

**SULAMA YÖNETİMİNİN İYİLEŞTİRİLMESİ İÇİN
UZAKTAN ALGILAMA YAKLAŞIMI İLE SULAMA
PROJELERİNİN PERFORMANSININ
DEĞERLENDİRİLMESİ, BURKİNA FASO, KOU VADİSİ
ÖRNEĞİ**

Alidou SAWADOGO



T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**SULAMA YÖNETİMİNİN İYİLEŞTİRİLMESİ İÇİN UZAKTAN ALGILAMA
YAKLAŞIMI İLE SULAMA PROJELERİNİN PERFORMANSININ
DEĞERLENDİRİLMESİ, BURKİNA FASO, KOU VADİSİ ÖRNEĞİ**

Alidou SAWADO
0000-0002-7437-8415

Prof. Dr. Kemal Sulhi GÜNDOĞDU
(Danışman)

DOKTORA TEZİ
BİYOSİSTEM MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2021
Her Hakkı Saklıdır

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 yararlanması 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.

07/07/2021

Alidou SAWADOGO

ÖZET

Doktora Tezi

SULAMA YÖNETİMİNİN İYİLEŞTİRİLMESİ İÇİN UZAKTAN ALGILAMA YAKLAŞIMI İLE SULAMA PROJELERİNİN PERFORMANSININ DEĞERLENDİRİLMESİ, BURKİNA FASO, KOU VADİSİ ÖRNEĞİ

Alidou SAWADO

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Biyosistem Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Kemal Sulhi GÜNDOĞDU

İklim koşulları ile birlikte sulamada suyun randımanlı kullanımı üzerindeki baskı artmaktadır. Düzenli performans değerlendirmeleri yapmak için kaynak eksikliği göz önüne alındığında, sulama suyu yönetimini iyileştirmek ve bitkisel üretimi sürdürmek için uygun maliyetli performans değerlendirme metodolojilerinin kullanılması kritik öneme sahiptir. Çalışma alanı olarak, Burkina Faso'nun güneybatısında yer alan 1200 hektarlık Kou vadisi sulama alanı (KVIS) seçilmiş, 2013 ve 2014 yıllarının kurak mevsimleri için çalışma gerçekleştirilmiştir. KVIS sulama performansının farklılık gösterdiği, yetiştirilen bitkiye ve coğrafi konumuna bağlı olarak değiştiği gözlenmiştir. Sulama alanında konumsal bağlı kademeli olarak değişen rölatif evapotranspirasyon değeri gözlenmiştir. Su stres seviyelerine göre, iyi sulanan alandan orta seviyede sulanan alana kadar, yüksek su stresli alandan çok yüksek su stresli alanlara kadar sınıflar gözlenmiştir. Su tüketim homojenliğine göre ise, orta düzeyden iyi düzeye kadar sınıflar gözlenmiştir. Bitki su verimliliği (CWP) değeri, çalışılan iki yıl için konumsal değişiklik göstermiştir. ET_a ve CWP'yi etkileyen ana fizikokimyasal faktörler ise, arazi ile ana kanal su alım noktası arasındaki mesafe (D_{PS1}), tarla yüksekliği, kum ve silt içerikleri, toprak toplam azotu, ekstrakte edilebilir potasyum ve çinko olarak elde edilmiştir. ET_a veya CWP'deki değişkenliği açıklamada D_{PS1} en çok katkıda bulunan değişken olmuştur. Çalışma ile uzaktan algılama tabanlı metodolojilerin, veri kıtlığı ve kaynak kısıtlılığı olan sulama alanlarında, sulama suyu yönetiminin iyileştirilmesi için, karar destek araçları olarak hizmet etme potansiyeli ortaya konulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Su yönetimi, gıda güvenliği, uzaktan algılama, sulama, Sahra Altı Afrika

2021, x + 101 Sayfa1.

ABSTRACT

PhD Thesis

ASSESSING IRRIGATION SCHEME PERFORMANCE USING REMOTE SENSING FOR
IMPROVING WATER MANAGEMENT IN BURKINA FASO

Alidou SAWADO

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

Supervisor: Prof. Dr. Kemal Sulhi GÜNDOĞDU

Given the increasing pressure on water for agricultural irrigation, coupled with unpredictable climate conditions, and with the lack of resources to carry out regular performance assessments, the use of cost-effective methodologies is critically important to improve irrigation water management and sustain crop production in irrigation schemes. In this study, a remote sensing-based methodology was developed to assess the spatial and temporal performance patterns of a 1200-ha irrigation scheme, the Kou Valley irrigation scheme (KVIS) during two consecutive cropping seasons (2013 and 2014). The analysis of the KVIS irrigation performance indicated varying spatial performance depending on the year, crop, and the crop's geographical position in the irrigation scheme. A gradient of spatially varied relative evapotranspiration was observed across the scheme resulting in four main areas according to water stress levels (from well-watered areas to moderately, highly and very highly water-stressed areas), with the uniformity of water consumption being fair to good. Results also showed large spatial variation of CWP during the study years, with sweet potato achieving relatively good performance compared to the two other crops. Distance between field and the irrigation scheme inlet (D_{PSI}), field elevation, sand and silt contents, soil total nitrogen, extractable potassium, and zinc were the main biophysical factors affecting rice ET_a and CWP. The importance of each of these variables in explaining the variability in ET_a or CWP varied according to the modelling approach although D_{PSI} was the most-contributing variable. Our findings ascertain the potential of remote sensing-based methodologies to serve as a basis for improved irrigation water management in decision support tools in data-scarce and resource-limited environments.

Key words: Water management, food security, remote sensing, irrigation, Sub-Saharan Africa

2021, x + 101 Pages.

TEŞEKKÜR

Bu doktora tezini üstlenmek benim için büyük bir mücadele ve eşsiz bir yaşam deneyimi oldu. Tezin kavramsallaştırılması, yazılması, gözden geçirilmesi ve düzenlenmesi süresince, bu araştırmanın tamamlanmasını mümkün kılan sürekli rehberlik, destek, teşvik ve yardım aldım.

İlk olarak beni doktora öğrencisi olarak tereddüt etmeden kabul eden hocam Prof. Dr. Kemal Sulhi Gündoğdu'ya teşekkür ederim. Sabrınız, anlayışınız, sürekli desteğiniz ve cesaretlendirmeniz için teşekkür ederim. Siz olmadan tezimi başarıyla bitirmem mümkün olmazdı.

Araştırma sürecim boyunca değerli rehberliği ve katkıları için Dr. Louis Kouadio, Dr. Farid Traoré, Dr. Sander J. Zwart, Dr. Elliott Dossou-Yovo ve Tim Hessels'e çok müteşekkirim. Bu çalışma boyunca sürekli benimle olduğunuz için teşekkür ederiz. İlgörülü geri bildirimleriniz, tavsiyeleriniz, teşvikleriniz ve destekleriniz bu araştırma döneminde bana destek verdi. Çalışmamı daha yüksek bir bilimsel düzeye getirdiniz ve deneyimlerinizden çok şey öğrendim. Yakın gelecekte sizinle çalışabilmeyi umuyorum. Yapıcı yorum ve öneriler için Dr. Abebe Chukalla'ya da teşekkür ederim.

Bu vesileyle Yurtdışı Türkler ve Akraba Topluluklar Başkanlığı'na (YTB) doktora çalışmalarımı finanse ettiği için teşekkür etmek istiyorum.

Kou Valley sulama sistemi yöneticilerine, özellikle de Bay Lassané Kaboré'ye mahsul verimi ve yönetim verilerini paylaştıkları için minnettarım.

Prof. Dr. Hasan Değirmenci'ye ve Prof. Dr. Ş.Tülin Akkaya Aslan'a bu tez boyunca denetimleri için çok teşekkür ederim.

Ayrıca derslerim süresince gösterdiği büyük emek ve yardımlardan dolayı Prof. Dr. Ali Osman Demir'e minnettarlığımı sunarım.

Son olarak, bu araştırma süresince devam eden destekleri ve cesaretlendirmeleri için aileme en derin şükranlarımı sunuyorum. Koşulsuz desteğiniz ve dualarınız için teşekkürler.

Alidou SAWADOGO
07/07/2021

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	v
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	vii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ.....	x
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xiii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xv
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Küresel Su ve Gıda Güvenliği.....	1
1.2. Sorun Bildirimi.....	2
1.3. Sulama Performansı için Uzaktan Algılama İmkanı.....	3
1.4. Tez Amacı.....	4
1.5. Tez Kapsamı.....	5
2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	7
2.1. Sulama Performans Değerlendirmesi.....	7
2.2. Sulama Performans Değerlendirmesine İlişkin Geleneksel ve Yeni Kavramlar.....	9
2.3. Sulama Performans Göstergeleri.....	10
2.3.1.Yeterlilik.....	11
2.3.2.Eşitlik.....	13
2.3.3.Etkinlik.....	14
2.3.4.Bağımlılık.....	15
2.3.5.Güvenilirlik.....	16
2.3.6.Verimlilik.....	17
2.3.7.Sürdürülebilirlik.....	18
2.3.8.Uluslararası su yönetimi enstitüsü (IWMI) göstergeleri.....	19
2.4. Sulama Performans Göstergeleri ve Uzaktan Algılama.....	20
2.5. Sulama Performans Göstergeleri Standartları.....	24
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	26
3.1. Materyal.....	26
3.1.1.Çalışma alanı.....	26
3.1.2.Landsat görüntüleri.....	27
3.1.3.FAO su verimliliği açık erişim ET _a verileri.....	28
3.1.4.İklim ve sayısal yükseklik modeli verileri.....	29
3.1.5.Arazi verileri.....	29
3.1.6.Fizikokimyasal veriler.....	31
3.2. Yöntem.....	32
3.2.1.Gerçek evapotranspirasyonun konumsal-zamansal varyasyonu.....	32
3.2.2.Konumsal-zamansal performans göstergeleri.....	38
3.2.3.Sulama performansını belirleyen fizikokimyasal faktörler.....	44
4. BULGULAR.....	49
4.1. Gerçek Evapotranspirasyonun Konumsal-Zamansal Varyasyonu.....	49
4.1.1.Gerçek evapotranspirasyonun zamansal dağılımı.....	49
4.1.2.Sezonluk gerçek evapotranspirasyonun konumsal dağılımı.....	49
4.1.3.PySEBAL ve FAO-WaPOR ET _a değerlerinin karşılaştırılması.....	50
4.2. Konumsal-Zamansal Performans Göstergeleri.....	51
4.2.1.Ana mahsullerin verimi ve sezonluk gerçek evapotranspirasyon.....	51
4.2.2.Sulama performans göstergeleri.....	54

4.3. Sulama Performansını Belirleyen Fizikokimyasal Faktörler.....	59
4.3.1.Çeltik yetiştirme ortamı, ET_a ve CWP.....	59
4.3.2.Gerçek evapotranspirasyon ve bitki su verimliliği belirleyicileri.....	60
4.3.3.LMM ve RF tabanlı modellerin performansının karşılaştırılması.....	66
5. TARTIŞMA VE SONUÇ.....	67
5.1. Tartışma.....	67
5.1.1.Gerçek evapotranspirasyonun konumsal-zamansal değişimi.....	67
5.1.2.Konumsal-zamansal sulama performans göstergeleri.....	68
5.1.3.Sulama performansını etkileyen fizikokimyasal faktörler.....	71
5.1.4.Çalışmanın kısıtları ve gelecek çalışmalar.....	72
5.2. Sonuç.....	73
KAYNAKLAR.....	75
EKLER.....	97
EK 1.....	98
EK 2.....	99
EK 3.....	100
EK 4.....	101
EK 5.....	102
EK 6.....	104
ÖZGEÇMİŞ.....	105

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
AF	: Adveksiyon Faktörü (-)
APAR	: Absorbe Edilen Fotosentetik Aktif Radyasyon (MJ m^{-2})
CV	: Varyasyon Katsayısı (%)
c_p	: Sabit Basıncıdaki Havanın Özgül Isısıdır ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)
ϵ	: Işık Kullanım Verimliliğidir (g MJ^{-1})
EC	: Elektriksel İletkenlik (S m^{-1})
EF	: Evaporatif Fraksiyon (-)
ϵ_{max}	: Maksimum Işık Kullanım Verimliliğidir (g MJ^{-1})
ET	: Evapotranspirasyon (mm)
ET_0	: Referans Evapotranspirasyon (mm day^{-1})
ET_a	: Gerçek Evapotranspirasyon (mm)
ET_p	: Potansiyel Evapotranspirasyondur (mm)
f	: APAR/PAR Fraksiyon (-)
G	: Toprak Isı Akısı (W m^{-2})
H	: Hissedilir Isı Akısı (W m^{-2})
HI	: Hasat Endeksi (-)
K_c	: Bitki Katsayısı (-)
LAI	: Yaprak Alan Endeksi ($\text{m}^2 \text{m}^{-2}$)
NDVI	: Normalize Edilmiş Bitki Örtüsü Endeksi (-)
P	: Yağış (mm)
PAR	: Fotosentetik olarak aktif radyasyon (MJ m^{-2})
r_{ah}	: Isı Aktarımına Aerodinamik Direnç (s m^{-1})
R_n	: Net Radyasyon (W m^{-2})
T_s	: Yüzey Sıcaklığı (K)
α	: Yüzey Albedosu (-)
λE	: Gizli Isı Akısını (W m^{-2})
ρ_w	: Su Yoğunluğu (kg m^{-3})
$RL\uparrow$: Giden Uzun Dalga Radyasyonu (W m^{-2})
$RL\downarrow$: Gelen Uzun Dalga Radyasyonu (W m^{-2})
$RS\downarrow$: Gelen Kısa Dalga Radyasyonudur (W m^{-2})
e_{act_24}	: 24 Saatlik Ortalama Gerçek Buhar Basıncı (kPa)
e_{sat_24}	: 24 saatlik ortalama doymuş buhar basıncı (kPa)
ϵ_0	: Yüzey Salınımı (-)

Kısaltmalar	Açıklama
ASTER	: Gelişmiş Uzay Kaynaklı Termal Emisyon ve Yansıma Radyometresi
AVHRR	: Gelişmiş Çok Yüksek Çözünürlüklü Radyometre
CWP	: Bitki Su Verimliliği
DEM	: Sayısal Yükseklik Modeli
e_a	: Arazi Uygulama Verimliliği
e_c	: İletim Verimliliği
e_d	: Dağıtım Verimliliği
e_p	: Toplam Sulama Verimliliği
e_s	: Sulama Sistem Verimliliği
ETM+	: Gelişmiş Tematik Mapper Plus
e_u	: Tersiyer Kanal Verimliliği
FAO	: Gıda ve Tarım Örgütü
ICID	: Uluslararası Sulama ve Drenaj Komisyonu
IMF	: Dünya Bankası ve Uluslararası Para Fonu
IWMI	: Uluslararası Su Yönetimi Enstitüsü
KVIS	: Kou Vadisi Sulama Planı
LMM	: Doğrusal Karışık Model
METRIC	: İçselleştirilmiş Kalibrasyon ile Evapotranspirasyonu Yüksek Çözünürlükte Haritalama
MODIS	: Orta Çözünürlüklü Görüntüleme Spektroradyometresi
<i>Moist</i>	: Nemlilik
NASA	: Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi
NERICA	: Afrika İçin Yeni Çeltik Çeşidi
NGO	: Sivil toplum örgütleri
NOAA	: Ulusal Okyanus ve Atmosfer İdaresi
NP	: Mahsulün kg başına Besin İçeriği
O&M	: İşletme ve Bakım
OLI	: Operasyonel Arazi Görüntüleyici
P_A	: Yeterlilik Göstergesi
P_D	: Güvenilirlik Göstergesi
P_E	: Eşitlik Göstergesi
P_F	: Verimlilik Göstergesi
PySEBAL	: SEBAL Modelinin Python Modülü
R	: Bölge
RF	: Rastgele Orman Modeli
RIS	: Rölatif Sulama Temini
UA	: Uzaktan Algılama
RWS	: Su Temini Oranı
SEBAL	: Arazi İçin Yüzey Enerji Dengesi Algoritması

SEBS	: Yüzey Enerji Dengesi Sistemi
SGVP	: Standartlaştırılmış Brüt Üretim Değeri
SRTM	: Mekik Radar Topografya Görevi
SSA	: Sahra Altı Afrika
S-SEBI	: Basitleştirilmiş Yüzey Enerji Dengesi Endeksi
TIRS	: Termal Kızılötesi Sensör
UCRB	: Bama Çeltik Kooperatifleri Birliğı
VIIRS	: Görünür Kızılötesi Görüntüleme Radyometre Paketi
WaPOR	: Su Verimliliğı Açık Erişim
WUA	: Su Kullanıcıları Derneğı

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 1.1. Tez aşamaları.....	6
Şekil 2.1. İç içe sistemler ve sulama.....	8
Şekil 2.2. Sulanabilir bir alanın şematik su dengesi.....	12
Şekil 2.3. Tipik güvenilirlik analizi.....	17
Şekil 2.4. Performans göstergelerinin kullanımına ilişkin terminoloji.....	25
Şekil 3.1. Burkina Faso Kou Vadisi sulama alanında sulama kanallarının ve bloklarının (A) ve baskın toprak türlerinin dağılımı (B).....	27
Şekil 3.2. WaPOR veri bileşeni akış şeması.....	28
Şekil 3.3. Çalışma dönemi boyunca Kou Vadisi sulama alanında ana kanalın (A) su akış hızları ve yağış oranları (B).....	30
Şekil 3.4. 2013 ve 2014 yıllarında kurak mevsim üretim döneminde KVIS sulama alanındaki arazi kullanımı.....	31
Şekil 3.5. Landsat 7 ETM+ görüntüsü enterpolasyon öncesi (A) ve sonrası (B).....	34
Şekil 3.6. Kou vadisi sulama alanında gerçek evapotranspirasyonu değerlendirmek için kullanılan yaklaşımı açıklayan şematik akış şeması.....	37
Şekil 3.7. Kou vadisi sulama alanı sulama performansını değerlendirmek için kullanılan yaklaşımı açıklayan şematik akış çizelgesi.....	43
Şekil 3.8. KVIS'te sulama performansını belirleyen fizikokimyasal faktörleri değerlendirmek için kullanılan akış çizelgesi.....	48
Şekil 4.1. Ortalama ET_a 'nın Ocak-Nisan 2013 ve 2014'te KVIS'teki zamansal dağılımı.....	49
Şekil 4.2. Ocak-Nisan 2013 ve 2014 boyunca KVIS'teki sezonluk ET_a 'nın konumsal dağılımı.....	50
Şekil 4.3. PySEBAL ve FAO-WaPOR kullanılarak elde edilen ET_a değerlerinin karşılaştırılması: 2013 yılı (A, B) ve 2014 yılı (C, D).....	51
Şekil 4.4. 2013 ve 2014 yıllarındaki kurak mevsim üretim dönemi boyunca Kou vadisi sulama alanındaki çeltik, mısır ve tatlı patates arazileri için sezonluk ET_a	52
Şekil 4.5. Kou vadisi sulama alanında 2013 ve 2014 yıllarındaki kurak mevsim üretim dönemi boyunca çeltik, mısır ve tatlı patates verim tahminleri.....	53
Şekil 4.6. Su tüketim oranının Kou Vadisi sulama alanında 2013 ve 2014 yılları için değişimi (Zayıf ve iyi performansı ayırt etmek için eşikler, kesik çizgilerle gösterilmiştir).....	55
Şekil 4.7. 2013 ve 2014 yıllarındaki kurak mevsim üretim dönemi boyunca Kou vadisi sulama alanındaki sezonluk ortalama rölatif evapotranspirasyonun (ET_{rel}) konumsal dağılımı.....	55
Şekil 4.8. KVIS havzasında 2013 ve 2014 yılları Ocak-Nisan aylarında rölatif evapotranspirasyonun değişimi.....	56
Şekil 4.9. Ocak-Nisan 2013 ve 2014 'de çeltik, mısır ve tatlı patates için su tüketiminin homojenliğinin değişimi.....	57
Şekil 4.10. Çeltik, mısır ve tatlı patates için tahmini bitki su verimliliğinin konumsal dağılımı.....	58
Şekil 4.11. Nakagawa'nın çeltik gerçek evapotranspirasyon (A) ve bitki su verimliliği (B) için marjinal R^2 değeri açısından her bir parametrenin katkısı.....	62
Şekil 4.12. Çeltik gerçek evapotranspirasyon (A) ve bitki su verimliliği (B) için parametrelerin doğrulukta ortalama azalma.....	63

Şekil 4.13. Çeltikte gerçek evapotranspirasyonun en önemli altı belirleyicisinin rastgele orman modellemesine dayalı kısmi bağımlılık grafiği.....	64
Şekil 4.14. Çeltik su verimliliğinin (CWP) en önemli altı belirleyicisinin rastgele orman modellemesine dayalı kısmi bağımlılık grafiği.....	65
Şekil 4.15. Gözlenen ve tahmin edilen çeltik gerçek evapotranspirasyonunun (A) ve su verimliliğinin (B) dağılımı.....	66

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 2.1. Uzaktan algılama kullanılarak ölçülebilen olası performans göstergeleri..	23
Çizelge 2.2. Performans standartları.....	25
Çizelge 3.1. 2013-2014 çalışma dönemi boyunca Kou Vadisi sulama alanında sulama performansını değerlendirmek için kullanılan Landsat görüntüleri.....	27
Çizelge 3.2. Bu çalışmada kullanılan çeltik, mısır ve tatlı patates için hasat indeksi (HI) ve nem içeriği değerleri.....	30
Çizelge 4.1. 2013 ve 2014 yıllarındaki kurak mevsim üretim dönemlerinde çeltik, mısır ve tatlı patates için hesaplanan ET_a ve verim değerleri.....	52
Çizelge 4.2. Kou Vadisi sulama alanında 2013 ve 2014 yıllarında çeltik, mısır ve tatlı patates veriminde iyi performans gösteren alanların yüzdesi.....	54
Çizelge 4.3. Kou Vadisi sulama alanında çeltik, mısır ve tatlı patates için CWP istatistiki değerleri ve CWP 'ye göre iyi performans gösteren alanların oranı.....	58
Çizelge 4.4. Kou vadisi sulama alanındaki çeltik arazileri fiziksel özelliklerinin belirleyici istatistikleri.....	60
Çizelge 4.5. Çeltiğin gerçek evapotranspirasyonu ve bitki su verimliliğini (CWP) etkileyen parametrelerin istatistiksel açıdan önem düzeyleri.....	61

1. GİRİŞ

1.1. Küresel Su ve Gıda Güvenliği

Dünyada üretilen gıdanın %70'inden fazlası sulu tarım alanlarında üretilmektedir ve sulu tarım, dünya çapında gıda üretiminde ve güvenliğinde önemli bir role sahiptir (FAO, 2004; Waller ve Yitayew, 2016). Pek çok ülkede, özellikle Sahra Altı Afrika ülkelerinde, sulu tarım ulusal ekonomi, gıda güvenliği ve yerel toplulukların geçim kaynakları için kritik öneme sahiptir (Poussin ve diğerleri, 2015; Turner ve diğerleri, 2004; Waller ve Yitayew, 2016). Bununla birlikte, hızla artan dünya nüfusu, su kaynakları üzerindeki baskı ve diğer sektörlerden (endüstriyel ve evsel sektörler) gelen talepler nedeniyle dünyanın birçok yerinde sulama için su kaynakları giderek azalmaktadır (Blatchford ve diğerleri, 2018; De Bruin ve Stricker, 2000; Stoyanova ve Stoyanova, 2019; Wellens ve diğerleri, 2013). Şu anda, dünya çapında yaklaşık 3,6 milyar insan yılda en az bir ayda potansiyel olarak su kıtlığı olan bölgelerde yaşamaktadır ve bu 2050'de yaklaşık 4.8-5.7 milyara yükselme ihtimali vardır (UN-Water, 2018). Kentleşmenin artması, kentsel gıda ve su taleplerini karşılamak için evsel ve endüstriyel su kullanımının artmasına neden olmaktadır. 2014 yılında şehirlerde yaklaşık 3,9 milyar insanın yaşadığı ve kentsel nüfusun 2050 yılına kadar 6,3 milyara çıkacağı ve dünyada %55 ek su talebi yaratacağı tahmin edilmektedir (OECD, 2012; UN-Water, 2012; UNDESAPD, 2014). Küresel nüfus 2050'ye kadar 9,7 milyara ulaşırken, gıda talebinin yüzde 70 artması beklenmektedir (FAO, 2009, 2016). Küresel gıda üretiminin artmasının gerekliliği, iklim değişikliği zorluklarıyla karşı karşıya kalacaktır. İklim değişikliği, su talebini artırarak, sulamaya en çok ihtiyaç duyulan alanlarda su mevcudiyetini azaltarak tarımı önemli ölçüde etkileyecektir (FAO, 2011; IPCC, 2014). Mevcut iklim değişikliği eğilimleri devam ederse, bir su krizi ve özellikle gelişmekte olan ülkelerde açlığın artması sonucunu doğurabilecektir (Hanjra ve Qureshi, 2010; Misra, 2014). İklim değişikliği koşullarında artan su ve gıda talepleri göz önüne alındığında, en büyük zorluklardan biri, daha az su kullanarak gıda üretiminin nasıl artırılacağıdır (Mancosu ve diğerleri, 2015; FAO, 2017). Bu zorluğa, verimli su kullanımı ve optimum mahsul üretimi için sürdürülebilir bir şekilde tarımsal su verimliliğini artırarak ulaşılabilir (Musick ve diğerleri, 1994; Molden, 1997; FAO, 2016; Bastiaanssen ve Steduto, 2017). Bu nedenle, artan su ve gıda taleplerini karşılamak için su yönetiminin iyileştirilmesi gerekmektedir.

1.2. Sorun Bildirimi

Kentsel su talebi gibi diğer sektörlerden artan su talepleri ve öngörülemeyen iklim koşulları nedeniyle, bazı Sahra Altı Afrika (SSA) ülkelerinde sulama için su kaynakları giderek azalmaktadır (UN-Water, 2012; IPCC, 2014; United Nations, 2014). Yağış değişkenliğinin ve tekrarlayan kuraklık olaylarının mahsul üretim üzerindeki olumsuz etkilerini ele almak ve yıllar içinde çiftlik karlılığını sürdürülebilir kılmak için, su ve tarımla ilgili çeşitli girişimler (örneğin, barajların ve büyük ölçekli sulama projelerinin inşası, küçük ölçekli sulamanın teşvik edilmesi) Burkina Faso'da 1970-1980'lerden beri uygulanmaktadır (MAHRH, 2006; Yameogo ve Kienou, 2013; FAO, 2014). Bununla birlikte, kontrolsüz kullanım ve etkili yönetim planı araçlarının eksikliği (Wellens ve diğerleri, 2013; Traoré ve diğerleri, 2019) kullanılabilir su kaynakları üzerinde önemli bir baskı oluşturmaktadır. Bu durum, tarımsal üretimin sürdürülebilirliğini tehdit etmekte ve ülke çapında gıda güvensizliği risklerinin artmasına neden olmaktadır. Su kaynaklarının daha verimli kullanımı, tarımsal üretimin sürdürülebilirliği için ihtiyaç haline gelmiştir. Su kaynaklarını korurken yıllar içinde kabul edilebilir verim seviyelerine ulaşmak için bitki su verimliliğini en üst düzeye çıkarmak, Burkina Faso'daki milyonlarca küçük çiftçi için oldukça önemlidir. Bu hedefe, sulama sisteminin konumsal-zamana bağlı sulama performans modelleri hakkında iyi bir bilgi birikimi ile ulaşılabilir. Performans değerlendirmeleri için veri gereksinimleri yüksektir, veriler nadiren toplanmakta, toplanan verilerin tümü de güvenilir ve hemen erişilebilir olamamaktadır (Bastiaanssen ve Bos, 1999; Gorantiwar ve Smout, 2005). Bu veriler, meteorolojik veriler (ör. yağış, gerçek ve potansiyel evapotranspirasyon), su deşarj ölçümleri, yetiştirilen bitkilerin bilgileri (ör. bitki gelişim katsayıları, bitki su gereksinimleri ve biyokütle gelişimi), topografya ve toprak verileri gibi verilerdir. Burkina Faso gibi ülkelerde, sulama planlarının performansını değerlendirmek için genellikle tarla gözlemlerine ve anketlere dayalı geleneksel yöntemler kullanılır, bu da sürecin emek yoğun, zaman alıcı olmasına neden olmaktadır (Dembélé ve diğerleri, 2001; Dembélé ve diğerleri, 2012; Kambou ve diğerleri, 2019; Poussin ve diğerleri, 2015). Performans değerlendirmesinde zaman ve maliyet etkin hale getirmek için yeni teknikler ve yaklaşımlar gereklidir. Uzaktan algılama (UA) tabanlı yaklaşımlar, uygun maliyetli alternatifler olarak görülmektedir (Bastiaanssen ve Bos, 1999; Blatchford ve diğerleri, 2019). Genel olarak, UA farklı konumsal ve zamansal ölçeklerde, açık ve

nesnel bilgiler sağlayabilir. UA veri işleme kapasitesindeki devam eden gelişmeler, yüksek zamansal ve mekânsal çözünürlüğe sahip uydu verilerinin kullanımı, veriye erişimin zor olduğu Burkina Faso gibi ülkelerde çok daha önem kazanmaktadır.

1.3. Sulama Performansı için Uzaktan Algılama İmkânı

Uzaktan algılama (UA) tabanlı yaklaşımlar, münferit arazilerden havza seviyesine kadar değişen ölçeklerde arazi kullanımı/arazi örtüsünün uygun maliyetli konumsal-zamansal değişkenliğini belirlemek için kolaylıkla kullanılabilir. Sulama performansının değerlendirilmesi için zemin bilgileriyle birleştirilen uzaktan algılama verileri kullanılır. Sulama planlarının performansını çeşitli çevre ve yönetim koşulları altında UA tabanlı yaklaşımlar kullanarak değerlendirmek için çalışmalar yapılmıştır (Bastiaanssen ve diğerleri, 2001; Friedman, 2001; Kuhn ve diğerleri, 2020; Liaw ve Wiener., 2002; Taghvaeian ve diğerleri, 2018; Zwart ve Leclert, 2010; Karci and Uçar, 2019). Bastiaanssen ve diğerleri (2001), Brezilya'daki Nilo Coelho projesinin performansını izlemek için Ulusal Okyanus ve Atmosfer İdaresi -Gelişmiş Çok Yüksek Çözünürlüklü Radyometre (NOAA-AVHRR) verilerini kullanarak yerinde ölçümlerle çalışmayı yürütmüşlerdir. Zwart ve Leclert'de (2010), yüksek çözünürlüklü Landsat-5 ve Landsat-7 ile elde edilen normalize edilmiş fark bitki örtüsü indeksi (NDVI) verileri ve uydu görüntüsünden özel işleme elde edilen güneş radyasyonu verilerine dayanan bir yaklaşım önermişlerdir. Uzaktan algılama tekniklerinin gelişimi, evapotranspirasyon, biyokütle üretimi ve toprak nemi gibi parametrelerin haritalanmasına izin veren birçok algoritmanın geliştirilmesini sağlamıştır. Bastiaanssen ve diğerleri (1998) tarafından geliştirilen Arazi için Yüzey Enerji Dengesi Algoritması (SEBAL) gibi uzaktan algılama algoritmaları, Su (2002) tarafından geliştirilen Yüzey Enerji Dengesi Sistemi (SEBS), Roerink ve diğerleri (2000) tarafından geliştirilen Basitleştirilmiş Yüzey Enerji Dengesi Endeksi (S-SEBI) ve Allen ve diğerleri (2007) tarafından geliştirilen Yüksek Çözünürlükte Evapotranspirasyon Haritalama ve İçselleştirilmiş Kalibrasyon (METRIC) bitki su parametrelerini tahmin etmek için kullanılan yaklaşımlardır. Arazi için Yüzey Enerji Dengesi Algoritması (SEBAL) modeli, dünya yüzeyinin enerji dengesinin farklı bileşenlerini ve gerçek evapotranspirasyonu tahmin etmek için kullanılan bir modeldir (Bastiaanssen ve diğerleri, 2002; Bastiaanssen ve diğerleri, 2005). Bu model, daha sonra çeşitli çevresel koşullar altında bitki biyokütlesi üretiminin

yanı sıra verim, su kullanımı ve su kullanım etkinliğini tahmin etmek için genişletilmiştir (Bastiaanssen ve Ali, 2003; Zwart ve Bastiaanssen, 2007). SEBAL modeli, Batı Afrika'daki Volta Havzası'ndaki önemli sınıraşan havzalardan birinde farklı arazi kullanım/örtü tipi koşulları altında ET_a 'nın konumsal dağılımını haritalamak için kullanılmıştır (Compaoré ve diğerleri, 2008; Opoku-Duah ve diğerleri, 2008). Brezilya'daki Nilo Coelho sulama alanının (Bastiaanssen ve diğerleri, 2001) ve Mali'deki Office du Niger adlı büyük ölçekli çeltik sulama alanının sulama performansının konumsal-zamansal dağılımını tahmin etmek için de kullanılmıştır (Zwart ve Leclert, 2010). Farklı sulama performans göstergelerinin bir kombinasyonu yoluyla, SEBAL modelini kullanan UA verilerinin analizi, Kou vadisi sulama alanı (KVIS) gibi sulama planlarının (Bastiaanssen ve diğerleri, 2001; Zwart ve Leclert, 2010) işleyişini teşhis etmek için fırsatlar sağlamıştır. Finansal yapının sürekli yerinde izlemeyi sürdürmek için sınırlı olduğu ve çok az tarihsel objektif bilginin mevcut olduğu ülkelerde, iyileştirilmiş sulama suyu yönetimi stratejileri için uygun maliyetli yaklaşımlar geliştirmek, sürdürülebilir tarım faaliyetleri ve bireylerin geçim kaynakları için hayati önem taşımaktadır. Uzaktan algılama görüntülerinden veri temin yoluyla, sulama sistemlerinin izlenmesi, Burkina Faso gibi SSA ülkelerinde sulama suyu yönetiminin iyileştirilmesi için ilgi çekicidir. Sulama sistemlerinin performansını araştırmak ve sulama suyu yönetimine rehberlik etmek için UA tabanlı yaklaşımların kapsamlı uygulamalarına rağmen, bu tür metodolojiler Burkina Faso'da operasyonel olarak çok az kullanılmıştır. Örneğin, Dembélé ve diğerleri (2012) ve Kambou ve diğerleri (2019), 2000'li yılların başlarında Kou vadisi sulama alanı (KVIS) çeltik tarım, yeşil fasulye, mısır ve soğan tarımı için sulanan tarım alanlarının performansını değerlendirmek için tarla izleme ve anket verilerini kullanmışlardır. Her iki çalışmada da, zamanında ve etkili müdahaleler için performans seviyelerinin gelişimi hakkında daha iyi bilgi sahibi olmanın gerekliliğini vurgulamışlardır.

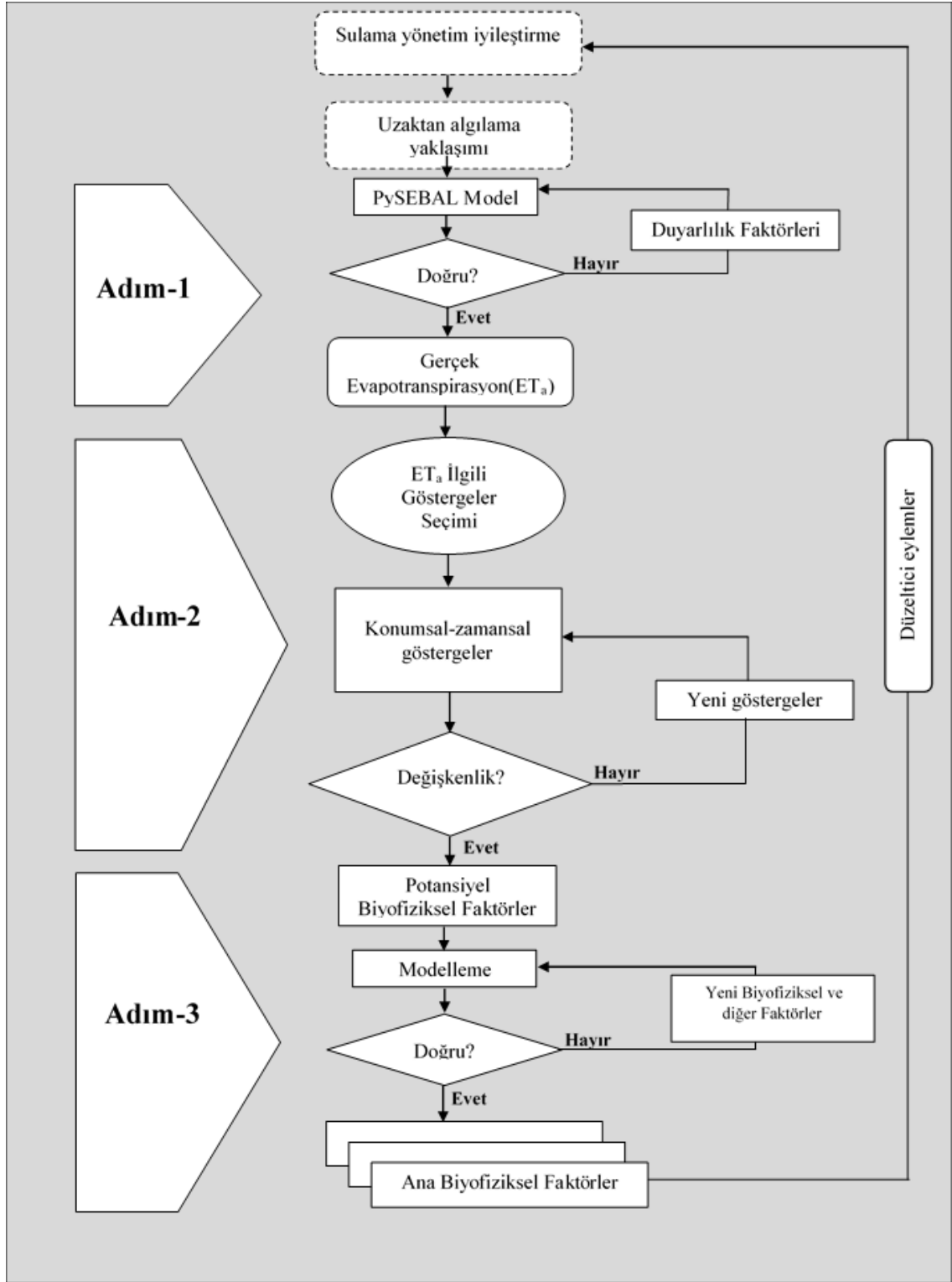
1.4. Tez Amacı

Bu çalışmada, sulama suyu yönetiminin iyileştirilmesi için uzaktan algılama tabanlı PySEBAL modeli kullanılarak Burkina Faso'da KVIS sulama alanında, sulama performansının uygun maliyetli bir şekilde incelenmesi amaçlanmıştır. Bu çalışmanın özel hedefleri aşağıdaki gibidir:

- Gerçek evapotranspirasyonun konumsal-zamansal değişimlerinin belirlenmesi;
- Üç ana bitki (çeltik, mısır ve tatlı patates) için KVIS sulama performansının konumsal-zamansal değişimlerinin belirlemesi;
- Sulama performansının konumsal-zamansal değişimlerini etkileyen fizikokimyasal faktörlerin değerlendirilmesi

1.5. Tez Kapsamı

Bu çalışma kapsamında, Şekil 1.1. de verilen adımlar takip edilmiştir. Birinci adımda, kurak mevsimlerde (Ocak-Nisan) 2013-2014 kritik sulama dönemine ait ET_a değerleri, Arazi için Yüzey Enerji Dengesi Algoritması (PySEBAL) kullanılarak tahminlenmiştir. Tahminlenen ET_a değerleri, açık erişim ile sunulan verilerle karşılaştırılmıştır. İkinci adımda ise, ET_a ile ilgili sulama performansı göstergeleri, tarla verileri kullanılarak konumsal-zamansal olarak belirlenmiştir. Belirlenen performans göstergeleri standart değerlerle karşılaştırılarak analiz edilmiştir. Üçüncü adımda, KVIS genelinde sulama performansı göstergelerinin değişkenliğini etkileyen toprak ve parsel gibi fizikokimyasal değişkenler değerlendirmiştir. Bu aşamada, doğrusal karışık model ve rastgele orman modelleri kullanılmıştır.

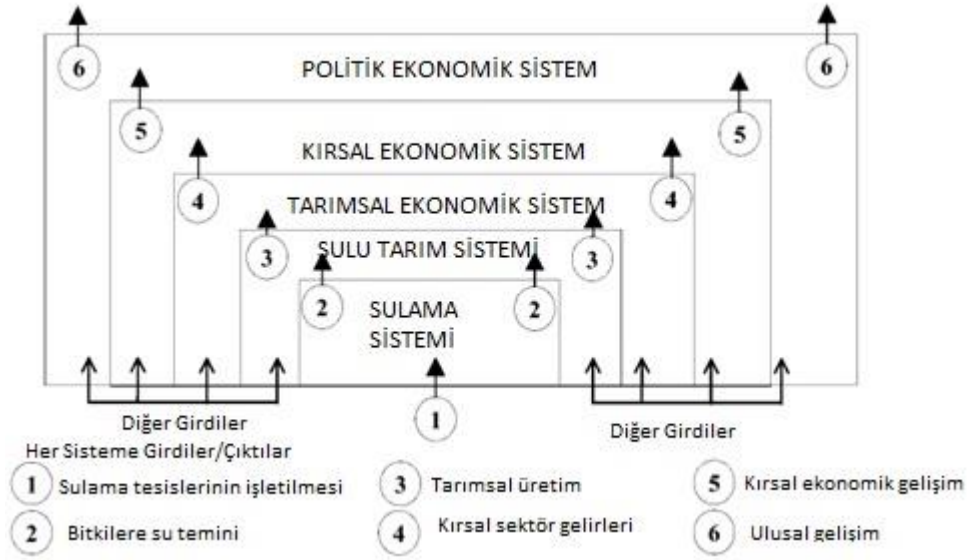


Şekil 1.1. Tez aşamaları.

2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Sulama Performans Değerlendirmesi

Sulama performansı belirleme çalışmaları çeşitli nedenlerle gerçekleştirilmektedir. Bunlar; performans odaklı yönetimin ayrılmaz bir parçası olarak sistem operasyonlarını iyileştirmek, stratejik hedeflere göre ilerlemeyi değerlendirmek, bir sistemin genel sağlığını değerlendirmek, müdahalelerin etkilerini değerlendirmek, kısıtlamaları teşhis etmek, performans belirleyicilerini daha iyi anlamak ve sistemin performansını zaman içinde diğerleriyle veya aynı sistemle karşılaştırmaktır (Molden ve diğerleri, 1998). Bir sulama sisteminin performans değerlendirilmesi, sulama sisteminin karmaşıklığından dolayı çok zor bir konudur. Smith (1990), sulu tarımın performansını değerlendirmenin zor olduğunu, çünkü çok boyutlu olmanın yanında çok disiplinli bir yaklaşım gerektirdiğini göstermiştir. Chambers (1988), sulama sisteminin karmaşıklığını, etki alanları (fiziksel, insan, biyo-ekonomik ve su), boyutlar (konum ve zaman) ve etki alanları ile içlerindeki öğeler arasındaki bağlantılar açısından tanımlamıştır. Sulama sisteminin karmaşıklığı, tanım ve performans değerlendirme yaklaşımlarının çeşitliliğini ortaya çıkarmıştır. Abernethy (1989), bir sistemin performansını, sistemin hedeflerinin göstergeleri olarak seçilen bir veya birkaç parametre açısından ölçülen başarı seviyeleri ile tanımlamıştır. Bos ve diğerleri (2005), sulama ve drenaj performans değerlendirmesini, bir sulama ve drenaj sisteminin yönetiminin sistematik olarak gözlemlenmesi, belgelenmesi ve yorumlanması olarak tanımlamışlardır. Sulama performansını değerlendirmek için, kullanılacak sistem ölçeğini belirleyerek işi tanımlamak ve yönlendirmek için bir çerçeve gereklidir. Sistem ölçeği birkaç farklı seviyede olabilir. Small ve Svendsen (1992), sulama performansı değerlendirilmesinin, daha geniş bir agro-ekonomik ve sosyo-ekonomik veya politik-ekonomik sistem kümesinin içine yerleştirilmiş bir alt sistem olarak sistemin sınırının net bir tanımlanması gerektiğini iddia etmiştir (Şekil 2.1.).



Şekil 2.1. İç içe sistemler ve sulama.

Sulama performansı değerlendirmesi çok karmaşık bir konudur ve birçok yazar, aşağıdaki gibi çeşitli performans değerlendirme yolları önermiştir (Small ve Svendsen, 1992; Ucar ve diğerleri, 2010; Murray-Rust ve Snellen, 1993; Bos ve diğerleri, 2005; Değirmenci ve diğerleri, 2017):

- Operasyonel performans değerlendirmeleri, yönetim süreçlerini belirlemek için program yöneticileri tarafından yapılır;
- Stratejik performans değerlendirmesi, mevcut kaynakların kullanımına ilişkin bilgi sağlar ve hükümet veya program sahipleri tarafından gerçekleştirilir;
- Düşük ve yüksek performansın nedenlerini anlamak ve analiz etmek için tanısal performans değerlendirmesi yapılır;
- Karşılaştırmalı performans değerlendirmesi, kıyaslama standartlarını belirlemek ve daha yüksek performansa yol açan bir sistemdeki süreçleri tespit etmek için yapılır.

Bos (1997), performans değerlendirme sürecinin, yöneticilerin iki basit soruyu yanıtlama kapasitesine bağlı olduğunu öne sürmüştür:

- İyi operasyonel performansın temeli olan ve belirlenen hedeflere ulaşılp ulaşılmadığını soran "İşleri doğru yapıyor muyum?"

- Stratejik performans değerlendirme sürecinin bir parçası olarak, daha geniş hedeflerin yerine getirilip getirilmediğini ve verimli bir şekilde yerine getirilip getirilmediğini bulmayı amaçlayan bir soru olan "Doğru olanı mı yapıyorum?".

2.2. Sulama Performans Değerlendirmesine İlişkin Geleneksel ve Yeni Kavramlar

İnsanın bitkisel üretimi iyileştirmek için sudan yararlanmaya başladığından beri performans değerlendirmesi sulamanın ayrılmaz bir parçası olmuştur. Mısırlılarda sulama, Nil nehrinin yıllık seline bağlıydı ve mahsullerini sulamak için su seviyelerini izlediler, suyu depolamak için havzalar inşa ettiler ya da sel sularını kullanarak tuzları her yıl kök bölgesinden uzaklaştırmaya çalışmışlardır (Waller ve Yitayew, 2016). Sulamanın tarihsel gelişimi boyunca, sulama suyu kullanımının verimliliğini değerlendirmek için birçok yaklaşım tanımlanmıştır. 70'li yıllarda Bos ve Nugteren (1990), 20-25 yıl öncesine kadar sulama verimliliğinin sulamada önemli bir faktör olarak kabul edildiğini ileri sürmüşlerdir. Bu yazarlar sulama verimliliklerini, iletim verimliliği, dağıtım verimliliği ve arazi uygulama verimliliği olarak ifade etmişlerdir. Diğer verimlilikler ise tersiyer birim verimliliği, sulama sistemi verimliliği ve genel proje verimliliği olarak tanımlanmıştır. Genel olarak, sulama verimliliği, giren ve çıkan suyun oranı olarak hesaplanabilir. Sulama verimliliği göstergeleri erken dönem sulama performans değerlendirme sürecinde kullanılmıştır. Bununla birlikte, verimlilikle ilgili performans göstergeleri, sulama sistemi performansını su talebi açısından tanımlamak için sınırlandırılmıştır. Sulama planlamasında su talebi ve su temini temel faktörler olarak kabul edilir. Levine (1982), bu iki faktörü birleştirerek, rölatif su teminini, su temininin su talebine oranı olarak tanımlamıştır. Bu gösterge, su temin verilerinin mevcudiyetine bağlı olarak sulama sisteminin herhangi bir seviyesinde ölçülebilir. Rölatif su temini, yalnızca sulama sisteminin alt sistemini dikkate alarak sistemin performansını tanımlar. Garces Restrepo (1983), suyu, insanı, çevreyi ve ekonomiyi bir sulama sisteminin alt sistemi olarak ele alarak, her birini değerlendirmek için göstergeler tanımlamıştır. Çiftçilerin memnuniyeti, insan alt sisteminin performansını belirlemek için kullanılır. Toprak su doygunluğu, toprak toksisitesi ve sulama suyu kalitesi performans göstergeleri çevresel alt sistem performansını tanımlar. Gösterge maliyet geri kazanımı, ekonomik alt sistem performansını belirlemek için kullanılır. Sulama performansının değerlendirilmesi için su dağıtım performansı (Lenton, 1984),

dağıtım homojenliği (Merriam ve diğerleri, 1983) gibi diğer göstergelerde geliştirilmiştir. Yeni veya iyileştirilmiş bir sulama planını değerlendirmek için Molden ve Gates, (1990), yeterlilik, verimlilik, güvenilirlik ve eşitlik göstergeleri gibi bir dizi performans göstergesini tanımlamıştır. Sulama performans göstergeleri hızlı bir gelişme göstermiştir ve günümüzde bir sulama sisteminin performansını değerlendirmek için yeni kavramlar tanıtılmaktadır. Su muhasebesi, havza çapında su kaynaklarının kullanımını değerlendirmek için nispeten yeni bir kavramdır, dolayısıyla suyun sulama dışı sektörler tarafından yararlı kullanımını içerir (Molden ve Sakthivadivel, 1999; Perry, 1999). Su tüketim oranı, çoklu sulama sistemleri kapsamında nehir havzaları düzeyinde performansı belirlemek için Molden (1997) tarafından tanıtılmıştır. Genel olarak, belirli bir alan için performans göstergelerinin hesaplanmasında, kanal akışı, agronomik veya sosyoekonomik verileri kullanmıştır. Geleneksel sulama performans göstergeleri, kanal akış verilerine dayanmaktadır (Bastiaanssen ve diğerleri, 1999). Bu araştırmacılar, sulama kanalının en uç noktasında akış ölçümü ile performansın belirlenebileceğini belirtmişlerdir. Bu gösterge değerlendirme süreci, göstergelerin konumsal dağılım bilgisini sağlamamaktadır. Böylece, mekana ve zamana göre değişen gösterge dinamiğinin değerlendirilmesinde sınırlılık ortaya çıkmaktadır. Daha önceki nesil sulama performans göstergeleri değerlendirmesi, geleneksel performans değerlendirme süreci olarak nitelendirilir. Göstergenin konumsal değerlendirmesini iyileştirmek için, mahsul parametrelerinin konumsal-zamansal bilgilerinin toplanmasında uzaktan algılama tekniği kullanılmaktadır. Gerçek evapotranspirasyon, toprak su içeriği ve bitki büyümesi gibi uzaktan algılama ile belirlenebilen parametreler, tarla düzeyine kadar çeşitli ölçeklerde toplam su kullanımını yansıtır (Bastiaanssen ve Bos, 1999). Mevcut performans göstergeleri değerlendirmesi, uzaktan algılama tekniklerini kullanma eğilimindedir. Bastiaanssen ve Bos (1999), uzaktan algılanan verilere dayalı sulama performansı göstergelerini, maliyet etkin bir şekilde ölçülebilen yeni nesil sulama performans göstergeleri olarak nitelendirmiştir.

2.3. Sulama Performans Göstergeleri

Göstergeler, hedefe ulaşılmasına yönelik ilerlemeyi ölçmenin bir yoludur (Savva ve Frenken, 2002). İlerlemeyi izlemek ve nihai başarıların değerlendirilmesi için nesnel bir temel sağlarlar. Sulama performans değerlendirmesinde kullanılan birçok gösterge

vardır ve ortak göstergeler arasında yeterlilik, eşitlik, verimlilik, güvenilirlik, verimlilik ve sürdürülebilirlik performans göstergeleri yer alır. Uluslararası Su Yönetimi Enstitüsü (IWMI), sulanan tarım sistemlerinin performansını karşılaştırmak için yararlı olan dokuz karşılaştırmalı gösterge belirlemiştir.

2.3.1. Yeterlilik

Su dağıtım sistemlerinin temel bir endişesi, bitkileri yeterince sulamak için gereken su miktarını sağlamaktır (Molden ve Gates, 1990). Yeterlilik, bir sulama sisteminin bitki su ihtiyacını karşılama kapasitesidir. Yeterlilik göstergesi, bitkinin artan ihtiyaçları için yeterli miktarda sağlanan su miktarı hakkında bilgi verir. Literatürde ele alınan yeterlilik göstergelerinden bazıları arasında, su temini oranı, rölatif evapotranspirasyon, su tüketim oranı ve Molden ve Gates yeterlilik göstergesi bulunmaktadır.

Sulama planlamasında, tasarımında ve işletiminde en önemli iki faktör su temini ve su talebidir. Levine (1982), su temini oranı (RWS) su temininin su talebine oranı olarak tanımlamıştır:

$$RWS = \frac{\text{Toplam Su Temini}}{\text{Bitki Su İhtiyacı}} \quad (2.1)$$

İhtiyaç, yalnızca evapotranspirasyon gibi teknik kriterlere bağlı olabilir. Bunun yanında, derine sızma yoluyla kaybedilen suda dahil edilebilir. Su temini, sulama ve etkili yağış sularını içerebilir.

Rölatif sulama temini (RIS), yağmur suyunu da içeren RWS'nin aksine, yalnızca sulama suyunun sağlanmasına odaklanır. Bu gösterge, sulama temininin sulama talebine oranıdır (Perry, 1996),

$$RIS = \frac{\text{Sulama Temini}}{\text{Sulama Talebi}} \quad (2.2)$$

Sulama temini yalnızca sisteme saptırılan suyu içerir ve sulama talebi, iyi sulanan koşullar altındaki bitki ET'sidir.

Hem RWS hem de RIS, arz ile talep arasında ilişki kurar, su bolluğunun veya kıtlığının durumu, arz ve talebin ne kadar sıkı bir şekilde eşleştiği konusunda bazı göstergeler verir (Molden ve diğerleri, 1998).

Rölatif evapotranspirasyon (ET_{ref}), gerçek evapotranspirasyonun potansiyel evapotranspirasyona oranıdır (Doorenbos ve Kassam, 1979). Potansiyel evapotranspirasyon, ET_0 , mevcut yerel durum göz önüne alındığında (güneş radyasyonu, yüzey albedo, sıcaklık, pürüzlülük parametreleri) birim alandan birim zamanda optimum su temini koşullarında buharlaşabilen su miktarı olarak tanımlanır (Roerink ve diğerleri, 1997). ET_{rel} şu şekilde tanımlanır:

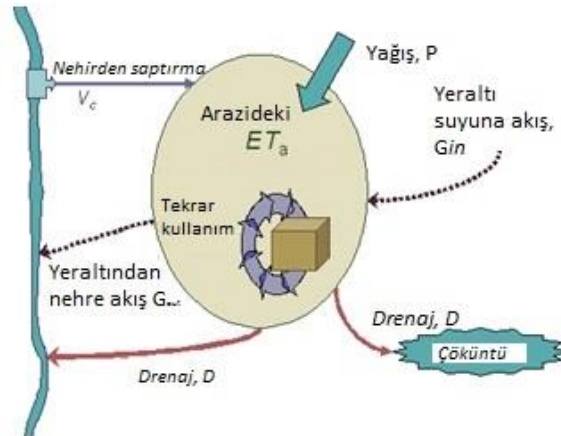
$$ET_{rel} = \frac{ET_a}{ET_0} \quad (2.3)$$

burada ET_a gerçek evapotranspirasyon ve ET_0 potansiyel evapotranspirasyondur.

Sulama, bitki gelişimi için su sağlar ve verim üzerinde olumlu etkiler sağlar. Gerekli su miktarı doğru zamanda uygulanırsa maksimum verim elde edilebilir. Fazla su uygulamaları, tuzlanma etkisi nedeniyle verimde düşüğe, yeraltı sularının ve çevrenin kimyasal kirlenmesine neden olur. Molden (1997), sulama sistemlerinde ve su havzası düzeyinde su tüketimini analiz etmek amacıyla, hem proses içi hem de proses dışı kullanımlar tarafından tüketilen su miktarını analiz etmek için su tüketim oranını tanımlamıştır. Su tüketim oranı, mevcut suyun tüketilen ve diğer su tüketim işlemleri için kullanılmayan kısmıdır. Sulanan bir alanda, tüketim oranı su dengesinin üç bileşeninin bir fonksiyonudur: gerçek evapotranspirasyon, tüm yağışların toplamı ve sisteme saptırılan sulama suyu hacmi (Şekil 2.2). Drenaj bileşeni hariç su dengesinin bu bileşenleri (ET_a , yağış ve sulama suyu) aşağıdaki denklem kullanılarak su tüketim oranı tahmininde kullanılır (Bos ve Bastiaanssen, 2003):

$$DF = \frac{ET_a}{P + V_c} \quad (2.4)$$

burada, ET_a gerçek evapotranspirasyon, V_c nehirden saptırılan su miktarı ve P yağıştır.



Şekil 2.2. Sulanabilir bir alanın şematik su dengesi.

Su dağıtımının yeterliliği, su temini, belirtilen su dağıtım programlarına, hidrolik yapıların programlara göre su sağlama kapasitesine ve hidrolik yapıların işletim ve bakımına bağlıdır. Molden ve Gates (1990) tarafından sunulan yeterlilik göstergesi (P_A), T zaman periyodu boyunca sistemin hizmet verdiği bir bölge veya R alt bölgesi için bu hedefe göre bir performans ölçüsüdür ve şu şekilde ifade edilir (Molden ve Gates, 1990):

$$P_A = \frac{1}{T} \sum_T \left(\frac{1}{R} \sum_R P_A \right) \quad (2.5)$$

burada $P_A = \frac{Q_D}{Q_R}$, Q_R gerekli su hacmidir, Q_D uygulanan su miktarı, R örneklenen bölgedir (üçüncül veya ikincil) ve T zaman periyodudur.

2.3.2. Eşitlik

Eşitlik, suyun sistemin farklı alanlarına dağıtımındaki adaleti temsil etmek için kullanılan genel bir terimdir. Abernethy (1986), eşitlik göstergesini, su dağıtımının konumsal homojenliği olarak tanımlamıştır. Eşitlik göstergelerinin çoğu, proje alanında farklı bölgelerde uygulanan su derinliğine dayanmaktadır. Eşitlik, bitki su tüketiminin homojenliğine (UWC) ve Molden ve Gates eşitlik göstergesine (P_E) dayalı olarak da belirlenebilir.

Kanal akış ölçümüne veya sulama takvimi değerlendirmesine dayanan birçok yöntem, sulanan bir alandaki su tüketiminin homojenliğini tahmin etmek için kullanılabilir. Uzaktan algılama teknikleri sayesinde, su tüketiminin homojenliği, ET_a 'nın konumsal dağılımına dayalı olarak da tahmin edilebilir. Bastiaanssen ve diğerleri (1996) tarafından tanımlanan ET_a 'nın varyans katsayısı (C_v) su tüketiminin homojenliğini tahmin etmek için aşağıdaki şekilde verilmiştir.

$$UWC = \frac{SD}{\bar{X}} * 100 \quad (2.6)$$

burada, SD, ET_a 'nın standart sapmasıdır ve \bar{X} , ET_a 'nın ortalamasıdır.

Eğer eşitlik, dağıtılan suyun rölatif miktarının konumsal homojenliği olarak yorumlanırsa, dağıtılan su miktarının ilgili zaman süresi boyunca ihtiyaç duyulan miktara oranının ortalama rölatif konumsal değişkenliği olacaktır. Önerilen bu gösterge aşağıdaki şekilde verilmiştir (Molden ve Gates, 1990),

$$P_E = \frac{1}{T} \sum_T CV_R \left(\frac{Q_D}{Q_R} \right) \quad (2.7)$$

Burada, $CV_R(Q_D/Q_R)$ bir bölgede R Q_D/Q_R oranının konumsal değişim katsayısıdır.

2.3.3. Etkinlik

Etkinlik, optimum su kullanımı için önemli bir sulama performansı göstergesidir. Bu nedenle bir etkinlik ölçüsü, genellikle başarının büyüklüğünün kullanılan kaynağın büyüklüğüne oranı biçiminde ifade edilir (Small ve Svendsen, 1992). Performansın etkinlik ölçüleri, genellikle Bos ve Nugteren (1974) ve Molden ve Gates (1990) tarafından tanımlanan bir oran biçiminde bir çıktı başarı ölçüsü ile girdi miktarı ölçüsünü birleştirir.

Bos ve Nugteren (1990) etkinlik performans göstergelerini iletim etkinliği, dağıtım etkinliği, tarla uygulama etkinliği, tersiyer ünite etkinliği, sulama sistemi etkinliği ve genel proje etkinliği olarak tanımlamışlardır.

İletim etkinliği (e_c), rezervuardan, su saptırma yapısından veya pompa istasyonundan dağıtım sisteminin çıkışlarına kadar olan kanal ve borulardan oluşan iletim şebekesinin etkinliğidir. Şu şekilde ifade edilebilir:

$$e_c = \frac{V_d + V_2}{V_c + V_1} \quad (2.8)$$

burada V_c nehirden yönlendirilen veya pompalanan su hacmi, V_d dağıtım sistemine iletilen hacim, V_1 diğer kaynaklardan iletim sistemine giriş akışı ve V_2 iletim sisteminden sulama dışı dağıtımlardır.

Dağıtım etkinliği (e_d), iletim ağından bireysel alanlara su sağlayan su dağıtım ve iletim kanallarının etkinliğidir. Şu şekilde ifade edilebilir:

$$e_d = \frac{V_f + V_3}{V_d} \quad (2.9)$$

burada V_d dağıtım sistemine gelen su hacmi, V_f araziye verilen su hacmi, V_3 ise su iletim sisteminden sulama dışı dağıtımlardır.

Tarla su uygulama etkinliği (e_a), tarla girişinde sağlanan su miktarı ile ihtiyaç duyulan ve vejetasyon periyodu boyunca bitkilerde su stresini önlemek için bitki tarafından

buharlaşma için kullanıma sunulan su miktarı arasındaki ilişkidir. şu şekilde ifade edilebilir:

$$e_a = \frac{V_m}{V_f} \quad (2.10)$$

burada, V_f araziye verilen sulama suyu hacmidir, V_m bitki tarafından evapotranspirasyon için ihtiyaç duyulan ve kullanıma sunulan sulama suyu hacmidir.

Tersiyer birim etkinliği (e_u), su dağıtım sisteminin ve su uygulama sũrecinin birleşik etkinliğidir ve şu şekilde ifade edilebilir:

$$e_u = \frac{V_m+V_3}{V_d} \quad (2.11)$$

Sulama sistemi etkinliği (e_s), su iletim ve dağıtım sistemlerinin birleşik etkinliğidir ve şu şekilde ifade edilebilir:

$$e_s = \frac{V_f+V_2+V_3}{V_c+V_1} \quad (2.12)$$

Genel sulama etkinliği (e_p), yıl boyunca sũrekli değişen bir değerdir ve gerçek su dağıtımının etkinliğinden ve çiftçilerin suyu etkili bir şekilde uygulama kabiliyetinden etkilenir. Yine de, sulama suyunun ne kadar etkin kullanıldığı konusunda her zaman iyi bir referanstır. Genel (veya proje) etkinlik şu şekilde ifade edilebilir:

$$e_p = \frac{V_m+V_2+V_3}{V_c+V_1} \quad (2.13)$$

Su dağıtım etkinliğinin amacı, su dağıtımlarını su gereksinimleriyle eşleştirerek suyu koruma arzusunu somutlaştırır. Bu hedefin bir lũsũ, Q_R ve Q_D oranının konumsal ve zamansal ortalaması olacaktır (Molden ve Gates, 1990). Molden ve Gates Etkinlik Gostergesi (P_F) şu şekilde ifade edilebilir:

$$P_F = \frac{1}{T} \sum_T \left(\frac{1}{R} \sum_R P_F \right) \quad (2.14)$$

burada $P_F = \frac{Q_R}{Q_D}$, eğer $Q_R \leq Q_D$ ve $P_F = 1$ ise, aksi halde.

2.3.4. Bağımlılık

Bağımlılık, dağıtılan su miktarının gerekli veya planlanan miktara oranının zamansal homojenliği olarak tanımlanır (Molden ve Gates, 1990). Su dağıtımının bağımlılığı

çiftçiler için önemlidir çünkü doğru planlamaya izin verir. Renault ve Vehmeyer (1999), bu göstergenin su uygulaması süresinin bağımlılığını ele almak veya su dağıtımının bağımlılığını değerlendirmek için kullanılabileceğini belirtmiştir. Molden ve Gates (1990), bir bağımlılık göstergesini zaman içinde homojen su dağıtımı olarak da tanımlamışlardır.

Sulama aralığının bağımlılığı (DII), uygulanan sulama aralığının, planlanan sulama aralığına oranıdır. Sulama aralığı, iki ardışık su uygulamasının başlangıcı arasındaki süre olarak ölçülür ve sulama aralığının bağımlılığı aşağıdaki şekilde ifade edilir (Bos, 1997; Bos ve diğerleri, 2005).

$$DII = \frac{\text{Uygulanan Sulama Aralığı}}{\text{Planlanan Sulama Aralığı}} \quad (2.15)$$

Sulama süresinin güvenilirliği (DD), su dağıtım süresinin plana veya aboneliğe oranıdır ve aşağıdaki şekilde ifade edilir (Bos, 1997; Bos ve diğerleri, 2005),

$$DD = \frac{\text{Uygulanan Su Dağıtım Süresi}}{\text{Planlanan Su Dağıtım Süresi}} \quad (2.16)$$

Su dağıtımının bağımlılığı, uygulamada dağıtılan su miktarının (Q_D) bir bölgede (R), ihtiyaç duyulan su miktarına (Q_R) oranının zamansal değişkenliğinin derecesidir ve aşağıdaki şekilde ifade edilir (Molden ve Gates Bağımlılık Göstergesi (P_D)) (Molden ve Gates, 1990).

$$P_D = \frac{1}{R} \sum_R CV_T \left(\frac{Q_D}{Q_R} \right) \quad (2.17)$$

burada, $CV_T (Q_D / Q_R)$, T zaman periyodu boyunca Q_D / Q_R oranının zamansal değişim katsayısıdır.

2.3.5. Güvenilirlik

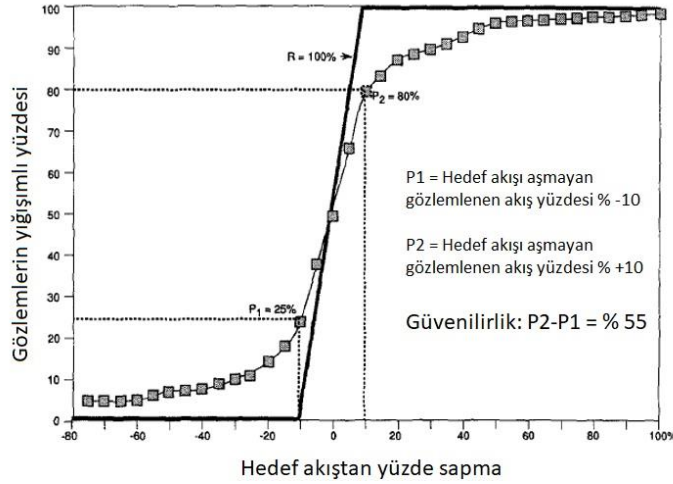
Güvenilirlik bazen bağımlılık olarak belirtilir. Güvenilirlik, sulama sisteminin ve su dağıtımlarının kullanıcılarının önceki beklentilerine ne derece uyduğunun belirlenmesidir. Murray-Rust ve Snellen (1993), güvenilirliğin, subjektif olduğundan, nicelikten çok sulama hizmetinin kalitesiyle ilgilendiği için değerlendirilmesi daha zor bir amaç olduğunu göstermiştir.

Makin ve diğerleri (1991) Tayland'da 20.000 hektarlık bir proje boyunca su dağıtımının güvenilirliğini inceledi. Sistemin çeşitli noktalarında gözlemlenen akışlar, hedeften

%10'dan fazla sapmazsa güvenilir, aksi halde güvenilir olarak sınıflandırılmıştır (Şekil 2.3). Gözlemlenen akışın güvenilir akış aralığına düştüğü zaman yüzdesi olarak, sistemdeki herhangi bir nokta için bir güvenilirlik indeksini (RI) tanımlamışlardır.

$$RI = P_2 - P_1 \quad (2.18)$$

burada P_1 , hedef akışı %-10'u aşmayan gözlemlenen akışların yüzdesidir ve P_2 , hedef akışı %+10'u aşmayan gözlemlenen akışların yüzdesidir.



Şekil 2.3. Tipik güvenilirlik analizi.

Deşarjların (RD) veya su seviyelerinin (stabilite) güvenilirliği ve su dağıtımlarının (öngörülebilirlik) zamanlamasının (RT) güvenilirliği aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir (Murray-Rust ve Snellen, 1993),

$$RD = \frac{\text{Gerçek Deşarj}}{\text{Hedef Deşarj}} \quad (2.19)$$

$$RT = \frac{\text{Gerçek Sulama Dağıtım Süresi}}{\text{Hedeflenen Sulama Dağıtım Süresi}} \quad (2.20)$$

2.3.6. Verimlilik

Verimlilik göstergeleri, sisteme eklenen girdiye yanıt olarak sistemden çıktıyla ilgilidir (Gorantiwar ve Smout, 2005). Verimlilik, bu çıktıların brüt terimlerle veya kullanılan girdiye göre ölçülmesiyle gösterilebilir. Bitki su verimliliği (CWP) ve arazi verimliliği gibi birkaç verimlilik göstergesi vardır.

Bitki suyu verimliliği fiziksel terimle, verimin (genellikle kg cinsinden ölçülür) tüketilen su miktarına oranı (genellikle bitki evapotranspirasyonu ile sınırlıdır, m^3 cinsinden ölçülür) olarak tanımlanır (Kijne ve diğerleri, 2003). Bitki su verimliliği

kavramı farklı şekillerde ifade edilebilir. Bitki fizyologları, bitki su verimliliğini, birim buharlaşma başına bitki verimi ve asimile edilen karbonun miktarı olarak kullanmaktadırlar (Viets, 1962). Sulama mühendisleri için CWP, terleme (T) ve evapotranspirasyon (ET) göre biyokütle ve verimin değişimi olarak tanımlanır (Perry ve diğerleri, 2009). CWP aşağıda verilen amaca yönelik formüllerle ifade edilebilir:

$$\text{Biyokütle su verimliliği (T)} = \frac{\text{Biyokütle}}{\text{Transpirasyon}} \quad (2.21)$$

$$\text{Biyokütle su verimliliği (ET)} = \frac{\text{Biyokütle}}{\text{Evapotranspirasyon}} \quad (2.22)$$

$$\text{Bitki su verimliliği (T)} = \frac{\text{Kullanılabilir Verim}}{\text{Transpirasyon}} \quad (2.23)$$

$$\text{Bitki su verimliliği (ET)} = \frac{\text{Kullanılabilir Verim}}{\text{Evapotranspirasyon}} \quad (2.24)$$

CWP, aynı zamanda, kullanılan birim su başına besin miktarı olarak ifade edilebilir (Renault ve Wallender, 2000). Ekonomik CWP ise birim kullanılan su miktarı veya ET başına ekonomik fayda (\$/m³) olarak da ifade edilebilir (Molden, 1997).

$$\text{Ekonomik bitki su verimliliği} = \frac{\text{Ekonomik Değer Çıktısı}}{\text{Kullanılan su veya ET}} \quad (2.25)$$

$$\text{Besin bitki su verimliliği} = \frac{\text{Fiziksel mahsul verimi}}{\text{Su kullanımı veya ET}} \times \text{NP} \quad (2.26)$$

NP, kg verim başına besin içeriğidir (beslenme birimi/kg)

Arazi, yetiştirilen bir bitki için maksimum üretkenliği tanımlayan önemli göstergedir. Bu nedenle, temel verimlilik göstergelerinden biri, belirli bir bitkinin bir hektarlık arazide nasıl performans gösterdiğini belirleyen bir göstergedir. Bitki verimi, birim arazide kabul edilen standart nem içeriğindeki hasat edilen tahıl veya diğer mahsulün ağırlığıdır ve aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$\text{Bitki Verimi} = \frac{\text{Verimi}}{\text{İşlenen alan}} \quad (2.27)$$

2.3.7. Sürdürülebilirlik

Sürdürülebilir sulama suyu yönetimi aynı anda iki hedefe ulaşmalıdır: gıda güvenliği için sulu tarımın sürdürülmesi ve doğal çevrenin korunması. Su kaynakları yönetimi için sürdürülebilirlik, su taleplerini ve su kaynakları sisteminin korunmasını eşzamanlı olarak karşılayan bir denge kavramını ifade eder (Cai ve diğerleri, 2001). Sürdürülebilirlik ise, işlenen alan oranı ve tuzluluk performans göstergeleri ile ifade edilebilir.

Sulanan alanın geleneksel olarak işletilme yoğunluğu, sulanan bir alanda yetiştirilen yıllık mahsul sayısının bir fonksiyonudur. Çok farklı büyüme sürelerine sahip çeşitli mahsullerin oluşturduğu bitki paterni nedeniyle bitki yetiştirme yoğunluğu iyi tanımlanmamıştır. Sulanabilir alanın bir mahsul tarafından doluluğunu ölçmek için Bos ve diğerleri (2005), aşağıdaki gibi ifade edilen işlenen alan oranını (CAR) önermiştir,

$$CAR = \frac{\text{Ortalama işlenen alan}}{\text{Toplam sulanabilir alan}} \quad (2.28)$$

Tuzların kök bölgesinden süzülmesi ve yeraltı suyunun yeniden kullanılması nedeniyle, sulanan bir alandaki yeraltı suyunun kalitesi bozulma eğilimindedir. Ayrıca sulama sistemindeki suyun kalitesi, drenaj suyunun dönüş akışı nedeniyle bozulma eğilimindedir. Sulanan alan içinde dikkate alınan yerlerde tuzluluğun oransal değişimi, Bos (1997) tarafından aşağıdaki gibi tanımlanan rölatif elektriksel iletkenlik (EC) oranı ile ölçülebilir:

$$\text{Rölatif EC Oranı} = \frac{\text{Gerçek EC değeri}}{\text{Kritik EC değeri}} \quad (2.29)$$

Kritik EC değeri, sulanan bitkilerin tuz toleransına bağlıdır.

2.3.8. Uluslararası su yönetimi enstitüsü (IWMI) göstergeleri

IWMI tarafından sulama sistemlerinde, performansı karşılaştırmak için dokuz gösterge sunulmuştur (Molden ve diğerleri, 1998). Bu göstergeler, sulu tarımda su, toprak ve finans gibi girdileri, sulama alanında elde edilen çıktılarla ilişkilendirir. Bu göstergelerde ihtiyaç duyulan veriler kolaylıkla elde edilebilmekte ve analizi kolayca yapılabilmektedir.

Dört karşılaştırmalı performans göstergesi, çıktıları birim arazi ile ilişkilendirir ve tarım performansının karşılaştırılması için temel oluşturur.

$$\text{Ekilen alan başına çıktı} = \frac{\text{Üretim}}{\text{Sulanan tarım arazisi alanı}} \quad (2.30)$$

$$\text{Sistem birim başına çıktı} = \frac{\text{Üretim}}{\text{Sistem alanı}} \quad (2.31)$$

$$\text{Su kaynağı başına çıktı} = \frac{\text{Üretim}}{\text{Saptırılmış sulama suyu miktarı}} \quad (2.32)$$

$$\text{Tüketilen su birimine göre çıktı} = \frac{\text{Üretim}}{\text{Gerçek ET}} \quad (2.33)$$

burada, üretim, yerel veya dünya fiyatlarında ölçülen brüt veya net üretim değeri cinsinden sulanan alanın çıktısıdır. Sulanan tarım arazisi alanı, analiz süresi boyunca ekili sulanan alanların toplamıdır. Sistem alanı, proje sahasının alanıdır. Saptırılmış sulama suyu miktarı, proje alanına saptırılan yüzey sulama suyunun hacmidir.

Su temini açısından bireysel sistemi karakterize etmek için üç gösterge tanımlanmıştır. Bunlar RWS, RIS ve su dağıtım kapasitesi (WDC) dir. WDC aşağıdaki gibi ifade edilir,

$$WDC = \frac{\text{Sistem Başında Kanal Kapasitesi}}{\text{En Yüksek Su Talebi}} \quad (2.34)$$

Burada, en yüksek su talebi, sulama sisteminin başında bir akış hızı olarak ifade edilen aylık en yüksek mahsul sulama gereksinimidir.

Sulanan tarımsal sistemlerin performansını karşılaştırmak için iki finansal gösterge tanımlanmış ve aşağıda verilmiştir:

$$\text{Brüt Yatırım Getirisi} = \frac{SGVP}{\text{Sulama Altyapısının Maliyeti}} \quad (2.35)$$

$$\text{Finansal Öz Yeterlilik} = \frac{\text{Sulamadan Elde Edilen Gelir}}{\text{Toplam İşletme ve Bakım Harcamaları}} \quad (2.36)$$

burada, sulama altyapısının maliyeti sulama dağıtım sisteminin maliyetidir. SGVP standartlaştırılmış brüt üretim değeridir. Sulamadan elde edilen gelir, sulama suyu ücretlerinden elde edilen gelir, ya da yerel olarak üretilen diğer gelirlerden elde edilen gelirdir. Toplam işletme ve bakım (O&M) harcamaları, O&M yoluyla yerel olarak harcanan miktardır ve ayrıca devletin dış sübvansiyonlarıdır.

2.4. Sulama Performans Göstergeleri ve Uzaktan Algılama

Uzaktan algılama, farklı konumsal ve zamansal çözünürlüklerde elde edilen kara yüzeyi bilgilerinin toplanmasında kullanılır. Uzaktan algılama ölçümlerinin kalitesi, konumsal ve zamansal çözünürlük olmak üzere iki ana parametre ile ilişkilidir. Konumsal çözünürlük, bir uydu sensörü tarafından algılanabilen veya bir uydu görüntüsünde görüntülenebilen en küçük özelliğin boyutunu ifade eder. Zamansal çözünürlük, görüntüler arasındaki süreyi ifade eder. Bu parametreler uydu görevine göre değişir. Landsat ve ASTER gibi uydulardan gelen görüntüler, 1000 m × 1000 m çözünürlüğe sahip MODIS ve 1100 m × 1100 m çözünürlüğe sahip NOAA-AVHRR uydularına kıyasla 30 m × 30 m gibi daha küçük piksel boyutları nedeniyle detaylı görüntü sunarlar. Hem Landsat hem de ASTER uyduları 16 günlük zamansal çözünürlüğe

sahiptir. Buna karşılık, MODIS ve NOAA-AVHRR uyduları günlük ölçümler sağlar. Sentinel 1 ve 2 gibi diğer uydular, 10 m görüntü çözünürlüğe sahip sağlar. Uzaktan algılama ile sulanan alan, mahsul türü, biyokütle gelişimi, mahsul verimi, bitki suyu gereksinimleri, evapotranspirasyon, tuzluluk ve toprak su doygunluğu hakkında değişen derecelerde başarı ve doğrulukla bilgi sağlayabilmiştir (Bastiaanssen ve Bos, 1999). Su tüketimi gibi bitki parametrelerinin belirlenmesi, geleneksel performans değerlendirme sürecinde oldukça zordur. Uzaktan algılama ile gerçek evapotranspirasyon, farklı alan ölçeklerinde kolaylıkla tahmin edilebilmektedir. Bitki parametrelerini hesaplamak için operasyonel algoritmalar günümüzde mevcuttur ve genişleyen bir araştırma alanı ve geliştirme eğilimleri 1970'lerden beri ilerlemektedir (Hiler ve Clark, 1971; Jackson ve diğerleri, 1977; Seguin ve Itier, 1983). Bu algoritmalar, genellikle sulama performans göstergelerini tahmin etmek için kullanılan ET_a , bitki katsayısı (K_c), normalize edilmiş bitki örtüsü endeksi (NDVI), Yaprak alan endeksi (LAI), buharlaşma fraksiyonu gibi bitki parametrelerini hesaplamak için uydu verilerini kullanmaktadırlar. Bastiaanssen ve diğerleri (1996), Doğu Nil Deltası'ndaki SEBAL modelinden sırasıyla evaporatif fraksiyon ve su tüketiminin homojenliğini içeren yeterlilik ve eşitlik performans göstergelerini hesaplamış ve su dağıtım analizinde uzaktan algılamamanın yararlı olduğunu göstermiştir. Türkiye'de pamuk yetiştiriciliği yapılan Gediz Nehri havzasında, Bastiaanssen (2000), uzaktan algılamadan buharlaşma fraksiyonu ile ifade edilen yeterlilik göstergesinin bitki su stresi için uygun bir gösterge olduğunu göstermiştir. Roerink ve diğerleri (1997), Arjantin'deki Rio Tunuyan sulama sahasında uzaktan algılama ile ET_a varyasyon katsayısı teriminde eşitlik göstergesini tahmin etmiştir. Literatürde, bitki su stresi indeksi (Jackson ve diğerleri, 1981), rölatif su temini (Menenti ve diğerleri, 1989), su eksikliği indeksi (Moran ve diğerleri, 1994), evaporatif fraksiyon (Bastiaanssen ve diğerleri, 1996) gibi birkaç yeterlilik göstergesi bildirilmiştir. Thiruvengadachari ve Sakthivadivel (1997), Hindistan'daki büyük bir çeltik sulama sisteminde tarımsal üretkenliğin uzaktan algılamaya dayalı bir değerlendirmesini gerçekleştirmişlerdir. Bu araştırmacılar, uzaktan algılama ile toplanan konumsal ve zamansal bilgilerin birkaç yıl boyunca sulama alanının performansının değerlendirilmesine yardımcı olabileceğini savunmuşlardır. Bastiaanssen ve diğerleri (1999) suyun verimliliğini, biyokütle veriminin evapotranspirasyona oranı olarak ifade etmişlerdir. Su verimliliğindeki değişimi anlamak, özellikle su kıtlığı koşullarında çok

önemlidir. Bu nedenle su verimini artırarak daha az su kullanarak daha fazla verime ulaşılabilir. Sulama sistemi geliştirme sürecindeki temel amaçlardan biri de sürdürülebilirliğin sağlanmasıdır. Su kaynakları yönetimi için sürdürülebilirlik, su taleplerini ve su kaynakları sisteminin korunmasını aynı anda karşılayan bir denge kavramını ifade eder. Sulama performansı göstergelerinin haritalanması, programın sürdürülebilirliğini etkileyen faktörlerin anlaşılmasına yardımcı olabilir. Ambast ve diğerleri (1999), sulama sürdürülebilirlik performans göstergesi olarak uzaktan algılama yoluyla su kayıt göstergesini rapor etmişlerdir. Sulama performans göstergelerinde uzaktan algılama uygulaması genellikle tarla verilerini tamamlayıcı şekilde gerçekleştirilir. Bastiaanssen ve Bos (1999), uzaktan algılama ile tahmin edilen olası performans göstergelerini (Çizelge2.1) rapor etmiş ve sulama performansı tahmininde uzaktan algılamanın çeşitli avantajlarının altını çizmiştir:

- Uzaktan algılamadan elde edilen ölçümler objektiftir. Önyargılara dayanmazlar.
- Bilgiler, belirli tipteki tarla ölçümlerine kıyasla çok doğru olabilir.
- Uzaktan algılama geniş bir alanı kapsar. Tarla etüdleri genellikle masraf ve lojistik kısıtlamalar nedeniyle küçük bir pilot alanla sınırlıdır.
- Bilgiler büyük resmi vermek için bir araya getirilebilir. Açıklayıcı bilgiler sağlamak için çok ince ölçeklerde veri değişkenliği konumsal olarak dağıtılabilir.
- Bilgi, coğrafi bilgi sistemleri aracılığıyla konumsal olarak temsil edilebilir ve bilgiler tablo biçiminde sağlandığında genellikle görünmeyen konumsal geometrileri ortaya çıkarabilir.
- Uzaktan algılama ölçümleri tekrarlanabilir ve su yönetimi uygulamalarının izlenmesine ve müdahalelerin etkilerinin değerlendirilmesine olanak tanır.

Ancak, uzaktan algılama, performans değerlendirmesinde bazı sınırlamalara sahiptir. Mahsul verimi, evapotranspirasyon ve toprak nemi hakkında geleneksel olarak toplanan verilerin doğruluğu, özellikle bölgesel ölçekte düşük kabul edilmektedir (Bastiaanssen ve Bos, 1999). Gerçek evapotranspirasyon doğrudan ölçülemez. Allen ve diğerleri (2013), kalibrasyon sürecinin uzaktan algılama modelleriyle ET_a tahmininde bir zorluk olmaya devam ettiğini ve otomatik kalibrasyon sürecinde %10'luk bir hata beklendiğini savunmuştur. Uzaktan algılama tabanlı modellerle ET_a tahmininde arazi ölçeğindeki önemli hata kaynaklarından biri de adveksiyon etkisidir. Mkhwanazi ve Chávez (2013)

SEBAL modelini adveksiyon etkili ve adveksiyon etkisi olmayan koşullar altında karşılaştırarak hata düzeyinin %5 ile %46 arasında değiştiğini belirlemiştir. Singh ve diğerleri (2008), SEBAL modelinde adveksiyon etkisine bağlı olarak %28'lik bir hata gözlemlemiştir. Günümüzde, ET_a 'yi konumsal olarak tahmin etmek için standart yöntemler yoktur. ET_a tahmininde standart yöntemlerin yokluğu özellikle bir araştırma zorluğudur. Uzaktan algılanan verilere dayalı göstergelerin doğruluğu daha mı iyi? sorusunun cevabının araştırılması gerekmektedir. Bastiaanssen ve Bos (1999), uzaktan algılama verilerinden bireysel parametrenin ölçüm doğruluğunun %80 ile %90 arasında değiştiğini göstermiştir.

Çizelge 2.1. Uzaktan algılama kullanılarak ölçülebilen olası performans göstergeleri.

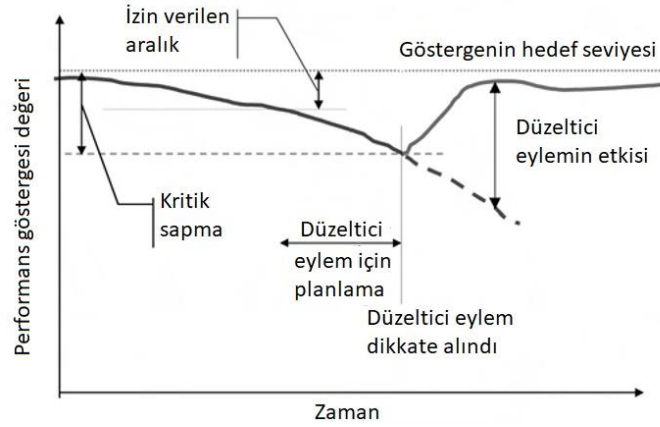
Performans göstergeleri	Uzaktan algılamanın kullanma amacı
Yeterlilik	
Bitki su stress indeksi	Yüzey enerji dengesi
Rölatif su temini	Bitki su ihtiyaçları
Su eksikliği indeksi	Yüzey enerji dengesi
Evaporatif fraksiyon	Yüzey enerji dengesi
Toprak nemi	Mikrodalga teknikleri
Eşitlik	
Birim alan başına su uygulaması	Bitki örtüsü indeksi
ET varyans katsayısı	Yüzey enerji dengesi
Evaporatif fraksiyon varyans katsayısı	Yüzey enerji dengesi
Tüketilen su varyans katsayısı	Yüzey enerji dengesi
Bitki verimin konumsal geometrisi	Bitki örtüsü indeksi
Gerçek ET nin konumsal geometrisi	Yüzey enerji dengesi
Güvenilirlik	
Evaporatif fraksiyon	Evaporatif fraksiyon zaman serisi
Verimlilik	
Uygulanan su miktarına göre gerçek evapotranspirasyon	Su dengesi
Uygulanan su miktarına göre verim	Bitki örtüsü indeksi
Evapotranspirasyon miktarına verim	Bitki örtüsü indeksi ve yüzey enerji dengesi
Sürdürülebilirlik	
Sulama sıklığı	Çok bantlı sınıflandırma
Çeltik yoğunluğu	Çok bantlı sınıflandırma
Buğday yoğunluğu	Çok bantlı sınıflandırma
Toprak su doygunluğu	Yüzey albedo
Üst toprak tuzluluğu	Yanlış renk kompoziti

2.5. Sulama Performans Göstergeleri Standartları

Sulama performansı göstergelerinin değerlendirilmesi ve karşılaştırılması için hiçbir karşılaştırma kriteri mevcut değilse, sulama performans göstergeleri bir anlam taşımaz. Bu nedenle, performans değerlendirme çalışmalarının uluslararası düzeyde karşılaştırılmasını kolaylaştırmak için performans göstergelerinin normatif standart değerleri geliştirilmiştir (ICID, 1978; Small ve Svendsen, 1992; Molden ve diğerleri, 1998; Değirmenci diğerleri, 2003). İç, dış ve bağıl gösterge standartları Small ve Svendsen (1992) tarafından sınıflandırılmıştır. İç standartlar sulanan proje alanını yerel olarak yönetmek için oluşturulan standartlardır. Bu standartlar, su dağıtım miktarını, su dağıtım zamanını, sulama hizmeti tarihi gibi standartları içermektedir. Bitki su ihtiyacı gibi bazı parametreleri normalleştirmek için dış göstergeler tanımlanmıştır. Bu göstergeler birçok kaynaktan türetilmiş ve uluslararası kullanım için standardize edilmiştir. Bağıl göstergeler, belirli bir sistem için bir performans ölçüsünün değerini, büyük bir karşılaştırılabilir sistem grubundan türetilen ortalama değerlerle karşılaştırmak için kullanılır. Bos ve diğerleri (2005) standart performans göstergelerini dört grup altında sınıflandırmışlardır:

- Kritik değer: ölçülebilir parametre ile karşılaştırmak için göstergenin sınır değerini belirlenir,
- Amaçlanan değer: gerçek bir fiziksel durumun amaçlanan bir değere göre klasik karşılaştırmasıdır. Bu süreç, bu değer belirlenmesinde bir insan kararı varsa kullanılır,
- Gerçek girdi değeri: bu değer, temel kaynakların girdi oranlarına göre çıktının miktarını belirlemek için kullanılır. Klasik sulama göstergeleri bu grupta değerlendirilir,
- Toplam değer: bu değer, toplam kullanılabilir kaynağın gerçek performans oranını (yüzde) ölçmek için kullanılır. Bu göstergelerin çoğu sulama yönetiminin sosyo-ekonomik (bütçe) parametreleriyle ilgilidir.

Performans değerlendirme sırasındaki karakteristik aktivite, bir parametrenin ölçülen değerinin bu parametrenin hedef değeri veya amaçlanan değeri ile karşılaştırılmasıdır. Bu nedenle gösterge, bir yönetim eylemini tetiklemeden izin verilen aralıkta dalgalanabilir (Şekil 2.4). Bununla birlikte, gösterge bu aralığın dışına çıkarsa, sorunun teşhisi düzeltici faaliyetin planlanmasına yol açmalıdır (Şekil 2.3).



Şekil 2.4. Performans göstergelerinin kullanımına ilişkin terminoloji.

Molden ve Gates (1990), bir sulama-su dağıtım sisteminin ne kadar iyi çalıştığını değerlendirmek için su dağıtım performans göstergelerinin yeterliliği (P_A), verimliliği (P_F), güvenilirliği (P_D) ve eşitliği (P_E) için standartlar belirlemiştir (Çizelge 2.2).

Çizelge 2.2. Performans standartları.

Ölçüm	Performans Sınıfları		
	İyi	Orta	Zayıf
P_A	0.90 - 1.00	0.80 - 0.89	< 0.80
P_F	0.85 - 1.00	0.70 - 0.84	< 0.70
P_E	0.00 - 0.10	0.11 - 0.25	> 0.25
P_D	0.00 - 0.10	0.11 - 0.20	> 0.20

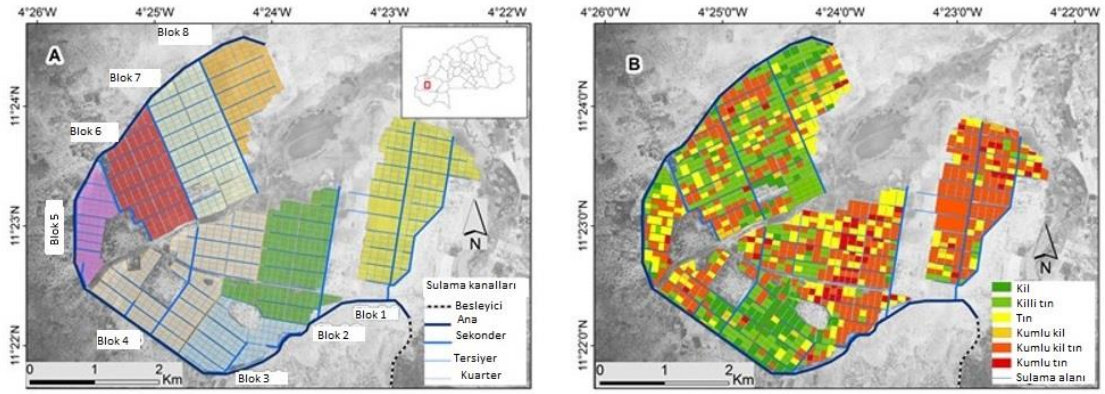
3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Materyal

3.1.1. Çalışma alanı

Çalışma alanı olan ve 1973 yılında inşa edilen KVIS, sekiz bloğa (Şekil 3.1A) bölünmüş 1200 hektarlık bir sulama proje alanıdır. Bu alanda tahıllar, yumru köklü bitkiler ve sebzeler dahil olmak üzere farklı bitkiler yetiştirilmektedir. KVIS, güneybatı Burkina Faso'daki Kou havzasında yer almaktadır. Kou havzası, sürekli su kaynakları nedeniyle su kaynakları açısından nispeten zengindir (Şekil Ek 1) (Dembélé ve diğerleri, 2012; Wellens ve diğerleri, 2013). Kou havzası, iki ana iklim mevsimi, Haziran'dan Eylül'e kadar yağmurlu bir mevsim ve ardından Ekim'den Mayıs'a kadar kurak bir mevsime sahip olan yarı nemli bir iklim ile karakterize edilebilir (Guinko, 1984; Traoré, 2012). Bitki örtüsü, *Carpa procera*, *Antizoris africana*, *Dalium guineense* ve *Chlorophora regia* gibi birçok Gine türlerinin bulunduğu büyük orman galerilerinden oluşur (Guinko, 1984). Aylık sıcaklıklar ortalama 18°C ile 37°C arasında değişmekte olup, bağıl nem değerleri mevsime bağlı olarak %20 ile %80 arasında değişmektedir (Traoré, 2012). Ortalama yıllık yağış 900 ile 1100 mm arasında değişmekte olup, yıllık potansiyel evapotranspirasyon ortalama 2000 mm'dir (Dembélé ve diğerleri, 2012; Traoré ve diğerleri, 2013). Havza alanının su kaynağı Kou Nehri ve kollarından gelen sudur. Su alma yapısından, kuru ve yağışlı mevsimlerde sırasıyla ortalama 1,4 ve 3,5 m³ s⁻¹ hacminde alınan sulama suyu yerçekimi ile iletilmektedir (Wellens ve diğerleri, 2013). Ana kanaldan kuartir kanallara kadar hiyerarşik bir sulama kanalı sistemi, proje alanı boyunca suyu iletir (Şekil 3.1A). KVIS proje alanında altı baskın toprak tekstür sınıfı bulunur (Wellens ve diğerleri, 2007; Dembélé ve diğerleri, 2012): Bunlar, kil, killi silt, kumlu kil, kumlu killi silt, silt ve kumlu silt 'dir (Şekil 3.1B). KVIS'te, çiftçiler iki farklı yetiştirme döneminde üretim yaparlar. Bu yetiştirme dönemleri Ocak'tan Mayıs'a kadar kurak mevsim ve Haziran'dan Ekim'e kadar yağışlı mevsim olarak tanımlanır. KVIS'te çiftçiler, su kullanıcıları birliği (WUA) bünyesinde örgütlenmiş ve Bama Çeltik Kooperatifleri Birliği (UCRB) adlı bir ana birlik çatısı altında çiftçiler tarafından yönetilmektedir. KVIS kapsamında WUA 'ya kayıtlı üye sayısı 2018 itibari ile 1300'den fazladır (kişisel görüşme: Lassané Kaboré¹).

¹ KVIS chef manager



Şekil 3.1. Burkina Faso Kou Vadisi sulama alanında sulama kanallarının ve bloklarının (A) ve baskın toprak türlerinin dağılımı (B).

3.1.2. Landsat görüntüleri

Bu çalışmada, Landsat-7 ETM+ ve Landsat-8 Operasyonel Arazi Görüntüleyici (OLI) ve Termal Kızılötesi Sensör (TIRS) cihazlarından açık gökyüzü görüntüleri kullanılmıştır (Çizelge 3.1). Uydu görüntüleri <https://earthexplorer.usgs.gov/> web sitesinden alınmıştır. Landsat 8 OLI / TRIS bantları 2-7 (konumsal çözünürlük 30 m), bant 10 ve 11 (konumsal çözünürlük 100 m) ve Landsat 7 ETM + bantları 1-5 ve 7 (konumsal çözünürlük 30 m) ve bant 6 (konumsal çözünürlük 60 m) kullanılmıştır. KVIS'te ET_a 'yı hesaplamak için PySEBAL modelinde Landsat görüntüleri kullanılmıştır.

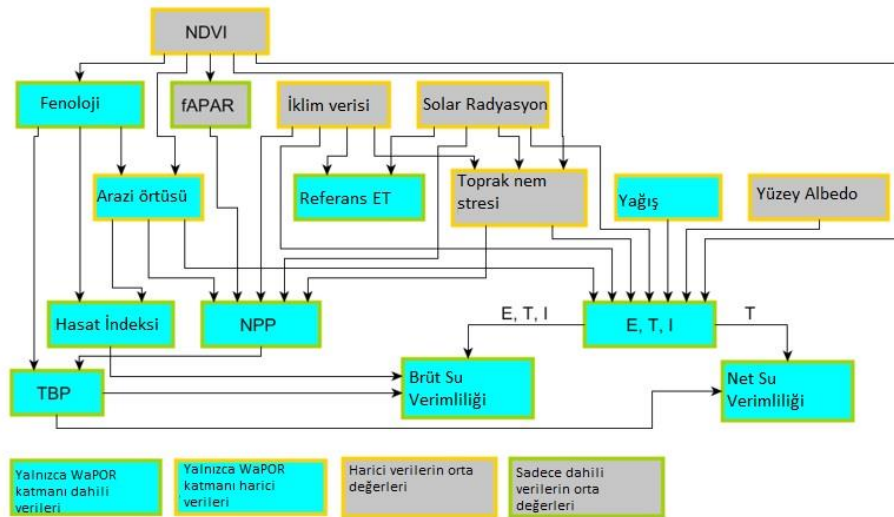
Çizelge 3.1. 2013-2014 çalışma dönemi boyunca Kou Vadisi sulama alanında sulama performansını değerlendirmek için kullanılan Landsat görüntüleri.

Kurak sezon 2013			Kurak sezon 2014		
No.	Görüntü tarihi	Sensor ¹	No.	Görüntü tarihi	Sensor
1	02/01/2013	LE7	1	28/12/2013	LC8
2	18/01/2013	LE7	2	29/01/2014	LC8
3	03/02/2013	LE7	3	14/02/2014	LC8
4	07/03/2013	LE7	4	18/03/2014	LC8
5	08/04/2013	LE7	5	03/04/2014	LC8
6	09/04/2013	LC8	6	19/04/2014	LC8
7	03/06/2013	LC8	7	21/05/2014	LC8

¹ LE7: Landsat-7 ETM+. LC8: Landsat-8 OLI/TIRS.

3.1.3. FAO su verimliliği açık erişim ET_a verileri

FAO Afrika ve Yakın Doğu'daki tarımsal su verimliliğini uzaktan algılama verilerinden izlemekte ve raporlamaktadır. WaPOR açık erişim sistemi, su verimliliği veri tabanına ve onun altında yatan binlerce harita katmanı için açık erişim sağlar, doğrudan veri sorgulamalarına, zaman serisi analizlerine, alan istatistiklerine ve su-arazi üretkenliği değerlendirmeleriyle ilişkili temel değişkenlerin verilerinin indirilmesine izin verir. Şekil 3.2, veri bileşenleri arasındaki ilişkiyi göstermektedir. FAO-WaPOR (https://wapor.apps.fao.org/home/WAPOR_2/1), arazi ve su verimliliği verilerini üretmek için kıtasal (250 m konumsal çözünürlük), ülke ve nehir havzası (100 m konumsal çözünürlük) ve yerel (30 m konumsal çözünürlük) olmak üzere üç konumsal seviyede uydu verilerini kullanır. Farklı konumsal ve zamansal ölçeklerdeki buharlaşma değerleri, ETLook modeli aracılığıyla Penman-Monteith denklemi ve uydudan türetilmiş veriler kullanılarak belirlenir (Bastiaanssen ve diğerleri, 2012). Uydu verileri MODIS (Orta Çözünürlüklü Görüntüleme Spektrometresi) ve AMSRE (Gelişmiş Mikrodalga Taramalı Radyometre) sensörlerinden alınmaktadır. FAO-WaPOR verileri, çeşitli bağımsız veri kaynakları (FAO ve IHE Delft, 2019) kullanılarak farklı katmanların tutarlılığı kontrol edilerek niteliksel olarak değerlendirilmiştir. Bu çalışma için, tahmini PySEBAL-ET_a'nın kalitesini değerlendirmek için FAO-WaPOR veri portalından çalışma dönemi (Ocak-Nisan 2013 ve 2014) için 250 m konumsal çözünürlükte dekadal (10 günlük periyot) ET_a verileri kullanılmıştır.



Şekil 3.2. WaPOR veri bileşeni akış şeması.

Kısaltma, E: Buharlaşma, T: Terleme, I: Kesişme, NPP: Net birincil üretim, TBP: Toplam biyokütle üretimi, ET: Evapotranspirasyon, NDVI: Normalize edilmiş farklar bitki örtüsü indeksi. Gri kutular, harici verileri standartlaştırılmış girdiye dönüştüren ara veri bileşenlerini temsil eder. Yeşil ana hatlar, yalnızca diğer veri bileşenlerinden türetilen veri bileşenlerini temsil eder. Turuncu ana hatları olan kutular, akış şemasında gösterilmeyen dış veri kaynakları gerektiren veri bileşenlerini temsil eder. Mavi kutular, WaPOR aracılığıyla dağıtılan veri değişkenlerini temsil eder.

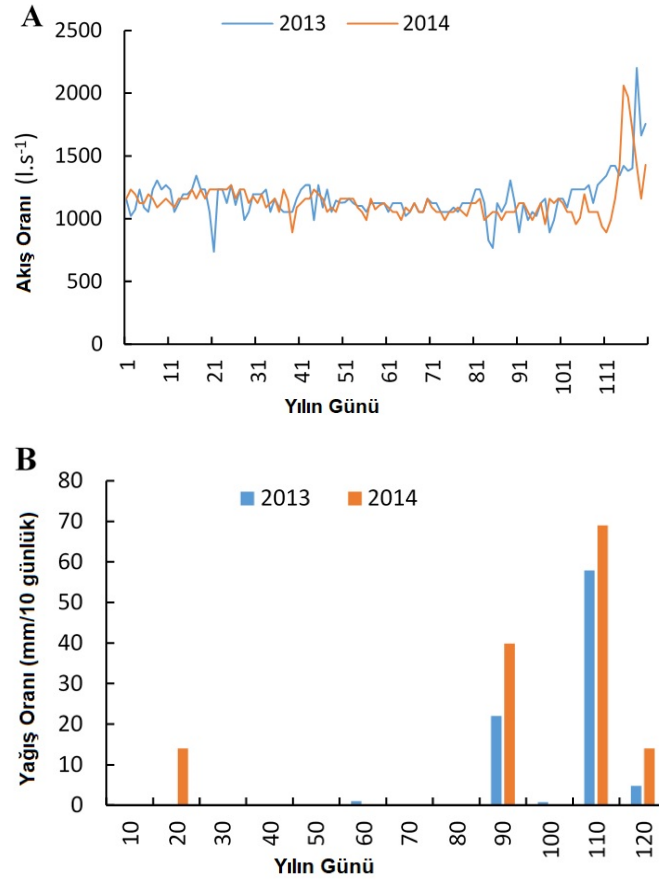
3.1.4. İklim ve sayısal yükseklik modeli verileri

Çalışmada, 2013 ve 2014 yıllarına ait 3-saatlik ve günlük hava sıcaklığı, rüzgar hızı, bağıl nem ve güneş radyasyonu verileri kullanılmıştır. Hava sıcaklığı, rüzgar hızı ve bağıl nem verileri KVIS'in yaklaşık 25 km güneydoğusunda bulunan Bobo-Dioulasso hava istasyonundan, güneş radyasyonu verileri ise <http://www.soda-pro.com> internet adresinden alınmıştır. ET_0 'ı hesaplamak için REF-ET yazılım paketinde günlük iklim verileri kullanılmıştır (Allen, 2016). ET_a 'nın hesaplanmasında PySEBAL modelinde 3 saatlik ve günlük hava durumu verileri kullanılmıştır.

Yükseklik ve eğime göre sıcaklıklardaki değişimler göz önüne alındığında PySEBAL içerisinde yüzey sıcaklığı düzeltmesinde 30 m konumsal çözünürlükte DEM verileri kullanılmıştır. DEM verileri ABD Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi'nin (NASA) Mekik Radar Topografya Görevi (SRTM) veri tabanından elde edilmiştir.

3.1.5. Arazi verileri

Arazi verileri olarak, çeltik, mısır ve tatlı patates için günlük su akış miktarı (KVIS'in besleyici kanalındaki sulama suyu miktarı), 10 günlük yağış oranları, hasat indeksi (HI) ve tane/yumru nem içeriği kullanılmıştır. Besleme kanalında ölçülen çalışma dönemi için sulama suyu debisi ve yağış miktarları (şekil 3.3) KVIS'in yönetim ekibinden elde edilmiştir (DRASA-Ouest, 2014). Drenaj ve derine sızma verileri çalışma süresi için temin edilememiştir.



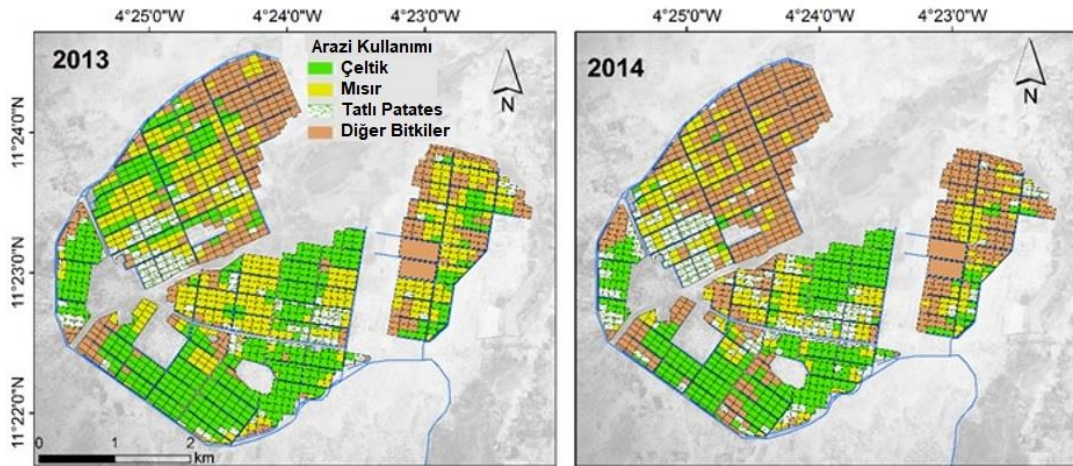
Şekil 3.3. Çalışma dönemi boyunca Kou Vadisi sulama alanında ana kanalın (A) su akış hızları ve yağış oranları (B).

HI ve tane/yumru nem içeriği verileri literatürden elde edilmiştir (Doorenbos ve Kassam, 1979; FAO, 1992; Lang, 2001; Steduto ve diğerleri, 2012). HI ve tane/yumru nem içerikleri (Çizelge 3.2), KVIS genelindeki ortak mahsul yönetimi uygulamalarını yansıtmak için rapor edilen değerler aralığında seçilmiştir.

Çizelge 3.2. Bu çalışmada kullanılan çeltik, mısır ve tatlı patates için hasat indeksi (HI) ve nem içeriği değerleri.

Bitki	HI (birimsiz)		Nem içeriği (%)			
	Referans		Bu çalışma	Referans		Bu çalışma
	Değer	Kaynaklar		Değer	Kaynaklar	
Çeltik	0.40-0.50	(Doorenbos ve Kassam, 1979)	0.45	15-20	(Doorenbos ve Kassam, 1979)	17
Mısır	0.30-0.40	(Steduto ve diğerleri 2012)	0.35	18-24	(FAO, 1992)	22
Tatlı Patates	0.75-0.85	(Lang, 2001)	0.8	75-80	(Steduto ve diğerleri 2012)	80

Çalışma süresi boyunca, çeltik genellikle KVIS'in güney kısımlarında yetiştirilmiştir. Mısır ekim alanları, sulama alanının orta ve kuzeydoğu kısımlarında yer alırken, tatlı patates ise çoğunlukla sulama alanının orta kısımlarında yetiştirilmiştir (Şekil 3.4). 2013 yılında çeltik, mısır ve tatlı patates ekilen alanlar sırasıyla 452, 369 ve 113 ha 'dır. 2014 yılı için ilgili değerler 317, 232 ve 175 ha 'dır (DRASA-Ouest, 2014; Nitcheu ve diğerleri, 2014). Sulamanın kritik dönemi tipik olarak Ocak'tan Nisan'a kadar uzanır ve çeltik ekim hazırlıkları Aralık'ta başlar ve ardından Ocak ayında ekim yapılmış olur. Mısır ekimi ve tatlı patates ekimi de Ocak ayında gerçekleşir. Mısır, tatlı patates ve çeltik çeşitlerinin büyüme döngüleri sırasıyla 80-100 gün, 90-100 gün ve 90-120 gün arasında değişmektedir. Belirtilen bu üç bitkinin hasat genellikle Mayıs ayında gerçekleştirilir. Afrika için Yeni çeltik (NERICA) çeşitleri (potansiyel çeltik verimi 5.0-7.0 t ha⁻¹), kompozit mısır çeşitleri (Barka ve Espoir çeşitlerinin potansiyel verim seviyeleri 4.0 - 6.5 t ha⁻¹ arasındadır) ve yerel tatlı patates çeşitleri (potansiyel verim seviyeleri 20.0 ile 30.0 t ha⁻¹ arasında değişmektedir), çalışma döneminde KVIS'de yetiştirilmiştir (Dembélé ve diğerleri, 2006; MASA, 2014).



Şekil 3.4. 2013 ve 2014 yıllarında kurak mevsim üretim döneminde KVIS sulama alanındaki arazi kullanımı.

3.1.6. Fizikokimyasal veriler

Çeşitli toprak fizikokimyasal değişkenler, Afrika Toprak Bilgi Servisi (AfSIS; Hengl ve diğerleri, 2015; 2017a; 2017b) ve AfSIS için derlenen Afrika Toprak Profilleri veritabanından (Leenaars, 2012; Leenaars ve diğerleri, 2014) alınmıştır. Veri tabanından alınan veriler; anakaya derinliği (DtB), hacim ağırlığı (BLD), kil içeriği (CL), silt içeriği

(SL), kum içeriği (SN), toprak organik karbonu (SOC), kullanılabilir su kapasitesi (AWC), potansiyel hidrojen (pH), kation değişim kapasitesi (CEC), toplam nitrojen (N) ve ekstrakte edilebilir kalsiyum (Ca), demir (Fe), magnezyum (Mg), fosfor (P), potasyum (K) ve çinko (Zn)'dir. Ana kayanın derinliği ile ilgili veriler dışında, çeltik bitkilerinin sığ kök derinliği nedeniyle 30 cm'lik üst toprak tabakası için veriler kullanılmıştır. AfSIS ve AfSIS için derlenen Afrika Toprak Profilleri veri tabanındaki toprak fizikokimyasal değişkenleri, 1960–2016 dönemini kapsayan, 250 m konumsal çözünürlükte toprak özelliklerinin ortalama durumunu temsil etmektedir (Hengl ve diğerleri, 2015; 2017a; 2017b). Bu verilerin, SSA'da çeltik dahil olmak üzere çeşitli mahsul alanlarındaki varyasyon kaynaklarını anlamada etkili olduğu kanıtlanmıştır (Hessels ve diğerleri, 2017; Djağba ve diğerleri, 2018; Dossou-Yovo ve diğerleri, 2019; Akpoti ve ark., 2020). AfSIS'deki toprak veri derleme metodolojisi ve toprak besin haritalarının değerlendirilmesi hakkında daha fazla bilgi Leenaars ve diğerleri, (2014), Hengl ve diğerleri, (2015) ve Hengl ve diğerleri, (2017a) 'da bulunmaktadır.

Çalışmaya her çeltik arazisi için iki değişken eklenmiştir. Bunlar, tarım arazisinin deniz seviyesinden yüksekliği (Arazi kotu) ve arazi ile ana kanal su alım noktası arasındaki mesafe (D_{PSI})'dir. Arazi kotu, ABD Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi'nin (NASA) SRTM veri tabanından 30 m konumsal çözünürlüklü olarak elde edilmiştir (Farr ve diğerleri, 2007). D_{PSI} , ArcGIS yazılımından yakın mesafe aracı kullanılarak, her bir çeltik arazisinin ağırlık merkezi ile KVIS sulama suyu giriş noktasına kadar sekonder ve ana kanal uzunlukları toplamı alınarak belirlenmiştir.

3.2. Yöntem

3.2.1. Gerçek evapotranspirasyonun konumsal-zamansal varyasyonu²

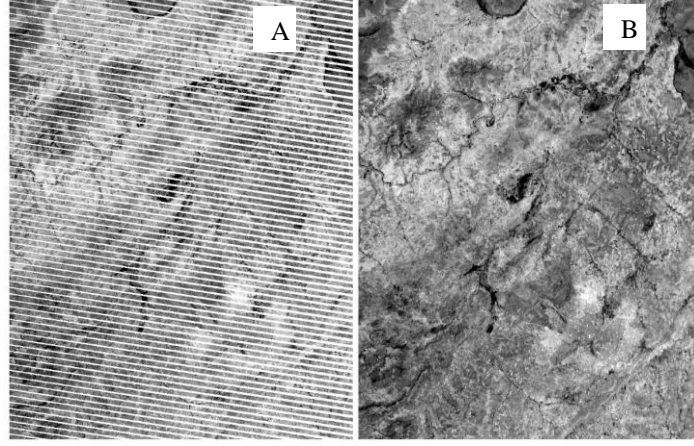
Evapotranspirasyon (ET), hidrosfer, atmosfer ve biyosfer arasındaki enerji ve kütle alışverişini belirlemede önemli bir rol oynar (Sellers ve diğerleri, 1996; Allen ve diğerleri, 1998). ET'yi tahmin etmek için çeşitli karmaşıklık düzeylerine ve veri gereksinimlerine sahip yöntemler mevcuttur. Bunlar, hava sıcaklığına dayalı yöntemler

² Bu bölüm aşağıdaki yayına dayanmaktadır: Sawadogo, A., Gundogdu, K. S., Traoré, F., Kouadio, L., & Hessels, T. (2020). Estimating In-Season Actual Evapotranspiration Over A Large-Scale Irrigation Scheme In Resource-Limited Conditions. *Comptes rendus de l'Académie bulgare des Sciences*, 73(10). [DOI:10.7546/CRABS.2020.10.18](https://doi.org/10.7546/CRABS.2020.10.18).

(Thornthwaite, 1948; Blaney ve Criddle, 1950), çeşitli iklim değişkenlerini içeren yöntemler (örneğin bağıl nem, rüzgar hızı, güneş radyasyonu ve hava sıcaklığı) (Penman, 1948) veya uydu tabanlı uzaktan algılama yöntemleri (Bastiaanssen, 1995; Bastiaanssen ve diğerleri, 1998; Su, 2002; Allen ve diğerleri, 2007; Nagler ve diğerleri, 2013; Senay ve diğerleri, 2013) şeklinde sıralanabilir. ET ölçümü için kullanılan yöntemler arasında tartılı lizimetreler alan ölçeği uygulamaları için standart kabul edilmektedir (Dugas ve Bland, 1989; Ünlü ve diğerleri, 2010). Büyük ölçekli alanlarda kullanımları, maliyetlerinin yüksek olması nedeniyle sınırlıdır ve elde edilen değerler, belirli bir sulama alanındaki konumsal değişkenliği temsil etmekte başarısız olabilmektedir (Bastiaanssen ve Bandara, 2001). Bu sınırlılıkların üstesinden gelmek için, uzaktan algılama tabanlı yöntemler kullanılır. İklim verilerine ek olarak bu tür verileri kullanan Arazi için Yüzey Enerji Dengesi Algoritması (SEBAL) modeli örnek olarak verilebilir (Bastiaanssen ve diğerleri, 1998). Uzaktan algılama tabanlı yöntemlerin temel avantajlarından biri, maliyet etkinliği ve çeşitli ölçekleri (tarladan havzaya ve bölgeye) kapsama kabiliyetidir. Bu çalışmada, büyük ölçekli (1200 ha) bir sulama sistemi olan KVIS üzerinden ET_a 'yı tahmin etmek için uygun maliyetli ve açık kaynak uydu tabanlı bir yaklaşım kullanılmıştır. Sulama için kritik dönem olan kurak mevsimlerde (Ocak-Nisan) ET_a değerleri 2013 ve 2014 yılları için PySEBAL modeli kullanılarak tahmin edilmiştir.

Veri yeniden örnekleme (yani, 100 m konumsal çözünürlük verilerinin 30 m konumsal çözünürlük verilerine yükseltilmesi), atmosferik düzeltmeler, sayısal yükseklik modeli (DEM) verilerinin işlenmesi ve bulut maskesi oluşturma dahil olmak üzere veri ön işleme, uydu görüntülerindeki sayısal değerlerin ışınma veya yansıtma değerlerine dönüştürülmesi, PySEBAL içinde gerçekleştirilmiştir (Hessels ve diğerleri, 2017). Landsat-7 ETM+ 'de çalışma yılları için temin edilen her görüntüde şerit şeklindeki görüntü bozulmaları bulunmaktadır (Şekil 3.5A). Bu durum, şeritlerin bulunduğu konumlardaki verinin alınmamasına neden olmuştur (Storey ve diğerleri, 2005). Bu sorun, indirilen veri ile birlikte gelen maske bantlar kullanılarak giderilmiştir. Jaafar ve Ahmad (2020), Landsat-7 ETM+ bantlarından ET_a hesaplaması için bant boşluklarının doldurulmasının, şerit boşlukları içinde nihai ET_a değerlerini doldurmaktan daha tutarlı ET_a değerleri ürettiğine işaret etmişlerdir. Bu nedenle, ET_a hesaplamalarından önce, her Landsat-7 ETM+ bandındaki boşluklar, Ters Mesafe Ağırlıklandırma enterpolasyon

algoritması (Şekil 3.5B) kullanılarak doldurulmuştur (Lu ve Wong, 2008; Jing ve Wu, 2013).



Şekil 3.5. Landsat 7 ETM+ görüntüsü enterpolasyon öncesi (A) ve sonrası (B).

Toprak Yüzey Enerji Dengesi Algoritması (PySEBAL) modeli için Python modülü, IHE-Delft Su Eğitimi Enstitüsü tarafından geliştirilmiştir. <https://pypi.org/project/SEBAL/> adresinden ücretsiz olarak edinilebilir. Model, uydu görüntüleri, sayısal yükseklik modeli (DEM) ve meteoroloji (hava sıcaklığı, rüzgar hızı, bağıl nem ve güneş radyasyonu) verilerini kullanarak yüzey enerji dengesinden bitki su parametrelerini tahmin etmek için kullanılır. Çeşitli uydu görüntüleri, örneğin, Landsat, Orta Çözünürlüklü Görüntüleme Spektrometre (MODIS), PROBA-Bitki Örtüsü ve Görünür Kızılötesi Görüntüleme Radyometre Paketi (VIIRS), PySEBAL modeli tarafından kullanılabilir. Arazi düzeyinde doğru ET_a tahminleri için yüksek konumsal ve zamansal çözünürlüğe sahip uydu görüntülerine ihtiyaç bulunmaktadır. Model çıktı verileri, evapotranspirasyon, biyokütle üretimi, bitki örtüsü endeksi, toprak nemi, radyasyon dengesi ve enerji dengesi içermektedir. Bu çalışma için PySEBAL modeli ile tahmin edilen günlük gerçek evapotranspirasyon verileri kullanılmıştır.

Modelde, gizli ısı akısını (λE , $W m^{-2}$) elde etmek için kara yüzeyindeki uydu geçişi zamanındaki enerji dengesini hesaplanmaktadır (Bastiaanssen ve diğerleri 2002 ve 2005):

$$\lambda E = R_n - G - H \quad (3.1)$$

burada R_n net radyasyon, ($W m^{-2}$), G toprak ısı akışı ($W m^{-2}$) ve H hissedilir ısı akışı ($W m^{-2}$).

Yüzeydeki net radyasyon akısı (R_n), yüzeyde bulunan gerçek radyant enerjiyi temsil etmektedir. Net radyasyonu hesaplamak için aşağıdaki yüzey radyasyon dengesi denklemini kullanılmaktadır:

$$R_n = (1 - \alpha) R_{s\downarrow} + R_{L\downarrow} - R_{L\uparrow} - (1 - \epsilon_0) R_{L\downarrow} \quad (3.2)$$

burada, α yüzey albedosu, $R_{s\downarrow}$ gelen kısa dalga radyasyonu, ($W m^{-2}$), $R_{L\downarrow}$ gelen uzun dalga radyasyonu, ($W m^{-2}$), $R_{L\uparrow}$ giden uzun dalga radyasyonu ($W m^{-2}$) ve ϵ_0 yüzey salınımıdır.

Toprak ısı akışı (G), dünya yüzeyinden yeraltına aktarılan ısı enerjisinin oranıdır. G , net radyasyon, yüzey sıcaklığı, albedo ve normalize edilmiş bitki örtüsü endeksinin (NDVI) bir fonksiyonu olarak tahmin edilmekte ve PySEBAL yönteminde Bastiaanssen (1995) tarafından geliştirilen ampirik denklem, kara pikselleri için G 'yi hesaplamak için kullanılmaktadır:

$$G = R_n(T_s (0.0038 + 0.0074 \alpha)(1 - 0.978 \times NDVI^4)) \quad (3.3)$$

burada T_s yüzey sıcaklığı (K), NDVI ise normalize edilmiş bitki örtüsü endeksidir.

Hissedilir ısı akışı (H), dünya yüzeyinden atmosfere iletim ve konveksiyon yoluyla aktarılan ısı enerjisinin oranıdır. H , yüzey sıcaklığı, yüzey pürüzlülüğü ve rüzgar hızından tahmin edilir. Hissedilir ısı akışı, aşağıdaki ısı transfer denklemini kullanılarak belirlenmektedir:

$$H = \frac{\rho \times c_p \times dT}{r_{ah}} \quad (3.4)$$

burada ρ hava yoğunluğu ($kg m^{-3}$) c_p sabit basınçtaki havanın özgül ısısı ($J kg^{-1} K^{-1}$), dT dikey yakın yüzey sıcaklık farkı (K) ve r_{ah} ısı aktarımına aerodinamik dirençtir ($s m^{-1}$).

Hissedilir ısı akışı, aerodinamik direnç ve hissedilir ısı akışı arasındaki ilişki nedeniyle yinelemeli bir şekilde hesaplanır. İlk iterasyonda, konveksiyonsuz nötr bir hava durumu varsayılmaktadır. Bu ilk yineleme, hissedilir bir ısı akışı ile sonuçlanacak, bu nedenle hava kararsız hale gelecek ve bu da aerodinamik direnci değiştirmekte ve bir sonraki yineleme adımı için girdi sağlamaktadır. Bu yineleme, nihai hissedilir ısı akışını bulmak için birçok kez gerçekleştirilir.

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

$$EF_{inst} = \frac{\lambda E}{\lambda E + H} \quad (3.5)$$

Günlük evaporatif fraksiyonun gün boyunca sabit olduğu varsayılır. Bu nedenle, anlık evaporatif fraksiyonu, günlük ET'yi hesaplamak için kullanılabilir. Günlük buharlaşma, aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanır:

$$ET_{24} = EF_{inst} \times AF \times \frac{R_{n24}}{\lambda \times \rho_w} \times 86400000 \quad (3.6)$$

AF'nin adveksiyon faktörü olduğu durumlarda; λ , buharlaşmanın gizli ısı (J kg⁻¹); ve ρ_w suyun yoğunluğu (kg m⁻³), R_{n24} 24 saatlik net radyasyon (W m⁻²). Adveksiyon faktörü, bölgesel ilerlemenin herhangi bir etkisini hesaba katmak için kullanılır ve aşağıdaki denklemle hesaplanmaktadır:

$$AF = 1 + 0.985(\exp((e_{sat,24} - e_{act,24}) \times 0.08) - 1) EF_{inst} \quad (3.7)$$

burada $e_{sat,24}$, 24 saatlik ortalama doymuş buhar basıncını (kPa) ve $e_{act,24}$, 24 saatlik ortalama gerçek buhar basıncını ifade etmektedir (kPa).

Bu çalışma için, PySEBAL'den elde edilen günlük veriler, sezonluk gerçek evapotranspirasyonu tahmin etmek için kullanılmıştır. Belirli sayıda uydu görüntüsünden türetilmiş ET_a haritalarında aylık ve sezonluk ET_a 'yı tahmin etmeye yönelik bir yaklaşım, FAO-56 tarafından önerilen yöntemle benzer şekilde, her piksel için bir bitki katsayısı eğrisinin oluşturulmasına dayanmaktadır (Trezza ve diğerleri, 2018). PySEBAL modeli, sonuç olarak günlük ET_a ve bitki katsayısı (k_c) değer haritalarını tahmin eden bir yaklaşımdır. Sezonluk ET_a 'yı belirlemek için, uydu görüntüsünün alındığı günler için k_c belirlenmiş olmalıdır. Bazı uydu görüntülerinin bulutlu olması ve Landsat'ın 16 günlük zamansal çözünürlüğü olması k_c 'nin günlük olarak belirlenmesinde kısıt oluşturmaktadır. Bu amaçla birbirini izleyen uydu görüntülerinden elde edilen k_c değerleri arasında doğrusal interpolasyon yapılmıştır. Enterpolasyonlu K_c değerleri, her gün için ET_0 ile çarpılmış ve aşağıdaki gibi sezonluk ET_a elde edilmiştir:

$$ET_{a(sezon)} = \sum_{i=m}^n [(K_{ci})(ET_{024i})] \quad (3.8)$$

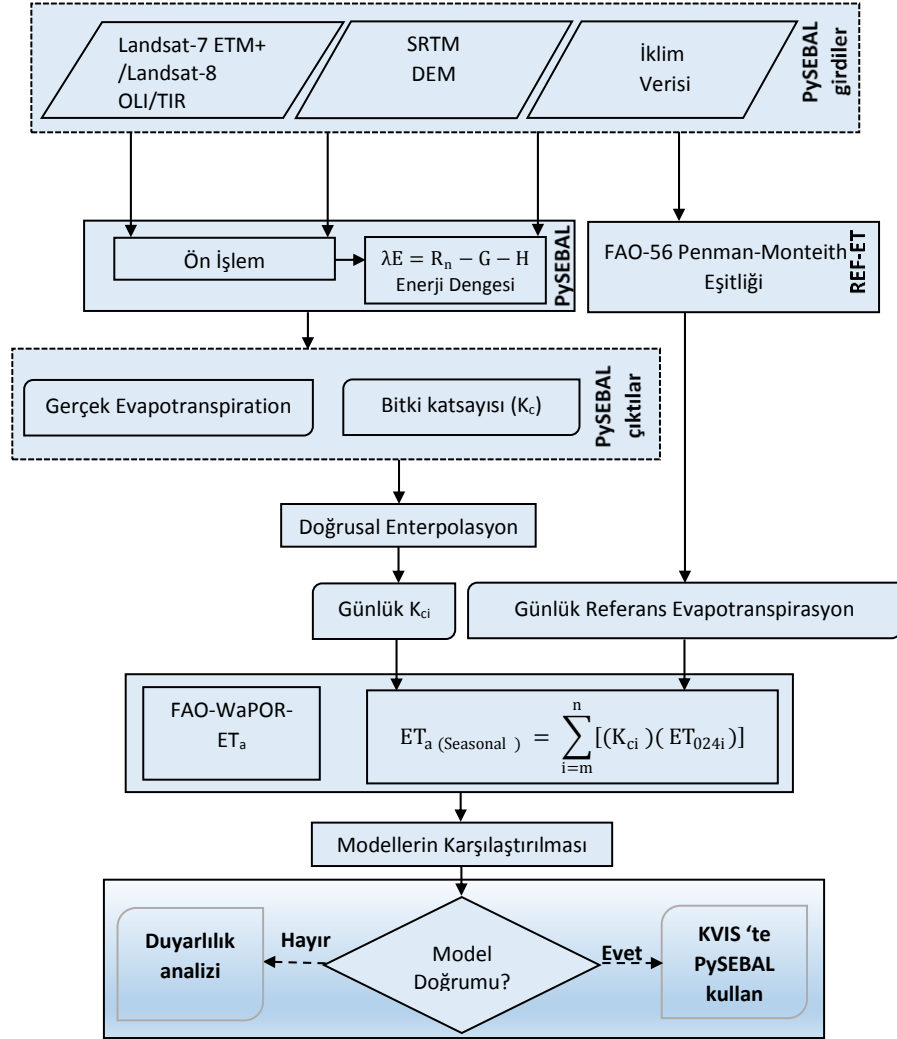
burada $ET_{a(sezon)}$, mm cinsinden m 'den n 'ye kadar bir süre boyunca ET_a değerinin toplamı; ET_{024i} , i günü için 24 saat boyunca mm cinsinden referans ET, ve K_{ci} , i günü üzerinden enterpolasyonlu K_c 'dir (boyutsuz).

ET_0 , REF-ET yazılım paketi ile FAO-56 Penman-Monteith yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır. ET_0 formülü aşağıdaki gibidir (Allen ve diğerleri, 1998; Allen, 2016):

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34u_2)} \quad (3.9)$$

burada ET_0 , referans evapotranspirasyon (mm gün^{-1}); e_s , doymuş buhar basıncı (kPa); R_n , mahsul yüzeyindeki net radyasyon ($\text{MJ m}^{-2} \text{gün}^{-1}$); e_a , gerçek buhar basıncı (kPa); G , toprak ısı akısı yoğunluğu ($\text{MJ m}^{-2} \text{gün}^{-1}$); u_2 , 2 m yükseklikte rüzgar hızı (m s^{-1}); T , 2 m yükseklikte ortalama günlük hava sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$); Δ eğim buhar basıncı eğrisi ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$); $e_s - e_a$, doyma buhar basıncı açığı (kPa); ve γ psikrometrik sabittir ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$).

KVIS'in gerçek evapotranspirasyonunu değerlendirmek için bu çalışmada kullanılan yaklaşımı açıklayan şematik bir diyagram Şekil 3.6'da sunulmuştur.



Şekil 3.6. KOU vadisi sulama alanında gerçek evapotranspirasyonu değerlendirmek için kullanılan yaklaşımı açıklayan şematik akış şeması.

PySEBAL modelinden elde edilen ET_a ve FAO-WaPOR'den elde edilen ET_a arasında konumsal ve zamansal karşılaştırmalar yapılmıştır. Konumsal analiz için, PySEBAL'den türetilen ET_a verileri, QGIS yazılımında uygulanan en yakın komşu algoritması kullanılarak FAO-WaPOR'un konumsal çözünürlüklerine uyması için 250 m konumsal çözünürlüklere yeniden örneklenmiştir. Zamansal analiz, iki kaynaktan (PySEBAL ve FAO-WaPOR) alınan on günlük veriler kullanılarak yapılmıştır.

Karşılaştırmaların kalitesi, determinasyon katsayısı (R^2) ve kök ortalama kare hatası (RMSE) kullanılarak değerlendirilmiştir. Tüm veri analizleri ve haritalama işlemleri, QGIS yazılımı (<https://qgis.org/>) ve Microsoft® Office Excel (Redmond, WA, ABD) kullanılarak yapılmıştır.

3.2.2. Konumsal-zamansal performans göstergeleri³

Küçük parsellerden ulusal ölçeklere kadar sulanan alanların performansını zamansal ve konumsal olarak karakterize etmek için arazi çalışmaları ve anketler, uzaktan algılama (UA) tabanlı yöntemler gibi çeşitli yaklaşımlar uygulanmaktadır. Arazi çalışmaları ve anketleri, geniş araziler için yapılırken genellikle maliyeti yüksek, yoğun emek gerektirir ve zaman alıcıdır. Öte yandan, UA tabanlı yöntemler, sulama proje alanının sulama performansını değerlendirmek için kullanılan, uydu görüntüleri çoğunlukla kolayca elde edilebildiğinden ve çeşitli konumsal ölçeklerde sık zaman aralıklarında sürekli sağlanabildiğinden, uygun maliyetli ve daha az zaman alıcıdır (Bastiaanssen ve Bos, 1999; Blatchford ve diğerleri, 2019). Uzaktan algılama verilerini kullanmak, bu tür bilgilerin diğer konumsal veri kaynakları ile entegrasyonunu da sağlamaktadır (Sheffield ve Morse-McNabb, 2015). UA tabanlı yaklaşımlar, dünya çapında çeşitli iklim koşulları ve konumlarda sulama sistemlerini karşılaştırmak ve çeşitli sulama performans göstergelerini (örn. Eşitlik, yeterlilik, güvenilirlik, verimlilik) değerlendirmek için başarıyla uygulanmaktadır (Ahmad ve diğerleri, 2009; Blatchford ve diğerleri, 2018; Kharrou ve diğerleri, 2013; Sawadogo ve diğerleri, 2020). Zwart ve Bastiaanssen (2007) arazi için Yüzey Enerji Dengesi Algoritması (SEBAL)

³ Bu bölüm aşağıdaki yayına dayanmaktadır: Sawadogo, A., Kouadio, L., Traoré, F., Zwart, S.J., Hessels, T., Gündoğdu, K.S., 2020. Spatiotemporal assessment of irrigation performance of the Kou Valley irrigation scheme in Burkina Faso using satellite remote sensing-derived indicators. ISPRS Int. J. Geo-Inf. 9, 484. <https://doi.org/10.3390/ijgi9080484>.

(Bastiaanssen ve Ali, 2003; Bastiaanssen ve diğeri, 2005)), NOAA-AVHRR ve Landsat'tan uydu görüntülerini kullanarak Pakistan, Çin, Mısır, Hindistan, Hollanda, Meksika ve ABD dahil olmak üzere farklı ülkelerdeki sulu buğday sistemlerinde evapotranspirasyon, verim ve CWP 'nin konumsal değişimini belirlemişlerdir. Kharrou ve diğeri (2013), uydu görüntüsünden hesaplanan göstergeleri (rölatif sulama temini, su tüketim oranı, rölatif evapotranspirasyon, mahsul varyasyon katsayısı) kullanarak, Fas'ın merkezinde, buğday tarlaları ve zeytin bahçelerinden oluşan sulanan bir alanda sulama performansındaki değişkenliği araştırmıştır. Uzaktan algılama tabanlı yaklaşımların sulama performans çalışmalarında yoğun olarak kullanıma imkanlarına rağmen, bu yaklaşımlar KVIS'te yeterince kullanılmamaktadır. KVIS, tahıllar, yumru kökler ve sebzeler (DRASA-Ouest, 2014) dahil olmak üzere, düşük bitki su verimliliği ve çeltik gibi başlıca mahsullerin verim seviyelerinde ~%50 oranında azalma (çeltik verimi 1980-1981'de 7.7 t ha⁻¹ 'dan 2000'de 4.0 t ha⁻¹ düşmüştür) ile karakterize edilir (Dembélé ve diğeri, 2012; Dicko, 2004; Ouédraogo, 1993). Sulama sistemlerinde yetersiz bakım ve yukarı havza kısmında su kullanımındaki artış dahil olmak üzere su kıtlığı ve yetersiz su yönetimi uygulamaları, düşük CWP ve verim düşüşünün bazı nedenleri olarak sayılabilir (Traoré, 2012; Wellens ve diğeri, 2013). KVIS'de verimli su kullanımı ve üretim ancak konumsal-zamansal sulama performansı hakkında iyi bir bilgi birikimiyle elde edilebilir. PySEBAL'den tahminlenen ve gerçek arazi verileri kullanılarak, çeltik, mısır ve tatlı patates bitkilerinde bitkilerin sulama suyu kullanımına ilişkin dört performans göstergesi (su tüketim oranı, rölatif evapotranspirasyon, su tüketimi homojenliği ve bitki su verimliliği) konumsal-zamansal olarak belirlenerek, standart değerlerle karşılaştırılmıştır.

Bu çalışma için PySEBAL modeli ile tahmin edilen yerüstü biyokütle (AGB) verileri kullanılmıştır. PySEBAL'de, AGB değeri, absorbe edilen fotosentetik aktif radyasyon, fotosentetik aktif radyasyon ve ışık kullanım verimliliğinin fraksiyonunun fonksiyonu olarak belirlemiştir (Bastiaanssen ve Ali, 2003; Zwart ve Bastiaanssen, 2007; Hessels ve diğeri, 2017). Fotosentetik olarak aktif radyasyon (PAR), yeşil bitkiler tarafından fotosentez için enerji kaynağı olarak kullanılabilen ve teknik olarak 400 ile 700 nm arasında değişen elektromanyetik radyasyonun bir parçasıdır (McCree, 1972). PySEBAL modelinde PAR, aşağıdaki denklem kullanılarak tahmin edilir:

$$PAR_{24} = bR_{s24} \quad (3.10)$$

burada $b = 0.48$, toplam güneş radyasyonunun fotosentez için kullanılabilen kısmını yansıtan regresyon denkleminin sabitidir.

Absorbe edilen fotosentetik aktif radyasyon (APAR), bir bitki örtüsü kanopisi tarafından absorbe edilen PAR fraksiyonu olarak tanımlanır. 24 saat boyunca emilen fotosentetik olarak aktif radyasyonun değerleri ($APAR_{24}$), aşağıdaki denklem kullanılarak PySEBAL modelinde tahmin edilmektedir:

$$APAR_{24} = fPAR_{24} \quad (3.11)$$

f faktörü aşağıdaki denklemle NDVI'dan tahmin edilmiştir:

$$f = -0.161 + 1.257 NDVI \quad (3.12)$$

APAR ve ışık kullanım verimliliğinden biyokütle, aşağıdaki denklemle hesaplanmıştır:

$$Biyokütle = \epsilon_{max} APAR 0.864 \quad (3.13)$$

burada ϵ_{max} , maksimum ışık kullanım verimliliğini ifade etmektedir ve Monteith, (1972) 'ye göre yalnızca C3 ve C4 mahsulleri ile değişmektedir. PySEBAL modelinde ϵ_{max} , C3 mahsulleri için $2,5 \text{ g MJ}^{-1}$ ve C4 mahsulleri için $4,5 \text{ g MJ}^{-1}$ olarak kabul edilmektedir.

Kısıtlı ortamda, ışık kullanım verimliliği, ısı (H), buhar (V) ve nem (M) stres katsayıları kullanılarak maksimum değerinin altına düşürülmektedir:

$$\epsilon = \epsilon_{max} \cdot H_{stress.coeff} \cdot V_{stress.coeff} \cdot M_{stress.coeff} \quad (3.14)$$

Nem stres katsayısı, gerçek terlemenin ($T_{act 24}$) potansiyel terlemeye ($T_{pot 24}$) oranı olarak ifade edilir.

$$M_{stress.coeff} = \frac{T_{act 24}}{T_{pot 24}} \quad (3.15)$$

PySEBAL modelinde, evaporasyon ve transpirasyon, ışık kullanımı yok etme faktörü, LAI, gerçek potansiyel evapotranspirasyon, doymuş toprak nem içeriği verileri, toprak nem stres katsayısı, psikrometrik sabit gibi birden çok değişken kullanılarak ayırılır.

Buhar stresi katsayısı şu şekilde hesaplanmıştır:

$$V_{stress.coeff} = 0.88 - \ln(e_{sat 24} - e_{act 24}) \quad (3.16)$$

Isı stres katsayısı aşağıdaki gibi hesaplanmıştır:

$$H_{stress.coeff} = \frac{(T_{24} - T_1) \cdot T_h^{Jarvis \text{ coefficient}}}{(K_t - T_1) \cdot (T_h - K_t)^{Jarvis \text{ coefficient}}} \quad (3.17)$$

Jarvis katsayısı şu şekilde ifade edilmektedir:

$$\text{Jarvis coefficient} = \frac{(T_h - K_t)}{(K_t - T_1)} \quad (3.18)$$

burada, T_{24} günlük sıcaklık, T_h stomatal aktivitenin üst sınırı, K_t optimum iletkenlik sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$) ve T_1 stomatal aktivitenin alt sınırıdır.

Uzaktan algılama kullanılarak ölçülebilen sulama performans göstergelerine ve mevcut arazi verilerine dayanarak dört performans göstergesi kullanılmıştır: Bunlar; su tüketim oranı, rölatif evapotranspirasyon (ET_{rel}), su tüketiminin homojenliği ve bitki su verimliliğidir (CWP). Bu göstergeler, Uluslararası Sulama ve Drenaj Komisyonu (Bos, 1997) ve Bastiaanssen ve Bos (1999) tarafından önerilen listelere dayanmaktadır. Çalışma süresi boyunca parsel ölçeğinde ayrıntılı sulama temini verilerinin bulunmaması nedeniyle Bos'un (2004)'de önerildiği şekilde KVIS sulama alanının tümü için su tüketim oranı belirlenmiştir. Kalan üç gösterge (su tüketiminin homojenliği, ET_{rel} ve CWP) ise üç bitki için ayrı ayrı belirlenmiştir.

Su tüketim oranı, sulanabilir alanların brüt su dengesini karakterize etmek için kullanılır (Molden, 1997; Bos, 2004; Karaca ve diğerleri, 2018). Bu çalışmada, su tüketim oranı, 2013 ve 2014 yıllarında Ocak-Nisan ayları için 10 günlük aralıklarla hesaplanmıştır. Bos (2004) tarafından önerildiği gibi su tüketim oranının 0,6 ila 0,8 arasında olması iyi performansı, 0,6 değerinden düşük değerler zayıf performans göstergesi olarak varsayılmıştır.

ET_{rel} , bitkinin su stresini önlemek için su temininin yeterliliğini göstermektedir (Molden ve Gates, 1990). Performans göstergeleri için ET_{rel} eşiklerini belirlerken yaygın bir sorun, çevreye göre genotip tepkilerinin çeşitliliğidir (Kang, 1997). Bir genotip, tüm ortamlarda her zaman aynı fenotipik özelliklere sahip değildir. Benzer şekilde, farklı genotipler belirli bir ortama farklı tepki verebilir (Gallais, 1990; Kang, 1997). Önceki çalışmalardaki öneriler ışığında (Roerink ve diğerleri, 1997; Asaana ve Sadick, 2016; Akhtar ve diğerleri, 2018), 0,75 'e eşit veya daha büyük değer iyi bir performans, 0,75 'in altındaki değerler zayıf performans olarak sınıflandırılmıştır.

Su tüketiminin homojenliği, ET_a 'nın varyasyon katsayısı (CV) kullanılarak tanımlanmıştır (Bastiaanssen ve diğerleri, 1996). Çalışmamızda sulanan bir alandaki su tüketiminin homojenliğini karakterize etmek için Molden ve Gates (1990) ve Bastiaanssen ve diğerleri (2001) tarafından önerilen CV değer aralıkları benimsenmiştir.

CV değerinin 10'dan küçük olması, su tüketiminin iyi homojenliğinin göstergesidir. Orta ve zayıf su tüketimi homojenlikleri, sırasıyla 10-25 aralığında ve 25'ten büyük değerler ile gösterilmiştir.

Farklı CWP kavramları mevcuttur. Örneğin, CWP, tanımlanmış bir mahsul değişkeni (örneğin, Verim) ile tüketilen su miktarı (genellikle bitki evapotranspirasyonu ile sınırlıdır) (Kijne ve diğerleri, 2003). Birim evapotranspirasyon veya sulama derinliği başına biyokütle veya verimdeki kazanç olarak tanımlanabilir (Perry ve diğerleri, 2009). Çalışmamızda CWP hesabında mahsul verimi ile ET_a arasındaki oran kullanılmıştır.

$$CWP = \frac{\text{Verim}}{ET_a} \quad (3.21)$$

Mahsul verimi, biyokütle, hasat indeksi ve hasatta bitki tane (veya yumru) nem içeriğinin bir fonksiyonu olarak belirlenmiştir.

$$\text{Verim} = \frac{\text{Biyokütle} \times \text{HI}}{1 - \text{Nem}} \quad (3.22)$$

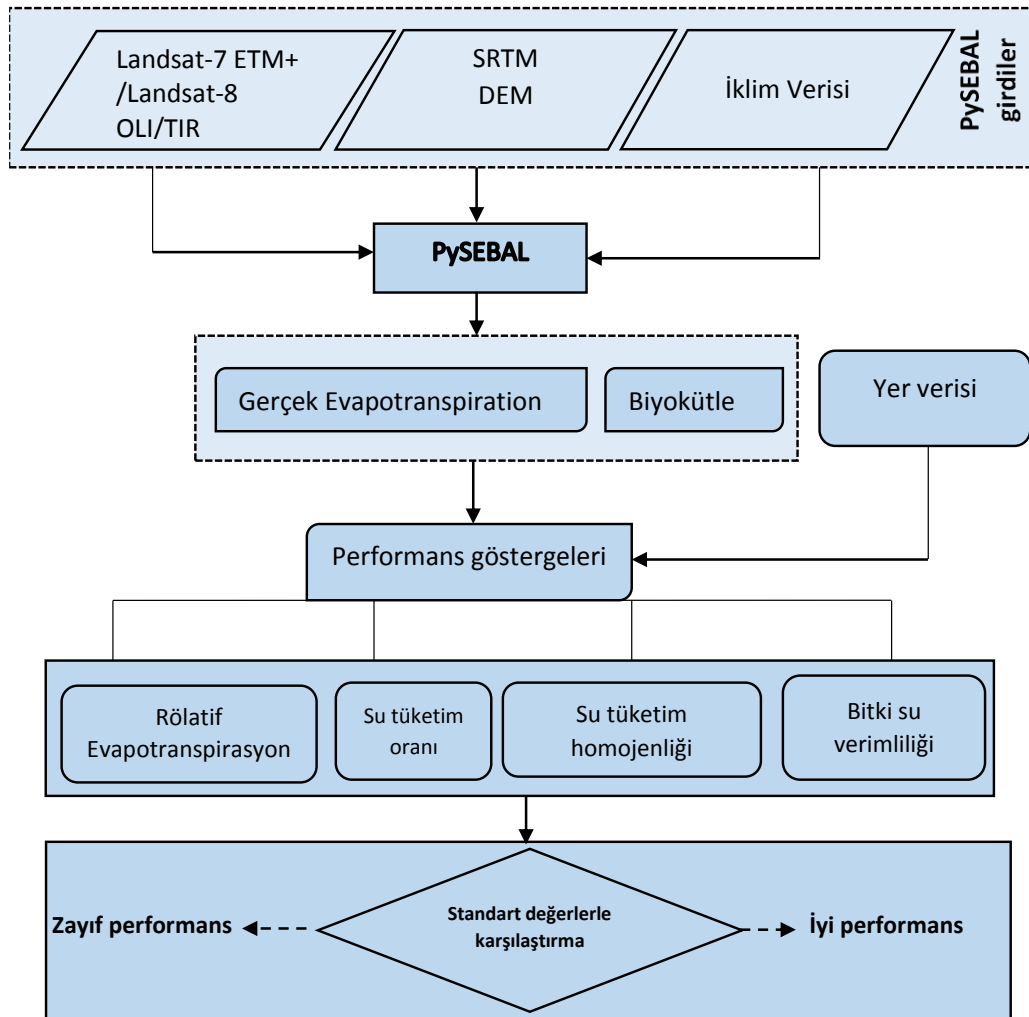
burada, verim, tane veya yumru verimine karşılık gelir (kg ha^{-1}); HI, hasat indeksi (birimsiz); Biyokütle, PySEBAL kullanılarak tahmin edilen biyokütle (kg ha^{-1}); ve nem, hasatta mahsul tanesinin (veya yumrunun) nem içeriğidir (%). Bu çalışmada kullanılan hasat indeksi değerleri ve tane/yumru nem içerikleri Çizelge3.2 'de verilmiştir.

Her sezon, mahsul verimi veri tabanlarında düzenli güncellemeler yapılmadığından, araştırma dönemi boyunca arazi başına gözlemlenen verim ile ilgili resmi kayıtlara ulaşılamamıştır. Sadece 2008 ile 2014 yılları arasında kaydedilen üç bitkinin ortalama verim değerine ulaşılabilmemiştir. Bu değerler çeltik, mısır ve tatlı patates için sırasıyla 4.0, 2.5 ve 15.7 t ha^{-1} 'dur (DRASA-Ouest, 2014; FAO, 2014). KVIS genelindeki ortak mahsul yönetimi uygulamaları (örneğin, uygulanan düşük gübre oranları) göz önüne alındığında beklenebilecek verim seviyeleri hakkında bir fikir sağlamak için ve karşılaştırma amacıyla, Dembélé ve diğerleri (2006) tarafından sağlanan en düşük çeltik potansiyel verim değerlerini, MASA (2014) tarafından sağlanan mısır ve tatlı patates için en düşük verim değerleri dikkate alınmıştır. Bu değerler, çeltik, mısır ve tatlı patates için sırasıyla 5.0, 4.0 ve 20.0 t ha^{-1} 'dir.

Literatürde çeşitlere, ekim bölgelerine ve yönetim uygulamalarına bağlı olarak çeşitli CWP değerleri, çeltik, mısır ve tatlı patates bitkileri için bulunmuştur. Örneğin, çeltik ve mısırın CWP aralıkları sırasıyla 0,6 ila 1,6 kg m^{-3} ve 1,2 ila 2,3 kg m^{-3} 'tür (FAO, 2003;

Steduto ve diğeri, 2012). FAO (2003) ve Steduto ve diğeri (2012), bu çalışmada iyi performansı karakterize etmek için çeltik, mısır ve tatlı patates için sırasıyla 0,6, 1,2 ve 4 kg m⁻³ CWP değerleri eşik değer olarak kullanılmıştır. Eşik değer altındaki CWP değerleri zayıf performansın, eşit değere eşit ve daha yüksek değerler iyi performansı göstermektedir.

2013 ve 2014 bitki, yetiştirme sezonlarının kritik sulama döneminde (Ocak-Nisan) KVIS'in sulama performansını değerlendirmek için bu çalışmada kullanılan yaklaşımı açıklayan şematik bir diyagram Şekil 3.7'da sunulmuştur.



Şekil 3.7. Kou vadisi sulama alanı sulama performansını değerlendirmek için kullanılan yaklaşımı açıklayan şematik akış çizelgesi.

3.2.3. Sulama performansını belirleyen fizikokimyasal faktörler

Belirli bir sulama alanındaki sulama performansındaki değişim; yağış değişkenliği, toprağın fiziksel özellikleri, toprak verimliliği, topografya ve mahsul yönetimi uygulamaları gibi çeşitli faktörlere bağlanabilir (Bastiaanssen ve Steduto, 2017; Foley ve diğerleri, 2020). Konumsal ve çok zamanlı toprak özellikleri verilerini elde etmek için uydu verilerinin kullanımı, çeşitli çalışmalarda ele alınmıştır (Chang ve Islam, 2000; Ge ve diğerleri, 2011; Forkuor ve diğerleri, 2017; Fontanet ve diğerleri, 2018; Yüzugullu ve diğerleri, 2020). Toprak özelliklerine ilişkin güvenilir ve kolayca elde edilebilen uzun vadeli gözlemlenen verilerin sınırlı olduğu Burkina Faso gibi ülkelerde, UA'den türetilen veriler, bu tür araştırmalarda kullanılma potansiyeline sahiptir. Uydudan türetilen toprak verileri, arazi kullanımı dahil olmak üzere tarımda çeşitli amaçlar için geleneksel (ör. Genelleştirilmiş doğrusal ve lojistik modeller) ve makine öğrenimi (ör. Yapay sinir ağları, rastgele orman (RF), artırılmış regresyon ağacı tabanlı modeller) modelleme çerçevelerinde kullanılmaktadır (Akpoti ve diğerleri, 2020; Laborte ve diğerleri, 2012; Dossou-Yovo et al., 2019). 2013 ve 2014 yıllarındaki kurak sezon üretim dönemlerinde mısır ve tatlı patatesin KVIS alanında göreceli olarak daha az homojen dağılımı göz önüne alınarak, bu çalışmada sadece çeltik mahsulü (Şekil Ek 4) için ilave analizler gerçekleştirilmiştir. Çeltikte ET_a ve CWP'nin değişkenliğini açıklayan ana toprak fiziksel ve kimyasal değişkenlerini değerlendirmek için Doğrusal karışık model (LMM) ve Rastgele Orman (RF) tabanlı modeller kullanılmıştır. Sulama şebeke girişine olan mesafe ve parsel kotu dahil olmak üzere çeşitli toprak özellikleri bu amaçla kullanılmıştır.

Modellemeden önce, PySEBAL'den türetilen ET_a , CWP ve fizikokimyasal faktörler konumsal haritalarından piksel değerleri ArcGIS (sürüm 10.4; (ESRI, 2016)) ve QGIS (sürüm 2.18.27; <https://qgis.org/>) yazılımı yardımıyla her parsel için çıkarılmıştır. İki pikselle örtüşen çeltik tarlaları için, bu piksellerin ortalama değeri dikkate alınmıştır. Daha sonra, fizikokimyasal faktörlerden korelasyon katsayısı $\geq 0,75$ olan açıklayıcı değişkenler aşırı uyumdan kaçınmak için çıkarılmıştır. Ayrıca, etki büyüklüklerinin doğrudan karşılaştırılmasına olanak tanımak için tüm veriler standartlaştırılmıştır [ortalama (x) / $2 \times sd(x)$] (Gelman ve Hill, 2007).

Çalışmada kullanılan doğrusal karışık model (LMM) formülü aşağıdaki gibidir (Laird ve Ware, 1982; Peng ve Lu, 2012):

$$Y = X\beta + Zu + \varepsilon \quad (3.23)$$

burada, Y bir $N \times 1$ sütun vektörüdür ve sonuç değişkeni olan ET_a veya CWP 'yı ifade etmektedir. Bu çalışmada $N = 770$; X belirleyicilerin $N \times p$ matrisi; β , sabit etkili regresyon katsayılarının $p \times 1$ sütun vektörü; Z , q rastgele etkiler ve J grupları için bir $N \times qJ$ tasarım matrisi; u , J grupları için q rasgele etkilerin (sabit β 'nin rastgele tamamlayıcısı) $qJ \times 1$ vektörü; ve ε , atıkların bir $N \times 1$ sütun vektörü. β , ortalama (μ) ve standart sapma (σ) ile rastgele bir normal değişken olarak dağıtılır; bu $\beta \sim N(\mu, \sigma)$ denklem formundadır.

Çalışmada rastgele etki faktörleri olarak KVIS blokları kullanılmış; toprak fizikokimyasal özellikleri ve alan özellikleri sabit etki faktörleri olarak kabul edilmiştir. Orijinal veri seti, eğitim ve test için sırasıyla rastgele %70 ve %30'a bölünmüştür. Eğitim veri seti, sabit etkilerin önemini test etmek için kullanılmıştır (anlamlılık seviyesi $\alpha = 0.05$). Model uyumunun doğruluğu, test veri seti kullanılarak değerlendirilmiştir. Her bir belirleyicinin rölatif önemi, 'dominanceanalysis' paket programı kullanılarak genel üstünlük analizi yöntemiyle değerlendirilmiştir (Azen ve Budescu, 2003; Luo ve Azen, 2013; Bustos-Navarrete ve Filipa, 2020). Nakagawa'nın marjinal R^2 'si (Nakagawa ve Schielzeth, 2013) üstünlük analizinde belirleyicinin rölatif önemini karşılaştırmak için istatistiksel gösterge olarak kullanılmıştır ve formülü aşağıda sunulmuştur:

$$R^2_{LMM(m)} = \frac{\sigma^2_f}{\sigma^2_f + \sigma^2_\alpha + \sigma^2_\varepsilon} \quad (3.24)$$

burada σ^2_f sabit etkiden hesaplanan varyans, σ^2_α rastgele etkinin varyansdır ve σ^2_ε hata varyansını temsil eder, (m) marjinal R^2 'yi gösterir (Örneğin sabit faktörlerle açıklanan varyans).

Tüm LMM hesaplamaları "nlme" (Pinheiro ve diğerleri, 2020) ve "lme4" (Bates ve diğerleri, 2015) paketleri kullanılarak yapılmıştır.

Rastgele ormanlar, model birleştirme kavramına dayanan bir öğrenme algoritmasına dayanmaktadır (Breiman, 2001; Prasad ve diğerleri, 2006). Her düğümde rastgele bir tahmin alt kümesinin seçildiği öğrenme örneğinden alınan önyüklemeli örneklerle

oluşturulan ikili karar ağaçlarını birleştirmektedir (Prasad ve diğerleri, 2006; Kouadio ve diğerleri, 2018). Çeltik tarlalarında ET_a veya CWP varyasyonlarının 12 belirleyicinin (veya açıklayıcı değişkenlerinin) önemini tahmin etmek için RF kullanılmıştır.

LMM yaklaşımında kullanılan eğitim ve test için rastgele bölünmüş veri kümeleri burada da kullanılmıştır. Karar ağaçlarının sayısı (N_{tree}) 500 olarak ayarlanmıştır. Ağaç yaprağı başına optimum minimum gözlem sayısı (m_{try}), RF algoritmasının yürütülmesi sırasında 'caret' paketi (sürüm 6.0-86; Kuhn ve diğerleri, 2020) kullanılarak otomatik olarak seçilmiştir. RF tabanlı modellerin performansının değerlendirilmesinde araç olarak, değişken önem düzeyleri, kısmi bağımlılık grafiği ve model tahmini sonuçları kullanılmıştır. Eğitim veri seti hem değişken önem düzeyleri hem de kısmi bağımlılık çizim analizleri için kullanılmıştır, test veri kümesi, model tahminini analiz etmek için kullanılmıştır. Doğruluktaki ortalama azalış, out-of-bag (verilerin torba dışı kısmındaki) (OOB) regresyon tahmin hatasına dayanan değişken öneminin bir ölçüsü olarak kullanılmıştır (Breiman, 2001; Liaw ve Wiener, 2002). Doğruluktaki ortalama azalış, orijinal gözlemlerin OOB doğruluğu ile rastgele permütasyonlu değişkenler arasındaki normalleştirilmiş fark olarak hesaplanmıştır (Cutler ve diğerleri, 2007; Mellor ve diğerleri, 2013). OOB hatasının önemi şu şekilde tanımlanır: Her ağaç için, verilerin torba dışı kısmındaki tahmin hatası kaydedilir. Tahmin doğruluğu, regresyonda ortalama kare hatası olarak tanımlanır. Her bir belirleyici değişkenine izin verildikten sonra aynı işlem tekrar edilir. İkisi arasındaki farkların tüm ağaçlarda ortalaması alınır. Ormandaki X_j değişkeninin önemi şu şekilde tanımlanır (Hong ve diğerleri, 2016):

$$VI(X_j) = \frac{1}{n_{tree}} \sum_{t=1}^{n_{tree}} (EP_{tj} - E_{tj}) \quad (3.25)$$

burada, n_{tree} ormandaki ağaçların sayısını belirtirken, E_{tj} , X_j değerlerini değiştirmeden önce ağaç t üzerindeki OOB hatasını belirtir; EP_{tj} , X_j değerlerini değiştirdikten sonra t ağacındaki OOB hatasını belirtir. Doğruluktaki ortalama azalış ne kadar büyükse, değişken o kadar önemlidir.

Kısmi bağımlılık grafiği analizi, seçilen belirleyici değişkenin yanıt değişkeni üzerindeki izole etkisini gösterir (Friedman, 2001). Kısmi bağımlılık, sabit x ile eğitim verilerinin ortalaması alınarak tahmin edilir $\{x_i, i = 1, \dots, n\}$ (Friedman, 2001; Shi ve diğerleri, 2018):

$$\hat{f}(x) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f(x, x_{ic}) \quad (3.26)$$

burada x , kısmi bağımlılık aranan değişkendir ve x_{ic} , eğitim verilerindeki diğer değişkenleri temsil eder. f regresyon ayarı için öngörülen regresyon fonksiyonudur.

Bu çalışmada, kısmi bağımlılık grafiği analizi için sadece ilk altı önemli açıklayıcı değişken kullanılmıştır. Model tahmin analizi, "randomForest" paketindeki (4.6-14 sürüm) (Liaw ve Wiener, 2018) RF nesnelere için "predict" yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Tüm analizler R'de (sürüm 4.0.0; R Core Team, 2020) gerçekleştirilmiştir.

LMM ve RF modellerinin uyum iyiliğini değerlendirmek ve performanslarını karşılaştırmak için determinasyon katsayısı (R^2), Nash-Sutcliffe verimlilik indeksi (NSE) ve kök ortalama kare hatası (RMSE) kullanılmıştır. R^2 , NSE, ve RMSE parametrelerinin formülleri aşağıdaki sunulmuştur:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}) \cdot (P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}} \quad (3.27)$$

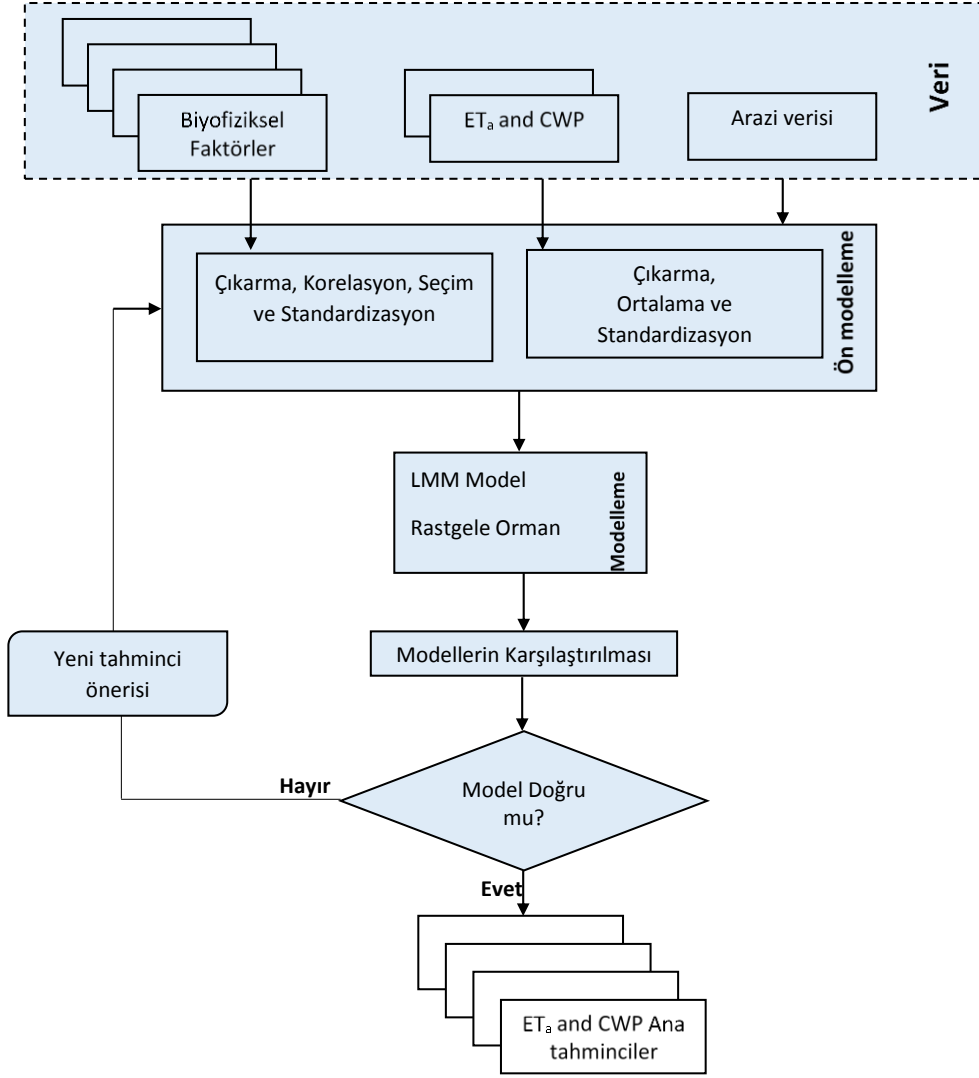
$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (3.28)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2} \quad (3.29)$$

burada, P_i ve O_i sırasıyla tahmin edilen ve gözlemlenen değerlere atıfta bulunur; \bar{P} ve \bar{O} sırasıyla ortalama tahmin edilen ve gözlemlenen değerler; ve n , test örneği sayısını göstermektedir.

Daha düşük RMSE değerleri ve 1'e yakın R^2 ve NSE değerleri, iyi model performansının göstergesidir.

Şekil 3.8, KVIS'te sulama performansını belirleyen fizikokimyasal faktörleri değerlendirmek için kullanılan modelin ana adımlarını göstermektedir.



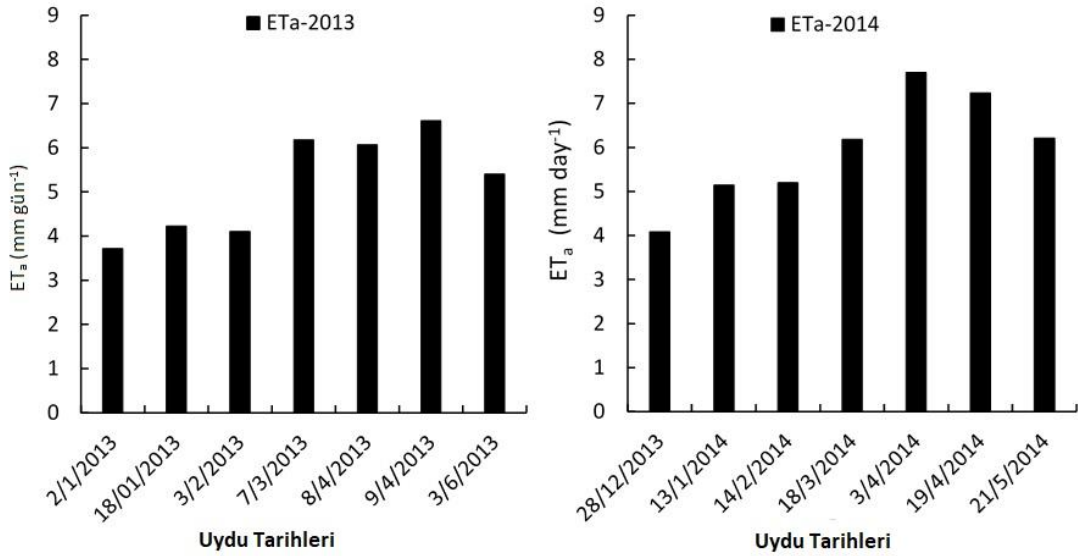
Şekil 3.8. KVIS'te sulama performansını belirleyen fizikokimyasal faktörleri değerlendirmek için kullanılan akış çizelgesi.

4. BULGULAR

4.1. Gerçek Evapotranspirasyonun Konumsal-Zamansal Varyasyonu

4.1.1. Gerçek evapotranspirasyonun zamansal dağılımı

Şekil 4.1'de Landsat uydu görüntülerinin temin edildiği günlerdeki ET_a değerinin zamansal değişimi verilmiştir. Şekilde her uydu görüntüsünden her piksel için elde edilen ET_a değerlerinin sulama alanı için ortalaması verilmiştir. 2013 ve 2014 yıllarının Ocak-Nisan aylarında, ET_a sırasıyla 3.72 mm gün^{-1} ile 6.62 mm gün^{-1} ve 4.09 mm gün^{-1} ile 7.7 mm gün^{-1} arasında değişmiştir (Şekil 4.1). 2014 döneminde 2013 dönemine göre daha yüksek ET_a değerleri görülmüştür.

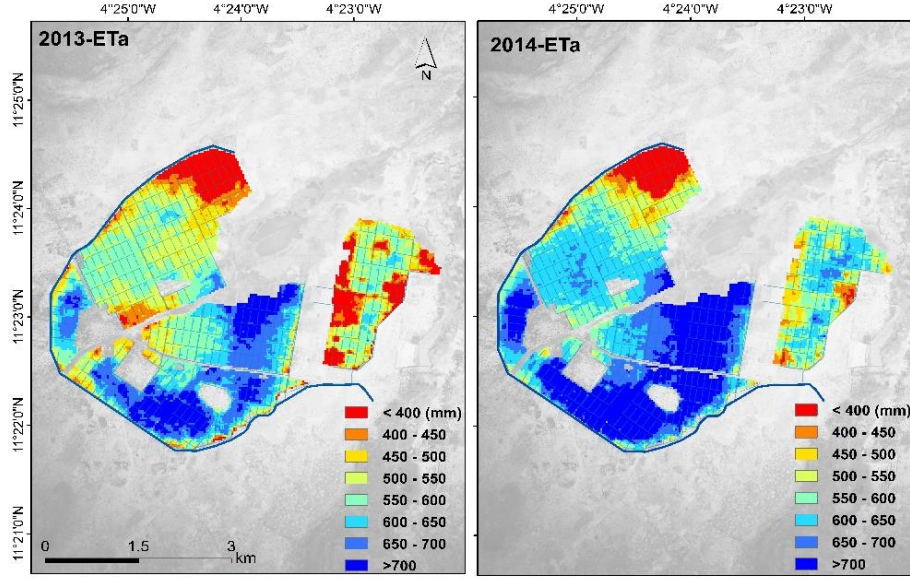


Şekil 4.1. Ortalama ET_a 'nın Ocak-Nisan 2013 ve 2014'te KVIS'teki zamansal dağılımı.

4.1.2. Sezonluk gerçek evapotranspirasyonun konumsal dağılımı

PySEBAL modeli ve FAO-WaPOR ET_a kullanılarak KVIS boyunca 30 m ve 250 m konumsal çözünürlüklerde tahmin edilen ET_a 'nın konumsal dağılımı sırasıyla Şekil 4.2 ve Şekil Ek 2'de sunulmuştur. Tahmin yöntemine ve yıllara bağlı olarak farklı ET_a değer aralıkları bulunmuştur. PySEBAL'den elde edilen ET_a değerleri 2013 yılında 178 ile 750 mm (ortalama 554 mm) arasında, FAO-WaPOR dan elde edilen ET_a değerleri 168 ila 642 mm (ortalama 429 mm) arasındadır. PySEBAL'den elde edilen ET_a değerleri

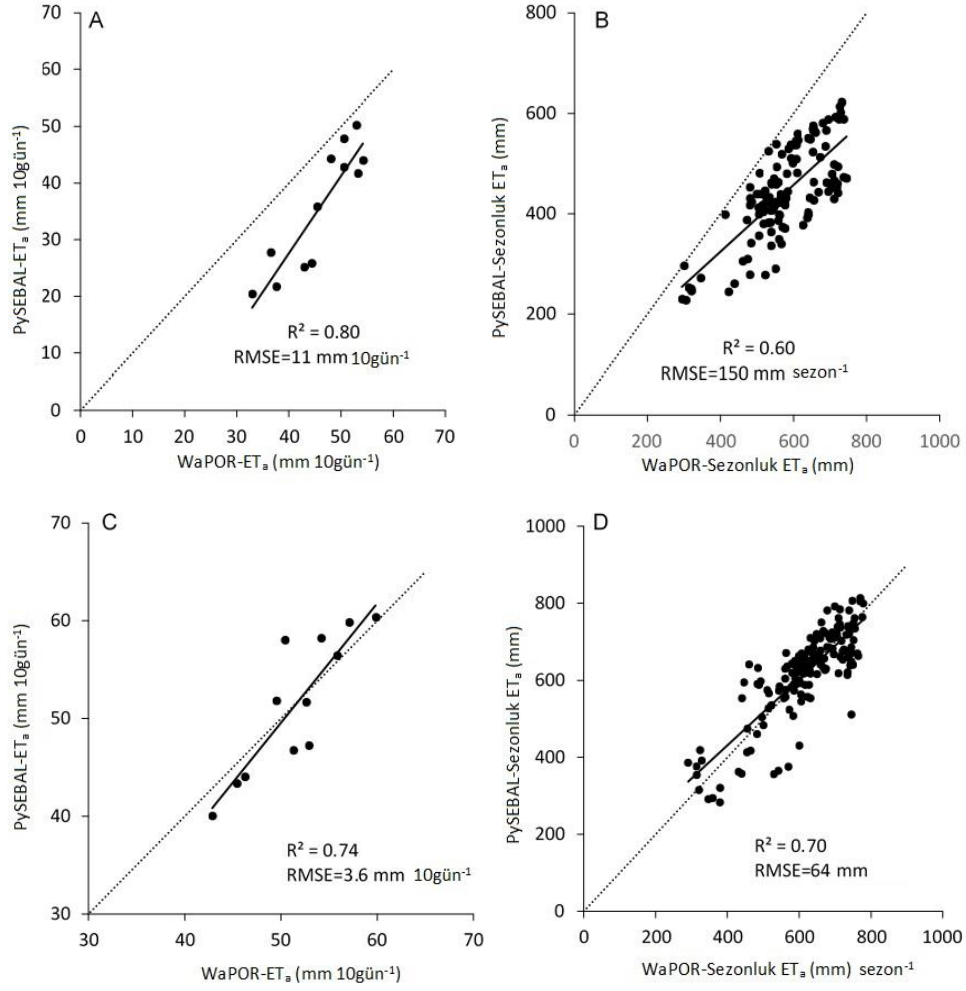
2014 yılında 239 ile 794 mm (ortalama 619 mm) arasında, FAO-WaPOR dan elde edilen ET_a değerleri 283 ila 848 mm (ortalama 618 mm) arasındadır.



Şekil 4.2. Ocak-Nisan 2013 ve 2014 boyunca KVIS'teki sezonluk ET_a 'nın konumsal dağılımı.

4.1.3. PySEBAL ve FAO-WaPOR ET_a değerlerinin karşılaştırılması

Genel olarak, PySEBAL ile FAO-WaPOR'dan elde edilen 10 ar günlük ve sezonluk ET_a arasında uyum gözlenmiştir. 2013 yılı için 10 ar günlük ve sezonluk tahminlerde RMSE değeri 11 mm ve 150 mm ve R^2 değeri 0.8 ve 0.6 olarak elde edilmiştir (Şekil 4.3A ve B). Diğer yılda ise, 10 ar günlük ve sezonluk tahminlerde RMSE değeri 3.6 mm ve 64 mm, R^2 değeri 0.74 ve 0.7 olarak elde edilmiştir (Şekil 4.3C-D). Senegal'de yapılan bir çalışmada, Akı kulesi ile FAO-WaPOR ile belirlenen ET_a arasında R^2 0.70 olarak elde edilmiştir (FAO ve IHE Delft, 2019). Bu çalışmada bulunan sonuçlar PySEBAL modelinin KVIS'te ET_a 'yı tahmin etmede iyi bir beceriye sahip olduğunu göstermektedir.



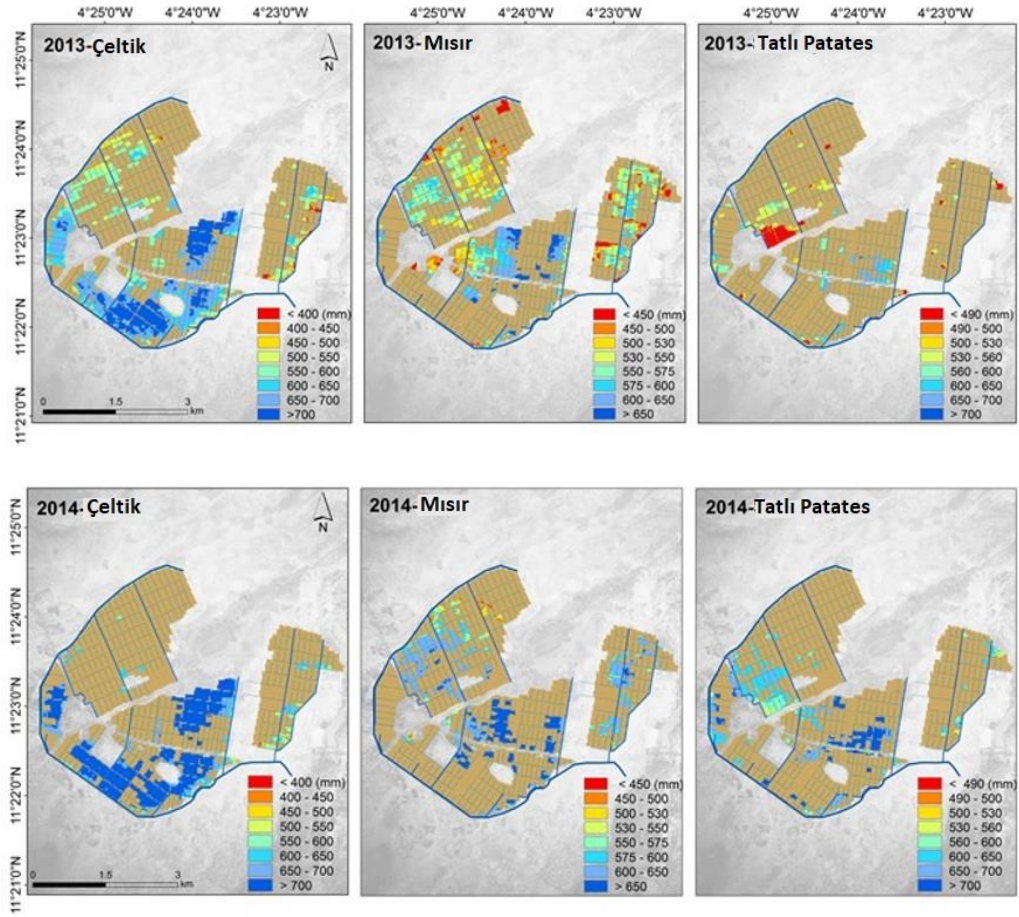
Şekil 4.3. PySEBAL ve FAO-WaPOR kullanılarak elde edilen ET_a değerlerinin karşılaştırılması: 2013 yılı (A, B) ve 2014 yılı (C, D).

4.2. Konumsal-Zamansal Performans Göstergeleri

4.2.1. Ana mahsullerin verimi ve sezonluk gerçek evapotranspirasyon

ET_a değeri 2014 yılında 2013 yılına göre nispeten daha yüksek olarak gözlenmiştir. ET_a değeri bitki türüne göre analiz edildiğinde, mısır ve tatlı patates arazilerindeki ortalama değerler oldukça benzerken, çeltik 'de nispeten daha yüksek elde edilmiştir. 2013 yılında ortalama ET_a değerleri mısır ve tatlı patates parsellerinde sırasıyla 551 ve 546 mm; 2014 yılında ise sırasıyla 621 ve 636 mm'dir (Çizelge4.1; Şekil 4.4). Çeltik parsellerindeki değerler 2013 ve 2014 yıllarında ortalama 635 ve 709 mm elde

edilmiştir. 2013 ve 2014 yılları arasında ET_a değerinde, çeltik, mısır ve tatlı patates için sırasıyla %12, %13 ve %16 oranında artış olmuştur.

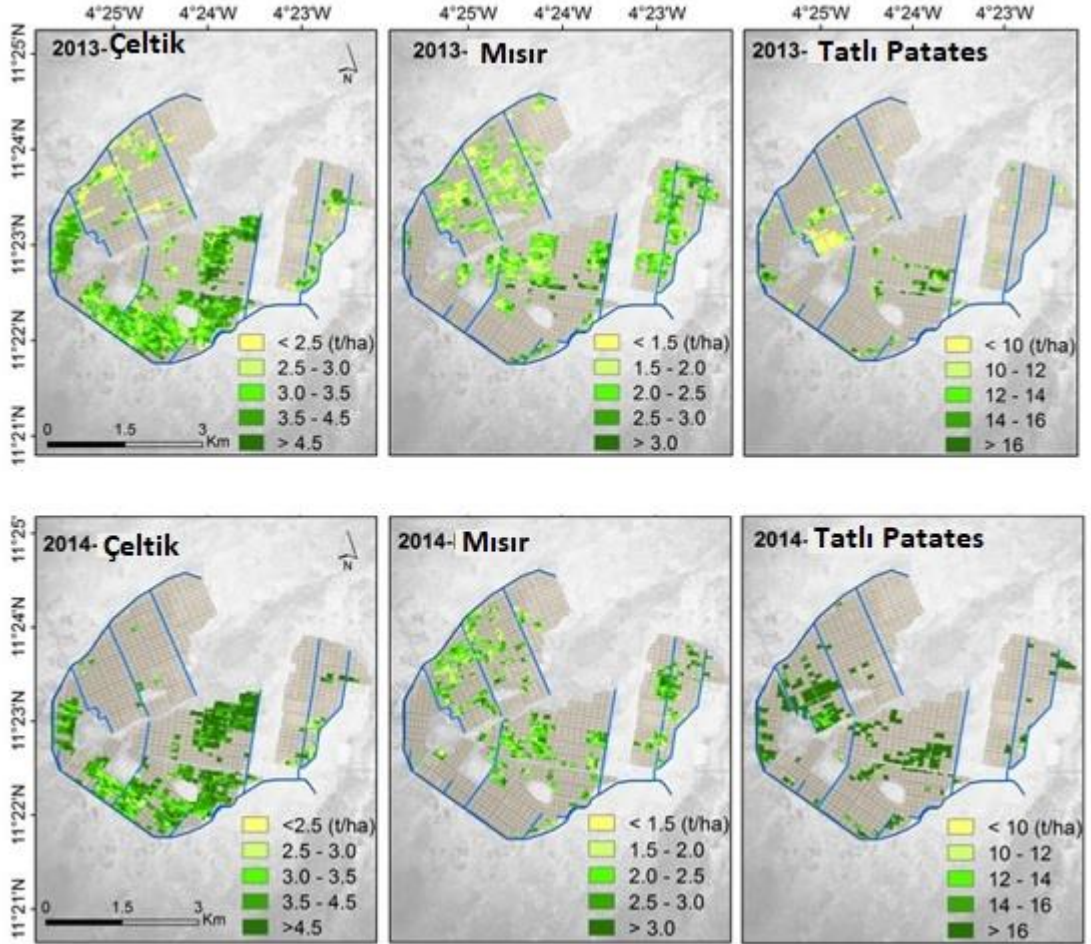


Şekil 4.4. 2013 ve 2014 yıllarındaki kurak mevsim üretim dönemi boyunca Kou vadisi sulama alanındaki çeltik, mısır ve tatlı patates arazileri için sezonluk ET_a .

Çizelge 4.1. 2013 ve 2014 yıllarındaki kurak mevsim üretim dönemlerinde çeltik, mısır ve tatlı patates için hesaplanan ET_a ve verim değerleri.

		Çeltik	Mısır	Tatlı patates
ET_a (mm)				
2013	Min	210	241	297
	Ortalama	635	551	546
	Max	750	713	712
2014	Min	398	443	478
	Ortalama	709	621	636
	Max	793	750	778
Değişim oranı (%)		+12	+13	+16
Hesaplanan verim ($t\ ha^{-1}$)				
2013	Min	0.40	0.40	6.10
	Ortalama	3.39	2.20	12.0
	Max	7.30	4.80	28.7
2014	Min	1.30	0.70	6.50
	Ortalama	4.20	2.30	18.4
	max	8.70	4.30	37.1
Değişim oranı (%)		+23	+3	+53

Tahmin edilen mısır, çeltik ve tatlı patates verimi, 2013 yılında sırasıyla 2.2, 3.39 ve 12.0 t ha⁻¹ olmuştur (Çizelge 4.1). Bir sonraki yıl için tahmin edilen verim değerlerinde sırasıyla %3, %23 ve %53 oranında artış bulunmuştur (Çizelge 4.1). Her iki yıl için verimlerin konumsal dağılımı Şekil 4.5'te verilmiştir.



Şekil 4.5. Kou Vadisi sulama alanında 2013 ve 2014 yıllarındaki kurak mevsim üretim dönemi boyunca çeltik, mısır ve tatlı patates verim tahminleri.

Tahmin edilen verimlerin, literatürdeki iyi performans verim değerleri ile karşılaştırılması, yıla ve bitki çeşidine bağlı olarak Çizelge 4.2'de verilmiştir. Tabloda görüleceği gibi, 2014 yılında çeltik ve tatlı patates bitkisinde standart verim değerlerinin üzerindeki alanların yüzdesi daha fazladır. Örneğin, 2014 yılında tatlı patates ekilen alanın %80'inde tahmin edilen verim, 2013-2014 döneminde gözlemlenen ortalama verimin üzerinde veya ona eşit olmuştur (Çizelge 4.2). KVIS genelinde, tahmin edilen mısır verimleri her iki yılda da genel olarak gösterge standardının altında olmasına

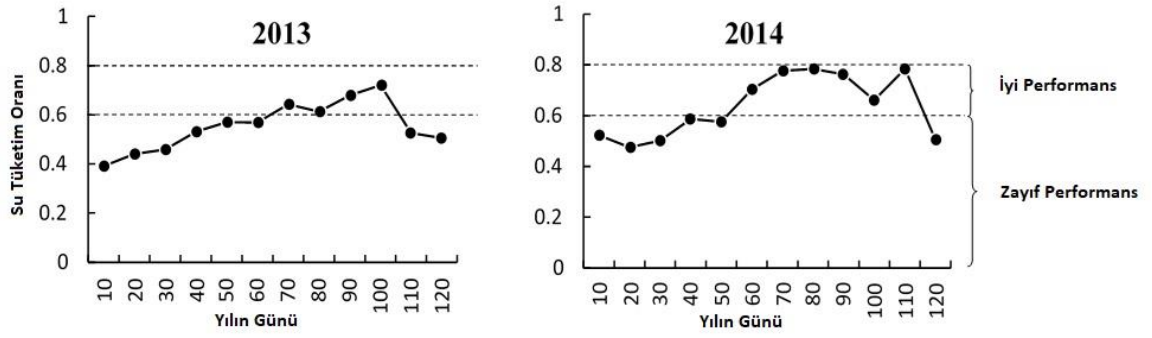
rağmen, sulama alanının güney kısımlarında tahmini verimi 4.0 t ha⁻¹ olan arazilerde bulunmaktadır (Şekil 4.5).

Çizelge 4.2. Kou Vadisi sulama alanında 2013 ve 2014 yıllarında çeltik, mısır ve tatlı patates veriminde iyi performans gösteren alanların yüzdesi.

		Çeltik	Mısır	Tatlı Patates
Toplam piksel sayısı	2013	5034	4069	1277
	2014	3540	2598	1940
İyi performans standartları (SV) (t ha ⁻¹)		5.0	4.0	20.0
Standartları sağlayan piksel oranı \geq SV (%)	2013	2.0	0.3	0.7
	2014	18	0.2	31
Gözlenen ortalama verim (TY) (t ha ⁻¹)		4.0	2.5	15.7
Ortalama verimin üzerindeki alanların oranı (%)	2013	17	18	12
	2014	54	37	80

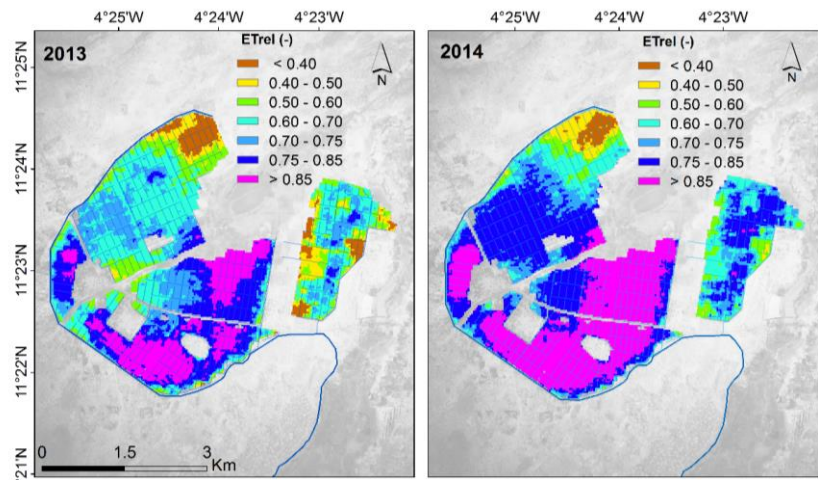
4.2.2. Sulama performans göstergeleri

KVIS proje alanı, 2013 ve 2014'teki kurak dönem sulama periyodunun her birinde fenolojik gelişime bağlı üç farklı su tüketim oranı ile karakterize edilmiştir (Şekil 4.6). Alanda, 2013 yılında bitkilerin ekim tarihinden 65 güne kadar, 2014'te 50 güne kadar su tüketim oranında zayıf performans gözlenmiştir. Su tüketim oranında, 2013 yılı için 66-105 günler arası, 2014 yılı için 51-110 günler arası iyi performans gözlenmiştir. Bundan sonraki günlerde bitki yetiştirme periyodu sonuna kadar zayıf performans gözlenmiştir. Bitki yetiştirme periyodunun ortasında, genellikle yaprak gelişimi tam olduğundan ET_a değerinde de artış olmuştur. Her iki yılda da gözlemlendiği gibi su tüketim oranının 0,6'dan büyük olması, sezon ortasında sulama suyunun iyi bir şekilde kullanıldığını göstermektedir. Hasat dönemine yaklaşıldığında, yaprak yaşlanması nedeniyle bitki su ihtiyacı doğal olarak azalır. Bu dönemde, çalışmada ele alınan mısır, çeltik ve tatlı patates için sulama suyu ihtiyacı artık yoktur.



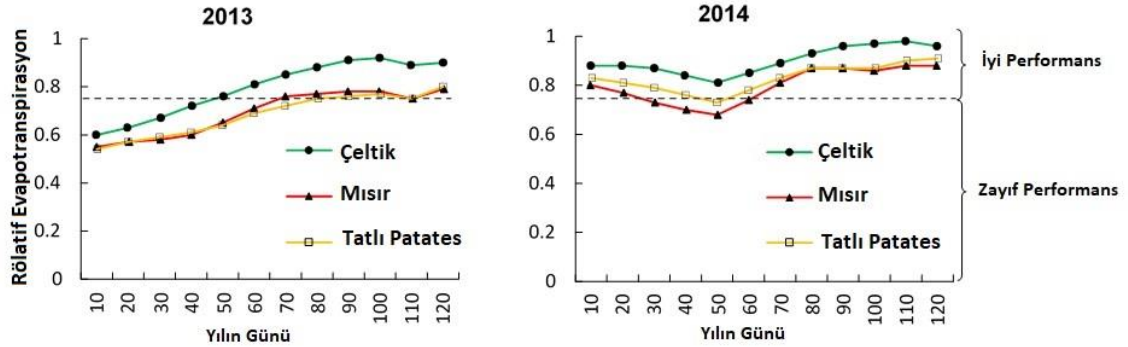
Şekil 4.6. Su tüketim oranının Kou Vadisi sulama alanında 2013 ve 2014 yılları için değişimi (Zayıf ve iyi performansı ayırt etmek için eşikler, kesik çizgilerle gösterilmiştir).

KVIS alanı boyunca, ET_{rel} değeri güneyden kuzeye doğru değişen bir yapı gözlenmiştir. Alan, çok yüksek derecede su stresi, yüksek su stresi, orta derecede su stresi ve su stresi olmayan alanlar olarak 4 grupta sınıflandırılmıştır (Şekil 4.7). Alanın kuzey kısımlarında çok yüksek derecede su stresi olan alanlar baskındır (blok 7 ve 8). Bu alanların güneyinde ağırlıklı olarak, yüksek su stresi olan alanlar bulunmaktadır (blok 6 ve 5). Sulama alanının orta kısımlarında genellikle orta derecede su stresi olan alanlar (blok 4) ve sulama alanının güney kısımlarında su stresi olmayan alanlar gözlenmiştir (blok 2 ve 3). Proje alanı içerisinde gözlenen bu değişkenlik, toprak bünyelerinin konumsal farklılığı ve sulama kaynağına yakın su kullanıcılarının sayısı ile ilgili olabilir. Arazide yapılan gözlemlerde, sulama suyu kaynağına yakın olan alanlarda, gayri resmi ve kontrolsüz su kullanımı nedeniyle KVIS'e sağlanan suyun yaklaşık %25'i kullanılmaktadır (Traoré, 2012; Wellens ve diğerleri, 2013).



Şekil 4.7. 2013 ve 2014 yıllarındaki kurak mevsim üretim dönemi boyunca Kou Vadisi sulama alanındaki sezonluk ortalama rölatif evapotranspirasyonun (ET_{rel}) konumsal dağılımı.

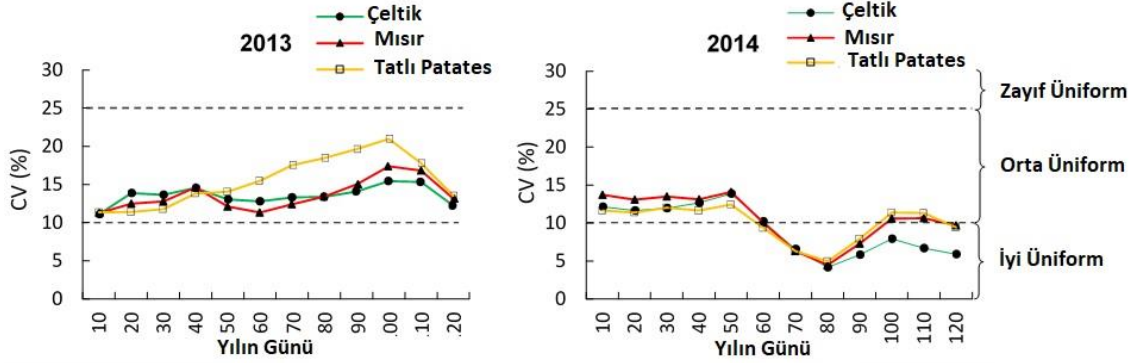
Üç bitki için ET_{rel} 'in analizinde, 2013 yılında benzer patern elde edilmiştir. Üretim sezonunun başlangıcından sonuna kadar ET_{rel} değeri artma eğilimi göstermiştir (Şekil 4.8). Bir sonraki yılda ise yine tüm mahsullerde, bitkilerin ekim tarihinden itibaren 55 güne kadar azalma eğilimi, daha sonra artma eğilimi gözlenmiştir. Mısır ve tatlı patates için elde edilen ET_{rel} , iki sezon içinde birbirine yakın değerlerde elde edilmiştir. Çeltik ve tatlı patates bitkilerinde, 2014 yılında, genel olarak iyi performans elde edilmiştir. İlk yıl olan 2013 yılında, 50 günden itibaren çeltik bitkisi iyi performans göstermiştir ($ET_{rel} > 0,75$). Diğer bitkilerde ise 70 günden sonra iyi performans belirlenmiştir. Çeltik 'de 2014 sezonunun başlarında meydana gelen ET_{rel} düşüşleri, sulama proje alanındaki bitki büyüme aşamalarının farklılığına bağlanabilir. İlk yıl gözlenen su kıtlığı, 2014 yılında bazı çiftçilerin tavsiye edilen üretim takvimine uymamasına, sonuçta farklı tarihlerde ekim ve dikim yapmalarına neden olmuştur. KVIS alanında 2014 yılında gerçekleşen çeltik tarımında farklı ekim tarihlerine ilişkin bir örnek Şekil Ek 3.'de verilmiştir.



Şekil 4.8. KVIS havzasında 2013 ve 2014 yılları Ocak-Nisan aylarında rölatif evapotranspirasyonun değişimi.

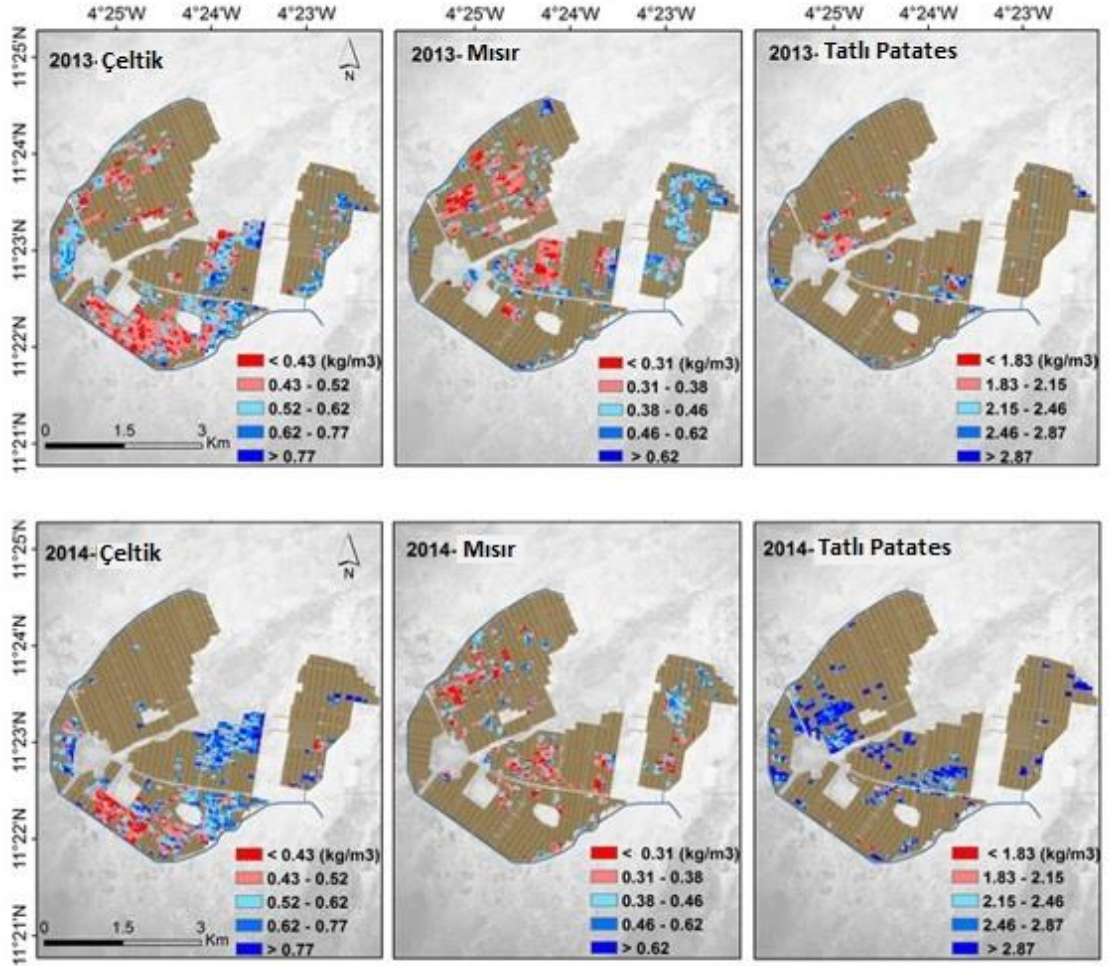
Su tüketiminin homojenliğini karakterize etmek için ET_a varyasyon katsayısı (CV) kullanılmıştır. Yıllara bağlı olarak farklı su tüketimi homojenliği desenleri gözlemlenmiştir. Su tüketimi homojenliği 2013 yılında tüm bitkileri için “*orta homojen*” sınıfında gerçekleşmiştir (Şekil 4.9). Su tüketim homojenliği, tatlı patates bitkisi için 100 güne kadar %10'dan %20'a yükselmiş, daha sonra azalmaya başlamıştır. Bu değer 2014 yılında, aynı 4 aylık izleme süresi boyunca %15 değerini aşmamıştır. Her üç bitki için, su tüketim homojenliğinin zamana bağlı değişimi benzer seyir izlemiştir. Su tüketimi homojenliği 2014 yılında 60 günden sonra tüm bitkiler için “*iyi homojen*” sınıfında gerçekleşmiştir. Çalışma süresi boyunca, drenaj ve derine sızma

nedeniyle bitkilerin kullanmadığı su miktarına ilişkin bir kayıt tutulmadığından bu sonuçlar dikkatli bir şekilde yorumlanmalıdır.



Şekil 4.9. Ocak-Nisan 2013 ve 2014 'de çeltik, mısır ve tatlı patates için su tüketiminin homojenliğinin değişimi.

Çalışma süresi boyunca bitki çeşidine göre KVIS genelinde çeşitli bitki su verimliliği değerleri gözlenmiştir. Bitki su verimliliği değerleri 2013 yılında, çeltik, mısır ve tatlı patates için sırasıyla ortalama 0.53, 0.42 ve 2.25 kg m⁻³ olmuştur (Şekil 4.10; Çizelge4.3). Bir sonraki yılda, çeltik ve tatlı patates için CWP'de bir artış ve mısır için bir düşüş gözlenmiştir. Bu yıl için ortalama CWP değerleri, çeltik, mısır ve tatlı patates için sırasıyla 0.59, 0.38 ve 2.89 kg m⁻³'tür. Her iki yılda tahmin edilen maksimum CWP'ler çeltik için 1.30 kg m⁻³ (2014 yılında), mısır için 0.92 kg m⁻³ (2013 yılında) ve tatlı patates için 5.86 kg m⁻³ (2014 yılında) 'dir.



Şekil 4.10. Çeltik, mısır ve tatlı patates için tahmini bitki su verimliliğinin konumsal dağılımı.

Çizelge 4.3. Kou Vadisi sulama alanında çeltik, mısır ve tatlı patates için CWP istatistiki değerleri ve CWP 'ye göre iyi performans gösteren alanların oranı.

			Çeltik	Mısır	Tatlı patates
Tahminlenen CWP aralığı	2013	min	0.15	0.10	1.02
		ortalama	0.53	0.42	2.25
		max	1.09	0.92	4.40
	2014	min	0.31	0.16	1.31
		ortalama	0.59	0.38	2.89
		max	1.30	0.76	5.86
Piksel sayısı	2013		5034	4069	1277
	2014		3540	2598	1940
İyi performans için standart değer			0.60	1.20	4.00
İyi performansa sahip alanlar (%)	2013		22	0	0.2
	2014		42	0	3

4.3. Sulama Performansını Belirleyen Fizikokimyasal Faktörler

4.3.1. Çeltik yetiştirme ortamı, ET_a ve CWP

Şekil Ek 6 'da verilen 16 adet fizikokimyasal parametreler arasında ikili korelasyon yapılmıştır. Korelasyon analizinden sonra, sadece 12 parametre çalışmada dikkate alınmıştır. Bunlar: D_{PSI}: arazi ile ana kanal su alım noktası arasındaki mesafe, Elv: yükseklik, DtB: anakaya derinliği, BLD: toprak hacim ağırlığı, SL: silt içeriği, SN: kum içeriği, pH: hidrojen potansiyeli, N: toplam azot, Ca: ekstrakte edilebilir kalsiyum, Fe: ekstrakte edilebilir demir, K: ekstrakte edilebilir potasyum; Zn: ekstrakte edilebilir çinko değerleridir. KVIS sulama alanında bu toprak özelliklerinde önemli farklılıklar bulunmaktadır (Çizelge4.4, Şekil Ek 5). Diğer kimyasal elementlerle karşılaştırıldığında, Ca içeriği 0-30 cm toprak katmanında daha baskındır, 581-1427 ppm (ortalama 885 ppm) arasında değişmektedir. Çeltik tarımı yapılan alanlarda pH değerleri 5.9 ile 6.4 arasında değişmektedir. Bu da çeltik tarımının çalışma süresi boyunca asidik topraklarda yapıldığını göstermektedir. Nishikawa ve diğerleri (2014) ve Yu, (1991) çeltik tarımı için uygun pH değerini 5.5-7.5 aralığı olarak belirtmişlerdir. Bu ise, KVIS sulama alanındaki çeltik arazilerin uygun pH değerine sahip olduğunu göstermektedir. DtB anakaya derinliği ortalama 157 cm, maksimum 174 cm derinlikindedir. Çeltik tarımında 15-30 cm toprak derinliğindeki toprak bünyesinin kumlu kil ve kumlu killi silt olması tavsiye edilmektedir. Çalışma alanında, bu katmandaki kum ve silt oranları sırasıyla ağırlıkça %38-%49 ve %23-%31 arasında değişmiştir. Çeltik parselleri deniz seviyesinden 295-310 m yüksektedir, parsellerin çoğunluğu (> %75) 300 metre yüksekliktedir. KVIS sulama alanı girişi ile en yakın parsel arasındaki uzaklık 815 m, en uzak parsel arasındaki uzaklık 11289 m'dir.

Çizelge 4.4. Kou vadisi sulama alanındaki çeltik arazileri fiziksel özelliklerinin belirleyici istatistikleri.

Değişkenler ^a	Birimler	Ortalama	CV ^b	Min	Max
Blok karakteristikleri					
Elv	m	302	0.97	295	310
D _{PSI}	m	4807	49.1	815	11289
Toprak fizikokimyasal özellikler					
DtB	cm	157	4.12	141	174
BLD	kg m ⁻³	1355	3.31	1300	1650
SL	w%	26	5.06	23	31
SN	w%	42	4.64	38	49
Ca	ppm	885	19.4	581	1427
Fe	ppm	133	7.32	109	151
K	ppm	122.6	11.1	94	157
N	ppm	770	7.01	584	879
pH	-	6.2	1.44	5.9	6.4
Zn	pp100m	240	10.56	155	384

^a: Elv: arazi kotu; D_{PSI}: arazi ile ana kanal su alım noktası arasındaki mesafe; DtB: anakaya derinliği; BLD: hacim ağırlığı; SL: silt içeriği; SN: kum içeriği; Ca: ekstrakte edilebilir kalsiyum; Fe: ekstrakte edilebilir demir; K: ekstrakte edilebilir potasyum; N: toplam azot; pH: hidrojen potansiyeli; Zn: ekstrakte edilebilir çinko

^b: CV: Varyans katsayısı.

4.3.2. Gerçek evapotranspirasyon ve bitki su verimliliği belirleyicileri

Çizelge 4.5 'de ET_a ve CWP [Doğrusal Karışık Model (LMM) Yaklaşımını Kullanılarak Değerlendirme] değerlerinin tahmininde kullanılacak parametrelerin istatistiksel önem düzeyleri verilmiştir. Genel olarak, arazi ile ana kanal su alım noktası arasındaki mesafe (D_{PSI}), ana kaya derinliği (DtB), hacim ağırlığı (BLD), silt içeriği (SL), kum içeriği (SN), toplam toprak azotu (N) ve potasyum (K) parametreleri, çeltiğin ET_a değerini tahminlemede istatistiksel açıdan öneme sahiptir (p <0.05; Çizelge 4.5). D_{PSI}, BLD, SL ve SN gibi faktörler ET_a ile negatif ilişkiye sahiptir. Bu nedenle, çeltik arazisi ana kanal su alım noktasından ne kadar uzak ise ET_a değeri o kadar düşük elde edilmiştir. Benzer şekilde, silt veya kum içeriği ne kadar yüksekse, ET_a değeri o kadar düşük elde edilmiştir. Diğer istatistiksel olarak anlamlı olan DtB, N ve K parametreleri

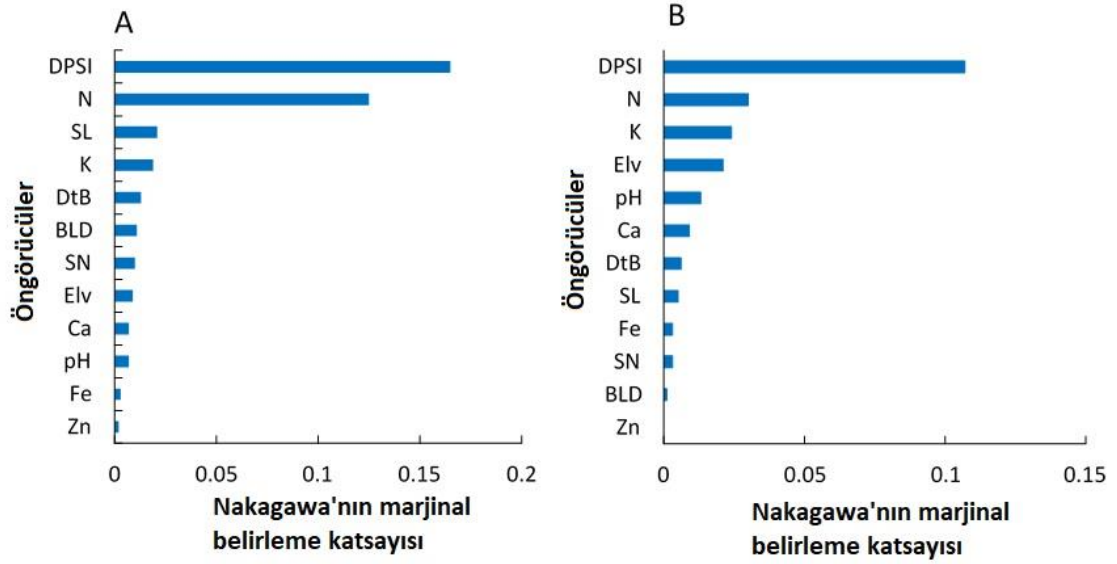
ile ET_a arasında pozitif ilişki bulunmuştur. Öte yandan, çalışma süresi boyunca çeltik arazilerinde CWP'yi belirlemede önemli etkiye sahip olan parametrelerin sayısı daha azdır. Bu parametreler Elv, D_{PSI} ve N 'dur. Bu üç parametrenin tümü, CWP ile negatif bir ilişkiye sahiptir. Bu durum, yüksek arazi kotunda bulunan çeltik tarlalarında, ana kanal su alım noktasından uzak parsellerde, yüksek azot konsantrasyonuna sahip arazilerde daha düşük CWP değerinin elde edileceğini göstermektedir.

Çizelge 4.5. Çeltiğin gerçek evapotranspirasyonu ve bitki su verimliliğini (CWP) etkileyen parametrelerin istatistiksel açıdan önem düzeyleri.

	ET_a	CWP
Sabit	660.1 **	0.60 **
Elv	3.0 ^{ns}	-3.3 10^{-2} **
D_{PSI}	-40.2 **	-2.6 10^{-2} **
DtB	5.5 *	5.1 10^{-3} ns
SL	-12.5 **	4.3 10^{-3} ns
SN	-7.3 *	4.4 10^{-3} ns
BLD	-5.4 *	-5.3 10^{-4} ns
N	20.8 **	-1.5 10^{-2} *
K	10.7 **	-1.0 10^{-2} ns
pH	0.5 ^{ns}	-8.8 10^{-3} ns
Zn	-5.1 ^{ns}	-2.2 10^{-3} ns
Ca	1.1 ^{ns}	-4.5 10^{-3} ns
Fe	-0.4 ^{ns}	1.4 10^{-3} ns

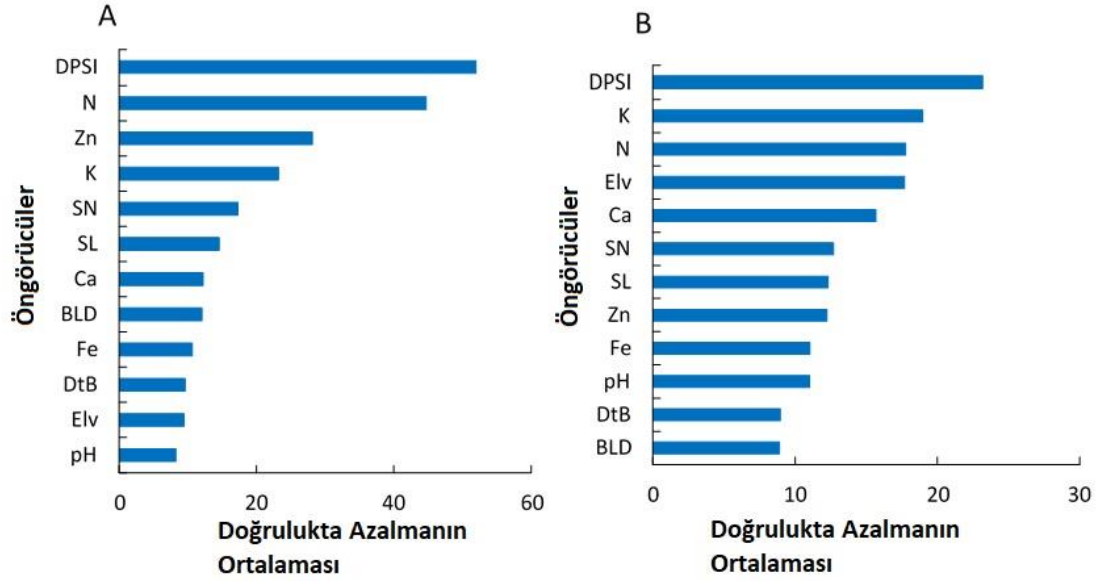
Kısaltmalar: Elv: arazi kotu; D_{PSI} : arazi ile ana kanal su alım noktası arasındaki mesafe; DtB: anakaya derinliği; Ca: ekstrakte edilebilir kalsiyum; Fe: ekstrakte edilebilir demir; K: ekstrakte edilebilir potasyum; N: toplam azot; pH: hidrojen potansiyeli; Zn: ekstrakte edilebilir çinko; BLD: hacim ağırlığı; SL: silt içeriği; SN: kum içeriği.

ET_a ve CWP için genel baskınlık analizinin sonuçları Şekil 4.11'de sunulmaktadır. ET_a 'daki değişkenlik için, hesaplanan Nakagawa marjinal R^2 değeri D_{PSI} ve N'de sırasıyla 0.165 ve 0.125 olmak üzere diğerlerine göre daha yüksektir (Şekil 4.11A). Diğer parametreler için (BLD, DtB, SL, SN, K; Çizelge4.5) Nakagawa marjinal R^2 değeri 0.010 ile 0.020 arasında değişmiştir. CWP için, D_{PSI} 'de en yüksek Nakagawa marjinal R^2 değeri elde edilmiştir (0.107; Şekil 4.11B). İstatistiksel olarak önem düzeyine sahip diğer parametrelerin (Elv, N) Nakagawa marjinal R^2 değerleri 0.010 ile 0.030 arasında elde edilmiştir.



Şekil 4.11. Nakagawa'nın çeltik gerçek evapotranspirasyon (A) ve bitki su verimliliği (B) için marjinal R² değeri açısından her bir parametrenin katkısı.

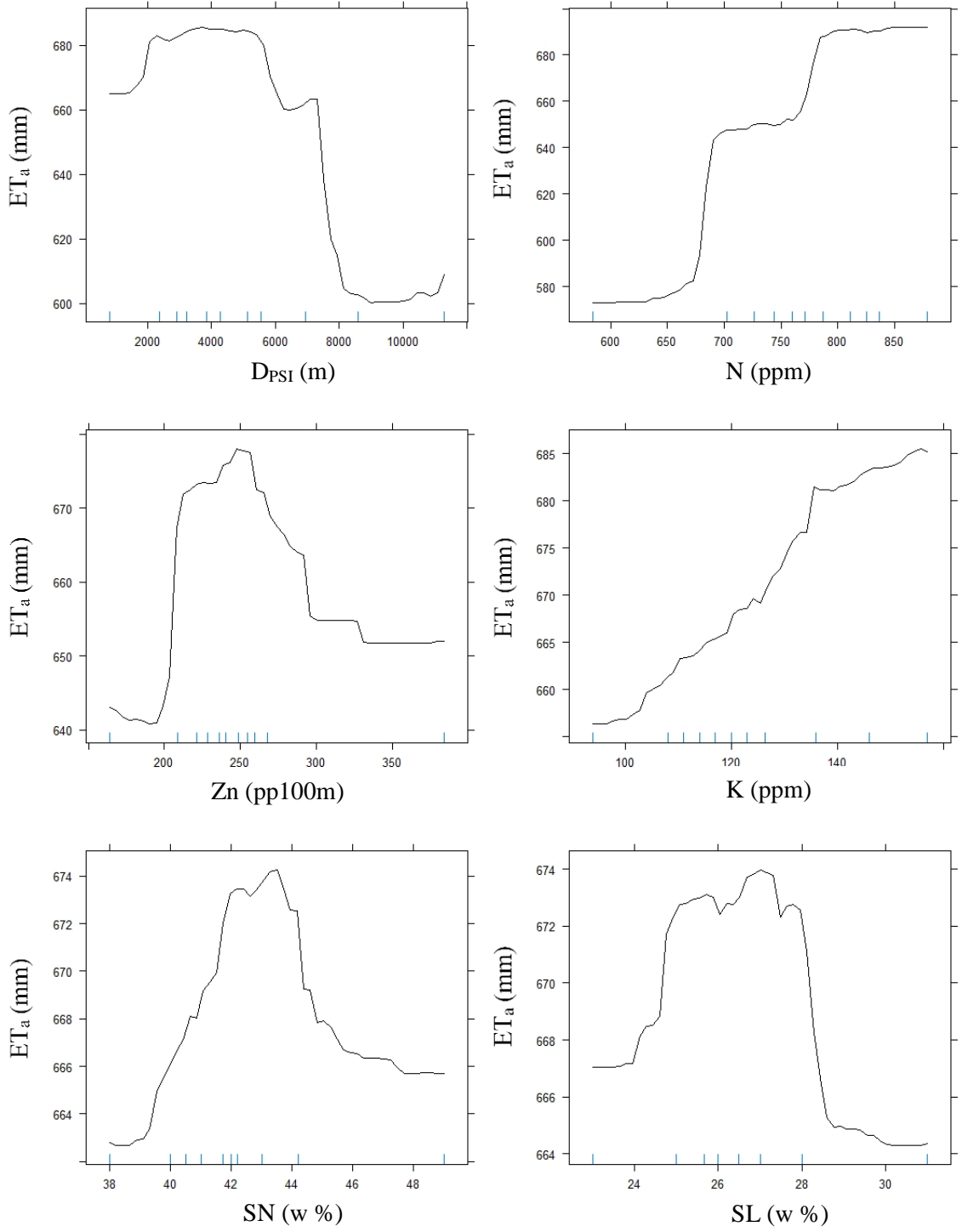
Genel olarak, RF modellerine göre değişkenlerin her birinin sıralaması, parametrelere göre farklılık göstermiştir (Şekil 4.12). D_{PSI} parametresinin ET_a ve CWP belirleme'de sırasıyla %52 ve %22 katkı ile diğer parametrelere göre daha fazla katkıda bulunduğu sonucuna varılmıştır (Şekil 4.12). ET_a için, %20 den fazla katkıda bulunan diğer parametreler ekstrakte edilebilir çinko (Zn), potasyum (K) ve azot (N)' dir (Şekil 4.12A). Silt ve kum içerikleri ve hacim ağırlığı sırasıyla yaklaşık %11 ile 16 'ya katkıda bulunmuştur. ET_a belirlemede, RF yaklaşımına göre en çok katkıda bulunan altı parametre D_{PSI} , N, Zn, K, SN, and SL 'dir (Şekil 4.12A). CWP 'de, parametrelerin çoğunluğunun RF tabanlı modele katkısı %10 ile 20 arasında değişmektedir; DtB ve BLD en az katkıda bulunan parametrelerdir (Şekil 4.12B). CWP belirlemede, RF yaklaşımına göre en çok katkıda bulunan altı parametre D_{PSI} , K, N, Elv, Ca ve SN dir.



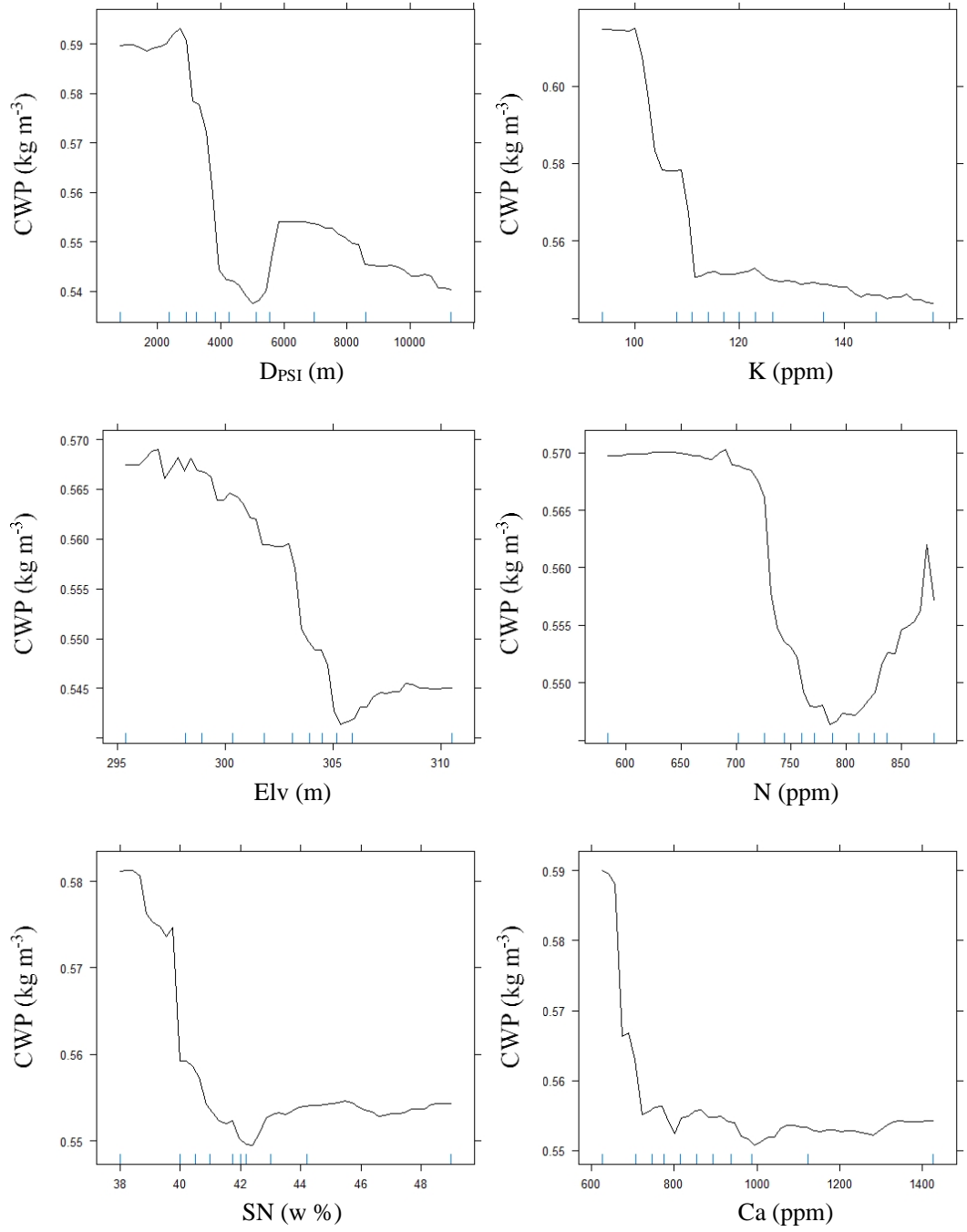
Şekil 4.12. Çeltik gerçek evapotranspirasyon (A) ve bitki su verimliliği (B) için parametrelerin doğrulukta ortalama azalma.

RF’de ET_a ve CWP modeline en çok katkıda bulunan altı parametre için kısmi bağımlılık grafikleri sırasıyla Şekil 4.13 ve Şekil 4.14’te gösterilmektedir. Bu grafikler, belirleyicinin ve yanıt değişkeni arasındaki ilişki modelini (örneğin, monoton veya monoton olmayan, doğrusal veya doğrusal olmayan) göstermektedir. Bu altı ortak değişken arasında, yalnızca K ve N ‘nın ET_a ile ilişkisi artan şekildedir. K veya N konsantrasyonundaki bir artış, çeltik ET_a ’sındaki bir artışla pozitif olarak ilişkilendirilmiştir. ET_a ile DPSI, Zn, SN ve SL arasında monoton olmayan ilişkiler bulunmuştur. DPSI, Zn ve SN ve SL için, genellikle belirli bir eşik değere kadar çeltik ET_a ’sında bir artış eğilimi, ardından bir düşüş eğilimi gözlenmiştir (Şekil 4.13).

CWP ile en önemli altı belirleyicinin ilişki örüntülerinin tümü monoton değildir (Şekil 4.14). Yani, belirli bir belirleyicinin artan veya azalan CWP ile bağlantısı aynı örüntüye sahip değildir. Örneğin, arazi kotu (Elv) ve N için, bir artıştan önce, belirleyicinin belirli bir eşik değerine (yani Elv için 305 m ve N için 780 ppm) kadar CWP ile azalan bir ilişki elde edilmiştir.



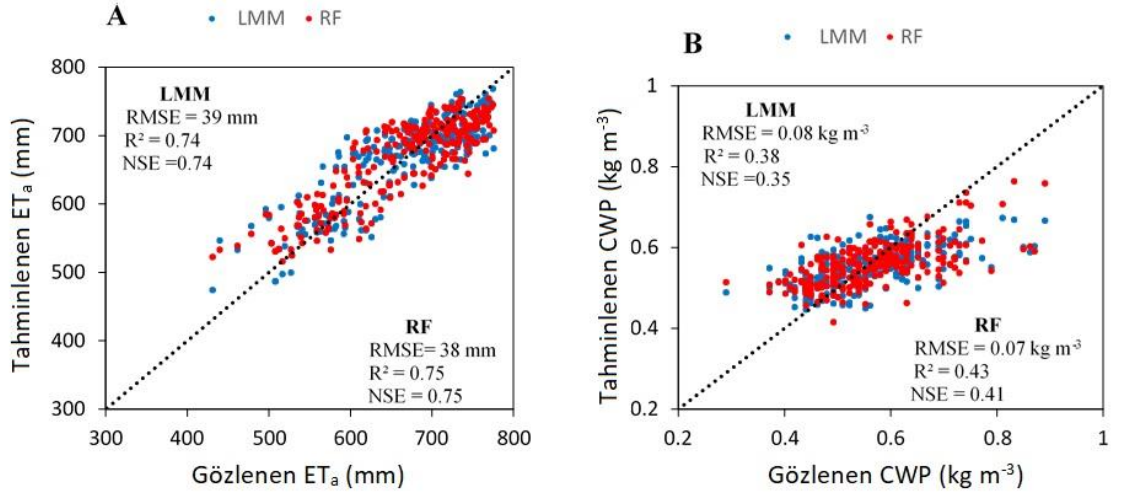
Şekil 4.13. Çeltikte gerçek evapotranspirasyonun en önemli altı belirleyicisinin rastgele orman modellemesine dayalı kısmi bağımlılık grafiği.



Şekil 4.14. Çeltik su verimliliğinin (CWP) en önemli altı belirleyicisinin rastgele orman modellemesine dayalı kısmi bağımlılık grafiği.

4.3.3. LMM ve RF tabanlı modellerin performansının karşılaştırılması

Her iki model de ET_a 'yı tahmin etmede iyi performans elde etmiştir. LMM ve RF tabanlı modeller için RMSE değeri sırasıyla 39 mm ve 38 mm, R^2 0.74 ve 0.75, NSE 0.74 ve 0.75'dir (Şekil 4.15A). Bununla birlikte, CWP için her iki modelin performansı orta düzeyde elde edilmiştir (sırasıyla RF tabanlı model ve LMM için 0.07 kg m^{-3} ve 0.08 kg m^{-3}). CWP'yi simüle etmede model performanslarının orta düzeyde olması, çalışmada kullanılmayan başka parametrelerin kullanımını gündeme getirmektedir.



Şekil 4.15. Gözlenen ve tahmin edilen çeltik gerçek evapotranspirasyonunun (A) ve su verimliliğinin (B) dağılımı.

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

5.1. Tartışma

Çalışmada, Burkina Faso'daki KVIS'de 2013 ve 2014 yıllarına ait iki kurak mevsimde üç bitki için konumsal-zamansal sulama performansları uzaktan algılama yaklaşımı ile belirlenmiştir. Aşağıdaki bölümlerde, Bölüm 4'te sağlanan sonuçlara göre belirli hedeflerin her birini ayrı ayrı tartışılmıştır. Potansiyel araştırma yolları en son bölümde tartışılmıştır.

5.1.1. Gerçek evapotranspirasyonun konumsal-zamansal değişimi

KVIS'de toprak türü, sulama suyu varlığı ve çalışma süresi boyunca yetiştirilen farklı mahsullerle ilişkili olabilecek bir ET_a değişkenliği gözlenmiştir. Bu değişkenlikte, sulama alanının bakım çalışmalarının yeterince yapılamaması ve havza yukarı kısımlarında aşırı su kullanımı, su kıtlığı ve yetersiz su yönetimi uygulamaları potansiyel nedenlerdir (Traoré, 2012; Wellens ve diğerleri, 2013). Mısır bitkisi için PySEBAL tarafından tahmin edilen ET_a ile arazide başka araştırmacılar tarafından elde edilen sonuçlar arasında iyi bir uyum vardır. Zwart ve Bastiaanssen (2004), sulanan mısır bitkisinde ET_a değeri için 200-1000 mm'lik bir aralık rapor etmişlerdir. Bu çalışmada, iki sezon boyunca 241-750 mm olarak elde edilmiştir (Çizelge 4.1). Çeltik bitkisinde ET_a değeri 210-793 mm aralığında tahminlenmiştir. Aynı araştırmacılar çeltik için 400-800 mm aralığında ET_a değeri bildirmişlerdir. Değerler arasındaki farklılık, yetiştirilen çeltik çeşidi ve tarımsal faaliyetlerdeki farklılıklarla ilişkili olabilir. Bununla birlikte, büyük ölçekli bölgelerin barındırdıkları heterojenlik, agro-ekosistemler boyunca yan etkiler ve karmaşık fizikokimyasal dinamikler, bu yaklaşımları uygularken ihmal edilemez hata kaynakları oluşturur (Allen, 1999; Bastiaanssen ve Bandara, 2001; Bastiaanssen ve diğerleri, 2002; Bastiaanssen ve Chandrapala, 2003; Singh ve diğerleri, 2008; Tolk ve diğerleri, 2006). Mahsul yönetimi uygulamaları veya modelin kendisiyle ilgili belirsizlikler (örneğin, model kalibrasyonu, enterpolasyon yöntemi) PySEBAL tabanlı yaklaşımın genel performansını etkilemektedir. Aslında, mahsul yönetimi uygulamaları bitkinin su tüketimini etkiler. Su yönetim uygulamaları, yetiştirilen mahsul çeşitliliği, uygulanan azot miktarı, haşere (böcek) ve hastalık yönetimini içermektedir (Dembélé ve diğerleri, 2005; Wellens ve diğerleri, 2013). PySEBAL

modelinin ana avantajlarından biri, hissedilir ısı akısının dahili kalibrasyonunu otomatik olarak kullanmasıdır. Bu, görüntüdeki yüzey sıcaklığına ve bitki örtüsü koşullarına bağlı olan sıcak ve soğuk piksellerin tanımlanmasını gerektirir. Yazları kurak olan yarı kurak bölgelerdeki iklimlere uygulandığında otomatik kalibrasyon prosedürlerinden beklenen hata (çalışmamızda olduğu gibi), deneyimli, bilgili kullanıcılar tarafından yapılan manuel kalibrasyondan yaklaşık %10 daha azdır (Allen ve diğerleri, 2013). PySEBAL modelinde bu tür otomatik kalibrasyon prosedürleri sırasında dahili önyargıları (hataları) azaltmak, modelin operasyonel amaçlarla verimli kullanımını iyileştirmek için çalışmalara gereksinim bulunmaktadır (Allen ve diğerleri, 2013; Feng, 2015). Enterpolasyon yöntemi ayrıca model performansını etkileyen bir önyargı (hata) kaynağıdır. Görüntüler arasında K_c enterpolasyonu yaparak ve bu enterpolasyonlu değerleri ET_0 ile çarparak günlük ET_a elde etmek, hata kaynaklarından birisidir (Singh, 2009; Singh ve diğerleri, 2012). Enterpolasyonun doğruluğu sezon başına görüntü sayısına bağlıdır. Allen ve diğerleri (2012), genellikle, sezonluk evapotranspirasyonu tahmin etmede doğru bir K_c eğrisi oluşturmak için ayda bir uydu görüntüsünün yeterli olduğunu belirtmiştir. Bununla birlikte, hızlı bitki örtüsü değişimi sırasında, daha fazla görüntüye ihtiyaç vardır. Bu çalışmada, her ay için en az bir görüntü kullanılmıştır. Bu tür veri sınırlaması, ET_a tahmininin genel performansını olumsuz etkilemektedir. Yine de, PySEBAL'den türetilen ET_a ile FAO-WaPOR ET_a karşılaştırıldığında ve veriler arası uyum dikkate alındığında hata kabul edilebilir seviyededir. Bu sonuçlar, PySEBAL modelinin KVIS'te sulama suyu yönetimi için kullanılabileceğini göstermektedir. Büyük ölçekli su yönetimi uygulamalarında, daha yüksek çözünürlüğe (30 m) sahip PySebal çıktılarının kullanılması önerilebilir.

5.1.2. Konumsal-zamansal sulama performans göstergeleri

2013 ve 2014 yıllarındaki kurak mevsim üretim dönemlerinde KVIS sulama alanında konumsal-zamansal sulama performansı, rölatif evapotranspirasyon, su tüketim oranı, su tüketiminin homojenliği, bitki su verimliliği olmak üzere dört göstergeye göre belirlenmiştir. Performansın yıla, ekilen mahsule ve mahsulün sulama alanındaki coğrafi konumuna bağlı olarak değiştiği sonucu varılmıştır. CWP performans göstergesi göz önüne alındığında, çeltik için tahmin edilen CWP'ler önceki çalışmalarda bildirilenlere benzer iken (Dembélé ve diğerleri, 2005; Dembélé ve diğerleri, 2012;

Zwart ve Bastiaanssen, 2004), mısır için daha düşük elde edilmiştir (Zwart ve Bastiaanssen, 2004). Bu tür farklılıklar, çalışma dönemi boyunca toprak verimliliği, mahsul yönetimi uygulamaları ve su varlığındaki farklılıklar ile ilgili olabilir. CWP'yi en üst düzeye çıkarmak için optimum gübre ve sulama suyu uygulamalarına göre optimum değeri veren literatür değerleri dikkate alındığında (Zwart ve Bastiaanssen, 2004), KVIS alanında tipik olarak uygulanan düşük gübre kullanımı (Üre ve NPK) (Dembélé ve diğerleri, 2005; Dembélé ve diğerleri, 2012) bu çalışmada elde edilen düşük CWP performansını açıklayabilir. Mahsul verimleri, PySEBAL'de sabit hasat indeksi (HI) değerleri kullanılarak tahmin edilmiştir. Biyokütle üretimi ve verimler arasında doğrusal bir ilişki vardır. Fakat, tarla koşullarında, biyokütle üretimi ve hasat indeksi, biyotik ve abiyotik streslerin zamanlaması ve büyüklüğüne bağlı olarak değişiklik göstermektedir (Musick ve diğerleri, 1994; Unkovich ve diğerleri, 2010). Sabit HI değerlerinin kullanılması, tahmini mahsul veriminde hatalara yol açabilmektedir. Bu nedenle, tahmini değerler ve ilgili göstergeler, gösterge niteliğinde kabul edilmeli ve dikkatli yorumlanmalıdır. İklim koşulları ve toprak özellikleri gibi çeşitli nedenler, CWP'yi bir bölgeden diğerine etkileyebilir (Dawe, 2005). Ayrıca, bir konumdaki daha yüksek bir CWP değerinin, başka bir konumdaki daha düşük bir CWP değerinden daha arzu edilen bir durumu gösterip göstermediği belirsizliğini korumaktadır (Dawe, 2005). Gelecekteki araştırmalar, KVIS genelinde yerel koşullar altında CWP değerlerinin belirlenmesini hedefleyebilir. Çeltik verim seviyesindeki düşüş göz önüne alındığında, mısır bitkisinin üretimi KVIS genelinde teşvik edilmiştir (Wellens ve diğerleri, 2007). Bununla birlikte, bu mahsulden de çalışma süresi boyunca yüksek verim alınmadığı tespit edilmiştir. Toplam mısır ekili alanın yalnızca %18'inde 2013 yılında ortalamanın üstünde verim alınmış, 2014 yılından ise mısır ekili alanın sadece %37'sinde ortalamanın üstünde verim alınmıştır (Çizelge4.2). Çeltik bitkisi içinde 2013 yılında benzer sonuçlar elde edilmiştir. Tatlı patates 2014 yılında diğer iki bitkiye göre daha yüksek verim alınan bitki olmuştur. Mısır ve çeltikte elde edilen zayıf performans, çiftçiler tarafından da farkedilerek 2013 yılına göre 2014 yılında çeltik ve mısır ekili alanlarda sırasıyla ~%30 ve %36 azalma gerçekleşmiş, tatlı patates üretim alanları %52 artmıştır (Çizelge4.2). Daha iyi bir gübreleme yönetimi ve önerilen bitki yetiştirme takvimlerine uyum yoluyla mısır ve çeltik verimliliğini artırma fırsatları vardır. Su tüketim oranıyla ilgili olarak, çalışma süresi boyunca düşük değerler

gözlenmiştir. Bunun drenaj ve derine sızma yoluyla kayda değer su kayıplarından kaynaklandığı düşünülmektedir. Kou Nehri'nden sulama için sürekli su akışı, KVIS'de uygulanan sulama yöntemiyle birleştiğinde, özellikle düşük su gereksinimi olan büyüme aşamalarında bu tür kayıpların artmasına neden olmaktadır. Suyun fazla olduğu dönemlerde, suyun depolanması gibi çiftçilerin uygulayabileceği alternatif su tasarrufu yöntemlerine ihtiyaç vardır. Bu tür su tasarrufu yöntemleri, proje alanı boyunca gözlemlenen konumsal olarak değişen rölatif evapotranspirasyon arasındaki değişkenliği azaltmaya ve su tüketiminin tekdüzeliğini iyileştirmeye yardımcı olabilir. KVIS genelinde iyi ve kötü performansa sahip alanları tespit etmek amacıyla performans göstergelerine odaklanan çalışmada, bu proje alanında karşılaşılan çeşitli sorunların yanı sıra iyi yönetim için zorlukları vurgulamaktadır. Sonuçlar, uzaktan algılama tabanlı yaklaşımın zaman ve maliyet için bir alternatif olabileceğini göstermiştir. Sulama performansının konumsal-zamansal kalıpları hakkında bu tür içgörülü bilgiler, sulama planının daha iyi bir şekilde yönetilmesi için sulama birliklerine yardımcı olabilir. Ayrıca, bu çalışmada uygulanan metodoloji, bulutlu koşullar altında daha iyi ET_a tahminleri sağlamak için radar görüntüleme ile kombinasyon halinde Copernicus-Sentinel-2 veya Copernicus-Sentinel-1 gibi farklı uydu görüntü kaynakları kullanılarak kolayca kullanılabilir. Yöneticilere ve diğer karar vericilere veri kıtlığı olan alanlarda su yönetimini iyileştirmede yardımcı olacak böyle bir metodolojinin potansiyeline rağmen, arazi ve sulama uygulamalarının başarısı çeşitli nedenlerle Burkina Faso'da sınırlı kalmaktadır. Sulama sistemi yöneticileri, danışmanları ve politika yapıcılar genellikle bu tür fırsatların farkında değildir (Bastiaanssen ve Bos, 1999) veya geliştirilen yöntemler genellikle kullanıcı odaklı değildir (Bos ve diğerleri, 2001). Bu zorluğun üstesinden gelmek için, farkındalıklarını artırmak ve kapasitelerini güçlendirmek için tüm paydaşları (çiftçilerden plan yöneticilerine ve politika yapıcılara kadar) içeren daha fazla vaka çalışması yapılmalıdır. Bu tür faaliyetler, mevcut özel-kamu ortaklıkları aracılığıyla yapılabilir (Wellens ve diğerleri, 2013). Bu tür UA tabanlı metodolojileri benimsemenin önündeki engellerin üstesinden gelmek için başka bir çözüm, sulama sistemi programı yönetimi hizmetleri içinde UA ve GIS birimlerinin oluşturulması olabilir.

5.1.3. Sulama performansını etkileyen fizikokimyasal faktörler

Çalışmada, KVIS'de sulanan çeltik için ET_a ve CWP'yi etkileyen toprak fizikokimyasal özellikleri ve parsel özellikleri incelenmiştir. ET_a ve CWP'nin konumsal değişiminin ağırlıklı olarak, arazi ile ana kanal su alım noktası arasındaki mesafeye, arazi kotuna, toprak kum ve silt içeriğine, toprağın azot, ekstrakte edilebilir potasyum ve çinko içeriğine bağlı olduğu sonucuna varılmıştır. Toprak bünyesi, topraktaki suyun hareketini, depolama kapasitesini ve bitkiler için mevcut olan depolanmış su miktarını etkiler. Sızmayı, su tutma kabiliyetini ve gerçek evapotranspirasyonu artırmak için organik madde eklenerek toprak dokusu iyileştirilebilir (Wilson ve diğerleri, 2020). Çalışma döneminde KVIS'de topraktaki azot ve potasyumun ET_a üzerindeki istatistiksel olarak anlamlı olumlu etkisi belirlenmiş, bu durum besin maddelerinin hem fotosentez hem de mahsul büyümesi üzerindeki rolünden kaynaklanabilir (Santos ve diğerleri, 2016; Skinner, 2013). Bu tür sonuçlar, bu iki bitki besin maddesinin gübrelemede uygun şekilde uygulanmasının KVIS'in genel performansı için çok önemli olduğunu göstermektedir (Dembélé ve diğerleri, 2005; Donovan ve diğerleri, 1999; Yameogo ve diğerleri, 2013). Çiftçileri gübre edinme konusunda desteklemek ve en iyi gübre yönetimi uygulamaları için farkındalıklarını artırmak, KVIS'teki çiftçilerin devam eden gübreleme sorunlarının azaltılmasına yardımcı olacaktır. LMM sonuçlarında, azotun çeltik CWP üzerindeki etkisi negatif olarak bulunmuştur. ET_a da ise azot olumlu bir etkiye sahiptir. Bitki ve su yönetimi uygulamaları, toprak verimliliği, bitki yetiştirme dönemi gibi çeşitli faktörler, ET_a ve verim üzerindeki etkileriyle CWP'yi etkileyebilir (Kijne, 2003; Nangia ve diğerleri, 2008). Su yönetimi uygulamaları göz önüne alındığında, tava sulama sistemlerinde bitki su verimliliği ve gerçek evapotranspirasyon, kanal suyunun azalması göz önüne alındığında, sulama kanallarının başından uzaklaştıkça daha fazla etkilenmektedir (Latif, 2007; Van Dam ve diğerleri, 2006). Ana kanal su alım noktasından en uzakta olan alanlara, daha az su gereksinimi olan mahsuller yetiştirmek veya damla sulama sistemi gibi verimli sulama sistemleri kullanmak, sulama alanının genel sulama performansını iyileştirmeye yardımcı olabilecektir. Arazi yüksekliğinin çeltikte CWP'yi etkilediği bilinmektedir (Bastiaanssen ve Steduto, 2017; Foley ve diğerleri, 2020). Sonuçlarımız, KVIS'in en yüksek arazi kotlarında sulanan arazilerde nispeten daha düşük CWP bulunduğunu göstermektedir. Bunun nedeni bu arazi kotlarında toprak erozyonu ve ardından toprak verimliliğindeki

kayıpla ilişkili olabilir (Karaca ve diğerleri, 2018; Seibert ve diğerleri, 2007). KVIS'te daha yüksek kotlarda arazi ve toprak suyu korumasının iyileştirilmesi ihtiyacını ortaya koymaktadır. Bu çalışmada gösterilen modellerin performansındaki sonuçlar, modelleme yaklaşımına göre çeşitlendirilmiştir. Rastgele orman temelli modellerin, çeşitli bağlamlarda çoklu doğrusal regresyon modellerinden daha iyi performans gösterdiği kanıtlanmıştır (Breiman, 2001; Jeong ve diğerleri, 2016). Sonuçlarımız, CWP için bu tür sonuçlarla uyumludur. Jeong ve diğerleri (2016), RF tabanlı modellerin görece daha yüksek performansının, mahsul ve tarım sistemlerinde olduğu gibi, çok fazla parametre içeren sistemlerde daha iyi sonuçlar verdiğini iddia etmişlerdir. Diğer iklim faktörleri, su varlığı, bitki çeşidi, yönetim uygulamaları ve sosyo-ekonomik faktörler (örn. sulama birliği özellikleri, çiftçilerin sulama sistemine yakınlığı, lojistik zorluklar, vb.) sulama performansını potansiyel olarak etkileyebilir (Dawe, 2005; Zhang ve diğerleri, 2013; Zwart ve Bastiaanssen, 2004). Bu tür potansiyel değişkenlerin dahil edilmesi, KVIS'teki sulama performansının temel kısıtlamalarını anlamamıza yardımcı olacaktır.

5.1.4. Çalışmanın kısıtları ve gelecek çalışmalar

Çalışmada elde edilen cesaret verici sonuçlara rağmen, bu tür bir yaklaşımı KVIS'te veya Burkina Faso'daki diğer sulama planlarında operasyonel olarak uygulamadan önce bazı kısıtların ele alınması gerekmektedir. Çalışmanın kısıtlarından biri, çalışma süresi boyunca ET_a değerlerini doğrulamak için tarla verilerinin olmamasıdır. Bireysel tarla verilerinin elde edilmesi mümkün görünse de, sulama alanındaki tüm parsellerden bu verilerin elde edilmesi zordur, maliyetlidir ve belirli bir sulama alanındaki konumsal değişkenliği temsil etmekte başarısız olabilir. Bu nedenle gelecekteki araştırmalar, konumsal evapotranspirasyon doğrulaması için minimum standartlara sahip UA tabanlı bir metodoloji geliştirerek bu sorunu çözmeye çalışmalıdır. Bu çalışma, iki ardışık kurak mevsimdeki ekim sezonu boyunca, üç ana mahsul için, dört sulama performans göstergesinin analizi ile sınırlı tutulmuştur. Bununla birlikte, çalışma alanındaki diğer bitkileri de kapsayacak şekilde, farklı göstergelerde ele alınarak analizler tarihsel verilerle genişletilebilir. Bu tür bir analiz, UA tabanlı yaklaşımları ve bir dizi seçilmiş performans göstergesini içeren KVIS'in düzenli sulama performansı değerlendirmesi için özel-kamu ortaklıkları aracılığıyla geliştirilebilir. Diğer bir önemli kısıt, biyokütle

üretimi ile verimler arasında doğrusal bir ilişki olduğunu kabul ederek, sabit HI değerleri kullanılarak mahsul verimi tahminidir. Biyokütle üretimi ve verimler arasındaki hem doğrusal hem de doğrusal olmayan ilişkiler, biyotik ve abiyotik streslerin zamanlaması ve büyüklüğüne bağlı olarak gözlemlenebilir. Sabit HI değerlerini kullanan yöntem, UA tabanlı yaklaşımlardan geliştirilmiş verim tahmini için hasat endeksinin konumsal değişkenliğini haritalayarak daha da geliştirilebilir. Diğer bir kısıt, çeltiğin CWP'sindeki değişkenliği açıklamak için fizikokimyasal faktörlerin yetersizliğidir. Sulama performansının belirleyicilerini araştırmak için derin öğrenme veya hibrit makine öğrenimi gibi diğer modellerin kullanılması konusunda çalışmalar yapılmalıdır.

5.2. Sonuç

Sulama proje alanları için sulama suyu yönetimini iyileştirmek ve sürdürülebilir tarım için sulama performans değerlendirmesinin yapılması oldukça önemlidir. Kurak ve yarı kurak bölgelerde üretimin sürdürülebilir olması için, su oldukça önemlidir. Var olan suyun yüksek verimli kullanılması için, sulama performansının değerlendirilmesi, eksikliklerin giderilmesi gerekmektedir. Bu amaçla maliyeti düşük yöntemlerin kullanılması kritik öneme sahiptir. Mahsul yetiştiriciliğini sürdürmek için uygun maliyetli metodolojilerin kullanılması düzenli performans değerlendirmesi yapmak için kaynak eksikliği göz önüne alındığında kritik öneme sahiptir.

Bu çalışma, Burkina Faso'da 1200 hektarlık bir sulama alanı olan KVIS'de sulama performansını konumsal-zamansal kapsamda belirlemek için uzaktan algılama yönteminin uygulanabilirliğini, doğruluğunu ve maliyet etkinliğini göstermiştir. Sonuçlar PySEBAL modelinin KVIS'te ET_a 'yı tahmin etmedeki etkinliğini vurgulamıştır. PySEBAL modeli ile daha detaylı konumsal bilgilerin eldesi yüksek çözünürlüklü uydu görüntüleri ile mümkündür. Elde edilen sonuçlar, kullanılan yaklaşımın KVIS genelinde zayıf performans gösteren alanların belirlenmesinde ve sulama performansının değişimlerinin değerlendirilmesinde ve bu tür bir değişkenliğin potansiyel belirleyicilerini keşfetmede etkili olduğunu göstermiştir. Erken ve geç bitki fenolojik aşamalarında, KVIS'te sulama suyu yönetiminin iyileştirilmesi ihtiyacı olduğu sonucuna varılmıştır. Bu tür sulama yönetimi uygulamaları, su kayıplarını azaltan ve su depolama sistemlerini dikkate alan metodları içermelidir. Sulama performansının

değerlendirmesi, KVIS genelinde konumsal olarak farklı bitkiler için çok yüksek su stresinden, iyi sulanan mahsul alanlarına kadar, karar vericilere, sulama planının genel performansını iyileştirmek için odaklanmanın nerede olması gerektiği konusunda yol gösterecektir. Ayrıca, sulama alanının genel performansını iyileştirmek için kurak mevsim dönemlerinde çeltik yetiştiriciliğine alternatif mahsullerin belirlenmesi yararlı olacaktır. Bu nedenle, çalışma döneminde bu mahsulün elde ettiği nispeten iyi performans göz önüne alındığında, sulamadan daha fazla yararlanmak için daha fazla tatlı patates yetiştiriciliğine geçiş benimsenebilir. Bu tür bulgular, yönetim ekibine ve çiftçi kuruluşlarına, mahsul verimini ve çiftçilerin gelirini artırmak amacıyla sulama alanının genel performansını iyileştirmek için uygun önlemler konusunda rehberlik edebilir. Çalışma, KVIS'teki sulama performansının konumsal değişkenliğini etkileyen fizikokimyasal faktörlere ilişkin önemli bir fikir vermektedir. Parsel ile sulama alanına su alım noktası girişi arasındaki mesafe, yükseklik, topraktaki kum ve silt içeriği, toprak toplam azotu ve ekstrakte edilebilir potasyum ve çinko gibi ana faktörlerin performans göstergesi üzerindeki etkilerinin ele alınması, karlılığın artırılmasına katkıda bulunabilir. KVIS sulama planında çeltik tarımı, daha düşük kotlarda (örneğin 300 m nin altındaki yüksekliklerde) ve proje girişine daha yakın yerlerde, uygun azot ve potasyum gübrelerinin kullanımı ile daha uygun sonuçlar verecektir. Bu tür sonuçlar, KVIS yöneticilerinin operasyonlarını daha iyi önceliklendirmek için zayıf performans gösteren arazileri stratejik olarak bulmalarına yardımcı olabilir.

Sulama performansına ilişkin bu bulgular, karar destek araçlarında gelişmiş sulama suyu yönetimi için önemlidir. KVIS yöneticilerinin, zamanında ve etkili düzeltici eylemler için sulama performansı hakkında güvenilir bilgi sağlayabilen bu çalışmada sunulan yaklaşıma dayalı böyle bir operasyonel araç kullanması uygun olacaktır. Bu çalışmada benimsenen metodoloji, sulama için su kaynaklarının yönetimini ve daha sürdürülebilir tarımsal üretim için merkez politikalarını iyileştirmeye yardımcı olmak için Burkina Faso gibi bölgelerde veya ülkelerde kolaylıkla kullanılabilir.

KAYNAKLAR

- Abernethy, C.L., 1986. Performance measurement in canal water management: a discussion. ODI-IIMI Irrigation Management Network Paper 86/2d, pp. 25.
- Abernethy, C.L., 1989. Performance criteria for irrigation systems., in: Rydzewski, J.R., Ward, K. (Eds.), Proceedings on International Conference on Irrigation Theory and Practice, University of Southampton, UK.
- Ahmad, M.D., Turrall, H., Nazeer, A., 2009. Diagnosing irrigation performance and water productivity through satellite remote sensing and secondary data in a large irrigation system of Pakistan. *Agr. Water Manage.* 96, 551-564.
- Akhtar, F., Awan, U.K., Tischbein, B., Liaqat, U.W., 2018. Assessment of irrigation performance in large river basins under data scarce environment—a case of Kabul river basin, Afghanistan. *Remote Sensing* 10, 972.
- Akpoti, K., Kabo-bah, A.T., Dossou-Yovo, E.R., Groen, T.A., Zwart, S.J., 2020. Mapping suitability for rice production in inland valley landscapes in Benin and Togo using environmental niche modeling. *Sci. Tot. Environ.* 709, 136165.
- Allen, R., 1999. Initial report on closure error from Eddy-Covariance Systems used in the regional advection perturbations in an irrigated desert (RAPID)—impacts on evapotranspiration. Technical Report.
- Allen, R., Trezza, R., Tasumi, M., Kjaersgaard, J., 2012. METRIC: mapping evapotranspiration at high resolution—applications manual for Landsat satellite imagery. University of Idaho, 130.
- Allen, R.G., 2016. REF-ET: Reference evapotranspiration calculation software for FAO and ASCE Standardized equations. Reference manual. University of Idaho, Kimberly, ID, USA.
- Allen, R.G., Burnett, B., Kramber, W., Huntington, J., Kjaersgaard, J., Kilic, A., Kelly, C., Trezza, R., 2013. Automated Calibration of the METRIC-Landsat

Evapotranspiration Process. JAWRA Journal of the American Water Resources Association 49, 563-576.

Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., 1998. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome, Italy.

Allen, R.G., Tasumi, M., Trezza, R., 2007. Satellite-Based Energy Balance for Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration (METRIC)-Model. Journal of Irrigation and Drainage Engineering 133, 380-394.

Ambast, S., Singh, O., Tyagi, N., Menenti, M., Roerink, G., Bastiaanssen, W., 1999. Appraisal of irrigation system performance in saline irrigated command using SRS and GIS, Operational remote sensing for sustainable development. Balkema, pp. 457-461.

Asaana, J., Sadick, A., 2016. Assessment of irrigation performance using remote sensing technique at Tono irrigation area in the Upper East region of Ghana. International Research Journal of Agricultural and Food Sciences 1, 79-91.

Azen, R., Budescu, D.V., 2003. The dominance analysis approach for comparing predictors in multiple regression. Psychological Methods 8, 129-148.

Bastiaanssen, W., Bandara, K.M.P.S., 2001. Evaporative depletion assessments for irrigated watersheds in Sri Lanka. Irrigation Science 21, 1-15.

Bastiaanssen, W., Cheema, M., Immerzeel, W., Miltenburg, I., Pelgrum, H., 2012. Surface energy balance and actual evapotranspiration of the transboundary Indus Basin estimated from satellite measurements and the ETLook model. Water Resources Research 48.

Bastiaanssen, W.G.M., 1995. Regionalization of surface flux densities and moisture indicators in composite terrain : a remote sensing approach under clear skies in Mediterranean climates. SC-DLO, Wageningen.

Bastiaanssen, W.G.M., 2000. SEBAL-based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey. Journal of Hydrology 229, 87-100.

- Bastiaanssen, W.G.M., Ahmad, M.-u.-D., Chemin, Y., 2002. Satellite surveillance of evaporative depletion across the Indus Basin. *Water Resources Research* 38, 9-1-9-9.
- Bastiaanssen, W.G.M., Ali, S., 2003. A new crop yield forecasting model based on satellite measurements applied across the Indus Basin, Pakistan. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 94, 321-340.
- Bastiaanssen, W.G.M., Bos, M.G., 1999. Irrigation Performance Indicators Based on Remotely Sensed Data: a Review of Literature. *Irrigation and Drainage Systems* 13, 291-311.
- Bastiaanssen, W.G.M., Brito, R.A.L., Bos, M.G., Souza, R.A., Cavalcanti, E.B., Bakker, M.M., 2001. Low cost satellite data for monthly irrigation performance monitoring: Benchmarks from Nilo Coelho, Brazil. *Irrigation and Drainage Systems* 15, 53-79.
- Bastiaanssen, W.G.M., Chandrapala, L., 2003. Water balance variability across Sri Lanka for assessing agricultural and environmental water use. *Agricultural Water Management* 58, 171-192.
- Bastiaanssen, W.G.M., Menenti, M., Feddes, R.A., Holtslag, A.A.M., 1998. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). 1. Formulation. *Journal of Hydrology* 212-213, 198-212.
- Bastiaanssen, W.G.M., Noordman, E.J.M., Pelgrum, H., Davids, G., Thoreson, B.P., Allen, R.G., 2005. SEBAL model with remotely sensed data to improve water-resources management under actual field conditions. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 131, 85-93.
- Bastiaanssen, W.G.M., Steduto, P., 2017. The water productivity score (WPS) at global and regional level: Methodology and first results from remote sensing measurements of wheat, rice and maize. *Science of The Total Environment* 575, 595-611.
- Bastiaanssen, W.G.M., Thiruvengadachari, S., Sakthivadivel, R., Molden, D.J., 1999. Satellite Remote Sensing for Estimating Productivities of Land and Water. *International Journal of Water Resources Development* 15, 181-194.

- Bastiaanssen, W.G.M., van der Wal, T., Visser, T.N.M., 1996. Diagnosis of regional evaporation by remote sensing to support irrigation performance assessment. *Irrigation and Drainage Systems* 10, 1-23.
- Bates, D., Mächler, M., Bolker, B., Walker, S., 2015. lme4: Linear Mixed-Effects Models Using Eigen and S4. R package version 1.1-10. 2015.
- Blaney, H.F., Criddle, W.D., 1950. Determining water requirements in irrigated areas from climatological and irrigation data. U.S. Soil Conservation Service, [Washington, D.C.].
- Blatchford, M.L., Karimi, P., Bastiaanssen, W.G.M., Nouri, H., 2018. From global goals to local gains—A framework for crop water productivity. *ISPRS Int. J. Geo-Inf.* 7, 414.
- Blatchford, M.L., Mannaerts, C.M., Zeng, Y., Nouri, H., Karimi, P., 2019. Status of accuracy in remotely sensed and in-situ agricultural water productivity estimates: A review. *Remote Sensing of Environment* 234, 111413.
- Bos, M., Dayum, S., Bastiaanssen, W., Vidal, A., 2001. Remote sensing for water management: The drainage component, Report on expert consultation meeting organized by representatives of the ICID, IPTRID, ILRI, WaterWatch and the World Bank, Ede-Wageningen May, pp. 15-16.
- Bos, M.G., 1997. Performance indicators for irrigation and drainage. *Irrigation and Drainage Systems* 11, 119-137.
- Bos, M.G., 2004. Using the depleted fraction to manage the groundwater table in irrigated areas. *Irrigation and Drainage Systems* 18, 201-209.
- Bos, M.G., Bastiaanssen, W.G.M., 2003. Using the depleted fraction to manage the groundwater table in irrigated areas.
- Bos, M.G., Burton, M.A., Molden, D.J., 2005. Irrigation and drainage performance assessment: practical guidelines. CABI Pub., Wallingford (United Kingdom).

Bos, M.G., Nugteren, J., 1974. On irrigation efficiencies. I.L.R.I., Wageningen, The Netherlands.

Bos, M.G., Nugteren, J., 1990. On irrigation efficiencies, 4th edition [1st edition 1974] ed. ILRI.

Breiman, L., 2001. Random Forests. *Mach. Learn.* 45, 5-32.

Bustos-Navarrete, C., Filipa, C.S., 2020. Dominance analysis for general, generalized and mixed linear models. R package version 2.0.0.

Cai, X., McKinney, D.C., Rosegrant, M.W., 2001. Sustainability analysis for irrigation water management: concepts, methodology, and application to the Aral Sea region.

Chambers, R., 1988. *Managing canal irrigation : practical analysis from South Asia.* Cambridge University Press, Cambridge [England]; New York.

Chang, D.-H., Islam, S., 2000. Estimation of soil physical properties using remote sensing and artificial neural network. *Remote Sens. Environ.* 74, 534-544.

Compaoré, H., Hendrickx, J.M.H., Hong, S., Friesen, J., van de Giesen, N.C., Rodgers, C., Szarzynski, J., Vlek, P.L.G., 2008. Evaporation mapping at two scales using optical imagery in the White Volta Basin, Upper East Ghana. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C* 33, 127-140.

Cutler, D.R., Edwards Jr., T.C., Beard, K.H., Cutler, A., Hess, K.T., Gibson, J., Lawler, J.J., 2007. Random Forests for Classification in Ecology. *Ecology* 88, 2783-2792.

Dawe, D., 2005. Increasing Water Productivity in Rice-Based Systems in Asia – Past Trends, Current Problems, and Future Prospects. *Plant Production Science* 8, 221-230.

De Bruin, H., Stricker, J., 2000. Evaporation of grass under non-restricted soil moisture conditions. *Hydrological sciences journal* 45, 391-406.

Değirmenci, H., Büyükcangaz, H., Kuşcu, H. 2003. Assessment of irrigation schemes with comparative indicators in the Southeastern Anatolia Project. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 27(5), 293-303.

Değirmenci, H., Tanriverdi, Ç., Arslan, F., Gönen, E. 2017. Benchmarking Performance of Large Scale Irrigation Schemes with Comparative Indicators in Turkey. Scientific Papers, Series E-Land Reclamation, Earth Observations and Surveying, Environmental Engineering, 6, 87-92.

Dembélé, Y., Dakouo, D., Ouedraogo, J., Siambo, E., Traoré, Y., Nishiyama, N., 2006. Creation et diffusion des variétés type NERICA au Burkina Faso, Atelier conjoint pour une riziculture durable en Afrique. JICA (Japanese International Cooperation Agency) and JAICA (Japan Association for International Cooperation in Agriculture and Forestry), Accra, Ghana.

Dembélé, Y., Kambiré, H., Sié, M., 2005. Gestion de l'eau et de l'azote en riziculture irriguée au Burkina Faso. Cahiers Agriculture 14, 569-572.

Dembélé, Y., Ouattara, S., Keïta, A., 2001. Application des indicateurs “approvisionnement relatif en eau” et “productivité de l'eau” à l'analyse des performances des petits périmètres irrigués au Burkina Faso. Irrigation and Drainage 50, 309-321.

Dembélé, Y., Yacouba, H., Keïta, A., Sally, H., 2012. Assessment of irrigation system performance in south-western Burkina Faso. Irrigation and Drainage 61, 306-315.

Dicko, D., 2004. Evaluation des performances sur le périmètre de la Vallée du Kou. Projet APPIA-EIERGEeau, Ouagadougou, Burkina Faso.

Djagba, J.F., Sintondji, L.O., Kouyaté, A.M., Baggie, I., Agbahungba, G., Hamadoun, A., Zwart, S.J., 2018. Predictors determining the potential of inland valleys for rice production development in West Africa. Appl. Geogr. 96, 86-97.

Donovan, C., Wopereis, M.C.S., Guindo, D., Nebié, B., 1999. Soil fertility management in irrigated rice systems in the Sahel and Savanna regions of West Africa: Part II. Profitability and risk analysis. Field Crops Res. 61, 147-162.

Doorenbos, J., Kassam, A.H., 1979. Yield response to water. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome, Italy.

Dossou-Yovo, E.R., Zwart, S.J., Kouyaté, A., Ouédraogo, I., Bakare, O., 2019. Predictors of Drought in Inland Valley Landscapes and Enabling Factors for Rice Farmers' Mitigation Measures in the Sudan-Sahel Zone. *Sustainability* 11, 79.

DRASA-Ouest, 2014. Production saisonnière sur la plaine de la Vallée du Kou de 2008 à 2014. Direction régionale de l'agriculture et de la sécurité alimentaire (DRASA), Ouagadougou, Burkina Faso.

Dugas, W.A., Bland, W.L., 1989. The accuracy of evaporation measurements from small lysimeters. *Agricultural and Forest Meteorology* 46, 119-129.

ESRI, 2010. Arcgis desktop: Release 10, Technical report. Environmental Systems Research Institute (ESRI), Redlands, CA, USA.

ESRI, 2016. Arcgis desktop: Release 10, Technical report. Environmental Systems Research Institute (ESRI), Redlands, CA, USA.

FAO, 1992. Maize in human nutrition. United Nations Food and Agriculture Organization (FAO), Rome, Italy.

FAO, 2003. Unlocking the water potential of agriculture. United Nations Food and Agriculture Organization (FAO), Rome, Italy.

FAO, 2004. Economic valuation of water resources in agriculture. From the sectoral to a functional perspective of natural resource management. FAO, Rome (Italy).

FAO, 2009. How to feed the world in 2050. Issue brief from the High-Level Expert Forum held in Rome, 12-13 October, FAO, Rome, Italy.

FAO, 2011. Climate change, water and food security. FAO, Rome (Italy).

FAO, 2014. Country fact sheet on food and agriculture policy trends - Burkina Faso, April 2014. United Nations Food and Agriculture Organization (FAO), Rome, Italy.

FAO, 2016. Coping with water scarcity: an action framework for agriculture and food security. Food and Agriculture Organization of the United Nations Rome, Italy.

FAO, 2017. Water for Sustainable Food and Agriculture: A report produced for the G20 Presidency of Germany. Food and Agriculture Organization of the United Nations Rome, Italy.

FAO, IHE Delft, 2019. WaPOR quality assessment: technical report on the data quality of the WaPOR FAO database version 1.0. FAO, Rome (Italy).

Farr, T.G., Rosen, P.A., Caro, E., Crippen, R., Duren, R., Hensley, S., Kobrick, M., Paller, M., Rodriguez, E., Roth, L., Seal, D., Shaffer, S., Shimada, J., Umland, J., Werner, M., Oskin, M., Burbank, D., Alsdorf, D., 2007. The Shuttle Radar Topography Mission. *Rev. Geophys.* 45.

Feng, L., 2015. Sensitivity Analysis of Hot/Cold Pixel Selection in SEBAL Model for ET Estimation, *Geography*. Virginia Polytechnic Institute and State University Virginia Tech.

Foley, D.J., Thenkabail, P.S., Anece, I.P., Teluguntla, P.G., Oliphant, A.J., 2020. A meta-analysis of global crop water productivity of three leading world crops (wheat, corn, and rice) in the irrigated areas over three decades. *Int. J. Digit. Earth* 13, 939-975.

Fontanet, M., Fernández-García, D., Ferrer, F., 2018. The value of satellite remote sensing soil moisture data and the DISPATCH algorithm in irrigation fields. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 22, 5889-5900.

Forkuor, G., Hounkpatin, O.K.L., Welp, G., Thiel, M., 2017. High resolution mapping of soil properties using remote sensing variables in south-western Burkina Faso: A comparison of machine learning and multiple linear regression models. *PLOS ONE* 12, e0170478.

Friedman, J.H., 2001. Greedy function approximation: a gradient boosting machine. *Annals of statistics*, 1189-1232.

Gallais, A., 1990. *Théorie de la sélection en amélioration des plantes*. Masson, Paris, France; Milan, Italy; Barcelona, Spain.

- Garces Restrepo, C., 1983. A methodology to evaluate the performance of irrigations systems : application to Philippine National systems.
- Ge, Y., Thomasson, J.A., Sui, R., 2011. Remote sensing of soil properties in precision agriculture: A review. *Front. Earth Sci.* 5, 229-238.
- Gelman, A., Hill, J., 2007. Data analysis using regression and multilevel/hierarchical models. Cambridge University Press, New York, NY, USA.
- Gorantiwar, S.D., Smout, I.K., 2005. Performance assessment of irrigation water management of heterogeneous irrigation schemes: 1. A framework for evaluation. *Irrigation and Drainage Systems* 19, 1-36.
- Guinko, S., 1984. Végétation de Haute Volta. Université de Bordeaux, France.
- Hanjra, M.A., Qureshi, M.E., 2010. Global water crisis and future food security in an era of climate change. *Food Policy* 35, 365-377.
- Hengl, T., Heuvelink, G.B.M., Kempen, B., Leenaars, J.G.B., Walsh, M.G., Shepherd, K.D., Sila, A., MacMillan, R.A., Mendes de Jesus, J., Tamene, L., Tondoh, J.E., 2015. Mapping Soil Properties of Africa at 250 m Resolution: Random Forests Significantly Improve Current Predictions. *PLOS ONE* 10, e0125814.
- Hengl, T., Leenaars, J.G.B., Shepherd, K.D., Walsh, M.G., Heuvelink, G.B.M., Mamo, T., Tilahun, H., Berkhout, E., Cooper, M., Fegraus, E., Wheeler, I., Kwabena, N.A., 2017a. Soil nutrient maps of Sub-Saharan Africa: assessment of soil nutrient content at 250 m spatial resolution using machine learning. *Nut. Cyc. Agroecosys.* 109, 77-102.
- Hengl, T., Mendes de Jesus, J., Heuvelink, G.B.M., Ruiperez Gonzalez, M., Kilibarda, M., Blagotić, A., Shangguan, W., Wright, M.N., Geng, X., Bauer-Marschallinger, B., Guevara, M.A., Vargas, R., MacMillan, R.A., Batjes, N.H., Leenaars, J.G.B., Ribeiro, E., Wheeler, I., Mantel, S., Kempen, B., 2017b. SoilGrids250m: Global gridded soil information based on machine learning. *PLOS ONE* 12, e0169748.

Hessels, T., van Opstal, J., Trambauer, P., Bastiaanssen, W.G.M., Faouzi, M., Mohamed, Y., Er-Raji, A., 2017. pySEBAL version 3.3.7. 2017, p. <https://pypi.org/project/SEBAL/>.

Hiler, E.A., Clark, R.N., 1971. Stress Day Index to Characterize Effects of Water Stress on Crop Yields. *Transactions of the ASAE* 14, 0757-0761.

Hong, H., Xiaoling, G., Hua, Y., 2016. Variable selection using Mean Decrease Accuracy and Mean Decrease Gini based on Random Forest, 2016 7th IEEE International Conference on Software Engineering and Service Science (ICSESS), pp. 219-224.

ICID, 1978. Standards for the calculation of irrigation efficiencies. The Commission, New Delhi.

IPCC, 2014. Climate Change 2014: Impacts, adaptation, and vulnerability. Part A: Global and sectoral aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, and New York, NY, USA.

Jaafar, H.H., Ahmad, F.A., 2020. Time series trends of Landsat-based ET using automated calibration in METRIC and SEBAL: The Bekaa Valley, Lebanon. *Remote Sensing of Environment* 238, 111034.

Jackson, R.D., Idso, S.B., Reginato, R.J., Pinter Jr., P.J., 1981. Canopy temperature as a crop water stress indicator. *Water Resources Research* 17, 1133-1138.

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

Jeong, J.H., Resop, J.P., Mueller, N.D., Fleisher, D.H., Yun, K., Butler, E.E., Timlin, D.J., Shim, K.-M., Gerber, J.S., Reddy, V.R., Kim, S.-H., 2016. Random Forests for Global and Regional Crop Yield Predictions. *PLOS ONE* 11, e0156571.

Jing, M., Wu, J., 2013. Fast image interpolation using directional inverse distance weighting for real-time applications. *Optics Communications* 286, 111-116.

Kambou, D., Degre, A., Xanthoulis, D., Ouattara, K., Destain, J.P., Defoy, S., De L'escaille, D., 2019. Evaluation and Proposals for Improving Irrigation Performance Around Small Reservoirs in Burkina Faso. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 145, 05019004.

Kang, M.S., 1997. Using genotype-by-environment interaction for crop cultivar development, in: Sparks, D.L. (Ed.), *Advances in Agronomy*. Academic Press, pp. 199-252.

Karaca, S., Gülser, F., Selçuk, R., 2018. Relationships between soil properties, topography and land use in the Van Lake Basin, Turkey. *Eurasian Journal of Soil Science* 7, 115-120.

Karci, A. P., and Yusuf, Uçar. 2019. Use of Remote Sensing and Geographic Information Systems in Irrigation Performance: A Case Study of Atabey Irrigation Scheme. *Türk Tarım ve Doğa Bilimleri Dergisi*, 6(4), 624-635.

Kharrou, M.H., Le Page, M., Chehbouni, A., Simonneaux, V., Er-Raki, S., Jarlan, L., Ouzine, L., Khabba, S., Chehbouni, G., 2013. Assessment of Equity and Adequacy of Water Delivery in Irrigation Systems Using Remote Sensing-Based Indicators in Semi-Arid Region, Morocco. *Water Resources Management* 27, 4697-4714.

Kijne, J.W., 2003. *Unlocking the water potential of agriculture*. FAO Land and Water Development division, Rome, Italy.

Kijne, J.W., Barker, R., Molden, D., 2003. Improving water productivity in agriculture: Editors' overview, in: Kijne, J.W., Barker, R., Molden, D. (Eds.), *Water productivity in agriculture: limits and opportunities for improvement*. CABI and International Water Management Institute (IWMI), Wallingford, UK, and Colombo, Sri Lanka.

Kouadio, L., Deo, R.C., Byrareddy, V., Adamowski, J.F., Mushtaq, S., Nguyen, V.P., 2018. Artificial intelligence approach for the prediction of Robusta coffee yield using soil fertility properties. *Comp. Electron. Agr.* 155, 324-338.

Kuhn, M., Wing, J., Weston, S., Williams, A., Keefer, C., Engelhardt, A., Cooper, T., Mayer, Z., Kenkel, B., Team, R.C., 2020. Package 'caret'. *The R Journal*.

- Laborte, A.G., Maunahan, A.A., Hijmans, R.J., 2012. Opportunities for expanding paddy rice production in Laos: spatial predictive modeling using Random Forest. *J. Land Use Sci.* 7, 21-33.
- Laird, N.M., Ware, J.H., 1982. Random-effects models for longitudinal data. *Biometrics* 38, 963-974.
- Lang, J., 2001. Notes of a potato watcher. Texas A&M University Press, College Station, Texas, USA.
- Latif, M., 2007. Spatial productivity along a canal irrigation system in Pakistan. *Irrig. Drain.* 56, 509-521.
- Leenaars, J., 2012. Africa Soil Profiles Database, version 1.0: a compilation of georeferenced and standardised legacy soil profile data for Sub-Saharan Africa (with dataset). Technical report, ISRIC — World Soil Information.
- Leenaars, J., Van Oostrum, A., Ruiperez Gonzalez, M., 2014. Africa soil profiles database version 1.2. A compilation of georeferenced and standardized legacy soil profile data for Sub-Saharan Africa (with dataset). Wageningen: ISRIC Report 2014/01; 2014. ISRIC–World Soil Information Wageningen, the Netherlands.
- Lenton, R.L., 1984. note on monitoring productivity and equity in irrigation systems. *Productivity and equity in irrigation systems*/edited by Niranjana Pant.
- Levine, G., 1982. Relative water supply: An explanatory variable for irrigation systems. Technical Report No. 6. Cornell University.
- Liaw, A., Wiener, M., 2002. Classification and regression by randomForest. *R news* 2, 18-22.
- Liaw, A., Wiener, M., 2018. Package ‘Randomforest’. R Version 4.6-14. R Dev. Core Team.
- Lu, G.Y., Wong, D.W., 2008. An adaptive inverse-distance weighting spatial interpolation technique. *Computers & Geosciences* 34, 1044-1055.

- Luo, W., Azen, R., 2013. Determining predictor importance in hierarchical linear models using dominance analysis. *J. Educ. Behav. Stat.* 38, 3-31.
- MAHRH, 2006. Politique nationale de développement durable de l'agriculture irriguée: Stratégie, plan d'action, plan d'investissement à l'horizon 2015. Rapport principal. Ministère de l'Agriculture de l'Hydraulique et des Ressources Halieutiques (MAHRH), Ouagadougou, Burkina Faso.
- Makin, I.W., Goldsmith, H., Skutsch, J.C., 1991. Ongoing performance assessment — a case study of Kraseio Project, Thailand. *Irrigation and Drainage Systems* 5, 31-42.
- Mancosu, N., Snyder, R.L., Kyriakakis, G., Spano, D., 2015. Water Scarcity and Future Challenges for Food Production. *Water* 7, 975-992.
- MASA, 2014. Catalogue national des espèces et variétés agricoles du Burkina Faso. Première édition Comité National des Semences. Ministère de l'Agriculture et de la Sécurité Alimentaire (MASA), Ouagadougou, Burkina Faso.
- McCree, K.J., 1972. The action spectrum, absorptance and quantum yield of photosynthesis in crop plants. *Agricultural Meteorology* 9, 191-216.
- Mellor, A., Haywood, A., Stone, C., Jones, S., 2013. The performance of random forests in an operational setting for large area sclerophyll forest classification. *Remote Sens.* 5, 2838-2856.
- Menenti, M., Visser, T., Morabito, J.A., 1989. Appraisal of irrigation performance with satellite data and georeferenced information. *Irrigation : theory and practice : proceedings of the international conference held at the University of Southampton 12 - 15 September, 1989.*, 785-801.
- Merriam, J.L., Shearer, M.N., Burt, C.M., 1983. Evaluating Irrigation Systems and Practices. in *Design and Operation of Farm Irrigation Systems*, in: Jensen, M.E. (Ed.), Monograph No. 3. American Society of Agricultural Engineers.
- Misra, A.K., 2014. Climate change and challenges of water and food security. *International Journal of Sustainable Built Environment* 3, 153-165.

Mkhwanazi, M.M., Chávez, J.L., 2013. Mapping evapotranspiration with the remote sensing ET algorithms METRIC and SEBAL under advective and non-advective conditions: accuracy determination with weighing lysimeters., Hydrology Days., Colorado State University.

Mohamed, E.S., Ali, A., El-Shirbeny, M., Abutaleb, K., Shaddad, S.M., 2019. Mapping soil moisture and their correlation with crop pattern using remotely sensed data in arid region. *Egypt. J. Remote Sens. Space Sci.*

Molden, D., 1997. Accounting for water use and productivity. International Water Management Institute, Colombo, Sri Lanka.

Molden, D., Sakthivadivel, R., 1999. Water Accounting to Assess Use and Productivity of Water. *International Journal of Water Resources Development* 15, 55-71.

Molden, D.J., Gates, T.K., 1990. Performance Measures for Evaluation of Irrigation-Water-Delivery Systems. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 116, 804-823.

Molden, D.J., Sakthivadivel, R., Perry, C.J., De Fraiture, C., 1998. Indicators for comparing performance of irrigated agricultural systems. IWMI, Colombo, Sri Lanka.

Monteith, J., 1972. Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. *Journal of applied ecology* 9, 747-766.

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

Murray-Rust, D.H., Snellen, W.B., 1993. Irrigation system performance assessment and diagnosis. IIMI, Colombo (Sri Lanka).

Musick, J.T., Jones, O.R., Stewart, B.A., Dusek, D.A., 1994. Water-yield relationships for irrigated and dryland wheat in the US Southern Plains. *Agronomy Journal* 86, 980-986.

- Nagler, P.L., Glenn, E.P., Nguyen, U., Scott, R.L., Doody, T., 2013. Estimating Riparian and Agricultural Actual Evapotranspiration by Reference Evapotranspiration and MODIS Enhanced Vegetation Index. *Remote Sensing* 5, 3849-3871.
- Nakagawa, S., Schielzeth, H., 2013. A general and simple method for obtaining R² from generalized linear mixed-effects models. *Meth. Ecol. Evolut.* 4, 133-142.
- Nangia, V., Turrall, H., Molden, D., 2008. Increasing water productivity with improved N fertilizer management. *Irrigation and Drainage Systems* 22, 193-207.
- Nishikawa, T., Li, K., Inamura, T., 2014. Nitrogen uptake by the rice plant and changes in the soil chemical properties in the paddy rice field during yearly application of anaerobically-digested manure for seven years. *Plant Prod. Sci.* 17, 237-244.
- Nitcheu, M., Midékor, A., Sawadogo, B., 2014. Restitution des travaux de suivi de la campagne saison sèche 2014 sur le périmètre rizicole de la vallée du Kou. AEDE/OE, Bobo-Dioulasso, Burkina Faso.
- OECD, 2012. OECD environmental outlook to 2050, OECD Publishing. OECD, Paris, p. 1 online resource (353 p.).
- Opoku-Duah, S., Donoghue, N.M.D., Burt, P.T., 2008. Intercomparison of evapotranspiration over the savannah Volta Basin in West Africa using remote sensing data. *Sensors* 8.
- Ouédraogo, S., 1993. Analyse économique de l'allocation des facteurs de production dans les exploitations rizicoles de la Vallée du Kou. CNRST/INERA, Ouagadougou, Burkina Faso.
- Peng, H., Lu, Y., 2012. Model selection in linear mixed effect models. *J. Multivariate Anal.* 109, 109-129.
- Penman, H.L., 1948. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences* 193, 120-145.

- Perry, C., Steduto, P., Allen, R.G., Burt, C.M., 2009. Increasing productivity in irrigated agriculture: Agronomic constraints and hydrological realities. *Agricultural Water Management* 96, 1517-1524.
- Perry, C.J., 1996. Quantification and measurement of a minimum set of indicators of the performance of irrigation systems. International Irrigation Management Institute, Colombo.
- Perry, C.J., 1999. The IWMI water resources paradigm – definitions and implications. *Agricultural Water Management* 40, 45-50.
- Pinheiro, J., Bates, D., DebRoy, S., Sarkar, D., R Core Team, 2020. nlme: Linear and Nonlinear Mixed Effects Models. R package version 3.1-147. <https://CRAN.R-project.org/package=nlme>.
- Poussin, J.C., Renaudin, L., Adogoba, D., Sanon, A., Tazen, F., Dogbe, W., Fusillier, J.L., Barbier, B., Cecchi, P., 2015. Performance of small reservoir irrigated schemes in the Upper Volta basin: Case studies in Burkina Faso and Ghana. *Water Resources and Rural Development* 6, 50-65.
- Prasad, A.M., Iverson, L.R., Liaw, A., 2006. Newer classification and regression tree techniques: Bagging and random forests for ecological prediction. *Ecosystems* 9, 181-199.
- R Core Team, 2020. R: A language and environment for statistical computing. Vienna, Austria.
- Renault, D., Vehmeyer, P.W., 1999. On reliability in irrigation service preliminary concepts and application. *Irrigation and Drainage Systems* 13, 77-105.
- Renault, D., Wallender, W., 2000. Nutritional water productivity and diets. *Agricultural water management* 45, 275-296.
- Roerink, G.J., Bastiaanssen, W.G.M., Chambouleyron, J., Menenti, M., 1997. Relating crop water consumption to irrigation water supply by remote sensing. *Water Resources Management* 11, 445-465.

- Roerink, G.J., Su, Z., Menenti, M., 2000. S-SEBI: A simple remote sensing algorithm to estimate the surface energy balance. *Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere* 25, 147-157.
- Santos, A.B.d., Fageria, N.K., Stone, L.F., Santos, T.P.B., 2016. Effect of irrigation and nitrogen fertilization on the agronomic traits and yield of irrigated rice. *Revista Ceres* 63, 724-731.
- Savva, A.P., Frenken, K., 2002. Monitoring the Technical and Financial Performance of an Irrigation Scheme. *Irrigation Manual Module* 14, 58.
- Sawadogo, A., Kouadio, L., Traoré, F., Zwart, S.J., Hessels, T., Gündoğdu, K.S., 2020. Spatiotemporal assessment of irrigation performance of the Kou Valley irrigation scheme in Burkina Faso using satellite remote sensing-derived indicators. *ISPRS Int. J. Geo-Inf.* 9, 484.
- Seguin, B., Itier, B., 1983. Using midday surface temperature to estimate daily evaporation from satellite thermal IR data. *International Journal of Remote Sensing* 4, 371-383.
- Seibert, J., Stendahl, J., Sørensen, R., 2007. Topographical influences on soil properties in boreal forests. *Geoderma* 141, 139-148.
- Sellers, P.J., Randall, D.A., Collatz, G.J., Berry, J.A., Field, C.B., Dazlich, D.A., Zhang, C., Collelo, G.D., Bounoua, L., 1996. A Revised Land Surface Parameterization (SiB2) for Atmospheric GCMS. Part I: Model Formulation. *Journal of Climate* 9, 676-705.
- Senay, G.B., Bohms, S., Singh, R.K., Gowda, P.H., Velpuri, N.M., Alemu, H., Verdin, J.P., 2013. Operational Evapotranspiration Mapping Using Remote Sensing and Weather Datasets: A New Parameterization for the SSEB Approach. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association* 49, 577-591.
- Sheffield, K., Morse-McNabb, E., 2015. Using satellite imagery to assess trends in soil and crop productivity across landscapes. *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.* 25, 012013.

- Shi, J., Yang, L., Zhu, A.-X., Qin, C., Liang, P., Zeng, C., Pei, T., 2018. Machine-Learning Variables at Different Scales vs. Knowledge-based Variables for Mapping Multiple Soil Properties. *Soil Science Society of America Journal* 82, 645-656.
- Singh, R.K., 2009. Geospatial Approach for Estimating Land Surface Evapotranspiration, *Agricultural and Biological Systems Engineering*. University of Nebraska - Lincoln, usa.
- Singh, R.K., Irmak, A., Irmak, S., Martin, D.L., 2008. Application of SEBAL Model for Mapping Evapotranspiration and Estimating Surface Energy Fluxes in South-Central Nebraska. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 134, 273-285.
- Singh, R.K., Liu, S., Tieszen, L.L., Suyker, A.E., Verma, S.B., 2012. Estimating seasonal evapotranspiration from temporal satellite images. *Irrigation Science* 30, 303-313.
- Skinner, R.H., 2013. Nitrogen fertilization effects on pasture photosynthesis, respiration, and ecosystem carbon content. *Agr. Ecosys. Environ.* 172, 35-41.
- Small, L.E., Svendsen, M., 1992. A framework for assessing irrigation performance. IFPRI working papers on irrigation performance 1, Washington, DC, USA.
- Smith, L.E.D., 1990. An economist's perspective on irrigation performance assessment: With examples from large scale irrigation in Morocco. *Irrigation and Drainage Systems* 4, 329-343.
- Steduto, P., Hsiao, C.T., Fereres, E., Raes, D., 2012. Crop yield response to water. United Nations Food and Agriculture Organization (FAO), Rome, Italy.
- Storey, J., Scaramuzza, P., Schmidt, G., 2005. Landsat 7 scan line corrector-off gap filled product development, PECORA 16 Conference Proceedings, Sioux Falls, South Dakota, USA.
- Stoyanova, A., Stoyanova, D., 2019. Study on the Productivity of Irrigation Water at Maize (*Zea Mays*). *Acta Scientific Agriculture* 3, 51-55.

- Su, Z., 2002. The Surface Energy Balance System (SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 6, 85-100.
- Taghvaeian, S., U., N.C.M., Osterberg, J.C., Sritharan, S.I., Watts, D.R., 2018. Remote sensing and gis techniques for assessing irrigation performance: Case study in Southern California. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 144, 05018002.
- Thiruvengadachari, S., Sakthivadivel, R., 1997. Satellite remote sensing for assessment of irrigation system performance: A case study in India. IWMI.
- Thornthwaite, C.W., 1948. An Approach toward a Rational Classification of Climate. *Geographical Review* 38, 55-94.
- Tolk, J.A., Evett, S.R., Howell, T.A., 2006. Advection influences on evapotranspiration of alfalfa in a semiarid climate. *Agronomy journal* 98, 1646-1654.
- Traoré, F., 2012. Optimisation de l'utilisation des ressources en eau du bassin du Kou pour des usages agricoles. Université de Liège, Liège, Belgium.
- Traoré, F., Bonkougou, J., Compaoré, J., Kouadio, L., Wellens, J., Hallot, E., Tychon, B., 2019. Using multi-temporal landsat images and support vector machine to assess the changes in agricultural irrigated areas in the Mogtedo region, Burkina Faso. *Remote Sensing* 11, 1442.
- Traoré, F., Cornet, Y., Denis, A., Wellens, J., Tychon, B., 2013. Monitoring the evolution of irrigated areas with Landsat images using backward and forward change detection analysis in the Kou watershed, Burkina Faso. *Geocarto International* 28, 733-752.
- Trezza, R., Allen, R.G., Kilic, A., Ratcliffe, I., Tasumi, M., 2018. Influence of Landsat revisit frequency on time-integration of evapotranspiration for agricultural water management, in: Bucur, D. (Ed.), *Advanced Evapotranspiration Methods and Applications*. IntechOpen, London, United Kingdom.
- Turner, K., Georgiou, S., Clark, R., Brouwer, R., Burke, J., 2004. Economic valuation of water resources in agriculture. From the sectoral to a functional perspective of natural

resource management. United Nations Food and Agriculture Organization (FAO), Rome, Italy.

Ucar, Y., Senyigit, U., Kadayifci, A., Tuylu, G. I. 2010. Evaluation of water use efficiency at parcel and scheme levels: A case study of Sarkikaraagac irrigation scheme in Turkey. *Journal of Food, Agriculture & Environment*, 8(2), 1046-1053.

UN-Water, 2012. *The United Nations World Water Development Report 4: Managing Water under Uncertainty and Risk*. World Water Assessment Programme (WWAP). Unesco, Paris, France. .

UN-Water, 2018. *The United Nations World Water Development Report 2018: Nature-Based Solutions for Water*. Paris, UNESCO.

United Nations, 2014. *World urbanization prospects: The 2014 revision - highlights*. United Nations (UN), New York, NY, USA.

Unkovich, M., Baldock, J., Forbes, M., 2010. Chapter 5 - Variability in Harvest Index of Grain Crops and Potential Significance for Carbon Accounting: Examples from Australian Agriculture, *Advances in Agronomy*. Academic Press, pp. 173-219.

Ünlü, M., Kanber, R., Kapur, B., 2010. Comparison of soybean evapotranspirations measured by weighing lysimeter and Bowen ratio-energy balance methods. *African Journal of Biotechnology* 9, 4700-4713.

Van Dam, J.C., Singh, R., Bessembinder, J.J.E., Leffelaar, P.A., Bastiaanssen, W.G.M., Jhorar, R.K., Kroes, J.G., Droogers, P., 2006. Assessing options to increase water productivity in irrigated river basins using remote sensing and modelling tools. *Int. J. Water Res. Dev.* 22, 115-133.

Viets, F.G., 1962. Fertilizers and the efficient use of water, in: Norman, A.G. (Ed.), *Advances in Agronomy*. Academic Press, pp. 223-264.

Waller, P., Yitayew, M., 2016. Introduction, in: Waller, P., Yitayew, M. (Eds.), *Irrigation and Drainage Engineering*. Springer International Publishing, Cham, Switzerland, pp. 1-18.

- Wellens, J., Diallo, M., Compaore, N.F., Derouane, J., Tychon, B., 2007. Renforcement structurel de la capacité de gestion des ressources en eau pour l'agriculture dans le bassin du Kou. Rapport Technique 1 (2005-2006). APEFE-WBI, Bobo-Dioulasso, Burkina Faso.
- Wellens, J., Nitcheu, M., Traore, F., Tychon, B., 2013. A public-private partnership experience in the management of an irrigation scheme using decision-support tools in Burkina Faso. *Agricultural Water Management* 116, 1-11.
- Wilson, T.G., Kustas, W.P., Alfieri, J.G., Anderson, M.C., Gao, F., Prueger, J.H., McKee, L.G., Alsina, M.M., Sanchez, L.A., Alstad, K.P., 2020. Relationships between soil water content, evapotranspiration, and irrigation measurements in a California drip-irrigated Pinot noir vineyard. *Agricultural Water Management* 237, 106186.
- Yameogo, P., Segde, Z., Dakouo, D., Sedogo, M., 2013. Placement profond de l'urée (PPU) et amélioration de l'efficacité d'utilisation de l'azote en riziculture irriguée dans le périmètre rizicole de Karfiguela au Burkina Faso. *J. Appl. Biosci.* 70, 5523-5530.
- Yameogo, S., Kienou, A., 2013. Analysis of public expenditures in support of food and agriculture development in Burkina Faso, 2006-2010. MAFAP and FAO, Rome, Italy.
- Yu, T.R., 1991. Characteristics of soil acidity of paddy soils in relation to rice growth, in: Wright, R.J., Baligar, V.C., Murrmann, R.P. (Eds.), *Plant-Soil Interactions at Low pH: Proceedings of the Second International Symposium on Plant-Soil Interactions at Low pH*, 24-29 June 1990, Beckley West Virginia, USA. Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 107-112.
- Yuzugullu, O., Lorenz, F., Fröhlich, P., Liebisch, F., 2020. Understanding fields by remote sensing: Soil zoning and property mapping. *Remote Sens.* 12, 1116.
- Zhang, L., Heerink, N., Dries, L., Shi, X., 2013. Water users associations and irrigation water productivity in northern China. *Ecol. Econ.* 95, 128-136.
- Zwart, S.J., 2013. 21 Assessing and Improving Water Productivity of Irrigated Rice Systems in Africa. *Realizing Africa's rice promise*, 265.

Zwart, S.J., Bastiaanssen, W.G.M., 2004. Review of measured crop water productivity values for irrigated wheat, rice, cotton and maize. *Agricultural Water Management* 69, 115-133.

Zwart, S.J., Bastiaanssen, W.G.M., 2007. SEBAL for detecting spatial variation of water productivity and scope for improvement in eight irrigated wheat systems. *Agricultural Water Management* 89, 287-296.

Zwart, S.J., Leclert, L.M.C., 2010. A remote sensing-based irrigation performance assessment: a case study of the Office du Niger in Mali. *Irrigation Science* 28, 371-385.

EKLER

Şekil Ek 1: Kou havzası: Su kaynakları ve kullanıcıları

Şekil Ek 2. 2013 ve 2014 yıllarında Ocak-Nisan boyunca Kou vadisinde sezonluk ETa'nın konumsal dağılımı (FAO-WaPOR 250-m konumsal çözünürlük)

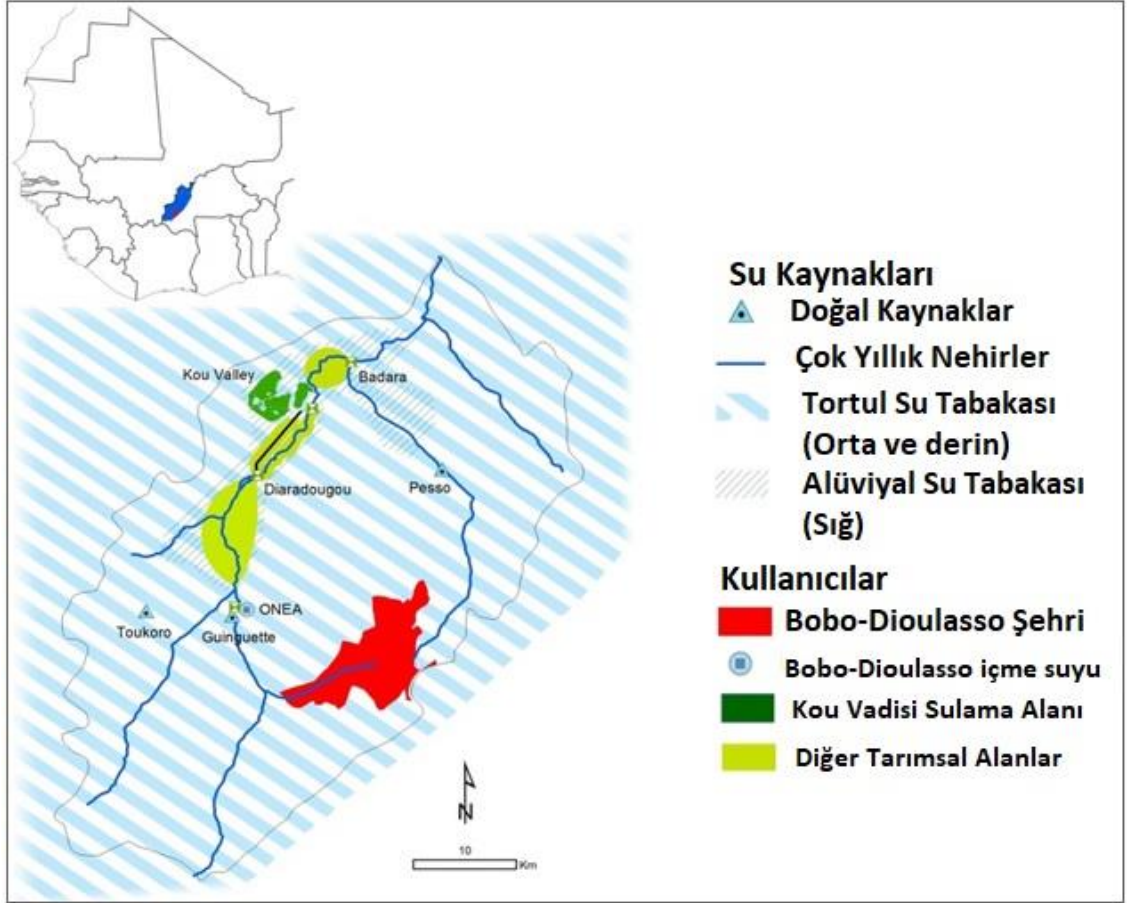
Şekil Ek 3. Kou Vadisi sulama alanında 2014 ekim sezonunda farklı çeltik fenolojik aşamaları gözlenmiştir, Solda: Şubat 2014 görüntüsü, sağda: Mayıs 2014 görüntüsü (Fotoğraf Alidou Sawadogo tarafından çekilmiştir)

Şekil Ek 4. 2013 ve 2014 yıllarındaki kurak mevsim üretim dönemlerinde Kou Valley sulama alanındaki çeltik arazileri

Şekil Ek 5. Kou vadisi sulama alanında kullanılan potansiyel belirleyicilerin konumsal dağılımı, Kısaltmalar: Elv: arazi kotu; D_{PSI}: havza su alma noktası ile parsel uzaklığı; DtB: anakaya derinliği; Ca: ekstrakte edilebilir kalsiyum; Fe: ekstrakte edilebilir demir; K: ekstrakte edilebilir potasyum; N: toplam azot; pH: hidrojen potansiyeli; Zn: ekstrakte edilebilir çinko; BLD: hacim ağırlığı; SL: silt içeriği; SN: kum içeriği

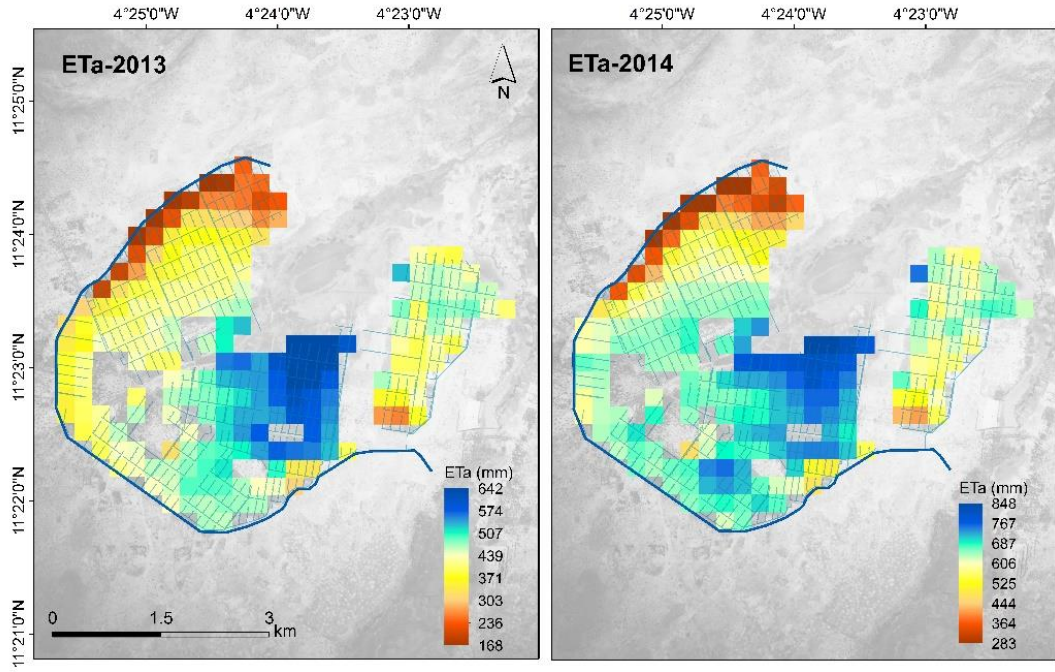
Şekil Ek 6. Çalışmada kullanılan potansiyel belirleyiciler arasında eşleştirilmiş korelasyon, Kısaltmalar: Elv: arazi kotu; D_{PSI}: havza su alma noktası ile parsel uzaklığı; DtB: anakaya derinliği; Ca: ekstrakte edilebilir kalsiyum; Fe: ekstrakte edilebilir demir; K: ekstrakte edilebilir potasyum; N: toplam azot; pH: hidrojen potansiyeli; Zn: ekstrakte edilebilir çinko; BLD: hacim ağırlığı; SL: silt içeriği; SN: kum içeriği

EK 1



Şekil Ek 1: Kou havzası: Su kaynakları ve kullanıcıları.

EK 2



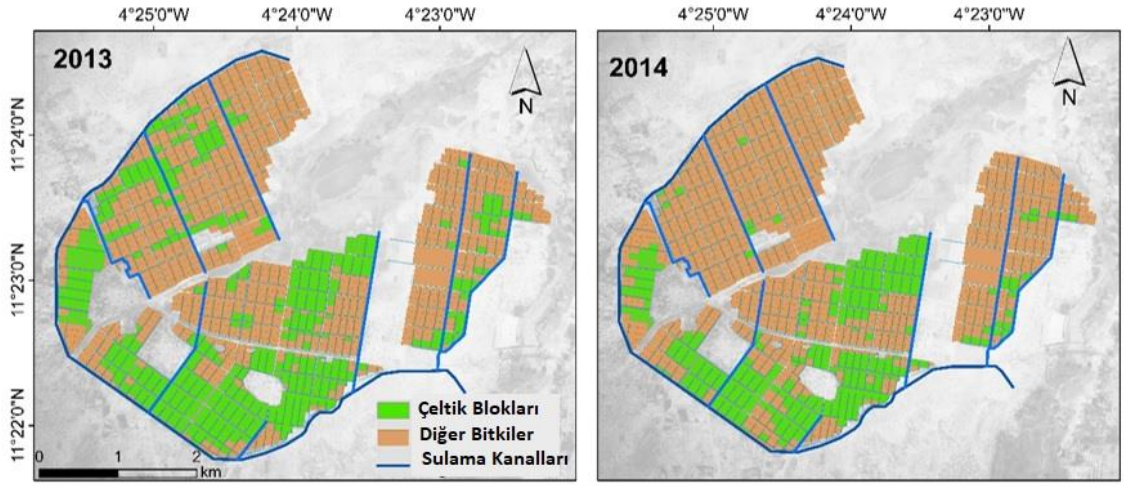
Şekil Ek 2. 2013 ve 2014 yıllarında Ocak-Nisan boyunca Kou vadisinde sezonluk ETa'nın konumsal dağılımı (FAO-WaPOR 250-m konumsal çözünürlük).

EK 3



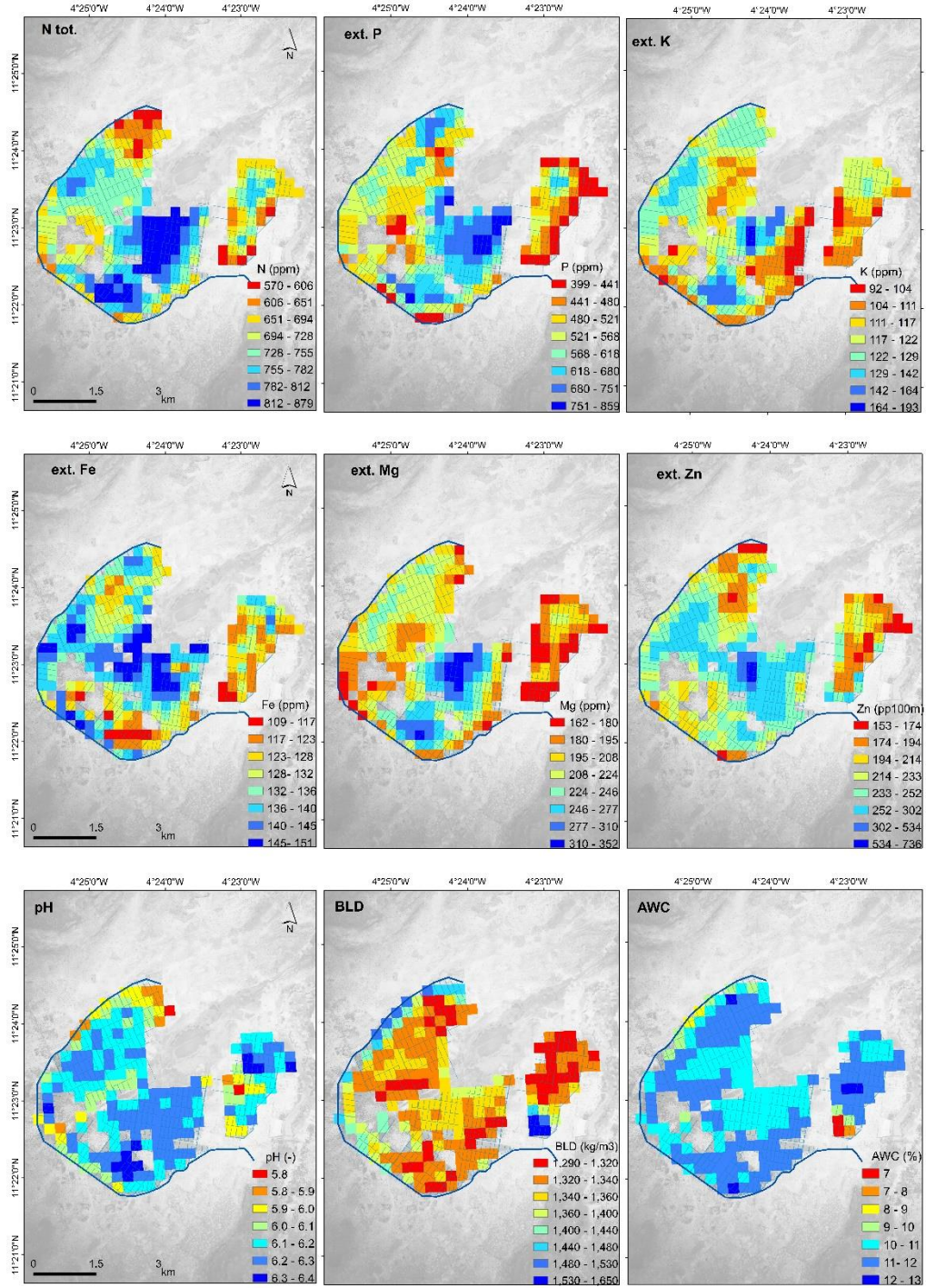
Şekil Ek 3. Kou Vadisi sulama alanında 2014 ekim sezonunda farklı çeltik fenolojik aşamaları gözlenmiştir, Solda: Şubat 2014 görüntüsü, sağda: Mayıs 2014 görüntüsü (Fotoğraf Alidou Sawadogo tarafından çekilmiştir).

EK 4

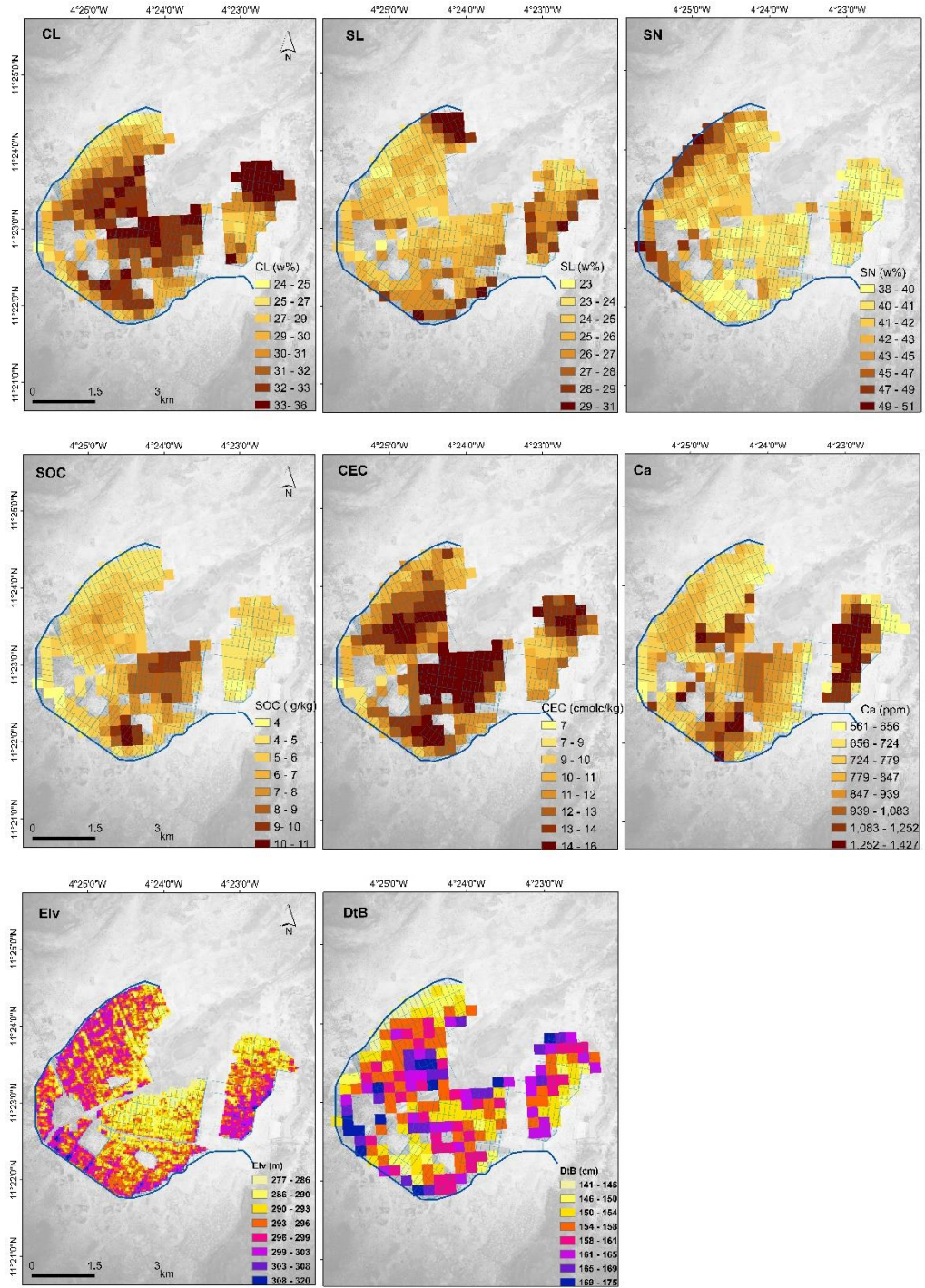


Şekil Ek 4. 2013 ve 2014 yıllarındaki kurak mevsim üretim dönemlerinde Kou Valley sulama alanındaki çeltik arazileri.

EK 5

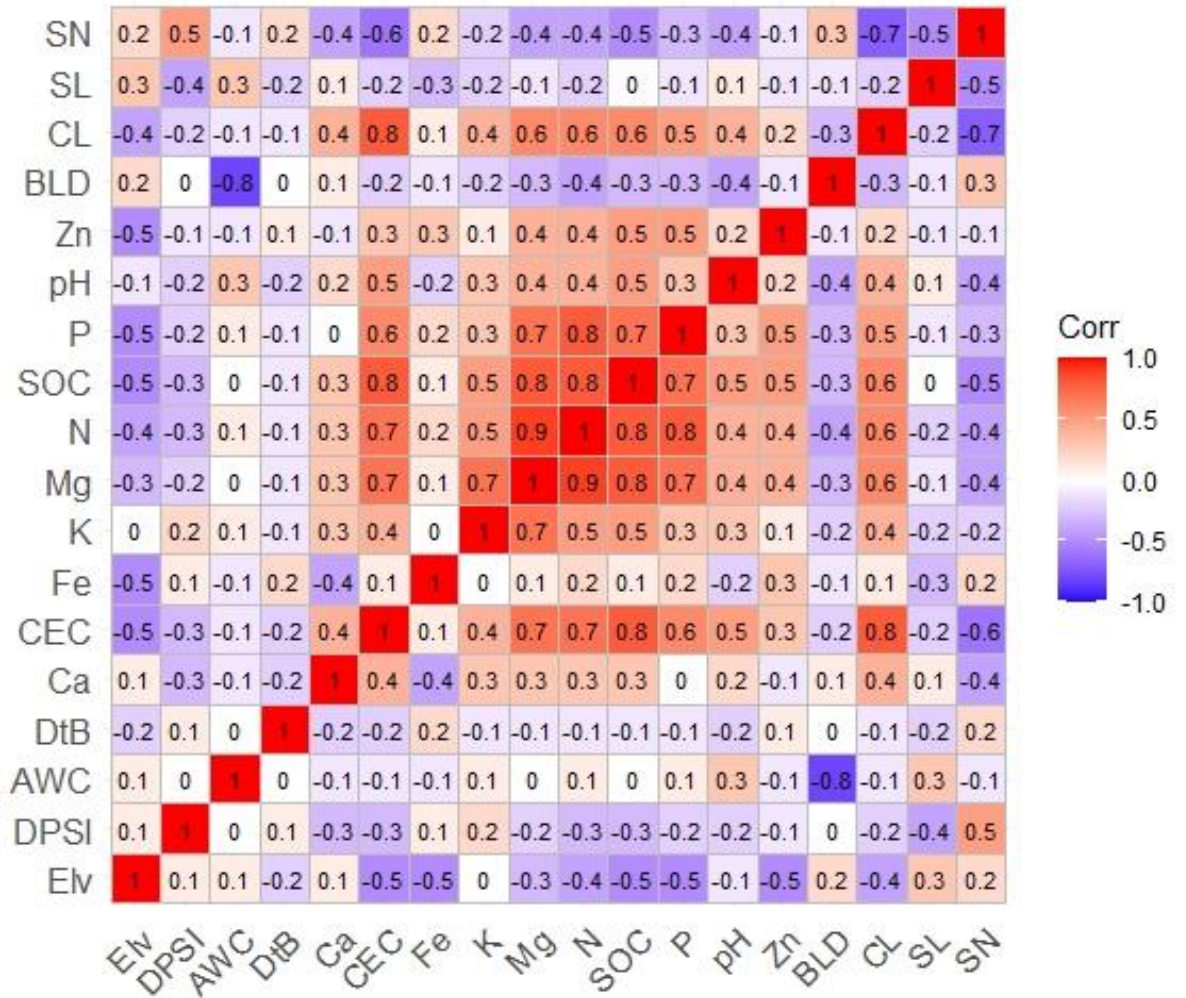


Şekil Ek 5. Kou vadisi sulama alanında kullanılan potansiyel belirleyicilerin konumsal dağılımı, Kısaltmalar: Elv: arazi kotu; D_{PSI} : havza su alma noktası ile parsel uzaklığı; DtB: anakaya derinliği; Ca: ekstrakte edilebilir kalsiyum; Fe: ekstrakte edilebilir demir; K: ekstrakte edilebilir potasyum; N: toplam azot; pH: hidrojen potansiyeli; Zn: ekstrakte edilebilir çinko; BLD: hacim ağırlığı; SL: silt içeriği; SN: kum içeriği.



Şekil Ek 5. Kou vadisi sulama alanında kullanılan potansiyel belirleyicilerin konumsal dağılımı (devam).

EK 6



Şekil Ek 6. Çalışmada kullanılan potansiyel belirleyiciler arasında eşleştirilmiş korelasyon, Kısaltmalar: Elv: arazi kotu; DPSI: havza su alma noktası ile parsel uzaklığı; DtB: anakaya derinliği; Ca: ekstrakte edilebilir kalsiyum; Fe: ekstrakte edilebilir demir; K: ekstrakte edilebilir potasyum; N: toplam azot; pH: hidrojen potansiyeli; Zn: ekstrakte edilebilir çinko; BLD: hacim ağırlığı; SL: silt içeriği; SN: kum içeriği.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Alidou SAWADOGO
Doğum Yeri ve Tarihi : Burkina Faso/1982
Yabancı Dil : İngilizce, Türkçe, ve Fransızca

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Yüksek Lisans (1) : Nazi Boni Üniversitesi (Eski Bobo-Dioulasso Politeknik Üniversitesi),
Kırsal Geliştirme Enstitüsü,
Ziraat Mühendisliği, 2009.

Yüksek Lisans (2) : Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de L'Environnement (2iE).
Hidrolik ve Sulama Sistemleri Yönetimi, 2014.

Doktora : Bursa Uludağ Üniversitesi,
Fen Bilimleri Enstitüsü,
Biyosistem Mühendisliği, 2021

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl: Institut de l'Environnement et de Recherches Agricoles (INERA)-Burkina Faso 2008-2010.

Ministère de l'Agriculture et des Aménagements Hydro-agricoles-Burkina Faso-2010-2015.

İletişim (e-posta): sawadogoalidou@yahoo.fr

Yayınları:

Kouadio, L., Byrareddy, V.M., Sawadogo, A., Newlands, N.K., 2021. Probabilistic yield forecasting of robusta coffee at the farm scale using agroclimatic and remote sensing derived indices. *Agricultural and Forest Meteorology* 306, 108449. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2021.108449>.

Sawadogo, A., Kouadio, L., Traoré, F., Zwart, S.J., Hessels, T., Gündoğdu, K.S., 2020. Spatiotemporal Assessment of Irrigation Performance of the Kou Valley Irrigation Scheme in Burkina Faso Using Satellite Remote Sensing-Derived Indicators. *ISPRS International Journal of Geo-Information* 9, 484. Special Issue Observation-Driven Understanding, Prediction, and Management in Hydrological/Hydraulic Hazard and Risk Studies. <https://doi.org/10.3390/ijgi9080484>.

Sawadogo, A., Hessels, T., Gündoğdu, K.S., Demir, A.O., Mustafa, Ü., Zwart, S.J., 2020. Comparative Analysis of the Pysebal Model and Lysimeter for Estimating Actual Evapotranspiration of Soybean Crop in Adana, Turkey. *International Journal of Engineering and Geosciences* 5, 60-65. <https://doi.org/10.26833/ijeg.573503>.

Sawadogo, A., Gündoğdu, K. S., Traoré, F., Kouadio, L., and Hessels, T. 2020. Estimating in-season actual evapotranspiration over a large-scale irrigation scheme in resource-limited conditions. *Comptes rendus de l'Académie Bulgare des Sciences* 73, No10, pp.1473.<http://doi.org/10.7546/crabs.2020.10.18>.

Sawadogo, A 2015 : Diagnostic et Analyse du Fonctionnement d'un Périmètre Irrigué: Cas du Périmètre Rizicole de la Vallée du Kou. Éditions universitaires européennes ISBN: 978-3-639-48166-2.

Sawadogo, A 2012: Évaluation de la Production du Niébé en Condition de Stress Hydrique: Phénotypage et Sélection Variétale du Niébé pour la Résistance à la Sécheresse. Éditions universitaires européennes ISBN: 978-613-1-54988-5

Drabo, I., and Sawadogo, A. 2009. Selection of Drought-tolerant Cowpea Lines Under Several Environments in Burkina Faso in CGIAR Generation Challenge Programme, 2009. 2009 Annual Research Meeting poster abstracts. Texcoco, Mexico: Generation Challenge Programme.