Kıyas Bitki Su Tüketiminin Hesaplanmasında Kullanılan Eşitliklerin Değerlendirilmesi

Cihan KARACA[1,*], Begüm TEKELİOĞLU[1], Dursun BÜYÜKTAŞ[1], Ruhi BAŞTUĞ[1]

[1]*Akdeniz Üniversitesi Ziraat Fakültesi Tarımsal Yapılar ve Sulama Bölümü, Antalya, Türkiye*
** cihankaraca@akdeniz.edu.tr*

ÖZET

Su kaynaklarının yönetimi, sulama sistemlerinin tasarımı, uygun bir sulama programlamasının yapılması ve çevrenin korunması için bitki su tüketiminin (ET_c) belirlenmesi önemlidir. Açık tarla koşullarında iklimsel veriler yardımıyla belirlenen kıyas bir bitki su tüketiminin (ET_o) bitkiye özel geliştirilmiş bir katsayı (k_c) ile çarpılmasıyla ET_c'nin belirlenmesi son yıllarda yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. ET_o belirlenmesi amacıyla günümüze kadar çok sayıda eşitlik geliştirilmiştir. Bu çalışmada geçmişten günümüze kadar geliştirilmiş ET_o eşitliklerinin büyük bir bölümünü temsil eden 71 adet eşitliğin derlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla 9 adet pan katsayısına dayalı, 15 adet sıcaklığa, 22 adet radyasyona, 14 adet kütle transferine ve 11 kombinasyona dayalı yöntem olmak üzere toplam 71 adet ET_o eşitliliği belirlenmiştir. Ayrıca bu eşitlikler farklı bölgelerde yapılmış olan çalışmaların incelenmesiyle bağlı olduğu yöntemdeki ve diğer yöntemlerdeki eşitlikler arasında karşılaştırma yapılarak farklı iklim koşullarında ET_o değerini doğru tahmin etme performansları incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kıyas Bitki Su Tüketimi, Penman Monteith, Karşılaştırma, En İyi Yöntem, ET_o.

Assessment of the Equations Computing Reference Crop Evapotranspiration

ABSTRACT

Determination of plant water consumption (ET_c) is important for water resources management, design of irrigation systems, appropriate irrigation planning and protection of the environment. Determination of ET_c by multiplying a comparative plant water consumption (ET_o) determined by climatic data in open field conditions with a coefficient (k_c) developed specifically for the plant is a widely used method in recent years. Numerous equations have been developed to compute ET_o. In this study, it was aimed to compile 71 equations representing a large part of ETo equations developed from the past to the present day. For this purpose, a total of 71 ET_o equations 9 of them, based on pan coefficients, 15of them based on temperature, 22 of them based radiation, 14 of them based on mass transfer and finally 11 of them based combination one or two of them, were determined. In addition, these equations are examined by comparing the performance of estimated ET_o values in different climatic conditions.

Keywords: Referans Evapotranspirasyon, Penman Monteith, Comparison, Best Method, ET_o

GİRİŞ

Ülkemiz gibi gelişmekte olan ülkeler için tarımsal gelirin artması ülke ekonomisi yönünden oldukça önemlidir. Mevcut tarım arazilerindeki tarımsal gelirin artması için tüm kültürel uygulamaların tam ve doğru yapılması gerekmektedir. Tarımsal geliri arttıran kültürel uygulamaların en önemlilerinden biri sulama uygulamasıdır (Delibaş, 1994). Optimum sulama uygulaması için en önemli aşama bitki su tüketimlerinin hesaplanması ve sulama suyu ihtiyacının belirlenmesidir. Lizimetreler, bitki su tüketiminin belirlenmesinde kullanılan yöntemler arasında en güvenilir ve doğru sonucu veren yöntem (Irmak vd., 2003) olarak kabul edilmekle birlikte ölçüm işleminin zor, pahalı ve uzun zaman gerektirmesi nedeniyle yetiştiriciler tarafından tercih edilmemektedir. Bitki su tüketimi lizimetreler ile doğrudan belirlenebileceği gibi iklimsel veriler yardımıyla çeşitli ölçüm ve modelleme tekniklerini kullanılarak da tahmin edilebilmektedir (Rana ve Katerji, 2000). Günümüzde bitki su tüketiminin (ET_c) belirlenmesinde önce kıyas (referans) bir bitki için su tüketimini (ET_o) tahmin etmek, sonrada bu değeri Eşitlik 1'deki gibi bitki katsayısı (k_c) ile düzeltmek yoluyla bitki su tüketimini (ET_c) elde etme yaklaşımı yaygın olarak kullanılmaktadır (Doorenboos ve Pruitt, 1977; Aydınşakir vd., 2003).

$$ET_c = k_c \, x ET_o \quad (1)$$

k_c ve ET_o hakkında en doğru kabul edilen tanım Allen vd. (1998) tarafından yapılmıştır. Bu tanıma göre ET_o, belirli iklimsel koşullarda yetişen, yeteri düzeyde sulanan, sağlıklı büyüyen, toprağı tamamen gölgeleyen, 12 cm yüksekliğinde, taç aerodinamik direncinin 70 s m^{-1}, yansıma (albedo) değerinin 0.23 olduğu çayır otları yüzeyinden oluşan maksimum evapotranspirasyon miktarıdır. k_c değeri deneysel olarak elde edilmekle birlikte bitkinin fizyolojisini, örtü derecesini, verilerin derlendiği yöreyi yansıtan bitkiye dayalı katsayıdır. Kıyas bitki su tüketim (ET_o) değerlerinin hesaplanması için farklı veri gerektiren ve farklı ayrıntı düzeylerinde çok sayıda yöntem geliştirilmiştir. Bunlardan bir kısmı yalnızca tek bir iklimsel parametreye ihtiyaç duyarken bir kısmı ise çok sayıda iklimsel parametreye ihtiyaç duyarlar (Karaca vd., 2017). Bu eşitliklerin bir kısmı fiziksel temele oturtulurken, bir kısmı ampirik olarak elde edilmişlerdir (Kanber, 2006). ET_o'yu belirlemede kullanılan bu eşitliklerin doğru tahmin etme başarısı farklı bölgelerde değişkenlik göstermektedir. Yapılan literatür taramasında ET_o eşitliklerinin sıcaklığa, radyasyona, kütle transferi tabanlı, pan katsayına ve bunların kombinasyonuna dayalı olmak üzere beş grup altında toplandığı görülmüştür (Gocic ve Trajkovic, 2010; Rácz vd., 2013; Tabari vd., 2013; Pandey vd., 2016).

Bu çalışmayla, tarla koşullarında kıyas bitki su tüketimini (ET_o) belirlemek için bugüne kadar geliştirilmiş eşitliklerin büyük bir bölümünü oluşturan 71 adet ET_o eşitliğinin sınıflandırılması ve bu eşitliklerin tek bir belgede verilmesi amaçlanmıştır. Ayrıca bu eşitliklerin farklı bölgelerdeki ET_o değerini doğru tahmin etme başarısı irdelenerek eşitliklerin birbirleri arasında avantajları ve dezavantajları ortaya konulmuştur.

Pan Katsayısına Dayalı Eşitlikler

A sınıfı kap buharlaşma verileri, referans bitki su tüketimini (ET_o) tahmin etmek için dünya genelinde yaygın olarak kullanılmaktadır. ET_o'yu tahmin etmek için buharlaşma kabından (pandan) meydana gelen buharlaşma (E_{pan}) verileri, kap etrafındaki üniform bir yüzeyin uzunluğu, günlük rüzgâr hızı ve günlük ortalama nemliliğin bir fonksiyonu olan kap

katsayısı (K_{pan}) ile düzeltilir. Bu yöntem FAO Pan Evaporasyon yöntemi (Eşitlik 2) olarak adlandırılmaktadır (Doorenboos ve Pruitt, 1977; Kaya vd., 2016).

$$ET_o = K_{pan} * E_{pan} \quad (2)$$

Doorenboos ve Pruitt, (1977) K_{pan} katsayısı için farklı oransal nem ve rüzgar koşulları için çizelge hazırlamıştır. Bunun yanında katsayının hesaplanabilmesi için çok sayıda eşitlik geliştirilmiştir. Bunlar arasında en çok kullanılan eşitlikler Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1. Pan katsayısına dayalı geliştirilen ET_o eşitlikleri

Cuenca (1989)	$K_{pan} = 0.475 - (0.245 * 10^{-3} U_2) + (0.516 * 10^{-2} RH) + (0.118 * 10^{-2} F) - (0.16 * 10^{-4} RH^2) - (0.101 * 10^{-5} F^2) - (0.8 * 10^{-8} RH^2 U_2) - (0.1 * 10^{-7} RH^2 F)$	(3)
Allen ve Pruitt (1991)	$K_{pan} = 0.108 - (3.31 * 10^{-4} U_2) + \left(0.0422 ln(F)\right) + \left(0.1434 ln(RH)\right) - \left[6.31 * 10^{-4} \left(\left(ln(F)\right)^2 ln(RH)\right)\right]$	(4)
Snyder (1992)	$K_{pan} = 0.482 + [0.24 ln(F)] - (3.76 * 10^{-4} U_2) + (0.0045 RH)$	(5)
Pereira (Pereira vd., 1995)	$K_{pan} = 0.85 * (\Delta + \gamma)/[\Delta + \gamma(1 + 0.33 U_2)]$	(6)
Orang (1998)	$K_{pan} = 0.51206 - (0.000321 U_2) + (0.002889 RH) + \left(0.03188 ln(F)\right) - \left(0.000107 RH\left(ln(F)\right)\right)$	(7)
Raghuwanshi ve Wallender (1998)	$K_{pan} = 0.5944 + 2.42 * 10^{-2} * X_1 - 5.83 * 10^{-2} * X_2 - 1.333 * 10^{-1} * X_3 - 2.083 * 10^{-1} * X_4 + 8.12 * 10^{-2} * X_5 + 1.344 * 10^{-1} * X_6$	(8)
FAO-56 (Allen vd., 1998)	$K_{pan} = 0.108 - 0.0286 U_2 + 0.0422 ln(F) + 0.1434 ln(RH) - 0.000631 [ln(F)]^2 ln(RH)$	(9)
Modified Snyder (Grismer vd., 2002)	$K_{pan} = 0.5321 - (3 * 10^{-4} U_2) + \left(0.0249\ ln(F)\right) + (0.0025 RH)$	(10)
Abdel-Wahed ve Snyder (2008)	$K_{pan} = 0.62407 - 2.80 * 10^{-4} * U_2 + 2.26 * 10^{-3} * RH - 2.660 * 10^{-2} * \ln(F)$	(11)

Yukarıdaki eşitliklerde U_2, 2 m yüksekliğindeki rüzgar hızını (km gün^{-1}, FAO-56 için m s $^{-1}$); RH, günlük ortalama bağıl nemi (%); F, rüzgara karşı bitki örtü mesafesini (m); Δ, Doygun buhar basıncı eğrisinin eğimini (kPa $^{o}C^{-1}$); X_1, ln (F); X_2, X_3, X_4 rüzgar hızına bağlı olarak 0 ile 1 arasında aldığı değeri; X_5, X_6, bağıl neme bağlı olarak 0 ile 1 arasında alığı değeri ve ϒ, Psikometrik katsayısını (kPa $^{o}C^{-1}$) ifade etmektedir.

Sıcaklığa Dayalı ET_o Eşitlikleri

Kıyas bitki su tüketimini tahmin etmek için sıcaklık verilerini kullanan bu eşitlikler diğer birçok eşitliğe nazaran daha az iklimsel parametreye ihtiyaç duyarlar. Bu ET_o'yu hesaplamak için gerek duyulan meteoroloji istasyonunun maliyetinin daha düşük olmasına ve elde edilen verilerin daha kolay bir biçimde değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır. Sıcaklığa dayalı bu ET_o eşitlikler Çizelge 2'de verilmiştir.

Çizelge 2. Sıcaklığa dayalı ET_o eşitlikleri

Thornthwaite (1948)	$ET_o = 16\left(\frac{10T_a}{I}\right)^a$ $I = \sum_{i}^{12}(0.2T_a)^{1.514}$ $\quad a = (675*10^{-7})I^3 - (771*10^{-5})I^2 + (179212*10^{-2})I + 0.49239$	(12)
Blaney ve Criddle (1950)	$ET_o = a + b[p(0.46T_a + 813)]$ $a = 0.0043(RH_{min}) - n/N - 1.41$ $b =$ $0.82 - 0.0041(RH_{min}) + 1.07(n/N) + 0.66(U_g) - 0.006(RH_{min})(n/N) - 0.0006(RH_{min})(U_g)$	(13)
Romanenko (1961)	$ET_o = 0.0018(25 + T_a)^2(100 - RH)$	(14)
Schendel (1967)	$ET_o(mm\ g^{-1}) = 16\frac{T_a}{RH}$	(15)
Linacre (1977)	$ET_o = [500T_m/(100 - A) + 15(T_a - T_{dew})]/(80 - T_a)$ $T_m = T + 0.006z$	(16)
Hargreaves (1975)	$ET_o = 0.0135\ R_s(T_a + 17.8)$	(17)
Hargreaves ve Samani (1985)	$ET_o = 0.0023Ra(T_a + 17.8)(T_{max} - T_{min})^{0.424}$	(18)
Kharrufa (1985)	$ET_o = 0.34pT_a{}^{1.3}$	(19)
Hargreaves-D1 (Droogers ve Allen, 2002)	$ET_o = 0.0030 * 0.408(T_a + 20)(T_{max} - T_{min})^{0.4}Ra$	(20)
Hargreaves-D2 (Droogers ve Allen, 2002)	$ET_o = 0.0025 * 0.408(T_a + 16.8)(T_{max} - T_{min})^{0.5}Ra$	(21)
Hargreaves-D3 (Droogers ve Allen, 2002)	$ET_o = 0.0013 * 0.408(T_a + 17)(T_{max} - T_{min} - 0.0123P)^{0.76}Ra$	(22)
Hargreaves-T1 (Trajkovic, 2007)	$ET_o = 0.0023 * 0.408(T_a + 17.8)(T_{max} - T_{min})^{0.424}Ra$	(23)
Valiantzas 1 (Valiantzas, 2006)	$ET_o = 0.051(1 - \alpha)R_s(T_a + 9.5)^{0.5} - 2.4\left(\frac{R_s}{R_a}\right)^2 + 0.048(T_a + 20) * \left(1 - (RH/100)\right)(0.5 + 0.536u_2) + 0.00012z$	(24)
Fooladmand ve Ahmadi (2009)	$ET_o = (8.13 * 0.041p) + (0.46p)T_{eff}$	(25)
Valiantzas 2 (Valiantzas, 2013)	$ET_o = 0.00668R_a\left((T_a + 9.5)(T_{max} - T_{min})\right)^{0.5} - 0.0696(T_{max} - T_{min}) - 0.024(T_a + 20)((1 - RH)/100) - 0.00455R_a(T_{max} - T_{dew})(0.5) + 0.0984\ (T_a + 17)(1.03 + 0.00055(T_{max} - T_{min})^2 - RH/100)$	(26)

Yukarıdaki eşitliklerde T_a, ortalama hava sıcaklığını (^oC); Tmax, maksimum hava sıcaklığını (^oC); Tmin, minimum hava sıcaklığını (^oC); Tdew, ortalama çiy noktasındaki sıcaklığı (^oC); Teff, efektif sıcaklığı (^oC); I, yıllık sıcaklık indisini; a ve b, ampirik katsayıyı; n, gerçek güneşlenme süresini (saat gün^{-1}); N, : Olası güneşlenme süresini (saat gün^{-1}); U_g, gündüz gerçekleşen rüzgar hızını (m s^{-1}); p, Yıllık gündüz saatlerinin günlük ortalama yüzdesini (%); R_a, atmosferin dış yüzeyine gelen radyasyonu (extraterrestrial Radyasyon) (MJ m^{-2} g^{-1}); Rs, gelen kısa dalga boylu radyasyonu (MJ m^{-2} g^{-1}); A, enlemi (derece); u_2, 2 m yükseklikteki rüzgar hızını (m s^{-1}), α, yansıma (albedo) katsayısını; z, yüksekliği (m) ve RH, günlük ortalama bağıl nemi (%) ifade etmektedir.

Radyasyona Dayalı Eşitlikler

Suyun buharlaşması için nispeten büyük miktarlarda duyulur ısı ya da radyant enerjiye ihtiyaç vardır. Bu nedenle buharlaşma süreci bitki yüzeyinde enerjinin değişimi ile yönetilir ve kullanılabilir enerji miktarıyla sınırlıdır. Bu sınırlama nedeniyle, enerji korunumu ilkesini uygulayarak buharlaşma oranını tahmin etmek mümkündür. ET_o'yu tahmin etmek için geliştirilen bu eşitliklerin temeli enerji dengesine dayanmaktadır (Jensen vd., 1990). Bu eşitlikler Çizelge 3'de verilmiştir.

Çizelge 3.Radyasyona dayalı ET_o eşitlikleri

Makkink (1957)	$ET_o = 0.61\frac{\Delta}{\Delta+\gamma}\frac{R_s}{2.45} - 0.012$	(27)
(Turc, 1961)	*RH ≥ %50 için*: $ET_o = 0.013\frac{T_a}{T_a+15}\frac{(23.88R_s)+50}{\lambda}$ *RH < %50 için*: $ET_o = \left(1+\frac{50-RH}{70}\right)0.013\frac{T_a}{T_a+15}\frac{(23.88R_s)+50}{\lambda}$	(28)
Stephens (Jensen, 1966)	$ET_o = 0.408 + (0.0158T_a + 0.09)R_s$	(29)
Stephens-Stewart (Jensen, 1966)	$ET_o = 0.408 + (0.0148T_a + 0.09)R_s$	(30)
Christiansen (1968)	$ET_o = 0.408 - 0.0385 * R_s$	(31)
Camargo (1971)	$ET_o = 0.01 * T_a * R_a * ND$	(32)
Priestley ve Taylor (1972)	$ET_o = \frac{C_T(T_a - T_X)R_s}{\lambda}$	(33)
McGuinness ve Bordne (1972)	$ET_o = \left\{\left((0.0082 * T_a) - 0.19\right)\left(\frac{R_s}{1500}\right)\right\} * 2.54$	(34)
Ritchie (1972)	$ET_o = \alpha\left[3.87 * 10^{-3}R_s\left((0.6T_{max}) + (0.4T_{min} + 29)\right)\right]$ $5°C < T_{max} < 35°C \quad \alpha = 1.1 \quad \rightarrow \quad T_{max} > 35°C \quad \alpha = 1.1 + 0.05(T_{max}) - 35$ $T_{max} < 5°C \quad \alpha = 1.1 + exp[0.18(T_{max} + 20)]$	(35)
Caprio (1974)	$ET_o = (0.01092708T_a + 0.0060706)R_s$	(36)
FAO-24-Radiation (Doorenboos ve Pruitt, 1977)	$ET_o = 0.408 * a\left(\frac{\Delta}{\Delta+\gamma}\right)R_s - 0.3$	(37)

Çizelge 3.Radyasyona dayalı ET_o eşitlikleri (Devam)

Modifiye-Makkink (Hansen, 1984)	$ET_o = 0.7\frac{\Delta}{\Delta+\gamma}\frac{R_s}{2.45}$	(38)
Jones ve Ritchie (1990)	$ET_o = 0.00387 * (0.6T_{max} + 04T_{min} + 29)R_s * \alpha$	(39)
Abtew (1996)	$ET_o = 0.408 * 0.01786 * R_s * T_{max}$	(40)
Bruin (de Bruin ve Stricker, 2000)	$ET_o = 0.408 * 0.65\left(\frac{\Delta}{\Delta+\gamma}\right)R_s$	(41)
Xu ve Singh (2000)	$ET_o = 0.408 * 0.98\left(\frac{\Delta}{\Delta+\gamma}\right)(R_n - G) - 0.94$	(42)
Irmak 1 (Irmak vd., 2003)	$ET_o = -0.611 + (0.149 * R_s) + (0.079 * T_a)$	(43)
Irmak 2 (Irmak vd., 2003)	$ET_o = 0.489 + (0.289 * R_s) + (0.023 * T_a)$	(44)
Berengena ve Gavilán (2005)	$ET_o = 0.408 * 1.65\left(\frac{\Delta}{\Delta+\gamma}\right)(R_n - G)$	(45)
Castañeda ve Prasada (2005)	$ET_o = 0.408 * 0.7\left(\frac{\Delta}{\Delta+\gamma}\right)R_n - 0.12$	(46)
Tabari 1 (Tabari vd., 2013)	$ET_o = -0.642 + (0.174R_s) + (0.0353T_a)$	(47)
Tabari 2 (Tabari vd., 2013)	$ET_o = -0.478 + (0.156R_s) - (0.0112T_{max}) + (0.0733T_{min})$	(48)

Yukarıdaki eşitliklerde T_a, ortalama hava sıcaklığını (^oC); T_{max}, maksimum hava sıcaklığını (^oC); T_{min}, Minimum hava sıcaklığını (^oC); T_x, sabit sıcaklık değerini (-3 ^oC); R_n, net radyasyonu (MJ m^{-2} g^{-1}); R_s, Gelen kısa dalga boylu radyasyonu (MJ m^{-2} g^{-1}); R_a, atmosferin dış yüzeyine gelen radyasyonu (extraterrestrial Radyasyon) (MJ m^{-2} g^{-1}); G, topraktan olan ısı akısı (MJ m^{-2} g^{-1}); Δ, doygun buhar basıncı eğrisinin eğimini (kPa $^oC^{-1}$); γ, psikometrik sabiti (kPa $^oC^{-1}$); RH, günlük ortalama bağıl nemi (%); ND, zaman aralığının uzunluğunu (gün); λ, buharlaşma gizli ısısını (MJ kg^{-1}) ve C_T, sıcaklıkla ilgili sabiti (0.0025) ifade etmektedir.

Kütle Transferine Dayalı Eşitlikler

Su buharı, yapraktan çok ince bir hava katmanı içine doğru moleküler yayınım (difüzyon) yoluyla hareket eder. Bu katmanın dışında yüzeyin düzgün olmayışı ve sıcaklık farkları, türbülent yayınımın, moleküler yayınımı çok geçtiği bir bölgenin oluşmasına neden olur. O nedenle kütle transferi yöntemlerinde buhar akışının, kısmen rüzgar hareketinden ve buharlaşma yüzeyi ile çevre havanın buhar basıncı farklarından ortaya çıktığı kabul edilmektedir (Kanber, 2006). Kütle transferine dayalı geliştirilmiş yöntemler temelde Dalton'un gaz yasasına dayanmaktadır. Kolay ölçülebilir değişkenler kullanan ve basit model formlarına sahip bu yöntemler pek çok durumda tatmin edici sonuçlar vermektedir (Singh ve Xu, 1997; Tabari vd., 2013). Kütle Transferine dayalı geliştirilen eşitlikler Çizelge 4'te verilmiştir.

Çizelge 4. Kütle Transferine Dayalı ET_o Eşitlikleri

Dalton (1802)	$ET_o = (0.3648 + 0.07223u)(e_s - e_a)$	(49)
Fitzgerald (1886)	$ET_o = (0.4 + 0.199u)(e_s - e_a)$	(50)
Trabert (1896)	$ET_o = 0.3075\sqrt{u}(e_s - e_a)$	(51)
Meyer (1926)	$ET_o = (0.375 + 0.5026u)(e_s - e_a)$	(52)
Rohwer (1931)	$ET_o = 0.44(1 + 0.27u)(e_s - e_a)$	(53)
Penman (1948)	$ET_o = 0.35\big(1 + (0.98/100u)\big)(e_s - e_a)$	(54)
Albrecht (1950)	$ET_o = (0.1005 + 0.297u)(e_s - e_a)$	(55)
Harbeck (Harbeck vd., 1958)	$ET_o = N * u(e_s - e_a)$	(56)
Romanenko (1961)	$ET_o = 0.0018(T_a + 25)^2(100 - RH)$	(57)
Brockamp ve Wenner (1963)	$ET_o = 0.543u^{0.456}(e_s - e_a)$	(58)
WMO (1966)	$ET_o = \big(0.1298 + (0.0934u)\big)(e_s - e_a)$	(59)
Papadakis (1966)	$ET_o = 2.5(e_{ma} - e_a)$	(60)
Mahringer (1970)	$ET_o = 0.15072\sqrt{3.6u}(e_s - e_a)$	(61)
Modifiye Romanenko (Oudin vd., 2005)	$ET_o = 4.5\left[1 + \left(\frac{T_{mean}}{25}\right)\right]^2\left(1 - \frac{e_a}{e_s}\right)$	(62)

Yukardaki eşitliklerde e_s, doygun buhar basıncını; e_a, gerçek buhar basıncı olup Rohwer (1931) ve Penman (1948) de birim olarak mmHg olup diğer tüm eşitliklerde birim hPa olarak kabul edilmiştir. e_{ma}, aylık ortalama maksimum sıcaklıktan elde edilen doygun buhar basıncını; u, rüzgar hızı olup Penman (1948) de birim olarak mil gün^{-1} olup diğer tüm eşitliklerde m s^{-1} olarak kabul edilmiştir. RH, bağıl nem olup birimi % dir. T_a, ortalama hava sıcaklığı olup birimi ^oC dir. N, kütle transfer katsayısı olup birimi yoktur. Romanenko (1961) eşitliği ve Harbeck (Harbeck vd., 1958) eşitliği ile elde edilen ET_o nun birimi cm ay^{-1} olup diğer tüm eşitliklerde birim mm gün^{-1} olarak bulunur.

Kombinasyon Eşitlikleri

İlk olarak Penman (1948) açık su yüzeyinden meydana gelen buharlaşmayı belirlemek amacıyla güneş, sıcaklık, nem ve rüzgar hızı gibi standart iklimsel verileri kullanarak enerji dengesi yöntemi ile kütle transferi yöntemini kombine ederek kullanmıştır. Kombinasyon yöntemi terimi, ET kestirimi için aerodinamik ve enerji dengesi yöntemlerinin birlikte uygulandığını göstermek amacıyla kullanılmaktadır. Bu yöntemde suyun kullanılmasında bitki tacı üzerindeki advektif koşulların etkisini, aerodinamik; evaporasyon/evapotranspirasyon da kullanılan enerji miktarını ise enerji dengesi terimleri ile göstermektedir (Kanber, 2006). Kombinasyon yöntemine göre geliştirilmiş eşitlikler Çizelge 5 de gösterilmiştir.

Çizelge 5. Kombinasyona dayalı ET_o eşitlikleri

Penman (1948)	$\lambda E = \frac{\Delta}{\Delta+\gamma}(R_n - G) + K_w \frac{\gamma}{\Delta+\gamma}(a_w + b_w u_2)(e_s - e_a)$	(63)
Penman (1963)	$ET_o = \frac{1}{\lambda}\frac{\Delta}{\Delta+\gamma}(R_n - G) + \frac{1}{\lambda}\frac{\gamma}{\Delta+\gamma}6.43W_f(e_s - e_a)^{VPD\#1}$ & $ET_o = \frac{1}{\lambda}\frac{\Delta}{\Delta+\gamma}(R_n - G) + \frac{1}{\lambda}\frac{\gamma}{\Delta+\gamma}6.43W_f(e_s - e_a)^{VPD\#3}$ $W_f = 1.0 + 0.537u_2$	(64)
Businger- Bavel (Van Bavel, 1966)	$ET_o = \frac{1}{\lambda}\frac{\Delta}{\Delta+\gamma}(R_n - G) + \frac{1}{\lambda}\frac{\Delta}{\Delta+\gamma}\frac{0.622\rho\lambda k^2}{P}\frac{u_2}{[ln((z-d)/z_0)]^2}(e_s - e_a)^{VPD\#i}$	(65)
Penman-Monteith (Monteith, 1965)	$ET_o = \frac{1}{\lambda}\frac{\Delta}{(\Delta+\gamma^*)}(R_n - G) + \frac{1}{\lambda}\frac{\gamma}{(\Delta+\gamma^*)}\left(K_1\frac{0.622\rho\lambda}{P}\right)\frac{1}{r_a}(e_s - e_a)^{VPD\#i}$	(66)
Kimberly Penman-72 (Wright ve Jensen, 1972)	$ET_o = \frac{1}{\lambda}\frac{\Delta}{\Delta+\gamma}(R_n - G) + \frac{1}{\lambda}\frac{\gamma}{\Delta+\gamma}6.43W_f(e_s - e_a)^{VPD\#3}$ $W_f = 0.75 + 0.993u_2$	(67)
Kimberly Penman-82 (Wright, 1982)	$ET_o = \frac{1}{\lambda}\frac{\Delta}{\Delta+\gamma}(R_n - G) + \frac{1}{\lambda}\frac{\gamma}{\Delta+\gamma}6.43W_f(e_s - e_a)^{VPD\#3}$ $W_f = a_w + b_w u_2$ $a_w = 0.4 + 1.4\,exp[-\{(D-173)/58\}^2]$ | $b_w = 0.605 + 0.345exp[-\{(D-243)/80\}^2]$	(68)
FAO-24 Corrected Penman (Doorenboos ve Pruitt, 1977)	$ET_o = c\left[\frac{\Delta}{\Delta+\gamma}(R_n - G) + \frac{\gamma}{\Delta+\gamma}2.7W_f(e_s - e_a)^{VPD\#i}\right]$ $W_f = 1 + 0.864u_2$	(69)
FAO-24 Penman (c = 1) (Doorenboos ve Pruitt, 1977)	$ET_o = \frac{\Delta}{\Delta+\gamma}(R_n - G) + \frac{\gamma}{\Delta+\gamma}2.7W_f(e_s - e_a)^{VPD\#i}$ $W_f = 1 + 0.864u_2$	(70)
FAO-PPP-17 Penman (Frère ve Popov, 1979)	$ET_o = \frac{1}{\lambda}\frac{\Delta}{\Delta+\gamma}(R_n - G) + \frac{1}{\lambda}\frac{\gamma}{\Delta+\gamma}6.43W_f(e_s - e_a)^{VPD\#1}$ $TD = (T_{max} - T_{min})$ | $TD \le 12°C\ \ W_f = 1 + 0.54u_2$ | $TD \le 13°C\ \ W_f = 1 + 0.60u_2$ | $TD \le 14°C\ \ W_f = 1 + 0.67u_2$ | $TD \le 15°C\ \ W_f = 1 + 0.73u_2$ | $TD \le 16°C\ \ W_f = 1 + 0.80u_2$ | $TD > 16°C\ \ W_f = 1 + 0.86u_2$	(71)
CIMIS Penman (Snyder ve Pruitt, 1992)	$\lambda E = \frac{\Delta}{\Delta+\gamma}(R_n - G) + K_w \frac{\gamma}{\Delta+\gamma}(a_w + b_w u_2)(e_s - e_a)^{VPD\#3}$ $R_n > 0\ \ a_w = 0.29\ \ b_w = 0.53$ | $R_n \# 0\ \ a_w = 1.14\ \ b_w = 0.40$ $K_w = 0.268$ | $G = 0$	(72)
FAO-56 Penman-Monteith (Allen vd., 1998)	$ET_o = \frac{\Delta}{(\Delta+\gamma^*)}(R_n - G) + \frac{\frac{\gamma}{(\Delta+\gamma^*)}(e_s - e_a)^{VPD\#i}(900)u_2}{T_{ort+275}}$	(73)

Kombinasyon yöntemine dayalı ET_o eşitliklerinde en önemli parametrelerden biri olan buhar basıncı açığını belirlemek için geliştirilen eşitlikler (Jensen vd., 1990; Snyder ve Pruitt, 1992; Swarnakar ve Raghuwanshi, 2000) Çizelge 6'da verilmiştir.

Çizelge 6 VPD belirlenmesi için geliştirilen eşitlikler

$(e_s - e_a)^{VPD\#1}$	$e_{ort} - e_d$	*(74)*
$(e_s - e_a)^{VPD\#2}$	$e_{ort}\left(1 - \frac{RH_{ort}}{100}\right)$	(75)
$(e_s - e_a)^{VPD\#3}$	$\frac{(e_{min} + e_{max})}{2} - e_d$	(76)
$(e_s - e_a)^{VPD\#4}$	$\frac{(e_{min} + e_{max})}{2} - e_{ort}\frac{RH_{ort}}{100}$	(77)
$(e_s - e_a)^{VPD\#5}$	$\frac{(e_{min} + e_{max})}{2} - \frac{(e_{min}RH_{max} + e_{max}RH_{min})}{2 * 100}$	(78)
$(e_s - e_a)^{VPD\#i}$	74, 75, 76, 77 ve 78 eşitliklerinden herhangi biri ile hesaplanabilir.	(79)

Çizelge 5 ve Çizelge 6'daki eşitliklerde Δ, doygun buhar basıncı eğrisinin eğimini (kPa $^oC^{-1}$); γ, psikometrik sabiti (kPa $^oC^{-1}$); γ^*, modifiye edilmiş psikometrik sabiti (kPa $^oC^{-1}$); λ, buharlaşma gizli ısısını (MJ kg^{-1}) R_n, net radyasyonu (MJ m^{-2} d^{-1}); G, topraktan olan ısı akısını (MJ m^{-2} d^{-1}); k, von-Karman sabiti (0.41); u_z, z m yükseklikteki rüzgar hızını (m s^{-1}); u_2, 2 m yükseklikteki rüzgar hızını (m s^{-1}); W_f, 2 metre yükseklikten ölçülen rüzgar hızının fonksiyonunu (m s^{-1}); a_w ve b_w, rüzgar fonksiyonunun katsayısını; d, rüzgar profilindeki sıfır düzlemde yer değiştirme yüksekliği (cm); r_a, aerodinamik direnci (s m^{-1}); z_o, pürüzlülük uzunluğu (cm); P, atmosferik basınç (kPa); ρ, havanın yoğunluğu (kg m^{-3}); c, düzeltme fakötürünü; $(e_s\text{-}e_a)^{VPD\#}$, buhar basıncı açığını (kPa $^oC^{-1}$); e_{ort}, ortalama hava sıcaklığında doygun buhar basıncını (kPa $^oC^{-1}$); e_d, çiğlenme sıcaklığındaki doygun buhar basıncını (kPa $^oC^{-1}$); e_{min}, minimum hava sıcaklığında doygun buhar basıncını (kPa $^oC^{-1}$); e_{max}, maksimum hava sıcaklığında doygun buhar basıncını (kPa $^oC^{-1}$); RH_{ort}, ortalama bağıl nemi (%); RH_{min}, minimum bağıl nemi (%) ve RH_{max}, maksimum bağıl nemi (%) ifade etmektedir.

KIYAS BİTKİ SU TÜKETİMİNİN BELİRLENMESİNDE KULLANILAN EŞİTLİKLERİN DEĞERLENDİRMESİ

Bu çalışmada 9 adet pan katsayısına, 15 adet sıcaklığa d, 22 adet radyasyona, 14 adet kütle transferine ve 11 adet bunların kombinasyonuna dayalı yöntem olmak üzere toplam 71 adet ET_o'yu tahmin etmede kullanılan eşitlik incelenmiştir.

Kombinasyona dayalı eşitliklerin çok sayıda iklimsel parametreye ihtiyaç duyması geri kalmış ve gelişmekte olan ülkelerde kullanımını sınırlayan en önemli faktördür (Dorji vd., 2016). Fakat son yıllarda ölçülemeyen yada ölçümü maliyetli olan solar radyasyon gibi iklimsel parametrelerin dolaylı olarak belirlenmesi, kombinasyona dayalı eşitliklerinde kullanımının artmasına neden olmuştur. Tarla koşullarında yapılan önceki çalışmalar kombinasyon yöntemine dayalı FAO56-P.M eşitliği, ET_o değerini farklı iklim koşullarında diğer tüm eşitliklerden daha doğru tahmin ettiğinden dolayı otoriteler tarafından standart bir yöntem olarak kabul edilmiştir (Ventura vd., 1999; Kashyap ve Panda, 2001; Irmak vd., 2003; Fontenot, 2004; Roberto Pereira ve Oregon Pruitt, 2004; López-Urrea vd., 2006; Emekli ve Baştuğ, 2007; Trajkovic ve Kolakovic, 2009; SreeMaheswari ve Aruna Jyothy, 2017).

Akdeniz iklimi, karasal iklim ve nemli iklim koşullarında yapılan çalışmalarda, pan katsayısına dayalı eşitliklerle hesaplanan ET_o değerlerinin, standart olarak kabul edilen FAO56-P.M değerlerine kıyasla düşük tahmin etme eğiliminde olduğu görülmüştür (Grismer vd., 2002; Xing vd., 2008; Kaboosi, 2012; Tabari vd., 2013; Heydari ve Heydari, 2014; Iuliana ve Neculau, 2015; SreeMaheswari ve Aruna Jyothy, 2017). Bu fark özellikle nemin düşük olduğu yüksek buharlaşma koşullarında daha da artmaktadır (Kaboosi, 2012). Ayrıca Bogawski ve Bednorz (2014) pan buharlaşma yöntemlerinin Polonya'da uygulanabilir olmadığını belirtmiştir.

Grismer vd. (2002) 6 farklı pan katsayısına dayalı ET_o eşitliği (Cuenca, Allen ve Pruitt, Snyder, Modifiye Snyder, Orang, Raghuwanshi ve Wallender) ile FAO-24 pan katsayısı tablosu ve CIMIS-Penman eşitliğinin performanslarını karşılaştırmıştır. Araştırmacılar, Cuenca denklemi haricinde pan katsayısına dayalı tüm eşitlikler FAO-24 tablosu ile benzer doğrulukla sonuçlar verdiğini bildirmişlerdir. FAO-24 pan katsayısı tablosu ile CIMIS-Penman eşitliğinden elde edilen değerler karşılaştırıldığında, sonuçların alan ve konuma bağlı olarak değiştiğini saptamışlardır. Bu nedenle Cuenca eşitliğinin, CIMIS-Penman eşitliğine en yakın sonuçları vermesine karşı FAO-24 pan katsayısı tablosu ile karşılaştırıldığında diğer pan katsayısına dayalı yöntemlere göre düşük performans gösterdiğini bildirmişlerdir.

Singh ve Xu (1997) kütle transferine dayalı eşitlikler için havanın doygunluk açığı (e_s-e_a), aylık serbest su yüzeyi buharlaşmasını tahmin etmede en önemli faktör olduğunu, buna karşı rüzgar hızının, aylık buharlaşma için önemsiz bir faktör olarak bulunduğunu bildirilmiştir. Bazı araştırmacılara göre (Tabari vd., 2013; Djaman vd., 2015) kütle transferine dayalı eşitliklerin FAO56-P.M eşitliğine göre ET_o değerinin daha düşük tahmin ettiği rapor edilmiştir. Önceki çalışmalar bu eşitliklerin, Senegal'de Sahelian ikliminde yüksek doğruluk yüzdesiyle ET_o değerini tahmin ettiğini, (Djaman vd., 2015) nemli bölgelerde (Tabari vd., 2013) ise en düşük doğruluk yüzdesiyle ET_o yu tahmin ettiğini göstermiştir.

Sıcaklık parametresi muhtemelen en kolay ölçülebilen, en yaygın ve en güvenilir iklim parametresidir. Sıcaklığın atmosferin buharlaşan gücünün bir göstergesi olduğu varsayımı, sıcaklık tabanlı yöntemlerin temelini oluşturur (Shahidian vd., 2012). Sıcaklığa dayalı yöntemlerde, solar radyasyon değerleri dolaylı olarak eşitliklerde kullanılırken rüzgar hızı ve nem parametreleri bu eşitliklerde bulunmazlar. Bu nedenle araştırmacıların bazıları (McKenney ve Rosenberg, 1993; Jabloun ve Ali, 2008) elde edilen tahminlerin diğer yöntemlere göre az güvenilir olduğunu düşünmektedirler. Örneğin nemli bölgelerde yapılan çalışmalarda sıcaklığa dayalı ET_o eşitliklerinin fazla tahminde bulunduğu belirtilirken (Jensen vd., 1997; Kashyap ve Panda, 2001; Yoder vd., 2005; Trajkovic, 2007; Landeras vd., 2008; Rojas ve Sheffield, 2013; Tabari vd., 2013; Djaman vd., 2015) bazı çalışmalarda (Jensen vd., 1990; Amatya vd., 1995; Xu ve Singh, 2000; Droogers ve Allen, 2002) ise az tahminde bulunduğu belirtilmiştir. Bunun nedeni Temesgen vd. (2005) göre yüksek rüzgar hızı ve düşük nem şartları yaşandığında sıcaklığa dayalı Hargreaves eşitliğinin FAO56-P.M eşitliğine kıyasla ET_o değerini daha az, düşük rüzgar hızı ve yüksek nemin ise ET_o değerini fazla tahmin ettiğindendir.

Radyasyon parametresi ET_o değerinin tahmin edilmesi için geliştirilen eşitliklerin büyük birçoğunda doğrudan ya da dolaylı olarak bulunmaktadır. Çünkü enerji açısından bakıldığında, buharlaşma miktarının topraktan, yapraktan ve bitki organlarının iç hücrelerinden atmosfere su taşımak için kullanılan enerjiye denk olduğu kabul edilir. Radyasyona dayalı ET_o eşitliklerinin performanslarının araştırıldığı çalışmalar incelendiğinde FAO56-P.M eşitliğine kıyasla daha fazla (Tabari vd., 2013) ya da az tahminde bulunduğu (Martinez ve Thepadia, 2010) belirtilmekle birlikte FAO-56 PM denkleminin uygulanması için iklimsel verilerin yetersiz olduğu durumda, radyasyona dayalı yöntemlerden Turc eşitliğinin, sıcak ve nemli bölgelerde (Trajkovic ve Kolakovic, 2009; Karaca vd., 2017),

soğuk nemli ve kurak iklimin görüldüğü bölgelerde (Tabari, 2010), sub-tropik bölgelerde (Fontenot, 2004) ve Akdeniz iklimine sahip bölgelerde (Xystrakis ve Matzarakis, 2011) ET_o değerini tahmin etmek için kullanılabilecek güvenli bir eşitlik olduğunu belirtmişlerdir. Ancak Trajkovic ve Stojnic (2007), Turc eşitliğinin güvenilirliğinin rüzgar hızına bağlı olduğunu belirtmiştir. Çünkü araştırmacılar göre Turc eşitliği, rüzgarın düşük olduğu bölgelerde FAO56-P.M eşitliğine kıyasla ET_o değerini aşırı tahmin etmiş ve rüzgarlı bölgelerde ise ET_o değerini daha az tahmin etmiştir. Tabari vd. (2013) radyasyon ölçümüne dayalı eşitliklerde daha doğru tahmin yapılması amacıyla ortalama sıcaklığın yerine maksimum ve minimum sıcaklıkların kullanılması önerilmiştir.

Kashyap ve Panda (2001) Hindistan'ın Kharagpur bölgesinde günlük referans bitki su tüketimini tahmin etmek amacı ile 10 farklı ET_o eşitliği (Penman, FAO-24 Penman, FAO-24 Corrected-Penman, Kimberley Penman-82, Penman-Monteith, Turc, Priestley-Taylor, FAO-24 Radyasyon, Hargreaves ve Blaney-Criddle) ile tartılı lizimetreden elde ettikleri sonuçları karşılaştırmışlardır. Yarı kurak bir iklimin yaşandığı bu bölgede radyasyona dayalı eşitliklerin lizimetre de ölçülen ET_o değerleri ile uyumlu olmakla beraber kombinasyona dayalı eşitliklerin daha iyi bir uyum gösterdiği görülmüştür. Lizimetre ölçümlerine en yakın sonucu Penman-Monteith eşitliğinin verdiğini bu eşitliği Kimberly Penman-82 ve FAO-24 Penman eşitliklerinin takip ettiğini bildirmişlerdir.

Lu vd. (2005) Amerika Birleşik Devletleri'nin güneydoğu yakasında yaptıkları çalışmada sıcaklığa ve radyasyona dayalı ET_o tahmini yapan 6 farklı eşitliği (Thornthwaite, Hamon, Hargreaves-Samani, Turc, Makkink ve Priestley-Taylor) karşılaştırmışlardır. Çalışmada eşitliklerin yaptıkları tahminler arasında yüksek korelasyon (Pearson korelasyon katsayısı 0.85-1.00) olduğu ifade edilirken, çok değişkenli istatistiksel testlerde ise farklı yöntemlerle hesaplanan ET_o değerlerinin birbirinden önemli derecede farklı oldukları ifade edilmiştir. Büyük farklılıklar sıcaklığa dayalı tahmin yapan eşitlikler ile radyasyona dayalı tahmin yapan eşitlikler arasında bulunmuştur. Sıcak, nemli iklim koşulları için geliştirilen radyasyona dayalı yöntemler (Priestley-Taylor ve Turc yöntemleri) Amerika Birleşik Devletleri'nin güneydoğu yakası için iyi bir performans gösterdiğini belirtmişlerdir.

Fernandes vd. (2012) tropikal iklim koşullarında 6 farklı ET_o eşitliğini (Makkink, Jensen-Haise, Camargo, Priestley–Taylor, Hargreaves, Hargreaves-Samani) FAO56-P.M eşitliği ile karşılaştırmışlardır. Araştırmacılar 6 eşitlikten elde ettikleri değerler ile FAO56-Penman-Monteith eşitliği ile elde ettikleri değerler arasında %10'dan daha fazla farklılık olduğunu saptamışlardır. Yazarlar Hargreaves, Priestley-Taylor ve Makkink yöntemleri diğer eşitliklere nazaran solar radyasyon parametresini kullanarak ışınım sürecinin etkilerini yansıttıkları için FAO56-Penman-Monteith eşitliği ile daha iyi uyum sağladığını belirtmişlerdir.

Tabari vd. (2013) nemli iklimin yaşandığı bir bölgede 8 tanesi pan buharlaşmasına dayalı, 7 tanesi sıcaklık ölçümüne dayalı, 4 tanesi radyasyon ölçümüne dayalı ve 10 tanesi de kütle transferi yöntemine dayalı 31 farklı ET_o eşitliğini FAO56-P.M eşitliği ile karşılaştırmışlardır. Yazarlar, pan buharlaşmasına dayalı eşitliklerin hepsi ve kütle transferine dayanan eşitliklerin büyük bir bölümünün FAO56-P.M eşitliğine kıyasla ET_o değerini az tahmin ettiğini belirtirken sıcaklığa dayalı ve radyasyona dayalı yöntemlerin ise FAO56-P.M eşitliğine kıyasla daha fazla tahminde bulunduğunu bildirmişlerdir. Ayrıca eşitliklerin doğru tahmin etme yüzdeleri incelendiğinde kütle transferine dayalı denklemlerin en kötü performansa sahip olduğu, radyasyona dayalı ve sıcaklığa dayalı yöntemlerin ise çalışmanın yapıldığı nemli bölgeye en uygun yöntemler olduğunu ifade etmişlerdir.

Djaman vd. (2015) Senegal'de Sahelian ikliminde 16 farklı ET_o eşitliği ile FAO56 Penman-Monteith eşitliğini karşılaştırmışlardır. Hargreaves, Modified Hargreaves, Ravazzani ve Tralkovic eşitliklerinin ET_o'yu fazla tahmin ettiğini Makkink, Hansen, Modifiye-

Romanenko ve Turc eşitliklerinin ise daha az tahmin ettiğini saptamışlardır. Araştırmacılar söz konusu bölgede FAO-56-Penman Monteith eşitliğinden sonraki en iyi 5 eşitliğin sırasıyla Valiantzas, Trabert, Romanenko, Schendel ve Mahringer olduğunu bildirmişlerdir.

Xystrakis ve Matzarakis (2011) Akdeniz iklimine sahip bölgede yaptığı çalışmada 13 farklı ET_o eşitliğini FAO Penman-Monteith modeli ile karşılaştırmışlar ve Hansen ve Turc eşitliğinin en kullanışlı eşitlik olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca radyasyon ölçümüne dayalı eşitliklerin kullanılmasını önermişlerdir.

Todorovic vd. (2015) ile López-Moreno vd. (2009) Akdeniz iklimine sahip bölgelerde yaptıkları çalışmada ET_o tahmini yapan eşitliklerden FAO-56 Penman-Monteith eşitliği için yeterli veri olmaması durumunda Hargreaves eşitliğinin kullanılmasını önermişlerdir.

SONUÇ

Bu çalışmada günümüze kadar geliştirilmiş ET_o eşitliklerin büyük bir bölümünü oluşturan toplam 71 adet eşitliğin (pan katsayısına dayanan 9 adet, sıcaklığa dayalı 15 adet, radyasyona dayalı 22 adet, kütle transferine dayalı 14 adet ve kombinasyona dayalı 11 adet yöntem) tek bir çalışmada verilmesi amaçlanmıştır. Ayrıca bu eşitliklerin ve bağlı oldukları yöntemlerin farklı iklim tiplerinde değerlendirilmesiyle eşitliklerin üstün ve zayıf özelliklerinin belirlenmesi amaçlanmıştır.

Bu eşitliklerin büyük bir bölümü geliştirildiği bölgede ve benzer iklime sahip diğer bölgelerde ET_o değerini yüksek doğrulukta tahmin etmesine karşı farklı iklimlerde aynı doğrulukta tahmin etmemektedirler. Önceki çalışmaların incelenmesi sonucunda FAO56-P.M eşitliğinin dünyanın pek çok bölgesinde diğer tüm yöntemlere kıyasla ET_o'yu en doğru tahmin ettiği ve otoriteler tarafından standart bir yöntem olarak kabul edildiği görülmüştür. Pan katsayısına dayalı yöntemlerle ilgili yapılmış çalışmalar incelendiğinde eşitliklerin standart yöntemlere kıyasla ET_o değerini daha düşük tahmin ettiği söylenebilir. Sıcaklığa dayalı yöntemler az sayıda iklimsel parametreye ihtiyaç duyması nedeniyle yeterli iklimsel verilerinin olmaması durumda iyi bir alternatif olabilir. Fakat sıcaklığa dayalı yöntemleri kullanırken seçilen eşitliğin benzer iklime sahip bir bölgede geliştirilmiş ya da kullanılacak bölgeye özel kalibrasyonunun olmasına dikkat edilmelidir. Önceki çalışmalardan anlaşılacağı üzere radyasyona dayalı yöntemlerden Turc eşitliği pek çok iklimde ve bölgede FAO56-P.M eşitliğine alternatif bir yöntem olarak önerilmesine rağmen eşitliğin doğru tahmin etme yüzdesini bölgedeki rüzgar hızının etkilediği görülmüştür. Ayrıca radyasyona dayalı yöntemler kullanırken ortalama sıcaklık verisi yerine maksimum ve minimum sıcaklık verisinin kullanılması ET_o' değerinin daha doğru tahmin edilmesine yardım etmektedir.

KAYNAKLAR

Abdel-Wahed, M.H., Snyder, R.L., 2008. Simple Equation to Estimate Reference Evapotranspiration from Evaporation Pans Surrounded by Fallow Soil. J. Irrig. Drain. Eng. 134, 425–429. doi:10.1061/(ASCE)0733-9437(2008)134:4(425)

Abtew, W., 1996. Evapotranspiration Measurements and Modeling for Three Wetland Systems in South Florida. J. Am. Water Resour. Assoc. 32, 465–473. doi:10.1111/j.1752-1688.1996.tb04044.x

Albrecht, F., 1950. Die Methoden zur Bestimmung der Verdunstung der natürlichen Erdoberfläche. Arch. für Meteorol. Geophys. und Bioklimatologie, Ser. B 2, 1–38. doi:10.1007/BF02242718

Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., 1998. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements, FAO Irrigation and Drainage Paper 56. FAO, Roma.

Allen, R.G., Pruitt, W.O., 1991. FAO-24 Reference Evapotranspiration Factors. J. Irrig. Drain. Eng. 117, 758–772. doi:10.1061/(ASCE)0733-9437(1991)117:5(758)

Amatya, D.M., Skaggs, R.W., Gregory, J.D., 1995. Comparison of Methods for Estimating REF-ET. J. Irrig. Drain. Eng. 121, 427–435. doi:10.1061/(ASCE)0733-9437(1995)121:6(427)

Aydınşakir, K., Baştuğ, R., Büyüktaş, D., 2003. Antalya Yöresinde Çim Kıyas Bitki Su Tüketimini Veren Bazı Ampirik Eşitliklerin Tarla ve Lizimetre Koşullarında Kalibrasyonu. Akdeniz Üniversitesi Ziraat Fakültesi Derg. 16, 107–119.

Berengena, J., Gavilán, P., 2005. Reference Evapotranspiration Estimation in a Highly Advective Semiarid Environment. J. Irrig. Drain. Eng. 131, 147–163. doi:10.1061/(ASCE)0733-9437(2005)131:2(147)

Blaney, H.F., Criddle, W.D., 1950. Determining Water Requeriments in Irrigated Areas from Climatological and Irrigation Data. Soil Conserv. Serv. US Dep. Agric. technical, p 48.

Bogawski, P., Bednorz, E., 2014. Comparison and Validation of Selected Evapotranspiration Models for Conditions in Poland (Central Europe). Water Resour. Manag. 28, 5021–5038. doi:10.1007/s11269-014-0787-8

Brockamp, B., Wenner, H., 1963. Verdunstungsmessungen auf den Steiner See bei Mu¨nster. Dt Gewa sserkundl Mitt. 7, 149–154.

Camargo, A.., 1971. Balanço Hídrico no Estado de São Paulo. 3.ed. Campinas IAC 116, 24.

Caprio, J.M., 1974. The Solar Thermal Unit Concept in Problems Related to Plant Development and Potential Evapotranspiration, içinde: Lieth, H. (Ed.), Phenology and Seasonality Modeling. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, ss. 353–364. doi:10.1007/978-3-642-51863-8_29

Castañeda, L., Prasada, R., 2005. COMPARISON OF METHODS FOR ESTIMATING REFERENCE EVAPOTRANSPIRATION IN SOUTHERN CALIFORNIA. J. Environ. Hydrol. 13, 1–10.

Christiansen, J., 1968. Pan Evaporation and Evapotranspiration from Climatic Data. J. Irrig. Drain. Div. 94, 243–265.

Cuenca, R.., 1989. Irrigation System Design-An Engineering Approach. Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs 552.

Dalton, J., 1802. Experimental Essays on the Constitution of Mixed Gases; on The Force of Steam of Vapour from Waters and Other Liquids in Different Temperatures, Both in a Torricellian Vacuum and in Air on Evaporation and on the Expansion of Gases by Heat. Mem. Manchester Lit. Philos. Soc. 5, 535–602.

de Bruin, H.A.., Stricker, J.N.., 2000. Evaporation of Grass Under Non-restricted Soil Mmoisture Conditions. Hydrol. Sci. J. 45, 391–406. doi:10.1080/02626660009492337

Delibaş, L., 1994. Sulama. Tekirdağ Ziraat Fakültesi 213.

Djaman, K., Balde, A.B., Sow, A., Muller, B., Irmak, S., N'Diaye, M.K., Manneh, B., Moukoumbi, Y.D., Futakuchi, K., Saito, K., 2015. Evaluation of Sixteen Reference Evapotranspiration Methods under Sahelian Conditions in the Senegal River Valley. J. Hydrol. Reg. Stud. 3, 139–159. doi:10.1016/j.ejrh.2015.02.002

Doorenboos, J., Pruitt, W.O., 1977. Guidelines for Predicting Crop Water Requirements, Irrigation and Drainage Paper 24. L. Water Dev. Div. FAO Rome 24, 144.

Dorji, U., Olesen, J.E., Seidenkrantz, M.S., 2016. Water balance in the complex mountainous terrain of Bhutan and linkages to land use. J. Hydrol. Reg. Stud. 7, 55–68. doi:10.1016/j.ejrh.2016.05.001

Droogers, P., Allen, R.G., 2002. Estimating Reference Evapotranspiration Under Inaccurate Data Conditions. Irrig. Drain. Syst. 16, 33–45. doi:10.1023/A:1015508322413

Emekli, Y., Baştuğ, R., 2007. Antalya'da Tarla Koşullarında Bermuda Çiminin Su Tüketimi ve Bazı Kıyas Bitki Su Tüketimi Eşitliklerinin Geçerliliğinin Belirlenmesi. Akdeniz Üniversitesi Ziraat Fakültesi Derg. 20, 45–57.

Fernandes, L.C., Paiva, C.M., Rotunno Filho, O.C., 2012. Evaluation of Six Empirical Evapotranspiration Equations - Case Study: Campos dos Goytacazes/RJ. Rev. Bras. Meteorol. 27, 272–280. doi:10.1590/S0102-77862012000300002

Fitzgerald, D., 1886. Evaporation. Trans. Am. Soc. Civ. Eng. 98, 2073–2085.

Fontenot, R.L., 2004. An Evaluation of Reference Evapotranspiration Models in Louisiana. M.Sc. Thesis. Louisiana State Univ. A&M Coll. 83 p.

Fooladmand, H.., Ahmadi, S.., 2009. Monthly Spatial Calibration of Blaney-Criddle Equation for Calculating Monthly ETo in South of Iran. Irrig. Drain. 58, 234–245. doi:Doi 10.1002/Ird.409

Frère, M., Popov, G., 1979. Agometeorological Crop Monitoring and Forecasting. FAO Plant Prod. Prot. Paper No 1, 64.

Gocic, M., Trajkovic, S., 2010. Software for estimating reference evapotranspiration using limited weather data. Comput. Electron. Agric. 71, 158–162. doi:10.1016/j.compag.2010.01.003

Grismer, M.E., Orang, M., Snyder, R., Matyac, R., 2002. Pan Evaporation to Reference Evapotranspiration Conversion Methods. J. Irrig. Drain. Eng. 128, 180–184. doi:10.1061/(ASCE)0733-9437(2002)128:3(180)

Hansen, S., 1984. Estimation of Potential and Actual Evapotranspiration. Hydrol. Res. 15, 205–212.

Harbeck, G.E., Kohler, M.A., Koberg, G.E., 1958. Water-loss investigations; Lake Mead studies. USGS Numbered Ser. Prof. Pap. 298, 100 p.

Hargreaves, G., 1975. Moisture Availability and Crop Production. Trans. ASAE 18, 980–984. doi:10.13031/2013.36722

Hargreaves, G.., Samani, Z.., 1985. Reference Crop Evapotranspiration from Temperature. Appl. Eng. Agric. 1, 96–99. doi:10.13031/2013.26773

Heydari, M.M., Heydari, M., 2014. Evaluation of Pan Coefficient Equations for Estimating Reference Crop Evapotranspiration in The Aarid Region. Arch. Agron. Soil Sci. 60, 715–731. doi:10.1080/03650340.2013.830286

Irmak, S., Irmak, A., Allen, R.G., Jones, J.W., 2003. Solar and Net Radiation-Based Equations to Estimate Reference Evapotranspiration in Humid Climates. J. Irrig. Drain. Eng. 129, 336–347. doi:10.1061/(ASCE)0733-9437(2003)129:5(336)

Iuliana, S., Neculau, G., 2015. Estimation of Reference Evapotranspiration from Pan Evaporation Data in Romania. Rom. J. Meteorol. 12, 65–73.

Jabloun, M., Ali, S., 2008. Evaluation of FAO-56 Methodology for Estimating Reference Evapotranspiration Using Limited Climatic data: Application to Tunisia. Agric. Water Manag. 95, 707–715.

Jensen, D.T., Hargreaves, G.H., Temesgen, B., Allen, R.G., 1997. Computation of ETo Under Nonideal Conditions. J. Irrig. Drain. Eng. ASCE 123, 400.

Jensen, M.E., 1966. Empirical Methods of Estimating or Predicting Evapotranspiration Using Radiatio. Evapotranspiration Its Role Water Resour. Manag. St. Joseph Am. Soc. Agric. Eng. 49, 66.

Jensen, M.E., Burman, R.D., Allen, R.G., 1990. Evapotranspiration and irrigation water requirements, ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 70.

Jones, J.., Ritchie, J.., 1990. Crop Growth Methods: Management of Farm Irrigation Systems. ASAE Monogr. No. 9. 63–89.

Kaboosi, K., 2012. The Investigation of Error of Pan Evaporation Data , Estimation of Pan Evaporation Coefficient by Pan Data and Its Comparison with Empirical Equations. Int. J. Agric. Crop Sci. 4, 1458–1465.

Kanber, R., 2006. Sulama, 4. ed. Çukurova Üniversitesi Ziraat Fakültesi, Adana.

Karaca, C., Büyüktaş, D., Tekelioğlu, B., 2017. Kıyas Bitki Su Tüketiminin (ETo) Hesaplanması Amacıyla Kullanılan Bilgisayar Yazılımlarının Karşılaştırması. 2.Ulusal Biyosistem Mühendisliği Kongresi 1, 23.

Kashyap, P.S., Panda, R.K., 2001. Evaluation of Evapotranspiration Estimation Methods and Development of Crop-Coefficients for Potato Crop in a Sub-Humid Region. Agric. Water Manag. 50, 9–25. doi:10.1016/S0378-3774(01)00102-0

Kaya, S., Evren, S., Daşci, E., 2016. Yarı - Kurak İklim Koşullarında A Sınıfı Kap Buharlaşmasını Tahmin İçin Çeşitli Eşitliklerin Karşılaştırılması. U. Ü. ZİRAAT FAKÜLTESİ DERGİSİ 30, 1–9.

Kharrufa, H.., 1985. Simplified Equation for Evapotranspiration in Arid Regions. Beitr¨age zur Hydrol. Sonderh. 5, 39–47.

Landeras, G., Ortiz-Barredo, A., Lopez, J.J., 2008. Comparison of Artificial Neural Network Models and Empirical and Semi-Empirical Equations for Daily Reference Evapotranspiration Estimation in the Basque Country (Northern Spain). Agric. Water Manag. 95, 553–565. doi:10.1016/j.agwat.2007.12.011

Linacre, E.T., 1977. A Simple Formula for Estimating Evaporation Rates in Various Climates, Using Temperature Data Alone. Agric. Meteorol. 18, 409–424. doi:10.1016/0002-1571(77)90007-3

López-Moreno, J.I., Hess, T.M., White, A.S.M., 2009. Estimation of Reference Evapotranspiration in a Mountainous Mediterranean Site Using the Penman-Monteith Equation With Limited Meteorological Data. Pirineos JACA 164, 7–31.

López-Urrea, R., Martín de Santa Olalla, F., Fabeiro, C., Moratalla, A., 2006. Testing evapotranspiration equations using lysimeter observations in a semiarid climate. Agric. Water Manag. 85, 15–26. doi:10.1016/j.agwat.2006.03.014

Lu, J., Sun, G., McNulty, S.G., Amatya, D.M., 2005. A Comparıson of Sıx Potentıal Evapotranspıratıon Methods for Regıonal Use in The Southeastern Unıted States. J. Am. Water Resour. Assoc. 41, 621–633. doi:10.1111/j.1752-1688.2005.tb03759.x

Mahringer, W., 1970. Verdunstungsstudien am Neusiedler See. Arch. für Meteorol. Geophys. und Bioklimatologie Serie B, 1–20.

Makkink, G.F., 1957. Testing the Penman Formula by Means of Lysimeters. J. Inst. Water Eng. 11, 277–288.

Martinez, C.J., Thepadia, M., 2010. Estimating Reference Evapotranspiration with Minimum Data in Florida. J. Irrig. Drain. Eng. 136, 494–501. doi:10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000214

McGuinness, J.L., Bordne, E.F., 1972. A comparison of lysimeter-derived potential evapotranspiration with computed values. Arsusda Technical, 80.

McKenney, M.S., Rosenberg, N.J., 1993. Sensitivity of Some Potential Evapotranspiration Estimation Methods to Climate Change. Agric. For. Meteorol. 64, 81–110. doi:https://doi.org/10.1016/0168-1923(93)90095-Y

Meyer, A., 1926. Über einige Zusammenhänge zwischen Klima und Boden in Europa. Chemie der Erde. 2, 209–347.

Monteith, J.L., 1965. Evaporation and Environment. Symp. Soc. Exp. Biol. 19, 205–234. doi:10.1613/jair.301

Orang, M., 1998. Potential Accuracy of the Popular Non-Linear Regression Equations for Estimating Pan Coefficient Values in the Original and Fao-24 Table. Unpubl. Rep. Calif. Dep. Water Resour. Sacramento.

Oudin, L., Hervieu, F., Michel, C., Perrin, C., Andréassian, V., Anctil, F., Loumagne, C., 2005. Which Potential Evapotranspiration Input for A Lumped Rainfall-Runoff Model? Part 2 - Towards A Simple and Efficient Potential Evapotranspiration Model for Rainfall-Runoff Modelling. J. Hydrol. 303, 290–306. doi:10.1016/j.jhydrol.2004.08.026

Pandey, P.K., Dabral, P.P., Pandey, V., 2016. Evaluation of reference evapotranspiration methods for the northeastern region of India. Int. Soil Water Conserv. Res. 4, 52–63. doi:10.1016/j.iswcr.2016.02.003

Papadakis, J., 1966. Climates of the World and Their Agricultural Potentialities. Buenos Aires Publ. by author 179 p.

Penman, H.L., 1948. Natural Evporation from Open Water, Bare Soil and Grass. R. Soc. 193, 120–145. doi:10.1098/rspa.1948.0037

Penman, L.H., 1963. Vegetation and Hydrology. Commonw. Bur. Soils, Harpenden Tech. Comm, 125 p.

Pereira, A.., Villa Nova, N.., Pereira, A.., Barbieri, V.., 1995. A Model for The Class A Pan Coefficient. Agric. For. Meteorol. 76, 75–82.

Priestley, C., Taylor, R., 1972. On the Assessment of Surface Heat Flux and Evaporation Using Large-Scale Parameters. Mon. Weather Rev. 100, 81–92. doi:10.1175/1520-0493(1972)100<0081:OTAOSH>2.3.CO;2

Rácz, C., Nagy, J., Dobos, A.C., 2013. Comparison of several methods for calculation of reference evapotranspiration. Acta Silv. Lignaria Hungarica 9, 441–467. doi:10.2478/aslh-2013-0001

Raghuwanshi, N.S., Wallender, W.W., 1998. Converting from Pan Evaporation to Evapotranspiration. J. Irrig. Drain. Eng. 124, 275–277. doi:10.1061/(ASCE)0733-9437(1998)124:5(275)

Rana, G., Katerji, N., 2000. Measurement and estimation of actual evapotranspiration in the field under Mediterranean climate: A review, içinde: European Journal of Agronomy. ss. 125–153. doi:10.1016/S1161-0301(00)00070-8

Ritchie, J.T., 1972. Model for Predicting Evaporation from a Row Crop with Incomplete Cover. Water Resour. Res. 8, 1204–1213. doi:10.1029/WR008i005p01204

Roberto Pereira, A., Oregon Pruitt, W., 2004. Adaptation of the Thornthwaite Scheme for Estimating Daily Reference Evapotranspiration. Agric. Water Manag. 66, 251–257.

Rohwer, C., 1931. Evaporation from Free Water Surface. USDA Tech Null. 1–96.

Rojas, J.P., Sheffield, R.E., 2013. Evaluation of Daily Reference Evapotranspiration Methods as Compared with the ASCE-EWRI Penman-Monteith Equation Using Limited Weather Data in Northeast Louisiana. J. Irrig. Drain. Eng. 139, 285–292. doi:10.1061/(asce)ir.1943-4774.0000523

Romanenko, V.., 1961. Computation of the Autumn Soil Moisture Using a Universal Relationship for a Large Area. Ukr. Hydrometeorol. Res. Inst. 3, No: 3. Kiev.

Schendel, U., 1967. Vegetationswasserverbrauch Und -Wasserbedarf. Habilitation 137 p.

Shahidian, S., Serralheiro, R., Serrano, J., Teixeira, J.L., Haie, N., Santos, F., 2012. Hargreaves and Other Reduced-Set Methods for Calculating Evapotranspiration. Evapotranspiration - Remote Sens. Model. 23, 59–80. doi:10.5772/18059

Singh, V.P., Xu, C.Y., 1997. Evaluation and Generalization of 13 Mass-Transfer Equations for Determining Free Water Evaporation. Hydrol. Process. 11, 311–323. doi:10.1002/(SICI)1099-1085(19970315)11:3<311::AID-HYP446>3.3.CO;2-P

Snyder, R.., 1992. Equation for Evaporation Pan to Evapotranspiration Conversion. J. Irrig. Drain. Engeneering ASCE 118, 977–980.

Snyder, R.L., Pruitt, W.O., 1992. Evapotranspiration Data Management in California. ASCE Water Forum '92 Proc. Irrig. Drain. Engr. Div. 128–133.

SreeMaheswari, C.., Aruna Jyothy, S., 2017. Evaluation of Class A Pan Coefficient Models for Estimation Oof Reference Evapotranspiration Using Penman-Monteith Method. Int. J. Sci. Technol. Eng. 3, 90–93.

Swarnakar, R.K., Raghuwanshi, N.S., 2000. DSS_ET User Manual. Dep. Agric. Food Eng. Indian Inst. Technol. 77.

Tabari, H., 2010. Evaluation of Reference Crop Evapotranspiration Equations in Various Climates. Water Resour. Manag. 24, 2311–2337. doi:10.1007/s11269-009-9553-8

Tabari, H., Grismer, M.E., Trajkovic, S., 2013. Comparative Analysis of 31 Reference Evapotranspiration Methods Under Humid Conditions. Irrig. Sci. 31, 107–117. doi:10.1007/s00271-011-0295-z

Temesgen, B., Eching, S., Davidoff, B., Frame, K., 2005. Comparison of Some Reference Evapotranspiration Equations for California. J. Irrig. Drain. Eng. 131, 73–84. doi:10.1061/(ASCE)0733-9437(2005)131:1(73)

Thornthwaite, C.W., 1948. An Approach toward a Rational Classification of Climate. Geogr. Rev. 38, 55–94. doi:10.2307/210739

Todorovic, M., Karic, B., Pereira, L.S., Lionello, P., 2015. Evapotranspiration Estimate in the Mediterranean: The Comparison Between Different Methods and Ppossible Impacts of Climate Change. EGU Gen. Assem.

Trabert, W., 1896. Neue Beobachtungen u¨ber Verdampfungsgeschwindigkeiten. Meteorol .Z. 13, 261–263.

Trajkovic, S., 2007. Hargreaves versus Penman-Monteith under Humid Conditions. J. Irrig. Drain. Eng. 133, 38–42. doi:10.1061/(ASCE)0733-9437(2007)133:1(38)

Trajkovic, S., Kolakovic, S., 2009. Evaluation of Reference Evapotranspiration Equations Under Humid Conditions. Water Resour. Manag. 23, 3057–3067. doi:10.1007/s11269-009-9423-4

Trajkovic, S., Stojnic, V., 2007. Effect of Wind Speed on Accuracy of Turc Method in a Humid Climate. Facta Univ. 5, 107–113.

Turc, L., 1961. Estimation of İrrigation Water Requirements, Potential Evapotranspiration: A Simple Climatic Formula Evolved Up to Date. Ann. Agron. 2, 13–49.

Valiantzas, J.D., 2013. Simplified Forms for the Standardized Fao-56 Penman-Monteith Reference Evapotranspiration Using Limited Weather Data. J. Hydrol. 505, 13–23. doi:10.1016/j.jhydrol.2013.09.005

Valiantzas, J.D., 2006. Simplified Versions for the Penman Evaporation Equation Using Routine WeatherData. J. Hydrol. 331, 690–702. doi:10.1016/j.jhydrol.2006.06.012

Van Bavel, C.H.M., 1966. Potential Evaporation: the Combination Concept and its Experimental Verification. Water Resour. Res. 2, 455–467.

Ventura, F., Spano, D., Duce, P., Snyder, R.L., 1999. An Evaluation of Common Evapotranspiration Equations. Irrig. Sci. 18, 163–170. doi:10.1007/s002710050058

WMO, 1966. Measurement and Estimation of Evaporation and Evapotranspiration. Tech Pap 83, Genf.

Wright, J.., Jensen, M.., 1972. Peak Water Requirements of Crops in Southern Idaho. In: Proceedings of the American Society of Civil Engineer. J. Irrig. Drain. Eng. 96, 193–201.

Wright, J.L., 1982. New Evapotranspiration Crop Coefficients. J. Irrig. Drain. Div. 108, 57–64.

Xing, Z., Chow, L., Meng, F., Rees, H.W., Monteith, J., Lionel, S., 2008. Testing Reference Evapotranspiration Estimation Methods Using Evaporation Pan and Modeling in Maritime Region of Canada. J. Irrig. Drain. Eng. 134, 417–424. doi:10.1061/(ASCE)0733-9437(2008)134:4(417)

Xu, C.Y., Singh, V.P., 2000. Evaluation and Generalization of Radiation-Based Methods for Calculating Evaporation. Hydrol. Process. 14, 339–349. doi:10.1002/(SICI)1099-1085(20000215)14:2<339::AID-HYP928>3.0.CO;2-O

Xystrakis, F., Matzarakis, A., 2011. Evaluation of 13 Empirical Reference Potential Evapotranspiration Equations on the Island of Crete in Southern Greece. J. Irrig. Drain. Eng. 137, 211–222. doi:10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000283

Yoder, R.E., Odhiambo, L.O., Wright, W.C., 2005. Evaluation of Methods for Estimating Daily Reference Crop Evapotranspiration at a Site in The Humid Southeast United States. Appl. Eng. Agric. 21, 197–202. doi:10.13031/2013.18153

View publication stats