

**ARAZİ İÇİN YÜZEY ENERJİ DENGESİ ALGORİTMASI  
(SEBAL) İLE GERÇEK EVAPOTRANSPIRASYONUN  
BELİRLENMESİ**

**Mücahid CAN**



T.C.  
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ARAZİ İÇİN YÜZEY ENERJİ DENGESİ ALGORİTMASI (SEBAL) İLE  
GERÇEK EVAPOTRANSPIRASYONUN BELİRLENMESİ**

Mücahid CAN  
0000-0002-5466-350X

Prof. Dr. Kemal Sulhi GÜNDOĞDU  
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ  
BİYOSİSTEM MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2022  
**Her Hakkı Saklıdır**

## TEZ ONAYI

Mücahid CAN tarafından hazırlanan “ARAZİ İÇİN YÜZEY ENERJİ DENGESİ ALGORİTMASI (SEBAL) İLE GERÇEK EVAPOTRANSPIRASYONUN BELİRLENMESİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Biyosistem Mühendisliği Anabilim Dalı’nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

**Danışman:** Prof. Dr. Kemal Sulhi GÜNDOĞDU

- Başkan** : Prof. Dr. Kemal Sulhi GÜNDOĞDU İmza  
0000-0002-5591-4788  
Bursa Uludağ Üniversitesi,  
Ziraat Fakültesi,  
Biyosistem Mühendisliği Anabilim Dalı
- Üye** : Prof. Dr. Şerife Tülin AKKAYA ASLAN İmza  
0000-0001-5129-8642  
Bursa Uludağ Üniversitesi,  
Ziraat Fakültesi,  
Biyosistem Mühendisliği Anabilim Dalı
- Üye** : Doç. Dr. Ali Beyhan UÇAK İmza  
0000-0003-4344-2848  
Siirt Üniversitesi,  
Ziraat Fakültesi,  
Biyosistem Mühendisliği Anabilim Dalı

**Yukarıdaki sonucu onaylarım**

**Prof. Dr. Hüseyin Aksel EREN**  
**Enstitü Müdürü**  
.././....

**B.U.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;**

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

**beyan ederim.**

.../.../.....

**Mücahid CAN**

## TEZ YAYINLANMA FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI BEYANI

Enstitü tarafından onaylanan lisansüstü tezin/raporun tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı (kâğıt) ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda verilen koşullarla kullanıma açma izni Bursa Uludağ Üniversitesi'ne aittir. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet hakları ile tezin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanım hakları tarafımıza ait olacaktır. Tezde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanılması zorunlu metinlerin yazılı izin alınarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederiz.

Yükseköğretim Kurulu tarafından yayınlanan “**Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge**” kapsamında, yönerge tarafından belirtilen kısıtlamalar olmadığı takdirde tezin YÖK Ulusal Tez Merkezi / B.U.Ü. Kütüphanesi Açık Erişim Sistemi ve üye olunan diğer veri tabanlarının (Proquest veri tabanı gibi) erişimine açılması uygundur.

Danışman Adı-Soyadı  
Tarih

Öğrencinin Adı-Soyadı  
Tarih

İmza

Bu bölüme kişinin kendi el yazısı ile okudum  
anladım yazmalı ve imzalanmalıdır.

İmza

Bu bölüme kişinin kendi el yazısı ile okudum  
anladım yazmalı ve imzalanmalıdır.

## ÖZET

Yüksek Lisans

### ARAZI İÇİN YÜZEY ENERJİ DENGESİ ALGORİTMASI (SEBAL) İLE GERÇEK EVAPOTRANSPIRASYONUN BELİRLENMESİ

**Mücahid CAN**

Bursa Uludağ Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Biyosistem Mühendisliği Anabilim Dalı

**Danışman:** Prof. Dr. Kemal Sulhi GÜNDOĞDU

Tarımda su kullanımı bitkisel üretim için bir gereklilik olup, bitki su ihtiyacının yeterince ve verimli bir şekilde karşılanması için bitki su tüketiminin belirlenmesi gerekmektedir. Bitki su tüketimi sadece meteorolojik koşullara değil, aynı zamanda bitki çeşidine bağlı olarak değişmektedir. Havza düzeyinde sulama sistemlerinin planlanmasında uygun bitki su tüketimi hesaplama yöntemleri kullanılması işlemleri kolaylaştırmaktadır. Günümüzde nüfus artışı, sanayileşme ve en önemlisi iklim değişikliği beraberinde küresel ısınma sonucu suyun önemi daha da artmış, kullanım verimliliği ve performans ölçütleri önem kazanmıştır. Bu çalışma ile geniş alanlarda bitki su tüketimi ve biyokütle gibi önemli parametrelerin uydu teknolojisi ile belirlenmesi hedeflenmiştir. Bu amaçla, Arazi İçin Yüzey Enerji Dengesi Algoritması olan PySEBAL modeli kullanılmıştır. Modelin çalıştırılması ile referans evapotranspirasyon, bitki katsayısı, gerçek evapotranspirasyon, bitki vejetasyon indeksleri ve biyokütle üretimi verileri elde edilmiştir. Bu değerler iklim verileri ve tarla düzeyinde elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. PySEBAL modeli gerçek evapotranspirasyonu %15-20 gibi hata ile hesaplayabilmiştir. İklim verileri ile hesaplama yöntemlerine göre çok daha hızlı ve az maliyetle sonuç veren uzaktan algılama tekniklerinin yakın gelecekte daha çok kullanılacağı düşünülmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Sulama, evapotranspirasyon, uzaktan algılama, SEBAL

**2022, viii + 72 sayfa.**

## **ABSTRACT**

MSc Thesis

DETERMINATION OF ACTUAL EVAPOTRANSPIRATION BY THE SURFACE  
ENERGY BALANCE ALGORITHM FOR LAND (SEBAL)

**Mücahid CAN**

Bursa Uludağ University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Biosystems Engineering

**Supervisor:** Prof. Dr. Kemal Sulhi GÜNDOĞDU

The use of water in agriculture is a necessity for plant production, and it is necessary to determine the plant water consumption in order to meet the plant water need sufficiently and efficiently. Plant water consumption varies not only with meteorological conditions, but also with plant variety. The use of appropriate plant water consumption calculation methods in the planning of irrigation systems at the basin level facilitates the operations. Today, as a result of population growth, industrialization and most importantly climate change, the importance of water has increased as a result of global warming, usage efficiency and performance criteria have gained importance. In this study, it is aimed to determine important parameters such as evapotranspiration and biomass in large areas with satellite technology. For this purpose, the PySEBAL model, which is the Surface Energy Balance for Land algorithm, was used. By running the model, reference evapotranspiration, plant coefficient, actual evapotranspiration, plant vegetation indices and biomass production data were obtained. These values were compared with the climate data and the results obtained at the field level. The PySEBAL model was able to calculate the actual evapotranspiration with an error of 15-20%. It is thought that remote sensing techniques, which give results with a lot of weather and less cost compared to calculation methods with climate data, will be used more in the near future.

**Key words:** Irrigation, evapotranspiration, remote sensing, SEBAL

**2022, viii + 72 pages.**

## TEŐEKKÖR

Lisans dnemimden beri verdiği bilgisayar programlama, konumsal teknolojiler dersleriyle bu alana ilgimi çekem, beni yüksek lisans danışmalığına kabul eden ve küresel salgın koşullarında dahi her türlü desteği esirgemeyen saygı değer hocam Prof. Dr. Kemal Sulhi GÜNDOĞDU' ya teşekkürlerimi sunarım.

Araştırma ve çalışmalarım boyunca desteklerini üzerimden eksik etmeyen anneme, babama ve eşime teşekkürlerimi sunarım.

Tez yazım dönemimde dünyaya gelen ve bize neşe kaynağı olan oğlumuz Zahid Arif'le birlikte doğal kaynakların daha etkin ve verimli şekilde kullanıldığı sürdürülebilir bir dünya dileğiyle...

Mücahid CAN  
01/01/2022



## İÇİNDEKİLER

	<b>Sayfa</b>
ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ .....	v
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	viii
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI .....	5
2.1. Bitkiler için Sulama Suyu İhtiyacı ve Evapotranspirasyon.....	5
2.2. İklim Verileri ile Evapotranspirasyonun Belirlenmesi .....	9
2.2.1. Penman-Monteith Yöntemi.....	10
2.2.2. Blaney-Criddle Yöntemi .....	11
2.3. Uzaktan Algılama ile Evapotranspirasyon Tahmini .....	13
2.4. Arazi için Yüzey Enerjisi Dengesi Algoritması (SEBAL) .....	15
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	24
3.1. MATERYAL .....	24
3.1.1. Çalışma Alanı.....	24
3.1.2. Uydu Verileri .....	27
3.1.3. İklim Verileri.....	28
3.1.4. Tarımsal Ürün .....	29
3.2. YÖNTEM.....	29
3.2.1. Toprak Örneklerinin Alınması ve Fiziksel Analizi.....	29
3.2.2. CROPWAT ve CLIMWAT ile Evapotranspirasyon Hesabı .....	29
3.2.3. TAGEM SUET Hesaplama Sistemi Uygulaması .....	30
3.2.4. SEBAL (Surface Energy Balance Algorithm For Land) Modeli.....	30
3.2.5. PySEBAL Model Uygulaması .....	33
4. BULGULAR.....	36
4.1. Toprak Fiziksel Analizi.....	36
4.2. Fenolojik Gözlem.....	36
4.3. İklim Verilerine Dayalı Evapotranspirasyon Bulguları .....	39
4.3.1. CropWat Programı Bulguları .....	39
4.3.2. SUET Hesaplama Sistemi Bulguları .....	40
4.4. PySEBAL Modeli Bulguları .....	41
4.4.1. Bakırköy Mahallesi Parseli PySEBAL Çıktıları .....	42
4.4.2. Tepecik Mahallesi Parseli PySEBAL Çıktıları .....	44
4.4.3. Yeşilova Mahallesi Parseli PySEBAL Çıktıları.....	48
5. TARTIŞMA ve SONUÇ .....	51
KAYNAKLAR .....	54
EKLER.....	63
EK 1 Dünya'nın Suyu Nerede?.....	64
EK 2 Dünya'da Suyun Kullanım Alanları .....	65
EK 3 Bakırköy Arazisi Gerçek Evapotranspirasyon Haritaları .....	66
EK 4 Tepecik Arazisi Gerçek Evapotranspirasyon Haritaları .....	68
EK 5 Yeşilova Arazisi Gerçek Evapotranspirasyon Haritaları .....	70
ÖZGEÇMİŞ .....	72

## SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
$\alpha$	Yüzey albedosu
AF	Adveksiyon faktörü
CETr	Yıgışimli referans evapotranspirasyon
CETa	Yıgışimli gerçek evapotranspirasyon
$c_p$	Sabit basınçtaki havanın özgül ısısı [ $J\ kg^{-1}\ K^{-1}$ ]
dT	Dikey yakın yüzey sıcaklık farkı [K]
$EF_{inst}$	Anlık evaporatif fraksiyonu
ETa	Gerçek bitki su tüketimi (mm)
ETc	Bitki su tüketimi (mm)
ETo	Referans bitki su tüketimi (mm)
ETr	Uydu Görüntüsünün alındığı güne ait referans evapotranspirasyon
ETrel	Bağıl bitki su tüketimi
$e_s$	Doymuş buhar basıncı [kPa]
$e_a$	Gerçek buhar basıncı [kPa]
$e_s - e_a$	Doygunluk buhar basıncı açığı [kPa]
eact_24	24 saatlik ortalama gerçek buhar basıncıdır [kPa]
esat_24	24 saatlik ortalama doymuş buhar basıncı [kPa]
$\epsilon_0$	Yüzey salınımı
G	Toprak ısı akısı yoğunluğu [ $MJ\ m^{-2}\ gün^{-1}$ ]
H	Hissedilir ısı akısı [ $MJ\ m^{-2}\ gün^{-1}$ ]
Kc	Bitki su tüketimi katsayısı
Km	Yıgışimli çarpım katsayısı
$\lambda E$	Gizli ısı akısı [ $MJ\ m^{-2}\ gün^{-1}$ ]
p	Yıllık gündüz saatlerinin ortalama günlük yüzdesi
Pw	Ağırlık yüzdesi cinsinden toprak nem miktarı (%)
Rn	Net radyasyon [ $MJ\ m^{-2}\ gün^{-1}$ ]
rah	Isı aktarımına aerodinamik direnç [ $s\ m^{-1}$ ]
$Rs\downarrow$	Gelen kısa dalga radyasyonu [ $W\ m^{-2}$ ]
$RL\downarrow$	Gelen uzun dalga radyasyonu [ $W\ m^{-2}$ ]
$RL\uparrow$	Giden uzun dalga radyasyonu [ $W\ m^{-2}$ ]
T	Ortalama günlük hava sıcaklığı 2 m boy [ $^{\circ}C$ ]
Tmin	En düşük sıcaklık [ $^{\circ}C$ ]
Tmax	En yüksek sıcaklık [ $^{\circ}C$ ]
Tort	Ortalama sıcaklık [ $^{\circ}C$ ]
Ts	Yüzey sıcaklığı [ $^{\circ}C$ ]
$u_2$	Rüzgar hızı 2 m yükseklikte [ $m\ s^{-1}$ ]
$\rho$	Hava yoğunluğu [ $kg\ m^{-3}$ ]
$\gamma$	Psikrometrik sabit [ $kPa\ ^{\circ}C^{-1}$ ]
W	Toprak örneğinin toplam ağırlığı (g)
Ws	Toprak örneğinin kuru ağırlığı (g)

## **Kısaltmalar Açıklama**

ASTER	Gelişmiş Uzay Kaynaklı Termal Emisyon ve Yansıma Radyometresi
AVHRR	Gelişmiş çok yüksek çözünürlüklü radyometre
CBS	Coğrafi Bilgi Sistemleri
CWSI	Bitki Su Stresi Endeksi
DEM	Dijital Yükseklik Modeli
ETM	Gelişmiş Tematik Eşleştirici
FAO	Birleşmiş Milletler Gıda Tarım Örgütü
GMT	Greenwich Orantılı Saat
GPS	Küresel Yer Belirleme Sistemi
METRIC	İçselleştirilmiş Kalibrasyon ile Yüksek Çözünürlükte Evapotranspirasyon Haritalama
MEVBİS	Meteorolojik Veri Satış ve Sunum Sistemi
NDVI	Normalize Edilmiş Bitki Fark Endeksi
NOAA	Ulusal Okyanus ve Atmosfer İdaresi
OLI	Operasyonel Arazi Görüntüleyici
ORT	Ortalama
PROBA-V	Araç İçi Otonom Bitki Örtüsü Projesi
SEBAL	Arazi için Yüzey Enerji Dengesi Algoritması
TAGEM	Tarımsal Araştırmalar ve Politikalar genel Müdürlüğü
TIRS	Termal Kızılötesi Sensör
TÜİK	Türkiye İstatistik Kurumu
UA	Uzaktan Algılama
USGS	Birleşik Devletler Jeoloji Araştırmaları Kurumu
VIIRS	Görünür Kızılötesi Görüntüleme Radyometre Paketi
WWAP	Dünya Su Değerlendirme Programı

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa

Şekil 2.1. Yeryüzü enlem konumları .....	13
Şekil 2.2. Evapotranspirasyon için enerji dengesi denklemi.....	16
Şekil 3.1. Çalışma parsellerinin Bursa ili içerisindeki konumu .....	24
Şekil 3.2. Bakırköy arazisi 1 nolu işletme.....	26
Şekil 3.3. Tepecik arazisi 2 nolu işletme .....	26
Şekil 3.4. Yeşilova arazisi 3 nolu işletme .....	26
Şekil 4.1. Bakırköy arazisi ürün yetiştirme dönemi (15 Mayıs 2020).....	37
Şekil 4.2. Tepecik arazisi ürün yetiştirme dönemi (15 Mayıs 2020).....	37
Şekil 4.3. Bakırköy arazisi 1 Temmuz 2020 tarihli görüntü .....	38
Şekil 4.4. Tepecik arazisi 1 Temmuz 2020 tarihli görüntü .....	38
Şekil 4.5. Yeşilova arazi 1 Temmuz 2020 tarihli görüntü .....	39
Şekil 4.6. Bursa istasyonu SUET ETo değerleri (mm/gün).....	41
Şekil 4.7. Bursa istasyonu SUET danelik mısır bitkisi için ETc değerleri (mm/gün) ....	41
Ek Şekil 1. Mevcut suyun yeryüzündeki dağılımı .....	64
Ek Şekil 2. Ülkelerin gelişmişlik düzeyine göre su kullanım alanları .....	65
Ek Şekil 3.1. Bakırköy arazisi 15 Haziran 2020 gerçek ETa sonuçları .....	66
Ek Şekil 3.2. Bakırköy arazisi 17 Temmuz 2020 gerçek ETa sonuçları .....	66
Ek Şekil 3.3. Bakırköy arazisi 18 Ağustos 2020 gerçek ETa sonuçları.....	67
Ek Şekil 4.1. Tepecik arazisi 15 Haziran 2020 gerçek ETa sonuçları .....	68
Ek Şekil 4.2. Tepecik arazisi 17 Temmuz 2020 gerçek ETa sonuçları.....	68
Ek Şekil 4.3. Tepecik arazisi 18 Ağustos 2020 gerçek ETa sonuçları.....	69
Ek Şekil 5.1. Yeşilova arazisi 15 Haziran 2020 gerçek ETa sonuçları.....	70
Ek Şekil 5.2. Yeşilova arazisi 17 Temmuz 2020 gerçek ETa sonuçları .....	70
Ek Şekil 5.3. Yeşilova arazisi 18 Ağustos 2020 gerçek ETa sonuçları .....	71

## ÇİZELGELER DİZİNİ

### Sayfa

Çizelge 3.1. Çalışma alanı; arazi, parsel bilgileri.....	25
Çizelge 3.2. Landsat 8 OLI/TIRS uydu verisi özellikleri .....	28
Çizelge 3.3. Çalışma alanı için uydu görüntülerinin konum özellikleri .....	28
Çizelge 3.4. Kullanılan uydu görüntülerinin tarihleri .....	27
Çizelge 4.1. Arazi topraklarının fiziksel analizi.....	36
Çizelge 4.2. Cropwat Bursa istasyonu Penman-monteith yöntemi ETo değerleri.....	39
Çizelge 4.3. Cropwat Bursa ili 23 Nisan Ekim tarihli mısır bitkisi su tüketimi .....	40
Çizelge 4.4. Bakırköy arazisi 15 Haziran 2020 PySEBAL çıktıları .....	42
Çizelge 4.5. Bakırköy arazisi 17 Temmuz 2020 PySEBAL çıktıları.....	43
Çizelge 4.6. Bakırköy arazisi 18 Ağustos 2020 PySEBAL çıktıları.....	44
Çizelge 4.7. Tepecik arazisi 15 Haziran 2020 PySEBAL çıktıları .....	45
Çizelge 4.8. Tepecik arazisi 17 Temmuz 2020 PySEBAL çıktıları.....	46
Çizelge 4.9. Tepecik arazisi 18 Ağustos 2020 PySEBAL çıktıları.....	47
Çizelge 4.10. Yeşilova arazisi 15 Haziran 2020 PySEBAL çıktıları.....	48
Çizelge 4.11. Yeşilova arazisi 17 Temmuz 2020 PySEBAL çıktıları .....	49
Çizelge 4.12. Yeşilova arazisi 18 Ağustos 2020 PySEBAL çıktıları .....	50

## 1. GİRİŞ

Su; yeryüzündeki tüm canlılar için hayati önem taşıyan doğal ve sınırlı bir kaynaktır. Tarih boyunca medeniyetlerin inşası ve gelişmesi suyun varlığı ile mümkün olmuştur. Mevcut su varlığı, kendisini hidrolojik döngü içerisinde yenileyebilmesine rağmen; sınırlı bir kaynaktır ve yönetilmesi gerekmektedir.

Son yüzyılda, özellikle de su kıtlığının gerçekleştiği koşullarda; suyun tasarrufu, verimliliği ve yönetimi üzerine çok sayıda araştırma yapılmış; suyun nasıl daha etkili ve verimli kullanılabileceğine cevaplar aranmıştır. Hatta henüz yeryüzünde kullanılmayan suların, kullanılabilmesinin yolları araştırılmıştır.

Ülkemizde ve dünya genelinde tarımsal sulama, su kullanımında büyük paya sahiptir. Birleşmiş Milletler Dünya Gıda ve Tarım Örgütü (FAO) verilerine göre; “Küresel olarak Dünya su kaynaklarının yaklaşık %70’i tarım amaçlı kullanılmaktadır. Bunu %19 ile sanayi ve %11 ile evsel kullanım izlemektedir” (FAO Aquastat, 2013).

Bu oranlar göze alındığında, tarımsal amaçlı gerçekleştirilecek bir sulama yönetimi programı; ister bölgesel, ister havza bazında olsun hedeflerine ulaştığında mevcut suyun kullanılabilirliğine dair önemli farklar oluşturacaktır. Bu noktada suyun tarımsal amaçlı kullanımı araştırma yapılması gereken önemli bir konudur.

Suyun yeryüzündeki dağılımı değerlendirildiğinde kullanımımızda olan suyun Dünya’daki mevcudunun çok küçük bir bölümü olduğu görülür.

Yerkürenin %70’i sularla kaplı olduğu halde; su kaynaklarının %96,5’ini okyanuslar, %1’ini diğer tuzlu sular ve %2,5’ini tatlı sular oluşturur.

Tatlı suyun ise %68,7’lik kısmı buzullarda, %30,1’i yeraltında bulunmaktadır.

Kalan %1,2’lik kısım tatlı suyun; %69’u toprak altında donmuş halde, %20,6 göllerde, %2,6’sı bataklıklarda, %0,49’u nehirlerde, %3,8’i nem olarak toprakta, %0,26’i biyotada, ve kalan %3’ü atmosferde yer almaktadır (Ek 1: Dünya’nın Suyu Nerede, USGS).

Dolayısıyla Dünya'daki 1,4 milyar km<sup>3</sup> mevcut suyun ancak %0,1'i doğrudan kullanımımızdadır. Dünya'daki tüm yeraltı sularının mevcuda oranı ise %0,75'tir. Okyanus suları doğrudan kullanımımızda olmasa da hidrolojik döngü içerisinde etkisi yadsınamaz.

Suyun ülkeler bazında kullanımı değerlendirildiğinde gelişmişlik düzeyi ile orantılı olduğu görülür. Az gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerde suyun tarımsal amaçlı kullanımı yaklaşık %82 iken, gelişmiş ülkelerde bu oran %30'lara kadar düşmektedir (World Water Assessment Programme [WWAP], 2003). Gelir düzeyi yüksek ülkelerde tarımsal su kullanımının yerini sanayi sektörü almaktadır (Ek 2: Dünya'da Suyun Kullanım Alanları).

Günümüzde ülkemizde ise su kullanımının %71,5 tarımsal amaçlı, % 17,8 endüstriyel ve %10,7 evsel amaçlı olduğu görülmektedir (Türkiye İstatistik Kurumu [TÜİK], 2018).

Ülkeler bazındaki su miktarı nüfusla orantılı olarak kişi başına düşen su miktarı olarak hesaplanmaktadır.

Su kıtlığı veya stres durumunu tanımlamak için kullanılan Falkenmark indeksi su kıtlığı/stres durumunu, ülke veya bölge için kişi başına düşen su miktarına göre şu şekilde sınıflandırmıştır (Falkenmark ve Lindh, 1976):

- Kişi başına 1.700 m<sup>3</sup> 'ten fazla su düşmesi durumunda su sorunu olmayan,
- Kişi başı 1.700-1.000 m<sup>3</sup> arası su miktarında su sıkıntısı olan,
- Su olanağı 1.000-500 m<sup>3</sup> arasında olduğunda su kıtlığı olan,
- 500 m<sup>3</sup> 'ten az su bulunması durumunda ise mutlak su kıtlığı olan.

Bu sınıflandırmaya göre Türkiye; 112 km<sup>3</sup> mevcut su potansiyeli ve kişi başına düşen yaklaşık 1500 m<sup>3</sup> kullanılabilir su miktarı ile su sıkıntısı olan bir ülke durumundadır ve yakın gelecekte gerekli önlemler yerine getirilmediği takdirde su kıtlığı olan bir ülke olma riskiyle karşı karşıyadır.

“Bu nedenle, mevcut su kaynaklarının korunması, alternatif su kaynaklarının geliştirilmesi, ekolojik çevre ile uyumlu teknolojilerin kullanımı ve yaygınlaştırılması, sürdürülebilir su politikalarının oluşturulması açısından büyük öneme sahiptir” (Kalkınma Bakanlığı, 2018).

Ülkemizde su kaynaklarının geliştirilmesi ve yönetimi için özel ihtisas komisyonları oluşturulmuş, dönemsel kalkınma hedefleri belirlenmiştir. Tarımsal Araştırmalar ve Politikalar Genel Müdürlüğüne (TAGEM), uzmanlar tarafından her coğrafi bölgeye ait, farklı tarımsal ürünler için bitki su tüketimi rehberleri hazırlanmıştır. Bu rehberlere göre bitkilerin gelişim dönemleri boyunca ihtiyacı olan sulama suyu miktarları belirlenmiş, önemli bir girdi olan evapotranspirasyon değerleri hesaplanmıştır.

Evapotranspirasyon (ET) kısaca; bitkinin yaprakları, gövdesi gibi toprak üstü aksamından terleme (transpirasyon) yoluyla ve toprak yüzeyinden buharlaşma (evaporasyon) yoluyla atmosfere ulaşan toplam su miktarıdır. Bölgeler bazında hesaplanan referans evapotranspirasyon (ET<sub>o</sub>) değerleri yetiştiriciliği yapılan bitkinin kendi özellikleri gereğince bir kc katsayısı ile çarpılır, bitki su tüketimi (ET<sub>c</sub>) değerleri elde edilir.

Evapotranspirasyonun belirlenmesi için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Bu yöntemlerden başlıcaları Penman, Penman-Monteith, Pan Evaporation, Kimberly-Penman, Priestley-Taylor, Hargreaves, Samani-Hargreaves ve Blaney-Criddle olarak sıralanabilir. Yöntemlerden bazıları çok sayıda iklim verisi kullanımını gerektirirken, bazıları ise az sayıda iklim parametresine ihtiyaç duymaktadır. Yöntemlerden bir kısmı verilerin yetersiz veya kısıtlı olduğu koşullara yönelik geliştirilmiştir. Modellerde kullanılan veri sayısına bağlı olarak doğruluk düzeyleri farklılık göstermektedir (TAGEM, 2017).

Günümüzde ise gelişen coğrafi bilgi sistemleri ve uzaktan algılama teknolojileri vasıtasıyla noktasal örnekleme yapmaya gerek kalmadan daha az masraf ve enerjiyle bu veriler ölçülebilmektedir.

Bunlardan biri olan Arazi için Yüzey Enerji Dengesi Algoritması (SEBAL) ile evapotranspirasyon, biyokütle ve vejetasyon değerlerinin hesaplanması sağlanmıştır.



Bastiaanssen ve ark (1998) tarafından geliştirilen SEBAL modeli çok kanallı uydu görüntülerinden gerçek evapotranspirasyon değerlerinin haritalanmasını sağlayan bir görüntü işleme tekniğidir (Bastiaanssen vd., 1998a). Bu teknik, temel enerji dengesi eşitliğine ait bileşenlerinin çözümünden, gerçek evapotranspirasyonu hesaplamaktadır. SEBAL modelinin bir diğer avantajı toprak veya arazi kullanımına dair detaylı bilgilere ihtiyaç duymamasıdır (Atasever, 2016).

Uygulamanın 2002 yılında, ileri düzey uygulama rehberi ve kullanım kılavuzu yayımlanmıştır. Model yirmi yılı aşkın bir süredir kullanılmakta ve sonradan geliştirilen muadillerine göre daha hassas, doğruluğu kanıtlanmış veriler sunmaktadır.

Birçok araştırmaya konu olan SEBAL uzaktan algılama modeli ile evapotranspirasyonun belirlenmesi tezin ana konusu oluşturur. Çalışmada kapsamında SEBAL modeli python uygulaması (PySEBAL) kullanılmış, belirlenen arazilerde yaz aylarına ait günlük gerçek evapotranspirasyon (ET<sub>a</sub>) değerleri hesaplanmıştır.

## **2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI**

### **2.1. Bitkiler için Sulama Suyu İhtiyacı ve Evapotranspirasyon**

Sulama, kültür bitkilerinin doğal yağışlarla karşılanamayan su ihtiyacının istenilen zamanda, istenilen miktarda ve kalitede, uygun yöntemlerle bitki kök bölgesine verilmesi olarak tanımlanmaktadır (Güngör vd., 2012).

Bitkiler, suyu kökleri vasıtasıyla topraktan alır. Bu emilim herhangi bir metabolik enerjiye gerek olmadan, osmotik kuralların etkisiyle gerçekleşir. Toprakтан alınan su ile suda erimiş haldeki besin maddeleri de bitki bünyesine geçer. Bu materyaller, hücre sel faaliyetlerde ve organik bileşiklerin sentezlenmesinde kullanılır.

Bitkiler topraktan aldıkları suyun çok küçük bir bölümü kullanırlar. Büyük bölümü ise terleme ile atmosfere geri verilmektedir. Kaynaklarda İngilizce karşılığı ile (transpirasyon) verilen terleme olayının gerçekleşmesi, enerjiye, buhar basıncı eğimine ve rüzgara dayanmaktadır. Buna ek olarak toprak su kapsamı, tuzluluk, toprağın su tutma kapasitesi ve köklerin suya ulaşma durumu gibi diğer bazı faktörler de terleme üzerinde etkilidir. Ayrıca terleme; tarımsal uygulamalar, bitki koşulları, bitki özellikleri, bitkinin gelişme ve/veya fenolojik dönemi ile diğer çevresel faktörlerin de etkisi altındadır.

Toprak su ilişkilerindeki bir başka durum, arazideki suyun buharlaşarak atmosfere geri ulaşmasıdır. Bu olay yine kaynaklarda İngilizce karşılığıyla (evaporasyon) yer almıştır. Suyun, bitki örtüsü dışındaki yüzeylerden buharlaşma yoluyla ve bitki yüzeylerinden terleme yoluyla atmosfere ulaşan toplam miktarı, evapotranspirasyon (ET) olarak nitelendirilmiştir. ET su döngüsünün temel bir bileşenidir ve hidrolojik çevrim için oldukça önemlidir.

Sulama sistemleri için en önemli hedef, elde edilen ürünün ve dolayısıyla gelirin artırılmasıdır. Ürün verimi, bitki su tüketim (evapotranspirasyon) miktarı ile doğrudan ilişkilidir. Daha fazla sulama yaparak fizyolojik bir sınıra kadar daha fazla verim elde edilebilir (Bastiaanssen vd., 1999).

Bitkilerin bulunduğu ortamlarda buharlaşma ve terleme eş zamanlı olarak gerçekleşmektedir ve hesaplamada bunları ayırt etmenin kolay bir yolu bulunmamaktadır.

Bitkilerin henüz toprak yüzeyini kaplamadığı alanlarda evaporasyon ile kayıp edilen su transpirasyona göre daha fazla iken, toprak yüzeyinin bitkilerle kaplandığı alanlarda transpirasyon ile kaybedilen su, evaporasyondan çok daha fazladır. Ayrıca evaporasyon ile toprağın yüzeye yakın kısımlardan su kaybı yaşanırken, transpirasyon ile bitkilerin etkili kök derinliği seviyesinde tutulan su atmosfere ulaşabilmektedir. Sonuç olarak evaporasyon ve transpirasyon ile atmosfere kayıp edilen su miktarı toplam değer cinsinden ET olarak değerlendirilmektedir. Bitki su tüketimi genel olarak belirli bir zaman dilimi için “mm” cinsinden ifade edilmektedir (TAGEM, 2017).

Bitki su tüketimi için üç farklı evapotranspirasyon kavramı kullanılmıştır.

- Kısa boylu bitkiyi esas alan referans bitki su tüketimi ( $ET_0$  ;  $ET_{ref}$ ),
- Bitki su tüketimi ( $ET_c$ ).

Referans bitki su tüketiminin bir  $K_c$  bitki katsayısıyla çarpımından elde edilir.

$$ET_c = ET_0 \times K_c \quad (2.1)$$

- Gerçek bitki su tüketimi ( $ET_a$ ).

Bunlar dışında kaynaklarda potansiyel bitki su tüketimi ( $ET_{pot}$ ) ve bağıl bitki su tüketimi ( $ET_{rel}$ ; relativ evapotranspiration) kavramları yer almaktadır.

Potansiyel su tüketiminin farklı bölgelerde farklı manalarda kullanılmasından ötürü standart bir tanımı yapılamamış, bunun yerine Referans Bitki Su Tüketimi ( $ET_0$ ) kavramının kullanımı yaygınlık kazanmıştır.

“ $ET_0$ ; egemen iklimsel koşullarda yetişen ve yeterli düzeyde sulanan, sağlıklı büyüyen, toprağı tamamen gölgeleyen, 12 cm yüksekliğinde ve taç aerodinamik direnci 70 s/m olan çim bitkisinden, albedonun 0,23 olduğu şartlarda gerçekleşen maksimum evapotranspirasyondur” (Güngör ve Yıldırım, 1989).

ET<sub>c</sub>, bir bitkinin ele alınan bir dönem için, herhangi bir hastalık zararlı etkisinin bulunmadığı, bitki besin elementi bakımından eksiklik çekmediği ve su stresi olmadığı standart koşullar altındaki su tüketimidir. Çim bitkisi için ET<sub>o</sub> ve ET<sub>c</sub> birbirine eşittir.

ET<sub>a</sub>, bir bitkinin ele alınan bir dönem için, standart olarak tanımlanan koşullardan farklı bir ortamdaki su tüketimidir. Buna göre ET<sub>a</sub> standart koşullarda ET<sub>c</sub>' ye eşit olabileceken, standart olmayan koşullarda daima ET<sub>c</sub>'den daha düşüktür.

ET<sub>rel</sub> (bağıl evapotranspirasyon), ise bitki su tüketim oranı olarak tanımlanmıştır ve ET<sub>a</sub>'nın ET<sub>o</sub>'a oranıdır. Sulama suyunun tedarik amacı, bitki su talebinin karşılanmasıdır. Başka bir deyişle, bitki su ihtiyacını (ET<sub>a</sub>) karşılamak için, önce iklime bağlı referans evapotranspirasyonun (ET<sub>o</sub>) karşılanması gerekir. ET<sub>rel</sub>'in aldığı değer eşiği, bitki üzerindeki su stres etkilerini önlemek için sulama suyu sağlama göstergesi olarak tanımlanabilir. Böylelikle ET<sub>rel</sub>, bitki su stresi endeksi (CWSI) ile ilişkilendirilmiştir.

$$ET_{rel} = \frac{ET_a}{ET_o} = 1 - CWSI \quad (2.2)$$

Bitki katsayısı (K<sub>c</sub>), standart koşullardaki bitki su tüketiminin (ET<sub>c</sub>), referans bitki su tüketimine (ET<sub>o</sub>) oranıdır. Bitki su tüketimi tahmininde K<sub>c</sub>' nin kullanımı veya K<sub>c</sub> yaklaşımı, ilk olarak Jensen (1968) tarafından önerilmiş, daha sonra diğer araştırmacılar tarafından bu yaklaşım geliştirmiştir (Doorenbos ve Pruitt, 1975, 1977; Burman vd., 1980a, Burman vd., 1980b; Allen vd., 1998).

Bitki su tüketimi, bitki ve toprağın karakteristik özelliklerinden etkilenmektedir. Referans bitkiden, ele alınan bitkinin boyu (ısı ve buhar taşınımını etkileyen bitki aerodinamik direnci), su kaybına karşı bitki-toprak direnci (bitkinin stomal özellikleri ve toprak tekstürü) ve toprak albedosu farklıdır ve bu yöntem FAO-56'da güncellenmiştir (Allen vd. 1998). Bu yaklaşımda, referans bitki olarak çim ve Penman-Monteith kombinasyon yöntemi kullanılmaktadır. FAO-56'da tekil K<sub>c</sub> ve ikili K<sub>c</sub> kullanımı önerilmiştir. Tekil K<sub>c</sub> ile bitkiden ve topraktan olan buharlaşma bir arada hesaplanırken, ikili K<sub>c</sub> ile bu buharlaşma oranları ayrı ayrı hesaplanmaktadır. İkili K<sub>c</sub> ile günlük ET<sub>c</sub> nin daha doğrulukta hesaplandığı belirtilmiştir. (Tolk, 2000).

FAO ve Dünya Meteoroloji Teşkilatı, bitkinin farklı gelişim dönemlerinde bitki katsayısını tanımlamak için bitki katsayısı grafiğini geliştirmiştir. Bitki katsayısını gösteren bu grafikte bitkinin başlangıç, orta ve son dönemleri esas alınmıştır (Tarantino ve Spano, 2001). Kc değerleri bitkinin ilk ekim-dikim zamanında en düşük düzeyde iken, tam gelişim gösterdiği dönemde ise en yüksek düzeye ulaşır ve ardından gelişim dönemi sonuna doğru azalma gösterir. Bu azalma bitkinin özellikleri ve son dönemdeki sulama yönetimine göre değişkenlik göstermektedir (Jensen vd., 1990; Allen vd., 1998).

Bitki su tüketimi günlük, haftalık, 10 günlük sürelerde hesaplanabildiği gibi aylık ve yıllık olarak da hesaplanabilir. Kısa süreli tüketim değerleri sulama aralığının planlanmasında kullanılırken, uzun süreli bitki su tüketim değerlerinden ise sulama projelerinin hazırlanmasında gerekli olan ortalama bitki su tüketiminin belirlenmesinde faydalanılmaktadır. Bu nedenle sulama projelerinin doğru planlanması ve işletilmesi, bitkilerin uzun-kısa dönemlere ait bitki su tüketimi miktarlarının doğru ölçülmesine bağlıdır (Jensen vd., 1990; Burman ve Pochop, 1994).

ET<sub>o</sub>'nun hesaplanabilmesi için gerekli olan asgari veriler hava sıcaklığı (T), bağıl nem (RH), güneş radyasyonu (Rs), atmosferik basınç (P) ve rüzgar (u) hızıdır. Hesaplanan ET<sub>o</sub> değerinin doğruluğu bütünüyle kullanılan iklim verilerinin kalitesine dayanmaktadır. En doğru sonucun elde edilebilmesi için bu iklim elemanlarının, zemini bitki ile kaplı (tercihen bakımlı çim bitkisi) meteoroloji istasyonlarında ölçülmüş olması gereklidir.

ET, hidrolojik döngü içerisinde önemli bir su bütçesi bileşenidir ve kara yüzeyleri ile atmosfer arasında kütle ve enerji alışverişinden sorumludur. ET ile toplam karasal yağışların %60-75'i atmosfere geri dönmektedir. Belirli bir bölge için bilinen ET kayıpları hidrolojik, tarımsal ve çevresel sistemlerin tasarımında ve geliştirilmesinde kullanılmaktadır (Senay vd., 2013).

Su kaynakları yönetiminde başarı sağlanması bir bakıma tarımsal suyun etkin yönetimine bağlıdır. Tarım için kullanılacak suyun doğru şekilde yönetilmesi, sulu tarım yapılan bölgelerde arazi toplulaştırması, sulama ve drenaj gibi alt yapı

sistemlerinin inşası ve bu sistemlerin doğru biçimde işletilmesi ile mümkün olmaktadır. Sulama ve drenaj sistemlerinin projelendirilmesi ve işletilmesi, kuraklığın izlenmesi ve çeşitli amaçlar doğrultusunda oluşturulan birçok hidrolojik model için en temel veri bitki su tüketimidir (ET<sub>c</sub>) (Burman ve Pochop, 1994; Akpolat, 2011).

İklim verilerine dayalı günlük bitki su tüketimi ve buna bağlı olarak sulama suyu ihtiyacının belirlenebilmesi için, yerel düzeyde ve saatlik olarak ölçülen hava sıcaklığı, oransal nem, rüzgâr hızı, yağış ve solar radyasyon parametrelerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu parametreler ülkemizde daha çok bölge ve şehir düzeyinde ölçülmektedir. Fakat tarımsal amaçlı bitkisel üretim faaliyetleri daha çok yerel düzeydeki kırsal alanlarda yürütülmektedir. Bu nedenle, yerel düzeyde iklim parametrelerinin ölçülebilmesi için tarımsal amaçlı portatif iklim istasyonlarının kullanımı zorunlu hale gelmektedir. Bu iklim istasyonları, iklim parametrelerini ölçmenin yanında referans bitki su tüketimini de hesaplayabilmektedir (Şarlı, 2019).

Sudan ve faydalarından azami derecede istifade için bölge koşullarının iklim ve topoğrafya yapısına uygun yöntemlerle bitki su tüketim miktarları belirlenmelidir.

Yarı kurak ve kurak bölgelerde evapotranspirasyon, sulama ve uygun su yönetimi için oldukça önemlidir. İklim değişikliği, su talebinde yaşanan artış ve su kıtlığından dolayı suyun muhafazası giderek daha fazla önem kazanmıştır. Sınırlı olan su kaynaklarından sürdürülebilir biçimde istifade etmenin birinci yolu sulama programlamasından geçmektedir. Sulama programı oluşturmada temel soru; suyun bitkiye ne zaman ve ne miktarda verilmesi gerektiğidir. Bu kararların verilmesi tarla koşullarındaki bitki su tüketimi verilerinin bilinmesi ile mümkündür. Bitki su tüketimi sadece tarımın bir girdisi olmakla kalmayıp; çok amaçlı projelerin planlanması, yapımı ve işletilmesi için de önemli bir kavram olmuştur (Burman ve Pochop, 1994; Akpolat, 2011).

## **2.2. İklim Verileri ile Evapotranspirasyonun Belirlenmesi**

Bitki Su Tüketimi - ET<sub>c</sub> iklim bölgelerine, bitki türüne, bitkinin vejetasyon süresi uzunluğuna ve tarımsal uygulamalara göre önemli farklılıklar gösterebilmektedir. ET<sub>c</sub>'nin doğruya en yakın bir biçimde tahmin edilebilmesi için bitki, toprak ve iklim özelliklerine dayalı olarak su bütçesi tekniğini esas alan matematiksel yöntemler

geliştirilmiştir. Penman Monteith, Pan Evaporation, Hargreaves-Samani ve Blaney Criddle yöntemi bu yöntemlerin başlıcalarıdır. (Özer, 1993; Kanber vd., 2007; Lazzara ve Rana, 2010; Pereira vd., 2015).

Bu yöntemlere ilave olarak Kimberly Penman, Turc, Christiansen, FAO 24 Radiation, Jensen-Heise, Priestley-Taylor, Thornthwaite, Romanenko, Schendel ve Linacre yöntemleri geliştirilmiş ve uygulanmıştır.

Genel olarak hesaplamalarda izlenen yol, ilk önce belirli koşulları yansıtan çim veya yonca bitkileri için referans bitki su tüketimini ( $ET_o$ ) tahmin etmek ve daha sonra bu değerin bitki katsayısı ( $k_c$ ) ile düzeltilerek bitki su tüketiminin belirlenmesidir (Jensen, 1974; Doorenbos ve Pruitt, 1977).

### **2.2.1. Penman-Monteith Yöntemi**

Uçak ve ark. (2013) evapotranspirasyonu doğrudan etkileyen iklim parametrelerini sıcaklık, yağış, rüzgar hızı ve bağıl nem olarak belirtmişlerdir. Evapotranspirasyon hesaplamasında kullanılan bir çok yöntem olmakla birlikte Kaya (2011), Smith (1996), Demirtaş ve ark. (2007), Ünlükara ve ark. (2010) yaptıkları çalışmalarda iklim verilerine dayalı en iyi bitki su tüketimi hesap yönteminin Penman-Monteith eşitliği olduğunu tespit etmişlerdir.

Penman, 1948 yılında iklim değerleri (güneşlenme, sıcaklık, nem ve rüzgâr hızı) kayıtlarını ele alarak açık su yüzeyinden buharlaşma formülünü geliştirmiştir. Bu yöntem Monteith tarafından 1976'da aerodinamik ve yüzey direnci faktörleri eklenerek bitkiler için daha da geliştirilmiş, 1990 yılında ise FAO tarafından bir araya getirilen uzmanlar FAO Penman-Monteith yöntemini ortaya koymuşlardır. Bu yöntem farklı ülkelerde farklı şekillerde isimlendirilmiş, potansiyel su tüketiminin ( $ET_r$ ), yerine referans bitki su tüketimi ( $ET_o$ ) kavramı kullanılmasıyla FAO-56 Penman Monteith adıyla genel geçer hale gelmiştir.

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 u_2)} \quad (2.3)$$

Formülde:

$ET_0$ ; mahsul yüzeyindeki referans evapotranspirasyonu [ $\text{mm gün}^{-1}$ ],

$R_n$ ; net radyasyonu [ $\text{MJ m}^{-2} \text{gün}^{-1}$ ],

$G$ ; toprak ısı akısı yoğunluğunu [ $\text{MJ m}^{-2} \text{gün}^{-1}$ ],

$T$ ; 2 m yükseklikte ortalama günlük hava sıcaklığını [ $^{\circ} \text{C}$ ],

$u_2$ ; 2 m yükseklikte rüzgar hızını [ $\text{ms}^{-1}$ ],

$e_s$ ; doymuş buhar basıncını [kPa],

$e_a$ ; gerçek buhar basıncını [kPa],

$e_s - e_a$ ; doymuşluk buhar basıncı açığı [kPa],

$\Delta$ ; buhar basıncı eğrisinin eğimini [ $\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$ ],

$\gamma$ ; psikrometrik sabitini [ $\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$ ] ifade etmektedir.

FAO-56 Penman-Monteith yöntemi; sulama programı hazırlanacak bitkinin, bitki büyüme katsayısının ( $k_c$ ) çim veya yoncanın yukarıda verilen iklim parametrelerine bağlı olarak belirlenen referans bitki su tüketimi değeri ( $ET_0$ ) ile çarpılarak bitki su tüketiminin ( $ET$ ) elde edilmesi esasına dayanmaktadır. Bitki büyüme katsayısı, bitkinin büyüme mevsimi boyunca farklı değerler almaktadır. Su tüketimi belirlenecek bitkinin boyu ve su kaybına karşı bitki-toprak direnci kıyas bitkiden farklı olmaktadır. Bu farklılıkların da dikkate alındığı, en gerçekçi su tüketimi tahminlerinin yapılmasını sağlayan Penman-Monteith eşitliği FAO-56 modifikasyonu FAO tarafından 1998 yılında 56 sayılı Sulama ve Drenaj Yayını ile uygulanmaya başlanmıştır (Allen vd., 1994; İlhan ve Utku, 1998; ASCE-EWRI, 2004; Koç ve Güner, 2005; Çetin vd., 2014).

### 2.2.2. Blaney-Criddle Yöntemi

Blaney-Criddle denklemi, evapotranspirasyonun hesaplanması için nispeten basit bir yöntemdir. Yeterli meteorolojik veri mevcut olduğunda, genellikle Penman-Monteith denklemi tercih edilir. Bununla birlikte, Blaney-Criddle denklemi, bir bölge için yalnızca hava sıcaklığı veri kümeleri mevcut olduğunda idealdir.



Blaney-Criddle denkleminin kaba doğruluğu göz önüne alındığında, bir aylık veya daha uzun süreler için evapotranspirasyonu hesaplamak için kullanılması tavsiye edilir.

Denklem , 8–15 cm yüksekliğinde aktif olarak büyüyen yeşil çimen olarak alınan bir referans mahsul için evapotranspirasyon hesaplar.

Blaney-Criddle formülü:

$$ET_0 = p (0,46 x T_{ort} + 8) \quad (2.4)$$

ET<sub>0</sub>; 1 aylık bir süre için ortalama olarak referans ürün evapotranspirasyonu (mm/gün)

T<sub>ort</sub>; ortalama günlük sıcaklık (°C),

p; yıllık gündüz saatlerinin ortalama günlük yüzdesidir.

Blaney-Criddle formülünün kullanımı için;

Adım 1: Günlük ortalama sıcaklık (T<sub>ort</sub>) değerleri belirlenir.

Yöntemde sıcaklık ve ET<sub>0</sub> ortalama aylık değerleri ifade eder. Örneğin, Mart ayında T ortalamasının 28°C olduğu bulunursa, bu, Mart ayı boyunca ortalama günlük sıcaklığın 28°C olduğu anlamına gelir.

Yerel bir meteoroloji istasyonunda günlük minimum ve maksimum sıcaklıklar ölçülürse, ortalama günlük sıcaklık şu şekilde hesaplanır:

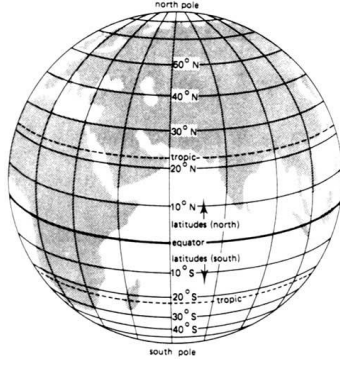
$$T_{max} = \frac{\text{Ay boyunca tüm maksimum sıcaklık değerlerinin toplamı}}{\text{ayın gün sayısı}} \quad (2.5)$$

$$T_{min} = \frac{\text{Ay boyunca tüm minimum sıcaklık değerlerinin toplamı}}{\text{ayın gün sayısı}} \quad (2.6)$$

$$T_{ort} = \frac{T_{max} + T_{min}}{2} \quad (2.7)$$

Adım 2 : Yıllık gündüz saatlerinin günlük ortalama yüzdesi (p) belirlenir.

p değerini belirlemek için FAO'nun belirttiği tablo kullanılır. p değerini belirleyebilmek için, alanın yaklaşık enlemini bilmek önemlidir. Ekvatorun kuzey veya güneyindeki derecelerin sayısı Şekil 2.1.'de verilmiştir.



**Şekil 2.1.** Yeryüzü enlem konumları

45° Güney enlemine sahip bir alan için Mart ayı için p değerinin belirlenmesi gerektiğini varsayıldığında ilgili tablodan Mart ayı boyunca p değerinin = 0,28 olduğu görülür.

ETo hesabı ;

$$ETo = p (0,46 T_{ort} + 8)$$

Örneğin, p = 0,29 ve T ort = 21,5°C olduğunda, ETo aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$ETo = 0,29 (0,46 \times 21,5 + 8) = 0,29 (9,89 + 8) = 0,29 \times 17,89 = 5,2 \text{ mm/gün}$$

### **2.3. Uzaktan Algılama ile Evapotranspirasyon Tahmini**

Sulama suyu yönetimi; bitkisel faktörlerin haricinde iklim ve toprak gibi ekolojik girdileri barındıran karmaşık bir sistemdir. Bir bitkinin yetiştirme döneminde ne kadar su tükettiğinin (ET<sub>c</sub>) bilinmesi ve sulama zamanı ile miktarının planlanması amacıyla birçok yöntem geliştirilmiştir. Son dönemlerde bitki izlemeye dayalı yöntemlerden uzaktan algılama teknikleri ön planda yer almaktadır (Köksal, 2007).

Uzaktan algılama, 1960'lı yıllarda gelişmeye başlamış, başlangıcından bu yana tarımın, uzaktan algılanmış verilerin kullanımı için uygun bir sektör olduğu düşünülmüştür (Jackson, 1984). Son kırk yılda yapılan araştırmalar, tarımsal sistemlerin yönetiminde gerekli bilgilerin birçoğunun, çeşitli uzaktan algılayıcı sensörler vasıtasıyla elde edildiğini göstermektedir (Köksal, 2007).

Uzaktan algılama teknolojileri; küresel yer belirleme sistemi (GPS) alıcıları, bilgisayarlar, coğrafi bilgi sistemleri (CBS) ve bitki simülasyon modelleri ile

kullanıldığında tarımsal üretimde oldukça büyük bir potansiyele sahiptir (Pinter vd., 2003).

Uydu görüntülerinin işlenmesi işlemi olan uzaktan algılama, tarımsal üretimde bitki ve toprak koşullarındaki değişimlerin üretim sezonu boyunca gözlenmesine olanak sağlayan bir tekniktir ve her geçen gün giderek önem kazanmaktadır.

Geçmiş dönemlerde kullanılan araçlardan kaynaklı olarak, görüntülerin sabit spektral bantlarla algılanması, çözünürlüklerin düşük olması, görüntüleme periyotlarının ve görüntünün kullanıcıya ulaşma zamanının uzun olması gibi bazı kısıtlayıcı faktörlere sahip (Moran vd., 1997) olduğu bilinmektedir.

Günümüzde ise uydu teknolojilerinin gelişmesi ile bu sorunların büyük oranda aşılmış; karışık arazi örtüsü sınıflarına ait alanlarda ETa kayıplarının hesaplanabildiği, enerji dengesine dayalı modeller geliştirilmiştir. Bu modellere; Bastianassen ve ark. tarafından (1998) tarafından geliştirilen SEBAL (Arazi için Yüzey Enerji Dengesi Algoritması) modeli ve ilerleyen süreçte geliştirilen S-SEBI (Basitleştirilmiş Yüzey Enerji Dengesi Endeksi), SEBS (Yüzey Enerji Dengesi Sistemi), METRIC (İçselleştirilmiş Kalibrasyon ile Yüksek Çözünürlükte Evapotranspirasyonu Haritalama), SSEBop (Operasyonel Basitleştirilmiş Yüzey Enerji Dengesi), TSEB (Norman vd., 2000), Alexi (Anderson vd., 2007) ve ETWatch (Wu vd., 2012) modelleri örnek gösterilebilir. Uzaktan algılama teknolojileri ve enerji dengesine dayanan bu modeller ETa tahmini için kabul edilebilir doğrulukta ve yinelenabilir ölçümler sağlamaktadır.

Enerji dengesine dayanan modeller, evapotranspirasyonun (ET) konumsal ve zamansal olarak haritalanmasına imkan vermektedir. Modellerin çalışma biçimi vejetasyona bağlı olan çeşitli göstergelerin (NDVI, SAVI, YAI ve albedo) kullanımı ile enerji dengesi bileşenleri olan net radyasyon ( $R_n$ ), toprak ısı akısı ( $G$ ), hissedilir ısı akısı ( $H$ ) ve gizli ısı akısının ( $\lambda E$ ) ayrı ayrı tahmin edilip haritalanması şeklindedir (Bastiaanssen vd., 1998a; 1998b; Allen vd., 2005; 2007; Kjaersgaard vd., 2009).

Yüzey enerji dengesi bileşenlerinin bir bölümü UA ile tespit edilebilmektedir. Özellikle yüzey sıcaklığının UA ile tespiti, yüzey enerji dengesinden bitki ve topraktan meydana

gelen buharlaşmanın zamansal ve mekansal olarak ölçülmesinde imkan sağlamaktadır (Brown ve Rosenberg, 1973; Stone ve Horton, 1974; Hatfield vd., 1984; Seguin vd., 1994). Ayrıca, yapılan araştırmalar bitki katsayısı ( $K_c$ ) ile spektral vejetasyon indeksleri arasında önemli istatistiksel ilişki olduğunu göstermiştir (Fitzgerald vd., 2003; Hunsaker vd., 2003a; Hunsaker vd., 2003b). Uzaktan algılanmış verilere göre bitkinin su stresinin tespiti için çeşitli stres ve vejetasyon indeksleri geliştirilmiştir (Jackson vd., 1977; Jackson vd., 1980; Idso vd., 1990; Kustas ve Daughtry, 1990; Moran vd., 1994; Penuelas vd., 1994; Alves ve Pereira, 2000; Kimura vd., 2004). Bu sayede bitkinin ihtiyacı olan su miktarı ve sulama dönemi belirlenebilmektedir.

Uzaktan algılamada tarla düzeyinde veri elde edilirken el radyometreleri kullanılmakta, geniş alanlarda ise belirli frekanslarda ölçüm yeteneği olan hava düzeneği ve uydular kullanılmaktadır. Bu nedenle, uzaktan algılanmış verilerle yüzey enerji dengesine dayalı  $ET_c$  hesaplamalarında en büyük problem, bir saniyelik zaman dilimine ait verilerin, bir gün ve hatta veri alma frekansı kadar zaman aralığı için kullanılmasıdır.

Uzaktan algılamaya dayalı bir başka ET hesabı ise METRIC modelidir. Enerji dengesine dayanan içsel kalibrasyon ile yüksek çözünürlükte evapotranspirasyon haritalama (METRIC) modeli ET belirlenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Allen vd., 2005). Model enerji dengesi bileşenleri olan net radyasyon ( $R_n$ ), toprak ısı akısı ( $G$ ), hissedilebilir ısı akısı ( $H$ ) ve gizli ısı akısı ( $\lambda E$ ) değerlerini ayrı ayrı tahminlemektedir. METRIC modelde  $H$  hesabı karmaşık biçimde içsel kalibrasyon ve iterasyon işlemlerini içermektedir. İçsel kalibrasyon işlemi uydu görüntüsünden seçimi yapılan sıcak, soğuk hücrelerin enerji dengesi bileşenlerine dairdir (Allen vd., 2005).

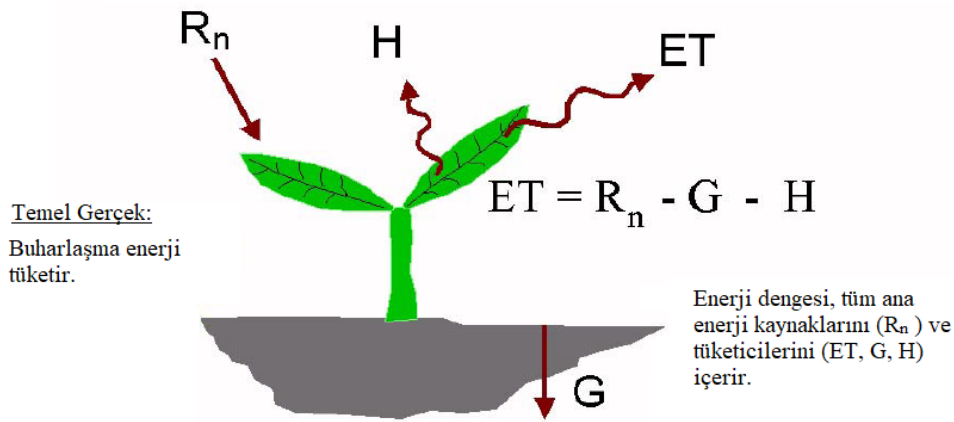
#### **2.4. Arazi için Yüzey Enerjisi Dengesi Algoritması (SEBAL)**

Evapotranspirasyon (ET); doğrudan ölçülerek ya da iklim verileri ve bitki parametreleri kullanılarak hesaplanabilmektedir (Kanber, 1997). Doğrudan ölçme işlemleri sağlıklı sonuç verebilir ancak; pahalı ve zaman alıcı yöntemlerdir. Bu nedenle, ET' nin iklim verileriyle belirlenmesi daha yaygındır (Güngör ve Yıldırım, 1989). Her iki yöntem kullanımında da ET' nin havza bazındaki ölçümü oldukça güçtür. Büyük alanlarda geleneksel yöntemlerle ET eldesinde en büyük sorun veri azlığı yaşanmasıdır. Bu tür

çalışmalarda küçük alanlarda elde edilen veriler aşamalı bir şekilde çalışmanın tamamı için kabul görmekte ve ET' nin alansal dağılımı tarafsız ölçülememektedir. Oysaki UA teknikleri, büyük alanlarda dahi yüksek mekansal çözünürlükte, tarafsız veriler sağlamaktadır (Bastiaanssen vd., 1999).

## Evapotranspirasyon için Enerji Dengesi

Evapotranspirasyon, enerji dengesinin "artığı" olarak hesaplanır.



**şekil 2.2.** Evapotranspirasyon için enerji dengesi denklemi (Waters vd., 2002)

Arazi için Yüzey Enerji Dengesi Algoritması (SEBAL, Surface Energy Balance Algorithm for Land) modeli, ET'nin UA tekniği ile eldesinde kullanılan etkili yöntemlerdendir. Modelle birlikte geleneksel yöntemlerde karşılaşılan ayrıntılı meteorolojik ölçümlerin ve bitki ile ilgili kapsamlı bilgilerin gerekliliği ortadan kalkmaktadır. Ayrıca çalışmalar küçük alanlarla kısıtlı kalmamakta havza bazına yayılabilmektedir. Modelin çözümde gerekli olan albedo, yüzey sıcaklığı ve vejetasyon indeksi değerleri UA tekniği ile elde edilmektedir (Bastiaanssen ve ark., 1998).

Bastiaanssen tarafından 2000 yılında gerçekleştirilen ve çalışma bölgesi Gediz Havzası olarak seçilen çalışmada bölgeye ait 26 Haziran 1998 ve 29 Ağustos 1998 günlerine ait uydu görüntüleri ile gerçek evapotranspirasyon miktarlarını hesaplamış ve havza boyutunda alanlar için SEBAL yöntemini önermiştir. 2007 yılında Kimura ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada Çin'e ait Loess Platosu'na ait günlük (24-h) *ETa* değerleri Landsat 5 verileri kullanılarak hesaplanmıştır. Evapotranspirasyon hesabı

için uzaktan algılama disiplini dünyanın birçok farklı bölgesinde kullanılmıştır. Kongo ve ark. (2011) tarafından Güney Afrika'nın Yukarı-Thukela Havzası'nda yapılan çalışmada 2005 Haziran ve 2006 Eylül tarihleri arasında MODIS uydusuna ait 28 görüntü kullanılarak arazi kullanım amacı farklı alanların evaporatif su kullanımı belirlenmiştir. Makalede mevsimlere göre farklılık gösteren buharlaşma miktarlarının değişimi izlenmiştir. 2011 yılında Sun ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada Çin'in Nansi Gölü Sulak alanlarında SEBAL yöntemi kullanılarak  $ET_a$  hesaplanmıştır. Landsat 7 ETM verilerinin kullanıldığı çalışmada günlük  $ET_a$  hesaplanmasında ortalama olarak %10.8'lik bir hata değeri elde edilmiş ve SEBAL yöntemi sulak alanların gerçek  $ET_a$  değerlerinin hesaplanması için önerilmiştir. Chemin ve arkadaşları (2004) tarafından yapılan uygulamada Özbekistan'ın Fergana iline ait  $ET_a$  değerleri uzaktan algılama verileri kullanılarak (SEBAL Yöntemi ile) hesaplanmıştır. NOAA/AVHRR verilerinin kullanıldığı çalışmada elde edilen  $ET_a$  değerleri direk ölçme yöntemleriyle karşılaştırılmış ve geniş alanlar için bu yöntemin kullanılabilceği gösterilmiştir. Kenya'da Yukarı Ewaso Ng'iro Kuzey Havzası'nda Mutiga ve ark. tarafından yapılan çalışmada 2000, 2003 ve 2006 yıllarındaki  $ET_a$  haritaları MODIS verileri kullanarak hesaplanmış ve FAO-56 yöntemi ile hesaplanan sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Bulgulara göre SEBAL yönteminin büyük alanlar için etkin bir yöntem olduğu belirtilmiştir. 2009 yılında Teixeira ve arkadaşları tarafından Brezilya'daki Sao Francisco Nehri Havzası'na ait  $ET_a$  değerleri SEBAL yöntemi kullanılarak bulunmuştur. Bu çalışmada SEBAL'in giriş parametrelerinin kalibrasyonu yapılmıştır. Jang ve arkadaşları tarafından 2010 yılında yapılan çalışmada, Kore'nin Gwangneung ve Haenam yerleşkeleri ile Japonya'nın Takayama Ormanı ve Tomakomai şehri içi  $ET_a$  hesaplaması MODIS verileri kullanarak yapılmıştır. Çalışma sonucu MODIS görüntüsünün çok büyük alanların  $ET_a$  değerlerinin hesaplanabilmesi için etkin olarak kullanılabilceği belirtilmiştir. Amerika'da, Batra ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, ABD'nin Büyük Güney Ovası Bölgesine ait  $ET_a$  değerleri uzaktan algılama verileri kullanarak hesaplanmıştır. Bu çalışmada MODIS ve AVHRR verileri kullanılmıştır. Çalışmanın temelinde klasik potansiyel ET hesaplama yöntemlerinden biri olan Priestley–Taylor Eşitliği ile uzaktan algılama verilerinin ilişkilendirilmesi (Yüzey sıcaklığı ve bitki indeksi ile) yatmaktadır. Yazarlar tarafından önerilen yöntemde büyük alanlara ait  $ET_a$  değerlerinin hesaplanması için uydu verilerinin

kullanılmasının gerekliliği vurgulanmıştır. 2008 yılında Sánchez ve arkadaşları tarafından İtalya'nın güneyinde Basilicata Bölgesinde yapılan çalışmada *ETa* hesaplamaları için Landsat 5 ve 7 uydu görüntüleri kullanılmıştır. Söz konusu bölge 9992 km<sup>2</sup> büyüklüğünde olmasından dolayı arazi örtüsü CORINE veri tabanından elde edilmiştir. İki Kaynaklı Enerji Dengesi (Two-Source Energy Balance - TSEB) metodunun tercih edildiği yöntemde günlük *ETa* değerlerini, yerel meteoroloji istasyonları ile yapılan kontrol ölçmelerine göre ortalama 1 mm/gün hata değeri ile elde etmişlerdir. 2008 yılında Singh ve arkadaşları tarafından Güney Nebraska'da yapılan çalışmada konuma ait gerçek evapotranspirasyon haritaları ve yüzey enerji akışları SEBAL yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır. Mayıs, Haziran, Temmuz, Ağustos ve Eylül aylarına ait Landsat 5 ve 7 uydu görüntülerinin kullanıldığı çalışmada yazarlar, ölçülmüş *ETa* değerleri ile SEBAL ile hesapladıkları değerler arasında %5 hata değeri olduğunu gözlemlemişler ve geniş alanlar için bu değer kabul edilebilir olduğunu belirtmişlerdir. *ETa* hesabının yüksek doğrulukla yapılabilmesi için en önemli etkenlerden biri araştırma alanına ait uydu görüntülerinin yüksek çözünürlüklü olmasıdır. Hafeez ve arkadaşları tarafından Filipinler'de yapılan çalışmada ülkenin en büyük pirinç üretiminin yapıldığı bölgelerden Luzon Bölgesinde, Terra ASTER, Landsat 7 ETM+ ve MODIS verilerini kullanarak SEBAL ile bölgenin *ETa* haritası üretilmiş ve doğrudan ölçümler ile uydu görüntülerinden elde edilen *ETa* değerleri karşılaştırılmıştır. Doğrudan ölçümler baz alındığında ortalama olarak Terra ASTER ile %9, Landsat 7 ETM+ ile %3 ve MODIS ile %13 sapmayla ET değerleri hesaplanmıştır. Çalışmanın sonucunda, çalışma alanının çok büyük olmaması durumunda Landsat ve ASTER kullanımının daha doğru sonuçlar vereceği vurgulanmıştır.

SEBAL sulama suyu tüketiminin belirlenmesinde de kullanılmaktadır. Hafeez ve Khan tarafından 2005 yılında yapılan çalışmada Çin'e ait Liuyuankou sulama sistemindeki su tüketiminin belirlenmesinde MODIS uydu görüntüsü ve SEBAL yöntemi tercih edilmiştir. Yöntemin kontrolü için *ETa* değerleri yersel ölçümler ile hesaplanmış ve SEBAL'in ürettiği sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Doğrudan ölçmelerle %5 civarında bir farklılık olduğu gözlemlenmiş ve büyük alanların *ETa* değerlerinin hesaplanmasında bu hata değerinin kabul edilebilir bir hata oranı olduğu vurgulanmıştır. Hafeez ve arkadaşları tarafından yapılan bir başka çalışmada Avustralya'daki Murrumbidgee

Havzası için *ETa* haritası SEBAL yöntemi kullanılarak üretilmiştir. NOAA-AVHRR, MODIS ve Landsat 5 TM verilerinin kullanıldığı çalışmada doğrudan ölçümlerle elde edilen değerlere en yakın sonucu Landsat verileri ile ulaşılmış ve yazarlar bu verinin kullanılmasını önermiştir.

Homojen olmayan büyük bölgelerde evapotranspirasyon hesabı oldukça önemli fakat zordur. Bu sebepten etkin bir yöntem seçmek hayati önem taşımaktadır. Guo ve arkadaşları Tibet Platosundaki *ETa* değerlerini hesaplamak için Landsat 7 ETM+ verilerini kullanmışlar ve homojen olmayan büyük alanlar için *ETa* hesabında uzaktan algılama verilerinin kullanılabilceğini göstermişlerdir.

Uzaktan algılama verileri ile evapotranspirasyonun ve büyük alanlar için su kaybının kabul edilebilir bir hata değeri ile hesaplanabilmesinden dolayı bu konuyla ilgili değişik çalışmalar IEEE tarafından desteklenen birçok sempozyumda sunulma imkanı bulmuştur. Jun ve arkadaşları tarafından 2006 yılında sunulan bildiriye, Çin'in Haihe Havzası'nda yapılan çalışmada yıllık *ETa* değerlerini hesaplamak için SEBAL yöntemini ve Landsat 5-7 verilerini kullandıklarını belirtmişlerdir. Çalışma sonucunda yıllık *ETa* değerlerini hidrolojik yöntemlere göre 2003 yılı için %10 fark ve 2004 yılı için %6 hata değeri ile bulmuşlardır. Bu hata değerlerinin, çalışma alanı yaklaşık 3177 ha olduğu için kabul edilebilir olduğu söylenebilir. 2001 yılında Allen ve arkadaşları tarafından ABD Idaho'daki Bear Riber Havzası'na ait 1985 yılı Temmuz, Ağustos, Eylül ve Ekim ayları için *ETa* değerlerini hesaplamış ve mevcut doğrudan ölçümlerle (lizimetre) üretilen sonuçları karşılaştırmışlardır. Sonuçta SEBAL yöntemi, lizimetre ölçümleri ile aylık bazda %16, sezonsal bazda %4 farkla *ETa* değerlerini hesaplamıştır. Aylık bazdaki bu farkın, kullanılan uydu görüntüsünün Landsat 5 olması dolayısıyla termal bandın uzaysal çözünürlüğünün 120 m olmasından kaynaklanmaktadır (Atasever, 2016).

Güneybatı Idaho'da Boise Vadisi'ne ait *ETa* değerlerinin hesaplanması için yapılan çalışmada tarımsal alanlarda günlük bazda ortalama 1.5 mm/gün hata değeri ile sonuçlar elde edilirken, kentsel alanlarda sezonsal *ETa* değerlerinde ortalama %15-20 sapma gözlemlenmiştir. Uydu görüntüsünün gözlemlendiği alan içinde tarımsal alanların artması genel doğruluğun artması için bir etken olabilmektedir. Dolayısıyla mevcut



arazi kullanımındaki değişimler, *ETa* değerlerinde önemli değişimlere sebebiyet verebilmektedirler. Chuansheng ve arkadaşları tarafından Çin'e ait Tarım Havzası'nda yapılan çalışmada, SEBAL ve Landsat ETM+ verileri kullanılarak arazi kullanımındaki değişimlerin gerçek evapotranspirasyon değerleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. NFBİ (NDVI) üzerinde değişimler olduğundan dolayı *ETa* değerlerinin SEBAL ile üretiminde önemli değişimler olduğu gözlemlenmiştir. Mingming ve arkadaşları 2011 yılında Çin'in Sarı Nehir Deltası'nda (Yellow River Delta) MODIS uydu görüntüsünü ve SEBAL yöntemini kullanarak yaptıkları çalışmada *ETa* değerlerinin zamansal ve konumsal değişimini incelemişlerdir.

Bitkilerin büyüme evresinde su açığının büyümeyi etkileyecek önemli bir etken olduğu düşünülürse, gerçek evapotranspirasyon değerinin mümkün olduğu kadar doğru hesaplanması önem taşımaktadır. Küçük alanlarda *ETa* değerinin doğrudan ölçme yöntemleri ile hesaplanması başarılı ve çok doğru sonuçlar vermesine rağmen çok büyük alanlar için bu, çok mümkün olmamaktadır. Bu problemin üstesinden gelebilmek için uzaktan algılama teknolojisi kullanılmaktadır (Atasever, 2016). Lihong ve arkadaşları tarafından 2010 yılında Çin Songnen Ovası'nda yapılan konumsal *ETa* haritalama işlemi için MODIS uydu verileri ve SEBAL yöntemi tercih edilmiştir. Kontrol değerleri istasyondan elde edilmiş ve SEBAL'in sonuçları ile karşılaştırılmıştır. SEBAL yönteminde tüm bitki büyüme sezonunda %18.26 sapma gözlemlenmiştir. Bu değer gerek kullanılan uydu görüntüsünün uzaysal çözünürlüğünün görece düşük olması gerekse çalışma alanının konumsal olarak farklı iklimsel varyasyonlara sahip olmasından dolayı araştırmacı tarafından kabul edilebilir bir değer olarak tanımlanmıştır.

*ETa* değerlerini etkileyen başka bir etken ise yine arazi kullanımındaki değişimden kaynaklanan arazi yüzey sıcaklığındaki değişimdir. Cao ve arkadaşlarının 2009 yılında yayımladıkları çalışmalarında 1990 ve 1999 yılları arasındaki arazi kullanımındaki değişimden kaynaklanan arazi yüzey sıcaklığının *ETa* üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Çalışma sonucunda *ETa* hesabı ile arazi yüzey sıcaklığının tüm arazi tipleri için belirgin biçimde negatif korelasyona sahip olduğu gösterilmiştir. Arazi yüzey sıcaklığıyla beraber kentleşmenin başlıca etkilerinden nüfus artışı ve endüstrileşme gibi etkenler, kentsel ısı adalarının oluşmasında neden olmaktadır. Kentsel ısı adaları ise

*ETa* değerlerini değiştiren etkenlerden biri haline gelmektedir. 2008 yılında Lin ve arkadaşları yaptıkları çalışmada ısı adaları ve *ETa* arasındaki ilişkiyi irdelemişlerdir.

Su kaynaklarının yönetimi hem lokal hem de global olarak büyük önem taşıdığından, su yönetiminin doğru yapılması ancak doğruluğu yüksek verilerin elde edilmesi ile mümkündür. Bu verilerden en önemlisi su kaybının dolayısıyla bölgeye ait *ETa* değerlerinin mümkün olduğu kadar hassas olarak hesaplanmasıdır. Bu amaçla dünyanın birçok ülkesinde geniş alanların *ETa* değerlerinin hesaplanmasında uzaktan algılama verilerinin kullanıldığı birçok doktora ve yüksek lisans tezleri bulunmaktadır (Atasever, 2016).

2010 yılında Chatterjee tarafından tamamlanan doktora tezinde uzaktan algılama verileri ile *ETa* hesabının etkinliği için geniş çaplı bilgi verilmiştir. Su, 2008 yılında tamamladığı doktora tezinde ABD Oklahoma'ya ait *ETa* değerlerini hesaplamak için MODIS verilerinden faydalanmıştır. Güney Dakota'daki su kullanımı belirlemek amacıyla hazırlanan, 2008 yılında kabul edilen doktora tezinde Swanson, bölgeye ait *ETa* değerlerini hesaplamak için MODIS, Landsat verileri ile SEBAL ve METRIC yöntemlerini tercih etmiştir.

SEBAL yönteminin belirli amaçlarla modifiye edilmiş farklı versiyonları da bulunmaktadır. 2003 yılında Tasumi tarafından hazırlanan doktora tezinde SEBAL yöntemi temel alınarak SEBAL-ID isimli bir model üretilmiştir. Bu yeni model SEBAL'in dağlık veya fazla engebeli alanlardaki zayıflığı gidermek için geliştirilmiş ve Güney Idaho'da Idaho Su Kaynakları Yönetimi'ne ait lizimetre ölçümleri ile karşılaştırılmış ve kullanılması önerilmiştir.

Atasever tarafından 2016 yılında SEBAL modeli Matlab ortamında hazırlanan Geri-İzleme Arama Algoritması (BSA) ile modifiye edilmiş, Landsat-8 uydu görüntülerinden sıcak, soğuk hücre seçimlerinin otomasyonla yapılması sağlanmıştır. SEBAL-BSA yaklaşımı Nisan ve Temmuz 2015 tarihli uydu görüntülerinden Çukurova bölgesi için gerçekleştirilmiş albedometre kullanarak oluşturulan *ETa* haritaları ile kıyaslanmıştır. Elde edilen sonuçlar çeşitli testlere tabi tutulmuş ve başarılı kabul edilmiştir. Modifiyesi yapılan modelin kullanılabilirliği ifade edilmiştir (Atasever vd., 2016a; 2016b).

Gerçek evapotranspirasyon değerlerinin haritalanmasında uydu teknolojilerini kullanan SEBAL ve benzeri tekniklerin en önemli dezavantajı, kullanılan uyduların zamansal çözünürlüklerinin düşük olması ve bulutlu olan günlerde işlemin yapılamamasıdır. Doğrudan uydu görüntüleri üzerinden aylık gerçek evapotranspirasyon haritalarının üretimi bu açıdan çok mümkün olmamaktadır. Bu nedenle aylık  $ET_a$ , meteoroloji verileri ile hesaplanan günlük  $ET_o$ 'lara bağlı olarak hesaplanmaktadır. Buradaki temel fikir; uydu görüntülerinin alındığı gün hesaplanan referans ET değeri ile o aya ait yığışımli referans ET değeri arasındaki ilişkinin; günlük  $ET_a$  ve yine aynı aya ait yığışımli  $ET_a$ 'ya benzerlik göstereceğidir.

Literatürdeki birçok çalışmada yığışımli  $ET_a$  bu şekilde hesaplanmaktadır. Bu işlemi matematiksel olarak ifade etmek gerekirse:

$$CET_r = \sum_{j=1}^k (ET_r)_j \quad (2.8)$$

$$CET_a = \sum_{i=1}^n (ET_a)_i \times K_m \quad (2.9)$$

$$K_m = \frac{CET_r}{ET_r} \quad (2.10)$$

Eşitlik 2.8, 2.9 ve 2.10'de  $n$  görüntü sayısını;  $K_m$  yığışımli çarpım katsayısını;  $CET_a$  hesaplanan yığışımli gerçek evapotranspirasyon değerini;  $CET_r$  yığışımli referans evapotranspirasyonu;  $ET_r$  görüntünün alındığı güne ait referans evapotranspirasyonu değerini;  $k$  ise sezon içerisindeki gün sayısını tanımlamaktadır (Atasever, 2016)

Su yönetimi ve su kaynaklarının planlaması amacıyla, geliştirilen uzaktan algılama ve görüntü işleme yöntemleri sayesinde bölgesel  $ET_a$  haritaları üretilebilmektedir. SEBAL modeli çeşitli uydu sistemlerine kolaylıkla uyarlanabilir ve az sayıda veriye ihtiyaç duymaktadır. Bu sebeple UA modelleri içerisinde Evapotranspirasyon haritalamada en çok kullanılan model olmuştur (Atasever, 2016)

Modelin tanımını yapan Bastiaanssen ve ark. (1998) SEBAL' in avantajlarını şu şekilde sıralamışlardır:

- En az düzeyde veri gerektirmesi,
- Değişik iklim tiplerinde uygulanabilme özelliği,
- Arazi kullanım sınıflandırmasına ihtiyaç duymaması,
- Hidroloji ve PBL modellerinde gerekli olan verilere ihtiyaç duymaması,
- Yüksek çözünürlüklü görüntülerde önemli hidro-meteorolojik parametrelerin fonksiyonları yerine getirebilmesi,
- Farklı zamansal ve alansal çözünürlükteki radyometrelerin kullanımına uygun olması,
- Yüksek çözünürlük sonuçlarının yer gözlemi ile karşılaştırılabilmesi,
- Esnek ve tercihe dayalı bir yaklaşım olması.

Yöntemin dezavantajları ise şu şekilde sıralanmıştır:

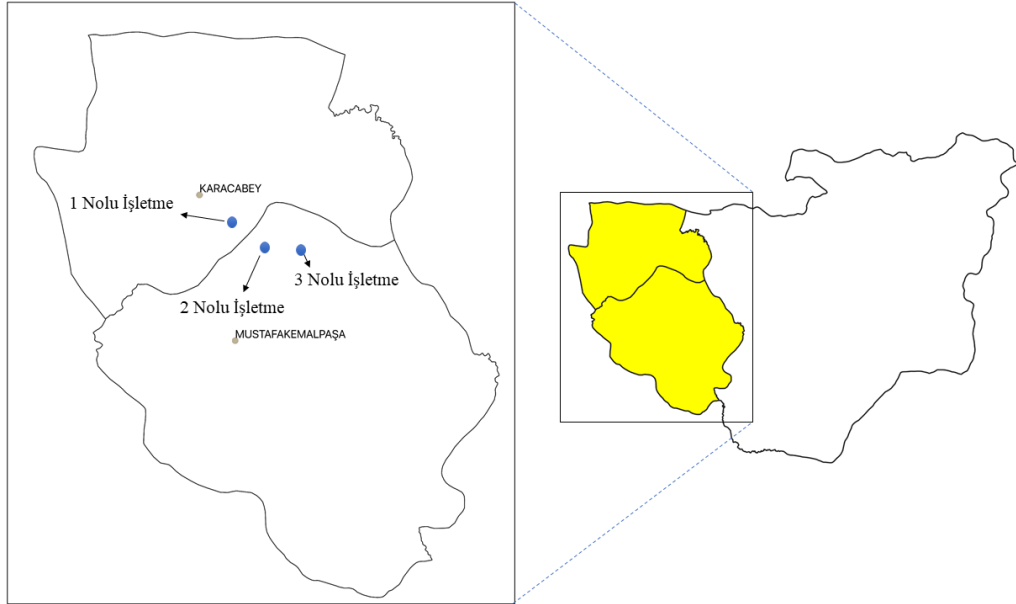
- Görüntülerin bulutsuz koşullarda olması,
- Bir görüntüde kuru alan ve su yüzeylerinin birlikte yer alması,
- Yüzey pürüzlülüğündeki eksiklikler
- Düz araziler için uygun oluşu.

### 3. MATERYAL ve YÖNTEM

#### 3.1. MATERYAL

##### 3.1.1. Çalışma Alanı

Çalışma bölgesi, Bursa ilinin 85 km güney batısında yer almakta olup, Bursa ilinin tarımsal potansiyeli yüksek en önemli ovalarındandır. Mustafakemalpaşa (MKP) Ovası 16555 ha araziye kapsamaktadır. Mustafakemalpaşa sulama alanı, 40,04° K, 28,13° D – 40,18° K, 28,53° D enlem ve boylamları arasındadır. Sulama alanında, yaygın olarak mısır, domates, sebze, şeker pancarı, yem bitkisi, meyve ve zeytin tarımı yapılmaktadır.



**Şekil 3.1.** Çalışma parsellerinin Bursa ili içerisindeki konumu

Ürün deseninin farklılık arz ettiği il genelinde; tarla bitkilerinden tane mısır, ekili alan ve üretim miktarı bakımından üçüncü sırada yer almaktadır. Bursa ili ortalama tane mısır verimi 1120 kg/da olup, mısır üretiminin %97'si Karacabey ve Mustafakemalpaşa ilçelerinden karşılanmaktadır (Anonim 2010).

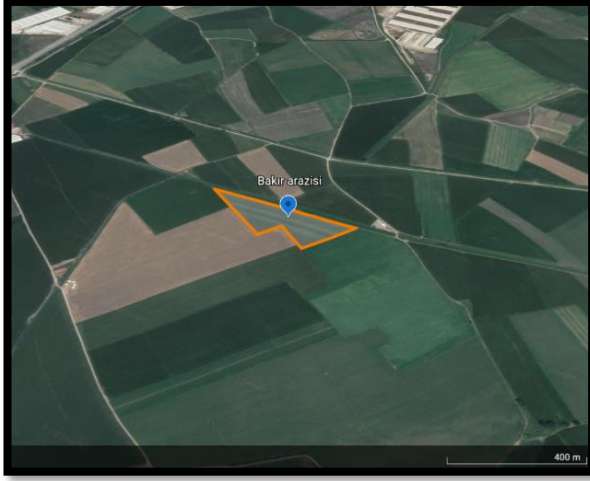
Çalışma alanı olarak, Mustafakemalpaşa sulama alanında Bakırköy, Tepecik ve Yeşilova mahallelerinden parseller seçilmiştir. Parsellerde mısır tarımı yapılmaktadır. Parsel sahipleri ile görüşülmüş, araştırmaya destek vermeleri sağlanmıştır.

Parsellerin seçiminde en az 20 dekar büyüklüğe sahip alanlar seçilmiştir. Her mahallede birden fazla parsel seçilmiş durumdadır. Bu parseller aynı işletmeye ait, birbirine komşu ve aynı ürünün yetiştirildiği parsellerdir. Tapu kayıtlarında farklı parseller olarak görülmektedirler. Parsel numaraları ve alanları Çizelge 3.1’ de verilmiştir.

**Çizelge 3.1.** Çalışma alanı; arazi, parsel bilgileri

İşletme No	İlçe	Mahalle	Ada / Parsel No	Alan (m2)	Ürün	Sulama Şekli
1	Karacabey	Bakırköy	268 / 27	12192	Mısır	Damla
1	Karacabey	Bakırköy	268 / 30	6171	Mısır	Damla
1	Karacabey	Bakırköy	268 / 31	1869	Mısır	Damla
1	Karacabey	Bakırköy	268 / 32	580	Mısır	Damla
2	M.Kemalpaşa	Tepecik	0 / 1488	10500	Mısır	Karık
2	M.Kemalpaşa	Tepecik	0 / 1490	7900	Mısır	Karık
2	M.Kemalpaşa	Tepecik	0 / 1491	11900	Mısır	Karık
3	M.Kemalpaşa	Yeşilova	0 / 1557	7850	Mısır	Damla
3	M.Kemalpaşa	Yeşilova	0 / 1558	5150	Mısır	Damla
3	M.Kemalpaşa	Yeşilova	0 / 1567	4700	Mısır	Damla
3	M.Kemalpaşa	Yeşilova	0 / 1568	2000	Mısır	Damla
3	M.Kemalpaşa	Yeşilova	0 / 1569	5000	Mısır	Damla

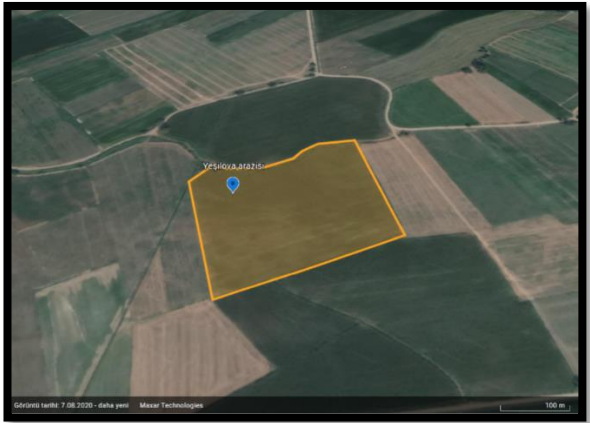
Her bir arazide, aynı tarihte (23 Nisan 2020) danelik mısır (Zea mays) ekimi yapılmıştır. Arazilerin 2020 Ağustos ayında çekilen Google Earth görüntüleri Şekil 3.2, 3.3 ve 3.4’ de verilmiştir.



Şekil 3.2. Bakırköy arazisi 1 no'lu işletme



Şekil 3.3. Tepecik arazisi 2 no'lu işletme



Şekil 3.4. Yeşilova arazisi 3 no'lu işletme

### 3.1.2. Uydu Verileri

Uzaktan algılama modeli için gerekli olan uydu görüntüleri USGS Earth Explorer veri portalından (<https://earthexplorer.usgs.gov/>) Landsat-8 OLI (Operasyonel Arazi Görüntüleyici) ve TIRS (Termal Kızılötesi Sensör) Seviye-1 ürünleri, “Landsat 8 OLI/TIRS Collection 1 Level-1” veri setinden GeoTIFF formatında elde edilmiştir. 16 gün zaman aralığı ile çekilen bu görüntülerin erişimi ücretsizdir.

Landsat 8, en son fırlatılan Landsat uydusudur ve Operasyonel Arazi Görüntüleyici (OLI) ve Termal Kızılötesi Sensör (TIRS) cihazlarını taşır. Landsat 8 OLI/TIRS uydu verileri iki adet termal bant, bir adet pankromatik bant ve sekiz adet spektral bant olmak üzere toplam 11 banda sahiptir (Çizelge 3.2).

**Çizelge 3.2.** Landsat 8 OLI/TIRS uydu verisi özellikleri

Sistem	Landsat-8
Sensör	OLI (Operational Land Imager)
Swath genişliği	170 x 185 km
Tekrarlama aralığı (Zamansal Çözünürlük)	16 gün
Spektral bantlar (Spektral Çözünürlük - $\mu m$ )	Bant 1 Aerosol (0,43 – 0,45 $\mu m$ ) Bant 2 Mavi (0,45 - 0,51 $\mu m$ ) Bant 3 Yeşil ( 0,53- 0,59 $\mu m$ ) Bant 4 Kırmızı (0,64 - 0,67 $\mu m$ ) Bant 5 Yakın Kızılötesi (0,85 - 0,88 $\mu m$ ) Bant 6 SWIR 1 (1,57 - 1,65 $\mu m$ ) Bant 7 SWIR 2 ( 2,11 - 2,29 $\mu m$ ) Bant 8 Pankromatik (0,50 - 0,68 $\mu m$ ) Bant 9 Cirrus (1,36 - 1,38 $\mu m$ ) Bant 10 TIRS 1 (10,6 - 11,19 $\mu m$ ) Bant 11 TIRS 2 (11,5 - 12,51 $\mu m$ )
Piksel büyüklüğü (Mekansal Çözünürlük)	15 m (Bant 8 PAN), 30 m (Bant 1-7, 9), 100 m (Bant 10-11)



Çalışmada kullanılan uydu görüntülerinin konumsal özellikleri Çizelge 3.3'te, görüntülerin çekim tarihleri Çizelge 3.4'te verilmiştir.

**Çizelge 3.3.** Mustafakemalpaşa alanı için uydu görüntülerinin konum özellikleri

<u>UTM Zone</u>	35
<u>Datum</u>	WGS84
<u>WRS Path</u>	180
<u>WRS Row</u>	032

**Çizelge 3.4.** Kullanılan uydu görüntülerinin tarihleri

No	Veri Tarihi	Veri Dosya Adı
1	15.06.2020	LC08_L1TP_180032_20200615_20200626_01_T1
2	17.07.2020	LC08_L1TP_180032_20200717_20200722_01_T1
3	18.08.2020	LC08_L1TP_180032_20200818_20200823_01_T1

Çalışma alanını içeren dijital yükseklik modeli (DEM; digital elevation model) verisi <https://search.earthdata.nasa.gov/> adresinden ASTGTMV003\_N40E028\_dem.tif dosyası şeklinde temin edilmiştir.

### 3.1.3. İklim Verileri

Araştırma bünyesinde gerekli olan iklim verileri, saatlik ve günlük ortalama olarak hava sıcaklığı, bağıl nem, rüzgar hızı ve net radyasyon değerleridir. Bu veriler Meteoroloji Genel Müdürlüğü, Meteorolojik Veri Bilgi Satış ve Sunum Sistemi (MEVBİS)' den aylık tablolar şeklinde temin edilmiştir. Veriler araştırma amaçlı kullanıldığından herhangi bir ücret talep edilmemektedir. İlgili aylık veriler uydu görüntülerin geçtiği tarih ve GMT (Greenwich Mean Time) uyarlı Türkiye saati (GMT+3) baz alınarak seçilmiştir. Günlük ortalamalar Microsoft Office Excel ortamında hesaplanmıştır.

### 3.1.4. Tarımsal Ürün

Çalışmada ürün olarak danelik mısır (zea mays) bitkisi seçilmiştir. Mısır susuz tarımı düşünülemeyen; C4 grubu, bir sıcak iklim bitkisidir. Yetiştirme sürecinde belirli dönemlerle sulanması gerekir. Sulamanın, topraktaki yarayışlı suyun %50'sine indiğinden yapılması önerilmektedir (Gençoğlan ve Yazar, 1996). Araştırma bölgesinde her bir arazide temmuz ve ağustos aylarında ortalama 10'ar gün arayla dört sulama yapılmıştır.

## 3.2. YÖNTEM

### 3.2.1. Toprak Örneklerinin Alınması ve Fiziksel Analizi

Çalışma alanında, her bir arazinin çeşitli bölgelerinden 0-30 cm ve 30-60 cm derinlikte toprak örnekleri alınmıştır. Toprak bünyesi, tarla kapasitesi, solma noktası ve hacim ağırlığı analizleri, Ankara Toprak Gübre ve Su Kaynakları Merkez Araştırma Enstitüsünde yaptırılmıştır. Uydu görüntüsünün alındığı tarihteki toprak örneklerinin nem içeriği analizi, Bursa Uludağ Üniversitesi Ziraat Fakültesi Biyosistem Mühendisliği Bölümü Drenaj Laboratuvarında yapılmıştır. Nem analizinde, örnekler darası belli kaplarda tartılmış net ağırlıkları hesaplanmıştır. Aynı örnekler 24 saat 105 °C'de kuruyuncaya kadar etüvde bekletilmiş ve kuru ağırlıkları tartılmıştır. Son olarak toprak nem içerikleri ağırlık yüzdesi cinsinden belirlenmiştir. Ağırlık yüzdesi cinsinden toprak nemi tespitinde aşağıdaki formül kullanılmıştır.

$$P_w = 100 \times (W - W_s) / W_s \quad (3.1)$$

W; toprak örneğinin toplam ağırlığını (g),

W<sub>s</sub>; örneğin kuru ağırlığını (g),

P<sub>w</sub> ise ağırlık yüzdesi cinsinden nem miktarını (%) ifade etmektedir.

### 3.2.2. CROPWAT ve CLIMWAT ile Evapotranspirasyon Hesabı

FAO Su Kaynakları Geliştirme ve Yönetim Servisi tarafından geliştirilen CROPWAT 8.0 yazılımı <https://www.fao.org/land-water/databases-and-software/cropwat/> adresinden ve CROPWAT için CLIMWAT 2.0 eklentisi <https://www.fao.org/land->

water/databases-and-software/climwat-for-cropwat/ adresinden indirilmiş, Windows işletim sistemine kurulmuştur.

Cropwat ET hesabı için gerekli iklim verileri, uzun dönem verilerini içeren Climwat eklentisi ile edinilmiş, değerler ortam verileri ile benzer olduğu için değişiklik yapılmamıştır. İklim verileri, bitki özellikleri, ekim tarihleri, toprak özellikleri cropwat ekranına girilmiş, Penman-monteith yöntemine göre ETo ve ETc değerleri hesaplanmıştır. Su tüketimi değerleri Çizelge 4.3.'de gösterildiği gibi elde edilmiştir.

### **3.2.3. TAGEM SUET Hesaplama Sistemi Uygulaması**

TAGEM tarafından 2017 yılında yayınlanan Bitki Su Tüketimi Rehberinden ilgili bölge ve ürün için tablodan ETc değerleri alınmış ve yine TAGEM tarafından Mayıs 2021'de hizmete sunulan SUET Hesaplama Sistemi version-1 beta sürümü denenmiştir. İlgili çalışma bölgesi meteoroloji istasyonundan gelen iklim verileri ile ETo değerleri ve sistem üzerinden seçimi yapılan danelik mısır bitkisi için ETc değerleri hesaplanmıştır.

### **3.2.4. SEBAL (Surface Energy Balance Algorithm For Land) Modeli**

SEBAL tekniğinde çok kanallı uydu görüntüleri kullanılmaktadır. Bu çalışmada 11 banda sahip Landsat-8 (OLI/TIRS) uydusu verileri kullanılmıştır. Modelin çalıştırılması için gerekli olan meteoroloji verileri, araştırma alanında faaliyette olan Mustafakemalpaşa istasyonundan elde edilmiştir. Radyasyon değerleri hariç tüm veriler Mustafakemalpaşa istasyonundan edinilmiştir. Saatlik ve günlük ortalama radyasyon değerleri için Bursa merkez istasyonu verileri kullanılmıştır. İklim verileri ile elde edilecek ETo, ETc hesaplamaları Cropwat yazılımı (FAO Penman Tekniği) ve FAO tarafından önerilen katsayılar ile yerel ekim ve hasat bilgileri kullanılarak yapılmıştır (Allen vd., 1998).

Model, uydu görüntüleri, sayısal yükseklik modeli (DEM) vasıtasıyla, toprak nem özellikleri, anlık-günlük ortalama hava sıcaklığı, rüzgar hızı, bağıl nem ve güneş radyasyonu iklim verilerini kullanarak yüzey enerji dengesinden bitki su parametrelerini tahmin edebilmektedir. PySEBAL modeli çeşitli uydu görüntülerini kullanabilme özelliğine sahiptir. Örneğin, Landsat uyduları, Orta Çözünürlüklü Görüntüleme

Spektroradyometre (MODIS) ve PROBA-Bitki Örtüsü ve Görünür Kızılötesi Görüntüleme Radyometre Paketi (VIIRS) verileri PySEBAL modeli tarafından görüntü işlemede kullanılabilir. ETa' nın arazi düzeyinde doğru tahminlenebilmesi için yüksek konumsal ve zamansal çözünürlüğe sahip uydu görüntüleri istenir (Sawadago, 2021).

Model ile enerji dengesi, radyasyon, toprak nemi, evapotranspirasyon, biyokütle ve vejetasyon verileri elde edilebilmektedir. Uygulama kapsamında PySEBAL modeli ile günlük ETref, kc, ETa, NDVI ve biyokütle verileri elde edilmiştir.

Model, gizli ısı akısını ( $\lambda E$ ,  $W m^{-2}$ ), uydu geçiş zamanındaki yer yüzeyi enerji dengesinden hesaplar (Bastiaanssen vd. 2002):

$$\lambda E = R_n - G - H \quad (3.2)$$

denklemden  $R_n$ ; net radyasyonu ( $W m^{-2}$ ),

$G$ ; toprak ısı akısını ( $W m^{-2}$ ) ve

$H$ ; hissedilir ısı akısını ( $W m^{-2}$ ) ifade etmektedir.

Net radyasyonu hesaplanmasında aşağıdaki yüzey radyasyon dengesi denklemi kullanılır:

$$R_n = (1-\alpha) R_{s\downarrow} + R_{L\downarrow} - R_{L\uparrow} - (1-\epsilon_0) R_{L\downarrow} \quad (3.3)$$

burada  $\alpha$ ; yüzey albedosunu,  $R_{s\downarrow}$  gelen kısa dalga radyasyonunu ( $W m^{-2}$ )  $R_{L\downarrow}$  gelen uzun dalga radyasyonunu ( $W m^{-2}$ ),  $R_{L\uparrow}$  giden uzun dalga radyasyonunu ( $W m^{-2}$ ) ve  $\epsilon_0$  yüzey salınımını ifade etmektedir.

Toprak ısı akısı ( $G$ ), yer yüzeyinden yeraltına aktarılan ısı enerjisinin oranıdır.  $G$ , kara pikselleri için radyasyon, yüzey sıcaklığı, albedo ve NDVI'ni içeren ampirik bir eşitlik ile bulunur:

$$G = R_n (T_s (0.0038 + 0.0074\alpha) (1 - 0.978 \times NDVI^4)) \quad (3.4)$$

burada  $T_s$  yüzey sıcaklığıdır (K) ve NDVI normalize edilmiş fark bitki örtüsü indeksidir.

Hissedilir ısı akısı, aşağıdaki ısı transfer denklemi kullanılarak belirlenir:

$$H = \frac{\rho \times c_p \times dT}{rah} \quad (3.5)$$

burada  $\rho$  hava yoğunluğunu ( $\text{kg m}^{-3}$ ),  $c_p$  sabit basınçtaki havanın özgül ısısını ( $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ ),  $dT$  dikey yakın yüzey sıcaklık farkını (K) ve  $rah$  ısı aktarımına aerodinamik direnci ( $\text{s m}^{-1}$ ) ifade etmektedir.

Gizli ısı akısının mevcut enerjiye oranı olarak tanımlanan anlık evaporatif fraksiyonu (EF), aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanır:

$$EF_{inst} = \frac{\lambda E}{\lambda E + H} \quad (3.6)$$

Günlük evaporatif fraksiyonun gün boyunca sabit olduğu kabul edilir. Anlık evaporatif fraksiyon ile günlük ET aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanır:

$$ET_{24} = EF_{inst} \times AF \times Rn_{24} \lambda \times \rho_w \times 86400000 \quad (3.7)$$

AF'nin adveksiyon faktörü olduğu durumlarda;  $\lambda$ , buharlaşmanın gizli ısısıdır ( $\text{J kg}^{-1}$ ); ve  $\rho_w$  suyun yoğunluğudur ( $\text{kg m}^{-3}$ ),  $Rn_{24}$ ; 24 saatlik net radyasyondur ( $\text{W m}^{-2}$ ). Adveksiyon faktörü, bölgesel değişimin ilerlemenin herhangi bir etkisini hesaba katmak için aşağıdaki denklem ile hesaplanır:

$$AF = 1 + 0.985 \left( \exp \left( (esat_{24} - eact_{24}) \times 0.08 \right) - 1 \right) EF_{inst} \quad (3.8)$$

burada  $esat_{24}$ , 24 saatlik ortalama doymuş buhar basıncı (kPa) ve  $eact_{24}$ , 24 saatlik ortalama gerçek buhar basıncıdır (kPa).

Ayrıca PySEBAL modelinden elde edilen günlük veriler, ihtiyaç olan sayıda uydu görüntüsünün kullanımı ile aylık ve sezonluk gerçek evapotranspirasyon tahmini için kullanılabilir (Trezza ve diğerleri, 2018). 2021 yılında Sawadogo tarafından gerçekleştirilen Burkina Faso Kou Vadisi'ni içeren çalışmada aylık ETa haritaları

FAO-56 yöntemine benzer şekilde bitki katsayısı eğrisinin oluşturularak hesaplamıştır (Sawadogo, 2021).

Bu amaçla birbirini izleyen uydu görüntülerinden elde edilen kc değerleri arasında doğrusal enterpolasyon yapılmaktadır. Enterpolasyonlu kc değerleri, aşağıdaki formüldeki gibi her günün ETo değeri ile çarpılıp, sezonluk ETa değerleri elde edilmektedir:

$$ET_a(\text{sezon}) = \sum_{i=m}^n [(k_{ci})(ET_{024i})] \quad (3.9)$$

burada ETa (sezon), mm cinsinden m'den n'ye kadar bir süre boyunca ETa değerinin toplamıdır; ET<sub>024i</sub>, i günü için 24 saat boyunca mm cinsinden referans ET değeri; ve k<sub>ci</sub>, i günü üzerinden enterpolasyonlu kc değeridir.

ETo, Cropwat yazılımı ile FAO-56 Penman-Monteith yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır. ETo formülü aşağıdaki gibidir (Allen vd, 1998; Allen, 2016):

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34 u_2)} \quad (3.10)$$

Aynı zamanda model ile Kc katsayısına bağlı olarak Bursa bölgesi için ETc değerleri hesaplanmıştır. Araştırma kapsamında kullanılan veriler Nisan ayından Ağustos ayına kadar olan altı aylık süredir.

### 3.2.5. PySEBAL Model Uygulaması

Çalışmada Arazi için Yüzey Enerji Dengesi Algoritması (PySEBAL) modeli için IHE-Delft Su Eğitimi Enstitüsü tarafından geliştirilen <https://pypi.org/project/SEBAL/> adresinden ücretsiz indirilebilen Python modülü kullanılmıştır.

Programların çalıştırılması sürecinde yalnızca Windows 10 işletim sistemi kullanılmıştır. Farklı versiyon denemelerinde Linux işletim sistemi gereken yerlerde Microsoft mağazasından Windows 10 için Ubuntu uygulaması edinilmiş ve program aşamaları bu ortamda gerçekleştirilmiştir.

Bitki su tüketiminin belirlenmesinde kullanılan SEBAL modeli ile QGIS Desktop 3.16.10 yazılımı ve GRASS GIS 7.8.5 eklentisi kullanılmıştır. Modelin çalıştırılması için Anaconda 3 Navigator ve Python 3.8 programlama dili kullanılmıştır.

PySEBAL modülünün çalıştırılması için gerekli tüm python eklentileri ilgili kütüphanelerden indirilmiş, kurulumu yapılmıştır. Pillow, h5py, lxml, netCDF4, openpyxl, numpy, pandas, scipy, pyproj, joblib python eklenti yazılımları çevrimiçi olarak kurulmuştur.

PySEBAL modelinde verilerin girişi ve çıktı alanı bir excel dosyasından takip edilmiştir. İlgili dosyada her bir sayfa için gerekli bilgiler sisteme girilmiş ve dosya yolları belirtilmiştir.

Modelin dört ana grup girdisi vardır:

1. Uydu verilerinin dosya yollarıyla sisteme işlendiği ve çıktı alanlarının belirtildiği genel girdi sayfasıdır.
2. İklim verilerinin (sıcaklık, rüzgar, nem, radyasyon) girildiği sayfadır.
3. Toprak verilerinin (tarla kapasitesi, solma noktası vb.) işlendiği sayfadır.
4. Kullanılan uydu tipi ve özelliklerinin sisteme işlendiği sayfadır.

Ayrıca sistemde detay araştırmalar için kullanıcı ayarlarının olduğu bir girdi sayfası ve hazır birtakım parametrelerin hesaplamaya dahil edilmesi için ek girdi sayfası bulunmaktadır.

USGS' den edinilen Landsat-8 uydusu C1-L1 veri setleri ve NASA'dan edinilen ASTER DEM sayısal yükseklik modeli verisi belirlenen klasörlerde saklanmış, modelin çalışması için ilgili tablo verilerine dosya konum bilgileri eklenmiştir

Her bir çalışma alanında toprak verileri olarak toprak fiziksel analiz sonuçları kullanılmış, iklim verileri için ise meteoroloji istasyonundan temin edilen değerler sisteme işlenmiştir.

Tüm veriler hazırlandıktan sonra UA modelinin çalıştırılması için GRASS GIS uygulamasına geçilmiştir. CBS yazılımı ile python sürümünün uyumlu olmasına dikkat edilmiştir. QGIS programı GRASS GIS uygulaması üzerinden gerekli konum ve projeksiyon sistemleri ayarlanmış ve python modülü çalıştırılmıştır.

PySEBAL modeli ile elde edilen ET<sub>a</sub> haritaları QGIS yazılımında analiz edilmiş ve Cropwat programından elde edilen ET<sub>o</sub>, ET<sub>c</sub> değerleri ile karşılaştırılmıştır. Çalışma boyunca haritalama işlemleri ve değer okumaları QGIS (<https://qgis.org/>) yazılımı ile tablosal analizler ise Microsoft® Office Excel programı kullanılarak yapılmıştır.



## 4. BULGULAR

Toprak fiziksel analizi sonucu elde edilen veriler ve bölgeye ait iklim verileri, yetiştirilen ürünün bitki katsayıları yardımıyla Penman-Monteith yöntemi ile evapotranspirasyon değerleri hesaplanmıştır. PySEBAL modeli ile elde edilen tematik haritalardan çalışma alanına ait pikseller seçilmiş, her bir değer not edilerek çizelgelere aktarılmıştır.

### 4.1. Toprak Fiziksel Analizi

Çalışma alanındaki arazilerde alınan toprak örnekleri analiz edilerek toprakların bünyesi (tekstürü) belirlenmiş, bozulmuş hacim ağırlıkları ile pySebal modelinde toprak verilerine işlenen tarla kapasitesi, solma noktası değerleri belirlenmiştir. Analiz sonucu her bir arazideki toprak örneklerinin orta bünyeye (L, CL) sahip olduğu belirlenmiştir. Toprak bünyesi, iklim verilerine dayalı ET hesabı için CropWat programına işlenmiştir.

**Çizelge 4.1.** Arazilerin toprak fiziksel analizi

Araziler	Kum, %	Silt, %	Kil, %	Bünye	Tarla Kapasitesi (%)	Solma Noktası (%)	Hacim Ağırlığı (gr/cm <sup>3</sup> )
Yeşilova	38,4	37,6	24	L	19,06	11,84	1,39
Tepecik	40,1	27,5	32,4	CL	22,09	12,76	1,33
Bakırköy	40,6	37,5	21,9	L	16,58	8,82	1,4

### 4.2. Fenolojik Gözlem

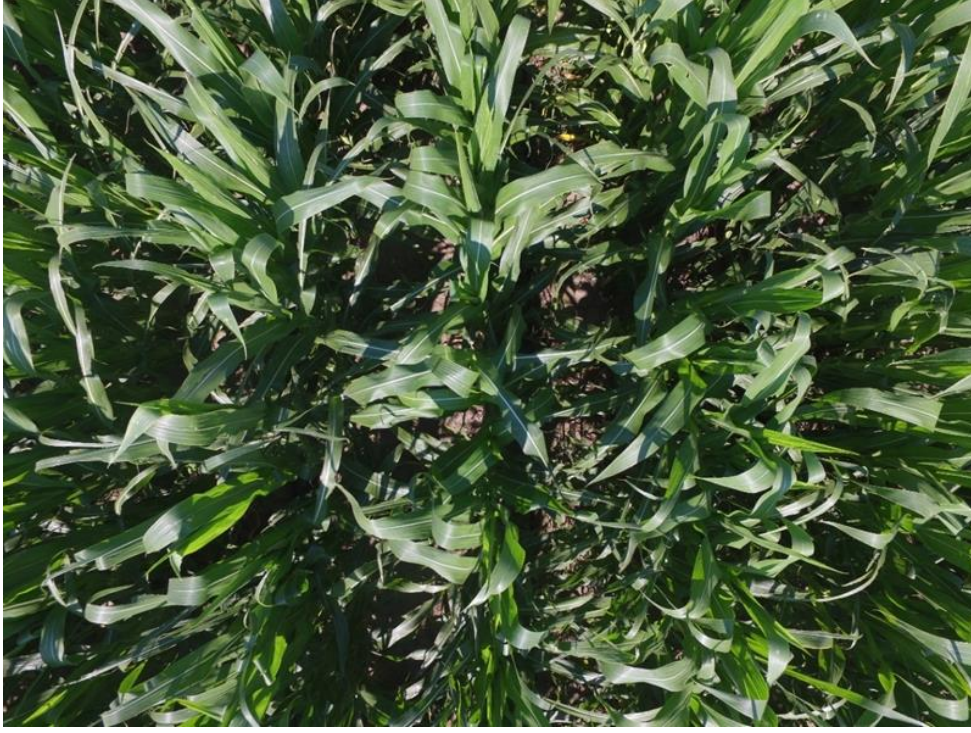
Araziler örnek alınan tarihlerde insansız hava aracıyla görüntülenmiş ve hava fotoğrafları çekilmiştir. Bu sayede toprağın fiziksel durumu ve ürünlerin vejetasyon durumu gözlemlenmiştir. Belirtilen tarihlerde çekilen hava fotoğrafları aşağıda verildiği gibidir (Şekil 4.1, Şekil 4.2, Şekil 4.3, Şekil 4.4, Şekil 4.5).



**Şekil 4.1.** Bakırköy arazisi ürün yetiştirme dönemi (15 Mayıs 2020)



**Şekil 4.2.** Tepecik arazisi ürün yetiştirme dönemi (15 Mayıs 2020)



**Şekil 4.3.** Bakırköy arazisi 1 Temmuz 2020 tarihli görüntü



**Şekil 4.4.** Tepecik arazisi 1 Temmuz 2020 tarihli görüntü



**Şekil 4.5.** Yeşilova arazi 1 Temmuz 2020 tarihli görüntü

### 4.3. İklim Verilerine Dayalı Evapotranspirasyon Bulguları

#### 4.3.1. CropWat Programı Bulguları

CropWat programı ile Penman-Monteith yöntemine göre, Bursa istasyonu 40.18 °N enlem ve 28.06 °E boylam değerlerinde aylık ETo bulunmuştur (Çizelge 4.2).

**Çizelge 4.2.** CropWat programı Bursa istasyonu Penman-Monteith ETo değerleri

Ay	En Düşük Sıcaklık °C	En Yüksek Sıcaklık °C	Nem %	Rüzgar Hızı km/gün	Güneş Saatleri	Radyasyon MJ/m <sup>2</sup> /gün	ETo mm/gün
Ocak	1,4	9,3	77	216	1,9	5,3	0,99
Şubat	2,4	10,7	78	216	2,4	7,4	1,21
Mart	3,7	13,6	76	181	3,2	10,6	1,65
Nisan	7,1	18,8	75	156	5,0	15,2	2,51
Mayıs	10,9	23,5	73	130	6,9	19,6	3,5
Haziran	14,3	28,2	65	147	9,2	23,4	4,8
Temmuz	16,5	30,3	62	190	10,5	24,9	5,61
Ağustos	16,3	27	62	190	11,4	24,4	5,43
Eylül	13	21,4	68	156	7,6	16,6	3,60
Ekim	9,5	16,5	76	138	5,1	10,7	2,05
Kasım	6	11,8	77	156	3,2	6,7	1,31
Aralık	3,8	16,5	78	216	1,9	4,8	1,07
ORT	8,7	20,1	72	174	5,7	14,1	2,81

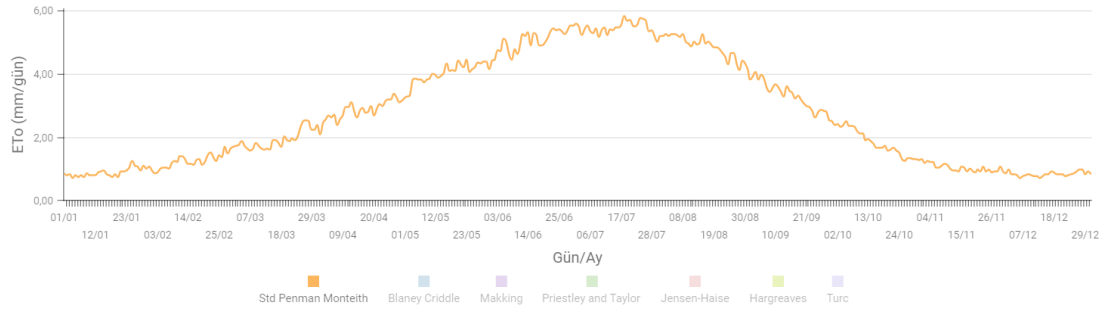
Ardından yine CropWat programı ile Bursa İli ETo ve yağmur istasyonu verileri kullanılarak 23 Nisan günü ekimi yapılan danelik mısır bitkisi için bitki su gereksinimleri hesaplanmıştır. Elde edilen veriler Çizelge 4.3'te verilmiştir.

**Çizelge 4.3.** CropWat Bursa ili 23 Nisan tarihinde ekilen mısır bitkisi su tüketimi

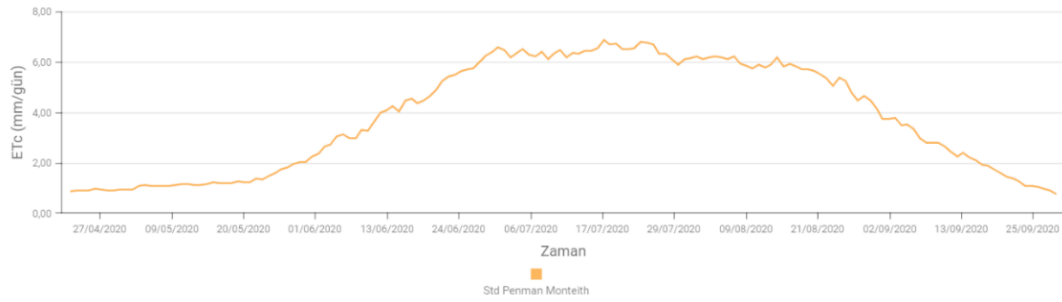
Ay	Onluk Dönem	Gelişim Dönemi	Kc	ETc mm/gün	ETc mm/dönem	Yağ. krş. mm/dönem	Sul. İht. mm/dönem
Nisan	3	İlk	0,30	0,85	6,8	14,0	0,0
Mayıs	1	İlk	0,30	0,95	9,5	15,6	0,0
Mayıs	2	Gelişme	0,39	1,37	13,7	14,1	0,0
Mayıs	3	Gelişme	0,66	2,61	28,7	12,5	16,1
Haziran	1	Gelişme	0,94	4,08	40,8	11,0	29,8
Haziran	2	Orta	1,17	5,61	56,1	9,5	46,6
Haziran	3	Orta	1,21	6,12	61,2	8,1	53,1
Temmuz	1	Orta	1,21	6,53	65,3	6,2	59,1
Temmuz	2	Orta	1,21	6,89	68,9	4,6	64,4
Temmuz	3	Son	1,17	6,56	72,2	5,2	67,0
Ağustos	1	Son	0,91	5,10	51,0	5,8	45,2
Ağustos	2	Son	0,62	3,50	35,0	6,1	28,9
Ağustos	3	Son	0,41	2,02	10,1	3,5	6,2
TOPLAM					519,4	116,3	416,4

#### 4.3.2. SUET Hesaplama Sistemi Bulguları

TAGEM tarafından 2021 yılında kullanıma sunulan SUET hesaplama sistemi ile Bursa İli için referans evapotranspirasyon ve mısır bitkisi su tüketim değerleri hesaplanmıştır. Uygulama sonucunda 15 Haziran tarihi için ETo: 4,9 mm, ETc: 4,04 mm; 17 Temmuz tarihi için ETo: 5,55 mm, ETc: 6,55 mm; 18 Ağustos tarihi için ETo: 4,92 mm, ETc: 5,81 mm su tüketim miktarları bulunmuştur. Program sonuçları Şekil 4.6 ve 4.7'de verilmiştir.



**Şekil 4.6.** Bursa istasyonu SUET ETo değerleri (mm/gün)



**Şekil 4.7.** Bursa istasyonu SUET danelik mısır bitkisi için ETc değerleri (mm/gün)

#### 4.4. PySEBAL Modeli Bulguları

Model, aynı anda birden fazla tipte ve sayıda veri setini işleyebilmektedir. Çıktılar exel dosyasında belirtilen bilgisayar klasöründe oluşturulmaktadır. Çıktı verileri, evapotranspirasyon, biyokütle (biomass), toprak nemi ve vejetasyon gibi verilerden oluşmaktadır. Bunlar dışında hesaplama esnasında kullanılan enerji ve radyasyon dengesi denklemi ( $R_n$ ,  $G$ ,  $H$ ,  $\lambda E$ ) verileri ayrı bir klasör olarak çıktı alanında görüntülenebilmektedir. Her dosya GeoTIFF veri tipindedir. Çalışmada model çıktılarından ET, vejetasyon ve biyokütle haritaları kullanılmıştır. ET verileri olarak ETref\_24, Kc, ETa\_24 haritaları kullanılmıştır. Rölatif ET (RET) değer haritası ise, model ile hesaplanan ETa değerlerinin, Cropwat ile bulunan ETc karşılıklarına bölünmesi ile elde edilmiştir. Bulgular aşağıdaki çizelgelerde verilmiştir.

#### 4.4.1. Bakırköy Mahallesi Parseli PySEBAL Çıktıları

Uydu görüntüsünün çekildiği 15 Haziran 2020 günü için CropWat (Penman-Monteith) ile yapılan hesaplamada, haziran ayı için ETo: 4,8 mm/gün (Çizelge 4.2), ETc: 5,61 mm/gün olarak bulunmuştur (Çizelge 4.3). PySEBAL modeli ile elde edilen değerler Çizelge 4.4. da verilmiştir. Çalışmada kullanılan uydu görüntülerinin çözünürlüğü 30\*30 metre olduğundan, model çıktıları da 30\*30 metre boyutlarında raster veri özelliğindedir. Ele alınan parselde denk gelen raster piksellerinin değeri çizelgede verilmiştir.

**Çizelge 4.4.** Bakırköy arazisi 15 Haziran 2020 PySEBAL çıktıları

Piksel No	ETref_24 (mm/gün)	Kc	ETa_24 (mm/gün)	RET (ETa / ETc)	NDVI	Biyokütle (kg/ha)
1	6,49	1,02	6,64	1,18	0,58	333,24
2	6,5	1,04	6,76	1,20	0,58	335,33
3	6,5	1,03	6,67	1,19	0,57	323,95
4	6,49	0,82	5,33	0,95	0,46	246,78
5	6,5	0,95	6,2	1,11	0,53	293,51
6	6,49	0,94	6,11	1,09	0,52	286,67
7	6,48	0,93	6,02	1,07	0,51	283,64
8	6,48	0,92	5,95	1,06	0,51	280,17
9	6,49	0,97	6,27	1,12	0,53	295,55
10	6,5	1,02	6,61	1,18	0,55	311,39
11	6,5	1	6,56	1,17	0,55	309,8
12	6,48	0,96	6,27	1,12	0,52	285,45
13	6,48	1,02	6,59	1,17	0,54	304,41
14	6,49	1,07	6,97	1,24	0,58	334,72
ORT	6,49	0,98	6,35	1,13	0,54	301,76

Haziran ayında Bakırköy arazisi için günlük ETref değerleri 6,49 mm olarak hesaplanmış, kc değerlerinin çarpımı ile günlük ETa değerleri ortalama 6,35 mm bulunmuştur.

Uydu görüntüsünün çekildiği 17 Temmuz 2020 günü için CropWat (Penman-Monteith) ile yapılan hesaplamada, Bakırköy mahallesi parseli, temmuz ayının aynı dönemi için

ETo: 5,61 mm/gün (Çizelge 4.2), ETc: 6,89 mm/gün (Çizelge 4.3) olarak bulunmuştur. PySEBAL modeli ile elde edilen değerler Çizelge 4.5' te verilmiştir.

**Çizelge 4.5.** Bakırköy arazisi 17 Temmuz 2020 PySEBAL çıktıları

Nokta No	ETref_24 (mm/gün)	Kc	ETa_24 (mm/gün)	RET ETa / ETc	NDVI	Biyokütle (kg)
1	7,94	1,22	9,65	1,40	0,79	715,6
2	7,94	1,22	9,64	1,40	0,79	714,3
3	7,93	1,2	9,53	1,38	0,78	711,5
4	7,97	1,22	9,71	1,41	0,78	708,1
5	7,98	1,24	9,92	1,44	0,8	735,3
6	7,98	1,24	9,9	1,44	0,8	732,9
7	7,97	1,23	9,8	1,42	0,8	726,8
8	7,96	1,21	9,66	1,40	0,79	718,4
9	7,95	1,22	9,68	1,40	0,79	724,9
10	7,94	1,22	9,65	1,40	0,79	720,7
11	7,94	1,19	9,46	1,37	0,79	717,4
12	7,98	1,16	9,26	1,34	0,73	658,1
13	7,98	1,23	9,82	1,43	0,79	723,7
14	7,95	1,21	9,62	1,40	0,78	709,5
ORT	7,96	1,22	9,66	1,40	0,79	715,51

Bakırköy arazisi Temmuz'un 17'si için gerçekleştirilen çalışmada günlük ETa'nın ortalama 9,66 mm'ye ulaştığı görülmüştür ve (ETa/ETc) RET oranı 1,5' e yakın değerler izlemiştir. Vejetasyon değerlerinin 0,79 ve biyokütlenin ise 715 kg elde edildiği bir hesaplama gerçekleşmiştir. Bu değerler vejetasyon gelişiminin önceki aya göre belirgin bir şekilde arttığını göstermektedir.

Uydu görüntüsünün çekildiği 18 Ağustos 2020 günü için CropWat (Penman-Monteith) ile yapılan hesaplamada, Bakırköy mahallesi parseli ağustos ayı aynı dönemi için, ETo: 5,43 mm/gün (Çizelge 4.2), ETc: 3,5 mm/gün (Çizelge 4.3) olarak bulunmuştur. PySEBAL modeli ile elde edilen değerler Çizelge 4.6' da verilmiştir.



**Çizelge 4.6.** Bakırköy arazisi 18 Ağustos 2020 PySEBAL çıktıları

Nokta No	ETref_24 (mm/gün)	Kc	ETa_24 (mm/gün)	RET (ETa / ETc)	NDVI	Biyokütle (kg)
1	7,93	1,48	11,74	3,35	0,5	388,4
2	7,93	1,47	11,69	3,34	0,49	379,3
3	7,93	1,47	11,68	3,34	0,49	382,9
4	7,95	1,47	11,7	3,34	0,48	369,8
5	7,95	1,47	11,71	3,35	0,48	366
6	7,95	1,47	11,7	3,34	0,48	363,6
7	7,95	1,47	11,69	3,34	0,48	369,3
8	7,94	1,47	11,71	3,35	0,49	378,1
9	7,94	1,47	11,66	3,33	0,48	371,8
10	7,93	1,46	11,62	3,32	0,48	362,6
11	7,93	1,47	11,63	3,32	0,49	375,2
12	7,97	1,46	11,67	3,33	0,47	360,9
13	7,96	1,47	11,69	3,34	0,49	374,1
14	7,94	1,47	11,67	3,33	0,47	358,6
ORT	7,94	1,47	11,68	3,34	0,48	371,47

Bakırköy arazisi Ağustos ayı model sonuçlarına göre günlük ETa' nın 11,7 mm dolaylarında en yüksek değerine ulaştığı görülmüştür ve ETa' nın ETc' ye oranı 3,34 ortalamayla ölçülmüştür. Bu durumda ETa' nın Cropwat çıktısına göre 3,5 mm olarak belirlenen değerden oldukça yüksek olduğu görülür. Vejetasyon indeksinde ise bir önceki aya göre azalma görülmüştür. NDVI ve biyokütle değerlerindeki azalma, artık sıcaklığın etkisi ile ürünün su kaybedip kurduğuna yorumlanmıştır. Araziden elde edilen ETa Haritaları EK 3' te verilmiştir.

#### **4.4.2. Tepecik Mahallesi Parseli PySEBAL Çıktıları**

Uydu görüntüsünün çekildiği 15 Haziran 2020 günü için CropWat (Penman-Monteith) ile yapılan hesaplamada, Tepecik mahallesi parselinde, ETo: 4,8 mm/gün, ETc: 5,61 mm/gün olarak bulunmuştur. PySEBAL modeli ile elde edilen değerler Çizelge 4.7' de verilmiştir.

**Çizelge 4.7.** Tepecik arazisi 15 Haziran 2020 PySEBAL çıktıları

Nokta No	ETref_24 (mm/gün)	Kc	ETa_24 (mm/gün)	RET (ETa / ETc)	NDVI	Biyokütle (kg)
1	6,5	0,7	4,55	0,81	0,31	92,72
2	6,5	0,69	4,47	0,80	0,29	81,05
3	6,49	0,66	4,32	0,77	0,28	74,53
4	6,49	0,69	4,49	0,80	0,31	94,14
5	6,49	0,85	4,25	0,76	0,36	142,1
6	6,5	0,74	4,79	0,85	0,37	130,54
7	6,5	0,73	4,76	0,85	0,34	107,92
8	6,5	0,74	4,79	0,85	0,37	133,58
9	6,5	0,92	6	1,07	0,64	211,37
10	6,5	0,95	6,21	1,11	0,65	220,02
11	6,5	0,94	6,12	1,09	0,62	193,54
12	6,49	0,92	5,96	1,06	0,65	220,14
13	6,49	0,99	6,42	1,14	0,7	275,83
14	6,49	1,02	6,62	1,18	0,72	337,37
15	6,49	1,03	6,67	1,19	0,72	353,44
16	6,49	1,02	6,64	1,18	0,72	345,65
17	6,49	0,96	6,23	1,11	0,67	238,16
18	6,49	1,02	6,66	1,19	0,72	355,91
19	6,49	1,03	6,69	1,19	0,73	365,95
20	6,49	1,04	6,75	1,20	0,73	378,21
21	6,49	1,04	6,72	1,20	0,73	373,88
22	6,49	0,96	6,24	1,11	0,66	237,77
ORT	6,49	0,89	5,74	1,02	0,56	225,63

15 Haziran için Tepecik arazisi günlük ETa değerleri ETc' ye oldukça yakın bir oranda (1,02) tesbit edilmiştir. NDVI değerleri 0,56 dolaylarında normal kabul edilmiştir. Biyokütle değerleri ortalama ve diğer arazilere düşük bir orandadır. Mısırın bu dönemdeki kc katsayısı model ile ortalama 0,89 belirlenmiştir.

Uydu görüntüsünün çekildiği 17 Temmuz 2020 günü için CropWat (Penman-Monteith) ile yapılan hesaplamada, Tepecik mahallesi parselinde, ET<sub>o</sub>: 5,61 mm/gün, ET<sub>c</sub>: 6,89

mm/gün olarak bulunmuştur. PySEBAL modeli ile elde edilen değerler Çizelge 4.8' de verilmiştir.

**Çizelge 4.8.** Tepecik arazisi 17 Tepecik 2020 PySEBAL çıktıları

Nokta No	ETref_24 (mm/gün)	Kc	ETa_24 (mm/gün)	RET (ETa / ETc)	NDVI	Biyokütle
1	7,95	0,82	6,54	0,95	0,28	79,27
2	7,95	0,81	6,45	0,94	0,25	49,75
3	7,95	0,82	6,52	0,95	0,24	46,12
4	7,95	0,84	6,68	0,97	0,27	65,91
5	7,96	0,84	6,69	0,97	0,28	73,73
6	7,94	0,88	6,98	1,01	0,32	106,27
7	7,92	0,86	6,82	0,99	0,28	74,02
8	7,94	0,86	6,86	1,00	0,28	80,5
9	7,95	1,02	8,1	1,18	0,65	373,23
10	7,94	1,05	8,34	1,21	0,7	470,84
11	7,94	1,02	8,08	1,17	0,7	468,32
12	7,95	1,04	8,25	1,20	0,68	447,09
13	7,95	1,06	8,45	1,23	0,73	606,84
14	7,95	1,09	8,65	1,26	0,76	691,17
15	7,95	1,08	8,61	1,25	0,75	678,71
16	7,95	1,07	8,51	1,24	0,75	667,64
17	7,95	1,04	8,26	1,20	0,71	503,12
18	7,95	1,08	8,62	1,25	0,77	700,13
19	7,95	1,09	8,68	1,26	0,76	690,84
20	7,95	1,1	8,77	1,27	0,75	679,98
21	7,95	1,11	8,81	1,28	0,77	692,5
22	7,95	1,05	8,31	1,21	0,71	530,92
ORT	7,95	0,98	7,82	1,13	0,56	398,95

Temmuz'un 17'sinde Tepecik arazisi için gerçekleştirilen işlemde günlük ETref 7,95 mm, Kc katsayısı 0,98 ve günlük ETa değerleri 6,92 mm ortalamasında bulunmuştur. Cropwat ile günlük 6,89 mm olarak belirlenen bitki su tüketimi model çıktısı ETa' ya 1,13 kat daha az olmuştur. Bir önceki ayla kıyaslandığında model çıktısı bitki su tüketimde günlük 2 mm arttığı görülmüştür.

Uydu görüntüsünün çekildiği 18 Ağustos 2020 günü için CropWat (Penman-Monteith) ile yapılan hesaplamada, Tepecik mahallesi parselinde, ETo: 5,43 mm/gün ETc: 3,5 mm/gün olarak bulunmuştur. PySEBAL modeli ile elde edilen değerler Çizelge 4.9’ da verilmiştir. Araziden elde edilen ETa Haritaları ise EK 4’ te verilmiştir.

**Çizelge 4.9.** Tepecik arazisi 18 Ağustos 2020 PySEBAL çıktıları

Nokta No	ETref_24 (mm/gün)	Kc	ETa_24 (mm/gün)	RET (ETa / ETc)	NDVI	Biyokütle (kg)
1	7,91	0,44	3,45	0,99	0,16	0,9
2	7,91	0,6	4,72	1,35	0,26	17,04
3	7,91	0,71	5,65	1,61	0,33	48,96
4	7,92	0,78	6,21	1,77	0,43	123,68
5	7,93	0,8	6,38	1,82	0,4	99,87
6	7,91	0,46	3,66	1,05	0,17	1,13
7	7,92	0,57	4,54	1,30	0,23	7,54
8	7,92	0,7	5,54	1,58	0,31	37,12
9	7,92	0,5	3,72	1,06	0,2	3,82
10	7,92	0,58	4,6	1,31	0,24	13,07
11	7,93	0,73	5,82	1,66	0,31	37,43
12	7,9	0,61	4,78	1,37	0,28	25,37
13	7,91	0,62	4,9	1,40	0,3	41,55
14	7,92	0,64	5,08	1,45	0,29	31,05
15	7,93	0,68	5,35	1,53	0,29	33,46
16	7,94	0,78	6,19	1,77	0,35	62,06
17	7,91	0,7	5,57	1,59	0,39	122,1
18	7,91	0,76	6	1,71	0,42	143,6
19	7,93	0,74	5,82	1,66	0,4	125
20	7,94	0,72	5,73	1,64	0,36	87
21	7,94	0,82	6,5	1,86	0,41	103,64
22	7,95	0,81	6,46	1,85	0,43	125,02
ORT	7,92	0,67	5,30	1,52	0,32	58,66

Tepecik arazisinde sonuçlarına göre Ağustos ayında artık ürünün hasat edilmiş olduğu yorumu yapılmıştır. Arazideki NDVI ve biyokütle değerleri bu durumu destekler niteliktedir. NDVI değerleri yer yer 0,3 ün altında izlemiş, biyokütle ise 30\*30 m<sup>2</sup> altında 58 kg ile çok düşük olarak gözlemlenmiştir.

#### 4.4.3. Yeşilova Mahallesi Parseli PySEBAL Çıktıları

Uydu görüntüsünün çekildiği 15 Haziran 2020 günü için CropWat (Penman-Monteith) ile yapılan hesaplamada, Yeşilova mahallesi parselinde, ETo: 4,8 mm/gün, ETc: 5,61 mm/gün olarak bulunmuştur. PySEBAL modeli ile elde edilen değerler Çizelge 4.10' da verilmiştir.

**Çizelge 4.10.** Yeşilova arazisi 15 Haziran 2020 PySEBAL çıktıları

Nokta No	ETref_24 (mm/gün)	Kc	ETa_24 (mm/gün)	RET (ETa / ETc)	NDVI	Biyokütle (kg)
1	6,5	1,09	7,07	1,26	0,72	407,77
2	6,49	0,93	6,06	1,08	0,63	209,56
3	6,5	1,12	7,26	1,29	0,74	418,69
4	6,5	1,11	7,21	1,29	0,74	414,49
5	6,49	0,99	6,44	1,15	0,67	253,82
6	6,49	1,08	7	1,25	0,72	399,63
7	6,49	1,09	7,1	1,27	0,72	405,65
8	6,5	1,09	7,08	1,26	0,73	407,07
9	6,5	1,1	7,12	1,27	0,73	407,12
10	6,49	1	6,49	1,16	0,68	255,67
11	6,49	1,03	6,71	1,20	0,7	375,69
12	6,49	1,07	6,97	1,24	0,71	395,83
13	6,49	1,09	7,09	1,26	0,72	405
14	6,49	1,07	6,97	1,24	0,72	397,47
15	6,49	1,08	7,03	1,25	0,72	402,09
16	6,49	1,07	6,92	1,23	0,71	392,21
17	6,49	1,11	7,19	1,28	0,73	415,26
18	6,49	1,08	7	1,25	0,72	401,57
19	6,49	1,02	6,62	1,18	0,7	370,6
20	6,49	1,08	7	1,25	0,72	400,75
ORT	6,49	1,07	6,92	1,23	0,71	376,797

Yeşilova arazisi Haziran 15'i için günlük ETref değerleri ortalama 6,49 mm; Kc katsayısı ortalaması 1.07 ve günlük ETa ortalaması 6,92 mm bulunmuştur. RET değerinin 1,23 olması ETa ile ETc arasında çok fark olmadığını göstermiştir. 0 ile 1 arasında olması gereken NDVI değeri 0,71 bulunmuştur.

Uydu görüntüsünün çekildiği 17 Temmuz 2020 günü için CropWat (Penman-Monteith) ile yapılan hesaplamada, Yeşilova mahallesi parselinde, ETo: 5,61 mm/gün, ETc: 6,89 mm/gün olarak bulunmuştur. PySEBAL modeli ile elde edilen değerler Çizelge 4.11' de verilmiştir.

**Çizelge 4.11.** Yeşilova arazisi 17 Temmuz 2020 PySEBAL çıktıları

Nokta No	ETref_24 (mm/gün)	Kc	ETa_24 (mm/gün)	RET (ETa / ETc)	NDVI	Biyokütle (kg)
1	7,95	1,12	8,93	1,30	0,75	680,1
2	7,95	1,02	8,15	1,18	0,7	597,3
3	7,95	1,13	8,99	1,30	0,77	700,6
4	7,95	1,13	8,99	1,30	0,79	717,2
5	7,95	1,02	8,08	1,17	0,71	547,2
6	7,94	1,13	8,98	1,30	0,77	695,5
7	7,95	1,15	9,15	1,33	0,78	714
8	7,95	1,14	9,03	1,31	0,79	716
9	7,95	1,16	9,19	1,33	0,8	727,2
10	7,95	1,07	8,52	1,24	0,73	652,5
11	7,95	1,13	8,96	1,30	0,76	688,8
12	7,95	1,17	9,32	1,35	0,79	721,6
13	7,95	1,15	9,18	1,33	0,78	710,1
14	7,95	1,13	8,95	1,30	0,77	703,8
15	7,95	1,13	8,96	1,30	0,77	702,9
16	7,95	1,13	8,99	1,30	0,77	696,2
17	7,95	1,12	8,93	1,30	0,76	690,2
18	7,95	1,1	8,75	1,27	0,76	683,5
19	7,95	1,07	8,52	1,24	0,73	655
20	7,95	1,1	8,71	1,26	0,76	683,3
ORT	7,95	1,12	8,86	1,29	0,76	684,15

Temmuz ayında Yeşilova arazisinde elde edilen değerler mevsim koşulları için makul değerlerdir. Günlük bitki su tüketimi 9 mm'ye yaklaşmış, vejetasyon indeksi ve biyokütlede artış yaşanmıştır. Kc değerlerinin bu dönemdeki mısır bitkisinin gelişim periyoduna uygun olduğu görülmüştür.

Uydu görüntüsünün çekildiği 18 Ağustos 2020 günü için CropWat (Penman-Monteith) ile yapılan hesaplamada, Yeşilova mahallesi parselinde, ETo: 5,43 mm/gün, ETc: 3,5

mm/gün olarak bulunmuştur. PySEBAL modeli ile elde edilen değerler Çizelge 4.12. de verilmiştir.

**Çizelge 4.12.** Yeşilova arazisi 18 Ağustos 2020 PySEBAL çıktıları

Nokta No	ETref_24 (mm/gün)	Kc	ETa_24 (mm/gün)	RET (ETa / ETc)	NDVI	Biyokütle (kg)
1	7,95	0,92	7,28	2,1	0,62	306,4
2	7,96	0,81	6,47	1,8	0,53	298,6
3	7,94	0,9	7,13	2,0	0,65	359,2
4	7,95	0,94	7,49	2,1	0,64	351,2
5	7,95	0,9	7,18	2,1	0,6	308
6	7,94	0,9	7,23	2,1	0,62	325,3
7	7,94	0,9	7,14	2,0	0,66	374
8	7,94	0,97	7,67	2,2	0,66	390
9	7,95	0,96	7,61	2,2	0,66	378,7
10	7,95	0,86	6,8	1,9	0,55	307,2
11	7,96	0,92	7,33	2,1	0,65	358,2
12	7,95	0,94	7,51	2,1	0,67	390,6
13	7,95	0,9	7,16	2,0	0,63	334,1
14	7,95	0,96	7,6	2,2	0,63	322,9
15	7,95	0,97	7,67	2,2	0,61	293,7
16	7,95	0,91	7,25	2,1	0,64	344
17	7,95	0,88	7	2,0	0,58	314,6
18	7,95	0,88	6,99	2,0	0,54	292,5
19	7,95	0,82	6,53	1,9	0,54	322,7
20	7,95	0,89	7,04	2,0	0,55	295,4
ORT	7,95	0,91	7,20	2,1	0,61	333,4

Ağustos ayının ortasından sonra bitki su tüketiminde gözlendiği üzere düşüş yaşanmıştır. Yine de günlük ETa değerleri cropwat çıktısı değerlerden oldukça yüksektir. RET oranı 2,1 ölçülmüştür. Ürünlerin su kaybedip kuruma başlamasından dolayı NDVI değeri ve biyokütlerde azalma görülmüştür. Yine de NDVI değeri 0,61 ile iyi bir vejetasyon göstermiştir. Araziden elde edilen ETa Haritaları EK 5' te verilmiştir.

## 5. TARTIŞMA ve SONUÇ

ET, bitkisel üretimde sulama zamanının planlanması; yani sulanacak alana ne zaman, ne kadar miktar su uygulanacağıının belirlenmesinde en önemli girdi olarak kabul edilmektedir. İklim verileri ile gerçekleşen hesaplamalar net sonuca oranla birtakım kabuller içermekte, alansal farklılıklar göz ardı edilmektedir. Arazilerde örnekleme ile yapılan ET hesaplamaları ise masraf ve zaman almasına karşın örnek miktarının belirli bir sınırdan kalmasından dolayı yine birtakım kabuller içerir. Oysaki bu çalışmada bir örneği gerçekleştirilen SEBAL yöntemleri ile daha hassas ve doğrulukta, hem de kısa sürede bir takım operasyonel işlemlerle maliyetsiz bir hesaplama gerçekleştirilmiştir. Bu faydaları sebebiyle UA' nın tarımsal kullanımı göze ardı edilemez şekilde üzerine araştırma yapılması gereken bir konu haline gelmiştir.

Bitkilerin gelişmesi ve yaşam faaliyetlerini gerçekleştirebilmesi için, doğal yağışlarla karşılanamayan su miktarının üreticiler tarafından ne zaman ne şekilde verileceğinin bilinmesi sürdürülebilir su politikaları ve tarımsal üretimin devamı için bir gerekliliktir. Bu bilgilere ulaşmanın en kolay yolunun günümüzde UA ve görüntü işleme teknikleri olduğu söylenebilir. Bu konuda ise hassaslığı ve doğruluğu kanıtlanmış modellerin kullanımı tercih edilmektedir. SEBAL modeli birçok araştırmada yüksek doğrulukta sonuçlar vermiş ve kullanılabilirliği ispatlanmıştır. Modelin yalnızca topografik özellikler açısından birkaç kısıtı bulunmaktadır.

Model ile vejetasyon dönemine göre değişen bitki su tüketimleri belirlenirken, kc bitki katsayıları belirlenmiş, bu değerlerin bitki gelişim dönemine uygun olduğu görülmüştür.

NDVI, biyokütle gibi tarımsal veriler hassas tarım teknolojilerinde de kullanım özelliği sebebiyle ayrı bir öneme sahiptir. Bu değerlerin dönemsel olarak tespitinin yapılabilmesi hassas tarımda planlanan değişken düzeyli uygulama reçetelerine veri oluşturmaktadır.

Günümüzde yeni teknolojiler sahip uydu sistemleri, bilgisayar programlamanın uzaktan algılama teknikleri ile gelişmesi bu verilerin eldesini kolaylaştırmaktadır.



Her konunun bir zorluğu olduğu gibi bu konuda da bir takım operasyonel problemler, kısıtlar söz konudur. Algoritmanın alıştırılması için kaynaklardaki farklı python sebal modülleri denenmiştir. Ancak bir kısım modüller kullanımı giderek azalan python 2 sürümünü kullanması sebebiyle çalışma sürecinde hata vermiş, gerekli eklentilerin yüklenmesi problem oluşturmuştur. şuan güncel sürüm olan python 3 ortamındaki bir kısım modüller ise yazılımsal olarak soğuk sıcak piksel seçiminde bir çeşit değişikliğe gitmiş ve bu modüller anlamlı değerler sunamamış, çalışma dışında bırakılmıştır. Bu konuda en kararlı sürüm pypi.org adresinden edinilen SEBAL modeli olmuştur.

Model iklim verilerini ve toprak verilerini hem mekansal veri (spatial data), hem de sayısal değer (number) olarak işleyebilmektedir. Mekansal veri işlemi için genellikle netCF4 tipi dosyalar kullanılmaktadır. Çeşitli kaynaklarda model tanıtımında iklim ve toprak verilerinin işlenmesi için GLDAS kaynağından edinilen NOAA nc4 dosyaları kullanılmış, bu dosyalardan ilgili verilerin temini GRASS GIS uygulaması gdal modülü kullanılarak yapılmıştır. Ancak bu mekansal verilerden ilgili parametrelerin çekilmesi ve birim dönüşümleri çeşitli yazılım döngülerini ve işlemlerini içeren bir süreçtir. Bunun yerine yürütülen araştırmada ilgili toprak ve iklim verileri sayısal olarak hazır bulunduğu için yine sisteme elle girilerek işlenmiştir.

NetCF4 dosya tipinden gerekli koordinat iklim ve toprak verilerin eldesi ile hiç arazi gözlemi ve toprak analizi yapılmadan bu yöntem uygulanabilir. Çalışmada arazi gözlemleri yapılmış, toprak verileri elde edilmiştir. Meteoroloji verileri ise MGM MEVBİS sisteminde elde edilerek işlenmiştir.

Türkiye’de Kayseri Atasever ve ark. tarafından yapılan araştırmada bir geri izleme algoritması kullanılmış, bu şekilde SEBAL sistemi modifiye edilmiştir. şuan için ise python programlama dilinin yaygınlaşması ile açık erişim kütüphaneler ve yazılım geliştiriciler sayesinde yeni versiyonlar ortaya çıkmıştır. Python ile çalışabilen ücretsiz ve kapsamlı CBS yazılımları ve eklentileri sayesinde bu hesaplamalar yapılabilmektedir. Algoritma herhangi ek bir modifiye bir yazılıma gerek kalmadan uydu verilerini doğru sonuçlar vererek işleyebilmektedir.

Buradaki kısıtlamalar, geliştirme dönemindeki farklı yazılımlardan kaynaklanmaktadır. Güncel olan versiyonlar kullanılmaması durumunda program uyumsuzluğu yaşanabilir ve geliştirme dönemindeki versiyonlarda hata oranların yüksek çıkması muhtemeldir.

UA için uydu verileri ile belirli tarihlerde gözlem yapılabilir olması, örneğin Landsat 8 uydusu için 16 günde bir veri elde ediliyor olması bu konudaki önemli bir dezavantajdır.

Bu durumda bile nisan ayından eylül ayında kadarki 6 aylık bir ürün sezonunda 10 ayrı tarihte 10 ayrı veri elde etmek mümkündür. Bu ve bu tür yöntemlerin ilerleyen süreçte daha çok gelişeceği ve kullanımının artacağı öngörülmektedir.

Yapılan çalışmada toprak ve iklim ögeleri dikkate alınarak PySEBAL UA yöntemi ile referans evapotranspirasyon, bitki katsayısı, gerçek evapotranspirasyon değerlerini gerçeğe yakın oranlarda belirlenmiş, hesaplaması yapılan NDVI ve biyokütle değerleri ise yeterli karşılaştırma ölçümleri olmağı için test edilmemiştir. Ülkemizde ve dünyanın çeşitli bölgelerinde yürütülen çalışmalar SEBAL modelinin, sulama ve su yönetimi için oldukça önemli olan bir parametresini yüksek doğrulukta tespit ettiğini göstermektedir.

## KAYNAKLAR

- Akpolat, A. (2011). Mikrometeorolojik ve Lizimetre Yöntemleriyle Belirlenen Buğday Bitki Su Tüketimlerinin Karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi. Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Aküzüm, T., Çakmak, B. ve Gökalp, Z. (2010). Türkiye’de Su Kaynakları Yönetiminin Değerlendirilmesi. Tarım Bilimleri Araştırma Dergisi 3 (1): 67-74.
- Allen, R.G., Smith, M., Perkier, A. ve Pereira L. S. (1994). An Update forthe Definition of Reference Evapotranspiration. ICID Bull., 43(2): s.1-34.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. ve Smith, M. (1998). Crop Evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. Irrigation and Drainage Paper 56, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 300 p.
- Allen, R.G., Morse, A., Tasumi, M., Bastiaanssen, W., Kramber, W. ve Anderson, H. (2001). "Evapotranspiration from Landsat (SEBAL) for water rights management and compliance with multi-state water compacts," *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2001. IGARSS '01. IEEE 2001 International*, s. 830-833.
- Allen, R.G., Tasumi, M., Morse, A. ve Trezza, R. (2005). A Landsat-based energy balance and evapotranspiration model in Western US water rights regulation and planning. *Irrigation and Drainage systems*, 19(3-4), 251-268.
- Allen, R.G., Tasumi, M., Morse, A., Trezza, R., Wright, J.L., Bastiaanssen, W., Kramber, W., Lorite, I. ve Robison, C. W. (2007). Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC) - Applications. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering-Asce*, 133 (4): 380-406.
- Allen, R.G., (2016). REF-ET: Reference evapotranspiration calculation software for FAO and ASCE Standardized equations. Reference manual. University of Idaho, Kimberly, ID, USA.
- Alves, I., ve Pereira, L. S. (2000). Non-water-stressed baselines for irrigation scheduling with infrared thermometers: a new approach. *Irrigation Science*, 19(2), 101-106.
- Anderson, M.C., Norman, J.M., Mecikalski, J. R., Otkin, J.A., ve Kustas, W.P. (2007). A climatological study of evapotranspiration and moisture stress across the continental United States based on thermal remote sensing: 1. Model formulation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 112(D10).
- Anonim (2010). Bursa Tarım İstatistikleri 2008 Yılı Faaliyet Raporu. Bursa Tarım İl Müdürlüğü. Erişim adresi: <https://bursa.tarimorman.gov.tr/>
- ASCE-EWRI (2004). The ASCE Standardized Reference Evapotranspiration Equation. Technical Committee report to the Environmental and Water Resources Institute of the

American Society of Civil Engineers from the Task Committee on Standardization of Reference Evapotranspiration. 173 p.

Atasever, Ü.H. (2016). Uzaktan Algılama Teknolojileri Kullanarak Evapotranspirasyonun Belirlenmesi, Doktora Tezi. Erciyes Üniversitesi.

Atasever Ü.H., Çobaner M., Çetin M., Özkan C. ve İnan H.İ. (2016a). SEBAL tekniği ve Landsat 8 uydu görüntüsü kullanılarak gerçek evapotranspirasyonun haritalanması: Kayseri örneği. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi* Cilt: 7, 2, 237-246.

Atasever Ü.H. ve Özkan C. (2016b). Gerçek Evapotranspirasyon Haritalama İçin Geri İzleme Arama Algoritması İle Modifiye Edilmiş Yeni Bir Sebal Yaklaşımı Ve Saha Uygulaması. 6. UZAL-CBS Sempozyumu, 5-7 Ekim 2016, Adana.

Bastiaanssen, W.G.M., Menenti, M., Feddes, R.A. ve Holtslag, A.A.M. (1998a). "A Remote Sensing Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL), 1. Formulation". *Journal of Hydrology* 212-213: 198-212.

Bastiaanssen, W.G.M., Pelgrum, H., Wang, J., Ma, Y., Moreno, J.F., Roerink, G.J. ve Van der Wal, T. (1998b). A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL).: Part 2: Validation. *Journal of Hydrology* 212-213, 213-229.

Bastiaanssen, W.G.M., Thiruvengadachari, S., Sakthivadivel, R. ve Molden. D.J. (1999). "Satellite Remote Sensing for Estimating Productivities of Land and Water". *Int. J. of Water Resource Development* 15 (2): 181-196.

Bastiaanssen, W.G.M. (2000). "SEBAL-Based Sensible and Latent Heat Fluxes in Irrigated Gediz Basin, Turkey". *Journal of Hydrology* 229: 87-100.

Bastiaanssen, W.G.M., Ahmad, M. U. D. ve Chemin, Y. (2002). Satellite surveillance of evaporative depletion across the Indus Basin. *Water resources research*, 38(12), 9-1.

Brown, K.W. ve Rosenberg, N.J. (1973). A resistance model to predict evapotranspiration and its application to a sugar beet field. *Agronomy J.*, 65(3):341-347.

Burman, R.D., Nixon, P.R., Wright, J.L. ve Pruitt, W.O. (1980a). Su gereksinimleri, 189-232.

Burman, R.D., Wright, J.L., Nixon, P.R. ve Hill, R.W. (1980b). Sulama Yönetimi - Su Gereksinimleri ve Su Dengesi.

Burman, R. ve L.O. Pochop (1994). Evaporation, evapotranspiration and climatic data. Development in atmospheric science. Elsevier, The Netherlands, 22:278.

Cao, X., Bao, A. ve Li, L. (2009). "A Study of Retrieval Land Surface Temperature and Evapotranspiration in Response to LUCS Based on Remote Sensing Data in Sanggong River," *Environmental Science and Information Application Technology. ESIAT 2009. International Conference on*, s. 325-329.

Chatterjee, S. (2010). Estimating evapotranspiration using remote sensing: A hybrid approach between MODIS derived enhanced vegetation index, Bowen ratio system, and ground based micro-meteorological data. Wright State University, Ann Arbor, s. 193.

Chemin, Y., Platonov, A., Ul-Hassan, M. ve Abdullaev, I. (2004). Using remote sensing data for water depletion assessment at administrative and irrigation-system levels: case study of the Ferghana Province of Uzbekistan. *Agricultural Water Management*, 64 (3): 183-196.

Çetin, Ö., Köksal, E.S., Yıldırım, Y.E. ve Özaydın, K.A. (2014). Türkiye’de Su Tüketim Rehberi Çalışmaları Kapsamında Bitki Su Tüketimi ve Bitki Katsayılarının Elde Edilmesi. 12. Kültürteknik Sempozyumu, 21-23 Mayıs 2014, Tekirdağ.

Demirtaş, Ç., Büyükcangaz, H., Yazgan, S. ve Candoğan, B.N. (2007). Evaluation of evapotranspiration estimation methods for sweet cherry trees (*Prunus avium*) in sub-humid climate. *Pakistan Journal of Biological Sciences* 10 (3):462-469.

Doorenbos J. ve Pruitt W.O. (1975). Guidelines for Predicting Crop Water Requirements. Irrigation and Drainage Paper 24, 1st edition., Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 179 p.

Doorenbos J. ve Pruitt W.O. (1977). Guidelines for Predicting Crop Water Requirements. Irrigation and Drainage Paper 24, 2st edition., Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 156 p.

Falkenmark, M., ve Lindh, G. (1976). Water for a starving world. Boulder: Westview Press.

Fitzgerald, G. J., Hunsaker, D.J., Barnes, E.M., Clarke, T.R., Lesch, S.M., Roth, R., Pinter Jr, P.J. (2003). Estimating Cotton Crop Water Use From Multispectral Aerial Imagery. In Irrigation Associations Exposition And Technical Conference, San Diego, Ca, Nov. 18-20. s. 138-148.

FAO Aquastat (2013). Erişim adresi: <https://www.fao.org/aquastat/en/overview/>

FAO. Cropwat 8.0, climwat 2.0 for cropwat yazılımları. Erişim adresi: <https://www.fao.org/land-water/databases-and-software>

FAO-56 (1998). FAO Sulama ve Drenaj Kağıdı No. 56. Mahsul Evapotranspirasyon (bitki su gereksinimlerinin hesaplanması için kılavuzlar)". Gıda ve Tarım Organizasyonu.

Gençoğlan, C. ve Yazar, A. (1996). Kısıntılı Su Uygulamalarının Mısır Verimine ve Su Kullanım Randımanına Etkileri, Çukurova Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarımsal Yapılar ve Sulama Bölümü, Adana.

Güngör Y. ve Yıldırım O. (1989). Tarla Sulama Sistemleri, Ankara Üniveristesi Ziraat Fakültesi Yayınları 1155, Ankara.

Güngör, Y., Erözel, A. Z. ve Yıldırım. O. (2012). Sulama (5.Baskı). Ankara Üniversitesi Ziraat Fakültesi Yayın no:1592. Ders Kitabı:544. Ankara.

Hatfield, J. L., Reginato, R.J. ve Idso, S.B. (1984). Evaluation of canopy temperature-evapotranspiration models over various crops. *Agricultural and Forest Meteorology*, 32:41-53.

Hafeez, M. ve Khan, S., (2005). Remote Sensing Application for Estimation of Irrigation Water Consumption in Liuyuankou Irrigation System in China. *Modsim 2005: International Congress on Modelling and Simulation: Advances and Applications for Management and Decision Making*: 1375-1381.

Hunsaker, D.J., Pinter, Jr. P.J., Barnes E. M. ve Kimball, B.A. (2003a). Estimating cotton evapotranspiration crop coefficients with a multispectral vegetation index. *Irrig. Sci.*22: 95-104.

Hunsaker, D.J., Pinter Jr, P.J., Fitzgerald, G.J., Clarke, T.R., Kimball, B.A. ve Barnes, E.M. (2003b). Tracking Spatial And Temporal Cotton Dt Patterns With A Normalized Difference Vegetation Index. *Irrigation Associations Exposition And Technical Conference Proceedings*, s. 126-137.

İlhan, A.İ. ve Utku, M. (1998). *GAP Sulama Alanında Bitki Su Tüketimi ve Bitki Su Gereksinimi*, Tarım Orman Meteorolojisi Sempozyumu (1998). İTÜ, İstanbul.

Idso, S.B., Pinter, Jr., P.J. ve Reginato, R.J. (1990). Non-water stressed baselines: the importance of site selection for air temperature and air vapour pressure deficit measurements. *Agricultural and Forest Meteorology*, 53:73-80.

Jackson, R.D., Reginato, R.J. ve Idso, S.B. (1977). Wheat canopy temperature: A practical tool for evaluating water requirements, *Water Resources Research*, 13(3):651-656.

Jackson, T.J. (1980). Yüzey ölçümlerinden profil toprak nemi. *Sulama ve Drenaj Dairesi Dergisi* , 106 (2), 81-92.

Jackson, R.D. (1984). Remote sensing of vegetation characteristics for farm management. In *Remote Sensing: Critical Review of Technology* (Vol. 475, pp. 81-97). SPIE.

Jang, K., Kang, S., Kim, J., Lee, C. B., Kim, T., Kim, J., Hirata, R. ve Saigusa, N. (2010). Mapping evapotranspiration using MODIS and MM5 Four-Dimensional Data Assimilation. *Remote Sensing of Environment*, 114 (3): 657-673.

Jensen, M.E. (1968). Water consumption by agricultural plants (Chapter 1).

Jensen, M.E. (1974). *Consumptive Use of Water and Irrigation Water Requirements*. ASCE, New York, USA, 215 p. Kitabı: 493.

Jensen, M.E., Burman R.D. ve Allen, R.G. (1990). Evapotranspiration and Irrigation Water Requirements, ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 70, s. 360.

Jun, X., Bingfang, W., Yuemin, Z., ve Jing, L. (2006). "Estimating Evapotranspiration using Remote Sensing in the Haihe Basin," *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2006. IGARSS 2006. IEEE International Conference on*, 2006, s. 1044-1047.

Kalkınma Bakanlığı (2018). Onbirinci Kalkınma Planı (2019-2023) Su Kaynakları Yönetimi ve Güvenliği Özel İhtisas Komisyonu Raporu, Ankara.

Kanber, R. (1997). Sulama, Çukurova Üniv. Ziraat Fak Yayınları No: 174, Adana, s. 530.

Kanber, R., Ünlü, M., Çakmak, EH ve Tüzün, M. (2007). Türkiye'de su kullanım verimliliği. Su kullanım verimliliği ve su verimliliği: WASAMED projesi. CIHEAM, Bari, s. 175-186.

Kaya, S. (2011). Yarı-Kurak İklim Koşullarında Farklı Yöntemlerle Hesaplanan Refereans Evapotranspirasyon Değerlerinin Karşılaştırılması, Bingöl Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 1(1):58-60, 2011.

Kimura, R., Okada, S., Miura, H. ve Kamichika, M. (2004). Relationships among the leaf area index, moisture availability, and spectral reflectance in an upland rice field. *Agricultural Water Management*, 69:83-100.

Kimura, R., Bai, L., Fan, J., Takayama, N. ve Hinokidani, O. (2007). Evapotranspiration estimation over the river basin of the Loess Plateau of China based on remote sensing. *Journal of Arid Environments*, 68 (1): 53-65.

Kjaersgaard, J.H., Allen, R.G., Garcia, M., Kramber, W. ve Trezza, R. (2009). Automated Selection of Anchor Pixels for Landsat based Evapotranspiration Estimation, World Environmental and Water Resources Congress: Great Rivers ASCE, 4400-4410.

Koç, T. ve Güner, Ü. (2005). Mevcut Sulama Projelerinin Fao Kriterleriyle Yeniden Değerlendirilmesi: Tavas Ovası Örneği, Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, Sayı 9, s. 93-106 Kütahya.

Kongo, M.V., Jewitt, G. W. P. ve Lorentz, S. A. (2011). Evaporative water use of different land uses in the upper-Thukela river basin assessed from satellite imagery. *Agricultural Water Management*, 98 (11): 1727-1739.

Köksal, E.S. (2007). Sulama Suyu Yönetiminde Uzaktan Algılama Tekniklerinin Kullanımı OMÜ Zir. Fak. Dergisi, 2007, 22(3):306-315.

Kustas, W.P. ve Daughtry, C.S. (1990). Estimation of the soil heat flux/net radiation ratio from spectral data. *Agricultural and Forest Meteorology*, 49(3): 205-223.

Lazzara P. ve Rana G. (2010). The use of crop coefficient approach to estimate actual evapotranspiration: a critical review for major crops under Mediterranean climate. *Ital J Agrometeorol* 25-39.

Lin, W. ve Han-qiu, X. (2008). "Study on the information extraction of Evapotranspiration and its relation with the urban heat island and urban expansion in Fuzhou City with its surrounding areas of SE China," *Earth Observation and Remote Sensing Applications. EORSA 2008. International Workshop on*, s. 1-6.

Lihong, Z., Kaishan, S., Bai, Z. ve Zongming, W. (2010). "Spatial mapping of actual evapotranspiration and water deficit with MODIS products in the Songnen Plain, 81 northeast China," *Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2010 IEEE International*, s. 879-882.

Mingming, Z., Xiyong, H., Xiao, L. ve Mingjie, L. (2011). "Spatial-temporal characters of evapotranspiration in the Yellow River Delta," *Spatial Data Mining and Geographical Knowledge Services (ICSDM), 2011 IEEE International Conference on*, s. 409-412.

Moran, M.S., Clarke, T.R., Inoue, Y. ve Vidal, A. (1994). Estimating crop water deficit using the relation between surface-air temperature and spectral vegetation index. *Remote Sensing of Environment* 49, 246-263.

Moran, M.S., Inou, Y. ve Barnes, E.M. (1997). Opportunities and limitations for image-based remote sensing in precision crop management. *Remote Sens. Environ.*, 61:319-346.

Monteith, J.L. (1965). Evaporation and environment. *Symp. Soc. Exp. Biol.* 19: 205–234.

Mutiga, J.K., Su, Z. ve Woldai, T. (2010). Using satellite remote sensing to assess evapotranspiration: Case study of the upper Ewaso Ng'iro North Basin, Kenya. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 12, Supplement 1 (0): S100-S108.

Norman, J.M., Kustas, W.P., Prueger, J.H. ve Diak, G.R. (2000). Surface flux estimation using radiometric temperature: A dual-temperature-difference method to minimize measurement errors. *Water Resour. Res.* 36(8). 2263-2274.

Özer, M.N. (1993). Evapotranspirasyon. In: Şener, S. (Ed.), *Sulama Teknolojisinde Yeni Gelişmeler Semineri*, 13-24 Eylül 1993, Tarsus, 38-48, Köy Hiz. Genel. Müd. Yayınları, No: 76, Ankara.

Pelgrum, H. ve Bastiaanssen, W.G.M. (1996). "An intercomparison of techniques to determine the area-averaged latent heat flux from individual in-situ observations: A remote sensing approach using the European Field Experiment in a Desertification-Threatened Area data", *Water Resources Research*, vol. 32(9): 2775-2786.



Penman, H.L. (1948). "Natural evaporation from open water, bare soil and grass." Proc. Roy. Soc. London, A193, 120-146.

Pereira, L.S., Allen, R.G., Smith, M. ve Raesda, D.R. (2015). Crop evapotranspiration estimation with FAO56: Past and future. *Agricultural Water Management* Vol:147 s. 4-20.

Peñuelas, J., Gamon, J.A., Fredeen, A.L., Merino, J. ve Field, C.B. (1994). Azot ve su ile sınırlı ayçiçeği yapraklarındaki fizyolojik değişikliklerle ilişkili yansıma indeksleri. *Çevrenin Uzaktan Algılanması*, 48 (2), 135-146.

Pinter, P.J. JR., Hatfield, J.L., Schepers, J.S., Barnes, E.m., Moran, S.M., Daughtry, C.S.T. ve Upchurch, D.R. (2003). Remote sensing for crop management. *Photogrammetric Engineering&Remote Sensing*, 69(6):647-664.

Priestley, C.H.B. ve Taylor, R.J. (1972). "On the assessment of surface heat flux and evaporation using large scale parameters." *Mon. Wea. Rev.*, 100, 81-92.

Sawadogo, A. (2021). Sulama Yönetiminin İyileştirilmesi İçin Uzaktan Algılama Yöntemi İle Sulama Projelerinin Performansının Değerlendirilmesi, Kou Vadisi Örneği. Doktora Tezi, Bursa Uludağ Üniversitesi.

Sánchez, J. M., Scavone, G., Caselles, V., Valor, E., Copertino, V. A. ve Telesca, V. (2008). Monitoring daily evapotranspiration at a regional scale from Landsat-TM and ETM+ data: Application to the Basilicata region. *Journal of Hydrology*, 351 (1-2): 58-70.

Seguin, B., Courault, D. ve Guerif, M. (1994). Surface temperature and evapotranspiration: Application of local scale methods to regional scales using satellite data. *Remote Sens. Environ.*, 49:287-295.

Senay, G.B., Bohms, S., Singh, R.K., Gowda, P.H., Velpuri, N.M., Alemu, H. ve Verdin, J.P. (2013). Operational Evapotranspiration Mapping Using Remote Sensing and Weather Datasets: A New Parameterization for the SSEB Approach. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association* 49, 577-591.

Singh, R.K., Irmak, A., Irmak, S. ve Martin, D.L. (2008). Application of SEBAL Model for Mapping Evapotranspiration and Estimating Surface Energy Fluxes in South-Central Nebraska. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 134, 273-285.

Stone, L.R. ve Horton, M.L. (1974). "Estimating Evapotranspiration using canopy temperatures: Field evaluation", *Agronomy J.*, 66:450-454.

Su, H. (2008). An evaluation of retrieving terrestrial evapotranspiration from remotely sensed data. Princeton University, Ph.D., Ann Arbor.

Sun, Z., Wei, B., Su, W., Shen, W., Wang, C., You, D. ve Liu, Z. (2011). Evapotranspiration estimation based on the SEBAL model in the Nansi Lake Wetland of China. *Mathematical and Computer Modelling*, 54 (3-4): 1086-1092.

Smith, M., Allen, R. ve Pereira, L. (1996). Revised FAO methodology for crop water requirements. Proceeding of the International Conference. (Eds. C.R. Camp, E.J. Sadler, and R.E. Yoder). 3-6 November, San Antonio, TX. s. 116-123.

Swanson, S. A. (2008). Determining the feasibility of using remote sensing to estimate irrigation water use in South Dakota at the field scale. South Dakota State University, M.S., Ann Arbor.

Şarlı, E. (2019). Programlanabilir Lojik Kontrolör (Pcl) Temelli İklim İstasyonu İçin Bitki Su Tüketimi Yazılımının Geliştirilmesi: Mısır (*Zea Mays* L.) Örneği, Yüksek Lisans Tezi. Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi.

TAGEM (2017). Bitki Su Tüketimi Rehberi. Ankara.

TAGEM. Suet hesaplama sistemi uygulaması v1 beta sürümü. Erişim adresi: <https://tagemsuet.tarimorman.gov.tr>

Tasumi, M. (2003). Progress in operational estimation of regional evapotranspiration using satellite imagery. University of Idaho, Ph.D., Ann Arbor.

Tarantino, E. ve Spano, D. (2001). La valutazione dei fabbisogni irrigui.

Teixeira, A.H. d. C., Bastiaanssen, W.G.M., Ahmad, M.D. ve Bos, M.G. (2009). Reviewing SEBAL input parameters for assessing evapotranspiration and water productivity for the Low-Middle São Francisco River basin, Brazil: Part A: Calibration and validation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 149 (3-4): 462-476, Part B: Application to the regional scale. *Agricultural and Forest Meteorology* 149, 477-490.

Tolk, J. (2000). Predicting crop water use- The new FAO-56 Methodology. *Water Management Research Unit Newsletter*. Vol. 4, No. 1 USDA, USA.

Trezza R., Allen R.G., Kilic A., Ratcliffe I., Masahiro Tasumi M. (2018). Influence of Landsat Revisit Frequency on Time-Integration of Evapotranspiration for Agricultural Water Management, *Advanced Evapotranspiration Methods and Applications*.

TÜİK (2018). Türkiye İstatistik Kurumu Başkanlığı, “Sektörel Su ve Atıksu İstatistikleri, 2018” Haber Bülteni, Sayı: 30673.

Uçak, A.B., Gençoğlan, C., Değirmenci, H. (2013). The Effect of Direct and Traditional Seeding Methods and Different Water Levels on the Water–Yield Relationship of Drip Irrigated Corn. *Journal of Food, Agriculture Environment*, 11(3-4), 828-833.

USGS (2015). *Landsat 8 (L8) Data Users Handbook*. 1.0 ed. United States Geological Survey, USA.

USGS. Dünya'nın suyu nerede? Erişim adresi: <https://www.usgs.gov/special-topics/water-science-school/science/where-earths-water>

USGS (2021). USGS Landsat 8 Seviye-1 Veri Ürünleri Kullanımı. Erişim adresi: <https://www.usgs.gov/landsat-missions/using-usgs-landsat-level-1-data-product>

Ünlükara, A., Yürekli, K., Anlı, A.S. ve Örs, İ. (2010). Kayseri İlinin RDI (Reconnaissance) İndeksine Göre Kuraklığının Değerlendirilmesi, Tarım Bilimleri Araştırma Dergisi, 3(1):13-17.

QGIS. CBS (Coğrafi Bilgi Sistemleri) QGIS Desktop 3.16.10 yazılımı ve GRASS GIS 7.8.5 eklentisi. Erişim adresi: <https://qgis.org/>

Waters, R., Allen, R., Bastiaanssen, W., Tasumi, M. ve Trezza, R. (2002). Sebal. Arazi için Yüzey Enerji Dengesi Algoritmaları. Idaho Uygulaması. Gelişmiş Eğitim ve Kullanım Kılavuzu, Idaho, ABD.

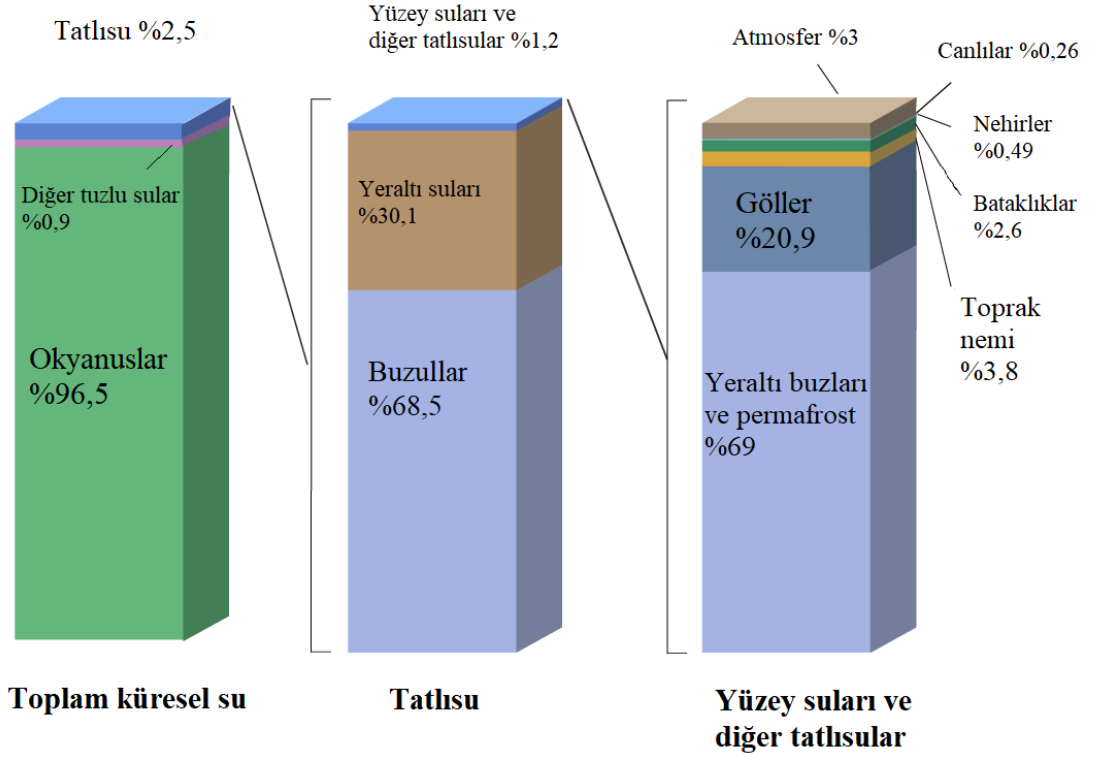
Wu, B., Yan, N., Xiong, J., Bastiaanssen, W.G.M., Zhu, W., ve Stein, A. (2012). Validation of ETWatch using field measurements at diverse landscapes: A case study in Hai Basin of China. *Journal of Hydrology*, 436, 67-80.

WWAP (2013). The United Nations World Water Development Report 2013. United Nations World Water Assessment Programme (WWAP). Paris, United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization.

## **EKLER**

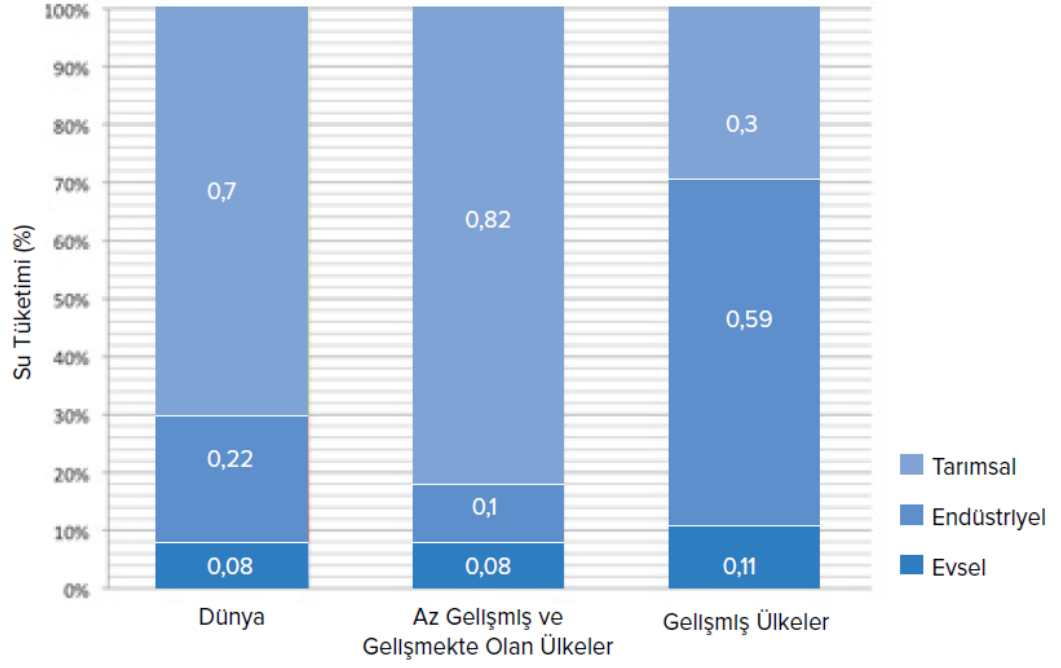
- EK 1** Dünya'nın Suyu Nerede?
- EK 2** Dünya'da Suyun Kullanım Alanları Grafiği
- EK 3** Bakırköy Arazisi Gerçek Evapotranspirasyon Haritaları
- EK 4** Tepecik Arazisi Gerçek Evapotranspirasyon Haritaları
- EK 5** Yeşilova Arazisi Gerçek Evapotranspirasyon Haritaları

## EK 1 Dünya'nın Suyu Nerede?



**Ek Şekil 1.** Mevcut suyun yeryüzündeki dağılımı (<https://www.usgs.gov/special-topics/water-science-school/science/where-earths-water>)

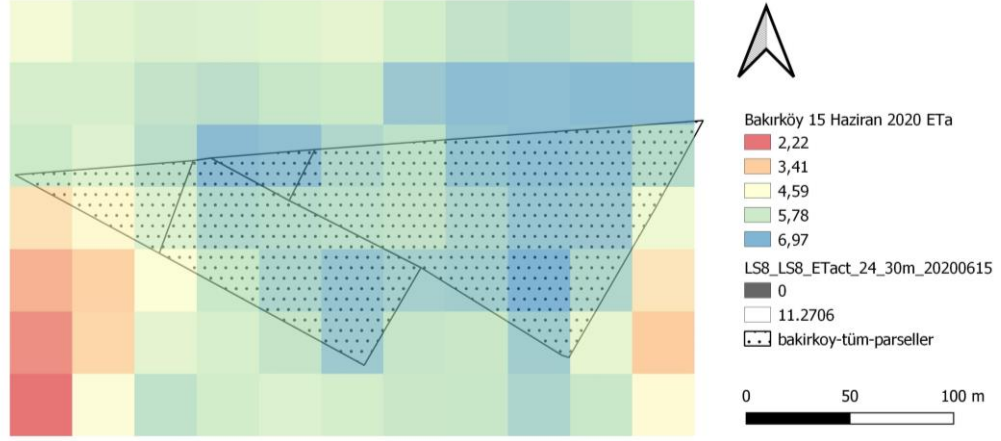
## EK 2 Dünya’da Suyun Kullanım Alanları



**Ek Şekil 2.** Ülkelerin gelişmişlik düzeyine göre su kullanım alanları (Aküzüm ve ark., 2010)

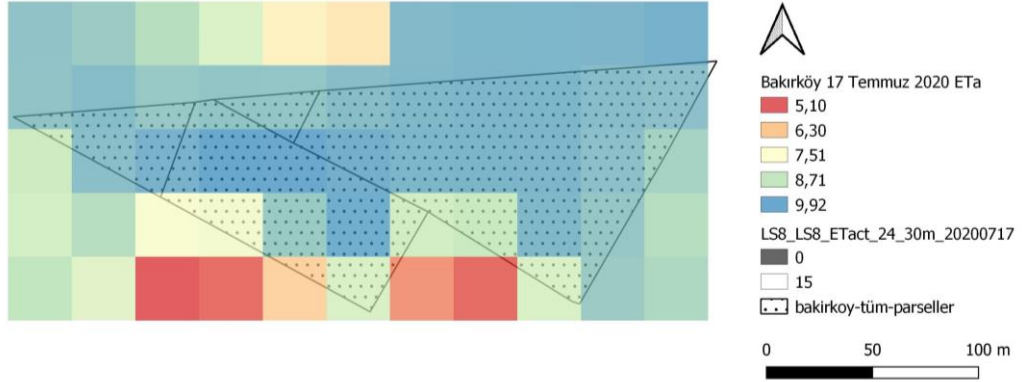
### EK 3 Bakırköy Arazisi Gerçek Evapotranspirasyon Haritaları

Bakırköy Arazisi 15 Haziran 2020 Gerçek Evapotranspirasyon Haritası



Ek Şekil 3.1. Bakırköy arazisi 15 Haziran 2020 gerçek ETa sonuçları

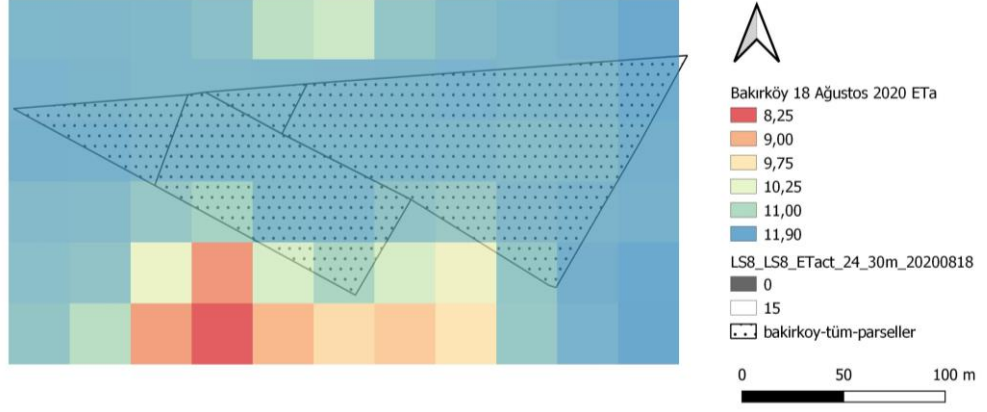
Bakırköy Arazisi 17 Temmuz 2020 Gerçek Evapotranspirasyon Haritası



Ek Şekil 3.2. Bakırköy arazisi 17 Temmuz 2020 gerçek ETa sonuçları

### EK 3 Bakırköy Arazisi Gerçek Evapotranspirasyon Haritaları (Devam)

Bakırköy Arazisi 18 Ağustos 2020 Gerçek Evapotranspirasyon Haritası

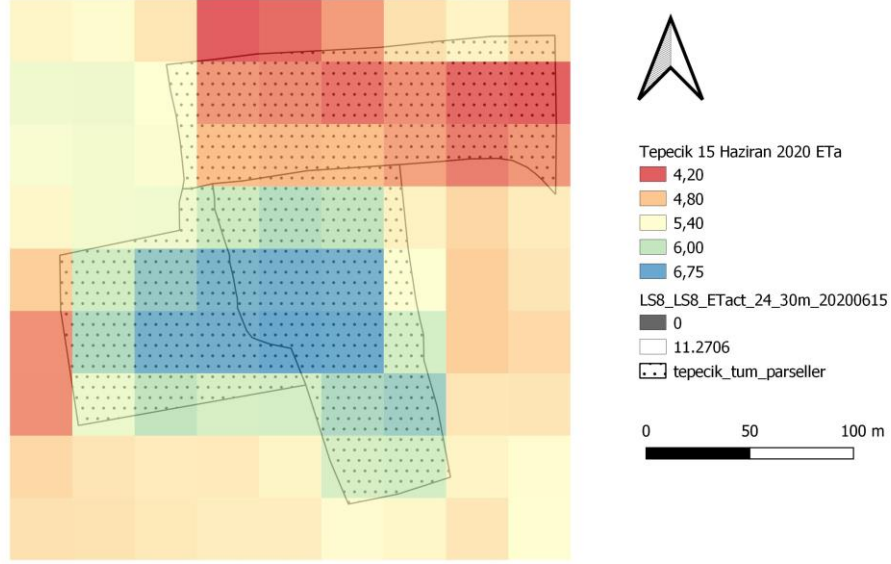


**Ek Şekil 3.3.** Bakırköy arazisi 18 Ağustos 2020 gerçek ETA sonuçları



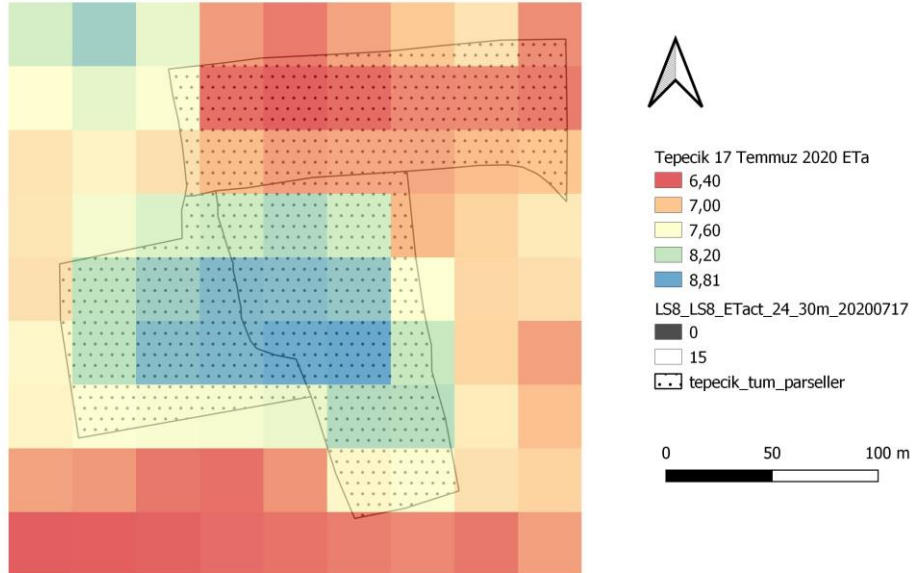
## EK 4 Tepecik Arazisi Gerçek Evapotranspirasyon Haritaları

Tepecik Arazisi 15 Haziran 2020 Gerçek Evapotranspirasyon Haritası



Ek Şekil 4.1. Tepecik arazisi 15 Haziran 2020 gerçek ETa sonuçları

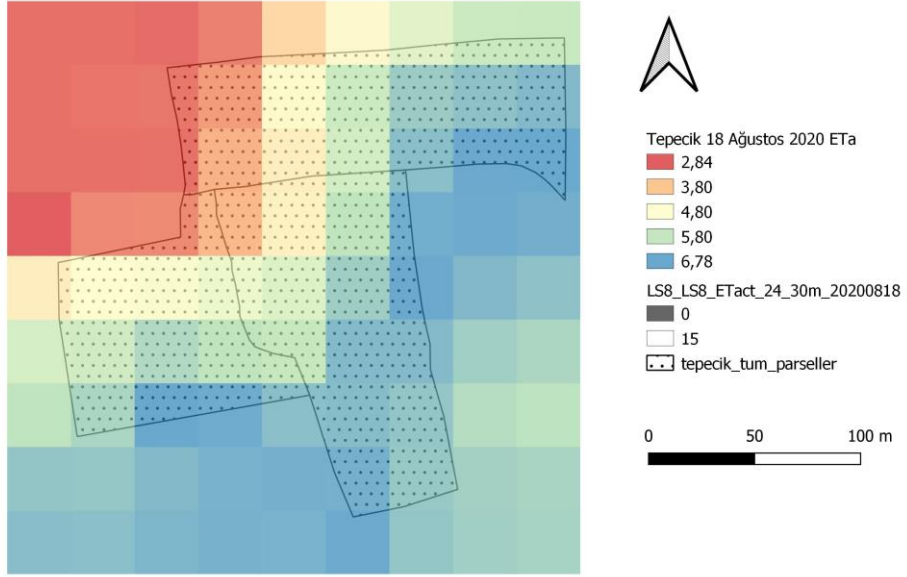
Tepecik Arazisi 17 Temmuz 2020 Gerçek Evapotranspirasyon Haritası



Ek Şekil 4.2. Tepecik arazisi 17 Temmuz 2020 gerçek ETa sonuçları

## EK 4 Tepecik Arazisi Gerçek Evapotranspirasyon Haritaları (Devam)

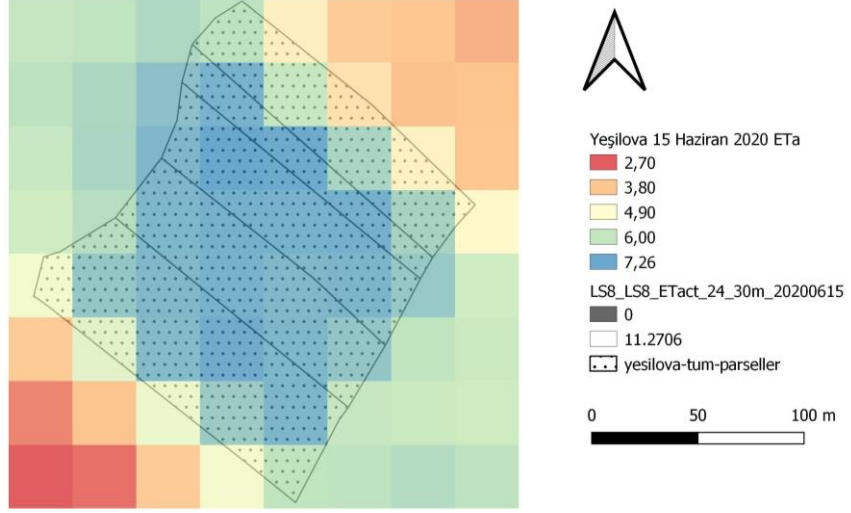
Tepecik Arazisi 18 Ağustos 2020 Gerçek Evapotranspirasyon Haritası



**Ek Şekil 4.3.** Tepecik arazisi 18 Ağustos 2020 gerçek ETa sonuçları

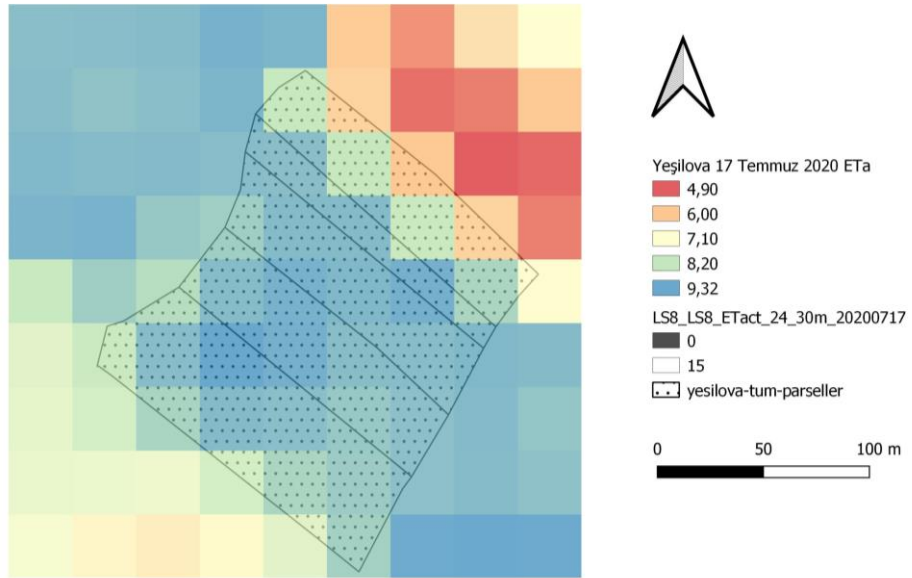
## EK 5 Yeşilova Arazisi Gerçek Evapotranspirasyon Haritaları

Yeşilova Arazisi 15 Haziran 2020 Gerçek Evapotranspirasyon Haritası



Ek Şekil 5.1. Yeşilova arazisi 15 Haziran 2020 gerçek ETa sonuçları

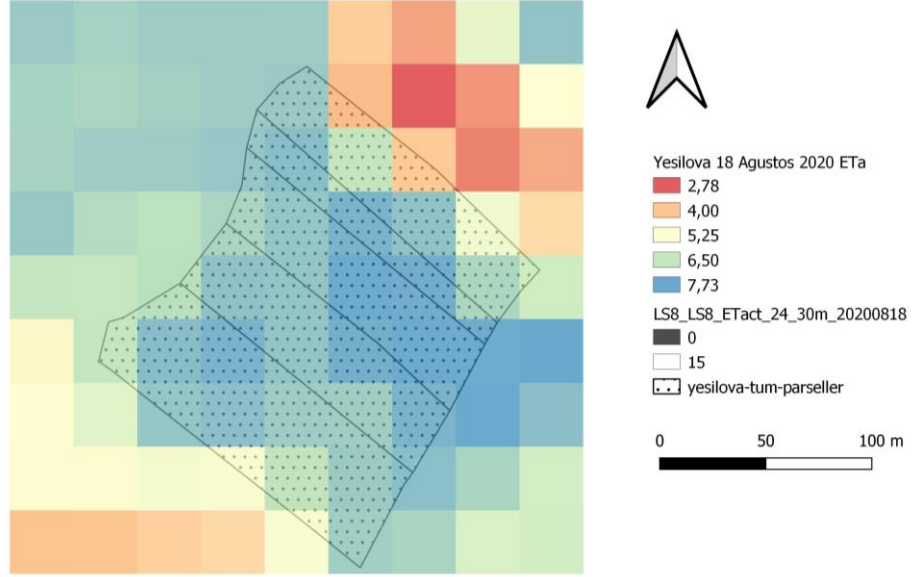
Yeşilova Arazisi 17 Temmuz 2020 Gerçek Evapotranspirasyon Haritası



Ek Şekil 5.2. Yeşilova arazisi 17 Temmuz 2020 gerçek ETa sonuçları

## EK 5 Yeşilova Arazisi Gerçek Evapotranspirasyon Haritaları (Devam)

Yeşilova Arazisi 18 Ağustos 2020 Gerçek Evapotranspirasyon Haritası



Ek Şekil 5.3. Yeşilova arazisi 18 Ağustos 2020 gerçek ETa sonuçları

## ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Mücahid CAN  
Doğum Yeri ve Tarihi : 26.09.1990  
Yabancı Dil : İngilizce

Eğitim Durumu

Lise : İbrahim Önal Anadolu Öğretmen Lisesi  
Lisans : Bursa Uludağ Üniversitesi Ziraat Fakültesi  
Biyosistem Mühendisliği Programı

Yüksek Lisans : Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü  
Biyosistem Mühendisliği ABD, Arazi Su Kaynakları BD

Çalıştığı Kurum/Kurumlar : Siberetik Yazılım Tasarım Ltd. Şi.  
TÜBİTAK 1002 - Araştırmacı

İletişim (e-posta) : mucahidican@gmail.com