değerlerine ait maksimum, minimum, ortalama ve standart sapma değerlerinin birbirine yakın olduğu görülmektedir. Model performansını gösteren ölçüm ve tahmin değerleri arasındaki RMSE değeri 11,4 olarak hesaplanmıştır. Tahmin değerleri ile ölçüm değerleri arasında oluşturulan dağılım grafiği aşağıda yer alan Şekil 4'te verilmiştir. Şekilden R^2 katsayısının 0.963 olarak hesaplandığı görülmektedir.

Tablo 4. Modelden elde edilen istatistiksel göstergeler

Tahmin Değerleri (mm)				Ölçüm Değerleri (mm)			
Maks.	Min.	Ort.	Std.Sp.	Maks.	Min.	Ort.	Std.Sp.
182.4	0.1	67.7	56.3	192.5	0.0	64.5	55.9



Şekil 4. Tahmin ve ölçüm değerleri arasındaki dağılım grafiği

Çoklu regresyon analizinden elde edilen model katsayıları

Tablo 5'te verilmiştir. Tabloda yer alan aylık periyot katsayısı, ETo katsayıları ve alan katsayıları çoklu regresyon analizi sonucunda elde edilmiş katsayılardır. Aylık ortalama ETo katsayılarına ilişkin açıklama ise daha önce yapılmıştır.

Tablo 5. Çoklu regresyon analizine dayalı model katsayıları

Aylar	Aylık Ortalama ETo Katsayıları	Aylık Periyot Katsayısı
Ocak	0.170	67.108
Şubat	0.139	67.108
Mart	0.317	67.108
Nisan	0.917	67.108
Mayıs	1.753	67.108
Haziran	2.173	67.108
Temmuz	2.425	67.108
Ağustos	2.026	67.108
Eylül	1.303	67.108
Ekim	0.538	67.108
Kasım	0.261	67.108
Aralık	0.131	67.108

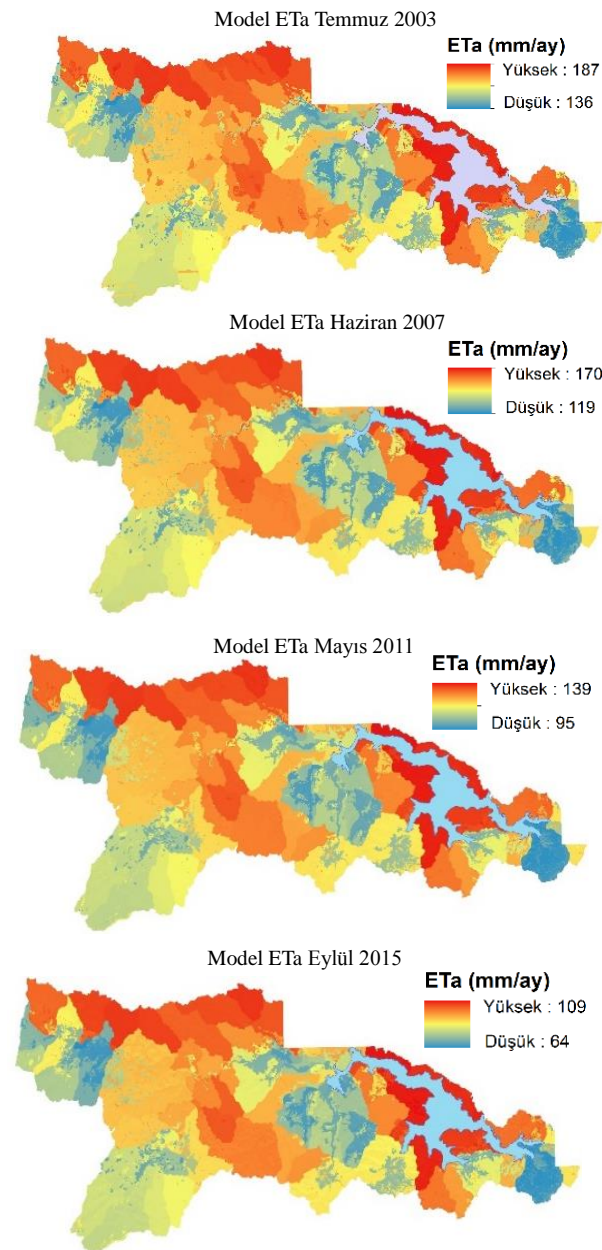
Arazi Sınıfları	ETo Katsayıları	Alan Katsayıları
Kıraç	-0.007	-0.000003
Maden	0.015	0.000009
Çayır	0.018	-0.000005
Orman	-0.010	0.000001
Sulak Alan	0.006	0.000001
Su Yüzeyi	-0.020	0.000006
Tarım	-0.062	0.000001
Yapı	0.002	0.000003

3.4. Arazi Kullanım Sınıfları ETo Kayıpları

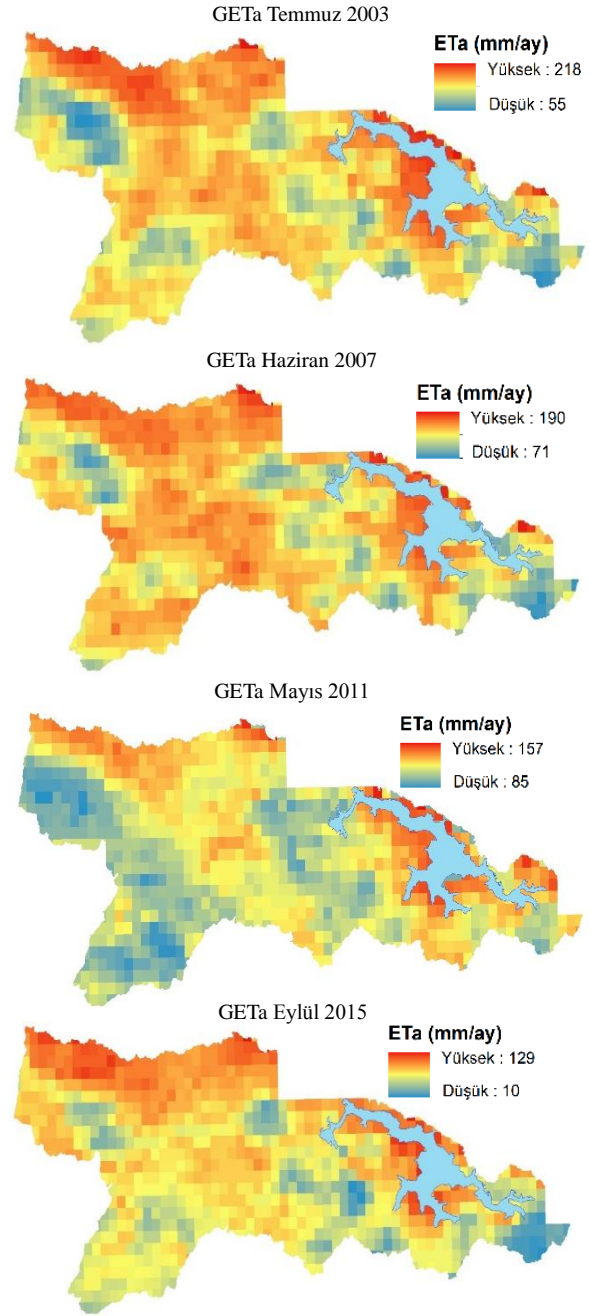
Terkos havzası kapsamında geliştirilen çoklu regresyon modeli kullanılarak Tablo 1'de verilen her bir aylık arazi kullanım haritası dönemi için arazi sınıflarına dayalı aylık ETo kayıpları hesaplanmış ve bunlara ait ETo haritaları oluşturulmuştur. Toplam 48 ayrı dönem için yapılan hesaplara dayanarak arazi kullanım sınıfı aylık ortalama ETo değerleri Tablo 6'da verilmiştir. Ancak oluşturulan 48 adet ETo haritasının tümünün gösterimi mümkün olmadığından dolayı, genel değişimin izlenmesi amacıyla, aşağıda yer alan Şekil 5'te sadece Temmuz 2003, Haziran 2007, Mayıs 2011 ve Eylül 2015 dönemleri için oluşturulan arazi kullanım sınıflarına dayalı ETo haritalarına yer verilmiştir. Şekil 6'da ise modelden hesaplanan ETo değerlerinin görsel karşılaştırmalarının yapılması amacıyla bu 4 ayrı döneme ait USGS GETa haritası verilmiştir.

Tablo 6. Arazi kullanım sınıflarının tüm dönemlere göre ortalama ETa değerleri

Aylar	Ortalama ETa Kayıpları (mm)							
	Orman	Tarım	Çayır	Su Yüzeyi (Göl hariç)	Sulak Alan	Kıraç	Maden	Yapı
Ocak	15	6	10	8	19	10	10	11
Şubat	13	4	8	6	16	8	8	9
Mart	24	14	20	17	28	19	20	21
Nisan	64	53	61	57	69	59	61	61
Mayıs	120	106	118	112	125	115	118	117
Haziran	148	133	146	140	154	143	146	145
Temmuz	165	148	164	156	171	160	164	162
Ağustos	138	123	137	130	144	133	137	136
Eylül	90	77	87	82	94	85	87	87
Ekim	39	29	35	32	42	34	35	36
Kasım	21	11	17	14	25	16	17	17
Aralık	12	3	8	5	16	7	8	8



Şekil 5. Modele dayanarak oluşturulan aylık ETa haritalarından seçilmiş örnekler



Şekil 6. USGS GETa haritalarından seçilmiş örnekler

3.5. Tartışma

Landsat uydu görüntüleri kullanılarak oluşturulan Terkos Havzası arazi kullanım sınıfları alansal verileri incelendiğinde (Tablo 2), birbirine yakın tarihli görüntülerden (örneğin 31 Aralık 2002 ve 03 Temmuz 2003 gibi) elde edilen arazi kullanım sınıfları alansal değerlerinde önemli bir değişikliğin olmadığı görülmektedir. Arazi kullanım sınıflarındaki değişimler birbirine uzak tarihli görüntülerden (örneğin: 03 Temmuz 2003 ile 12 Haziran 2007 gibi) elde edilen haritalarda görülmektedir. Bu sonuçlar; çalışma kapsamında yapılmış olan uydu görüntülerinden elde edilen arazi kullanım sınıfı haritalarının, görüntünün alındığı tarihten 3 ay öncesinde ve 3 ay sonrasında önemli bir değişime uğramamış olduğu varsayımını destekler niteliktedir.

Öte yandan; model kullanılarak oluşturulan ETa haritaları incelendiğinde, bu haritalardaki minimum ve maksimum aylık ETa değerleri aralığının, GETa haritalarındaki minimum ve maksimum aylık ETa değerleri aralığından daha dar bir skalaya sahip olduğu görülmektedir. Arazi kullanım sınıflarına ait ETa değerlerinin hesaplanması amacıyla geliştirilen regresyon modelinde alt havzalar en küçük harita birimi olarak kullanılmıştır. Her bir alt havza alanındaki PM yöntemine göre hesaplanmış ortalama ETo değeri ve alt havza global ETa değerleri arasında arazi kullanım sınıfları ve aylık periyotların da hesaplamalara dahil edildiği bir bağıntı kurulmuştur. GETa haritaları ve modelden elde edilen ETa haritalarındaki maksimum-minimum değer skalasındaki farklılıkların temel nedeninin, modelde en küçük harita birimi olarak alt havzaların kullanılmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu bağlamda; alt havza bazında yapılan hesaplamalarda GETa değerlerinin ortalamasının alınmasından dolayı, bazı minimum ve maksimum değerlerin bu ortalama değerler içerisinde elenmiş olabileceği, şayet modelde alt havza birimlerinden daha küçük harita birimleri kullanılırsa maksimum-minimum değer skalasının genişleyebileceği düşünülmektedir. Maksimum-minimum değer skalalarındaki bu farklılığa rağmen, model sonucunda elde edilen istatistiksel göstergelerin, geliştirilen bu modelin arazi kullanım sınıflarına ait ETa kayıplarının tahmininde kullanılabilir olduğuna işaret ettiği düşünülmektedir.

Ek: FAO Penman-Monteith Yöntemine Göre Referans Evapotranspirasyonun Hesaplanmasına Kullanılan Denklemler [27]

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{(T + 273)} u_2(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)}$$

$$R_n = R_{ns} - R_{nl}$$

$$R_{ns} = (1 - \alpha)R_s$$

$$R_s = \left(a_s + b_s \frac{n}{N}\right)R_a$$

$$N = \left(\frac{24}{\pi}\right)\omega_s$$

$$\omega_s = \arccos(-\tan(\phi)\tan(\delta))$$

$$\delta = 0.409 \sin\left(\frac{2\pi}{365}\right) - 1.39$$

$$R_a =$$

$$24 \frac{60}{\pi} G_{sc} d_r (\omega_s \sin(\phi) \sin(\delta) + \cos(\phi) \cos(\delta) \cos(\omega_s))$$

$$d_r = 1 + 0.033 \cos\left(\frac{2\pi}{365}\right)$$

$$\Delta = \frac{4098(0.6108 \exp\left(\frac{17.27T}{T + 237.3}\right))}{(T + 237.3)^2}$$

$$G_{ay,i} = 0.07(T_{ay,i+1} - T_{ay,i-1})$$

$$\gamma = 0.000665P$$

$$P = 101.3((293 - 0.0065z)/293)^{5.26}$$

$$u_2 = u_z \frac{4.87}{\ln(67.8z - 5.42)}$$

$$e_s = \frac{e^0(T_{maks}) + e^0(T_{min})}{2}$$

$$e^0(T) = 0.6108 \exp\left(\frac{17.27T}{T + 237.3}\right)$$

$$e_a = \frac{e^0(T_{min}) \frac{RH_{maks}}{100} + e^0(T_{maks}) \frac{RH_{min}}{100}}{2}$$

ET₀: Referans evapotranspirasyon [mm gün⁻¹]

R_n: Net güneş radyasyonu [MJ m⁻² gün⁻¹]

G: Toprak ısı akısı [MJ m⁻² gün⁻¹]

T: Ortalama sıcaklık [°C]

u₂: Yüzeiden 2 metre yükseklikteki ortalama rüzgâr hızı [m s⁻¹]

e_s: Ortalama doymuş buhar basıncı [kPa]

e_a: Gerçek buhar basıncı [kPa]

Δ: Doymuş buhar basıncı-sıcaklık eğrisinin eğimi [kPa °C⁻¹]

γ: psikrometrik sabit [kPa °C⁻¹]

R_{ns}: Net kısa dalga güneş radyasyonu [MJ m⁻² gün⁻¹]

R_{nl}: Net uzun dalga güneş radyasyonu [MJ m⁻² gün⁻¹]

R_s: Kısa dalga güneş radyasyonu [MJ m⁻² gün⁻¹]

α: Albedo (Çim için 0,23 olarak alınmıştır.)

ω_s: Gün batımı saat açısı [rad]

φ: Enlem derecesi [rad]

δ: Güneş kırımı [rad]

a_s + b_s: Açık gökyüzü şartlarında dünyaya ulaşan dünya dışı radyasyon oranı (a_s=0.25, b_s=0.5 olarak alınmıştır.)

n: Gerçek güneşlenme süresi [saat]

N: Maksimum güneşlenme süresi [saat]

R_a: Dünya dışı güneş radyasyonu [MJ m⁻² gün⁻¹]

J: 1 yıl içerisindeki günlerin sayısı

G_{sc}: Güneş sabiti [0.0820 MJ m⁻² dakika⁻¹]

d_r: Dünya-Güneş arası ters nispi mesafe

G_{ay,i}: Hesap yapılacak aya ait toprak ısı akısı [MJ m⁻² gün⁻¹]

T_{ay, i+1}: Bir sonraki aya ait ortalama sıcaklık [°C]

T_{ay, i-1}: Bir önceki aya ait ortalama sıcaklık [°C]

P: Atmosfer basıncı [kPa]

z: Deniz seviyesine göre yükseklik [m]

u_z: Ölçüm yapılan yükseklikteki ortalama rüzgâr hızı [m s⁻¹]

e_{0(Tmaks)}: Maksimum sıcaklığa göre doymuş buhar basıncı [kPa]

e_{0(Tmin)}: Minimum sıcaklığa göre doymuş buhar basıncı [kPa]

e_{0(T)}: T sıcaklıktaki doymuş buhar basıncı [kPa]

RH_{maks} : Maksimum nispi nem

RH_{min} : Minimum nispi nem

Kaynaklar

- [1] Córdova M., Carrillo-Rojas, G., Crespo, P., Wilcox, B., & Céleri, R. (2015). Evaluation of the Penman-Monteith (FAO 56 PM) method for calculating reference evapotranspiration using limited data. *Mountain Research and Development*, 35(3), 230-239.
- [2,23] Senay, G. B., Kagone, S., & Velpuri, N. M. (2020). Operational global actual evapotranspiration: Development, evaluation and dissemination, *Sensors*, 20, 1915.
- [3,15] Senay, G. B., Bohms, S., Singh, R. K., Gowda, P. H., Velpuri N. M., Alemu, H., & Verdin, J. P. (2013). Operational evapotranspiration mapping using remote sensing and weather datasets: A new parameterization for the SSEB approach. *Journal Of The American Water Resources Association*, 49(3), 577-591.
- [4,27] Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper (Vol. 56). Rome: FAO.
- [5,10] Celestin, S., Qi, F., Li, R., Yu, T., & Cheng, W. (2020). Evaluation of 32 simple equations against the Penman-Monteith method to estimate the reference evapotranspiration in the Hexi Corridor, Northwest China. *Water*, 12, 2772.
- [6] Debnath, S., Adamala, S., & Raghuwanshi, N. S. (2015). Sensitivity analysis of FAO-56 Penman-Monteith method for different agro-ecological regions of India. *Environmental Processes*, 2, 689-704.
- [7,11] Lang, D., Zheng, J., Shi, J., Liao, F., Ma, X., Wang, W., Chen, X., & Zhang, M. (2017). A comparative study of potential evapotranspiration estimation by eight methods with FAO Penman-Monteith method in Southwestern China. *Water*, 9, 734.
- [8] Hao, X., Zhang, S., Li, W., Duan, W., Fang, G., Zhang, Y., & Guo, B. (2018). The uncertainty of Penman-Monteith method and the energy balance closure problem. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 123, 7433-7443.
- [9] Djamana, K., Baldea, A. B., Sowa, A., Mullera, B., Irmak, S., N'Diaye, M. K., Manneha, B., Moukumbia, Y. D., Futakuchic, K., & Saito, K. (2015). Evaluation of sixteen reference evapotranspiration methods under sahelian conditions in the Senegal River Valley. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 3, 139-159.
- [12] Song, X., Lu, F., Xiao, W., Zhu, K., Zhou, Y., & Xie, Z. (2019). Performance of 12 reference evapotranspiration estimation methods compared with the Penman-Monteith method and the potential influences in Northeast China. *Meteorological Applications*, 26, 83-96.
- [13] McShane, R. R., Driscoll, K. P., & Sando, R. (2017). A review of surface energy balance models for estimating actual evapotranspiration with remote sensing at high spatiotemporal resolution over large extents: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2017-5087.
- [14,16] Savoca, M. E., Senay, G. B., Maupin, M. A., Kenny, J. F., & Perry, C.A. (2013). Actual evapotranspiration modeling using the operational Simplified Surface Energy Balance (SSEBop) approach: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2013-5126.
- [17] Senay, G. B., Gowda, P. H., Bohms, S., Howell, T. A., Friedrichs, M., Marek, T. H., & Verdi, J. P. (2014). Evaluating the SSEBop approach for evapotranspiration mapping with landsat data using lysimetric observations in the semi-arid Texas High Plains. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 11, 723-756.
- [18] Senay, G. B., MFriedrichs, M., Singh, R. K., & Velpuri, N. M. (2016). Evaluating Landsat 8 evapotranspiration for water use mapping in the Colorado River Basin, *Remote Sensing of Environment*, 185,171-185.
- [19] Chen, M., Senay, G. B., Singh, R. K., & Verdin, J. P. (2016). Uncertainty analysis of the Operational Simplified Surface Energy Balance (SSEBop) model at multiple flux tower sites, *Journal of Hydrology*, 536, 384-399.
- [20] Paula, A.C.P. de, Silva, C.L. da, Rodrigues, L.N., & Schererwarren, M. (2019). Performance of the SSEBop model in the estimation of the actual evapotranspiration of soybean and bean crops. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 54, e00739.
- [21] Senay, G. B., Schauer, M., Velpuri, N. M., Singh, R. K., Kagone, S., Friedrichs, M., Litvak, M. E., & Douglas-Mankin, K. R. (2019). Long-term (1986-2015) crop water use characterization over the Upper Rio Grande Basin of United States and Mexico using Landsat-based evapotranspiration. *Remote Sensing*, 11, 1587.
- [22] Ayyad, S., Al Zayed, I. S., Ha, V. T. T., & Ribbe, L. (2019). The performance of satellite-based actual evapotranspiration products and the assessment of irrigation efficiency in Egypt. *Water*, 11, 1913.
- [24] Chen, F. W., & Liu, C. W. (2012). Estimation of the spatial rainfall distribution using inverse distance weighting (IDW) in the middle of Taiwan. *Paddy Water Environment*, 10, 209-222.
- [25] Samanta, S., Pal, D. K., Lohar, D., & Pal, B. (2012). Interpolation of climate variables and temperature modeling. *Theoretical and Applied Climatology*, May 2012.
- [26] Yang, X., Xie, X., Liu, D. L., Ji, F., & Wang, L. (2015). Spatial interpolation of daily rainfall data for local climate impact assessment over Greater Sydney Region. *Advances in Meteorology*, 563629.