T.C.
BATMAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

HAVZA ÖLÇEĞİNDE TARIMSAL SU KULLANIMININ HİDROLOJİK MODEL TABANLI SU AYAK İZİ METODU İLE TESPİT ve OPTİMİZE EDİLMESİ

Muhammed Sungur DEMİR

Mayıs-2024
BATMAN

T.C.
BATMAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

HAVZA ÖLÇEĞİNDE TARIMSAL SU KULLANIMININ HİDROLOJİK MODEL TABANLI SU AYAK İZİ METODU İLE TESPİT ve OPTİMİZE EDİLMESİ

Muhammed Sungur DEMİR

Danışman
Doç. Dr. Abdullah MURATOĞLU

Mayıs-2024
BATMAN

TEZ KABUL VE ONAYI

Muhammed Sungur DEMİR tarafından hazırlanan "HAVZA ÖLÇEĞİNDE TARIMSAL SU KULLANIMININ HİDROLOJİK MODEL TABANLI SU AYAK İZİ METODU İLE TESPİT ve OPTİMİZE EDİLMESİ" adlı tez çalışması 13/05/2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri **İmza**

Başkan
Prof. Dr. Mehmet İshak YÜCE

Danışman
Doç. Dr. Abdullah MURATOĞLU

Üye
Prof. Dr. İlker ANGIN

Üye
Doç. Dr. Emrullah ACAR

Üye
Dr. Öğr. Üyesi İbrahim Halil DEMİREL

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Dr. Öğr. Üyesi Ömer Murat ÖTER
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Muhammed Sungur DEMİR

Tarih: 13/05/2024

ÖZET

DOKTORA TEZİ

HAVZA ÖLÇEĞİNDE TARIMSAL SU KULLANIMININ HİDROLOJİK MODEL TABANLI SU AYAK İZİ METODU İLE TESPİT VE OPTİMİZE EDİLMESİ

Muhammed Sungur DEMİR

Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Abdullah MURATOĞLU

2024, 174 Sayfa

Jüri
Doç. Dr. Abdullah MURATOĞLU
Prof. Dr. Mehmet İshak YÜCE
Prof. Dr. İlker ANGIN
Doç. Dr. Emrullah ACAR
Dr. Öğr. Üyesi İbrahim Halil DEMİREL

Geçtiğimiz yüzyıl boyunca küresel ve bölgesel su stresi problemleri artış göstermiştir. Bu problemin önemli nedenleri arasında küresel ısınma, iklim değişikliği, nüfus artışı gibi faktörler yer almaktadır. Bununla birlikte, küresel su tahsisinin %80'inden fazlasını kullanan tarım sektörü, artan su kıtlığının en önemli sebebi olarak öne çıkmaktadır. Bu nedenle, son yıllarda araştırmacılar, tarımda su tüketimini azaltmaya yönelik çalışmalara odaklanmıştır. Özellikle 21. yüzyılın başlarında geliştirilen su ayak izi (SA) konsepti, tarımsal üretimin su kaynakları üzerindeki etkilerinin detaylı bir şekilde incelenmesine ve su tüketimini azaltmaya yönelik stratejilerin analizine olanak tanımaktadır.

Ceyhan Havzası, ülkemizin üç farklı iklim bölgesinin kesişiminde yer aldığı için yüksek iklim ve mahsul çeşitliliğine sahip önemli bir tarım bölgesidir. Bu nedenle, havzadaki tarımsal su kullanımı oldukça fazladır. Bu çalışmanın temel amacı, Ceyhan Havzası'nda yetiştirilen tarımsal ürünlerin hidrolojik model tabanlı detaylı SA analizlerini gerçekleştirmek ve mevcut ürün desenini optimize ederek tarımsal su kullanımını azaltmaya yönelik tedbirler sunmaktır. Bu bağlamda, mevcut çalışma üç temel aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada, 2011-2021 yılları arasındaki iklim verileri kullanılarak SWAT modeli ile havzanın hidrolojik modeli oluşturulmuştur. İkinci aşamada, tarımsal yönetim uygulamaları SWAT modeline işlenmiş ve incelenen ürünlerin mavi, yeşil ve gri SA miktarları belirlenerek haritalandırılmıştır. Son aşamada, çok amaçlı optimizasyon yöntemi kullanılarak havzadaki ürün deseni, mavi ve toplam SA parametreleri üzerinden optimize edilmiştir. Bu çalışma, literatürdeki diğer araştırmalardan temel olarak üç yönden farklılık göstermektedir. i) literatürdeki SA çalışmaları çoğunlukla ampirik yöntemlerle gerçekleştirilmişken, mevcut çalışmada hidrolojik model tabanlı SA analizleri yapılarak yüksek mekânsal ve zamansal çözünürlüklü sonuçlar elde edilmiştir. Bu sayede ürün deseni önerileri net bir şekilde haritalandırılabilmiştir. ii) Önceki çalışmalarda ürün deseni ayarlamaları genellikle mahsul odaklı gerçekleştirilmişken, bu çalışmada su yönetimi odaklı ürün deseni optimizasyonu yapılmıştır. iii) SA konseptinde en önemli bileşen olan mavi SA, amaç fonksiyonunda ağırlıklandırılarak çeşitli senaryolar altında optimum ürün deseni haritaları oluşturulmuş ve havzaya en uygun çözüm araştırılmıştır.

Bu çalışmanın temel bulgularına göre, mevcut durumda bütün ürünlerde genel olarak mavi su ayak izinin havzanın kuzey kesimine, yeşil su ayak izinin ise havzanın güneyine doğru arttığı tespit edilmiştir. Öte yandan, ürün deseni optimizasyonu ile toplam su ayak izinde %23.4 (614 milyon m^3) oranında bir düşüş; mavi su ayak izinde ise %47.9'luk (464 milyon m^3) bir azalma potansiyeli ortaya konmuştur. Buna göre, sadece Ceyhan Havzası'nda ürün deseni optimizasyonu ile su kaynakları üzerindeki insani müdahale

değişmeksizin 480 bin ton ek buğday üretimi yapılabileceği ve yıllık yaklaşık 5.6 milyon kişiye yetecek kadar tatlı su tasarrufunun sağlanabileceği tespit edilmiştir. Bu çalışmanın tarımsal üretimde su tüketiminin azaltılmasına yönelik sunduğu çözüm önerilerinin, ülkemizdeki su yönetimi çalışmalarına katkı sağlaması beklenmekte olup gelecekte ekonomik analizler ile birlikte bölgenin sulama alt yapısı ve çiftçi alışkanlıkları gibi parametrelerin değerlendirilerek, ürün deseni önerilerinin uygulanabilirliğini artırmaya yönelik araştırmaların yapılabileceği düşünülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Ceyhan havzası, hidrolojik model, optimizasyon, su ayak izi, SWAT, ürün deseni

ABSTRACT

Ph.D THESIS

DETERMINATION AND OPTIMIZATION OF AGRICULTURAL WATER USE AT BASIN SCALE BY HYDROLOGICAL MODEL BASED WATER FOOTPRINT METHOD

Muhammed Sungur DEMİR

Batman University Graduate Education Institute
Civil Engineering Department of Science

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Abdullah MURATOĞLU

2024, 174 Pages

Jury
Assoc. Prof. Dr. Abdullah MURATOĞLU
Prof. Dr. Mehmet İshak YÜCE
Prof. Dr. İlker ANGIN
Assoc. Prof. Dr. Emrullah ACAR
Asst. Prof. Dr. İbrahim Halil DEMİREL

Over the past century, global and regional water stress problems have increased. Significant causes of this problem include factors such as global warming, climate change, and population growth. Additionally, the agricultural sector, which consumes more than 80% of global water allocation, stands out as the most critical reason for the increasing water scarcity. Consequently, in recent years, researchers have focused on studies to reduce water consumption in agriculture. Specifically, the water footprint (WF) concept, developed in the early 21st century, enables a detailed examination of the impacts of agricultural production on water resources and the analysis of strategies to reduce water consumption.

The Ceyhan Basin, located at the intersection of three different climate zones in Turkey, is a significant agricultural region with high climate and crop diversity. Therefore, agricultural water use in the basin is quite high. The primary aim of this study is to conduct detailed WF analyses of agricultural products grown in the Ceyhan Basin based on a hydrological model and to propose measures to reduce agricultural water use by optimizing the current crop pattern. In this context, the present study was conducted in three main stages. In the first stage, the basin's hydrological model was created using the SWAT model with climate data from 2011-2021. In the second stage, agricultural management practices were processed into the SWAT model, and the blue, green, and grey WF amounts of the examined products were determined and mapped. In the final stage, a multi-objective optimization method was used to optimize the crop pattern in the basin based on blue and total WF parameters.

This study differs fundamentally from other research in the literature in three main ways: i) while WF studies in the literature have mainly been carried out using empirical methods, the present study achieved high spatial and temporal resolution results through hydrological model-based WF analyses, allowing for clear mapping of crop pattern recommendations; ii) previous studies typically focused on crop-centric adjustments, whereas this study conducted water management-focused crop pattern optimization; iii) the blue WF, the most critical component in the WF concept, was weighted in the objective function, creating optimal crop pattern maps under various scenarios to find the best solution for the basin.

According to the main findings of this study, the current general trend shows an increase in the blue WF towards the northern part of the basin and an increase in the green WF towards the southern part. On the other hand, with crop pattern optimization, a potential reduction of 23.4% (614 million m^3) in the total WF and a 47.9% (464 million m^3) decrease in the blue WF was demonstrated. Accordingly, it was found that by optimizing the crop pattern in the Ceyhan Basin alone, an additional 480,000 tons of wheat could be produced without changing human intervention on water resources, and approximately 5.6 million

people could be supplied with enough freshwater annually. The solution proposals offered by this study to reduce water consumption in agricultural production are expected to contribute to water management studies in Turkey, and future research evaluating parameters such as the region's irrigation infrastructure and farmer habits, along with economic analyses, is anticipated to increase the applicability of crop pattern recommendations.

Keywords: Ceyhan basin, cropping pattern, hydrological modeling, optimization, SWAT, water footprint

ÖNSÖZ

Akademik hayatım boyunca bana her türlü konuda destek olan, yol gösteren, değerli zamanını bana ayıran ve bilgi birikimini paylaşmaktan geri durmayan çok kıymetli saygıdeğer hocam Sayın Doç. Dr. Abdullah MURATOĞLU'na sonsuz şükranlarımı sunarım.

Doktora sürecimde bilgi ve tecrübesiyle katkılarından dolayı Sayın Prof. Dr. Necati KAYAALP'e ve Sayın Prof. Dr. Şahnaz TİĞREK'e;

Tez sürecinde kıymetli önerileri ile bana zaman ayıran Sayın Doç. Dr. Emrullah ACAR'a ve Dr. Öğr. Üyesi İbrahim Halil DEMİREL'e;

Katkılarından dolayı değerli jüri üyeleri Sayın Prof. Dr. Mehmet İshak YÜCE ve Sayın Prof. Dr. İlker Angın'a;

Tez çalışmamda tecrübesi ile bana yol gösteren Sayın Doç. Dr. Yunus DEMİR'e;

Ayrıca tez yazım sürecinde desteklerinden dolayı Sayın Arş. Gör. Muhammed Vedat GÜN'e ve Sayın Zehra AVANOZ'a

Teşekkürlerimi sunarım.

Hayatım boyunca her konuda yanımda olan, eğitim hayatımda her türlü desteği sunan anne ve babama, zorlu geçen doktora sürecimde sabırla arkamda duran, bu çalışmada maddi ve manevi en büyük destekçim eşim Zehra'ya ve evimin neşesi sevgili kızım Elif'e teşekkür ederim.

Muhammed Sungur DEMİR
BATMAN-2024

İÇİNDEKİLER

ÖZET ..... **iv**

ABSTRACT ..... **VI**

ÖNSÖZ ..... **VIII**

İÇİNDEKİLER ..... **IX**

SİMGELER VE KISALTMALAR ..... **XI**

1. GİRİŞ **1**

2. TEMEL BİLGİLER VE İLGİLİ ÇALIŞMALAR **5**

2.1. Temel Bilgiler 5
2.1.1. Su kaynakları, sanal su ve su ayak izi 5
2.1.2. Sanal su kavramı 6
2.1.3. Su ayak izi (SA) konsepti 8
2.1.4. Su ayak izinde farklı yaklaşımlar 11
2.1.5. Hidrolojik modelleme 14
2.1.6. Ülkemizde ve dünyada tarım sektörü 17
2.2. Su Ayak İzi Çalışmaları 19
2.2.1. Su ayak izini azaltmaya yönelik çalışmalar 20
2.2.2. İklim değişikliği senaryolarının etkisi 21
2.2.3. SA değerlendirme çalışmaları 23
2.3. Hidrolojik Modelleme Çalışmaları 27
2.3.1. Türkiye'de hidrolojik modelleme çalışmaları 27
2.3.2. Hidrolojik model tabanlı uluslararası SA çalışmaları 28
2.4. Tarımsal Ürün Deseni Optimizasyonu Çalışmaları 30
2.5. Mevcut Çalışmanın Orijinalliği 32

3. MATERYAL VE YÖNTEM **33**

3.1. Çalışma Alanı 33
3.2. SWAT Modeli 35
3.2.1. Yüzey akışı 37
3.2.2. Evapotranspirasyon (ET) 39
3.2.3. Sızma 43
3.2.4. Yüzey altı akış 44
3.2.5. Yer altı akışı 44
3.2.6. Bitki büyümesi modellenmesi 45
3.3. SWAT Modeli Girdileri 47
3.4. SWAT Modelinin Kurulumu 52
3.4.1. Kalibrasyon ve validasyon 55
3.4.2. Tarımsal yönetimin tanımlanması 58
3.5. SA Metodolojisi 63
3.5.1. Tarımsal ürünler ve SA 64
3.5.2. Buharlaşma modelleri ve SA 65

3.5.3. Mavi ve yeşil SA Denklemleri 67
3.5.4. Gri su ayak izinin hesaplanması 68
3.5.5. SA metodolojisinin kısıtları 70
3.6. SWAT Metodolojisi ile SA Hesabı 71
3.7. Optimizasyon Algoritması 75

4. BULGULAR VE TARTIŞMA 80

4.1. SWAT Modeli Kalibrasyon ve Validasyonu 80
4.2. Buharlaşma ve Verim Verileri ile Validasyon 85
4.3. Yüksek Alansal Çözünürlüklü SA Analizleri 89
4.3.1. Mavi ve yeşil SA haritaları 90
4.3.2. Gri SA haritaları 100
4.3.3. Toplam SA haritaları 105
4.3.4. İlçe ölçekli SA analizleri 110
4.3.5. Ceyhan Havzası genelinde SA analizi 114
4.3.6. SA verilerinin literatür karşılaştırması 117
4.4. Su Ayak İzindeki Zamansal Değişimler 119
4.5. Ürün Deseni Optimizasyonu 123
4.5.1. Kümelenmiş ürün deseni optimizasyonu 133
4.6. Çalışmanın Kısıtları 135

5. SONUÇ 137

6. KAYNAKLAR 140

7. EKLER 159

8. ÖZGEÇMİŞ 175

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

A : Ekim alanı (ha)
A_h : Havza alanı (km^2)
$A_{ilçe(k)}$: k ilçesinin toplam alanı (km^2)
$A_{ilçe,h(k)}$: k ilçesinin havza içerisinde kalan alanı (km^2)
a_{kc} : Toplanma zamanında meydana gelen günlük yağışın fraksiyonu
AS_k : k senaryosuna göre havza genelinde tahıl grubuna tahsis edilen ekili alanı (ha)
$AS_{k,i}$: k senaryosuna göre i ilçesindeki ekim alanı (ha)
AWC_k : Toprak katmanındaki su kapasitesi (mm)
bio : Toplam bitki biyokütlesi (kg/ha)
bio_z : Toprak üstünde kalan toplam biyokütle (kg/ha)
BST_{mavi} : Mavi bitki su tüketimi (m^3/ha)
$BST_{yeşil}$: Yeşil bitki su tüketimi (m^3/ha)
C_{max} : İzin verilen maksimum kirlilik konsantrasyonu
C_{nat} : Su kaynaklarındaki doğal besin maddesi konsantrasyonu
e_a : Gerçek buhar basıncı (kPa)
E_p : Potansiyel buharlaşma (mm/gün)
Es'' : Günlük maksimum toprak suyu buharlaşma miktarı (mm)
E_t : Maksimum terleme hızı (mm/gün)
$E_{t,gerçek}$: Günlük gerçek terleme miktarı (mm)
ET_g : Günlük evapotranspirasyon miktarı (mm)
ET_0 : Referans evapotranspirasyon (mm)
ET_a : Gerçek evapotranspirasyon (mm)
ET_c : İdeal koşullarda yetişen bitki evapotranspirasyonu (mm)
ET_p : Potansiyel evapotranspirasyon (mm)
ET_{mavi} : Mavi evapotranspirasyon (mm)
$ET_{yeşil}$: Yeşil evapotranspirasyon (mm)
E_v : Çıkış suyu hacmi
e_z : Suyun buhar basıncı (kPa)
ez_0 : Doymuş buhar basıncı (kPa)
$E_{zemin,k}$: k katmanındaki buharlaşma talebi (mm)
$E'_{zemin,k}$: Su içeriğine göre düzenlenmiş k katmanındaki buharlaşma talebi (mm)
$E''_{zemin,k}$: k katmanındaki buharlaşma (mm)
$E_{zemin,ka}$: Toprak katmanının en alt sınırındaki buharlaşma talebi (mm)
$E_{zemin,ku}$: Toprak katmanının en üst sınırındaki buharlaşma talebi (mm)
$E_{zemin,z}$: z derinliğinde toprağın buharlaşma talebi (mm)
FC_k : Tarla kapasitesi
FC_k : k katmanında tarla kapasitesindeki su içeriği (mm)
fr_{LAImx} : Maksimum yaprak alan indeksi fraksiyonu
fr_{PHU} : Potansiyel ısı birimi fraksiyonu
fr_{PHU} : Isı birimi fraksiyonu
G_y : Yerdeki ısı akı yoğunluğu (MJ/m^2×gün)
G_t : Toprak ısı akısı yoğunluğu ($MJ.m^{-2}.gün^{-1}$)
GSA_y : Gri hacimsel SA (m^3)
H_0 : Uzay radyasyonu (MJ/m^2×gün)
H_{ar} : Bitki tarafından yakalanan aktif fotosentetik radyasyon (MJ/m^2)
HI_{opt} : Bitkinin hasat indeksi
H_{net} : Net radyasyon miktarı (MJ/m^2×gün)
H_{tr} : Gelen toplam radyasyon (MJ/m^2)
HU : Günlük ısı birimi
h_{yas} : Su tablası (m)
I_a : Akıştan önceki ilk tutma miktarı (mm)
K_1 : Sabit katsayı (8.64×104)
K_c : Bitki katsayısı
K_{doygun} : Doygun hidrolik iletkenlik katsayısı (mm/saat)
k_{eff} : Çıkış suyundaki kirlilik konsantrasyonu

k_{ger} : Giriş suyunun gerçek konsantrasyonu
k_l : Işık sönümleme katsayısı
K_m : Aylık kar erimesi miktarı (mm)
L : Kirlilik yükü (kg)
LAI : Yaprak alan indeksi
LAI_{mx} : Maksimum yaprak alan indeksi
L_f : Yanal akışı (mm)
L_{gw} : Ana kanala olan mesafe (m)
L_n : Sudaki noktasal kirleticinin net yükü (kg)
L_y : Yamaç uzunluğu (m)
$L_{yayılı}$: Sudaki yayılı kirletici yükü (kg/ha)
N : Araştırma alanına uygulanan toplam kirlilik bileşeni miktarı (kg/ha)
NSE : Nash–Sutcliffe verimlilik katsayısı
P_{atm} : Atmosferik basınç (kPa)
$PBIAS$: Yüzde sapma
P_{eff} : Efektif yağış (mm)
P_g : Günlük yağış miktarı (mm)
PHU : Bitkinin toplam ısı birimi (˚C)
p_{ij} : *j* parselinde üretilebilecek *i* ürün miktarı (t)
P_u : Mahsul üretim miktarı (t)
$P_{u,ilçe(k,i)}$: *i* ürününün *k* ilçesinin tamamındaki üretim miktarı (ton)
Q_{ga} : Yeraltı suyundan günlük ters akış miktarı (mm)
Q_m : Gerçek veri
Q'_m : Gerçek verilerin ortalaması
Q_{pik} : Pik debi (m^3/s)
Q_s : Simülasyon verisi
Q'_s : Simülasyon verilerinin ortalaması
Q_{ta} : *i* gününde ana kanala doğru gerçekleşen yeraltı suyu akışı (mm)
Q_{yanal} : Yüzey altı akış debisi (mm/gün)
$Q_{yüzey}$: Günlük yüzeysel akış miktarı (mm)
R : Yüzey akışı (mm)
R^2 : Determinasyon katsayısı
r_a : Hava katmanının difüzyon direnci (s/m)
r_c : Bitkisel örtü direnci (s/m)
RUE : Radyasyon kullanım verimliliği $(kg/ha.(MJ/m^2))^{-1}$
S : Maksimum tutulma miktarı (mm)
S : Kök bölgesinden derine sızan su miktarı (mm)
$S0$: Mevcut durumdaki SA değerleri
$SA_{d,i}$: Sığ akiferde *i* gününde depolanan su miktarı (mm)
SA_{gri} : Gri su ayak izi (m^3/t)
$SA_{havza(i)}$: *i* ürününün havzadaki ortalama su ayak izi (m^3/t)
$SA_{HRU(i)}$: HRU'daki su ayak izi (m^3/t)
$SA_{ilçe(i)}$: İlçenin su ayak izi (m^3/t)
$SA_{m,havza(i)}$: *i* ürününün havzadaki toplam hacimsel su ayak izi (m^3)
$SA_{m,HRU(i)}$: Herhangi bir HRU'daki hacimsel su ayak izi (m^3)
$SA_{m,ilçe(i)}$: İlçedeki i ürününün hacimsel su ayak izi (m^3)
$SA_{m,ilçe(k,i)}$: *k* ilçesindeki *i* ürününün hacimsel su ayak izi (m^3)
SA_{mavi} : Mavi su ayak izi (m^3/t)
$SA_{yeşil}$: Yeşil su ayak izi (m^3/t)
slp : Eğim
$SP_{k,i}$: *k* senaryosuna göre *i* ilçesindeki ekim alanı tahsisinin havzanın tamamındaki ekim alanına oranı (%)
SW_0 : Başlangıçtaki toprak su içeriği
SW_k : Toprak katmanının su içeriği (mm)
SW_k : Toprak katmanında mevcut olan su miktarı (mm)
SW_k : *k* katmanındaki su içeriği (mm)
$SW_{k,artık}$: Sızabilecek su miktarı (mm)
SW_t : t anındaki toprak su içeriği (mm)
t_{kc} : Alt havzanın toplanma zamanı (saat)
T_{maks} : Maksimum günlük sıcaklık (ºC)

T_{min} : Minimum günlük sıcaklık (ºC)
T_{ort} : Ortalama günlük sıcaklık (ºC)
$T_{sızma}$: Sızma süresini (saat)
T_{taban} : Bitki büyümesi için gerekli minimum sıcaklık (˚C)
U_2 : 2 m yükseklikteki rüzgâr hızı (m/s)
w_1 : Birinci amaç ağırlık katsayısı
$w_{a,k}$: *k* katmanındaki potansiyel su çekimi miktarı (mm)
$w'_{a,k}$: *k* katmanındaki düzenlenmiş potansiyel su talebi (mm)
$w''_{a,k}$: Su içeriğine göre ayarlanmış potansiyel su alım miktarı (mm)
$w_{a,ka}$: Alt katmandaki potansiyel su çekim miktarı (mm)
$w_{a,ku}$: Üst katmandaki potansiyel su çekim miktarı (mm)
$w_{a,z}$: Zemin yüzeyinden *z* derinliğine kadar potansiyel bitki su alımı miktarı (mm)
W_{ck} : Çekilen su hacmi
$w_{gerçek,k}$: *k* katmanındaki gerçek su alım miktarı (mm)
$w_{gerçek,t}$: Bitkinin günlük toplam su alım miktarı (mm)
W_k : *k* katmanında solma noktasındaki su içeriği (mm)
WP_k : *k* katmanında solma noktasındaki su içeriği (mm)
w_{pompa} : *i* gününde pompalama ile akiferden çekilen su miktarı (mm)
$w_{Q,sa}$: *i* gününde akifere giren su miktarı (mm)
w_{revap} : *i* gününde toprak katmanlarına doğru hareket eden su miktarı (mm)
$w_{sız,k}$: Günlük alt toprak katmanına sızan su miktarı (mm)
w_v : Vadoz bölgeye sızan su miktarı (mm)
Y : Mahsul verimi (kg/ha)
y : 0 ve 1 değerlerini alabilen tam sayı değişkeni
z : Derinlik (mm)
z_i: : *j* parseli haricinde *i* ürünü yetiştirilen parsel sayısı
z_{kd} : Herhangi bir büyüme dönemindeki kök derinliği (mm)
$z_{kd,mx}$: Maksimum kök derinliği (mm)
$z_{kök}$: Kök derinliği (mm)
$Z_{n(i)}$: *i.* aydaki net toprak nemi (mm)
α : Sabit bir sızma oranı
α_p : Sabit katsayı (1.28)
β_w : Su dağılım katsayısı
γ : Psikrometrik sabit (kPa/ ºC)
Δ : Doymuş buhar basıncı-sıcaklık eğrisinin eğimi
Δbio : Günlük biyokütledeki artış (kg/ha)
$\Delta S1$: S1 senaryosundaki su ayak izi miktarlarının S0 senaryosuna göre değişimi (%)
$\Delta S_{k,i}$: *k* senaryosuna göre *i* ilçesindeki ekim alanı tahsis oranının S0 senaryosuna göre değişimi
Δt : Zaman aralığı (saat)
ΔZ_n : Aylık toprak nemindeki değişim (mm)
$\Delta Z_{n(i)}$: *i.* aydaki toprak nemindeki değişim
λ : Buharlaşma ısısı (MJ/kg)
ρ_{hava} : Havanın yoğunluğu (kg/m^3)
Φ_d : Toprak tabakasının tahliye edilebilir gözenekliliği (mm/mm)

Kısaltmalar

AGİ : Akım gözlem istasyonu
DSİ : Devlet Su İşleri
ET : Evapotranspirasyon
FAO : Birleşmiş Milletler Gıda ve Tarım Örgütü
HRU : Hidrolojik tepki birimi
MGM : Meteoroloji Genel Müdürlüğü
S0 : Mevcut durumdaki su ayak izi senaryosu
S1 : 1. optimizasyon senaryosu
SA : Su ayak izi
SS : Sanal su
SSM : Sanal su muhtevası
SST : Sanal su transferi
SYM : Sayısal yükseklik modeli

TAGEM : Tarımsal Araştırmalar ve Politikalar Genel Müdürlüğü
TUİK : Türkiye İstatistik Kurumu
USDA : Amerika Birleşik Devletleri Tarım Bakanlığı
USGS : Amerikan Jeoloji Araştırmaları Kurumu
YDA : Yaşam döngüsü analizi
YDE : Yaşam döngüsü envanter analizi
YDED : Yaşam döngüsü etki değerlendirmesi

1. GİRİŞ

Küresel ölçekte yaşanan su stresinin en önemli faktörlerinden biri, tarımsal su kullanımıdır. Tarım sektöründe genel olarak ürün odaklı stratejilerin oluşturulması ve suyun öneminin ikinci planda kalması, su kaynaklarının büyük miktarlarda israfına neden olmaktadır. Özellikle ekonomik kaygılar, bilinçsiz tarımsal yönetim uygulamaları, çiftçi alışkanlıkları ve mevcut politikalar nedeniyle tarım sektörü su stresinin odak noktası haline gelmiştir. Öte yandan, geleceğe yönelik projeksiyonlarda, önümüzdeki yıllarda su kıtlığının daha da kötüleşmesi ve gıda güvenliği için ciddi tehditler oluşturması ön görülmektedir (Rosegrant vd., 2009). Bazı çalışmalar, 2050 yılına kadar kentsel alanlarda 2.4 milyar insanın su kıtlığı ile karşı karşıya kalabileceğini ortaya koymaktadır (Connor ve Coates, 2023). Bu durumun tarım sektörü gibi kritik faaliyetlerde verim düşüşlerine neden olarak gıda arzında ciddi sorunlara yol açacağı düşünülmektedir.

Dünya genelinde olduğu gibi ülkemizde de kullanılabilir su potansiyelinin %74 gibi (32 milyar m^3) büyük bir kısmının tarımsal sulamada kullanıldığı raporlanmaktadır (Yaykıran, 2016). Bu sebeple, ülkemizde ve küresel anlamda tarımda su verimliliğinin artırılması, Birleşmiş Milletler Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri'ne ulaşmanın temel bileşenleri olan, küresel su stresini ve tarımsal sürdürülebilirliği yönetmek için önem arz etmektedir (Feng vd., 2021; Luan vd., 2018). Bu bağlamda, sanal su (SS) veya su ayak izi (SA) gibi çeşitli çevresel indikatörler, doğal ekosistemler üzerindeki öngörülen insan etkisini belirlemek (Sun vd., 2021), sürdürülebilirliği araştırmak ve su kaynaklarının dağılımını optimize etmek için geliştirilmiştir (Hoekstra, 2016). Bu göstergeler, farklı coğrafyalardaki ürünlerde su tüketiminin değerlendirilmesini sağlamakta ve hedeflenen stratejilerin uygulanması yoluyla, tatlı su kaynakları üzerindeki stresi azaltma hakkında fikir vermektedir (Luan, Wu, vd., 2018).

SA kavramı nispeten yeni bir konsept olmasına karşın, araştırmacıların yoğun ilgisini görmüş ve metodolojisi hızla gelişmiştir. Fakat su ayak izinin hidroloji, yer bilimleri, tarım ve ziraat gibi çeşitli uzmanlık alanlarını kapsayan disiplinler arası bir kavram olması nedeniyle, metodolojisinde hâlâ eksiklikler bulunmaktadır. Özellikle evapotranspirasyon, sızma ve yüzey akışı gibi hidrolojik parametrelerinin ölçümünün zor ve belirsizliklerinin fazla olması, SA hesaplamalarını zorlaştırmaktadır. Bununla birlikte son yıllarda, geniş alanlarda hidrolojik parametrelerin tespit edilmesine olanak sağlayan birçok hidrolojik model geliştirilmiştir. Bu programların kullanımının artması, SA araştırmacılarının da ilgisini çekmiştir. Hidrolojik model tabanlı SA analizlerinin ampirik

yöntemlere göre daha gerçekçi sonuçlar vermesi, yüksek mekânsal ve zamansal çözünürlükte değerlendirmelerin yapılabilmesine olanak sağlaması ve sulama ve gübreleme gibi farklı tarımsal yönetim uygulamalarının SA üzerindeki etkilerini kolayca yansıtabilmeleri nedeniyle SA çalışmalarında büyük avantaj sağlamaktadırlar. Buna karşın, girdi verilerinin oldukça fazla olması, kalibrasyon ve havza modellemesinin zor olması ve kullanımının pratik olmaması sebebiyle bu alanda yeterince çalışma bulunmamaktadır.

SA, son 20 yılda su stresi ile mücadelede geliştirilen stratejiler için önemli bir mihenk taşı haline gelmiştir. SA göstergesi kullanılarak birçok ürün ve üretim sürecinin çeşitli su kullanım türleri ortaya konabilmiştir. Dahası SA konsepti, su stresine karşın geliştirilebilecek stratejilerin etkinliklerinin net bir şekilde değerlendirilmesine ve en uygun yöntemlerin belirlenebilmesine olanak sağlamıştır. Bu bağlamda yapılan çalışmalar, malçlama, damla sulama, filtre şeritlerinin kullanılması ve ürün deseni düzenlemesi ile ürün kaybı yaşanmaksızın su mevcudiyetine olumlu yönde önemli katkılar sağlanabileceğini göstermektedir (Bölüm 2.2.1). Bu yöntemler arasında ürün deseni ayarlamasının, su kaynaklarının sürdürülebilirliğinin sağlanması açısından diğer yöntemlere göre çok daha etkili ve daha az maliyetli olmasına karşın, SA perspektifi ile yeterince çalışılmamıştır. Bu alanda yapılan araştırmalar çoğunlukla mahsul verimini artırmaya odaklanmıştır. Bu bağlamda literatürde, hidrolojik model tabanlı SA çalışmaları ve SA metoduyla ürün deseni optimizasyonu çalışmalarının oldukça kısıtlı olduğu görülmektedir. Bununla birlikte, hidrolojik model kullanılarak detaylı analizlerle bölgenin su ayak izinin hesaplandığı ve bu şekilde tarımsal ürün deseninin optimize edildiği herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu doğrultuda, mevcut çalışmada hidrolojik model tabanlı SA analizi ile ürün deseni optimizasyonu hedefleri birleştirilerek bu alanda ilk defa bir çalışma ortaya koyulmuştur. Bu sayede, mevcut çalışma kapsamında detaylı ve yüksek hassasiyetli SA sonuçlarının ve ürün deseni önerilerin oluşturulması sağlanabilmiştir.

Ceyhan havzası ülkemizin Doğu Anadolu, Güney Doğu Anadolu ve Akdeniz bölgeleri arasında bir geçiş konumunda olması nedeniyle iklim ve tarımsal ürün çeşitliliği yüksek bir bölgedir. Bu nedenle, Ceyhan Havzasının ürün deseni karmaşık bir yapıya sahiptir. Öte yandan, bitkisel üretimin fazla olması nedeniyle, tarımsal su tüketimi yüksektir. Bu doğrultuda Ceyhan Havzası, mevcut çalışma konusu açısından oldukça elverişlidir. Bu çalışmanın temel amacı, ülkemizin önemli tarımsal bölgelerinden olan Ceyhan Havzası'nın hidrolojik modelinin oluşturularak, buradaki tarımsal üretiminin

yüksek alansal ve zamansal çözünürlüklü su ayak izinin belirlenmesi ve ürün deseninin farklı senaryolar altında optimize edilerek su mevcudiyeti üzerindeki baskının minimize edilmesine yönelik çözüm önerileri geliştirmektir. Bu bağlamda, 2011-2021 yılları arasındaki iklim verileri kullanılarak SWAT (Soil and Water Assesment Tool) modeli aracılığıyla havzanın kapsamlı bir hidrolojik modeli oluşturulmuştur. SWAT modeli, havzanın 4 farklı noktasında bulunan akım gözlem istasyonlarındaki (AGİ) debi değerleri ile kalibre ve valide edilmiştir. Ardından model, ülkemizde alanında en önemli kuruluşlardan biri olan ve geniş veri seti sunan Tarımsal Araştırmalar ve Politikalar Genel Müdürlüğü (TAGEM) bitkisel evapotranspirasyon verileri ile de doğrulanmıştır. Ayrıca, modelin mahsul verimi sonuçları Türkiye İstatistik Kurumu'nun (TUİK) tarımsal ürünlerin verim istatistikleri ile karşılaştırılarak da doğrulanmıştır. Sonuç olarak aylık, yıllık ve 10 yıllık ortalama olmak üzere farklı zamansal ölçeklerde, havzanın genelini temsil eden ürünlerin yeşil, mavi ve gri (nitrat kaynaklı) su ayak izleri, yüksek alansal çözünürlükle hesaplanmıştır. Son olarak, toplam ve mavi SA farklı oranlarda ağırlıklandırılarak 6 farklı senaryo altında ürün deseni, su yönetimi perspektifi ile optimize edilmiştir. Mevcut çalışmanın literatüre katkıları aşağıda maddeler halinde özetlenmiştir.

- Hidrolojik model tabanlı SA hesaplamaları henüz başlangıç aşamasında olup, özellikle yeşil SA metodolojisi tam gelişmemiştir. Mevcut çalışma ile yeşil SA hesaplamalarında farklı bir perspektif ortaya konmuştur.
- SA metodolojisi kullanılarak, yüksek çözünürlüklü alansal dağılıma sahip veriler ile ürün deseni optimizasyonu mevcut çalışma ile literatüre kazandırılmıştır.
- Aylık ölçekli SA hesaplamaları literatürde az sayıda bulunmakta olup, mevcut tez kapsamında her bir ürünün aylık SA dağılımları belirlenmiştir. Bu sayede sulama talebi yoğunluğunun belirlenmesi, aylık planlamaların yapılması vb. konularda katkı sağlanabileceği düşünülmektedir.
- SA metodolojisinde suyun renkleri (mavi, yeşil, gri su), su yönetiminde farklı açılardan öneme sahiptirler. Bu çalışmada, ağırlıklandırma yöntemi ile farklı senaryolar altında çözüm önerileri geliştirilmiştir.
- Ceyhan Havzası'nın daha önce SWAT modeli oluşturulmamıştır. Mevcut çalışma ile Ceyhan Havzası'nın hidrolojik modeli oluşturularak havzanın kalibrasyon parametreleri belirlenmiştir.

  Bu çalışmanın araştırma soruları ise aşağıda sıralanmıştır.

1. Bir havzada yüksek çözünürlüklü ürün deseni optimizasyonu yapmak mümkün müdür? Mümkünse bunun metotları nelerdir?
2. Ürün deseni ayarlamasının Ceyhan gibi bir havzaya su yönetimi açısından potansiyel faydaları nelerdir?
3. Hidrolojik model tabanlı SA analizlerinin ürettiği sonuçların doğruluğu hangi mertebededir?
4. Aylık analizler gibi farklı zamansal ölçeklerin kullanılması ile su yönetimine ne gibi katkılar sağlanabilir?

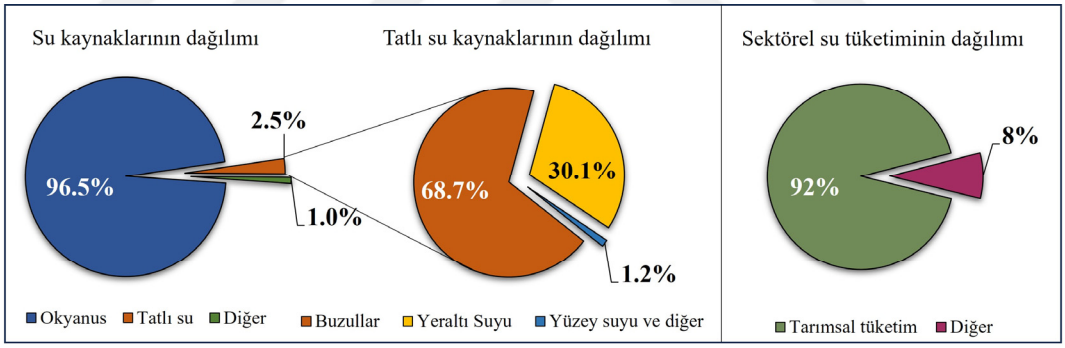
Bu çalışma kapsamında ikinci bölümde sanal su, su ayak izi ve hidrolojik modelleme gibi konularda temel bilgiler verilmiş ve su ayak izi, hidrolojik modelleme ve ürün deseni optimizasyonu ile ilgili kapsamlı bir literatür taraması yapılmıştır. Üçüncü bölüm ise SWAT modeli ve SA teorisinin, SWAT modelinin kurulumunun ve optimizasyon algoritmasının anlatıldığı materyal metot bölümünden oluşmaktadır. Dördüncü bölüm, bulgular ve tartışma kısmını oluşturan, kalibrasyon ve validasyon sonuçlarının verildiği, havzanın ürün bazlı SA haritalarının görselleştirilerek tartışıldığı ve optimizasyon sonuçlarının değerlendirildiği kısımlardan ibarettir. Son olarak beşinci bölümde nihai bir değerlendirme yapılmıştır.

2. TEMEL BİLGİLER VE İLGİLİ ÇALIŞMALAR

2.1. Temel Bilgiler

2.1.1. Su kaynakları, sanal su ve su ayak izi

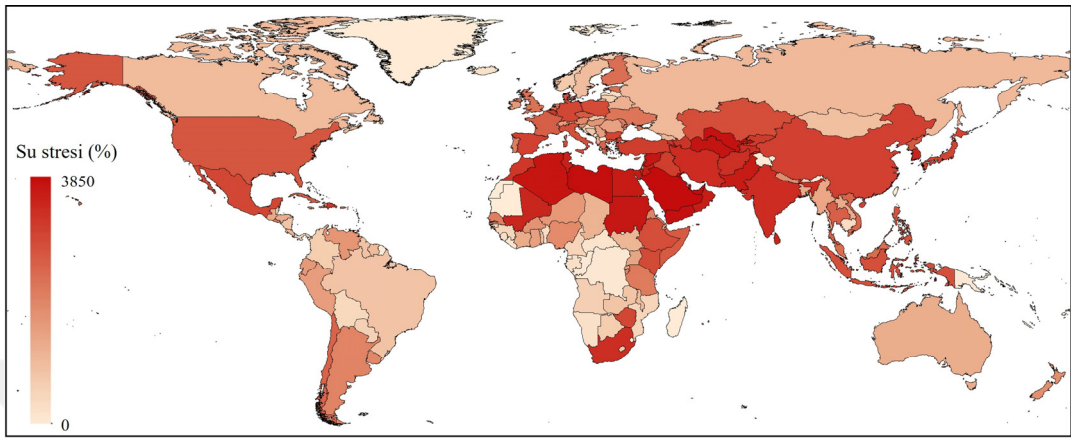
Tatlı su veya temiz su olarak adlandırılan su kaynakları, dünyadaki toplam suyun yalnızca %2.5'ini oluşturmaktadır (Sun vd., 2021) (Şekil 2.1). Bununla birlikte, toplam tatlı su rezervinin yaklaşık üçte ikilik kısmı buzullardan oluştuğu için bu rezerv kullanılamamaktadır. Kullanılabilir tatlı su rezervlerinin ise sadece yaklaşık %4'lük kısmı yüzey suyu olarak direkt kullanıma hazır durumdadır (Gleick, 1993). Buna karşın, nüfus artışı, teknolojik ilerlemeler, ekonomik gelişmeler, iklim değişikliği ve temel gıdalara duyulan ihtiyaç nedeniyle tatlı suya olan talep geçtiğimiz yüzyıl boyunca önemli ölçüde artmıştır (Ercin ve Hoekstra, 2014). Bu durum, küresel ölçekte birçok bölgede su stresine neden olmuştur. Dünya genelinde tarımsal alanlarda yaşayan yaklaşık 1.2 milyar insanın su kıtlığından etkilendiği tahmin edilmektedir (Wang vd., 2022).



Şekil 2.1. Su kaynaklarının ve tüketiminin dünya genelinde ve sektörel bazda dağılımı (Gleick, 1993)

Birleşmiş Milletler Gıda ve Tarım Örgütü'nün (FAO), 2021 yılında ülke ölçeğinde su kullanımlarını ve su rezervlerini incelediği rapor (FAO, 2021a) ülkelerin su streslerini ortaya koymuştur (Şekil 2.2). Buna göre Avrupa, Güney Amerika ve Kanada'da nispeten su stresinin daha düşük olduğu fakat Mısır, Suudi Arabistan ve Suriye başta olmak üzere orta doğu ülkelerinde ve Afrika kıtasının güney kesiminde ciddi su stresinin yaşandığı görülmektedir. Aynı zamanda, ülkemiz de su stresinin ciddi oranlarda baskı oluşturduğu bölgeler arasında yer almaktadır. Öyle ki ülkemizde yıllık kişi başı kullanılabilir su miktarı 2000 yılında 1652 m^3 iken 2020 yılı itibariyle 1346 m^3 seviyelerine düşmüştür (Sarış, 2021). Ayrıca, bazı çalışmalar Türkiye genelinde 2030

yılında kişi başı kullanılabilir su miktarının 1120 m^3'e düşeceğini öngörmektedir (SYGM, 2016).



Şekil 2.2. Ülke bazında küresel su stresi haritası
(FAO (2021) verileri kullanılarak uyarlanmıştır.)

Dünya genelinde yaşanan su stresinin daha iyi anlaşılabilmesini sağlamak ve su mevcudiyetini iyileştirmeye yönelik stratejiler geliştirmek amacıyla çeşitli indikatörler ortaya atılmıştır. Bunlardan en güncel ve popüleri olan SA kavramı ilk olarak 21. yüzyılın başında geliştirilmiştir. SA metodolojisi, ekolojik ayak izi perspektifine benzer bir şekilde ürünler, işletmeler veya faaliyetlerle ilişkili su tüketiminin değerlendirilmesine olanak tanır. Falkenmark göstergesi, su yoksulluğu endeksi ve su hassasiyeti endeksi gibi geleneksel su kullanımı hesaplamalarının aksine (Dong vd., 2013), SA metodolojisi tüketilen toplam su hacminin yanı sıra kullanılan suyun türünü ve kapsamını da belirterek su yönetiminin çok yönlü değerlendirilmesi açısından avantaj sağlamaktadır (Muratoglu, 2020). Bu bağlamda SA göstergesi, hemen hemen her sektöre uygulanabildiği ve kapsamlı bir değerlendirme sağladığı için yıllar içinde popülerlik kazanmıştır (Feng vd., 2021). Bu alanda gerçekleştirilen araştırmalarının önemli bir kısmı, su tüketimi üzerindeki en önemli etmenlerden olan tarımsal üretime odaklanarak gerçekleştirilmiştir (Hoekstra vd., 2012; Nouri vd., 2019). SA konseptinin daha iyi anlaşılabilmesi için, sanal su metodolojisi ve farklı SA yaklaşımları aşağıda detaylıca incelenmiştir.

2.1.2. Sanal su kavramı

Sanal su (SS) kavramı ilk olarak Allan (1993) tarafından ortaya atılmış (Wang vd., 2013) ve daha sonra Hoekstra ve Chapagain (2007) tarafından herhangi bir ürün üretimi için gerekli su girdilerini belirlemek üzere geliştirilmiştir (Ming ve Chen, 2013).

SS, bir üründe gömülü olan toplam su miktarını temsil etmektedir (Muratoglu, 2020a). Sanal su muhtevası (SSM) ise herhangi bir ürünün birim ağırlığını üretmek için kullanılan su kaynaklarının toplam hacmini ifade etmektedir (Muratoglu, 2021). SSM konusunda hem bölgesel (Meng vd., 2014; Fu vd., 2018; Zhao vd., 2014; Hirwa vd., 2022) hem de uluslararası (Dalin vd., 2012; Caro vd., 2021; Fader vd., 2010) pek çok araştırma bulunmaktadır.

SSM, ürün çeşitleri arasında büyük farklılıklar göstermesiyle beraber bölgeden bölgeye de farklılıklar göstermektedir. Tablo 2.1'de FAO, (2021a) tarafından yayınlanan ülke bazlı küresel su stresi haritasında bazı ürünlerin farklı ülkelerdeki ve dünya genelindeki sanal su içerikleri gösterilmiştir. Burada sanal su içeriği bakımından, ürünler ve ülkeler arasında ciddi farkların mevcut olduğu görülmektedir. Örneğin, kahvenin ABD'deki sanal su içeriği 5790 m^3/t iken Endonezya'da 21030 m^3/t olduğu görülmektedir. Bu duruma coğrafyalar arasındaki iklim koşullarındaki farklılıklar, bölgelerin toprak yapıları, topoğrafyaları, üretim ve tedarik zincirlerindeki uygulamalar neden olmaktadır. Bununla birlikte, ürünler arasında da SSM yönünden büyük farklılıkların olduğu, bazı ürünlerin düşük sanal su muhtevasına sahip olmasına karşın bazı ürünlerin kendi ağırlıklarından çok, gizli su içeriğine sahip oldukları görülmektedir. Örneğin, şeker kamışının sanal su muhtevasının küresel ortalaması 175 m^3/t iken, her bir ton kahvenin içerisinde gömülü olarak 20682 m^3 su bulunduğu görülmektedir.

Tablo 2.1. Bazı ürünlerin sanal su içeriği verileri (FAO, 2021a)

Ürün	ABD	Çin	Hindistan	Rusya	Endonezya	Dünya Ortalaması
Pirinç (kabuklu)	1656	1716	3702	3118	2793	2975
Buğday	849	690	1654	2375	-	1334
Mısır	489	801	1937	1397	1285	909
Soya Fasulyesi	1869	2617	4124	3933	2030	1789
Şeker kamışı	103	117	159	-	164	175
Pamuk tiftiği	5733	3210	18694	-	10072	8242
Biftek	13193	12560	16482	21028	14818	15497
Kahve	5790	7488	14500	-	21030	20682
Koyun eti	5977	5202	6692	7621	5956	6143
Süt	695	1000	1369	1345	1143	990
Peynir	3457	4963	6793	6671	5675	4914
Sığır derisi	14190	13513	17710	22575	15929	16656

Son birkaç yıldır araştırmacılar, suyun uluslararası veya bölgeler arası ticaret yoluyla dolaylı transferini içeren, sanal su transferi (SST) olarak da bilinen yeni bir konuyu araştırmaktadır. SST kavramı, su tüketimine neden olan bir ürünün başka bir ülkeye ihraç edildiğinde, aslında o ürünle birlikte suyun da dolaylı olarak ihraç edildiğini öne sürmektedir. Yani, ürünün ihraç edilmesiyle beraber, ürünün üretimi için kullanılan

doğal kaynaklara yapılan baskılar ve diğer çevresel etkiler, üretim bölgesinde kalmaktadır. Dolayısıyla SST, su kıtlığı çeken ülkelerin, su zengini ülkelerden su yoğun ürünler ithal etmek suretiyle su stresini azaltma stratejisine dayanmaktadır (Mubako vd., 2013; Dalin vd., 2012). Bu sayede, bazı ülkelerin dolaylı olarak başka bölgelerin su ihtiyaçlarını karşılamasına yardımcı olabileceği düşünülmektedir (Hoekstra ve Hung, 2002; Mahlakeng, 2023). Fakat, bu konuda bazı araştırmacıların çeşitli eleştirileri bulunmaktadır. Buna göre, bu yaklaşımın işgücü maliyetleri, ekonomik beklentiler, sosyal farkındalık eksikliği ve sosyoekonomik baskılar nedeniyle uygulanamayacağı savunulmaktadır (Zhao, vd., 2019; Kumar ve Singh, 2005). Bu nedenle, SST stratejilerinin çok boyutlu olarak değerlendirilmesi gerekmektedir. Öte yandan günümüzde, su tüketim miktarının yanı sıra tüketilen suyun niteliğinin de belirlenmesinin, su stresini azaltma stratejilerinin daha etkin gerçekleştirilmesini sağlayacağı düşünülmektedir. Dolayısıyla günümüzde, SS ve SST ile ilgili küresel tartışmalar esas olarak SA kavramı etrafında odaklanmıştır.

2.1.3. Su ayak izi (SA) konsepti

Sanayi devriminin ardından dünya, insan faaliyetinin baskın bir etkiye sahip olduğu, Antropojenik Çağ olarak bilinen yeni bir jeolojik çağa girmiştir. Ne yazık ki bu zaman diliminde, insan kaynaklı baskılar nedeniyle iklim, çevre ve ekosistemler üzerinde oldukça yoğun baskılar görülmektedir. İnsan kaynaklı faaliyetlerin sonuçları arasında yüksek düzeyde karbondioksit emisyonları, artan küresel sıcaklıklar, hava kirliliği, şiddetli seller, kuraklıklar, su kıtlığı, su kaynaklarının aşırı tüketilmesi, kirletilmesi ve yüksek oranda azot ve fosfor emisyonları yer almaktadır. İnsanın doğal süreçler üzerindeki etkisini ölçmek için çevresel, ekolojik, karbon, su, toprak ve azot ayak izleri dahil olmak üzere çeşitli ayak izi metodolojileri geliştirilmiştir (Muratoglu, 2021; Matuštík ve Kočí, 2021). Burada SA, beşerî süreçlerde kullanılan suyun bir ölçüsünü belirtmektedir. Bu sayede insanların, gezegenin sınırlı tatlı su kaynakları üzerindeki etkisi ortaya çıkarılabilmektedir (Hoekstra vd., 2011).

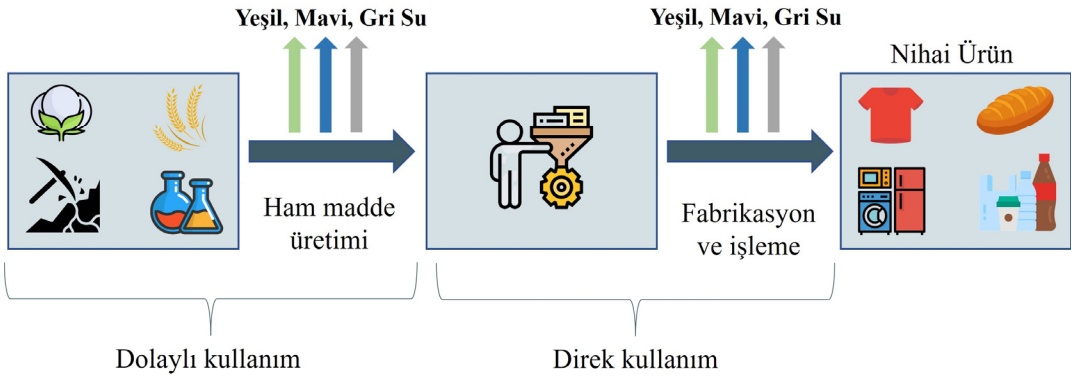
Su ayak izinin temelleri, Allan (1993) tarafından tanımlanan SS kavramına dayanmaktadır (Jeswani ve Azapagic, 2011). Ancak SS ve SA kavramları arasında bazı farklılıklar vardır. SS yalnızca bir üründe gömülü bulunan su miktarını ifade ederken, SA üretim sürecinde doğrudan veya dolaylı olarak tüketilen tatlı su miktarını ve türünü gösteren daha kapsamlı bir göstergedir (Ercin ve Hoekstra, 2014).

Su ayak izi metodolojisi, geleneksel su kullanım göstergelerinden üç bakımdan farklılık göstermektedir (Hoekstra, vd., 2011). Su ayak izi kavramında;

- Tarımsal sulamanın bitki tarafından tutulmayan ve sızma, yüzey akışı veya yüzey altı akışı olarak hidrolojik çevrimi devam ettiren sular mavi su kullanımı kapsamına alınmamaktadır.
- Su kullanımında, mavi suyun yanı sıra yeşil ve gri sular da ayrı ayrı incelenmektedir.
- Sadece doğrudan su kullanımı değil aynı zamanda dolaylı su tüketimi de göz önüne alınmaktadır.

SA fikri ilk olarak A.J. Hoekstra tarafından, 2002 yılında bir konferansta ortaya atılmış (Hoekstra, 2016) ve daha sonra Hoekstra ve Chapagain (2008) tarafından geliştirilmiştir (Shrestha vd., 2017). Konsept, pamuk yetiştiriciliğinden gömlek üretimine (Chen vd., 2023), madencilikten (Peña ve Huijbregts, 2014) elektronik imalata (Madaka vd., 2022) kadar insan faaliyetinin neredeyse her alanına uygulanabilmektedir. Bu nedenle SA, tarımsal faaliyetler, endüstriyel üretim, elektronik cihazlar vb. dahil olmak üzere çeşitli ürünleri ve tedarik zincirlerini barındıran kapsamlı bir gösterge haline gelmiştir (Jefferies vd., 2012). Ayrıca SA, konuma ve zamana bağlı olarak değişen çok boyutlu bir parametredir (Feng vd., 2021). Bir bölgede yetiştirilen bir mahsulün su ayak izi, farklı bir bölgede yetiştirilen aynı mahsulün su ayak izinden farklı olabilmektedir (Chapagain ve Hoekstra, 2004; Dang vd., 2022). Benzer şekilde, bir bölgede üretilen veya yetiştirilen herhangi bir ürün, farklı zamanlarda değişen su ayak izine sahip olabilmektedir (Zhuo vd., 2016).

Bir ürünün su ayak izi, hammaddelerinin ve tedarik zinciri ile üretim sürecindeki diğer faaliyetlerin su ayak izlerinin toplamıdır (Ababaei ve Etedali, 2017) (Şekil 2.3). Örneğin, bir tişörtün su ayak izi, hammaddesi olan pamuğun üretim sürecindeki su ayak izinin yanı sıra fabrikasyon, nakliye vb. süreçlerdeki toplam su ayak izinden oluşmaktadır.



Şekil 2.3. Üretim zinciri boyunca su ayak izinin şematik gösterimi

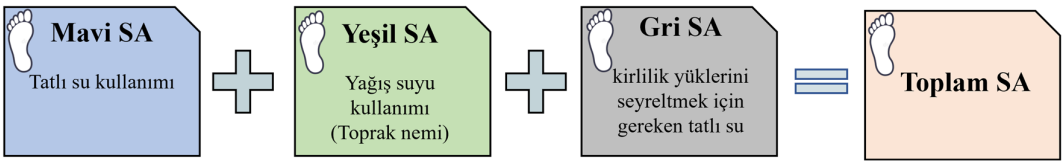
SA kavramı 21. yüzyılın başından bu yana hızla gelişmiştir. Araştırmacılar arasındaki işbirliğini artırmak ve kullanılan metodu iyileştirmek amacıyla 2008 yılında Su Ayak İzi Ağı (WFN) kurulmuştur (Muratoglu, 2021). SA metodolojisi, Hoekstra vd. (2011) tarafından "*Su Ayak İzi Değerlendirme Kılavuzu*"nun yayınlanmasıyla daha da geliştirilmiştir. Son olarak, ISO (Uluslararası Standardizasyon Örgütü) kapsamında, SA kavramı standartlaştırılmış ve "*su ile ilişkili olası çevresel etkileri analiz eden ve su mevcudiyeti ve su kullanımı, doğal çevre, insan sağlığı ve su kaynakları dahil olmak üzere tüm çevresel yönleri dikkate alan metrik*" olarak tanımlanmıştır (ISO 14046, 2014).

SA kavramı, ortaya atıldığından bu yana metodolojisi, çevresel etkileri ve uygulamaları açısından çeşitli gelişmeler kaydetmiştir. Bu alanda yapılan ilk araştırmalar, sanal su transferinin dünya çapında bir değerlendirmesini yapmayı amaçlamışlardır. Daha sonra, ürün ve bölgelerin su ayak izinin üç bileşenini ayrıntılı olarak ölçülmesine odaklanılmıştır (Lovarelli vd., 2016). Ayrıca, ilk çalışmalarda sadece hacimsel SA yaklaşımı kullanılırken, daha sonraki çalışmalarda Yaşam Döngüsü Analizi (YDA) tabanlı SA yaklaşımından da yararlanılmıştır. SA yaklaşımları ve metodolojisi ile kavramın avantajları ve sınırları Bölüm 3.5'te ayrıntılı olarak verilmiştir.

2.1.3.1. Suyun renkleri

SA metodolojisinde, bir ürün tarafından kullanılan tatlı su, mavi, yeşil ve gri olmak üzere üç bileşene ayrılmaktadır (Hoekstra, vd., 2011) (Şekil 2.4). Mavi SA, üretim ve tedarik sürecinde nehirlerden, doğal ve insan yapımı rezervuarlardan ve yeraltı suyu kaynaklarından kullanılan tatlı su miktarını ifade etmektedir (Masud vd., 2018). Hoekstra vd. (2011) mavi suyu, yüzey ve yeraltı sularının tüketiminin bir göstergesi olarak tanımlamaktadır. Burada "tüketim" terimi, suyun doğadan kalıcı olarak kaybedilmesi

anlamına gelmemektedir. Su, hidrolojik döngü yoluyla sürekli olarak yenilenen bir kaynaktır. Bununla birlikte, herhangi bir zamanda bir bölgede sınırlı miktarda yüzey ve yeraltı suyu mevcuttur ve insanlar belirli bir dönemde bu miktardan fazlasını tüketemez. Dolayısıyla, mavi SA belirli bir zaman-mekan sınırı içinde su kullanım düzeyini göstermektedir (Hoekstra vd. (2011).



Şekil 2.4. Su ayak izinin alt bileşenleri

Yeşil su, yüzey akışı ve yeraltı suyu şarjı hariç olmak üzere, zeminin üst katmanlarında ve bitki örtüsünde depolanan, yağışın karada kalan kısmını ifade eder. Mavi su ayak izine benzer şekilde, yeşil su ayak izi de insani su tüketimini gösterir (Hoekstra vd., 2009) ve ürün veya hizmetler için kullanılan yağmur suyu miktarını temsil eder. Bununla birlikte yeşil SA, mavi su ayak izine kıyasla daha dar bir kapsama sahiptir ve çoğunlukla sadece tarımsal üretim yoluyla su kaynaklarının dolaylı kullanımını temsil etmektedir (Liu vd., 2009; Veettil ve Mishra, 2016).

Son olarak gri su, çevre standartlarını karşılamak üzere tatlı su kaynaklarındaki kirlilik yüklerini seyreltmek için gereken tatlı su miktarı olarak tanımlanmaktadır (Jeswani ve Azapagic, 2011; Ercin ve Hoekstra, 2014). Gri SA kavramı ilk olarak Hoekstra ve Chapagain (2008) tarafından ortaya atılmıştır. Ancak, nispeten yeni olan bu metodoloji tam olarak oturmamış ve birçok eksikliği bulunmaktadır (Hoekstra vd., 2009). Örneğin, Muratoglu (2020b), gri SA çalışmalarında sabit bir sızıntı katsayısının kullanıldığını ve bu durumun gri SA hesaplarının doğruluğunu azalttığını belirtmiştir. Gri SA metodolojisindeki kısıtlar Bölüm 3.5.5.2.'de detaylı olarak tartışılmıştır. Gri su ayak izinin doğrudan kirli su miktarını değil, kirliliği ortadan kaldırmak için gereken temiz su miktarını temsil ettiğinin (Hoekstra vd., 2009) altı çizilmelidir. Bu nedenle, gri SA su kirliliğinin şiddetini temsil eden bir göstergedir. Özetle, gri SA kirlilik yükünün ve çevresel standartların bir fonksiyonu iken; mavi ve yeşil SA, evapotranspirasyonun ve toprak neminin bir fonksiyonudur (Muratoglu, 2021).

2.1.4. Su ayak izinde farklı yaklaşımlar

Su ayak izinin hesaplanması için hacimsel SA ve Yaşam Döngüsü Analizi (YDA)

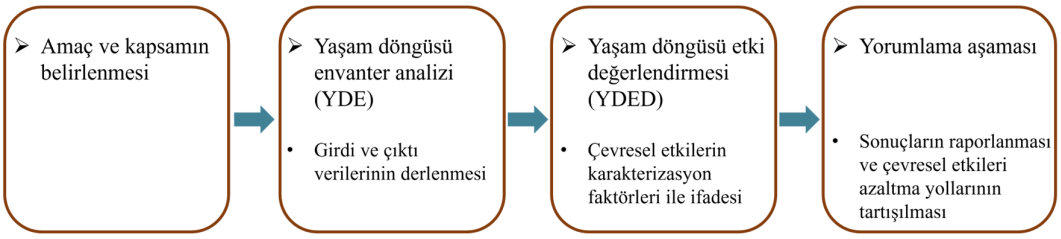
temelli SA olmak üzere iki ana yaklaşım bulunmaktadır (Lovarelli vd., 2016). Her iki yaklaşımın amacı su kaynaklarının korunmasına dolaylı olarak katkıda bulunmak olsa da, bunlar önemli metodolojik farklılıklar içermektedirler (Boulay vd., 2013). Hacimsel SA yaklaşımı, ilk SA analizlerinde kullanılan orijinal yöntem olup insan faaliyetleri ile tatlı su kaynakları arasında bağlantı kuran su yönetimi odaklı bir yaklaşım sergilemektedir (Hoekstra, 2016). Öte yandan, YDA komitesi de 2009 yılından bu yana SA ile ilgilenmekte ve YDA tabanlı SA için yeni yöntemler geliştirmektedir (Hoekstra, 2016). YDA tabanlı SA metodolojisinin temel amacı, su mevcudiyetinin ve su kıtlığının çevre üzerindeki potansiyel etkisini incelemektir (Zhai vd., 2021).

2.1.4.1. YDA tabanlı SA yaklaşımı

YDA ilk olarak 1970'lerde enerji kullanımını analiz etmek için geliştirilmiş bir metottur (Guine vd., 2002). Daha sonra, 1980'lerde yaşam döngüsü etki modelleri tanıtılmıştır (Guinee vd., 2011). YDA, özellikle iklim değişikliği, ötrofikasyon, ozon tabakasının incelmesi gibi potansiyel çevresel etkilerin, hammaddeden kullanım sonrası atık bertarafına kadar tüm üretim ve tedarik zincirleri de dahil olmak üzere, bir ürünün yaşam döngüsü boyunca değerlendirilmesi için kullanılan bir yöntemdir (Daylan vd., 2011). Bu nedenle YDA, doğal çevre, insan sağlığı ve doğal kaynaklar üzerindeki etkileri inceleyen kapsamlı bir değerlendirme sağlamaktadır (Finnveden vd., 2009).

YDA, ISO standartlarına uygun olarak amaç ve kapsamın belirlenmesi, yaşam döngüsü envanter analizi (YDE), yaşam döngüsü etki değerlendirmesi (YDED) ve yorumlama olmak üzere dört ana adımda gerçekleştirilmektedir (Klöpffer, 1997; Daylan vd., 2011) (Şekil 2.5). YDA çalışmalarında, ilk olarak, çalışmanın amacı ve karar verme sürecine dahil edilecek çevresel etkilerin boyutları belirlenmelidir (Daylan vd., 2011). İkinci aşamada, tüm girdi ve çıktı verileri derlenmekte ve YDE analizi gerçekleştirilmektedir. Üçüncü aşamada ise YDED, potansiyel çevresel etkiler YDE verileri kullanılarak değerlendirilmektedir (Rashid ve Yusoff, 2015). Bu aşamada, YDE verileri etki faktörleri ile çarpılarak, çevresel etki kategorileri için göstergeler üretilmektedir. Buradaki etki faktörü, bir kirleticinin ilgili kategori üzerindeki etki potansiyelini temsil etmektedir. Örneğin küresel ısınma potansiyeli CO_2 eşdeğeri birimlerle ifade edilmektedir. CH_4 ve N_2O gibi sera gazı emisyonlarının küresel ısınmaya katkılarını hesaplamak için, etki faktörleri ile çarpılarak CO_2 eşdeğerleri belirlenmektedir

(Brentrup vd., 2004). Son aşamada ise YDED sonuçları sunularak, olumsuz çevresel etkilerin nasıl azaltılabileceği tartışılmaktadır (Brentrup vd., 2001).



Şekil 2.5. ISO standartlarına göre YDA değerlendirme aşamaları

YDA uzmanları, SA analizlerini çeşitli şekillerde eleştirmişlerdir. YDA yaklaşımına göre su ayak izi; karbon ayak izi gibi diğer ekolojik ayak izi kavramlarından farklıdır. Buna göre SA, ekolojik ayak izlerinin aksine daha yerel bir etkiye sahiptir. Örneğin, bir otomobilin İstanbul ve Londra'daki karbon emisyonu etkisi karşılaştırılabilirken, aynı şey SA için söylenemeyeceği iddia edilmektedir (Wichelns, 2015). Bu sebeplerle bazı YDA araştırmacıları, hacimsel SA yaklaşımının su yönetimi için yararlı olmasına rağmen, YDA için çok önemli olan su tüketiminin çevresel ve sosyal etkilerini dikkate almadığını savunmaktadır (Jeswani ve Azapagic, 2011). Buna karşın bazı araştırmacılar ise, YDA metodolojisinin çevresel etkiyi azaltma ve sürdürülebilirliği teşvik etme avantajlarına rağmen, su kaynaklarının adil ve verimli tahsisini dikkate almadığını iddia etmektedirler (Hoekstra, 2016).

2.1.4.2. Hacimsel SA yaklaşımı

Bu bölümde hacimsel SA yönteminin kavramsal temeli ve YDA yaklaşımından farklılıkları tartışılmaktadır. Hoekstra (2016)'ya göre hacimsel yaklaşımla, su kaynaklarının sürdürülebilirliği analiz edilebilir ve tedarik zinciri boyunca ürünlerin su kullanımı belirlenebilir. Ayrıca, hacimsel SA yaklaşımı tedarik zinciri içinde ortaya çıkabilecek dış su kaynaklarına bağımlılığın belirlenmesine yardımcı olabilir. Öte yandan bu yaklaşımın önemli bir avantajı da su kaynaklarının adil ve eşit bir şekilde tüketilmesini sağlamasıdır (Boulay vd., 2013).

Hacimsel yaklaşıma göre SST ile, su zengini bölgelerde yüksek su gereksinimi olan ürünlerin yetiştirilmesi stratejisi ile su kıtlığı olan bölgeler üzerinde olumlu bir etki oluşturulabilir (Hoekstra, 2016). Ancak YDA yaklaşımı, ticaretin sadece su kaynaklarına dayalı olarak analiz edilmesinin pratik olmadığını ve ülkelerin fırsat maliyetlerinin,

hammadde kaynaklarının ve endüstriyel teknolojilerinin de dikkate alınması gerektiğini öne sürmektedir (Wichelns, 2015). Ayrıca YDA araştırmacıları, ekilebilir arazinin, gıda ticareti üzerinde, suyun mevcudiyetinden daha büyük bir etkiye sahip olduğunu bildirmişlerdir. Aynı zamanda YDA metodolojisinde, bir ülkedeki su tüketiminin başka bir ülkedeki su mevcudiyeti üzerinde çok az etkisi olduğu savunulmaktadır (Kumar ve Singh, 2005). Buna karşın, literatürde birçok çalışma sanal su transferinin ulusal ve uluslararası su bütçelerinin dengelenmesinde ve su kıtlığının hafifletilmesinde önemli bir rol oynadığını göstermektedir (Ming ve Chen, 2013). Dahası, Sun vd. (2021), İsrail ve Ürdün gibi su kıtlığı çeken bazı ülkelerin, su stresini hafifletmek amacıyla yüksek SS içeriğine sahip ürünlerin ihracatını azaltmaya yönelik politikalar geliştirdiğini belirtmiştir.

Hacimsel ve YDA tabanlı SA yaklaşımları arasındaki temel fark odak noktalarında yatmaktadır. YDA öncelikle ürünlerle ilgilenirken, hacimsel SA yaklaşımı su yönetimiyle ilgilenmektedir. Daha basit bir ifadeyle, hacimsel SA yaklaşımı tatlı su kaynaklarının hem yerel hem de küresel ortamlarda adil, verimli ve sürdürülebilir tahsisini ve kullanımını amaçlarken, YDA yaklaşımı ürünlerin sürdürülebilirliğini kapsamlı bir süreçle değerlendirmektedir (Boulay vd., 2013). Dolayısıyla araştırmacıların bu farklılıkları tanıması ve hedeflerine göre uygun yöntemi seçmesi önemlidir. Mevcut çalışmada, tarımsal ürün deseni optimizasyonu ile su kaynaklarının daha verimli ve sürdürülebilir tahsisinin sağlanmasının amaçlanmasından dolayı hacimsel SA yaklaşımı benimsenmiştir.

2.1.5. Hidrolojik modelleme

Dünya yüzeyinde, yer altında ve atmosferde bulunan su molekülleri sürekli bir döngü halinde hareket etmektedirler. Suyun, yeryüzü ve atmosfer arasındaki bu döngüsel hareketinin tüm aşamaları hidrolojik döngü olarak adlandırılmaktadır. Bu döngü içerisinde suyun hareketinin tahmin edilmesi, hidroloji biliminin doğası gereği oldukça zordur. Çünkü, suyun hareketini etkileyen topoğrafya, zemin yapısı, arazi örtüsü ve iklim parametreleri gibi birçok etmen bulunmakta ve bunlar da kendi içerisinde oldukça fazla belirsizlik barındırmaktadır. Dolayısıyla, yağışla birlikte yeryüzüne düşen suyun ne kadarının hangi hızda harekete geçeceği, ne kadarının yeraltı suyuna dönüşeceği net bir şekilde belirlenememektedir. Bununla birlikte, suyun hareketini tahmin etmek amacıyla

birçok matematiksel ve ampirik model geliştirilmiştir. Bu modeller genel bir ifade ile hidrolojik modeller olarak adlandırılmaktadır.

Hidrolojik modeller, rasyonel metotla başlayıp günümüzde dağılımlı fiziksel modellere kadar gelişim göstermiştir (Todini, 2007). Günümüzde gelişen bilgisayar teknolojisi ile beraber birçok paket programların birleştirilmesi ile geniş kapsamlı hidrolojik modelleme programları oluşturulmuştur. Bu programlar, havzaların modellerini bilgisayar ortamında oluşturularak, gerçek saha koşullarında belirlenmesi oldukça zor olan hidrolojik parametrelerin tahmin edilmesine olanak sağlamıştır. Dolayısıyla hidrolojik modeller, su kaynaklarının planlaması, yağış-akış ilişkisinin modellemesi, taşkın tahmini ve yönetimi, su kalitesi araştırmaları, yer altı suyu modellemesi ve iklim değişikliği etkilerinin incelenmesi gibi birçok konuda geniş kullanım alanına sahiptir (Pechlivanidis vd., 2011).

Hidrolojik modeller, teorik altyapıları, yaklaşımları ve kullandıkları modeller bakımından bazı farklılıklar göstermektedirler. Bu modeller genel olarak stokastik ve deterministik olmak üzere ikiye ayrılmaktadırlar (Abdulkareem vd., 2018). Deterministik modeller ise kendi içerisinde kavramsal, fiziksel ve ampirik olmak üzere üçe ayrılmaktadır (Wang vd., 2019; Awasthi ve Kumar, 2021). Fiziksel modeller, karmaşık çözümler gerektiren ve çok miktarda veriye ihtiyaç duyan, kütlenin korunumu gibi fiziksel denklemlere dayanan modellerdir. Bu modellere HEC-HMS, SWAT ve MIKESHE örnek olarak verilebilir (Abdulkareem vd., 2018). Kavramsal modellerde (TOPMODEL ve HBV model vb.) ise hidrolojik döngü daha basit matematiksel ifadelerle simüle edilmektedir (Liu vd., 2019). Son olarak ampirik modeller (birim hidrograf vb.) ise verilerin, deneysel yöntemlerle analiz edilmesine ve hidrolojik döngü içerisindeki parametreler arasında ilişki kurulmasına dayanmaktadır (Pechlivanidis vd., 2011; Akyürek vd., 2019). Ampirik modeller havzanın fiziksel süreçlerini değil, girdi ve çıktı verilerinden türetilen matematiksel denklemleri içermektedir (Devi vd., 2015). Bunların dışında, hidrolojik modeller bütünleşik ve dağılımlı olarak da ikiye ayrılabilirler (Wang vd., 2019). Bütünleşik (lumped) modellerde arazi kullanımı, toprak özellikleri gibi veriler ortalama tek bir değer olarak kabul edilmektedir (Chathuranika vd., 2022). Dolayısıyla bu modeller havzayı gerçek anlamda temsil etmekten uzaktırlar. Dağılımlı modeller ise verilerin veya parametrelerin havza içerisindeki dağılımlarını dikkate alarak bir simülasyon oluşturmaktadırlar.

Literatürde hidrolojik modellemede kullanılan birçok program bulunmaktadır. WEAP (Water Evaluation and Planning System), HSPF (The Hydrologic Simulation

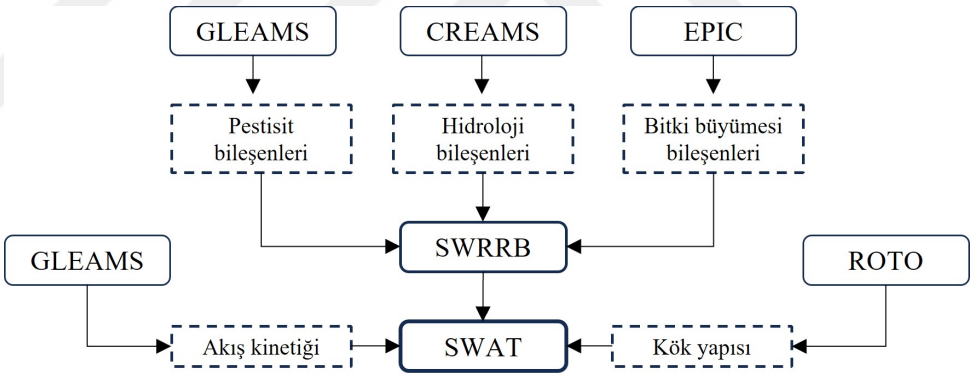
Program FORTRAN), HEC-HMS, MIKE-SHE ve SWAT (Soil and Water Assessment Tool) bu programlardan bazılarıdır (Güngör, 2018). HSPF, nehir ve göletlerde su kalitesini simüle etme amaçlı USEPA (Amerikan Çevre Koruma Ajansı) ve USGS (Amerikan Jeolojik Araştırmaları Kurumu) tarafından geliştirilmiştir (Yaykıran, 2016). HEC-HMS ise USACE (ABD Ordusu Mühendisler Kolordusu) tarafından uzun yıllardır geliştirilerek günümüzdeki şeklini almıştır. HEC-HMS modeli; taşkın kontrolü, rezervuar işletmeciliği, taşkın uyarı sistemi planlanması ve dolu savak kapasitesinin incelenmesi gibi birçok konuda kullanılmaktadır (Halwatura ve Najim, 2013; Güngör, 2018). Bir diğer hidrolojik modelleme programı olan WEAP ise 1988 yılında SEI (Stockholm Çevre Enstitüsü) tarafından su bütçelerinin hesaplanması ve farklı senaryolar altında su talebinin ve temininin değerlendirilmesi amacıyla geliştirilmiştir (Arslan, 2019). WEAP modeli, su kaynaklarını ve su taleplerini simüle etmesinin yanında, uygulanan politikaların su miktarı, su kalitesi ve çevre üzerindeki etkileri analiz eden kompleks bir yazılımdır (Agarwal vd., 2019). Bununla birlikte, WEAP daha çok su kaynaklarının talep ve arzına yönelik senaryoların analizinde kullanılmaktadır (Adgolign vd., 2016). Bu senaryolar iklim değişikliği, havza durumu ve değişikliği, çevresel değişiklikler gibi durumları içerebilmektedir (Rajendran vd., 2020). Son olarak SWAT ise su bütçesi ve su kirliliği hesaplamalarında kullanılan (Kabal, 2019) USDA (Amerika Birleşik Devletleri Tarım Bakanlığı) ve Texas Üniversitesi tarafından 30 yıllık bir süreçte sürekli geliştirilen (Gassman vd., 2007) hidrolojik modelleme programıdır. SWAT, havzaları doğruya yakın bir şekilde modellemesi, kalibrasyon ve belirsizlik analizi gibi ek paket programlar sunması (Askar, 2020) nedeniyle literatürde en çok kabul görmüş (Moreira vd., 2020) ve uygulanmış hidrolojik modellerdendir (Peker ve Sorman, 2021).

2.1.5.1. SWAT modeli

SWAT, J. Arnold tarafından USDA için geliştirilmiş geniş kapsamlı bir modeldir. Bu model, büyük havzalarda uzun yıllar boyunca değişen toprak yapısının, arazi örtüsünün ve arazi kullanımının su kaynakları üzerindeki etkisini tahmin etmek amacıyla kullanılmaktadır (Neitsch vd., 2011). SWAT fiziksel temelli günlük olarak simülasyon yapabilen, yarı dağılımlı (Akoko vd., 2021; Gungor vd., 2016) sürekli bir modeldir (Arnold vd., 1998; Dutal, 2020). Ayrıca SWAT, sekiz bileşenden (hidroloji, meteoroloji, sediment, toprak sıcaklığı, bitki büyümesi, besinler, pestisitler/böcek ilaçları ve tarımsal yönetim) (Borah ve Bera, 2003) ve yüzlerce eşitlikten oluşan, geniş çerçeveli bir

simülasyon aracıdır (Zhao vd., 2013). Bu model ile yüzey akışı, toprak nemi, evapotranspirasyon, sediment taşınımı, bitki büyümesi, su kalitesi ve tarımsal yönetim uygulamaları simüle edilebilmektedir (Zhao vd., 2013).

SWAT modelinin atası SWRRB (Simulator for Water Resources in Rural Basins) modeli olarak kabul edilebilir (Devi vd., 2015; Borah ve Bera, 2003). SWRRB modeli kırsal havzalardaki hidrolojik süreçlerin simülasyonu için CREAMS günlük yağış hidrolojisi modelinin modifiye edilmesi (Arnold ve Williams, 1987), EPIC mahsul büyüme alt modelinin eklenmesi ve GLEAMS pestisit bileşeninin dahil edilmesi ile geliştirilmiştir (Arnold vd., 2012; Gassman vd., 2007). SWRRB modeli, su yönetiminin aşağı havzalara (mansap) etkisini incelemek amacıyla geliştirilmiş olan ROTO modeli ile birleştirilerek SWAT modeli oluşturulmuştur (Arnold vd., 2012). Ayrıca modele, QUAL2E modelinden akım içi kinetik rutinler de dahil edilmiştir (Gassman vd., 2007) (Şekil 2.6). Bununla birlikte daha sonraları modele birçok alt model ve yöntem eklenerek günümüzdeki kapasitesine çıkarılmıştır (Arnold vd., 2012).

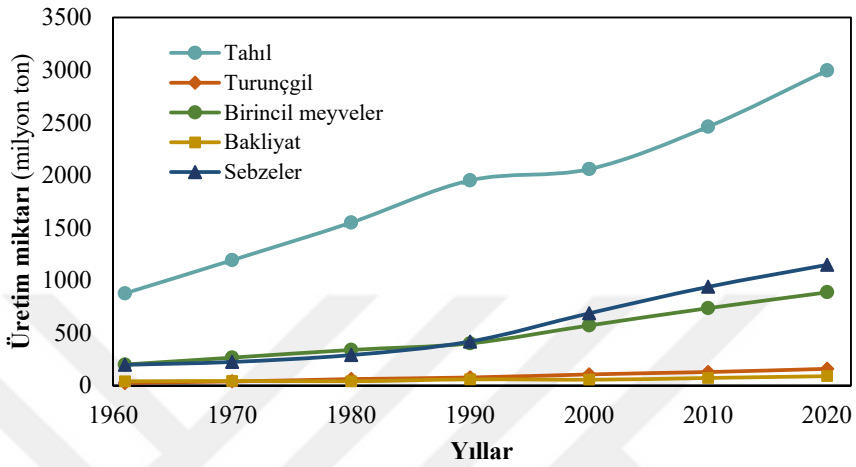


Şekil 2.6. SWAT modelinin genel bileşenleri
(Gassman vd. (2007)'den uyarlanmıştır.)

2.1.6. Ülkemizde ve dünyada tarım sektörü

İnsanlık, tarih boyunca sürekli gelişim göstermiş ve günümüzdeki refah düzeyine ve teknolojiye ulaşmıştır. Bununla birlikte, tarih akışında gerçekleşen bazı kritik gelişmelerin ardından insanoğlunun yaşantısında önemli sıçramalar yaşanmıştır. Bu kritik süreçlerin en önemlileri, tarımsal devrim ve sanayi devrimi olarak görülmektedir (Direk, 2012). Tarımsal devrim insanlığın yerleşik düzene geçmesini, beslenme alışkanlıklarının değişmesini ve teknolojik çalışmaların artmasını sağlamıştır. Günümüzde de yaşantımızın en önemli faaliyetlerinden biri olan tarım, küresel ısınma, kirlilik, su kıtlığı

ve iklim değişikliği gibi problemler ile birlikte global anlamda stratejik bir sektör haline gelmiştir. Şekil 2.7'de farklı ürün gruplarının yıllara göre dünya genelinde üretim miktarlarının grafiği gösterilmiştir.



Şekil 2.7. Farklı ürün gruplarının yıllara göre dünya genelinde üretim miktarları (FAOSTAT (2022) verileri ile oluşturulmuştur)

Şekil 2.7'de dünya genelinde bütün ürün gruplarının yıllar içerisinde belirli oranlarda artış gösterdiği görülmektedir. Nüfus artışı, teknolojik gelişmeler ve refah seviyesi göz önüne alındığında bu beklenen bir durumdur. Fakat Birleşmiş Milletler raporlarına göre 2020 yılında aç insan sayısı 690 milyon iken (BM, 2020) 2021 yılında bu sayı 811 milyona ulaşmıştır (BM, 2021). Su kıtlığı ve iklim değişikliği ile beraber gelecek yıllarda tarımsal üretim artış hızında düşüşlerin yaşanacağı ve açlık sınırının altındaki insan sayısının artacağı öngörülmektedir. Bu durum tarım sektörünün kritik ve stratejik önemini gözler önüne sermektedir.

Türkiye, birçok ürün grubunda dünyada önemli bir yere sahip olmasına karşın, bazı ürün gruplarında üretim kapasitesi bakımından dünya üretiminin gerisinde kalmaktadır. Tablo 2.2'de 2020 yılında bazı ürünlerin farklı ülkelerdeki üretim miktarları karşılaştırılmıştır. Türkiye'nin tek başına dünya genelindeki arpa, elma, üzüm ve zeytin üretiminin yüzde 5'inden fazlasını karşıladığı görülmektedir. Bununla birlikte mısır ve pirinç üretiminde yüzde 1'in altında kalmaktadır.

Tablo 2.2. 2020 yılında bazı ürünlerin farklı ülkelerdeki üretim miktarları (bin ton) (FAOSTAT, 2024)

	ABD	Çin	Hindistan	Rusya	Türkiye	Dünya Geneli	Türkiye/Dünya(%)
Arpa	3599	900	1720	20939	8300	157030	5.3
Buğday	49691	134255	107590	85896	20500	760925	2.7
Ayçiçeği tohumu	1353	2375	213	13314	2067	50230	4.1
Soya Fasulyesi	112549	19604	11226	4308	155	353464	4.4
Mısır	360252	260876	30160	13879	6500	1162353	0.6
Pamuk tohumu	9737	29500	17731	-	1774	83113	2.1
Pirinç	10323	213610	178305	1142	980	756744	0.1
Elma	4650	40501	2734	2040	4300	86442	5.0
Üzüm	5389	14843	3125	682	4209	78034	5.4
Zeytin	61	2.62	51300	-	1316	23640	5.6
Patates	18790	78236	51300	19607	5200	359071	1.5

Ülkemiz, iklim ve toprak çeşitliliğinin fazla olması, iş gücü potansiyelinin yüksek olması ve verimli topraklara sahip olması sebebiyle tarımsal üretim potansiyeli yüksek bir bölgedir (Köse Gül, 2017). Fakat tarım arazilerinin miras nedeniyle çok fazla bölünmesi (Günay ve Çelik, 2021), bazı bölgelerdeki sulama suyu yetersizliği, kırsal yerleşim yerlerinden kentsel bölgelere olan göç gibi nedenlerle ülkemizde tarım sektörü, gerçek potansiyelinin altında kalmaktadır. Ülkemizin tarım sektöründeki güçlü ve zayıf yönleri Tablo 2.3'te maddeler halinde gösterilmiştir.

Tablo 2.3. Türkiye'nin tarım sektöründeki güçlü ve zayıf yönleri (Günay ve Çelik, 2021)

Güçlü Yönler	Zayıf Yönler
• Biyolojik çeşitlilik	• Akademi-endüstri-kamu iş birliği düşüklüğü
• Zengin iklim ve coğrafi koşullar	• Üretimde planlama eksikliği
• Tarım arazisi ve iş gücünün yeterli olması	• Tarımsal veri eksikliği
• Tarıma dayalı sanayinin varlığı	• Bazı ürünlerde ithalata bağımlılık
• Dünyada 55 ürünün üretiminde ilk 10'da olunması	• Çok sayıda ama sınırlı büyüklükte tarım arazileri
• Artmakta olan uluslararası iş birliği	• Pazarlama yetersizliği

2.2. Su Ayak İzi Çalışmaları

Bu bölümde mevcut çalışmanın hedefleri ile ilgili ve araştırmacıların üzerine yoğunlaştığı, SA azaltma yöntemleri, iklim değişikliğinin su ayak izine etkisi ve tarımsal ürün SA değerlendirme çalışmalarının geniş bir literatür özeti sunulmuştur.

2.2.1. Su ayak izini azaltmaya yönelik çalışmalar

Dünyadaki toplam tatlı su tüketiminin çok büyük bir kısmından tarım sektörü sorumludur. Dolayısıyla, su kıtlığını yönetmek için en temel stratejilerden biri bu sektördeki su kullanımını azaltmaktır (Ababaei ve Etedali, 2017). Bu bağlamda su ayak izi analizi, tarımsal su kullanımının değerlendirilmesine ve bu konuda etkili stratejiler oluşturulmasına olanak sağlamaktadır. Bu stratejilerin uygulanması, tarımsal ürünlerin su ayak izini azaltarak su stresini yönetmeyi olumlu yönde etkileyebilmektedir. Bu doğrultuda, yağışların etkinliğini en üst düzeye çıkarmak, su kullanım verimliliğini artırmak için gelişmiş sulama tekniklerini benimsemek, gereksiz buharlaşmayı azaltmak için malç kullanmak, gübre israfını en aza indirmek, optimum tarımsal uygulamalar yoluyla ürün verimini artırmak, ürün desenini ve yönetim stratejilerini optimize etmek gibi çeşitli stratejiler uygulanabilmektedir (Ababaei ve Etedali, 2017; Deihimfard vd., 2022; Chapagain ve Hoekstra, 2004; Nouri vd., 2019; Etedali vd., 2019).

Tarımda su ayak izinin azaltılmasına yönelik araştırmalar, tarımsal yönetim uygulamalarının etkinliği ve ürün deseninin ayarlanması olmak üzere iki başlık altında incelenmiştir. Tarımsal yönetim uygulamaları aşağıda incelenmiş olup, ürün deseni optimizasyonu çalışmaları Bölüm 2.4'te tartışılmıştır.

2.2.1.1. Tarımsal yönetim uygulamaları

Malçlama, sulama yöntemleri, bitkisel filtreler ve gübre uygulamaları gibi zirai uygulamaların SA üzerindeki etkisini anlamak için çok sayıda çalışma yapılmıştır. Bu tekniklerden biri olan malçlama, uygun büyüme koşullarını sağlamak için bitkilerin etrafındaki yüzeyi örtme yöntemidir. Bu uygulama, özellikle kurak bölgelerde su tasarrufu ve erozyon kontrolü gibi birçok amaca hizmet etmektedir (Bhardwaj, 2013). Özellikle SA alanında yapılan araştırmalar, malçlamanın su ayak izini azaltmada olumlu bir etkisi olduğunu göstermektedir. Wang vd. (2022), stres ağırlıklı SA perspektifini (YDA konsepti) kullanmak suretiyle malçlamanın mavi su ayak izini %14.8 oranında azalttığını ve yeşil/mavi SA oranını artırdığını göstermişlerdir. Buna karşın bazı çalışmalarda ise malçlamanın SA üzerinde yalnızca küçük bir etkisi olduğunu öne sürülmüştür. Nouri vd. (2019) malçlamanın mavi su ayak izini yalnızca %3.6 oranında azalttığını gözlemlemişlerdir. Bu durumda, malçlamanın su tasarrufu açısından maliyet etkinliğini değerlendirmek önemlidir. Malçlama kullanımındaki amaç yalnızca su tasarrufu sağlamaksa, diğer tarımsal yönetim uygulamaları kullanılarak daha etkili

sonuçlar elde edilebilir. Nitekim, Chukalla vd. (2015) sulama teknikleri ve stratejileri malçlamadan daha etkili olduğunu ifade etmişlerdir. Çalışmalarında, tarımsal yönetim stratejilerinin su ayak izinde %29'luk (mavi SA için %44 ve yeşil SA için %14) azalma sağlayabildiğini belirtmişlerdir. Bir başka çalışmada Jamshidi vd. (2020), bitkisel filtre şeritlerini değerlendirmek için SWAT modelini kullanmışlardır. Filtre şeritlerinin kirletici yüklerini azaltmada olumlu bir etkiye sahip olmasına karşın, ürün verimini olumsuz etkileyebileceklerini ifade etmişlerdir. Bununla birlikte, çalışma alanlarının düşük bir gri SA oranına sahip olduğunu, bu sebeple bitkisel filtre şeritleri uygulamasının su ayak izini azaltmada yetersiz kaldığı sonucuna varmışlardır.

Bu doğrultuda, tarımsal yönetim uygulamaları yoluyla su ayak izini minimize etmek için, çalışma alanındaki belirli koşullara uygun, maliyet etkin yöntemlerin seçilmesi oldukça önemlidir. Örneğin yeterli yağış nedeniyle mavi su ayak izinin zaten minimum düzeyde olduğu bölgelerde malçlamanın su ayak izini dikkate değer ölçüde azaltmayabileceği göz önüne alınarak maliyet etkinliği değerlendirilmelidir. Benzer şekilde, gri SA miktarlarının zaten düşük olduğu bölgelerde bitkisel filtre şeritleri uygulamasının su ayak izini etkili bir şekilde azaltmayacağı göz önüne alınmalıdır.

2.2.2. İklim değişikliği senaryolarının etkisi

Küresel ısınma, yağış rejimindeki değişimler ve artan atmosferik CO_2 seviyeleri gibi iklim değişikliğinin unsurları, tarımsal üretim üzerinde önemli etkilere sahiptirler (Kobuliev vd., 2021). Bu faktörlerden sıcaklıktaki artış, bitki su tüketimini artırarak su kaynakları üzerinde baskı oluşturmaktadır. Yağışlardaki dalgalanmalar ise sulama suyu ihtiyacını önemli ölçüde etkilemektedir (Bocchiola vd., 2013). Buna karşın, iklim değişikliğinin diğer olumsuz etkilerinden farklı olarak, CO_2 konsantrasyonundaki artış ise pirinç ve buğday (C3 bitkileri) gibi ürünlerin verimlerini artırmaktadır (Bocchiola, 2015). Dolayısıyla, atmosferdeki CO_2 konsantrasyonunun artması, küresel ısınmanın olumsuz etkilerini hafifleterek mahsul verimini artırabilmektedir (Deihimfard vd., 2022). Dahası, CO_2 konsantrasyonundaki artış, bitkilerin stomalarını kapatmasına ve transpirasyonu azaltmasına neden olmaktadır (Chen vd., 2021; Bocchiola, 2015). Öte yandan, küresel ısınmanın mahsul olgunlaşmasını hızlandırması da tarım sektörü için olumlu bir etkiye sahiptir (Bocchiola, 2015; Shrestha vd., 2017). Sonuç olarak, tüm bu iklim değişikliği parametrelerinin SA bileşenleri üzerinde doğrudan veya dolaylı olarak hem olumlu hem de olumsuz etkileri olduğu görülmektedir (Zheng vd., 2020).

İklim değişikliğinin SA üzerindeki etkisine ilişkin yapılan çalışmaların çoğu belirli bölgelere ve ürünlere odaklanmıştır. Küresel bir çalışmada, Ercin ve Hoekstra (2014) küresel su ayak izinin en iyi ve en kötü durum senaryoları için sırasıyla %18-180 oranında artacağını belirtmişlerdir. Ayrıca, yeşil su ayak izinin tüm senaryolarda sürekli olarak en büyük bileşen olarak baskın olduğunu ve en yüksek mavi SA miktarının tahıl grubunda bulunduğunu gözlemlemişlerdir.

Buğdayın birçok üründe birincil bileşen olarak rol aldığı ve gıda güvenliğinin sağlanmasındaki önemi göz önüne alındığında, bu ürünün gelecek projeksiyonlarının değerlendirilmesi oldukça önem arz etmektedir. Bu bağlamda, buğdayın verimindeki ve su ayak izindeki değişiklikleri değerlendirmeye yönelik birçok çalışma yapılmıştır. Deihimfard vd. (2022), Chen vd. (2021) ve Garofalo vd. (2019); artan atmosferik CO_2 konsantrasyonlarının buğday veriminde artışa ve su ayak izinde düşüşe yol açacağını öngörmüşlerdir. Buna karşın, artan sıcaklıkların bitki su tüketimindeki artışı da tetikleyeceği göz ardı edilmemelidir. Kobuliev vd. (2021), verimde beklenen artışa rağmen buğdayın toplam su ayak izinin %7.5-11 oranında artmasını ön gördüklerini ifade etmişlerdir. Öte yandan, Jia vd. (2022) ve Govere vd. (2020) gibi çeşitli çalışmalar, bu projeksiyonlarla çelişerek verimin aslında azalabileceğini öne sürmektedir. Sonuç olarak su ayak izinin iklim değişikliğine duyarlılığı değişkenlik arz etmektedir. Elbeltagi vd. (2020)'de çalışmalarında iklim değişikliğindeki bölgesel farklılıkların SA üzerindeki etkisini vurgulamışlardır.

Pirinç, yetiştirilmesi için ciddi miktarda su gerektiren önemli bir temel gıda olması nedeniyle, SA araştırmalarının diğer bir odak noktası haline gelmiştir. Literatür çalışmaları, pirincin iklim değişikliklerine karşı oldukça hassas olduğunu ortaya koymaktadır. Shrestha vd. (2017)'ye göre, bazı pirinç çeşitlerinin su ayak izleri 2020-2050-2080 projeksiyonlarında önemli (%92) bir artış gösterecektir. Ancak aynı çalışmada, gelecekteki iklim koşulları altında bazı pirinç çeşitlerinin verimlerinin kurak mevsimlerde iyileşebileceği ve bunun da potansiyel olarak su ayak izinde %42'ye varan bir düşüşe yol açabileceği öne sürülmektedir. Bocchiola (2015) ve Zheng vd. (2020) ise gelecekte pirincin su ayak izinin artacağını öngörmüşlerdir. Öte yandan Arunrat vd. (2020), gelecekte tarımsal aktivitelerin büyük ölçekli alanlarda gerçekleştirileceğini ve daha uygun gübreleme yöntemlerinin kullanılacağını ifade ederek, pirincin gri su ayak izinde kayda değer bir azalma beklediklerini bildirmişlerdir. Buna karşın, Shrestha vd. (2017) iklim değişikliğinin ağırlıklı olarak pirincin mavi su ayak izini etkileyeceğini bildirmişlerdir.

İklim değişikliğinin ürün verimi ve SA üzerindeki etkisini inceleyen çalışmalar Tablo 2.4'te özetlenmiştir.

Tablo 2.4. İklim değişikliğinin SA üzerindeki etkisine ilişkin çalışmaların özeti

Çalışmalar	Ürün çeşidi	Çalışma alanı	Verim	SA
Ercin ve Hoekstra (2014)	Bitkisel üretim	Küresel	-	↑
Deihimfard vd. (2022)	Buğday	İran	↑	↓
Garofalo vd. (2019)	Buğday	Almanya ve İtalya	↑	↓
Kobuliev vd. (2021)	Buğday	Güney Tacikistan	↑	↑
Jia vd. (2022)	Buğday	Çin	değişken*	↓
Govere vd. (2020)	Buğday	Zimbabve	↓	↑ (mavi SA)
Elbeltagi vd. (2020)	Buğday, Mısır	Mısır	bölgesel değişken	
Shrestha vd. (2017)	Pirinç	Taylve	pirinç türüne göre değişir	
Bocchiola (2015)	Pirinç	İtalya	↑	↑
Zheng vd. (2020)	Pirinç	Çin	↓	↑
Arunrat vd. (2020)	Pirinç	Taylve	bölgesel değişken	↓ (gri SA)
Chen vd. (2021)	Mısır, sorgum,	ABD	↓	↓
	Buğday		↑	↓
Bocchiola vd. (2013)	Mısır	İtalya Po Vadisi	↓	↑
Sun vd. (2012)	Yazlık Buğday	Çin	↑	↓
Ayala vd. (2016)	Soya fasulyesi	Amazon	-	↑
Reddy vd. (2022)	Kuru tarım ü.	Hindistan	↑	↓
Zhao vd. (2014)	Mahsuller**	Çin	↑	↓

* İklim değişikliği senaryosuna bağlı olarak değişir.
** Buğday, mısır, soya fasulyesi ve pirinci içerir.

2.2.3. SA değerlendirme çalışmaları

SA çalışmaları küresel ve yerel olmak üzere çeşitli mekânsal ölçeklerde yürütülmektedir. Bitkisel su tüketimine ilişkin öncü çalışma, Hoekstra ve Hung (2002) tarafından küresel ölçekte gerçekleştirilmiştir. Daha sonra Chapagain ve Hoekstra (2003), küresel ölçekli çalışmaların popülerliğinin artmasına önemli katkı sağlamışlardır. Bu çalışmalar, su kaynakları kullanımının ulusal düzeyde karşılaştırılmasını sağlamakta ve küresel eğilimler ile su kaynaklarının geleceği hakkında önemli bilgiler sunmaktadır. Buna karşılık, yerel ölçekli çalışmalar ise saha ölçeğinde su kaynakları yönetimi için stratejiler geliştirmek açısından değerlidir. Bu bölümde, küresel ve yerel ölçekli çalışmalar ile ürün bazlı analizler ayrı ayrı incelenmektedir.

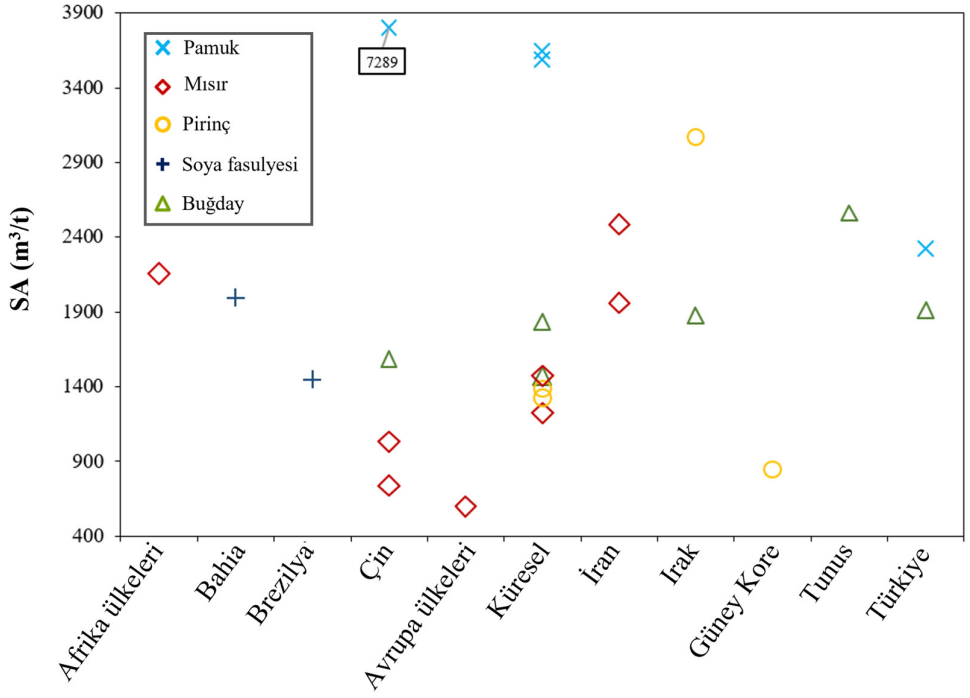
2.2.3.1. Küresel çalışmalar

Ulusların toplam su ayak izi tüketim, konum, iklim ve tarımsal uygulamalar gibi birçok faktör tarafından belirlenmekte ve bu da ülkeler arasında önemli SA farklılıklarına

neden olmaktadır. Chapagain ve Hoekstra (2004), ABD ve Çin'de kişi başına düşen SA miktarını sırasıyla 2480 ve 700 m^3/yıl olarak hesaplamışlardır. Daha sonra Mekonnen ve Hoekstra (2011a) bu değerin küresel ortalamasını 1385 m^3/yıl olarak bildirmiştir. Burada, ABD'de dünya ortalamasının neredeyse iki katı olan kişi başı SA değeri, özellikle refah düzeyi ve et tüketimi yüksek olan ülkelerde, tüketim alışkanlıklarının SA üzerinde nasıl bir etkisinin olduğunu ortaya koymaktadır.

Mekonnen ve Hoekstra (2011a) küresel toplam su ayak izini 9087 Gm^3/yıl olarak tahmin etmiş ve bunun yaklaşık %92'sinin tarımsal üretimden kaynaklandığını belirtmişlerdir. Bu değer Chapagain ve Hoekstra (2004) tarafından 7450 Gm^3/yıl, Mekonnen ve Hoekstra (2011b) tarafından ise 7404 Gm^3/yıl olarak hesaplanmıştır. Burada en önemli hususlardan biri SA bileşenlerinin dağılımıdır. Yapılan çalışmalar tarımsal su ayak izinin %70'inden fazlasını yeşil su ayak izinin oluşturduğunu göstermektedir (Mekonnen ve Hoekstra, 2011b).

SA araştırmalarında, yaygın ekim alanları nedeniyle mısır önemli bir tahıl ürünüdür (Awika, 2011). Küresel çalışmalar, mısırın ortalama su ayak izinin 500-2500 m^3/t arasında değiştiğini tahmin etmektedir (Mekonnen ve Hoekstra, 2011b; Mialyk vd., 2022). Afrika ülkelerinde mısırın su ayak izi 2157 m^3/t iken, Avrupa ülkelerinde bu değerin yaklaşık 597 m^3/t olduğu ortaya konmuştur (Mialyk vd. 2022). Öte yandan, mısır su ayak izindeki yeşil-mavi dağılımı coğrafi ve iklimsel koşullara bağlı olarak değişmekle beraber, bu oranın zaman zaman 10'u aşabildiği raporlanmaktadır (Mialyk vd., 2022; Mekonnen ve Hoekstra, 2011b). Bununla birlikte, mısır üretiminin ciddi miktarda gri su ayak izine sahip olduğunu ortaya koyan Liu vd. (2017) ABD, Çin ve Brezilya'da azot kaynaklı gri su ayak izini sırasıyla 592, 770 ve 203 m^3/t olarak tahmin etmişlerdir. Benzer çalışmalar diğer ürünler için de yapılmıştır. Ekim alanı fazla olan bazı ürünlerin ortalama küresel su ayak izleri Şekil 2.8'de gösterilmiştir.



Şekil 2.8. Bazı ürünlerin Bazı ürünlerin yerel ve küresel su ayak izleri *

***Veri kaynakları:** Çin, Fu vd. (2019), Duan et al (2016), Dang vd. (2022), Han vd. (2018); Türkiye, Muratoğlu (2020); global, (Chapagain vd., 2006), (Mekonnen ve Hoekstra, 2014), Mekonnen ve Hoekstra (2011b), (Siebert ve Döll, 2010), (Chapagain ve Hoekstra, 2011), (Mekonnen ve Hoekstra, 2010); İran, Bulsink vd. (2010), Ababaei ve Etedali (2017); Afrika ve Avrupa ülkeleri (Mialyk vd. 2022); Irak, Ewaid vd. (2021), Ewaid vd. (2019); Güney Kore, Yoo vd. (2014); Brezilya, Santos ve Naval (2020); Bahia, Costa vd., (2021); Tunus, Chouchane vd. (2015)

2.2.3.2. Yerel çalışmalar

Bazı yerel çalışmalarda, çeşitli ülkelerin genel tarımsal su ayak izleri araştırılmıştır. Bu çalışmalar, ülkelerdeki tarımsal su kullanımı için kapsamlı bir çerçeve geliştirmek ve diğer ülkelerle karşılaştırmalar yapmak açısından önemlidir. Muratoglu ve Avanoz (2021) Türkiye'de tarımsal üretimde kullanılan su miktarını incelemiş; Türkiye'deki toplam tarımsal üretimin su ayak izini 107 Gm^3/yıl olarak bulmuş ve bunun %56'sının mavi su olduğunu belirtmişlerdir. Bir başka çalışmada, Ercin vd. (2013) Fransa'da tarımsal üretimin toplam su ayak izini 80 Gm^3/yıl olduğunu bildirmişlerdir. Her iki çalışma da tarımsal su ayak izinde en büyük payın buğday, mısır ve arpada olduğu gösterilmiştir. Öte yandan, Huang vd. (2012) Pekin'de yaptıkları çalışmada tüketilen ürünlerde en yüksek su ayak izine sebze, buğday ve mısırın sahip olduğunu ve bu değerin toplam 2.37 Gm^3/yıl olduğunu ifade etmişlerdir.

Ayrıca yukarıda bahsedilen çalışmaların dışında çok sayıda yerel SA hesaplama çalışmaları bulunmaktadır (Vanham ve Bidoglio, 2014; Novoa vd., 2019; Ding vd., 2018; Souissi vd., 2019; Salmoral vd., 2011). Tüm bu literatür çalışmaları, su ayak izinin hem zamansal hem de mekânsal değişimlere karşı oldukça hassas olduğunu göstermektedir. Bu bağlamda, SA araştırmalarında kullanılan uzamsal-zamansal çözünürlük ve modeller, varsayımlar ve sınırlamalar, sonuçlar üzerinde önemli bir etkiye sahiptir (Feng vd., 2021).

2.2.3.3. Ürün bazlı analizler

Ewaid vd. (2019), 2016 ve 2017 yılları arasında Irak'taki 15 farklı ilde buğdayın su ayak izini hesaplamışlardır. Çalışmalarında, ortalama yeşil, mavi ve toplam SA sırasıyla 1226, 650 ve 1876 m^3/t olarak verilmiştir. Ancak, bu değerlerin şehirler arasında büyük farklılıklar gösterdiği belirtilmiştir. Muratoglu (2020), Türkiye'de buğdayın mavi ve yeşil su ayak izini sırasıyla 1161 ve 748 m^3/t olarak tahmin etmiştir. Han vd. (2018) ise yukarıda bahsedilen çalışmalardan biraz daha yüksek olmak üzere kuzey Çin'de buğdayın su ayak izini 1581 m^3/t (%52 yeşil, %29 mavi ve %19 gri) olarak hesaplamıştır. Sıcak ve kurak bir iklime sahip olan Tunus'ta yapılan çalışmada, Chouchane vd. (2015) buğdayın su ayak izini 2560 m^3/t olarak benzer çalışmalardan oldukça üstünde hesaplamışlardır (yeşil, mavi ve gri SA için sırasıyla 2380, 70 ve 110 m^3/t).

Mısır, buğdaya kıyasla genel olarak daha düşük bir su ayak izine sahiptir. Duan vd. (2016) çalışmalarında, Çin'in kuzeydoğusunda 1998-2012 yılları arasında mısır üretiminin yeşil, mavi ve gri su ayak izini sırasıyla 527, 213, 290 m^3/t olarak belirlerken, toplam su ayak izini 1029 m^3/t olarak hesaplanmışlardır. Aynı bölgede, Dang vd. (2022) 1996-2018 yılları arasında mısır üretiminin yeşil ve mavi su ayak izini sırasıyla 696 ve 40 m^3/t olarak hesaplamışlardır. Aynı coğrafi bölgede ancak farklı zaman dilimlerinde yürütülen bu iki çalışma arasındaki fark, SA değerlendirmelerinde çalışma periyodunun öneminin altını çizmektedir. Bulsink vd. (2010) Endonezya'da mısırın yeşil, mavi ve gri su ayak izini sırasıyla 2395, 75 ve 13 m^3/t olarak hesaplarken, Ababaei ve Etedali (2017) bu değeri İran'da 1958 m^3/t olarak hesaplamışlardır. Son olarak, Feng vd. (2021) dünya çapında yapılan çalışmaları gözden geçirmiş ve bu çalışmalarda mısırın ortalama su ayak izinin 907 m^3/t olduğunu bildirmişlerdir. Ayrıca, Dang vd. (2022) mısırın büyüme aşamaları arasında en yüksek su ayak izinin püsküllü-sütlü büyüme aşamasında görüldüğünü ve su ayak izini etkileyen en önemli iklim faktörlerinin sıcaklık ve güneşlenme süresi olduğunu bildirmişlerdir.

Santos ve Naval (2020), 1999-2018 yılları arasında Brezilya'nın kuzeydoğu bölgesinde soya fasulyesi üretiminin ortalama yıllık yeşil ve gri su ayak izini sırasıyla 1379 ve 1446 m^3/t olarak hesaplamıştır. Çalışma bölgesinde sulama çok sınırlı olduğu için mavi SA ihmal edilmiştir. Öte yandan, Costa vd., (2021), Bahia Eyaleti'nin batı bölgesinde 2012-2017 yılları arasında soya fasulyesinin ortalama su ayak izini 1993 m^3/t olarak belirlemişlerdir.

Fu vd. (2019), 1989-2016 yılları arasında pamuğun mavi, yeşil ve gri su ayak izlerini sırasıyla 3645, 2586 ve 1058 m^3/t olarak hesaplamışlardır. Muratoğlu (2020) Türkiye'de (Diyarbakır ili) pamuğun su ayak izini 2303 m^3/t (gri SA hariç) olarak belirlemiştir. Ewaid vd. (2021) Irak'ta pirincin su ayak izini 3072 m^3/t olarak hesaplamışlardır. Bu çalışmada, bölgedeki pirinç yetiştiriciliği sırasında sıcak ve kuru hava koşulları nedeniyle mavi SA, toplam su ayak izinin %99.7'sini oluşturmuştur. Yoo vd. (2014) ise Güney Kore'de pirincin su ayak izinin 844.5 m^3/t ile diğer çalışmalara nispeten oldukça düşük olduğunu belirlemişlerdir.

2.3. Hidrolojik Modelleme Çalışmaları

Hidrolojik modeller, yüzey akışı, sızma, azot taşınımı, sediment taşınımı ve su kaynaklarının sürdürülebilirliği gibi konuların araştırılması ve iklim projeksiyonları altında havza durumunun değerlendirilmesi gibi birçok çalışmada kullanılmaktadır. Bu bölüm, ülkemizde gerçekleştirilmiş hidrolojik modelleme çalışmaları ve hidrolojik model tabanlı SA çalışmaları olmak üzere iki başlık altında incelenmiştir.

2.3.1. Türkiye'de hidrolojik modelleme çalışmaları

Ülkemizde birçok hidrolojik modelleme çalışması bulunmaktadır. Yaykıran (2016), çalışmasında Sakarya havzasının hidrolojik modelini ülkemizde pek kullanılmamış olan WEAP programını kullanarak oluşturmayı hedeflemiştir. Birçok verinin entegrasyonu ile oluşturulan modelde yüzeysel akışın, havza çıkışında gözlemlenen akışa yakın olduğu görülmektedir. Fakat kalibrasyonun tek bir istasyonla sınırlı kalması, modelin bir bütün olarak değerlendirilmesine engel olmuştur. Arslan (2019) ise çalışmasında Burdur gölü havzasının WEAP ile modelini oluşturularak entegre su kaynakları yönetimi çalışması gerçekleştirmiş ve geleceğe yönelik farklı senaryolarla su arz ve talebi projeksiyonları oluşturmuştur. Çalışmada, olumsuz senaryoda (yağışın azalması, buharlaşmanın ve kayıpların artması vb.) 2050 yılında karşılanamayan su talebi

85 hm^3/yıl olarak öngörülmüştür. Güngör (2018), SWAT modelini kullanarak Filyos Çayı Havzası'nın su bütçesini araştırmış ve farklı iklim senaryolarının havzaya etkilerini incelemiştir. Çalışmada model sonuçları, havza çıkışındaki akım gözlem istasyonu verileri ile karşılaştırıldığında gerçeğe yakın sonuçlar verdiği görülmüştür. Fakat havzanın üst kısmında veri eksiklikleri nedeniyle model, debiyi gerçek değerlerden fazla tahmin etmiştir. Farklı iklim senaryolarına göre ortalama debinin 19.7 m^3/s'den 11.4 m^3/s'ye düştüğü ifade edilmiştir. Çetin vd. (2017) farklı senaryolar altında (yağışın %35 oranında azalması ve gübre kullanımının %25 oranında artması) su bütçesi elemanlarını ve azot taşınımını belirlemek amacıyla Aşağı Seyhan Ovası'nda bulunan 11308 ha'lık alanın SWAT modelini oluşturmuşlardır. Çalışmada yağışın %35 azalması durumunda drenaj akımlarının %19 azalacağı, gübre miktarındaki %25 artışın drenajla taşınan azot miktarında %27'lik artış yapacağı sonucuna varılmıştır. Akyürek vd. (2019) Adana Çakıt Havzası'nda NAM (Nedbør-Afstrømnings-Model) modeli kullanarak yarı dağılımlı kavramsal yağış-akış simülasyonu geliştirmişlerdir. Ayrıca çalışmada aynı havza HEC-HMS ile de modellenmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. İki modelinde genel anlamda başarılı olduğu fakat HEC-HMS modelinin bir istasyonda daha iyi tahminlemede bulunduğu belirtilmiştir. Bunun yanında çalışmada, kısa süreli modelleme çalışmaları için HEC-HMS'nin daha uygun olduğu belirtilmiştir.

2.3.2. Hidrolojik model tabanlı uluslararası SA çalışmaları

Son yıllarda, SA hesaplamalarının doğruluğunu artırmak için farklı yaklaşımlar ve yöntemler geliştirmeye odaklanan çalışmalarda artış gözlemlenmiştir. Hidrolojik modellemeye dayalı SA çalışmaları, toprak tipi, toprak dağılımı ve tarımsal yönetim stratejileri gibi çeşitli faktörlerin dikkate alınmasına olanak sağlamaktadır. SA çalışmalarında hidrolojik modellerin kullanımı, tarımsal üretim süreci boyunca mekânsal varyasyonları yansıtmak ve yüksek zamansal çözünürlüklü sonuçlar ortaya koymak gibi diğer yöntemlere göre çeşitli avantajlar sunmaktadır (Luan vd., 2018).

Luan vd. (2018a), SWAT modelini ve hidrolojik süreçleri kullanarak Çin'deki bitkisel su tüketimini değerlendirmek için bir yöntem geliştirmiştir. Çalışmada buğday, mısır ve ayçiçeğinin mavi ve yeşil toplam su kullanımı sırasıyla 1036, 774 ve 1510 m^3/t olarak hesaplamışlardır. Başka bir çalışmada, De Girolamo vd. (2019), İtalya'da bir havzada durum buğdayının gri su ayak izini (3284 m^3/t) araştırmak için SWAT modelini kullanmışlardır. Luan vd., (2018b) çalışmalarında SWAT modelini kullanarak hidrolojik

süreçlere dayalı bitkisel üretimin, bölgesel ölçekte SA hesabı için yöntem geliştirmeyi amaçlamışlardır. Çalışmada, sulamanın olduğu ve olmadığı iki senaryo altında yeşil ve mavi SA hesaplanmıştır. Ayrıca, mavi su ayak izi hesabında sulama kanalları ile taşınan sudan kaybedilen miktar da hesaba katılmıştır. Çalışma sonucunda, klasik alan ölçekli çalışmalara göre bölgesel ölçekli hidrolojik model tabanlı çalışmaların daha yüksek çözünürlüklü sonuçlar verdiği belirtilmiş ve su ayak izi değişiminin alansal varyasyonlarını daha iyi yakalayabilmeyi sağladığı vurgulanmıştır.

D'Ambrosio vd. (2020) SWAT modelini kullanarak İtalya'daki Canale d'Aiedda Nehri Havzası'nda insan baskısı altında su güvenliğini SA perspektifinden araştırmışlardır. Yeşil ve mavi SA ayrımında Luan vd., (2018b)'nin çalışmasına benzer bir metodoloji izlemişlerdir. Çalışmada tarımsal yönetim uygulamaları (sulama, gübreleme, hasat zamanı vb.) için çiftçilerle görüşülmüş fakat, çalışma alanının tamamında tarımsal yönetim aynı kabul edilmiştir. Bunun yanında, model kalibrasyonunun sadece altı aylık bir süre için gerçekleştirilmesi de model doğruluğu için bir kısıt oluşturmuştur. Sonuç olarak çalışma alanında toplam SA 214 milyon m^3/yıl olarak hesaplanmıştır (yeşil, mavi ve gri SA sırasıyla %37.2, %9.2 ve %53.6). Salmoral vd. (2017) SWAT modelini kullanarak İspanya'da bulunan bir havzanın su ayak izini hesaplayarak mevcut durumda ve farklı tarımsal yönetim senaryoları altında suyun sürdürülebilirliğini değerlendirmişlerdir. Çalışmada yıllık yağışın yaklaşık %65'lik kısmının tarımsal üretimde kullanıldığını göstermişlerdir. Ayrıca havzanın hidrolojik döngüsünde toprak neminin baskın olduğu; yeşil SA, doğal vejetasyondan gerçekleşen ET ve direk zeminden gerçekleşen buharlaşmanın su bütçesinin yaklaşık %81'ini oluşturduğu ifade edilmiştir.

Jamshidi vd. (2020)'nin çalışmasında SWAT kullanılarak SA hesaplanmış ve farklı uygulama yöntemlerinin (gübreleme ve sulamanın azaltılması ve bitki filtre şeritlerinin uygulanması) SA (mavi, yeşil ve gri) üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bu uygulamaların ürün veriminde %32'ye kadar bir azalmaya sebep olacağı öngörülmesine rağmen, sulu tarımda su ayak izinde %24'e varan azalmanın sağlanabileceği gösterilmiştir. Ayrıca havzanın toplanma alanı olan Zrebar gölündeki azot ve fosfor kirlilik konsantrasyonunda sekiz yıl içerisinde %60'lık bir azaltmanın sağlanabileceği ifade edilmiştir. Xie vd. (2020) SWAT modelini kullanarak Çin'de bulunan Yellow nehir havzasının su kaynaklarını, yeşil ve mavi su ayak izini ve su kıtlığını analiz etmişlerdir. Çalışmada SWAT modeli kullanılarak ilk defa su ayak izinin aylık ölçekte haritalandırıldığı ifade edilmiştir. 12 ürünün incelendiği çalışmada havzanın toplam mavi

ve yeşil su ayak izi 45 Gm^3/yıl (%90.3 yeşil SA, %9.7 mavi SA) olarak hesaplanmıştır. Ayrıca havza toplamında en yüksek ve en düşük mavi SA oranının sırasıyla mısır ve pamukta görüldüğü sonucuna varılmıştır. Zhu vd. (2018) çalışmalarında Çin'de bulunan Hai havzasında yeşil suyun zamansal ve mekânsal dağılımını ve arazi kullanım türlerinin yeşil su üzerindeki etkilerini SWAT modelini kullanarak analiz etmişlerdir. Çalışmada maksimum depolanabilir yeşil suyun düz alanlarda daha düşük olduğu ve yeşil suyun alansal dağılımının toprak tipinden oldukça etkilendiği ifade edilmiştir. Ayrıca uygun bitki türlerinin tarımsal alanlarda ekiminin, yeşil su kullanım verimliliğini artıracağı gösterilmiştir.

D'Ambrosio, Gentile ve De Girolamo (2020) çalışmalarında SWAT modelini kullanarak su ayak izi metodu ile İtalya'da bulunan Canale D'Aiedda havzasının su kullanımının sürdürülebilirliğini değerlendirmişlerdir. Havzanın toplam tarımsal su ayak izi 124.4 Gm^3 olduğu ve yeşil, mavi ve gri su ayak izinin oransal dağılımının sırasıyla %78.3, %17.4 ve %4.3 olduğu ifade edilmiştir. Masud vd. (2018) Kanada'da yaptıkları çalışmalarında arpanın gelecekteki verimini ve su tüketimini SWAT modelini kullanarak modellemiş ve arpanın su ayak izini değerlendirmişlerdir. Yağmurla beslenen arpanın veriminde artış görüleceği, sulu tarımda ise verimde bir değişiklik olmayacağı ön görülmüş olup, çalışmada referans yıllara göre (1985-2009) 2064 yılında su ayak izinde %60'a varan bir düşüşün gerçekleşebileceği ifade edilmiştir.

2.4. Tarımsal Ürün Deseni Optimizasyonu Çalışmaları

Uygun bir ürün ekim paterninin oluşturulması, birçok nedenden dolayı büyük önem arz etmektedir. Bunlar arasında su stresini ve su kirliliğini azaltmak, tarımsal üretimi ve net faydaları iyileştirmek, sürdürülebilirliği sağlamak ve gıda taleplerini karşılamak yer almaktadır. Literatürde bu alanda çalışmaların büyük çoğunluğu ürün odaklı yani aynı su miktarı ile maksimum ürün veya ekonomik getiri amacıyla gerçekleştirilmiştir.

Jain vd. (2021) Hindistan'ın Telangana eyaletinde tarımsal üretimdeki net faydayı artırma ve gübre uygulamalarını azaltma amaçları doğrultusunda çok amaçlı optimizasyon algoritması ile ürün deseni optimizasyonu gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada, şeker kamışı ve yer fıstığının ekim alanın artırılması, buna karşın pirinç ve pamuğun ekim alanının azaltılması önerilmiştir. Osama vd. (2017) Mısır'da yetiştirilen 28 farklı ürünün ürün desenini maksimum net getiri amacıyla, su mevcudiyeti ve tarım

alanı kısıtları altında optimize etmişlerdir. Çalışma sonucunda net faydanın yaklaşık %6 oranında artırılabileceği ifade edilmiştir. Hindistan'da yapılan bir başka çalışmada Rath vd. (2019), optimizasyon ile yıllık getirinin yaklaşık %33 oranında artırılabileceğini göstermişlerdir. Shreedhar vd. (2015) de benzer şekilde Hindistan'da ürün deseni optimizasyonu yapmışlardır. Çalışmada su tüketimine bağlı olarak net faydanın arttığı gösterilmiştir. Liu vd. (2022) Çin'de bulunan Heihe Havzası'nda gerçekleştirdikleri çalışmalarında SWAT modelini kullanarak mahsul, ekonomik ve maksimum besin getirisi su verimliliklerini optimize etmişlerdir. Ayrıca ekonomik su verimliliği hedefinde, buğday ekim oranında düşüşler, arpa ekiminde ise artış öngörülmüştür. Bununla birlikte, Hao vd. (2018), 7 farklı ürünle 10 farklı su mevcudiyeti senaryosuna göre yaptıkları çalışmada, su ve tarım alanın tahsisinde mısır tohumuna diğer ürünlerden daha çok yer verilmesi gerektiği belirtilmiştir. Vivekanandan vd. (2009) Hindistan'da üç farklı amaç için (net getiri, protein miktarı ve kalori değeri) ürün deseni optimizasyonu gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada bölge için en iyi senaryonun, net getiri hedefinde olduğu ifade edilmiştir.

Literatürde SA metodolojisi kullanılarak su odaklı yürütülen ürün deseni optimizasyonu çalışmaları oldukça kısıtlıdır. Bu araştırmalar, küçük ölçeklerden küresel seviyelere kadar çeşitli seviyelerde yürütülebilmektedir. Büyük ölçekli optimizasyon zor olsa da bu çalışmalar ürün deseninin SA üzerindeki etkisini anlamak açısından önemlidir. Davis vd. (2017), küresel ölçekte ürün desenlerinin optimize edilmesinin yağış (yeşil) suyunda %14 ve sulama (mavi) suyu kullanımında %12'lik bir azalma sağlayabileceğini vurgulamışlardır. Dahası çalışmada, tarımsal üretimin optimize edilmesi ile mevcut gıda miktarında önemli bir artış sağlanabileceği ve bu durumda 825 milyon insana yetecek kadar daha besin arzının oluşturulabileceğini ifade etmişlerdir. Bir başka çalışmada Su vd. (2014), ürün desenlerinin optimize edilmesinin, mavi SA birimi başına net karı neredeyse iki katına çıkarma potansiyeline sahip olduğunu bildirmişlerdir.

Yerel ölçekli bazı çalışmalar, ürün ekim yapısının iyileştirilmesiyle buğday, arpa ve mısır gibi tahılların su ayak izinin azaltılabileceğini kanıtlamıştır (Etedali vd. 2019). Fakat, ekim yapısındaki değişiklikler yalnızca su ayak izini değil, aynı zamanda ekonomik getiri gibi diğer faktörleri de etkileyecektir. Bu doğrultuda, Liu vd. (2019) i. su ayak izinin ekonomik getiriden daha önemli olduğu, ii. ekonomik getirin su ayak izinden daha önemli olduğu, iii. her ikisi de aynı öneme sahip olduğu üç farklı senaryo altında mavi su ayak izini en aza indirmek ve tarımsal net faydayı en üst düzeye çıkarmak için bir optimizasyon modeli geliştirmişlerdir. Ekonomik faktörler öncelikli olduğunda, pirinç

ekiminin mevcut uygulamalara kıyasla %16 oranında artırılması gerektiği öne sürülmüştür. Öte yandan, mavi su ayak izinin azaltılmasının daha önemli olduğu senaryoda, mısır ve soya fasulyesi ekiminin sırasıyla %9 ve %10 oranında artırılması gerektiği bildirilmiştir.

2.5. Mevcut Çalışmanın Orijinalliği

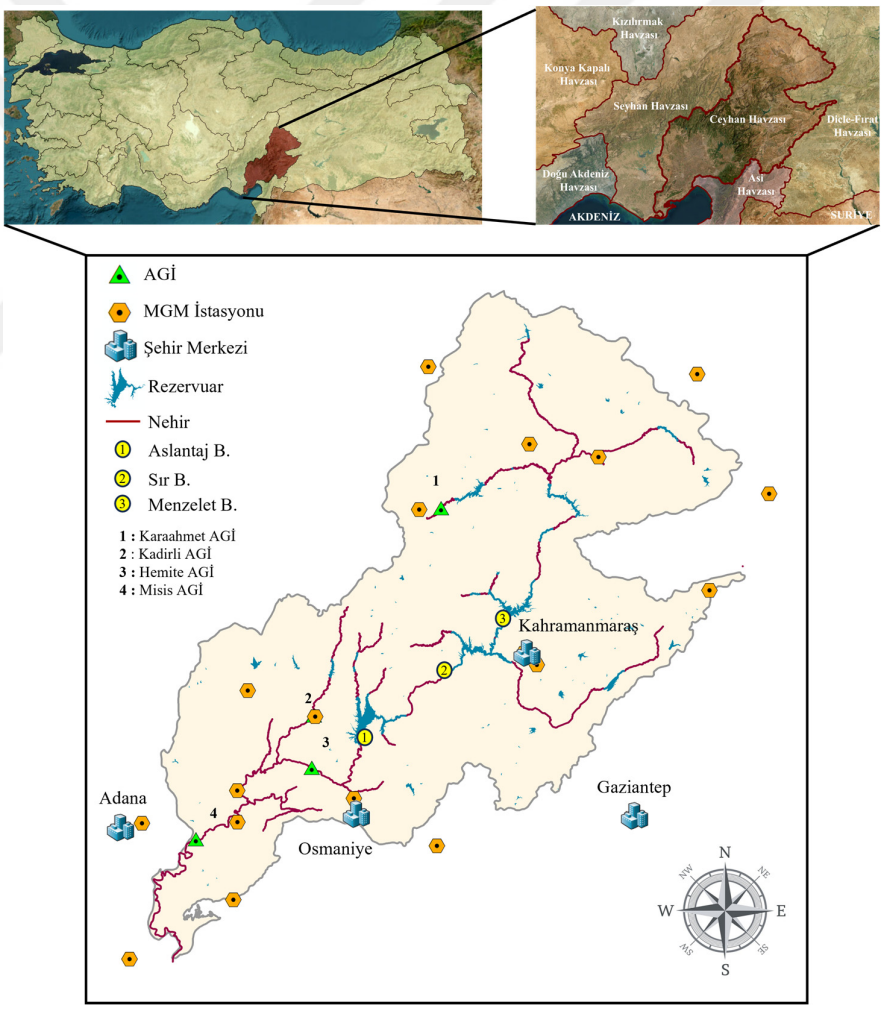
Bölüm 2.2'de literatürde farklı ölçeklerde gerçekleştirilmiş SA değerlendirme çalışmaları, iklim değişikliği altında ürünlerin gelecekte ön görülen su ayak izlerini azaltmaya yönelik çalışmalar özetlenmiştir. Yapılan çalışmalar tarımsal üretimde mahsullerin su ayak izlerinin oldukça yüksek olduğunu ve küresel ölçekte su tüketiminin büyük oranda bu sektörde gerçekleştiğini göstermektedir. Ayrıca literatürde iklim değişikliğinin SA üzerindeki etkilerine yönelik farklı görüşler olsa da genel olarak bu alanda yapılan çalışmalar bitki su tüketiminin artacağını ön görmektedir. Bu nedenle tarım sektöründe su kullanımının azaltılması, su kaynaklarının sürdürülebilirliği açısından kritik öneme sahiptir. Bu bağlamda malçlama, bitkisel filtre şeritlerinin kullanılması, verimli sulama tekniklerinin kullanılması ve ürün deseninin optimize edilmesi gibi yöntemler araştırılmıştır. Fakat literatürde ürün deseni optimizasyonu çalışmalarının büyük çoğunluğunun ürün getirisini ve net kârı artırmaya yönelik olduğu ve kısıtlı sayıda çalışmada SA odaklı ürün deseni optimizasyonun gerçekleştirildiği görülmüştür. Öte yandan SA çalışmalarında genellikle ampirik yöntemlerin kullanıldığı, dolayısıyla genellikle düşük alansal ve zamansal çözünürlüklü analizler gerçekleştirildiği tespit edilmiştir.

Mevcut çalışmada, hidrolojik modelleme, SA ve ürün deseni optimizasyonu konuları birlikte çalışılarak ilk defa yüksek alansal çözünürlüklü SA verileri ile ürün deseni optimizasyonu gerçekleştirilerek, literatürdeki çalışmaların aksine su yönetimi odaklı net ürün deseni önerileri getirilmiştir. Ayrıca, SA konseptinde mavi su ayak izinin önemine binaen bu çalışmada ilk defa mavi ve toplam SA farklı oranlarda ağırlıklandırılarak, çeşitli senaryolar altında ürün deseni optimizasyonları oluşturulmuş ve havza karakteristiğine en uygun çözüm aranmıştır.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Çalışma Alanı

İskenderun Körfezi'nden ülkenin iç kesimlerine doğru uzanan Ceyhan Havzası, Türkiye'nin Doğu Akdeniz Bölgesinde 36° 55' ve 38° 72' kuzey enlemleri ile 35° 45' ve 37° 81' doğu boylamları arasında yer almaktadır (Yuce vd., 2022). Batıda Seyhan, doğuda Dicle-Fırat, güneyde ise Asi havzalarına komşudur (Şekil 3.1). Ülkenin yüz ölçümünün yaklaşık %2.73'ünü oluşturan Ceyhan Havzası 21,391 km^2 yağış alanına sahiptir (Yuce vd., 2022).



Şekil 3.1. Çalışma alanına genel bakış

Havza alanının büyük bir bölümü Kahramanmaraş (%59), Osmaniye (%14.7) ve Adana (%17.9) il sınırlarında yer almaktadır. Bununla birlikte havza sınırları içerisinde Kayseri, Sivas, Malatya, Adıyaman ve Gaziantep illeri de kısmen yer almaktadır. 2015 yılı

verilerine göre havza sınırları içerisinde 1,843,496 kişi ikamet etmekte olup, bu değer ülke nüfusunun %2.34'lük kısmına denk gelmektedir (ÇYGM, 2016).

Ceyhan Havzası sarp dağlık arazilerden ve geniş alüvyal tabanlardan oluşmuştur (ÇYGM, 2016). Verimli arazilerinden dolayı tarımsal faaliyetler açısından önemli bir bölge olan Ceyhan Havzası, içerisinde birçok nehir, göl, baraj ve regülatör barındırmaktadır (Özbay vd., 2019). Ceyhan havzasında Aslantaş, Menzelet, Sır ve Berke gibi önemli barajların yanı sıra irili ufaklı toplam 13 baraj bulunmaktadır. Bununla birlikte, havza yıllık yaklaşık 7.18 milyar m^3 akış hacmi ile ülkenin toplam akış hacminin %4'ünü oluşturmaktadır (Tanriverdi vd., 2010).

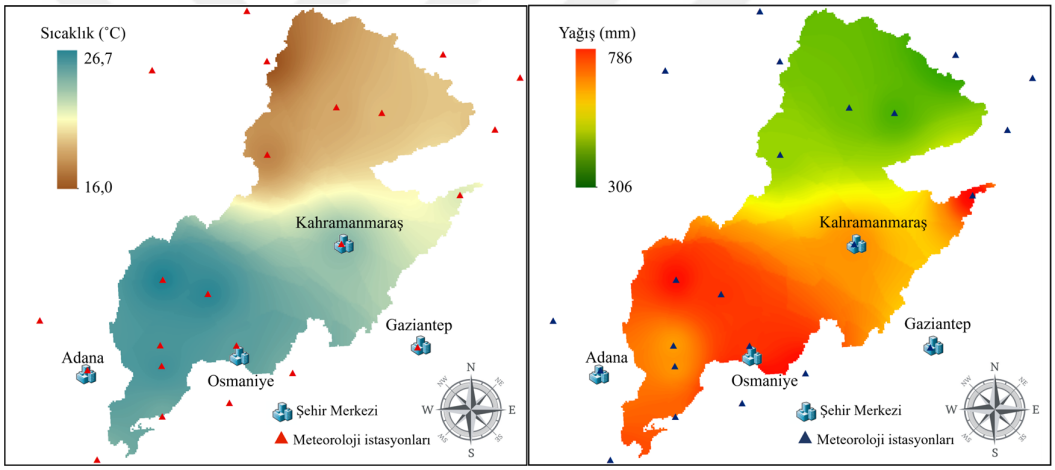
Ceyhan havzasının ana akarsu hattını oluşturan Ceyhan Nehrinin toplam uzunluğu 509 km olup, nehrin doğduğu yer Akdeniz ve Güneydoğu Anadolu Bölgesi sınırına yakın bir bölgede yer alan Söğütlü Çayı'dır (Altın vd., 2020). Nehrin ortalama debisi 82.9 m^3/s olup, İskenderun Körfezi'nde Akdeniz'e dökülmektedir (Burgan, 2019). Havzada yer alan diğer önemli akarsular ve uzunlukları Tablo 3.1'de verilmiştir. Ayrıca çalışma kapsamında akım verilerinin kullanıldığı AGİ istasyonları Şekil 3.1'de işaretlenmiştir.

Tablo 3.1. Ceyhan havzasındaki önemli akarsular (SYGM, 2018)

Akarsu Adı	**Uzunluğu (km)**
Ceyhan Nehri	509
Aksu Çayı	102
Göksu Çayı	69
Söğütlü Çayı	67
Hurman Çayı	61
Körsulu Deresi	56
Kadirli Deresi	44
Kömürsuyu Deresi	42
Deli Çayı	39
Karanlık Deresi	32
Ördeközü Deresi	32
Bertiz Çayı	30

Ceyhan Havzası'nın yüz ölçümünün yaklaşık yarısı orman ve yarı doğal alanlardan oluşurken, %46'lık kısmı tarım arazilerinden oluşmaktadır. Havza genelinde en çok yer kaplayan arazi sınıfları sırasıyla sürekli sulanan tarım alanları, seyrek bitki alanları, doğal bitki örtüsü ile birlikte bulunan tarım alanları, bitki değişim alanları ve sulanmayan ekilebilir tarım alanlarıdır. Ceyhan Havzasının kuzey kesimleri genellikle seyrek bitki alanları ile kaplı iken, güney kesiminde tarım alanlarının hâkim olduğu görülmektedir.

Havza iklim özellikleri bakımından Akdeniz ve Karasal iklim tipleri arasında geçiş iklim tipine sahiptir. Kışların soğuk ve yağışlı geçtiği bölgede, yaz ayları kurak geçmektedir (SYGM, 2018). Ceyhan Havzası'nın ortalama yıllık yağış ortalaması yaklaşık 727 mm olarak belirlenmiştir (SYGM, 2019). 2011-2021 yılları arasında havza içerisinde maksimum günlük yağış miktarı 131 mm ile Kozan'da ölçülmüştür. Ayrıca havzada ortalama yıllık yağış maksimum 868 mm olarak ölçülürken, minimum ise 468 mm olarak belirlenmiştir (Yuce ve Esit, 2021). Çalışma periyodunu kapsayan 2011-2021 yılları arasındaki ortalama yağış miktarının havza içerisindeki dağılımı Şekil 3.2'de gösterilmiştir. Burada yağışın havzada homojen dağılmadığı, havzanın kuzey kesiminde yıllık ortalama yağışın 300 mm'ye kadar düştüğü, güney kesiminde ise yılık ortalama yağışın 800 mm'ye yaklaştığı görülmektedir.



Şekil 3.2. Ceyhan Havzasında 2011-2021 yılları arasındaki yıllık ortalama yağış ve günlük maksimum sıcaklık dağılımı

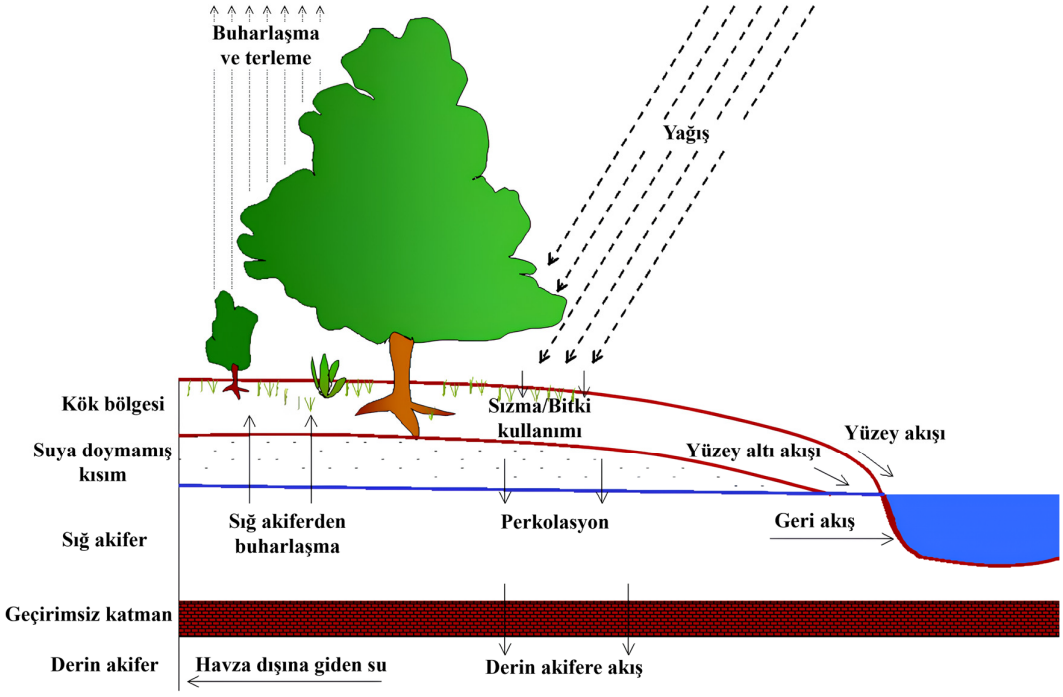
Ceyhan Havzası'nın uzun yıllar sıcaklık ortalaması yaklaşık 15 °C iken, çalışma süresince kaydedilmiş maksimum günlük sıcaklık 47.4 °C ile Adana'nın Ceyhan ilçesinde ölçülmüştür. Bununla birlikte 2011-2021 yılları arasında ortalama günlük maksimum sıcaklığın havza içerisindeki dağılımı Şekil 3.2'de görselleştirilmiştir. Burada yıllık ortalama yağış haritasına yakın bir dağılımın olduğu, havzanın güneyine doğru sıcaklıkların arttığı görülmektedir.

3.2. SWAT Modeli

SWAT ile belirli bir havza modellenirken, incelenen havza alt havzalara ayrılır. Daha sonra alt havzalar da toprak yapısı ve arazi özellikleri benzer olan hidrolojik tepki

birimlerine (HRU) bölünür. Hesaplamalarda her bir HRU ayrı ayrı analiz edilerek havzanın bütünü çözümlenmektedir.

Bir havzanın simülasyonu, hidrolojik döngünün kara ve iletim aşaması olarak iki ana bölüme ayrılmaktadır. Kara aşaması, her bir alt havzanın su, sediment, besin ve pestisit bakımından ana kanalı beslemesinin simülasyonu olarak açıklanabilir (Cuceoglu vd., 2017). Hidrolojik döngünün iletim aşaması ise havzanın çıkışına kadar suyun ve diğer taşınım elamanlarının nehir boyunca iletiminin gerçekleştiği bölüm olarak tanımlanmaktadır (Neitsch vd., 2011). SWAT tarafından kullanılan hidrolojik döngünün kara aşamasına ait süreçler Şekil 3.3'te gösterilmiştir. Ayrıca simüle edilen hidrolojik döngü, Denklem 3.1'de verilen su dengesine dayanmaktadır (Zhu vd., 2018).

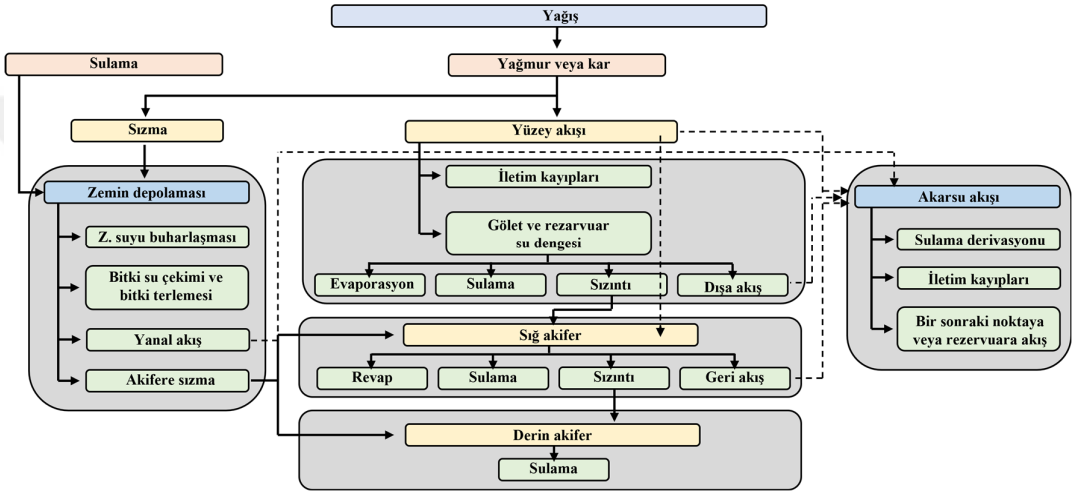


Şekil 3.3. Hidrolojik döngünün şematik gösterimi
(Neitsch vd. (2011)'den uyarlanmıştır.)

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^{t}\left(P_g - Q_{yüzey} - ET_g - w_v - Q_{ga}\right) \tag{3.1}$$

Burada, SW_t (mm) t anındaki toprak su içeriğini, SW_0 (mm) başlangıçtaki toprak su içeriğini, P_g (mm) günlük yağış miktarını, $Q_{yüzey}$ (mm) günlük yüzeysel akış miktarını, ET_g (mm) günlük evapotranspirasyon miktarını, w_v (mm) vadoz bölgeye sızan su miktarını, Q_{ga} (mm) ise yeraltı suyundan günlük ters akış miktarını temsil etmektedir.

SWAT modeli nehre giren toplam akımı; yüzey akışı, yüzey altı akış ve akiferden gelen akış olarak üçe ayırmaktadır (Şekil 3.3). Su havzaya yağmur veya kar yağışı yoluyla indikten sonra yağışın bir kısmı yüzey akışına dönüşmekte bir kısmı ise sızmaya geçmektedir. Sızan suyun bir kısmı da yüzey altı akışa dönüşürken, diğer kısmı akifere süzülmektedir. Tüm bu süreç boyunca terleme ve buharlaşma yolu ile evapotranspirasyon gerçekleşmekte ve suyun iletimi boyunca kayıplar yaşanmaktadır. SWAT modelinde suyun hareketinin şematik gösterimi Şekil 3.4'te verilmiştir.



Şekil 3.4. SWAT modelinde suyun hareketi (Neitsch vd. (2011)'den uyarlanmıştır.)

Bu bölümde SWAT metodolojisi, hidrolojik döngü içerisinde yer alan yüzey akışı, evapotranspirasyon, sızma, yüzey altı akış, yer altı akışı ve bunlara ilave olarak bitki büyümesi "*Toprak ve Su Değerlendirme Aracı Dökümantasyonu*" (Neitsch vd., 2011)'dan yararlanılarak ayrı başlıklar altında verilmiştir.

3.2.1. Yüzey akışı

Yağış, başlangıçta kuru toprağa etki ettiğinde sızma hızı çok yüksek, yüzey akışı ise yok denecek kadar az olmaktadır. Zamanla toprak ıslandıkça, yağış hızı sızma hızını geçmeye başlar ve yüzeysel akış meydana gelir (Neitsch vd., 2011). SWAT modelinde yüzeysel akışın tahmininde SCS eğri numarası yöntemi ve Green-Ampt sızma yöntemi kullanılmaktadır (El-Sadek ve Irvem, 2014). SCS eğri numarası metodunda günlük veriler yeterli olurken Green-Ampt sızma yönteminde saatlik verilere ihtiyaç duyulmaktadır (Dutal, 2020). Denklem 3.2'de SCS eğri numarası eşitliği verilmiştir (Bosznay, 1989).

$$Q_{yüzey} = \frac{\left(P_g - I_a\right)^2}{\left(P_g - I_a + S\right)} \tag{3.2}$$

Burada, $Q_{yüzey}$ (mm) yüzey akışını, P_g (mm) günlük yağış miktarını I_a (mm) akıştan önceki ilk tutma miktarını (depolama, sızma vs.), S (mm) ise maksimum tutulma miktarını ifade etmektedir.

S parametresi zemin türüne, arazi kullanımına, eğime ve iklim özelliklerine göre değişmektedir (Neitsch vd., 2011). Genel bir yaklaşım olarak ilk tutulma miktarının (I_a) 0.2 S'ye eşit olduğu kabul edilmektedir. Bu durumda Denklem 3.2 düzenlenerek Denklem 3.3 elde edilmektedir (Bosznay, 1989). Ayrıca S parametresinin ampirik formülü Denklem 3.4'te verilmiştir.

$$Q_{yüzey} = \frac{\left(P_g - 0{,}2S\right)^2}{\left(P_g + 0{,}8S\right)} \tag{3.3}$$

$$S = 25{,}4\left(\frac{1000}{CN} - 10\right) \tag{3.4}$$

Burada CN, eğri numarasını ifade etmektedir. Tablo 3.2'de CN eğri numarasının arazi kullanım şekline ve zemin grubuna göre değerleri verilmiştir. Zemin grubu, Amerika Birleşik Devletleri Doğal Kaynakları Koruma Servisi (NRCS)'ne göre A, B, C ve D olarak dörde ayrılmaktadır. A grubunda akış potansiyeli düşük iken, D grubuna doğru akış potansiyeli artmaktadır (Jouma, 2019).

Tablo 3.2. CN eğri numarası (Bayazıt, 2013)

Arazi Kullanım Şekli		Hidrolojik Zemin Grubu			
		A	B	C	D
Ekili alan	Korunmasız	72	81	88	91
	Korunmalı	62	71	78	81
Otlak	Kötü durumda	68	79	86	89
	İyi durumda	39	61	74	80
Çayır		30	58	71	78
Orman	Zayıf	45	66	77	83
	İyi	25	55	70	77
Açık yerler: parklar, çim	İyi durumda	39	61	74	80
	Kötü durumda	49	69	79	84
Ticaret ve iş bölgeleri		89	92	94	95
Endüstri bölgeleri		81	88	91	93

Tablo 3.2'nin devamı

Arazi Kullanım Şekli		Hidrolojik Zemin Grubu			
		A	B	C	D
Oturma Bölgeleri	% 65'i geçirimsiz	77	85	90	92
	% 38'i geçirimsiz	61	75	83	87
	% 30'u geçirimsiz	57	72	81	86
	% 25'i geçirimsiz	54	70	80	85
	% 20'si geçirimsiz	51	68	79	84
Kaplamalı otopark, çatı		98	98	98	98
Yollar	Kaplamalı	98	98	98	98
	Çakıl	76	85	89	91
	Toprak	72	82	87	89

Yağış sırasında veya sonrasında havza şekline göre değişen zamanlarda pik debiler meydana gelmektedir. Pik debi, sediment taşınımının tahmin edilmesi için önemli bir parametredir (Güngör, 2018). SWAT modeli, pik debiyi düzenlenmiş rasyonel metot ile hesaplamaktadır (Denklem 3.5).

$$Q_{pik} = \frac{a_{kc} \times Q_{yüzey} \times A_h}{3{,}6 \times t_{kc}} \tag{3.5}$$

Burada, Q_{pik} pik debiyi (m^3/s), a_{kc} toplanma zamanında meydana gelen günlük yağışın fraksiyonunu, $Q_{yüzey}$ (mm) yüzeysel akış miktarı, A_h (km^2) havza alanını, t_{kc} (saat) ise alt havzanın toplanma zamanını temsil etmektedir.

3.2.2. Evapotranspirasyon (ET)

SWAT gerçek evapotranspirasyonu (ET_a) hesaplamak için öncelikle bitki kanopisinden gerçekleşen buharlaşmayı hesaplamaktadır. Daha sonra maksimum terlemeyi ve süblimleşme/toprak buharlaşmasını hesaplamaktadır. En son olarak gerçek terleme ve süblimleşme/toprak buharlaşmasını belirleyerek, gerçek evapotranspirasyonu tahmin etmektedir. Burada model teorisinin çok uzun olması nedeniyle potansiyel ET, toprak buharlaşması ve gerçek terleme miktarının hesaplanması özetle anlatılmış olup detaylı bilgi için SWAT'ın teorik dokümantasyona (Neitsch vd., 2011) bakılabilir.

3.2.2.1. Potansiyel evapotranspirasyon

SWAT modelinde potansiyel buharlaşma tahmininde Penman-Monteith, Priestley-Taylor ve Hargreaves olmak üzere üç yöntem kullanılabilmektedir. Penman-Monteith yöntemi güneşlenme, sıcaklık, nem ve rüzgâr hızı verilerine gereksinim

duyarken Hargreaves ve Priestley-Taylor metotlarında sadece sıcaklık verisi gerekmektedir (Neitsch vd., 2011). İyi sulanan bitkiler için kararlı atmosfer koşullarında Penman-Monteith yöntemi Denklem 3.6'daki şekilde formülize edilmektedir (Aouissi vd., 2016).

$$\lambda E_t = \frac{\Delta\left(H_{net} - G_y\right) + \gamma K_1 \left(\frac{0,622\lambda\rho_{hava}}{P_{atm}}\right)\left(e_z^0 - e_z\right)}{\Delta + \gamma\left(1 + \frac{r_c}{r_a}\right)} \tag{3.6}$$

Burada, λ (MJ/kg) buharlaşma ısısını, E_t (mm/gün) maksimum terleme hızını, K_1 sabit katsayıyı (8.64×104), P_{atm} (kPa) atmosferik basıncı, Δ doymuş buhar basıncı-sıcaklık eğrisinin eğimini, H_{net} (MJ/m^2×gün) net radyasyon miktarını, G_y (MJ/m^2×gün) yerdeki ısı akı yoğunluğunu, ρ_{hava} (kg/m^3) havanın yoğunluğunu, ez_0 (kPa) doymuş buhar basıncını, e_z (kPa) suyun buhar basıncını, γ (kPa/ ºC) psikrometrik sabiti, r_c bitkisel örtü direncini (s/m), r_a (s/m) ise hava katmanının difizyon direncini temsil etmektedir.

Priestley-Taylor ve Hargreaves metotları, Penman-Monteith yöntemine göre daha sade olmaları ve daha az veri gerektirmelerine karşın yeterli veri bulunması durumunda genellikle Penman-Monteith yöntemi kullanılmaktadır. Priestley-Taylor ve Hargreaves yöntemleri sırasıyla Denklem 3.7 ve 3.8'de gösterilmiştir (Aouissi vd., 2016).

$$\lambda E_p = a_p \frac{\Delta}{\Delta + \gamma}\left(H_{net} - G\right) \tag{3.7}$$

Burada, E_p (mm/gün) potansiyel buharlaşmayı, α_p (1.28) ise sabit katsayıyı temsil etmektedir.

$$\lambda E_p = 0,0023 \times H_0 \times \left(T_{maks} - T_{\min}\right)^{0,5} \times \left(T_{ort} + 17,8\right) \tag{3.8}$$

Burada, H_0 (MJ/m^2×gün) uzay radyasyonunu, T_{maks} (ºC) maksimum günlük sıcaklığı, T_{min} (ºC) minimum günlük sıcaklığı, T_{ort} (ºC) ortalama günlük sıcaklığı ifade etmektedir.

3.2.2.2. Evaporasyon

Model toprak suyu evaporasyonu hesabı için buharlaşmayı zeminin farklı katmanlarında bölüştürmektedir. Buharlaşmasına izin verilen maksimum su miktarını

belirlemek için kullanılan derinlik dağılımı Denklem 3.9'da gösterilmiştir. Bu denklemdeki katsayılar, buharlaşmanın %50'si ilk 10 mm'de ve %95'i 100 mm'de gerçekleşecek şekilde tanımlanmıştır (Neitsch vd., 2011).

$$E_{zemin,z} = E_s'' \times \frac{z}{z + \exp(3{,}374 - 0{,}00713 \times z)} \tag{3.9}$$

Burada, $E_{zemin,z}$ (mm) z derinliğinde toprağın buharlaşma talebini, Es'' (mm) günlük maksimum toprak suyu buharlaşma miktarını, z (mm) ise derinliği temsil etmektedir. Bir toprak tabakasındaki buharlaşma miktarı ise toprak tabakasının üst ve alt sınırlarında hesaplanan buharlaşma miktarları arasındaki fark alınarak belirlenmektedir (Denklem 3.10).

$$E_{zemin,k} = E_{zemin,ka} - E_{zemin,ku} \tag{3.10}$$

Burada, $E_{zemin,k}$ (mm) k katmanındaki buharlaşma talebini, $E_{zemin,ka}$ (mm) toprak katmanının en alt sınırındaki buharlaşma talebini, $E_{zemin,ku}$ (mm) toprak katmanının en üst sınırındaki buharlaşma talebini ifade etmektedir. Bununla birlikte SWAT, kullanıcının toprak buharlaşma talebini karşılamak için kullanılan derinlik dağılımını değiştirmesine izin vermek için Denklem 3.10'a *toprak suyu buharlaşması dengeleme katsayısı*nı (*esco*) eklemiştir (Denklem 3.11) (Neitsch vd., 2011).

$$E_{zemin,k} = E_{zemin,ka} - E_{zemin,ku} \times esco \tag{3.11}$$

Eğer toprak katmanındaki su içeriği tarla kapasitesinin altına düşerse, buharlaşma talebi de düşecektir. Bu durumda toprak katmanındaki buharlaşma, Denklem 3.12 ve 13'teki gibi hesaplanmaktadır.

$$E'_{zemin,k} = E_{zemin,k} \times \exp\left(\frac{2{,}5 \times (SW_k - FC_k)}{FC_k - W_k}\right) \qquad \text{eğer} \qquad SW_k < FC_k \tag{3.12}$$

$$E'_{zemin,k} = E_{zemin,k} \qquad \text{eğer} \qquad SW_k \geq FC_k \tag{3.13}$$

Burada, $E'_{zemin,k}$ (mm) su içeriğine göre düzenlenmiş k katmanındaki buharlaşma talebini, SW_k (mm) k katmanındaki su içeriğini, FC_k (mm) k katmanında tarla kapasitesindeki su içeriği, W_k (mm) k katmanında solma noktasındaki su içeriğini temsil etmektedir.

Son olarak, model günlük maksimum evaporasyon miktarını, bitkinin kullanabileceği su içeriğinin %80'i ile sınırlandırmıştır. Bu durumda gerçek buharlaşma Denklem 3.14'teki gibi bulunmaktadır.

$$E''_{ze\min,k} = \min\left(E'_{ze\min,k}\ ;\ 0{,}8\times\left(SW_k - WP_k\right)\right) \tag{3.14}$$

Burada, $E''_{zemin,k}$ (mm) k katmanındaki buharlaşmayı temsil etmektedir.

3.2.2.3. Terleme

Gerçek terleme miktarı, maksimum terleme miktarı ve bitkinin kök bölgesinden su alım miktarına bağlı olarak değişmektedir. Maksimum terleme miktarı mevcut çalışmada Penman-Monteith yöntemi ile belirlenmiştir (Denklem 3.6). Bitkinin su alım miktarı ise Denklem 3.15 ve 16'daki gibi modellenmektedir (Neitsch vd., 2011).

$$w_{a,z} = \frac{E_t}{1-\exp\left(-\beta_w\right)} \times \left(1-\exp\left(-\beta_w \frac{z}{z_{kök}}\right)\right) \tag{3.15}$$

$$w_{a,k} = w_{a,ka} - w_{a,ku} \tag{3.16}$$

Burada, $w_{a,z}$ (mm) toprak yüzeyinden z derinliğine kadar potansiyel bitki su alımı miktarını, E_t (mm) maksimum terleme miktarını, β_w su dağılım katsayısını, z (mm) toprak yüzeyinden derinliği, $z_{kök}$ (mm) kök derinliğini, $w_{a,k}$ (mm) k katmanındaki potansiyel su çekimi miktarını, $w_{a,ka}$ ve $w_{a,ku}$ ise (mm) sırasıyla alt ve üst katmandaki potansiyel su çekim miktarını temsil etmektedir. SWAT modeli ayrıca, toprağın üst katmanlarında yeterli miktarda su bulunmaması durumunda, alt katmanlardan su çekiminin artırılarak telafi edilmesine olanak sağlamaktadır (Denklem 3.17).

$$w'_{a,k} = w_{a,k} + w_{talep} \times epco \tag{3.17}$$

Burada, $w'_{a,k}$ (mm) k katmanındaki düzenlenmiş potansiyel su talebini, w_{talep} (mm) üst katmanlarda karşılanamayan su talebini, *epco* ise bitki su alımı telafi faktörünü ifade etmektedir. *epco* kullanıcı tarafından belirlenebilmekte olup, mevcut çalışmada kalibrasyon aşamasında ayarlanmıştır. Toprak katmanlarında yeterli miktarda su bulunmaması durumunda ise bitki su çekimi azalacaktır. SWAT modelinde bu durum göz önüne alınarak potansiyel su çekimi Denklem 3.18 ve 19'daki gibi düzenlenmiştir.

$$w''_{a,k} = w'_{a,k} \times \exp\left(5 \times \left(\frac{SW_k}{0,25 \times AWC_k} - 1\right)\right) \quad \text{eğer} \quad SW_k < \left(0,25 \times AWC_k\right) \tag{3.18}$$

$$w''_{a,k} = w'_{a,k} \quad \text{eğer} \quad SW_k \geq \left(0,25 \times AWC_k\right) \tag{3.19}$$

Burada, $w''_{a,k}$ (mm) su içeriğine göre ayarlanmış potansiyel su alım miktarını, SW_k (mm) toprak katmanında mevcut olan su miktarını ve AWC_k (mm) ise zemin katmanındaki su kapasitesini temsil etmektedir. Son olarak, toprak katmanındaki gerçek su alım miktarı Denklem 3.20 ve 21'deki gibi belirlenmektedir. Bununla birlikte, günlük gerçek su alım miktarının aynı gündeki gerçek terleme miktarına eşit olduğu varsayılmaktadır (Denklem 3.22).

$$w_{gerçek,k} = \min\left(w''_{a,k} \; ; \; \left(SW_k - WP_k\right)\right) \tag{3.20}$$

$$w_{gerçek,t} = \sum_{k=1}^{n} w_{gerçek,k} \tag{3.21}$$

$$E_{t,gerçek} = w_{gerçek,t} \tag{3.22}$$

Burada, $w_{gerçek,k}$ (mm) k katmanındaki gerçek su alım miktarını, WP_k (mm) k katmanında solma noktasındaki su içeriğini, $w_{gerçek,t}$ (mm) bitkinin günlük toplam su alım miktarını ve $E_{t,gerçek}$ (mm) günlük gerçek terleme miktarını ifade etmektedir.

3.2.3. Sızma

SWAT modelinde her toprak tabakası için sızma ayrı ayrı hesaplanmaktadır. Toprak katmanının su içeriği (SW_k) tarla kapasitesinden (FC_k) yüksek olduğu ve alt katmanın doygun olmadığı durumlarda sızma gerçekleşir. Aksi durumda su yüzey veya yüzey altı akışı olarak devam eder (Denklem 3.23 ve 24). Bu denklemlerde $SW_{k,artık}$ (mm) sızabilecek su miktarını ifade etmektedir (Neitsch vd., 2011).

$$SW_{k,artık} = SW_k - FC_k \quad \text{eğer} \quad SW_k > FC_k \tag{3.23}$$

$$SW_{k,artık} = 0 \quad \text{eğer} \quad SW_k \leq FC_k \tag{3.24}$$

Bir katmandan diğer katmana sızan su miktarı ise Denklem 3.25'teki gibi hesaplanmaktadır.

$$w_{sız,k} = SW_{k,artık} \times \left(1 - \exp\left(\frac{-\Delta t}{T_{sızma}}\right)\right) \tag{3.25}$$

Bu denklemde, $w_{sız,k}$ (mm) günlük alt toprak katmanına sızan su miktarını, Δt (saat) zaman aralığını, $T_{sızma}$ (saat) ise sızma süresini temsil etmektedir.

3.2.4. Yüzey altı akış

SWAT yüzey altı akış için geliştirilen kinematik depolama modelini kullanmaktadır (Awasthi ve Kumar, 2021). Bu model kütle süreklilik denklemine ve su dengesi yöntemine dayanmaktadır. Denklem 3.26'da yüzey altı akışı için kullanılan formül verilmiştir (Neitsch vd., 2011).

$$Q_{yanal} = 0,024\left(\frac{2 \times SW_{k,artık} \times K_{doygun} \times slp}{\phi_d \times L_y}\right) \tag{3.26}$$

Bu denklemde, Q_{yanal} (mm/gün) yüzey altı akış debisini, $SW_{k,artık}$ (mm) doygun bölgede depolanan suyun birim alan başına tahliye edilebilir su hacmini, K_{doygun} (mm/saat) doygun hidrolik iletkenlik katsayısını, slp eğimi, Φ_d (mm/mm) toprak tabakasının tahliye edilebilir gözenekliliğini, L_y (m) ise yamaç uzunluğunu temsil etmektedir.

3.2.5. Yer altı akışı

SWAT, sığ ve derin akiferi ayrı ayrı modellemektedir. Sığ akifer genellikle taban akışını sağlayarak ana kanalı beslemekte olup sığ akiferin su dengesi Denklem 3.27'deki gibi olmaktadır (Zhang vd., 2016).

$$SA_{d,i} = SA_{d,i-1} + w_{Q,sa} - Q_{ta} - w_{revap} - w_{pompa} \tag{3.27}$$

Bu denklemde, $SA_{d,i}$ (mm) sığ akiferde i gününde depolanan su miktarını, $SA_{d,i-1}$ (mm) sığ akiferde $i-1$ gününde depolanan su miktarını, $w_{Q,sa}$ (mm) i gününde akifere giren su miktarını, Q_{ta} (mm) i gününde ana kanala doğru gerçekleşen yeraltı suyu akışını, w_{revap} (mm) i gününde toprak katmanlarına doğru hareket eden su miktarını, w_{pompa} (mm) i gününde pompalama ile akiferden çekilen su miktarını temsil etmektedir.

SWAT Denklem 3.27'de yer alan sığ akiferin su dengesindeki bütün parametreleri ayrı ayrı simüle ederek, akiferdeki depolanan su miktarını belirlemektedir. Bu denklemde yer alan yeraltı suyu akışının (taban akışı) formülü Denklem 3.28'de gösterilmiştir.

$$Q_{ta} = \frac{8000 \times K_{doygun} \times h_{yas}}{L_{gw}^{\ 2}} \tag{3.28}$$

Bu denklemde, K_{doygun} (mm/gün) akiferin hidrolik iletkenliğini, L_{gw} (m) ana kanala olan mesafeyi, h_{yas} (m) ise su tablası yüksekliğini ifade etmektedir.

3.2.6. Bitki büyümesi modellenmesi

SWAT bitki büyümesinin simülasyonunda "*Enviromental Policy Integrated Climate*" (EPIC) bitki büyümesi modelinin basitleştirilmiş halini kullanmaktadır. SWAT ideal koşullar altında yetiştiği varsayılan bitkinin potansiyel büyümesini günlük olarak hesaplamaktadır. Burada bitki büyümesi, yaprak alan gelişimi, bitki türüne özgü olarak belirlenen radyasyon kullanım verimliliği altında bitki tarafından engellenen güneş ışığı ve bu ışığın biyokütleye dönüştürülmesi simüle edilerek modellenmektedir (Neitsch vd., 2011). Bitkinin yaprak alanları vasıtasıyla engellenen güneş radyasyonu Denklem 3.29'da verilen şekilde hesaplanmaktadır.

$$H_{ar} = 0{,}5 \times H_{tr} \times \left(1 - \exp\left(-k_l \times LAI\right)\right) \tag{3.29}$$

Burada, H_{ar} (MJ/m^2) bitki tarafından yakalanan aktif fotosentetik radyasyonu, H_{tr} (MJ/m^2) gelen toplam radyasyonu, k_l ışık sönümleme katsayısını, LAI ise yaprak alan indeksini temsil etmektedir. LAI birim arazi başına düşen yaprak alanı olarak tanımlanmakta ve Denklem 3.30-3.33 yardımı ile hesaplanmaktadır. (Neitsch vd., 2011).

$$fr_{PHU} = \frac{\sum_{i=1}^{n} HU_i}{PHU} \tag{3.30}$$

$$fr_{LA\mathrm{Im}x} = \frac{fr_{PHU}}{fr_{PHU} + \exp(l_1 - l_2 \times fr_{PHU})} \tag{3.31}$$

$$\Delta LAI_i = \left(fr_{laimx,i} - fr_{laimx,i-1}\right) \times LAI_{mx} \times \left(1 - \exp\left(5 \times \left(LAI_{i-1} - LAI_{mx}\right)\right)\right) \tag{3.32}$$

$$LAI_i = LAI_{i-1} + \Delta LAI_i \tag{3.33}$$

Burada, fr_{PHU} potansiyel ısı birimi fraksiyonunu, HU günlük ısı birimini, PHU toplam ısı birimini, fr_{LAImx} maksimum yaprak alan indeksi fraksiyonunu, l_1 ve l_2 şekil katsayılarını, ΔLAI günlük yaprak alan indeksindeki artışını ve LAI_{mx} maksimum yaprak alan indeksini temsil etmektedir.

Bitki büyümesindeki günlük biyokütle artışı ise yakalanan aktif fotosentetik radyasyon ile bitkinin radyasyon kullanım verimliliğinin bir fonksiyonu olarak oluşmaktadır (Denklem 3.34). Toplam biyokütle ise Denklem 3.35'te gösterilmiştir.

$$\Delta bio = RUE \times H_{ar} \tag{3.34}$$

$$bio = \sum_{i=1}^{m} \Delta bio_i \tag{3.35}$$

Burada, Δbio (kg/ha) günlük biyokütledeki artışı, bio toplam bitki biyokütlesini (kg/ha) RUE (kg/ha.(MJ/m^2))$^{-1}$ ise radyasyon kullanım verimliliğini temsil etmektedir. RUE, birim yakalanan solar radyasyon miktarının neden olduğu biyokütle miktarını ifade etmekte olup SWAT veri tabanında her bir ürün için belirlenmiştir.

Mahsul verimi ise toplam biyokütleye ve hasat indeksine bağlı olarak değişmektedir (Denklem 3.37 ve 3.38). Hasat indeksi ise ideal şartlar altındaki bitkinin hasat indeksi (HI_{opt}) ve potansiyel ısı birimi fraksiyonunun (fr_{PHU}) bir fonksiyonudur (Denklem 3.36). fr_{PHU} Denklem 3.30'dan hesaplanmakta olup, HI_{opt} ise SWAT veri tabanından her bir mahsul için belirlenmiştir.

$$HI = HI_{opt} \times \frac{100 \times fr_{PHU}}{\left(100 \times fr_{PHU} + \exp\left(11{,}1 - 10 \times fr_{PHU}\right)\right)} \tag{3.36}$$

$$Y = bio_z \times HI \qquad eğer \qquad HI \leq 1 \tag{3.37}$$

$$Y = bio \times \left(1 - \frac{1}{1 + HI}\right) \qquad \text{eğer} \qquad \text{HI}>1 \tag{3.38}$$

Burada, bio_z (kg/ha) toprak üstünde kalan toplam biyokütleyi, HI hasat indeksini ve Y ise mahsul verimini (kg/ha) ifade etmektedir.

Ayrıca, SWAT kök gelişimini ve kök derinliğini de bitki büyüme dönemi boyunca günlük olarak hesaplamaktadır (Denklem 3.39 ve 3.40). Modelde bitkilerin büyüme

dönemi başlangıcında 10 mm kök derinliğinin olduğu ve potansiyel ısı birimi fraksiyonu (fr_{PHU}) 0.4'e ulaştığı zaman kök derinliğinin maksimuma eriştiği kabul edilmektedir.

$$z_{kd} = 2{,}5 \times fr_{PHU} \times z_{kd,mx} \qquad \text{eğer} \qquad fr_{PHU} \leq 0{,}40 \tag{3.39}$$

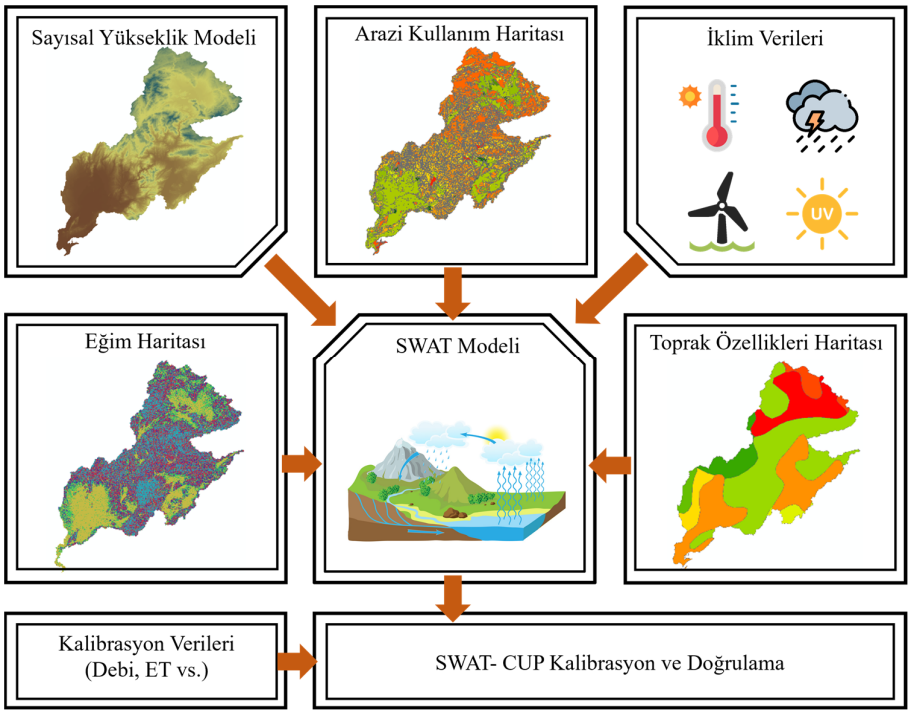
$$z_{kd} = z_{kd,mx} \qquad \text{eğer} \qquad fr_{PHU} > 0{,}40 \tag{3.40}$$

Burada, z_{kd} herhangi bir büyüme dönemindeki kök derinliğini (mm), $z_{kd,mx}$ (mm) maksimum kök derinliğini ifade etmektedir.

Maksimum kök derinliği ürün bazında ve toprak tipine göre değişmekte olup, ürünlerin (*RDMX*) ve toprak tiplerinin (*SOL_ZMX*) maksimum kök derinlikleri SWAT veri tabanında bulunmaktadır. Denklem 3.39 ve 3.40'ta kullanılan maksimum kök derinliği, bu iki derinlik arasında minimumu olmaktadır.

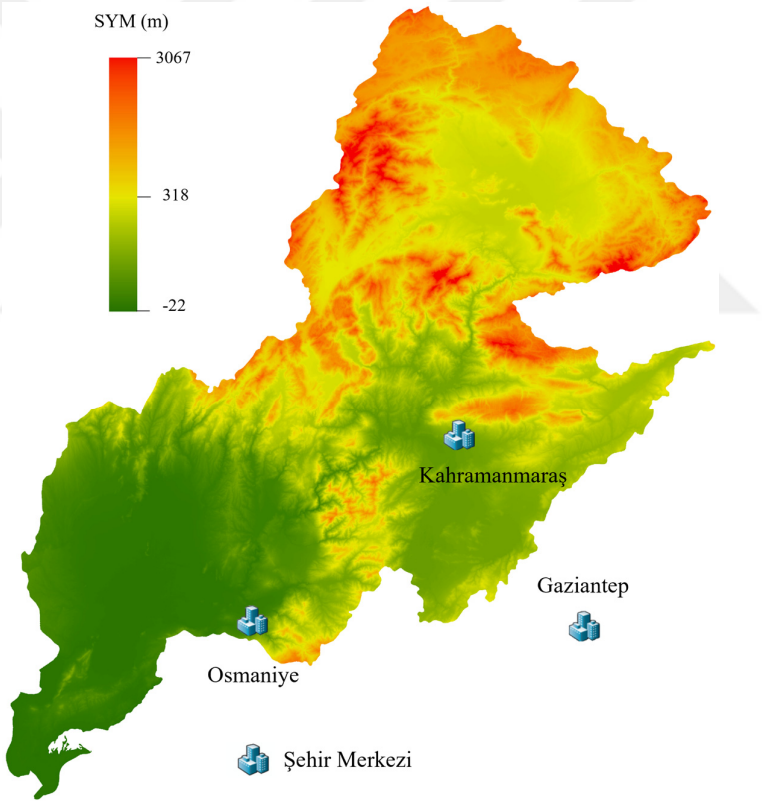
3.3. SWAT Modeli Girdileri

Mevcut çalışmada SWAT modeli, ARCGIS üzerinden çalışabilen ArcSWAT modülü üzerinden oluşturulmuştur. SWAT, çalışma alanını modelleyebilmek için sayısal yükseklik modeli (SYM), arazi kullanım haritası, toprak özellikleri haritası, eğim haritası ve iklim verileri olmak üzere beş temel veri setine ihtiyaç duymaktadır (Şekil 3.5).



Şekil 3.5. SWAT modelinde kullanılan temel veri setleri

Sayısal yükseklik modeli 1950'li yıllardan itibaren kullanılmaya başlanılmış olup, daha kaliteli ve yüksek çözünürlüklü veri sağlaması nedeniyle, basılı topografik haritaların yerini almıştır (Erdoğan, 2007). Birçok alanda sıklıkla kullanılan SYM haritaları, inşaat mühendisliği bölümünde baraj ve yol inşaatı alanlarında sıklıkla kullanılmaktadır (Erdoğan, 2007). SYM modelleri; uçaklar, dronlar ve uydular yardımı ile uzaktan algılama verileri ile oluşturulabilmektedir. Mevcut çalışmada, "*Mekik Radar Topografya Görevi*" (SRTM) projesi kapsamında oluşturulmuş SYM verisi, Amerikan Jeoloji Araştırmaları Kurumu'nun (USGS) web sitesinden temin edilmiştir. Ceyhan havzasının -22 m ile 3067 m arasında değişen sayısal yükseklik modeli Şekil 3.6'da gösterilmiştir.



Şekil 3.6. Ceyhan Havzası sayısal yükseklik modeli

SWAT modelinin ihtiyaç duyduğu ikinci veri seti ise arazi örtüsü haritasıdır. Bu veri setinde, çalışma alanındaki arazi türlerinin alanlarının miktarı ve mekânsal dağılımı modele tanıtılmaktadır. Dolayısıyla arazi kullanım haritalarında; endüstriyel bölgeler, şehir yapıları, tarımsal, ormanlık ve sulak alanlar gibi farklı kategorideki arazi kullanım sınıfları haritalandırılmaktadır. Bu haritalar genellikle uzaktan algılama metotları ile

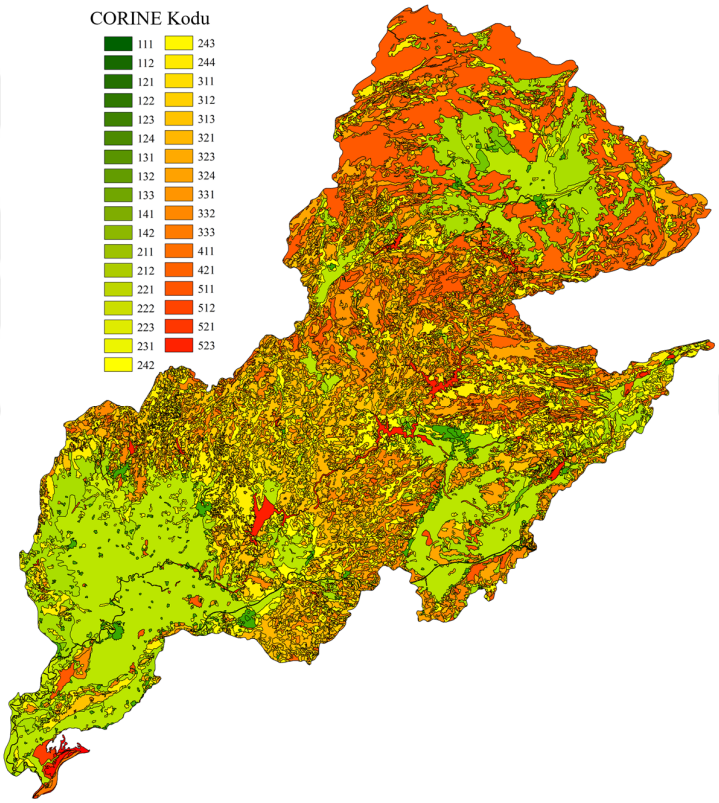
farklı uydu görüntüleri kullanılarak oluşturulmaktadır. Dünya genelinde üretilmiş birçok arazi örtüsü haritası bulunmaktadır. Ülkemizde yapılan çalışmalarda genellikle CORINE, Global Land Survey (GLS), GlobeLve30 ve USGS Global Land Cover Characterization gibi veri setleri kullanılmaktadır (Aktürk, 2019). Avrupa Çevre Ajansı'nın bir projesi olan CORINE arazi kullanım türü bakımından oldukça kapsamlı veri seti sunmaktadır (Özür Karakaş ve Ataol, 2018). 1985 yılında Avrupa Komisyonu tarafından başlatılan CORINE projesine 27 ülke katkı sağlamış ve ilk ürün CLC1990 olarak sunulmuştur. Daha sonra ise aralarında ülkemizin de bulunduğu 39 ülke bu proje kapsamına dahil edilmiş olup 2000, 2006, 2012 ve 2018 yıllarında arazi kullanım haritaları ücretsiz olarak sunulmuştur (Hysa, 2018). CORINE arazi kullanım türlerini üç düzeyde sınıflandırmıştır. Beş ana başlık bulunan sınıflandırmada, ikinci düzeyde 15 ve üçüncü düzeyde toplam 44 başlık bulunmaktadır (Özür Karakaş ve Ataol, 2018) (Tablo 3.3).

Tablo 3.3. CORINE arazi kullanım sınıfları

1. Yapay Bölgeler	**2. Tarımsal Alan**	**3. Orman ve Yarı Doğal Alanlar**
1.1. Şehir Yapısı	2.1. Ekilebilir Alan	3.1. Ormanlar
1.1.1.Sürekli şehir yapısı	2.1.1.Sulanmayan Ekilebilir Alanlar	3.1.1. Geniş Yapraklı Ormanlar
1.1.2.Kesintili/Süreksiz Şehir Yapısı	2.1.2. Sürekli Sulanan Alanlar	3.1.2. İğne Yapraklı Ormanlar
1.2.Endüstri Ticaret ve Ulaşım Birimleri	2.1.3. Pirinç Tarlaları	3.1.3. Karışık ormanlar
1.2.1.Endüstriyel ve Ticari Birimler	2.2.Sürekli Ürünler	3.2. Maki ve Otsu Bitkiler
1.2.2.Karayolları, Demiryolları ve ilgili alanlar	2.2.1. Üzüm Bağları	3.2.1. Doğal Çayırlıklar
1.2.3.Limanlar	2.2.2. Meyve Bahçeleri	3.2.2. Fundalıklar
1.2.4.Havaalanları	2.2.3. Zeytinlikler	3.2.3. Sklerotik Bitki Örtüsü
1.3.Maden Ocağı Boşaltım ve İnşaat Sahaları	2.3.Meralar	3.2.4. Bitki değişim alanları
1.3.1. Maden Çıkarım Sahaları	2.3.1. Mera Alanları	3.3. Bitki örtüsü ile kaplı olmayan veya az miktarda bitki örtüsü ile kaplı açık alanlar
1.3.2. Boşaltım Sahaları	2.4. Karışık Tarımsal Alanlar	3.3.1. Sahiller kumsallar kumluklar
1.3.3. İnşaat Sahaları	2.4.1.Sürekli ürünlerle birlikte bulunan senelik ürünler	3.3.2. Kayalıklar
1.4. Yapay Tarımsal Olmayan Yeşil Alanlar	2.4.2. Karışık Tarım Alanları	3.3.3.Seyrek bitki alanları
1.4.1. Yeşil Şehir Alanları	2.4.3. Doğal bitki örtüsü ile birlikte bulunan tarım alanları	3.3.4. Yanmış alanlar
1.4.2. Spor ve Eğlence Alanları	2.4.4.Ormanla karışık tarım alanları	3.3.5. Buzul ve kalıcı kar
4. SULAK ALANLAR	**5. SU YAPILARI**	
4.1. Karasal Bataklıklar	5.1. Hareketli Sular	
4.1.1.Karasal Bataklıklar	5.1.1. Su yolları	
4.1.2. Turbalıklar	5.1.2. Su kütleleri	
4.2. Denize yakın ıslak alanlar	5.2. Deniz suları	
4.2.1.Tuz bataklığı	5.2.1. Kıyı Lagünleri	
4.2.2. Tuzlalar	5.2.2. Nehir ağızları deltalar	
4.2.3. Gelgit olayı ile oluşan düzlükler	5.2.3. Deniz, okyanus	

Mevcut çalışmada Ceyhan Havzasının arazi örtüsü CORINE projesinin CLC 2018 veri setinden sağlanmıştır (CORINE, 2018). Şekil 3.7'de Ceyhan Havzası'nın arazi örtüsü haritası verilmiştir.

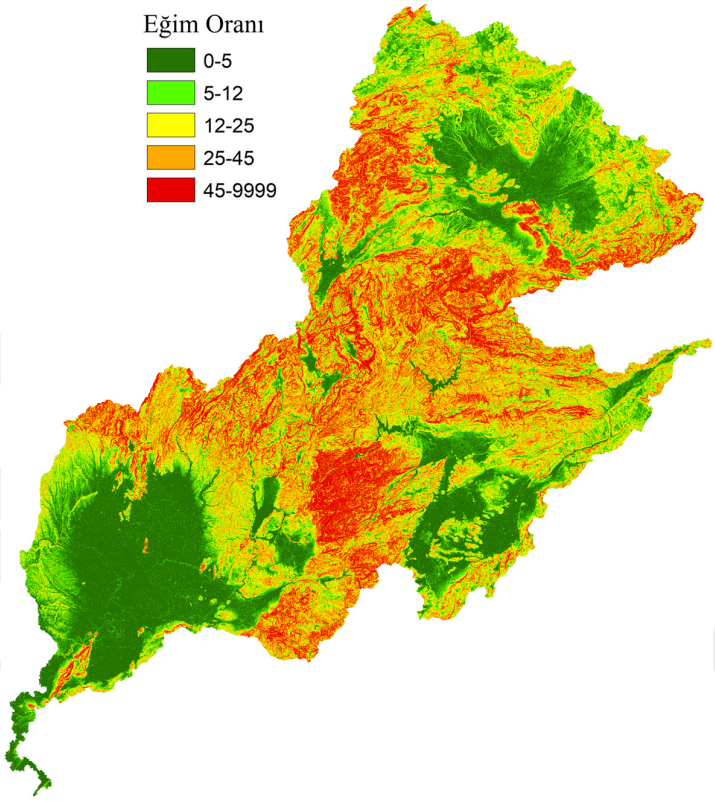
Çalışma alanında 35 farklı arazi kullanım türü bulunmaktadır. Bununla birlikte bazı arazi kullanım türlerinin havza alanında çok az yer kapladığı görülmüştür. Dolayısıyla SWAT modelinin veri tabanında bulunan arazi kullanım türleri göz önüne alınarak, benzer özellikler taşıyan arazi sınıfları birleştirilmiştir. Birleştirme işlemi ile arazi örtüsü sınıfı sayısı 24'e indirilmiştir.



Şekil 3.7. Ceyhan Havzası arazi örtüsü haritası

SWAT modeli, hidrolojik tepki birimlerini oluştururken SYM, arazi örtüsü ve toprak özellikleri veri setinin yanında çalışma alanını eğim sınıflarını da işleme almaktadır. Çünkü eğim derecesi yüzey akışını ve dolayısıyla birçok hidrolojik parametreyi doğrudan etkilemektedir. Eğim sınıfları haritası, SYM veri seti üzerinden direkt olarak model içerisinde üretilebilmektedir. SWAT, kullanıcılara en fazla beş farklı eğim sınıfının oluşturulmasına izin vermektedir. Mevcut çalışmada havzanın temsiliyetinin yüksek olması amacıyla modele beş eğim sınıfı tanımlanmıştır. Modelde,

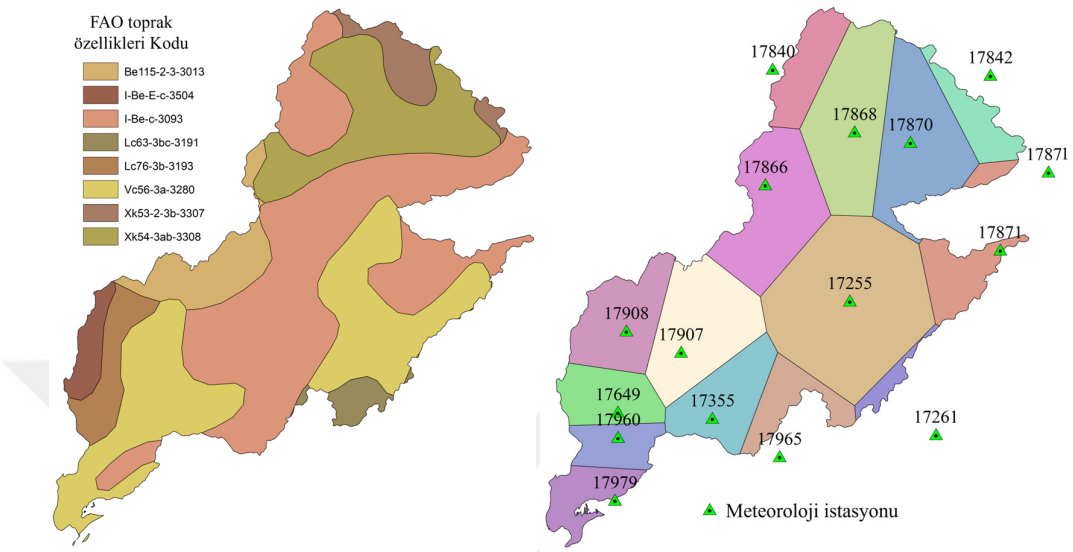
eğim sınıflarının alansal olarak havzada homojen dağılımının sağlanabilmesi için sınıf aralıkları % 0-5, % 5-12, % 12-25, % 25-45, % 45-99 olarak belirlenmiştir. Şekil 3.8'de Ceyhan Havzası'nın eğim sınıfı haritası gösterilmiştir.



Şekil 3.8. Ceyhan Havzası eğim sınıfı haritası

Havza modellemelerinde; sızma, yüzey akışı, toprak su içeriği gibi parametreler toprak tipinden ve karakteristiğinden önemli ölçüde etkilenmektedir. Dolayısıyla hidrolojik modellerin birçoğu toprak özellikleri veri setine ihtiyaç duymaktadır. SWAT modelinin de temel girdilerinin dördüncüsü toprak özellikleri haritasıdır. Bu veri seti bazı araştırmalarda saha çalışmaları sonucunda numuneler incelenerek elde edilirken, bazı çalışmalarda ise toprak özellikleri veri seti direkt yerel kuruluşlardan da temin edilebilmektedir. Bununla birlikte küresel çaplı toprak özellikleri veri setleri de bulunmaktadır. Literatürde en çok kabul görmüş ve güvenilirliği yüksek olan küresel ölçekli veri seti Birleşmiş Milletler Gıda ve Tarım Örgütü'nün (FAO) hazırladığı toprak haritasıdır. Ülkemizde de SWAT modeli ile yapılan çalışmaların büyük bir kısmında FAO'nun veri seti kullanılmıştır (Peker ve Cüceoğlu, 2022). Mevcut çalışmada *FAO*

DSMW (Digital Soil Map of the World) veri seti kullanılmıştır. Şekil 3.9'da mevcut çalışmada kullanılan Ceyhan Havzası'nın toprak özellikleri haritası gösterilmiştir.



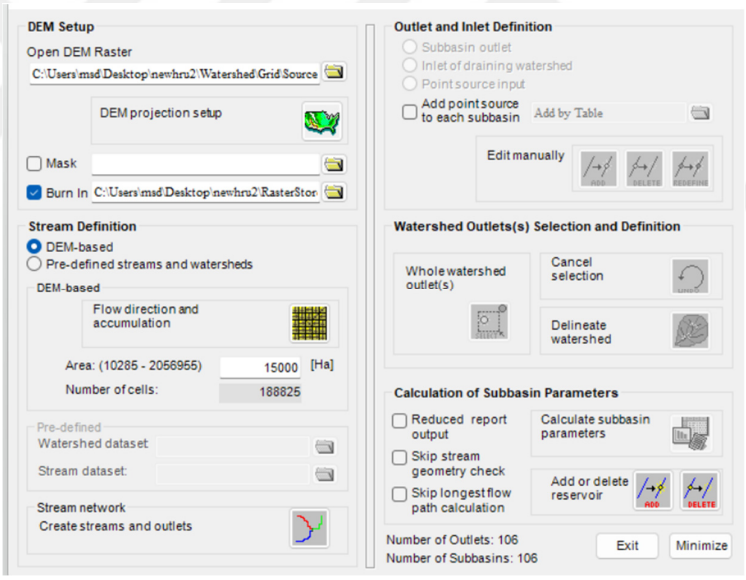
Şekil 3.9. Ceyhan Havzası toprak özellikleri haritası ve MGM istasyonlarının Ceyhan Havzası'ndaki temsil alanı

SWAT potansiyel ET hesaplarında kullanılacak yönteme göre farklı meteorolojik verilere ihtiyaç duymaktadır. Mevcut çalışmada Penman–Monteith yöntemi kullanıldığı için günlük yağış miktarı (mm), solar radyasyon (MJ/m^2), rüzgâr hızı (m/s), bağıl nem oranı ve minimum-maksimum sıcaklık (ºC) verilerine ihtiyaç duyulmuştur. Çalışma alanı farklı iklim tipleri arasında bir geçiş bölgesi olmasından dolayı, iklim verilerinin değişkenliği yüksek olabilmektedir. İklim verilerindeki varyasyonun daha iyi yakalanabilmesi amacıyla mevcut çalışmada olabildiğince fazla istasyondaki veri setleri kullanılmıştır. Bu doğrultuda, MGM'ye bağlı Ceyhan Havzası içinde ve çevresinde bulunan toplam 16 meteoroloji istasyonundan iklim verileri temin edilmiştir. Şekil 3.9'da modelde kullanılan meteoroloji istasyonlarının konumları ve bu istasyonların temsil alanları Thiessen polygon metodu ile gösterilmiştir.

3.4. SWAT Modelinin Kurulumu

Model ARCGIS'e entegre edilmiş ArcSWAT üzerinden oluşturulmuştur. Basit bir arayüze sahip model, beş adımda oluşturulmaktadır. İlk olarak sayısal yükseklik modeli üzerinden akım ağı ve alt havzalar oluşturulmuş ve akım gözlem noktaları işaretlenmiştir (Şekil 3.10). Bu aşamada ilk olarak USGS'den temin edilen SYM, çalışma alanına uygun

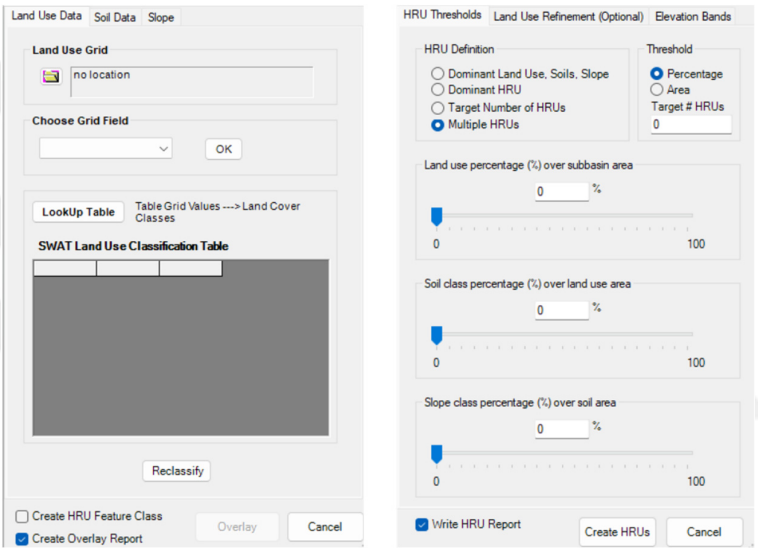
olarak kırpılmış ve ARCGIS üzerinden koordinatlandırılıp, projeksiyonu oluşturulmuştur. Ceyhan Havzası, Kuzey Yarımkürede UTM (Universal Transversal Merkator) 37. zonda bulunduğundan dolayı SYM ve diğer altlıkların projeksiyonları WGS 1984 UTM Zone 37N olarak oluşturulmuştur. Akım ağı oluşturulurken, DSİ'den temin edilmiş akım ağı haritası "Burn in" sekmesinde kullanılarak daha doğru bir ağ oluşturulmuştur. Ayrıca Ceyhan Nehri üzerinde bulunan önemli su yapılarından olan Aslantaş, Menzelet ve Sır barajlarının aylık ortalama deşarj debileri, maksimum işletme göl hacmi ve alanı, minimum işletme göl hacmi ve alanı ve simülasyon başlangıcındaki (01/01/2011) rezervuar hacmi verileri DSİ'den temin edilerek uygun formatta modele işlenmiştir. Daha sonra havzanın çıkış noktası belirlenerek akım ağı ve alt havzalar oluşturulmuştur. Seçilen çözünürlüğe bağlı olarak havza toplamda 108 alt havzaya ayrılmıştır.



Şekil 3.10. Havzanın bölümlenerek akım ağının oluşturulması

Modelin ikinci aşamasında "HRU Analysis" sekmesinde arazi örtüsü, toprak özellikleri haritası modele tanıtılıp eğim haritası ve hidrolojik tepki birimleri (HRU) oluşturulmuştur (Şekil 3.11). CORINE arazi örtüsü haritasında ve FAO toprak özellikleri haritasında bulunan sınıfların bazıları SWAT veri tabanında bulunmamaktadır. Dolayısıyla, bu aşamada öncelikle arazi örtüsü ve toprak özellikleri haritaları SWAT formatına uygun hale getirilmelidir. Bu sebeple, benzer özellikli bazı arazi sınıfları birleştirilmiş ve "MAP Window" veri tabanındaki toprak sınıfları SWAT'a tanıtılmıştır. Ayrıca bu aşamada detayları Bölüm 3.3'te ifade edilen beş sınıftan oluşan eğim haritası

modele tanımlanmıştır. “HRU Analysis” aşamasının ikinci kısmında HRU eşikleri tanımlanmakta ve yükseklik bantları oluşturulabilmektedir (Şekil 3.11). SWAT gereksiz ve yüksek HRU sayılarının önüne geçerek analiz süresini kısaltmak ve işlemciyi rahatlatmak adına HRU’ların birleştirilebilmesini önermektedir. Bu amaçla arazi örtüsü, toprak özellikleri ve eğim sınıflarına eşik değerler verilerek, alt havza alanının eşik seviyesinden daha az bir yüzde ile yer kaplayan HRU’lar elimine edilmektedir (Her vd., 2015). Eleme işleminden sonra arta kalan HRU’lar yeniden paylaştırılır, böylece alt havzadaki arazi alanının %100'ü modellenir (Neitsch vd., 2011).



Şekil 3.11. HRU’ların oluşturulması

SWAT’ın resmî sitesindeki dokümantasyonunda, arazi kullanımı için %20, toprak özellikleri için %10 ve eğim için %20 eşiklerinin kullanılmasının çoğu durumda yeterli olacağı belirtilmiştir (Winchell, Srinivasan, Luzio ve Arnold, 2013). Mevcut çalışmada arazi kullanımı, toprak özellikleri ve eğim sınıfları için eşik değerler sırasıyla %5, %5 ve %20 olarak belirlenmiş ve havza 7028 HRU’dan oluşturulmuştur. Ayrıca yine bu aşamada yüksekliğin yağış, sıcaklık ve kar erimeleri üzerindeki etkilerini hesaba katmak amacıyla yükseklik bantları oluşturulmuştur.

Son aşamada SWAT modeline uygun olarak düzenlenen günlük ölçekli iklim verileri (yağış, solar radyasyon, rüzgâr hızı, bağıl nem ve minimum-maksimum sıcaklıklar) modele tanıtılarak model çalıştırılmıştır. Mevcut çalışmada model 2011-2021 yılları arasında çalıştırılmış ve 1 yıllık süre ısınma periyodu olarak tanımlanmıştır.

3.4.1. Kalibrasyon ve validasyon

Hidrolojik modellerin çalışma alanının anlamlı ve doğru bir şekilde temsil edilebilmesi için, gerçek saha koşullarında gözlemlenmiş veriler ile kalibre edilmesi gerekmektedir. Kalibrasyon aşamalarının etkin bir şekilde gerçekleştirilebilmesi için öncelikle SWAT modelindeki belirsizliklerin minimum seviyede olması gerekmektedir. Fakat, modelleme aşamasında hidrolojik süreçlerin karmaşıklığından dolayı birçok belirsizlikle karşılaşılabilmektedir. Hidrolojik modellerdeki belirsizlikler çevresel kaynaklı, girdi verilerindeki ve model parametrelerindeki belirsizlikler olmak üzere üç başlıkta incelenmektedir (Abbaspour vd., 2007).

Geniş havzalarda yapılan çalışmalarda, havzadaki bütün etmenler göz önüne alınamamaktadır. Örneğin atık su deşarjının veya hayvan yetiştiriciliğinin su kalitesine etkisi modele tanıtılamamaktadır (Abbaspour, 2015). Bu durum çevresel kaynaklı belirsizlikleri arttırabilir. Ayrıca yol, baraj ve köprü inşaatları sırasında sediment taşınımını etkileyecek etmenlerin göz önüne alınamaması da bu duruma neden olmaktadır (Abbaspour, 2015). İkinci belirsizlik ise girdi verilerindeki belirsizliktir. Model, noktasal verileri (yağış, sıcaklık, rüzgâr hızı vs.) alansala çevirerek hidrolojik döngüyü çözümlemektedir. Bu durum bazı hatalara ve belirsizliklere neden olmakta olup özellikle dağlık bölgelerde belirsizlik artmaktadır (Abbaspour, 2015). Ayrıca girdi verilerinin temin edildiği istasyonlardaki ölçüm belirsizlikleri de modelin doğruluğunu etkilemektedir. Son belirsizlik ise modelde kullanılan parametrelerin (*CN2* veya *epco* gibi) belirsizliğidir. Çevresel ve girdi verilerindeki belirsizlikler modelleme aşamasında, kalibrasyon işlemleri gerçekleştirilmeden minimize edilmelidir. Aksi takdirde kalibrasyon aşamalarında yeterli derecede iyileşme sağlanamayabilmektedir (Abbaspour vd., 2007). Parametre belirsizlikleri ise kalibrasyon işlemleri ile havzayı en iyi temsil edecek şekilde iyileştirilebilmektedir.

Hidrolojik modellerin kullanılmaya başlandığı ilk zamanlarda kalibrasyon işlemleri manuel olarak gerçekleştirilmiş olsa da günümüzde gelişen teknoloji ile birlikte Genelleştirilmiş Olası Belirsizlik Tahmini (Generalized Likelihood Uncertainty Estimation, GLUE), Parametre Çözümü (Parameter Solution, ParaSol) ve Sıralı Belirsizlik Uyarlama Sürüm 2 (Equential Uncertainty Fitting version 2, SUFI-2) gibi çeşitli algoritmalar geliştirilmiştir (Moreira vd., 2020). Literatürdeki bazı araştırmalarda farklı metotlar kullanılmış olsa da (Duru vd., 2018), çalışmaların çoğunda kalibrasyon ve

validasyon işlemleri, kolaylığı ve verimliliği nedeniyle (Peker ve Sorman, 2021) SWAT-CUP üzerinden SUFI-2 algoritması kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

SWAT-CUP, SWAT modelinin kalibrasyonu için geliştirilmiş, birçok farklı algoritmanın kullanımına izin veren, otomatik bir belirsizlik analizi ve kalibrasyon programıdır (Sao vd., 2020). SWAT-CUP her ne kadar otomatik bir kalibrasyon modülü olsa bile, tatmin edici sonuçlar alınabilmesi için kalibrasyon sırasında gerekli işlem adımlarının sırasıyla ve prosedürlere uygun olarak gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Mevcut çalışmada öncelikle hassasiyet analizleri gerçekleştirilmiş, sonrasında kar, yağış ve sıcaklık parametreleri kalibre edilmiş ve daha sonra diğer hassas parametrelere geçilmiştir. Son olarak validasyon ve performans analizi gerçekleştirilerek model nihai kullanıma hazır hale getirilmiştir.

Mevcut çalışmada model kalibrasyonu SWAT-CUP SUFI-2 algoritması ile, Ceyhan Havzası'nın genelini temsil eden dört farklı noktada bulunan (Şekil 3.1) DSİ'nin akım gözlem istasyonlarından alınan aylık ortalama debi değerleri ile gerçekleştirilmiştir. Kalibrasyon ve validasyon periyotları belirlenirken her iki periyodun olabildiğince benzer olması gerekmektedir (Arnold vd., 2012). Bu bağlamda, her bir istasyon için bu periyotlar ayrı ayrı değerlendirilmiş olup Tablo 3.4'te gösterilmiştir. Burada sadece Karaahmet istasyonu hariç diğer istasyonlarda, veri eksikliği sebebi ile validasyon 2020 yılına kadar gerçekleştirilmiştir.

Tablo 3.4. Kalibrasyon ve validasyon periyotları

AGİ İstasyonu	Kalibrasyon periyodu	Validasyon periyodu
Karaahmet AGİ	Ocak 2014-Temmuz 2018	Temmuz 2018-Eylül 2021
Kadirli AGİ	Ocak 2014-Ocak 2018	Ocak 2018-Eylül 2020
Hemite AGİ	Ocak 2014-Ocak 2018	Ocak 2018-Eylül 2020
Misis AGİ	Ocak 2014-Ocak 2018	Ocak 2018-Eylül 2020

3.4.1.1. Hassasiyet analizi ve kalibrasyon prosedürü

Hassasiyet analizleri ve kalibrasyon işlemlerinden önce SWAT-CUP girdi verilerinin model formatına uygun olarak hazırlanması ve amaç fonksiyonunun belirlenmesi gerekmektedir. Model kullanıcıya 11 farklı amaç fonksiyonu sunmaktadır. Literatürde birçok çalışmada Nash-Sutcliffe (NSE) katsayısı (Denklem 3.41) amaç fonksiyonu olarak kullanılmaktadır (Gungor vd., 2016; Peker ve Sorman, 2021). Mevcut çalışmada da amaç fonksiyonu olarak NSE katsayısının maksimize edilmesi tanımlanmıştır.

SWAT modelinde yüzey akışı, sızma ve buharlaşma gibi faktörleri etkileyebilecek birçok parametre bulunmaktadır. Bütün parametrelerin SWAT-CUP ile kalibre edilmesi ve kabul edilebilir sonuçlar alınması mümkün değildir. Bu sebeple öncelikle hassasiyet analizleri gerçekleştirilerek havzanın duyarlı olduğu parametreler belirlenmeli ve bunlar üzerinden kalibrasyon adımlarının gerçekleştirilmesi gerekmektedir.

Hassasiyet analizleri, parametrelerin teker teker değerlendirildiği yerel ve birçok parametrenin birlikte değerlendirildiği global hassasiyet analizleri olmak üzere ikiye ayrılmaktadır (Moreira vd., 2020). Global hassasiyet analizleri sonucunda bazen havzaya duyarsız görülen parametreler, yerel analizde duyarlı olabilmektedir (Cuceoglu vd., 2017). Bu sebeple mevcut çalışmada, ilk olarak global hassasiyet analizleri; akabinde yerel hassasiyet analizleri gerçekleştirilmiştir. Hassasiyet analizleri için literatürde en sık kullanılan ve havzaya duyarlı olabileceği düşünülen 20 parametre seçilmiş ve her bir istasyonda bu parametreler ile hassasiyet analizleri gerçekleştirilmiştir. Burada havzaya duyarlı parametrelerin belirlenmesinde p-value ve t-stat değerlerine göre karar verilmekte olup p-value ne kadar sıfıra yakınsa ve t-stat'ın mutlak değeri ne kadar büyükse parametre o kadar hassastır (Peker ve Sorman, 2021).

Hassasiyet analizlerinin ardından havzada belirlenen dört istasyon için ayrı ayrı kalibrasyon işlemleri gerçekleştirilmiştir. Kalibrasyon sırasında bütün parametrelerin (kar, yükseklik-yağış, yükseklik-sıcaklık vb.) aynı anda kalibre edilmesi normal dışı sonuçların elde edilmesine neden olabilmektedir (Peker ve Sorman, 2021). Dolayısıyla mevcut çalışmada kalibrasyon prosedürlerine uygun olarak ilk olarak yükseklik farklarının yağış ve sıcaklık üzerindeki etkilerini belirleyen *PLAPS* ve *TLAPS* parametreleri 100 iterasyonla kalibre edilmiştir. Ardından kar yağışı ve erime faktörleri olan *SFTMP*, *SMTMP*, *SMFMX*, *SMFMN* ve *TIMP* parametreleri 350 iterasyon ile kalibre edilmiştir. Son olarak diğer hassas parametreler belirlenen minimum ve maksimum değerler arasında, 500 iterasyonla kalibre edilmiş ve bir sonraki kalibrasyon için yeni minimum ve maksimum değerler belirlenmiştir. Bu işlem adımı performans kriterleri değişmeyene kadar birkaç kez tekrarlanmıştır.

3.4.1.2. Performans analizi

Kalibrasyon sonuçlarının doğruluğu; determinasyon katsayısı (R^2), Nash–Sutcliffe verimlilik katsayısı (*NSE*) ve yüzde sapma (*PBIAS*) gibi istatistiki parametreler

ile değerlendirilmektedir. Determinasyon ve NSE verimlilik katsayısı 0 ile 1 arasında değer alabilirken 1'e yakın olması modelin daha doğru olduğunu göstermektedir (El-Sadek ve Irvem, 2014). PBIAS ise 0'a yaklaştıkça modelin daha doğru sonuçlar verdiği söylenebilir. Literatürde model doğruluğu için genel kabul görmüş performans kriter aralığı Tablo 3.5'te gösterilmiştir (Santhi vd., 2001**;** Akiner ve Akkoyunlu, 2012; Awasthi ve Kumar, 2021**;** Yuemei vd., 2007). Ayrıca Denklem 3.41, 3.42 ve 3.43'te sırasıyla *NSE*, R^2 ve *PBIAS* istatistiki kriterlerin formülizasyonları gösterilmiştir (Luan vd., 2018).

Tablo 3.5. Performans kriterleri

Performans değerlendirmesi	**R^2**	**NSE**	**PBIAS**
Çok iyi	R^2>0.85	NSE>0.75	PBIAS< ±10
İyi	0.7< R^2≤0.85	0.65<NSE≤0.75	±10≤PBIAS< ±15
Yeterli	0.6< R^2≤0.7	0.5<NSE≤0.65	±15≤PBIAS< ±25
Yetersiz	R^2≤0.6	NSE ≤0.5	PBIAS≥ ±25

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(Q_m - Q_s)^2}{\sum_{i=1}^{n}(Q_m - Q'_m)^2} \tag{3.41}$$

$$R^2 = \frac{\left[\sum_{i=1}^{n}(Q_m - Q'_m)(Q_s - Q'_s)\right]^2}{\sum_{i=1}^{n}(Q_m - Q'_m)^2 \cdot \sum_{i=1}^{n}(Q_s - Q'_s)^2} \tag{3.42}$$

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^{n}(Q_m - Q_s)}{\sum_{i=1}^{n}Q_m} \times 100 \tag{3.43}$$

Burada, Q_m gerçek veriyi, Q_s simülasyon verisini, Q'_m gerçek verilerin ortalamasını ve Q'_s simülasyon verilerinin ortalamasını temsil etmektedir.

3.4.2. Tarımsal yönetimin tanımlanması

Çalışma alanında ürün çeşitliliğinin fazla olması nedeniyle, mevcut çalışmada havza genelini temsil edebilecek, geniş ekim alanına ve yüksek üretim miktarına sahip ürünler belirlenerek modelde kullanılması amaçlanmıştır. Bu amaçla, TUİK'in yıllık zamansal ölçekli ilçe bazında sağladığı tarımsal üretim istatistiklerinden yararlanılmıştır.

TUİK, “sebzeler”, “meyve içecek ve baharat bitkileri”, “süs bitkileri”, “tahıllar ve diğer bitkisel ürünler” gibi farklı kategorilerde tarımsal üretim ve tarım alanı istatistiklerini kullanıcılara sağlamaktadır. Mevcut çalışmada SA çalışmalarının odak noktasında bulunan tahıl ürünleri çalışılmış olup, bu doğrultuda TÜİK’in “tahıllar ve diğer bitkisel ürünler” grubundaki istatistikler kullanılmıştır. Bu ürünlerin, 2011-2020 yılları arasında Ceyhan Havzası’nda sınırı olan ilçelerin, 10 yıllık ortalama toplam ekili alanları ve üretim miktarları belirlenmiştir.

Onikişubat ve Dulkadiroğlu gibi ilçelerin coğrafi sınırlarının tamamı Ceyhan Havzası içerisinde yer alırken, Darende ve Yüreğir gibi ilçelerin ise çok küçük bir kısmı havza içerisinde kalmaktadır. Bu durum, havza içerisinde yetiştirilen ürünlerin net üretim miktarları ve ekili alanlarının belirlenememesine neden olmaktadır. Mevcut çalışmada, ilçelerdeki tahıl yetiştiriciliğinin homojen olarak dağılım gösterdiği varsayılarak, ilçelerin havza içindeki tarımsal alan ve üretim miktarı dağılımları Tablo 3.6’da verilen oranlar kapsamında belirlenmiştir. Mevcut çalışmada, “tahıl ve diğerleri” grubunda toplam ekili alanın yaklaşık %90’ına yakınını oluşturan kışlık buğday, durum buğdayı, arpa, mısır, silajlık mısır, pamuk, patates ve ayçiçeği olmak üzere sekiz farklı ürün incelenmiştir. Bu ürünlerle ilgili veriler Tablo 3.7’de gösterilmiştir.

Tablo 3.6. Ceyhan Havzası’nda tahıl ve diğerleri grubundaki tarımsal faaliyet istatistikleri

	İlçe oranı* (%)	**Ekili alan (km^2)**	**Üretim miktarı (10^3 t)**
Afşin	100.0	472	344
Andırın	99.0	156	102
Bahçe	86.7	30	15
Çağlayancerit	83.9	21	8
Ceyhan	91.0	1,023	658
Darende	5.4	7	3
Dulkadiroğlu	100.0	200	122
Düziçi	100.0	2,248	113
Ekinözü	87.5	34	15
Elbistan	97.1	604	455
Göksun	76.3	265	147
Gölbaşı	39.7	34	13
Gürün	13.2	37	9
Hasanbeyli	97.0	27	10
İmamoğlu	61.8	218	103
Kadirli	100.0	413	283
Kozan	64.5	322	166
Nurdağı	55.4	147	157
Nurhak	26.1	5	1
Onikişubat	100.0	172	95
Osmaniye M.	86.7	256	165
Pazarcık	58.0	166	114

Tablo 3.6'nın devamı

	İlçe oranı* (%)	Ekili alan (km^2)	Üretim miktarı (10^3 t)
Sarıçam	31.9	127	71
Sarız	33.3	42	29
Sumbas	99.8	119	96
Toprakkale	61.0	31	20
Türkoğlu	99.6	203	143
Yumurtalık	15.1	48	23
Yüreğir	18.5	110	89
Ceyhan H. Toplam		5,510	3,571

***** İlçenin havza içerisinde kalan alanının, toplam ilçenin alanına oranını ifade etmektedir.

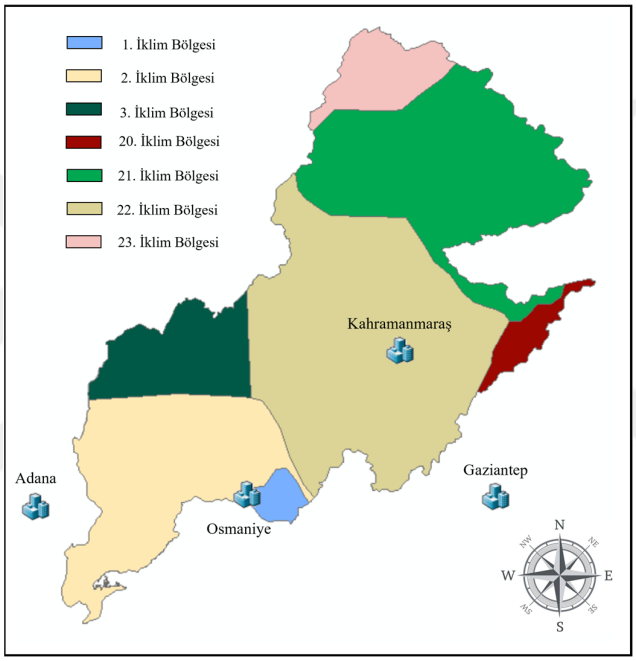
Tablo 3.7. Çalışmada incelenen mahsullerin ekim alanları ve üretim miktarları

Ürün	Ekili Alan (km^2)	Üretim miktarı (10^3 t)	Toplam ekili alan içindeki oranı (%)	Toplam üretim içerisinde oranı (%)
Kışlık Buğday	2,216	779	40.2	21.8
Mısır	948	938	17.2	26.3
Arpa	402	110	7.3	3.1
Durum Buğdayı	331	141	6.0	3.9
Ayçiçeği Tohumu	343	103	6.2	2.9
Pamuk	455	154	8.3	4.3
Slajlık Mısır	116	507	2.1	14.2
Patates	27	89	0.5	2.5
Havza Geneli	4,838	2,822	88	79

Tarımsal ürünler, kendi türlerine özgün olarak çimlenme ve büyüme dönemlerinde farklı iklim koşullarına ihtiyaç duyarlar. Bu sebeple aynı bölgede yetişen her bir ürünün ekim ve hasat tarihleri farklı olabilmektedir. Bununla birlikte, geniş çalışma alanlarındaki iklimsel farklılıklardan dolayı aynı ürünlerde de ekim ve hasat tarihleri değişebilmektedir. Dolayısıyla çözünürlüğün yüksek olduğu hidrolojik modellemeler ile gerçekleştirilen SA çalışmalarında, tarımsal yönetimin uygun bir şekilde belirlenmesi önem arz etmektedir. Mevcut çalışmada mahsullerin havza içerisindeki ekim ve dikim tarihlerinin belirlenmesinde TAGEM verilerinden ve ısı birimi (heat unit) teorisinden yararlanılmıştır.

TAGEM tarafından yayınlanan "Türkiye'de Sulanan Bitkilerin Bitki Su Tüketimleri" adlı raporda Türkiye'de aynı iklim özelliklerine sahip bölgeler 29 farklı iklim sınıfına ayrılmış ve tarımsal ürünlerin ekim-hasat tarihleri, büyüme dönemi uzunlukları, buharlaşma yükseklikleri vs. belirlenmiştir. Buna göre Ceyhan Havzası yedi iklim sınıfından oluşmaktadır (Şekil 3.12). Mevcut çalışmada 1. İklim bölgesinin havza alanında çok küçük bir bölgeyi temsil ettiğinden dolayı bunun yerine 2. İklim bölgesi

verileri kullanılmış olup, alt havzalar altı sınıfta kategorize edilerek ürünlerin ekim ve hasat tarihleri belirlenmiştir (Tablo 3.8). Bununla birlikte, aynı iklim bölgesinde yükselti farklarına bağlı iklimsel farklılıklar da görülebilmektedir. Bu sebeple, iklim bölgesinin tamamında aynı ekim ve hasat tarihlerinin belirlenmesi ürünlerin verimleri üzerinde büyük farkların oluşmasına neden olacaktır. Bu durumun önüne geçmek adına ısı birimi teorisinden yararlanılarak, aynı iklim bölgesindeki bazı alt bölgelerde ekim ve hasat tarihlerinde değişikliklere gidilmiştir.



Şekil 3.12. Ceyhan Havzası'ndaki iklim bölgeleri (Veri kaynağı: TAGEM (2017)

Tablo 3.8. Farklı iklim bölgelerinde (İ.B.) mahsullerin ekim ve hasat tarihleri (TAGEM 2017)

Ürünler	2.İ.B.	3.İ.B.	20.İ.B.	21.İ.B.	22.İ.B.	23.İ.B.
K. Buğday	20 Ekim	10 Kasım	10 Ekim	20 Eylül	20 Ekim	10 Ekim
	15 Mayıs	30 Mayıs	5 Temmuz	5 Temmuz	5 Haziran	10 Temmuz
D. Buğdayı	20 Ekim	10 Kasım	10 Ekim	20 Eylül	20 Ekim	10 Ekim
	15 Mayıs	30 Mayıs	5 Temmuz	5 Temmuz	5 Haziran	10 Temmuz
Arpa	30 Ekim	20 Kasım	1 Ekim	10 Ekim	20 Ekim	1 Ekim
	10 Mayıs	25 Mayıs	5 Haziran	20 Haziran	20 Mayıs	15 Haziran
Mısır	5 Nisan	15 Mart	25 Nisan	5 Mayıs	15 Nisan	5 Mayıs
	5 Eylül	10 Ağustos	1 Ekim	10 Ekim	15 Eylül	10 Ekim
S. Mısır	15 Nisan	15 Nisan	5 Mayıs	5 Mayıs	15 Nisan	5 Mayıs
	20 Ağustos	20 Ağustos	15 Eylül	15 Eylül	25 Ağustos	15 Eylül
Pamuk	20 Nisan	15 Nisan	15 Nisan	15 Nisan	15 Nisan	
	20 Ekim	15 Ekim	15 Ekim	15 Ekim	15 Ekim	

Tablo 3.8'in devamı

Ürünler	2.İ.B.	3.İ.B.	20.İ.B.	21.İ.B.	22.İ.B.	23.İ.B.
Patates	10 Nisan	20 Nisan	20 Nisan	20 Nisan	10 Nisan	20 Nisan
	10 Ağustos	20 Ağustos	10 Eylül	10 Eylül	20 Ağustos	10 Eylül
Ayçiçeği	30 Mart	20 Mart	30 Nisan	30 Nisan	20 Nisan	30 Nisan
	15 Ağustos	5 Ağustos	20 Eylül	25 Eylül	15 Eylül	25 Eylül

Isı birimi teorisine göre bitki büyümesinde en büyük etkenin sıcaklık olduğu, bitkinin gelişimi için gerekli taban sıcaklığın üstündeki sıcaklıkların bitki büyümesini hızlandırdığı ve taban sıcaklığının altındaki sıcaklıklarda bitki büyümesinin durduğu varsayılmaktadır. Bu teoride bitki gelişim periyodu boyunca günlük taban sıcaklığın üstündeki sıcaklıklar kümülatif toplanarak, ürünün toplam ısı birimi hesaplanmaktadır (Neitsch vd., 2011) (Denklem 3.44 ve 3.45).

$$HU = T_{ort} - T_{taban} \qquad Eğer \qquad T_{ort} > T_{taban} \tag{3.44}$$

$$PHU = \sum_{i=1}^{n} HU \tag{3.45}$$

Burada, HU (˚C) günlük ısı birimini, T_{ort} (˚C) günlük ortalama sıcaklığı, T_{taban} (˚C) bitki büyümesi için gerekli minimum sıcaklığı, PHU (˚C) bitkinin toplam ısı birimini ve n ise bitki gelişimi için gerekli günü temsil etmektedir.

SWAT modelinin veri tabanında her bir ürünün taban sıcaklıkları belirlenmiş olup, taban sıcaklığına ve ısı birimine göre bitki gelişimi modellenmektedir. Mevcut çalışmada her bir ürünün alt havza ölçeğinde ısı birimleri hesaplanmış ve ısı birimi nispeten düşük olan alt havzalardaki ekim ve hasat tarihleri, aynı iklim bölgesindeki diğer alt havzaların ısı birimleri ile kalibre edilmiştir.

Sulama ve gübreleme işlemleri için SWAT, kullanıcıya otomatik ve manuel olmak üzere iki seçenek sunmaktadır. Manuel yöntem tercih edilirse, kullanıcının her bir HRU ve ürün için sulama zamanını ve miktarını, gübre çeşidini, zamanını ve miktarını modele işlemesi gerekmektedir. Bu durumda gerekli veriler genellikle çiftçi anketleri ve saha araştırmaları ile oluşturulmaktadır. Mevcut çalışmada havza alanının çok geniş olması nedeniyle manuel yöntemin tercih edilmesi oldukça zordur. Otomatik yöntemde, bitki su stresi, kullanıcının belirlediği su stresi eşiğini geçtiğinde model otomatik olarak sulama işlemini gerçekleştirmektedir. Mevcut çalışmada SA analizleri optimum koşullarda gerçekleştirildiği için bitkilerin su stresi yaşamadıkları varsayılmıştır. Bununla

birlikte, gübreleme işlemi için de bitkinin herhangi bir stres yaşamadan ihtiyaç duyduğu besin miktarı sağlanacak şekilde otomatik yöntem kullanılmıştır.

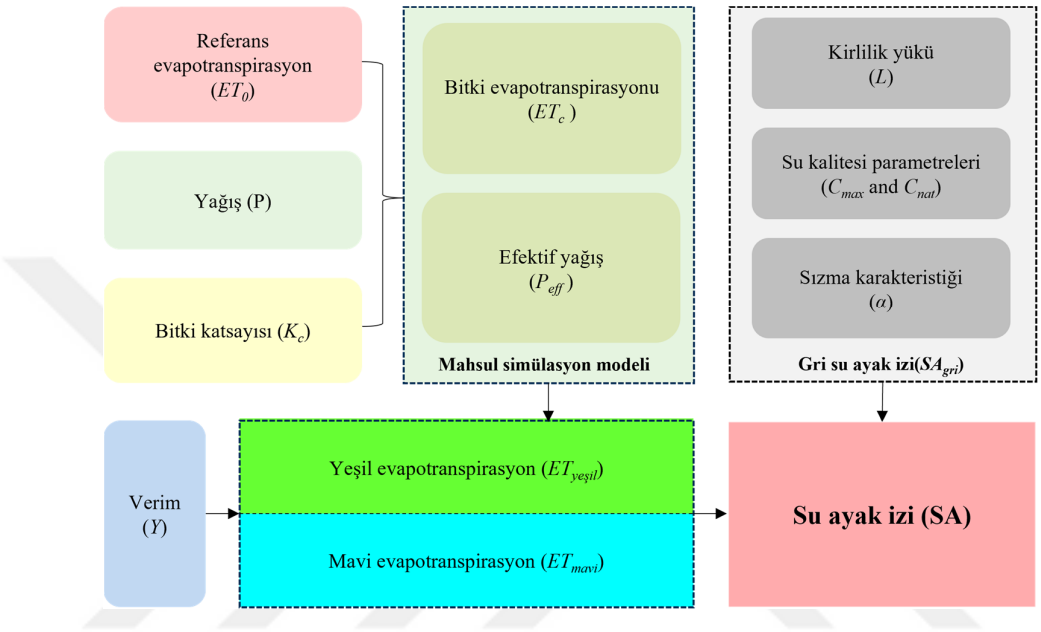
3.5. SA Metodolojisi

SA hesaplamalarında tipik olarak üç ana metodoloji kullanılmaktadır. Bunlar; ampirik yöntemler, bölgesel su dengesine dayalı istatistiksel yöntemler ve hidrolojik modellemeye dayalı yöntemlerdir (Luan, Wu, vd., 2018). SA analizi bu yöntemlerden biri veya birkaçı kullanılarak gerçekleştirilebilir. CROPWAT gibi ampirik yöntemler, hesaplamalar için temel olarak günlük toprak su içeriği dengesini kullanır. İstatistiksel yöntemler, buharlaşmanın (ET) su girişi ve çıkışı arasındaki farkla belirlendiği su dengesi ilkelerine dayanır (Luan, Wu, vd., 2018). Son olarak, hidrolojik modellemeye dayalı yaklaşımlar, hidrolojik döngüde yer alan tüm parametreleri modelleyerek su ayak izini tahmin eder. Hidrolojik yöntemler, toprak tipi, toprak dağılımı ve tarımsal yönetim uygulamaları dahil olmak üzere çeşitli faktörlerin detaylı incelenmesine olanak tanır.

Bu bölümde, bitkisel su ayak izini hesaplamak için yaygın olarak kullanılan modellerden bahsedilmiştir. Su ayak izinin temel ampirik yaklaşımı Şekil 3.13'te genelleştirilmiştir. Literatür çalışmalarının büyük çoğunluğu, *Su Ayak İzi Değerlendirme El Kitabı'*nda Hoekstra vd. (2011) tarafından sunulan yaklaşımı temel alarak hesaplamaktadır. Bu yaklaşımda SA, tüketim ve kirlilik bileşenleri olmak üzere iki unsur etrafında incelenmektedir. Tüketim bileşeni, bitki gelişim süreci boyunca topraktan buharlaşma ve bitkideki terleme de dahil olmak üzere kullanılan toplam suyun tahmin edilmesi ile belirlenmektedir. Hoekstra vd. (2011), toplam su tüketimini ideal koşullar altında gerçekleşen ürün buharlaşması (ET_c) olarak tanımlamaktadır. Burada en önemli unsurlardan biri bitkisel buharlaşmayı mavi ve yeşil olarak ikiye ayırmaktır. Bu bağlamda, mavi ve yeşil su ayak izini belirlemenin odak noktası, kök bölgesinde depolanan ve bitki tarafından bir kaynak olarak kullanılabilen etkili yağış miktarının (P_{eff}) doğru modellenmesidir. Burada P_{eff} ve ET_c; iklim verileri, referans buharlaşma (ET_0) ve ürün katsayıları kullanılarak, mahsul simülasyon modelleri ile hesaplanmaktadır. Sonrasında, mavi ve yeşil ET miktarları Bölüm 3.5.3'te ayrıntılı olarak açıklandığı gibi ayırt edilmektedir.

Kirlilik bileşeni, tarımsal üretim sırasında tatlı suya nüfuz eden gübre ve pestisit gibi kirletici yük miktarları tahmin edilerek hesaplanmaktadır. Bu çerçevede, gri SA, izin verilen maksimum kirlilik konsantrasyonunu (C_{max}) aşan kirlilik yükü miktarını temsil

etmektedir. Buradaki kirlilik yükü Hoekstra vd. (2011) tarafından önerilen metodolojiye göre, sabit bir sızma oranı (α) kullanılarak tahmin edilebilmektedir. Öte yandan, gri SA hesaplamalarında su kaynaklarındaki doğal besin maddesi konsantrasyonu (C_{nat}) da dikkate alınmaktadır (Bölüm 3.5.5).



Şekil 3.13. Klasik SA hesaplama metodolojisi

3.5.1. Tarımsal ürünler ve SA

Bitkiler yaprakları aracılığıyla güneş ışığını ve havayı emerken, kökleri aracılığıyla topraktan besin ve su alırlar. Bitkilerin aldığı suyun bir kısmı temel işlevler için kullanılırken, geri kalanı ise terleme ile atmosfere salınır. Terleme yoluyla gerçekleşen bitki su tüketimi, hidrolojik döngünün ve su ayak izinin önemli bir bileşenidir. Bitki özellikleri, hasat alanı, mahsul verimi vb. parametreler bitkisel su tüketiminin hesaplanmasında kritik öneme haiz faktörlerdir. Bitkisel su tüketimini tahmin etmek üzere çok sayıda mahsul modeli oluşturulmuştur. Bu modeller iklim koşulları, toprak koşulları ve tarımsal yönetim uygulamaları gibi çeşitli faktörleri dikkate almaktadır (Siad vd., 2019).

Literatürde SA hesaplamaları için CROPWAT, AquaCrop, CropSyst, Crop Water Use Model (BSTModel), Agricultural Production Systems sIMulator (APSIM), DSSAT, EPIC ve HERMES gibi çeşitli ürün simülasyon modelleri kullanılmıştır (Elbeltagi vd., 2020; Hoekstra vd., 2012; Luan vd., 2018; Shrestha vd., 2017). AquaCrop ve CROPWAT, bitki büyümesi ve transpirasyon arasında bir korelasyon kuran su merkezli

modeller iken, DSSAT ve EPIC, öncelikle büyüme ve radyasyon arasındaki ilişkiyi dikkate almaktadır (Tolomio ve Casa, 2020). CropSyst ise hem su hem de radyasyon faktörlerini içeren kapsamlı bir ürün modelidir (Tolomio ve Casa, 2020).

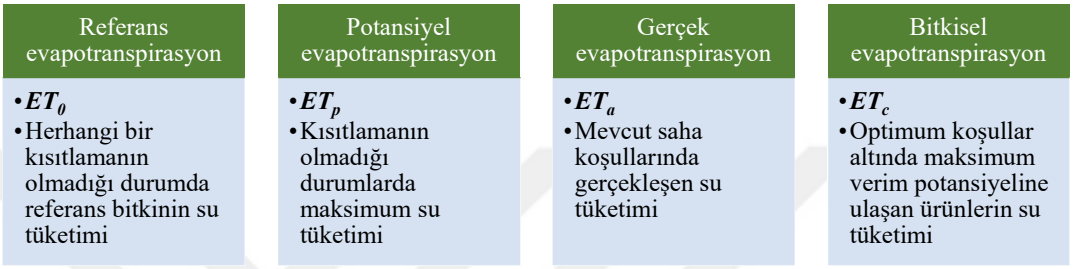
CROPWAT ve AquaCrop modelleri, SA analizlerinde en çok kullanılan ürün modelleridir. CROPWAT, FAO tarafından sulama yönetimi ve planlaması için geliştirilmiştir (Akinbile vd., 2020). Bu model, bitkinin su ihtiyacını ve etkili yağışı hesaplayabilmektedir (Hoekstra vd., 2012). Benzer şekilde, yine FAO tarafından geliştirilen AquaCrop, çeşitli yönetim ve çevre koşulları altında bitki büyümesini suya bağlı olarak simüle etmektedir (Akinbile vd., 2020). Bu, AquaCrop'un sulama stratejileri gibi çevresel faktörlerin etkileri hakkında daha doğru tahminler yapmasını sağlamaktadır (Tsakmakis vd., 2018). Bu iki model arasındaki temel fark, temel olarak bitkisel buharlaşmayı tahmin etme yöntemleri ile ilgilidir. CROPWAT, buharlaşmayı (ET_c), bitki katsayısı (K_c) ve referans buharlaşmanın (ET_0) bir fonksiyonu olarak formüle ederken, AquaCrop buharlaşma ve terlemeyi bağımsız olarak hesaplayarak ikili bir yaklaşım benimsemektedir (Zoidou vd., 2017).

3.5.2. Buharlaşma modelleri ve SA

SA metodolojisinin en önemli parametresi olan buharlaşma (ET), toprak yüzeyinden buharlaşan (evaporasyon) ve bitki transpirasyonu yoluyla atmosfere salınan toplam su miktarıdır. Bu süreç, bitkiler yaşamsal faaliyetlerini gerçekleştirirken yapraklarındaki stoma adı verilen küçük gözeneklerden su buharının dışarı salınması şeklinde doğal olarak gerçekleşir (Budaklı Çarpıcı ve Çelik, 2011). Literatürde, ET için potansiyel, gerçek, referans ve bitkisel buharlaşma olmak üzere çeşitli parametreler geliştirilmiştir. Bu terimler bazen SA çalışmalarında karıştırılabilmektedir.

Referans evapotranspirasyon (ET_0), 12 cm boyunda aktif olarak büyüyen, yeşil çimlerle kaplı, yeterli su kaynağı ile zemini tamamen gölgeleyen geniş bir alanda gerçekleşen ET olarak tanımlanmaktadır (Allen vd., 2006). Potansiyel evapotranspirasyon (ET_p) ise ilk olarak Thornthwaite vd. (1944) tarafından önerilmiş olup, su kıtlığı veya sulama açığı gibi herhangi bir sınırlama olmaksızın geniş bir bitki örtüsü alanından meydana gelebilecek su kaybını ifade etmektedir (Stanhill, 2004; Neitsch vd., 2011). Öte yandan, gerçek evapotranspirasyon (ET_a), realistik koşullar altında meydana gelen su kaybı miktarını göstermektedir. Genel olarak, ET_a, ET_p'den daha azdır, ancak yoğun yağış dönemlerinde her ikisi eşit olabilmektedirler. Son olarak,

bitkisel evapotranspirasyon (ET_c) ise herhangi bir hastalık olmaksızın geniş tarlalarda optimum toprak nemi koşulları ve iyi yönetim uygulamaları altında bitkilerin tam üretime ulaşması için gereken su miktarı olarak tanımlanır (Allen vd., 2006). Pratik tarla koşullarında, yetersiz yağmur ve sulama nedeniyle su stresi oluşabilmekte ve bu da ET_a'nın ET_c'den daha düşük olmasına neden olabilmektedir. Şekil 3.14'te, çeşitli ET türleri karşılaştırılmaktadır.



Şekil 3.14. Çeşitli ET türlerinin karşılaştırılması

ET temel olarak iklim parametreleri (rüzgar hızı, güneş radyasyonu, nem, hava sıcaklığı, vb.), ürün parametreleri (ürün türü, yoğunluğu, büyüme aşaması, vb.) ve tarımsal yönetim ve çevre koşulları (toprak özellikleri, gübreleme, toprak işleme, sulama, vb.) olmak üzere üç faktörden etkilenmektedir (Temesgen vd., 2005). ET'nin matematiksel olarak modellenmesi, içerdiği çok çeşitli parametreler nedeniyle oldukça zordur. Çeşitli varsayımlara dayalı olarak birçok ET modeli geliştirilmiştir (Lu vd., 2005). Denklem 3.46 ile temsil edilen FAO Penman-Monteith yöntemi (Allen vd., 2006), ET'yi tahmin etmek için standart model olarak kabul edilmektedir. Buna göre, referans ET aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır;

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta\left(R_n - G_t\right) + \gamma \frac{900}{T+273} U_2 \left(e_s - e_a\right)}{\Delta + \gamma\left(1 + 0.34U_2\right)} \tag{3.46}$$

Burada, G_t (MJ.m^{-2}.gün^{-1}) toprak ısı akısı yoğunluğunu, T (°C) ortalama sıcaklığı U_2 (m/s) 2 m yükseklikteki rüzgâr hızını, e_s (kPa) doygunluk buhar basıncını, e_a (kPa) gerçek buhar basıncını, Δ (kPa/°C) buhar basıncı eğrisinin eğimi ve γ (kPa/°C) psikometrik sabiti temsil etmektedir.

Daha sonra ET_c, ürün katsayısı ile birlikte ET_0'ın bir fonksiyonu olarak hesaplanır. CROPWAT, su ayak izini tahmin etmek için Denklem 3.47'yi kullanmaktadır.

$$ET_c = K_c \times ET_0 \tag{3.47}$$

Burada, K_c bitki türüne, yetiştirme bölgesine ve gelişme dönemlerine bağlı olarak değişen bir bitki katsayısıdır.

3.5.3. Mavi ve yeşil SA Denklemleri

Toplam SA mavi, yeşil ve gri su ayak izlerinin toplamından oluşmaktadır. Mavi ve yeşil SA, bitkisel su kullanımının verime bölünmesiyle belirlenmektedir (Denklem 3.48 ve 3.49):

$$SA_{mavi} = \frac{BST_{mavi}}{Y} \tag{3.48}$$

$$SA_{yeşil} = \frac{BST_{yeşil}}{Y} \tag{3.49}$$

Burada, SA_{mavi} (m^3/t) mavi su ayak izini, $SA_{yeşil}$ (m^3/t) yeşil su ayak izini, BST_{mavi} (m^3/ha) mavi su tüketimini, $BST_{yeşil}$ (m^3/ha) yeşil su tüketimini ve Y (ton/ha) ürün verimini temsil etmektedir.

BST_{mavi} ve $BST_{yeşil}$ sırasıyla mavi ve yeşil ET toplamlarıdır (Denklem 3.50 ve 3.51).

$$BST_{mavi} = 10\sum ET_{mavi} \tag{3.50}$$

$$BST_{yeşil} = 10\sum ET_{yeşil} \tag{3.51}$$

Burada, ET_{mavi} (mm) mavi evapotranspirasyonu ve $ET_{yeşil}$ (mm) yeşil evapotranspirasyonu göstermektedir. ET_{mavi} ve $ET_{yeşil}$, Denklem 3.52 ve 3.53'te gösterildiği gibi ET_c ve P_{eff}'in bir kombinasyonu ile belirlenmektedir. Burada, bitkinin gelişme aşamasında kaybettiği su miktarı etkili yağıştan azsa, yağış bitki büyümesi için yeterli olacaktır. Bu durumda $ET_{yeşil}$, ET_c'ye eşit olacak ve ET_{mavi} sıfır olacaktır. Ancak, yağış bitkinin su ihtiyacını karşılamak için yeterli değilse, o zaman sulama (mavi su) gerekecektir. Bu durumda ET_{mavi} gerçek ET ile etkili yağış arasındaki farka eşit olacak, $ET_{yeşil}$ ise P_{eff}'e eşit olacaktır.

$$ET_{yeşil} = \min\left(ET_c, P_{eff}\right) \tag{3.52}$$

$$ET_{mavi} = \max\left(0, ET_c - P_{eff}\right) \tag{3.53}$$

Burada, ET_c (mm) ve P_{eff} (mm) sırasıyla bitkisel evapotranspirasyonu ve etkili yağışı temsil etmektedir.

3.5.4. Gri su ayak izinin hesaplanması

Su kirliliğinin kaynakları, noktasal ve yayılı kaynaklar olmak üzere iki kategoriye ayrılmaktadır. Noktasal kaynaklar endüstriyel ve evsel atıklarla ilişkiliyken, yayılı kaynaklar tarımsal üretimde gübre ve pestisit kullanımı ile ilgilidir. Tarımsal gri SA esas olarak azot ve fosfor yüklerine dayanırken, endüstriyel ve evsel gri SA kimyasal ve evsel kirliliklerden oluşmaktadır. Her iki kirlilikten kaynaklanan gri SA genel bir ifade olarak Denklem 3.55'te gösterildiği gibi belirtilebilir (Hoekstra vd., 2011).

$$GSA = \frac{L}{C_{\max} - C_{nat}} \tag{3.55}$$

Burada, GSA gri hacimsel su ayak izini (m^3), L (kg) kirlilik yükü, C_{max} (kg/m^3) ve C_{nat} (kg/m^3) sırasıyla izin verilen maksimum ve doğal kirlilik konsantrasyonlarıdır.

Sudaki kirletici maddelerin miktarı olarak tanımlanan çevresel su kalite standartları, içme suyu, sulama suyu, yüzey veya yeraltı suyu gibi ortamın türüne bağlı olarak önemli farklılıklar gösterebilmektedir (Franke vd., 2013). Hoekstra vd. (2011) yeraltı suyundaki C_{max} değerinin içme suyu standartlarına göre belirlenebileceğini, yüzey suyunda ise ekolojik hususlara dayandığını öne sürmektedir. Yeraltı suyundaki C_{max}, ABD Çevre Koruma Ajansı (USEPA) tarafından belirlenen standartlara uygun olarak 10 mg/L olarak kabul edilmektedir (Ababaei ve Etedali, 2017; Deihimfard vd. 2022; Gobin vd., 2017; Ewaid vd., 2021). C_{nat}, havzada herhangi bir insan etkisi olmaksızın su kaynaklarındaki doğal kirlilik yükünü temsil eder. Bu değerin kesin olarak belirlenmesi zordur; ancak insan faaliyetinin olmadığı durumlarda kirlilik yükünün düşük olması nedeniyle genellikle sıfır olarak kabul edilir (Aldaya ve Hoekstra, 2010; Lovarelli vd., 2016).

Gri SA analizlerinde, noktasal ve yayılı kirleticilerin ayrı ayrı değerlendirilmesi gerekmektedir. Noktasal kirletici yükleri doğrudan su kaynaklarına deşarj edildiği için bunların konsantrasyonunu tahmin etmek nispeten kolaydır. Noktasal kirleticilerin yükü aşağıdaki gibi formüle edilebilir (Franke vd., 2013);

$$L_n = E_v \times k_{eff} - W_{ck} \times k_{ger} \tag{3.56}$$

Burada, L_n sudaki noktasal kirleticinin net yükünü (kg), E_v çıkış suyu hacmini, k_{eff} çıkış suyundaki kirlilik konsantrasyonunu, W_{ck} çekilen su hacmini, k_{ger} giriş suyunun gerçek konsantrasyonunu ifade etmektedir.

Yayılı kirleticilerin tahmin edilmesi ise esas olarak farklı coğrafyalardaki toprak yapısının çok çeşitli ve benzersiz olması nedeniyle karmaşık ve zordur. Çünkü gübre ve pestisit gibi kirleticilerin sadece bir kısmı yeraltı ve yerüstü su kaynaklarına ulaşmaktadır (Hoekstra vd., 2011). Dolayısıyla gri su ayak izini hesaplamak için, su ortamlarına sızan kirlilik oranının belirlenmesi elzemdir (Franke vd., 2013). Bu oranın, karmaşık biyo-jeo-kimyasal süreçler nedeniyle değişken olmasına rağmen, çoğu çalışmada genellikle sabit kaldığı varsayılmaktadır. Bu bağlamda, Hoekstra vd. (2011) tarafından üç kademeli bir yaklaşım önerilmektedir. Kademe 1 en çok kullanılan yaklaşım (Denklem 3.57 ve 3.58) olup bu yaklaşımda nitrat kirliliği için sızıntı oranı (α) genellikle 0.1 olduğu varsayılmaktadır (Han vd., 2018; Govere vd. 2020; Mekonnen ve Hoekstra, 2010). Öte yandan, 2. ve 3. kademeler, daha fazla hassasiyet ve doğruluğun gerekli olduğu daha spesifik bölgelerde kullanılmaktadır. Fakat 2. ve 3. kademeler ek veri setleri gerektirmekte ve daha karmaşık hesaplamalar içermektedir (Muratoglu, 2021).

$$L_{yayılı} = a \times N \tag{3.57}$$

$$SA_{gri} = \frac{L_{yayılı}}{(C_{\max} - C_{nat}) \times Y} = \frac{a \times N}{(C_{\max} - C_{nat}) \times Y} \tag{3.58}$$

Burada, $L_{yayılı}$ sudaki yayılı kirletici yükü (kg/ha), α sızıntı oranını, N (kg/ha) araştırma alanına uygulanan toplam kirlilik bileşeni miktarı, SA_{gri} yayılı gri SA (m^3/t) ve Y (t/ha) mahsul verimidir. Mevcut çalışmada tarımsal üretimin su ayak izinin araştırılmasından dolayı noktasal yükler çalışmanın kapsamı dışındadır.

Birden fazla kirlilik türünün söz konusu olduğu durumlarda, her bir kirleticiye ait gri su ayak izini ayrı ayrı hesaplamak mümkündür. Ancak, toplam gri SA, bireysel gri su ayak izlerinin kümülatif toplamı değildir. Bunun yerine toplam gri SA, kritik kirletici olarak adlandırılan, en yüksek gri su ayak izine neden olan kirletici tarafından belirlenmektedir. Burada kritik kirleticinin doğal konsantrasyonlarına seyreltilmesi, zaten ikincil kirleticilerin de seyreltilmesine neden olacaktır. Böylece, bir bölgedeki toplam gri SA sadece en yüksek konsantrasyona sahip kirleticiye odaklanarak hesaplanmaktadır (Muratoglu, 2021). Bu doğrultuda kirlilik yüklerinden azotun, fosfora göre toprakta daha fazla çözülerek daha yüksek sızıntı oranına sahip olmasından dolayı (Mekonnen ve

Hoekstra, 2018), literatürde genellikle kritik kirletici olarak azot seçilmektedir (Muratoglu, 2020b). Bu çalışma kapsamında da gri SA hesaplamaları, kritik kirletici olarak azotun üzerinden gerçekleştirilmiştir.

3.5.5. SA metodolojisinin kısıtları

SA metodolojisi, su kaynaklarının yönetimi ve değerlendirilmesi için güvenilir ve yaygın olarak kabul gören bir yaklaşımdır. Bu alanda yapılan araştırmalar, su kaynaklarının daha etkin, verimli ve sürdürülebilir kullanımının sağlanmasında önemli ilerlemeler kaydedilmesini sağlamıştır. Bununla birlikte, kavramın göreceli yeniliği, karmaşıklığı, hesaplamalar için gereken verilerin fazlalığı (Muratoğlu, 2020) ve hidrolojik süreçlerin karmaşık doğası nedeniyle çeşitli sınırlamaları da vardır. Bu çalışmada, bu kısıtlılıklar iki sınıfta incelenmiştir. İlk kategori, gerçek tarımsal koşulları tam olarak yansıtmayan ürün modelleriyle ilişkili olan mavi ve yeşil su ayak izini ele almaktadır. İkinci kategori ise gri SA metodolojisindeki kısıtlar ile ilgilidir.

3.5.5.1. Mavi ve yeşil SA ile ilgili Kısıtlar

Ampirik modeller (CROPWAT ve CROPSYST gibi) ve bölgesel su dengesine dayalı istatistiksel modeller, gerçek toprak nemini göz ardı ederek optimum koşullar altındaki buharlaşmayı kullanmaktadırlar (Luan, Wu, vd., 2018). Bununla birlikte, gerçek saha koşullarında, toprak nemi her zaman optimum değildir ve tarım alanları çoğu zaman su stresi ile karşı karşıya kalmaktadırlar. Ayrıca etkili yağışı tahmin etmeye yönelik mevcut teoriler de oldukça yetersizdir. Bu teoriler temel olarak yağışa dayanmakta olup çeşitli mahsul, toprak ve meteorolojik parametreleri dikkate almamaktadır. Ayrıca, tüm çevresel ve bölgesel koşullarda tutarlı bir şekilde doğru tahminler üretmemektedirler. Sonuç olarak, tahmin edilen yeşil ve mavi su ayak izi miktarlarında varyasyonlar olabilmektedir. Buna ek olarak, ampirik modellerin ve bölgesel su dengesine dayalı istatistiksel modellerin mekânsal çözünürlükleri bazen yetersiz kalabilmektedir (Luan, Wu, vd., 2018). Çalışmalar genellikle il düzeyinde yürütüldüğünden, su ayak izindeki bölgesel farklılıklar her zaman net bir şekilde ortaya konulamamaktadır. Bu durum, tarımsal su ayak izinin mekânsal duyarlılığının belirlenmesini ve yerel hedefli çözümlerin geliştirilmesini engelleyerek su yönetimi ve SA değerlendirmelerinde etkinliğin azalmasına yol açabilmektedir.

SA hesaplamalarında tarımsal yönetim uygulamaları (sulama süresi, sulama yöntemi, gübreleme uygulamaları vb.) da SA tahminlerinin doğruluğu üzerinde önemli bir etkiye sahiptir (Lovarelli vd., 2016). Sulama yönetimi, özellikle mavi SA üzerinde kayda değer etkiye sahiptir. Bununla birlikte, çiftçiler tarafından yapılan sulama uygulamalarının çeşitlerini ve tekniklerini belirlemek ve bunları hesaplamalara dahil etmek genellikle zordur. Bu nedenle, genel varsayımlar yapılmaktadır. Dolayısıyla, uygulanan tarımsal yönetim türleri ve sahadaki gerçek durumun tam olarak yansıtılamaması, SA çıktılarında belirsizliklere yol açmaktadır. Buna ek olarak, malçlama ve bitkisel filtre şeridi kullanımı gibi belirli tarım uygulamaları SA değerlerini düşürebilmektedir. Ancak, bu uygulamalar SA hesaplamalarında sıklıkla göz ardı edilmektedir.

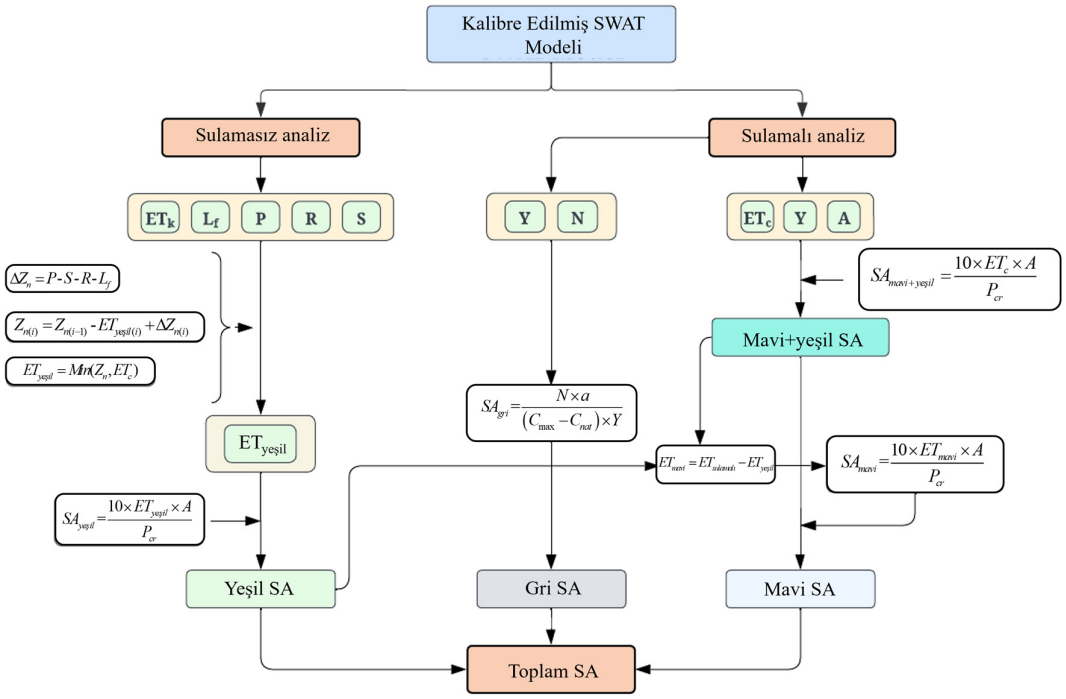
3.5.5.2. Gri su ayak izi ile ilgili kısıtlar

Gri SA yaklaşımı, özellikle kullanılan veri ve modelleme yaklaşımıyla ilgili sınırlamalara tabidir. İlk olarak, gri SA çıktıları (Denklem 3.55) çevresel su kalite standartlarından doğrudan etkilenmektedir. Yüzey ve içme suyu standartları büyük farklılıklar göstermektedir ve literatürdeki çalışmalarda kullanılan standartlar çoğu zaman farklılıklar gösterebilmektedir. Ayrıca, C_{max} ve C_{nat} standartları arasında önemli mekânsal farklılıklar bulunmaktadır (Liu vd., 2017). Bu nedenle kirletici yükü aynı olsa bile gri SA çıktılarında bazen farklılıklara neden olabilmektedir. Ayrıca gübreleme ve pestisit kullanımı gibi tarımsal yönetim uygulamalarının modellere dahil edilmesi, özellikle geniş mekânsal sınırlara sahip analizlerde her zaman mümkün değildir. Bu durum gri SA hesaplamalarında eksikliklere yol açabilmektedir. Öte yandan, su ve toprak kaynaklarının karmaşık davranışları nedeniyle su ortamındaki kirlilik yüklerinin tahmin edilmesi de oldukça zordur. Burada sabit bir sızıntı akış katsayısının kullanılması gri SA analizlerinin belirsizliğini artırmaktadır. Ayrıca, birçok gri SA analizi genellikle eko toksisite, biyolojik parçalanabilirlik ve su arıtımı gibi faktörleri ihmal etmektedir (Lovarelli vd., 2016; Hastings ve Pegram, 2012).

3.6. SWAT Metodolojisi ile SA Hesabı

Mevcut çalışmada SA hesaplamaları kalibre edilmiş SWAT modeli üzerinden her bir mahsulün tarımsal yönetim uygulamaları modele işlenerek ayrı ayrı analiz edilmiştir. Bununla birlikte, yeşil SA hesabında sulama suyunun toprak nemine olan etkilerinin

elimine edilmesi gerekmektedir. Bu sebeple, kalibre edilmiş model üzerinden sulamalı ve sulamasız koşullar olmak üzere iki farklı simülasyon oluşturulmuştur. SA hesaplamaları: tüketimin toplam SA hesabı, mavi ve yeşil su ayak izinin ayrımının yapılması ve kirlilik SA bileşeninin belirlenmesi olmak üzere 3 aşamada gerçekleştirilmiş ve Şekil 3.15'te şematize edilmiştir.



Şekil 3.15. SWAT modeli ile SA hesaplama metodolojisinin şematize gösterimi

Sulamalı analiz sonucunda modelden alınan mahsul verimi, ekili alan ve mahsul büyüme süreci boyunca gerçekleşen ET verileri ile bitkisel tüketimin su ayak izi hesaplanmıştır (Denklem 3.59).

$$SA_{mavi+yeşil} = \frac{10 \times ET_c \times A}{P_u} \tag{3.59}$$

Burada, bitkiler herhangi bir su ve besin stresi ile karşı karşıya kalmadıkları için sulamalı koşulda gerçekleşen buharlaşma ET_c'yi (mm) temsil etmekte, A (ha) ve P_u (t) ise sırasıyla ekili alanı ve üretim miktarını ifade etmektedir.

Yeşil su ayak izinin belirlenebilmesi için bitkinin büyüme dönemindeki yağışlar sonucunda kök bölgesinde oluşan toprak neminin belirlenmesi gerekmektedir. Bu amaçla aylık ölçekte toprak nemindeki değişim Denklem 3.61'de, sulamasız koşuldaki simülasyondan temin edilen net yağış, kök bölgesinden derine sızma miktarı, yüzey akışı

ve yatay akış verileri ile hesaplanmıştır. Net yağış miktarı toplam yağış, kar yağışı ve kar erimeleri verileri ile Denklem 3.60'taki gibi hesaplanmıştır. Bitkinin tüketebileceği aylık net toprak nemi ise aylık toprak nemi değişimi ile bir önceki aydan kalan toprak neminin bir fonksiyonu olarak Denklem 3.62'deki gibi hesaplanmıştır.

$$P = P_{toplam} - P_{kar} + K_m \tag{3.60}$$

$$\Delta Z_n = P - S - R - L_f \tag{3.61}$$

$$Z_{n(i)} = Z_{n(i-1)} - ET_{yeşil(i)} + \Delta Z_{n(i)} \tag{3.62}$$

Burada, P (mm) aylık net yağışı, P_{toplam} (mm) aylık toplam yağışı, P_{kar} (mm) kar yağışı miktarını, K_m (mm) aylık kar erimesi miktarını, $\Delta Z_{n(i)}$ (mm) ET haricinde aylık toprak nemindeki değişimi, S (mm) kök bölgesinden derine sızan su miktarını, R (mm) yüzey akışını, L_f (mm) yanal akışı, $Z_{n(i)}$ i. aydan bir sonraki aya aktarılan net toprak nemini, $ET_{yeşil(i)}$ i. aydaki yeşil evapotranspirasyonunu temsil etmektedir.

Bitki, büyüme döneminde tükettiği su miktarını yağışlar sonucu oluşan toprak nemi yeterli ise buradan, değilse sulama suyu yardımı ile karşılamaktadır. Dolayısıyla SA analizlerinde kullanılan genel metodolojiye benzer bir şekilde $ET_{yeşil}$, sulu koşullarda gerçekleşen buharlaşma (ET_c) ve ilgili ayda kullanılabilir net toprak neminin ($\Delta Z_{n(i)}+Z_{n(i-1)}$) minimumu olacaktır (Denklem 3.63). $ET_{yeşil}$'in hesaplanması sonucu $SA_{yeşil}$ (m^3/t) de Denklem 3.64'te gösterildiği şekilde belirlenmiştir.

$$ET_{yeşil(i)} = Min(\Delta Z_{(i)} + Z_{n(i-1)}, ET_{c(i)}) \tag{3.63}$$

$$SA_{yeşil} = \frac{10 \times ET_{yeşil} \times A}{P_u} \tag{3.64}$$

Gri SA (m^3/t), sulamalı analizden elde edilen mahsul verimi (Y, t/ha) ve kirlilik yükünün (N, kg/ha) bir fonksiyonu olarak hesaplanmıştır (Denklem 3.65). Bölüm 3.5.4'te ifade edildiği üzere fosforun azota göre çok az bir kısmının toprakta çözülmesinden dolayı mevcut çalışmada kritik kirletici yük olarak azot göz önüne alınmıştır.

$$SA_{gri} = \frac{N \times a}{(C_{max} - C_{nat}) \times Y} \tag{3.65}$$

Burada sızma oranı (α), maksimum izin verilebilir kirlilik konsantrasyonu (C_{max}, kg/m^3) ve doğal kirlilik konsantrasyonu (C_{nat}, kg/m^3) Bölüm 3.5.4'te ifade edilen literatürdeki genel görüşler doğrultusunda sırasıyla 0.1, 0.01 ve 0 olarak kabul edilmiştir.

Havzanın ürünler bazında mevcut durumdaki SA hesaplamaları için mahsullerin havza içerisindeki dağılımının belirlenmesi gerekmektedir. Fakat, mevcut ürün desenini ve bu desenin 11 yıllık çalışma periyodundaki değişimini gösteren veri seti bulunmamaktadır. Bu nedenle, mevcut üretim koşullarındaki su ayak izinin belirlenebilmesi için iki varsayım yapılmıştır. Birincisi, mahsullerin ilçe ölçeğinde homojen olarak dağıldığı kabul edilmiştir. Bu sayede, ilçenin havza içerisinde kalan kısmındaki bitkisel üretim miktarları, TUİK tarımsal üretim istatistiklerinden temin edilen ilçenin tamamında gerçekleşen üretim miktarı ile ilçenin havza içerisindeki oranı çarpılarak hesaplanmıştır. Havza genelindeki üretim miktarları ise, havza içerisinde yer alan ilçelerin üretim miktarları toplanarak belirlenmiştir (Denklem 3.66). İlçelerin havza içerisinde kalan kısımlarının ilçe alanına oranları ise Tablo 3.6'daki gibi alınmıştır.

$$P_{u,\,havza(i)} = \sum_{k=1}^{n} \left(P_{u,\,ilçe(k,\,i)} \times \frac{A_{ilçe,\,h(k)}}{A_{ilçe(k)}} \right) \tag{3.66}$$

Burada, $P_{u,ilçe(k,i)}$ (t) i ürününün k ilçesinin tamamındaki üretim miktarını, $A_{ilçe(k)}$ (km^2) k ilçesinin toplam alanını, $A_{ilçe,h(k)}$ (km^2) k ilçesinin havza içerisinde kalan alanını, $P_{u,havza(i)}$ (t) ise i ürününün havzanın tamamındaki üretim miktarını temsil etmektedir.

İkinci varsayımda ise bitkisel su ayak izinin ilçe genelinde ortalama olarak sabit kaldığı kabul edilmiştir. İlçelerin mahsul bazında ortalama su ayak izleri ise ilçe içerisinde yer alan HRU'lardaki su ayak izlerinin alansal ortalamaları alınarak belirlenmiştir (Denklem 3.67).

$$SA_{ilçe(k,\,i)} = \frac{\sum_{k=1}^{n} SA_{HRU(k,\,i)} \times A_{HRU(k,n)}}{\sum_{k=1}^{n} A_{HRU(k,n)}} \tag{3.67}$$

Burada, i ürün çeşidini, k ilçeyi, n ilçedeki HRU sayısını, $SA_{HRU(k,i)}$ (m^3/t) HRU'daki su ayak izini, $SA_{ilçe(k,i)}$ (m^3/t) ilçedeki su ayak izini, $A_{HRU(k)}$ HRU alanını temsil etmektedir.

Yukarıdaki varsayımlar ile havzanın mevcut durumdaki ürünler bazında su ayak izi; TUİK tarımsal üretim istatistikleri, ilçelerin havza içerisindeki oranları ve ilçelerin

ortalama su ayak izleri ile hesaplanmıştır (Denklem 3.68 ve 3.69).

$$SA_{m,\,havza(i)} = \sum_{k=1}^{n} \left(SA_{ilçe(k,i)} \times P_{u,ilçe(k,i)} \frac{A_{ilçe,\,h(k)}}{A_{ilçe(k)}} \right) \tag{3.68}$$

$$SA_{havza(i)} = \frac{SA_{m,\,havza(i)}}{P_{u,\,havza(i)}} \tag{3.69}$$

Burada, $SA_{m,havza(i)}$ (m^3) i ürününün havzadaki toplam hacimsel su ayak izini, $SA_{ilçe(k,i)}$ (m^3/t) k ilçesindeki i ürününün su ayak izini, $SA_{havza(i)}$ (m^3/t) ise i ürününün havzadaki ortalama su ayak izini temsil etmektedir.

3.7. Optimizasyon Algoritması

Optimizasyon, çözüm kümesi içerisinde en iyi çözümü bulma işlemi olarak adlandırılabilir. Optimizasyon problemlerinin çözümü için geliştirilen yöntemler, kesin çözüm yöntemleri ve sezgisel yöntemler olmak üzere iki ana başlık altında gruplandırılır (Zäpfel vd., 2010). Kesin çözüm yöntemleri, optimum çözümü garanti ederken, sezgisel yöntemler ile bulunan uygun çözümler için en uygun sonuçlar garanti edilmez. Kesin çözüm yöntemleri de kendi içerisinde probleme özgü etkili kesin algoritmalar ve doğrusal programlama gibi genel amaçlı algoritmalar olmak üzere ikiye ayrılır (Giovanni, 2017). İkinci yaklaşımda, problemin matematiksel modeli oluşturulur ve bu model farklı çözücülerde çözdürülür. Kesin çözüm yaklaşımları ile kabul edilebilir süre içerisinde çözüm bulunamadığı zaman sezgisel yöntemlere başvurulur. Bu tez çalışmasında ele alınan problemin, karma tam sayılı doğrusal modeli oluşturulmuştur. Modelin çözümünde kabul edilebilir süre içerisinde optimum çözüm alındığından sezgisel bir yöntem geliştirilmesine gerek kalmamıştır.

Optimizasyon algoritmasında en kritik nokta, en iyi çözüm kriterinin yani amaç fonksiyonun ne olduğudur. Bazı problemler (Örneğin bitkisel su tüketimini minimize etmek) tek bir amaç içermekte olup bu problemin çözümü nispeten daha kolaydır. Fakat birçok optimizasyon problemlerinde tek bir amaç yerine birden çok ve birbiriyle çelişkili amaçlar (Örneğin bitkisel su tüketimi minimize edilirken mahsul üretiminin maksimize edilmesi) bulunabilmektedir (Pereira vd., 2022). Bu tarz problemlerin çözümünde çok amaçlı optimizasyon teknikleri kullanılmaktadır. Literatürde en çok kullanılan çok amaçlı optimizasyon tekniği, ağırlıklandırma yaklaşımıdır (Atlas, 2008). Bu yaklaşım sayesinde çok amaçlı problem, amaçların belirli oranlarda ağırlıklandırılması ile tek amaçlı hale

çevrilmektedir (Cui vd., 2017). Ağırlıklandırma yaklaşımındaki en önemli sorunlardan biri, belirsizlik içerisinde amaç fonksiyonlarının hangi oranlarda ağırlıklandırılacaklarının belirlenmesidir (Gunantara, 2018). Burada birden fazla senaryoların karar vericilere sunulması veya problem alanında uzman kişilerin ağırlıkları seçmesi uygun çözümün belirlenebilmesi için önemlidir.

Bir nehir havzasında tarımsal üretimin toplam su ayak izinin minimize edilmesi, doğal kaynaklar üzerindeki antropojenik etkiyi azaltmak için oldukça önem arz etmektedir. Bununla birlikte, SA bileşenlerinin su kaynakları üzerindeki etkileri birbirlerinden farklıdır. Mavi ve gri SA indikatörlerinin aksine yeşil su ayak izinin yüksek olması direkt olarak olumsuz bir durumun göstergesi değildir. Çünkü havzanın toplam yeşil su ayak izinin yüksek olması, toprak neminin ürün getirisi olmaksızın atmosfere geri dönerek israf olmadığını göstermektedir. Bununla birlikte, havzanın yeşil su mevcudiyetinin, havza iklim koşullarına uygun tarımsal ürünlere tahsis edilmesi, mevcut su miktarı ile maksimum ürün getirisi sağlanması açısından önem arz etmektedir. Öte yandan, gri SA direkt su mevcudiyetini etkilememektedir. Bunun yerine, kirlilik yükünü bertaraf etmek için gerekli olan tatlı su mevcudiyetini ifade etmektedir. Mavi SA ise tatlı su kaynaklarının tüketiminin bir göstergesi olması nedeniyle, SA metodolojisinin en önemli bileşeni olduğu söylenebilir.

Dolayısıyla toplam su ayak izindeki azalma, su kaynakları üzerindeki insani etkiyi bertaraf etmesi açısından önemlidir fakat, toplam su ayak izindeki azalmaya mavi su ayak izinin, yeşil ve gri su ayak izine göre daha büyük oranda katkı yapması etkili bir su kaynakları yönetimi açısından istenilen bir durumdur. Bütün bunlar göz önüne alınarak mevcut çalışmada, mavi ve toplam su ayak izinin azaltılması olmak üzere çok amaçlı optimizasyon yönteminin kullanılmasına karar verilmiştir. Öte yandan, çok amaçlı fonksiyon, ağırlıklandırma tekniği kullanılarak tek amaçlı optimizasyon haline getirilmiştir (Denklem 3.70). Optimizasyon algoritmasında kullanılan indisler, parametreler, karar değişkeleri ve bunların açıklamaları aşağıda verilmiştir.

Amaç fonksiyonu:

$$Min\ z = \omega_1 \left(x_{ij} \times SA_{ij} \right) + \omega_2 \left(x_{ij} \times SA_{Mij} \right) \tag{3.70}$$

İndis ve Setler:

- i: ürün indisi
- j: Parsel indisi
- d_i: *i* ürününe olan talep

- *k*: alt havza indisi

Parametreler:

- p_{ij}: *j* parselinde üretilebilecek *i* ürün miktarı
- w_1: Birinci amaç ağırlık katsayısı
- w_2: İkinci amaç ağırlık katsayısı
- M: Yeterince büyük bir sayı

Karar Değişkenleri:

- x_{ij}: *i* ürünü *j* parselinde üretilirse 1, aksi takdirde 0
- y: 0 ve 1 değerlerini alabilen tam sayı değişken
- z_i: aynı alt havzada i ürünü haricinde mahsul yetiştirilen parsel adedi

Bir havzada su kaynaklarının sürdürülebilirliğini sağlamak amacıyla toplam ve mavi su ayak izinin önem katsayılarının net olarak belirlenebilmesi mümkün değildir. Bunun yerine, farklı önem katsayılarında senaryoların oluşturularak ilgili havzanın değerlendirilmesi daha uygun bir yaklaşım olacağı düşünülmektedir. Mevcut çalışmada Ceyhan Havzası'nda tarımsal ürün deseni, su yönetimi perspektifinden toplam ve mavi SA ağırlıklandırılarak S1, S2, S3, S4, S5 ve S6 olmak üzere 6 farklı senaryo altında değerlendirilmiştir (Tablo 3.9). Burada S0 mevcut durumu temsil etmektedir. Öte yandan S1 sadece toplam su ayak izinin önemli olduğu ve mavi su ayak izinin hiç öneminin olmadığı senaryoyu temsil ederken, S6'da ise tam tersi bir şekilde havzada sadece mavi su ayak izinin minimize edilmesinin önemli olduğu ve diğer bileşenlerin önemsiz olduğu senaryo temsil edilmektedir. S1'den S6'ya doğru mavi su ayak izinin ağırlığı lineer bir şekilde artarken, toplam su ayak izinin önem katsayısı ise yine lineer bir şekilde azalmaktadır.

Tablo 3.9. Optimizasyon senaryolarında mavi ve toplam su ayak izinin ağırlıkları

	S0	S1	S2	S3	S4	S5	S6
Mavi SA	-	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1
Toplam SA	-	1	0.8	0.2	0.4	0.2	0

SA azaltma stratejilerinde en önemli hususlardan biri su tüketiminin azaltılırken, ürün kaybının göz önüne alınmasıdır. Üretim miktarı azaltılarak su ayak izinde önemli düşüşler sağlanabilir. Fakat, bu durum gıda arzında ciddi tehditler oluşturacaktır. Gıda arzının yüksek olduğu ve su kaynaklarının gıda arzından daha kritik hale geldiği bölgelerde üretim kayıpları tolere edilebilir. Fakat mevcut çalışmanın gerçekleştirildiği Türkiye gibi gıda arzının son derece önemli olduğu bölgelerde ürün kaybına müsaade

edilmemelidir. Bu sebeple mevcut çalışmada ürün deseni optimize edilirken herhangi bir mahsulün üretim kaybının %2'yi geçmemesi ve aynı zamanda %5'ten fazla üretim artışının olmaması sağlanmıştır (Denklem 3.71 ve 3.72). Öte yandan, herbir parselde en fazla bir ürün çeşidinin yetişmesi gerektiği tanımlanmıştır (Denklem 3.73).

Kısıtlar:

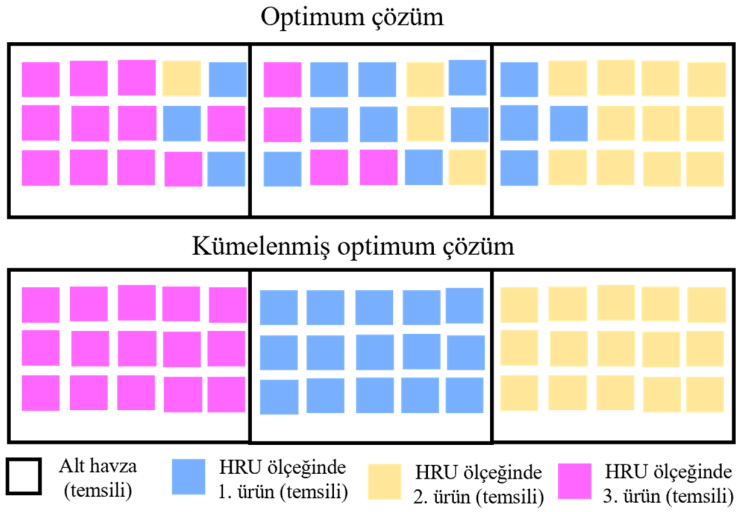
$$\sum_j x_{ij} \times p_{ij} \geq d_i \times 0.98 \qquad \forall i \qquad (3.71)$$

$$\sum_j x_{ij} \times p_{ij} \leq d_i \times 1.05 \qquad \forall i \qquad (3.72)$$

$$\sum_i x_{ij} \leq 1 \qquad \forall j \qquad (3.73)$$

Burada, p_{ij} (t) j parselinde üretilebilecek i ürünü miktarını, d_i (t) i ürününün Ceyhan Havzası genelinde mevcut durumdaki üretim miktarını temsil etmektedir.

SWAT modelinde en küçük alan birimi olan parseller (HRU) birbiri içine geçmiş halde bulunmaktadırlar. Bu durum, optmimum ürün deseninde çok kısa aralıklarla mahsul çeşidinin değişmesine neden olmaktadır. Bu nedenle ürün deseni stratejilerinin uygulanabilirliği düşmektedir. Dolayısıyla mevcut çalışmada uygulanabilirliği artırmak adına optimum çözüme ek olarak Denklem 3.74 ve 3.75'deki kısıtlar eklenmiştir. Burada herbir alt havzada sadece bir ürün çeşidinin yetiştirilmesi hedeflenerek, mahsul çeşitlerinin net sınırlarla ayrıldığı kümelenmiş ürün deseni haritalarının elde edilmesi sağlanmıştır (Şekil 3.16).



Şekil 3.16. Optimum ve kümelenmiş optimum çözümün temsili gösterimi

$$\sum_{j \in \delta_k} x_{ij} \leq y \times \mathrm{M} \qquad \forall i \qquad (3.74)$$

$$\sum_i z_i \le M \times (1-y) \qquad \forall i \qquad (3.75)$$

Denklem 3.74'te *i* ürünü *j* parselinde üretilirse yani x_{ij} 1 olursa *y* değişkeni 0 olmak zorundadır. Bu durumda Denklem 3.75'te z_i değeri yani *j* parseli dışında *i* ürününün yetiştirildiği parsel sayısı 0 olmak zorundadır. Öte yandan Denklem 3.74'te x_{ij} 0 değerini alırsa *y* değeri 0 veya 1 olabilir. Bu durumda z_i 0 veya 0'dan büyük herhangi bir tam sayı değerini alabilir. Bu şekilde alt havzalardaki ürün çeşitliği Şekil 3.16'da örneklendirildiği gibi tek bir ürün tipine indirgenmesi sağlanmıştır.

Bu çalışmada, mevcut durumda ilçelerdeki tarımsal üretimin su yönetimi perspektifinden uygunluğunun değerlendirilmesi ve optimizasyon senaryolarının karşılaştırılması için, S0, S1 ve S6 senaryolarındaki ilçelere tarım alanı tahsis oranları hesaplanmıştır (Denklem 3.76 ve 77).

$$SP_{k,i} = \frac{AS_{k,i}}{AS_k} \times 100 \qquad (3.76)$$

$$\Delta S_{k,i} = SP_{k,i} - SP_{0,i} \qquad (3.77)$$

Burada, $SP_{k,i}$ (%) *k* senaryosuna göre *i* ilçesindeki ekim alanı tahsisinin havzanın tamamındaki ekim alanına oranını, $AS_{k,i}$ *k* senaryosuna göre *i* ilçesindeki ekim alanını (ha), AS_k *k* senaryosuna göre havza genelinde tahıl grubuna tahsis edilen ekili alanı (ha), $\Delta S_{k,i}$ *k* senaryosuna göre *i* ilçesindeki ekim alanı tahsis oranının S0 senaryosuna göre değişimini temsil etmektedir.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. SWAT Modeli Kalibrasyon ve Validasyonu

Kalibrasyon işlemlerinin ilk adımında her bir akım gözlem istasyonunun temsil ettiği toplanma alanında hassasiyet analizleri gerçekleştirilmiştir. Bunun için literatürde en çok kullanılan 20 kalibrasyon parametresi belirlenerek global hassasiyet analizleri yapılmıştır. Analiz sonucunda *t-stat* ve *P-değeri* değerlerine göre parametrelerin hassaslıkları değerlendirilmiştir. Genellikle *P-değeri* 0.05'ten küçük olan parametreler hassas kabul edilmektedir (Thavhana, Savage ve Moeletsi, 2018). Fakat yapılan çalışmalar *P-değeri* 0.05'ten büyük olan parametrelerinde model performansını etkileyebildiğini göstermektedir (Leng vd., 2020). Bu nedenle mevcut çalışmada global hassasiyet analizi sonucunda *P-değeri* 0.1'den küçük parametreler hassas kabul edilmiş olup global hassasiyet analizi ile beraber yerel hassasiyet analizleri de gerçekleştirilerek nihai değerlendirme yapılmıştır. Tablo 4.1-4.4'te her bir AGİ istasyonunda gerçekleştirilen hassasiyet analizlerinin sonuçları verilmiştir.

Tablo 4.1. Karaahmet AGİ global hassasiyet analizi

Parametreler	t-stat	P-değeri	Parametreler	t-stat	P-değeri
CN2.mgt	16.90	0	RCHRG_DP.gw	1.11	0.26
SOL_Z(..).sol	-14.89	0	REVAPMN.gw	1,03	0.30
SOL_AWC(..).sol	-14.39	0	GW_DELAY.gw	-0.89	0.37
SOL_BD(..).sol	4.15	0	OV_N.hru	0.78	0.42
ESCO.hru	3,09	0	ALPHA_BNK.rte	-0.76	0.45
GW_REVAP.gw	-2.16	0,03	EPCO.hru	-0.52	0.60
SLSUBBSN.hru	-2.11	0,04	CH_N2.rte	-0.44	0.66
SURLAG.hru	1.76	0,08	CH_K2.rte	0.26	0.79
SHALLST.gw	1.50	0.13	ALPHA_BF.gw	0.16	0.87
LAT_TTIME.hru	1.24	0.21	GWQMN.gw	0.11	0.91

Tablo 4.2. Kadirli AGİ global hassasiyet analizi

Parametreler	t-stat	P- değeri	Parametreler	t-stat	P- değeri
CN2.mgt	18.04	0.00	SOL_BD(..).sol	1.40	0.16
SOL_AWC(..).sol	-9.32	0.00	LAT_TTIME.hru	1.27	0.21
ESCO.hru	8.16	0.00	GW_DELAY.gw	-1.26	0.21
SOL_Z(..).sol	-7.27	0.00	CH_N2.rte	-1.06	0.29
GW_REVAP.gw	-3.01	0.00	EPCO.hru	0.57	0.57
SLSUBBSN.hru	-2.70	0.01	REVAPMN.gw	0.56	0.57

Tablo 4.2'nin devamı

Parametreler	t-stat	P- değeri	Parametreler	t-stat	P- değeri
SURLAG.hru	-2.25	0.03	CH_K2.rte	-0.50	0.62
ALPHA_BNK.rte	1.51	0.13	OV_N.hru	0.47	0.64
RCHRG_DP.gw	-1.45	0.15	ALPHA_BF.gw	0.43	0.67
SHALLST.gw	1.44	0.15	GWQMN.gw	0.26	0.80

Tablo 4.3. Hemite AGİ global hassasiyet analizi

Parametreler	t-stat	P- değeri	Parametreler	t-stat	P- değeri
ESCO.hru	5.6	0	SHALLST.gw	0.87	0.39
ALPHA_BF.gw	-1.82	0.07	REVAPMN.gw	0.85	0.4
SOL_AWC(..).sol	-1.74	0.08	OV_N.hru	-0.71	0.48
SOL_BD(..).sol	-1.58	0.12	GWQMN.gw	-0.51	0.61
EPCO.hru	-1.45	0.15	GW_REVAP.gw	-0.48	0.63
CN2.mgt	-1.28	0.2	ALPHA_BNK.rte	-0.38	0.71
RCHRG_DP.gw	-1.26	0.21	SLSUBBSN.hru	-0.29	0.77
CH_N2.rte	1.24	0.22	GW_DELAY.gw	0.24	0.81
LAT_TTIME.hru	-1.1	0.27	CH_K2.rte	-0.23	0.82
SOL_Z(..).sol	-1.08	0.28	SURLAG.hru	0.07	0.95

Tablo 4.4. Misis AGİ global hassasiyet analizi

Parametreler	t-stat	P- değeri	Parametreler	t-stat	P- değeri
CN2.mgt	4.88	0	ALPHA_BF.gw	0.97	0.33
ESCO.hru	7.09	0	GW_DELAY.gw	-0.9	0.37
SOL_Z(..).sol	-3	0	GW_REVAP.gw	-0.78	0.44
SOL_AWC(..).sol	-4.47	0	GWQMN.gw	0.75	0.45
SLSUBBSN.hru	-2.21	0.028	LAT_TTIME.hru	0.74	0.46
ALPHA_BNK.rte	2.21	0.03	OV_N.hru	-0.66	0.51
EPCO.hru	-2.07	0.04	SHALLST.gw	0.54	0.59
SURLAG.hru	-2.02	0.04	CH_N2.rte	-0.47	0.64
RCHRG_DP.gw	1.43	0.15	SOL_BD(..).sol	0.18	0.86
CH_K2.rte	-1.28	0.2	REVAPMN.gw	-0.15	0.88

Analiz sonuçlarında havza genelinin *CN2*, *SOL_Z*, *SOL_AWC*, *ESCO* parametrelerine oldukça hassas olduğu gözlemlenmiştir. *CN2*, SCS eğri numarası parametresi olduğu için yüzey akışını etkileyen en önemli parametrelerden biridir. Dolayısıyla *CN2* parametresinin havza genelinde en hassas parametrelerden biri olması beklenen bir durumdur. *SOL_Z* ve *SOL_AWC* toprak parametreleri olup sırasıyla toprak tabaka kalınlığını ve toprak katmanındaki kullanılabilir su kapasitesini temsil etmektedir.

ESCO ise Bölüm 3.2.2'de ifade edildiği üzere toprak buharlaşma talebinin toprak katmanlarındaki dağılımını etkileyen bir parametre olup, ET üzerinde etkilidir. Bu parametrenin bütün istasyonlarda *P-value* değeri 0 olarak gözlemlenmiştir. Bu durum *ESCO*'nun havzanın tamamında oldukça hassas bir parametre olduğunu göstermektedir.

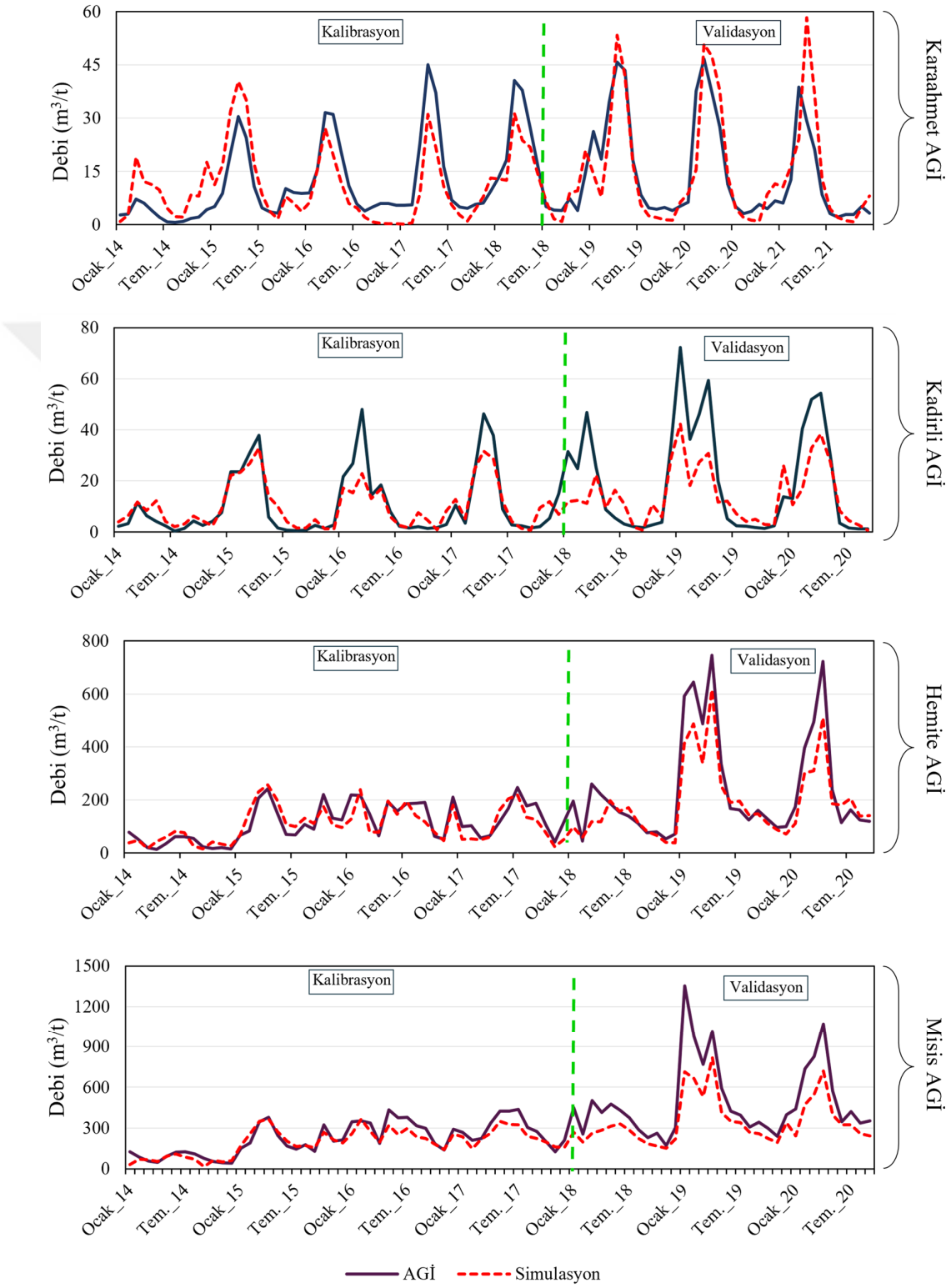
Bu parametrelerin dışında yer altı suyu revap katsayısının (*GW_REVAP*) Kadirli ve Karaahmet istasyonlarında hassas olduğu fakat, Misis ve Hemite istasyonlarının temsil ettiği toplanma alanına duyarlı olmadığı gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, taban akışı üzerinde etkili olan *ALPHA_BF* (taban akışı alfa faktörü) parametresinin, Hemite istasyonunda duyarlı olduğu fakat diğer istasyonlarda hassasiyetinin düşük olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum, kalibrasyon işlemlerinin sadece havza çıkışlarında yapılmasının yanlış sonuçlar doğuracağını, mümkün olduğunca alt havza özelinde kalibrasyon işlemlerinin gerçekleştirilmesi gerektiğinin altını çizmektedir.

Global hassasiyet analizinin ardından bir parametrenin değiştiği diğer tüm parametrelerin sabit kaldığı yerel hassasiyet analizleri gerçekleştirilmiştir. Burada global hassasiyet analizleri sonucunda, havzaya hassas olan ve hassas olabileceği düşünülen parametrelerle yerel hassasiyet analizi gerçekleştirilmiştir. Örneğin, Karaahmet istasyonunda global hassasiyet analizi sonucunda *SHALLST*, *RCHRG_DP* ve *GW_DELAY* parametrelerinin hassas olmadığı görülmesine karşın yerel analizlerde havzaya duyarlı olduğu görülerek kalibrasyon işlemlerine dahil edilmiştir. Benzer şekilde Kadirli istasyonunda *REVAPMN* ve *GWQMIN*, Hemite istasyonunda *SOL_Z* ve *GWQMIN*, Misis istasyonunda ise *GW_REVAP* ve *GWQMIN* parametreleri yerel hassasiyet analizleri sonucunda kalibrasyon işlemlerine dahil edilmiştir. Buna karşın, Kadirli istasyonunda global hassasiyet analizinde *SLSUBBSN* ve *SURLAG* parametrelerinin hassas olduğu görülmesine karşın, yerel hassasiyet analizi sonucunda havzaya duyarlı olmadığına karar verilerek kalibrasyon işlemlerinden çıkarılmıştır.

Kalibrasyon işlemlerinde, performans kriterleri değişmeyene kadar iterasyona devam edilmiş ve bir sonraki iterasyondaki parametrelerin maksimum ve minimum değerleri belirlenmiştir. Bu işlemlerin sonucunda parametrelerin nihai değerleri belirlenmiştir. Ek 1 ve 2'de dört istasyonda kalibrasyon sırasında kullanılan parametrelerin son iterasyondaki maksimum ve minimum değerleri ile kalibrasyon sonucunda elde edilen nihai değerler gösterilmiştir.

Kalibrasyon işlemlerin ardından, nihai parametreler Tablo 3.4'te belirtilen zaman periyotları içerisinde kalibrasyona tabii tutulmaksızın validasyon gerçekleştirilmiştir. Bu işlemlerin ardından akım gözlem istasyonlarından alınan akım değerleri ile

kalibrasyon/validasyon sonucunda elde edilen simülasyon sonuçları Şekil 4.1'de karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.1. Karaahmet, Kadirli, Hemite ve Misis AGİ istasyonlarında kalibrasyon ve validasyon sonuçları

Şekil 4.1'de Karaahmet istasyonunda model sonuçlarının gerçek değerlere oldukça yakın sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Fakat, özellikle bahar aylarında pik debilerin yaşandığı dönemde modelin kalibrasyon döneminde gerçek değerlerden daha düşük, validasyon döneminde ise daha yüksek sonuçlar ürettiği görülmektedir. Kadirli istasyonunda ise yine genel anlamda modelin AGİ sonuçlarıyla uyumlu olduğu söylenebilmesine karşın, pik debileri belirlemede modelin yetersiz kaldığı gözlemlenmiştir. Bu durum, pik debilerin oluşmasındaki en önemli faktörlerden biri olan bahar aylarında yaşanan kar erimelerinin tahmin edilmesinde modelin yetersiz kaldığını göstermektedir. Benzer bir durum, Ceyhan Havzası'na komşu olan Seyhan Havzası'nda gerçekleştirilen bir diğer çalışmada da gözlemlenmiştir (Irvem ve El-Sadek, 2018). Ayrıca literatürdeki diğer çalışmalarda da dağlık alanlarda kar erimelerinin simülasyonunun zorluğundan bahsedilmiştir (Abbas vd., 2019).

Havza alanının büyük bir kısmını temsil eden Hemite ve Misis istasyonlarında özellikle kalibrasyon döneminde modelin oldukça iyi sonuçlar verdiği görülmektedir (Şekil 4.1). Bununla birlikte, 2019 ve 2020 yıllarında büyük taşkınların yaşandığı, havza çıkışında debinin yaklaşık 1200 m^3/s'lik debilere çıktığı gözlemlenmektedir. Fakat model, taşkın dönemlerinde gerçek değerlerden aşağıda sonuçlar vermiştir. Bu durumun hem bahar aylarındaki kar erimelerinin tahminindeki yetersizliğinden hem de uzun yıllık veri setinin temin edilmemesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Çünkü, uzun yıllık verilerle gerçekleştirilen kalibrasyon işlemlerinde, taşkınların olduğu yağışlı yıllarla kurak yıllar birlikte model tarafından değerlendirilmektedir. Bu sayede validasyon döneminde gerçekleşecek olan taşkınlar veya kurak dönemler daha iyi tahmin edilebilmektedir (Arnold vd., 2012). Fakat mevcut çalışmada uzun yıllık veri setinin temin edilememesi nedeniyle validasyon periyodunda büyük taşkın dönemlerinin bulunmasına karşın, kalibrasyon periyodunda bu çaplı taşkın dönemleri gerçekleşmemiştir. Bu durum validasyon döneminde model performansında bir miktar düşüşlere neden olmuştur.

Mevcut çalışmada SWAT modelinin kalibrasyon ve validasyon dönemlerindeki performansı R^2, *NSE* ve *PBIAS* faktörleri ile değerlendirilmiş olup Tablo 4.5'te gösterilmiştir. Burada Karaahmet istasyonunda literatürdeki genel performans kriterlerine göre kalibrasyon döneminde R^2 ve *NSE*'nin yeterli *PBIAS*'nin ise çok iyi olduğu, validasyon döneminde ise model performansının daha iyileştiği görülmüştür. Bunun aksine Kadirli istasyonunda ise kalibrasyon döneminde performans kriterlerinin hepsinin çok iyi olmasına karşın, validasyon döneminde *NSE* ve *PBIAS* faktörlerinde

düşüş gözlenmiştir. Bu durumun en temel nedeni yukarıda da bahsedildiği üzere pik debilerin gerçek değerden daha düşük tahmin edilmesidir. Hemite ve Misis istasyonlarında ise genel itibari ile performans kriterlerinin çok iyi seviyede olduğu görülmektedir. Bu durumun en temel sebeplerinden biri Hemite istasyonunun Aslantaş Baraj gövdesine yakın bir konumda bulunmasıdır. Öte yandan, Hemite istasyonu ile Misis istasyonu büyük ölçüde aynı bölgeleri temsil etmeleri, Misis istasyonunda da performans kriterlerinin yüksek çıkmasında etkili olmuştur. Fakat, Misis istasyonunda validasyon döneminde gerçekleşen taşkın debisinin tahminindeki eksiklikten dolayı *NSE* ve *PBIAS* faktörlerinde düşüş gözlemlenmiştir. Sonuç olarak bütün istasyonlarda simülasyon sonucunda elde edilen ortalama debi değerlerinin gerçek ortalamalara genel itibari ile oldukça yakın sonuçlar verdiği söylenebilir.

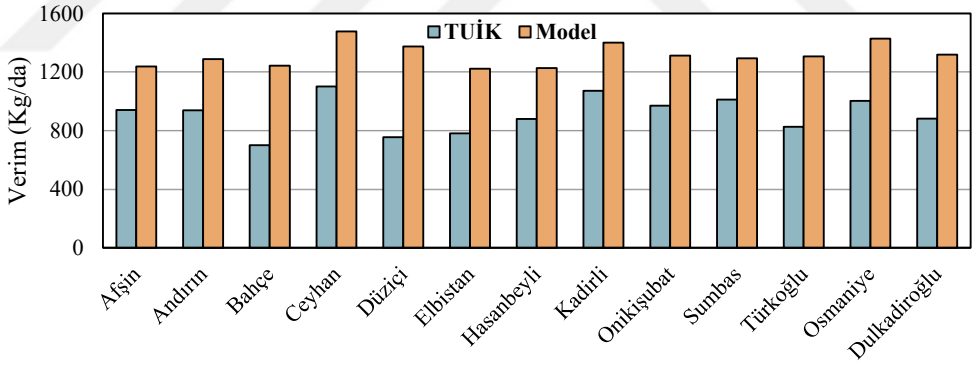
Tablo 4.5. Kalibrasyon ve validasyon performans değerlendirilmesi

	R^2	*NSE*	*PBIAS*	*Ortalama Sim. (AGİ)*
Kalibrasyon				
Karaahmet İstasyonu	0.64	0.63	7.0	11.07 (11.9)
Kadirli İstasyonu	0.83	0.78	1.5	10,09 (10.25)
Hemite İstasyonu	0.74	0.72	5.7	105.8 (112.2)
Misis İstasyonu	0.86	0.79	12.4	195.9 (223.5)
Validasyon				
Karaahmet İstasyonu	0.75	0.66	-3.6	14.74 (14.23)
Kadirli İstasyonu	0.74	0.57	26.8	13.89 (19.73)
Hemite İstasyonu	0.88	0.81	12.6	143.2 (163.9)
Misis İstasyonu	0.91	0.51	29.6	359.52 (496.3)

4.2. Buharlaşma ve Verim Verileri ile Validasyon

Su ayak izi çalışmaları, ET_a değerini belirlemedeki zorluklardan dolayı genellikle ideal koşullarda yetişen bitkinin buharlaşması (ET_c) üzerinden gerçekleştirilir. Fakat buharlaşmanın aksine mahsul verimi için, ideal koşullarda yetişen ürün verimi değerleri yerine, gerçek saha koşullarındaki istatistikler kullanılmaktadır. Bu durum veriler arasında uyuşmazlığa neden olabilmektedir. Mevcut çalışmada hidrolojik modelleme sayesinde, model üzerinden ideal koşullarda yetişen mahsullerin verimleri hesaplanarak SA analizleri gerçekleştirilmiştir. Böylelikle ET ve mahsul verimi arasındaki uyumsuzluk giderilmiştir. Fakat bu durum modelden elde edilen verim değerlerinin TUİK istatistiklerinden yüksek çıkmasına ve dolayısıyla mevcut çalışmada belirlenen SA değerlerinin ampirik yöntemlere göre düşük çıkmasına neden olmuştur.

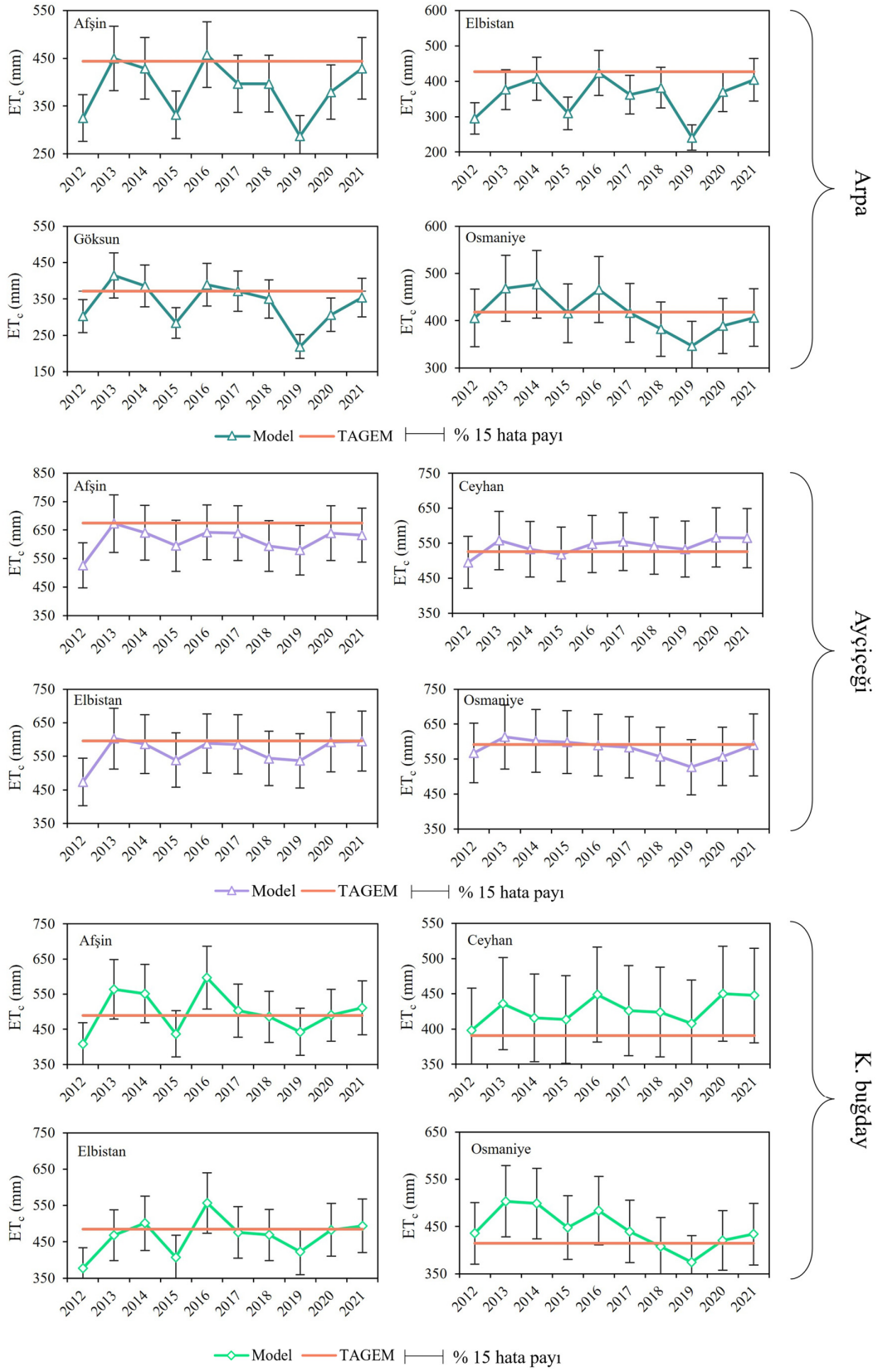
Şekil 4.2'de Ceyhan Havzası'nda en fazla ekili alana sahip olan mısır ürününün TUİK istatistiklerine ve modele göre verimleri karşılaştırılmıştır. Diğer ürünlerin karşılaştırmalı grafikleri Ek 3 ve 4'te verilmiştir. Şekil 4.2'de mısır için model sonuçlarının beklenilen bir şekilde TUİK istatistiklerinin bir miktar üstünde çıktığı görülmektedir. Buna karşın, Ek 3'te arpa ve ayçiçeğinde TUİK istatistiklerinin model sonuçlarından oldukça düşük olduğu görülmüştür. Bu durum, arpa ve ayçiçeği yetiştiriciliğinin bölgede genellikle kuru tarım olarak gerçekleştiğini düşündürmektedir. Literatürde bunu destekler bir şekilde ayçiçeği ve arpa yetiştiriciliğinin ülkemizde genellikle kuru tarım koşullarında gerçekleştirildiği belirtilmiştir (Kaya et al., 2021; Ergün et al., 2017). Ek 3'te arpa ve ayçiçeği kuru tarım koşullarında modellenerek verim değerleri grafiğe eklenmiştir. Burada arpa için TUİK istatistikleri ile kuru koşullardaki model verilerinin oldukça yakın olduğu, ayçiçeğinde ise TUİK istatistiklerinin kuru ve sulu tarım model sonuçlarının arasında çıktığı tespit edilmiştir. Patateste aynı durum gözlenmiş olup (Ek 3), diğer ürünlerde genellikle beklenilen bir şekilde model sonuçlarının TUİK verilerinin bir miktar üstünde olduğu gözlemlenmiştir.



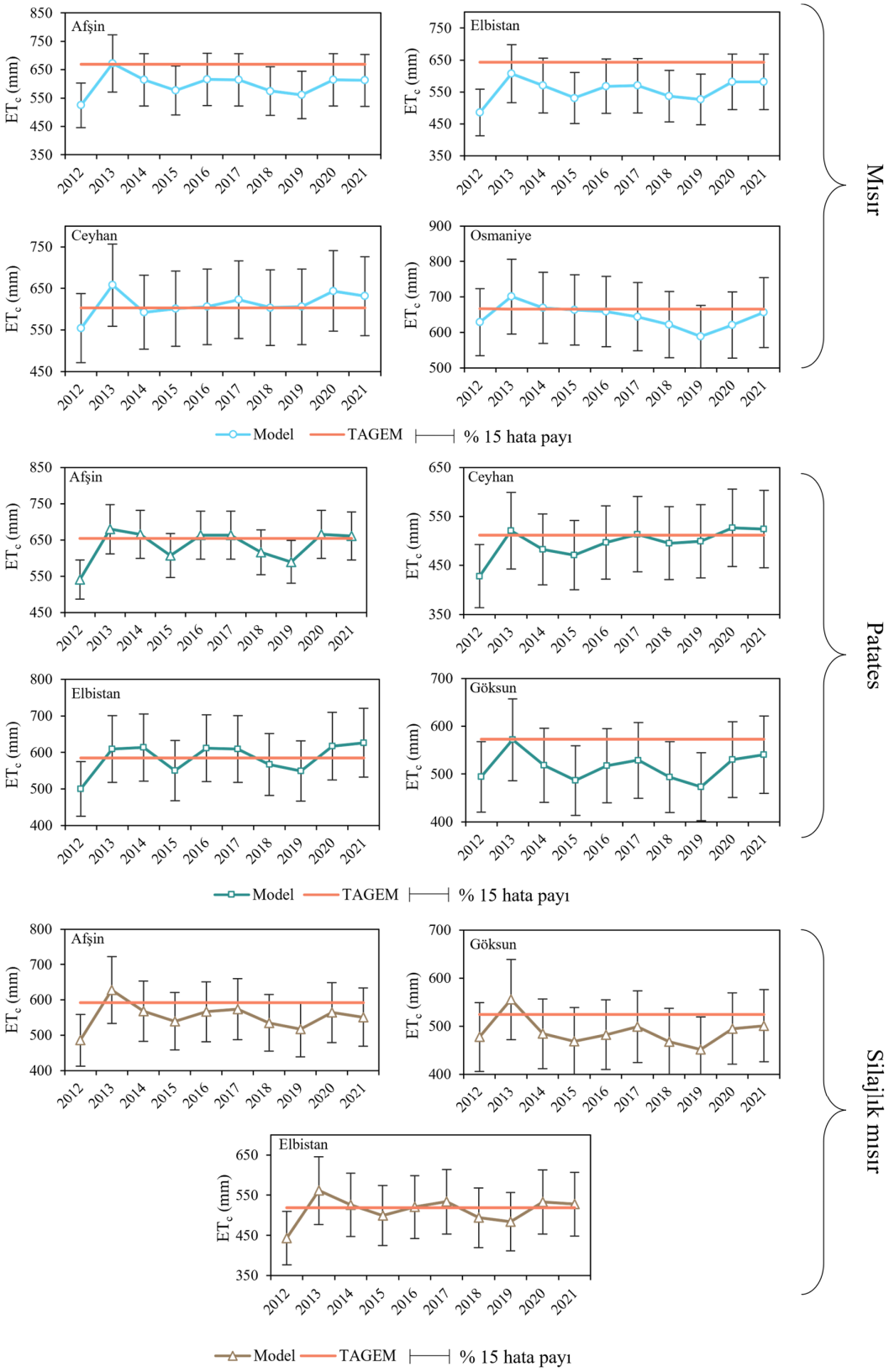
Şekil 4.2. TUİK mısır verimi istatistikleri ile modelin karşılaştırılması

Mevcut çalışmada SWAT modelinden elde edilen ET_c değerleri, TAGEM'in belirlediği uzun yıllık ortalama ET_c verileri ile doğrulanmıştır. TAGEM her bir ürünün ET_c değerlerini farklı iklim bölgelerinde bulunan istasyonlarda belirlemiştir. Bu verilerin noktasal sonuçlar vermelerine karşın SWAT modelinin alansal sonuçlar vermesi nedeniyle, TAGEM verileri ile direkt olarak doğrulama yapılamamıştır. Bu sebeple, her bir ürün için TAGEM'in noktasal verileri ters mesafe ağırlıklı (IDW) interpolasyon yöntemi ile alansala çevrilmiştir. Ek 5 ve 6'da TAGEM verilerine göre mahsullerin, Ceyhan havzasındaki ET_c dağılımları görselleştirilmiştir.

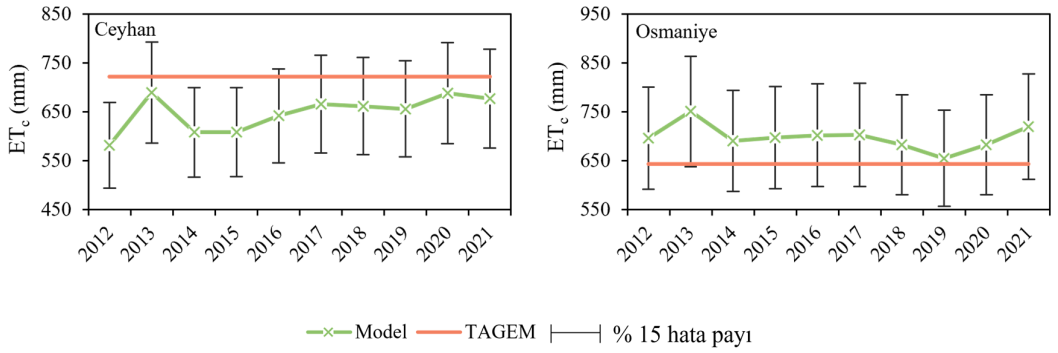
Şekil 4.3 ve 4.4'te ise modelden elde edilen 10 yıllık ortalama ET_c dağılımları ile uzun yıllık ortalama TAGEM verilerinin karşılaştırılmalı grafiği verilmiştir.



Şekil 4.3. Arpa, ayçiçeği ve kışlık buğday ürünlerindeki buharlaşmanın karşılaştırılması



Şekil 4.4. Mısır, patates ve silajlık mısır ürünündeki buharlaşmanın karşılaştırılması



Şekil 4.5. Pamuk ürünündeki buharlaşmanın karşılaştırılması

Şekil 4.3 ve 4.4'te model ET_c sonuçlarının genel itibari ile TAGEM verileri ile oldukça tutarlı olduğu, model sonuçlarının neredeyse tamamının %15'lik hata payı içerisinde kaldığı görülmektedir. Bununla birlikte, model sonuçlarının yıllar arasındaki iklimsel farklılıklar nedeniyle, yıllık ölçekte varyasyonlar gösterdiği de ifade edilmelidir. Buna karşın, TAGEM verileri uzun yıllık ortalama analizler sonucunda belirlendiği için tek bir değer olarak görülmektedir. Bu durum, bazı yıllarda model sonuçlarının TAGEM verilerinden uzaklaşmasına neden olmuştur. Öte yandan, TAGEM verilerinin alansal değerlere çevrilmesi sırasında yükseklik farklılıklarının dikkate alınamaması da özellikle Elbistan ve Göksun'daki model sonuçları ile bazı uyuşmazlıklara neden olmuştur. Afşin, Elbistan ve Göksun'da bulunan istasyonların yükseklikleri sırasıyla 1213, 1143 ve 1341 m olmasına karşın, SYM verilerine göre bu ilçelerin ortalama yükseklikleri sırasıyla 1503, 1506 ve 1728 m'dir. Bu durum Afşin, Elbistan ve Göksun'da TAGEM sonuçlarının gerçek alansal ortalama ET_c değerlerinden bir miktar fazla çıkmasına neden olduğu düşünülmektedir.

4.3. Yüksek Alansal Çözünürlüklü SA Analizleri

Ürünlerin havza geneli ortalama su ayak izlerinin yanında, bu ürünlerin su ayak izlerinin havza içerisindeki dağılımının belirlenmesi de etkili bir su yönetimi açısından önem arz etmektedir. Bu bölümde her bir mahsulün, havza içerisindeki her bir HRU'daki su ayak izleri belirlenmiştir. Bu sayede ürünlerin, havzanın tamamındaki su ayak izlerinin dağılımı değerlendirilebilmiştir. Mevcut çalışmada iklim, ürün çeşidi ve coğrafi farklılıklara bağlı olarak bölgeler arasında, bazı ürünlerin su ayak izinde 5 kata varan büyük varyasyonların oluştuğu izlenmiştir. Mısır, kışlık buğday, pamuk, ayçiçeği, silajlık mısır ve patatesin genel itibari ile havzanın kuzey kesimlerine doğru toplam su ayak izinin arttığı görülmüştür. Bununla birlikte, arpa ve durum buğdayının ise toplam su ayak izi

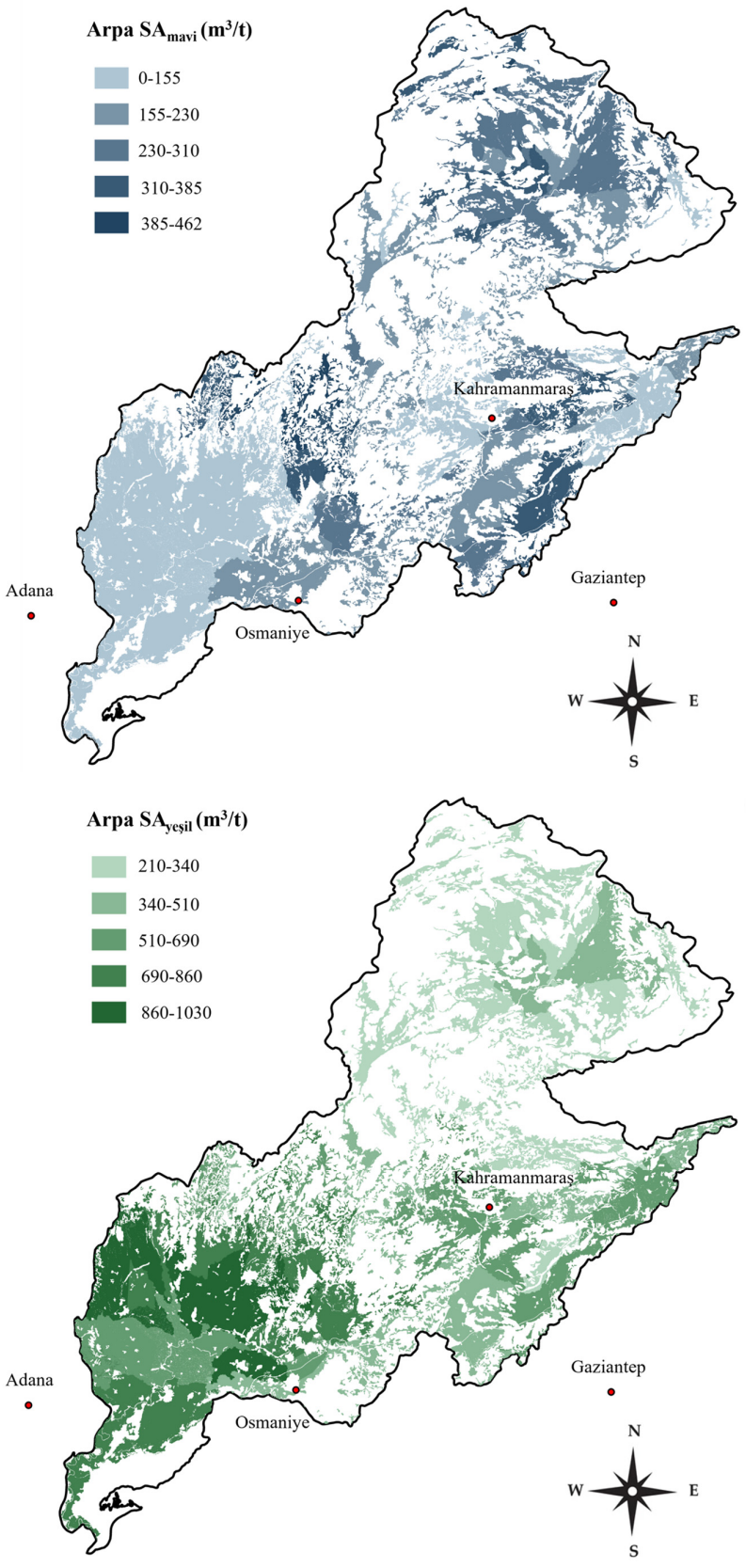
havzanın güney kesimlerinde maksimuma ulaşmıştır. Bu bölümde mavi ve yeşil SA, gri SA ve toplam su ayak izinin havza içindeki dağılımı ayrı başlıklar altında incelenmiştir.

4.3.1. Mavi ve yeşil SA haritaları

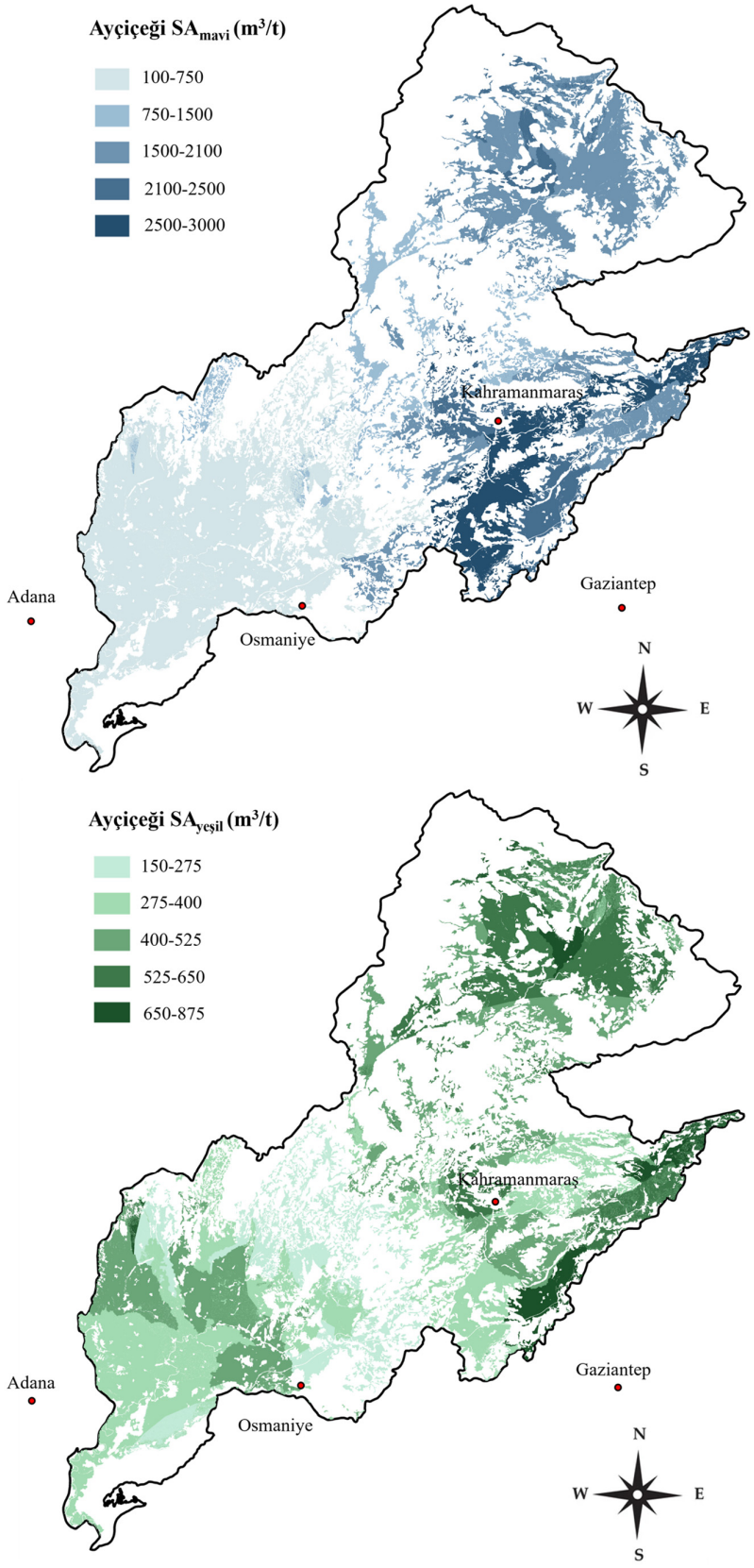
Şekil 4.6-4.13'te, çalışma kapsamında incelenen ürünlerin mavi su ayak izinin genellikle havzanın kuzey kesimlere doğru arttığı, güney kesimlerde özellikle Adana-Osmaniye arasında ise büyük oranda azaldığı görülmektedir. Bu durum, havzanın kuzey kesimlerinde efektif yağışın bitki gelişimi için yetersiz kaldığını ve büyük oranda mavi suya ihtiyaç duyulduğunu göstermektedir. Şekil 3.2'de Ceyhan Havzası'nın çalışma periyodundaki ortalama yıllık yağış dağılımı da bu durumu desteklemektedir. Havzanın güneyine doğru artan ortalama yağış miktarı, efektif yağış miktarını artırarak mavi SA miktarının düşmesine neden olmuştur. Bununla birlikte, Kahramanmaraş-Gaziantep arasında mavi su ayak izinin maksimum seviyelere çıktığı görülmektedir. Bu duruma, ilgili bölgelerdeki toplam SA ve bitki su tüketiminin yüksek olması, güney kesimlere nispeten yağış miktarının daha az olması dolayısıyla efektif yağışın düşmesi gibi durumlar neden olmaktadır. Mavi su ayak izindeki bölgesel farklılıklar özellikle ayçiçeği üretiminde göze çarpmaktadır (Şekil 4.7). Kahramanmaraş ve çevresinde ayçiçeğinin mavi su ayak izi 2500-3000 m^3/t'a kadar çıkarken, havzanın güney kesimlerinde 100 m^3/t seviyelerine kadar düşmektedir. Bununla birlikte, mısır üretiminde ise diğer ürünlere nispeten daha homojene yakın bir mavi SA dağılımı görülmektedir. Kışlık buğdayın mavi su ayak izinin havzanın güney kesimlerinde homojen bir şekilde yaklaşık 150 m^3/t civarında olduğu, kuzey kesimlere doğru ise artarak bazı yerlerde yaklaşık 900 m^3/t civarına ulaştığı görülmektedir. Pamuğun mavi su ayak izi ise Kahramanmaraş ve çevresinde nispeten daha yüksek gerçekleşmiştir. Bununla birlikte, havzanın kuzey kesimlerinin pamuk üretimine elverişsiz olması, mahsul veriminin sıfıra yakın olmasına neden olmuştur. Bu sebeple, havza kuzeyinde pamuğun su ayak izi oluşmamıştır.

Havza genelinde yeşil su ayak izinin genellikle mavi SA ile ters orantılı olarak havzanın güney kesimlerine doğru arttığı izlenmiştir. Fakat, ayçiçeği üretiminde yeşil su ayak izinin kuzey kesimlere doğru arttığı, özellikle Kahramanmaraş çevresinde yoğunluğun maksimuma ulaştığı görülmektedir. Bu durum, ayçiçeği veriminin genellikle kuzey kesimlere doğru ve Kahramanmaraş çevresinde düşmesinden kaynaklanmaktadır. Patates üretiminde ise yeşil su ayak izinin genel itibari ile havzanın güney kesimlerine doğru arttığı fakat yine özellikle Kahramanmaraş, Gaziantep ve Adıyaman arasında

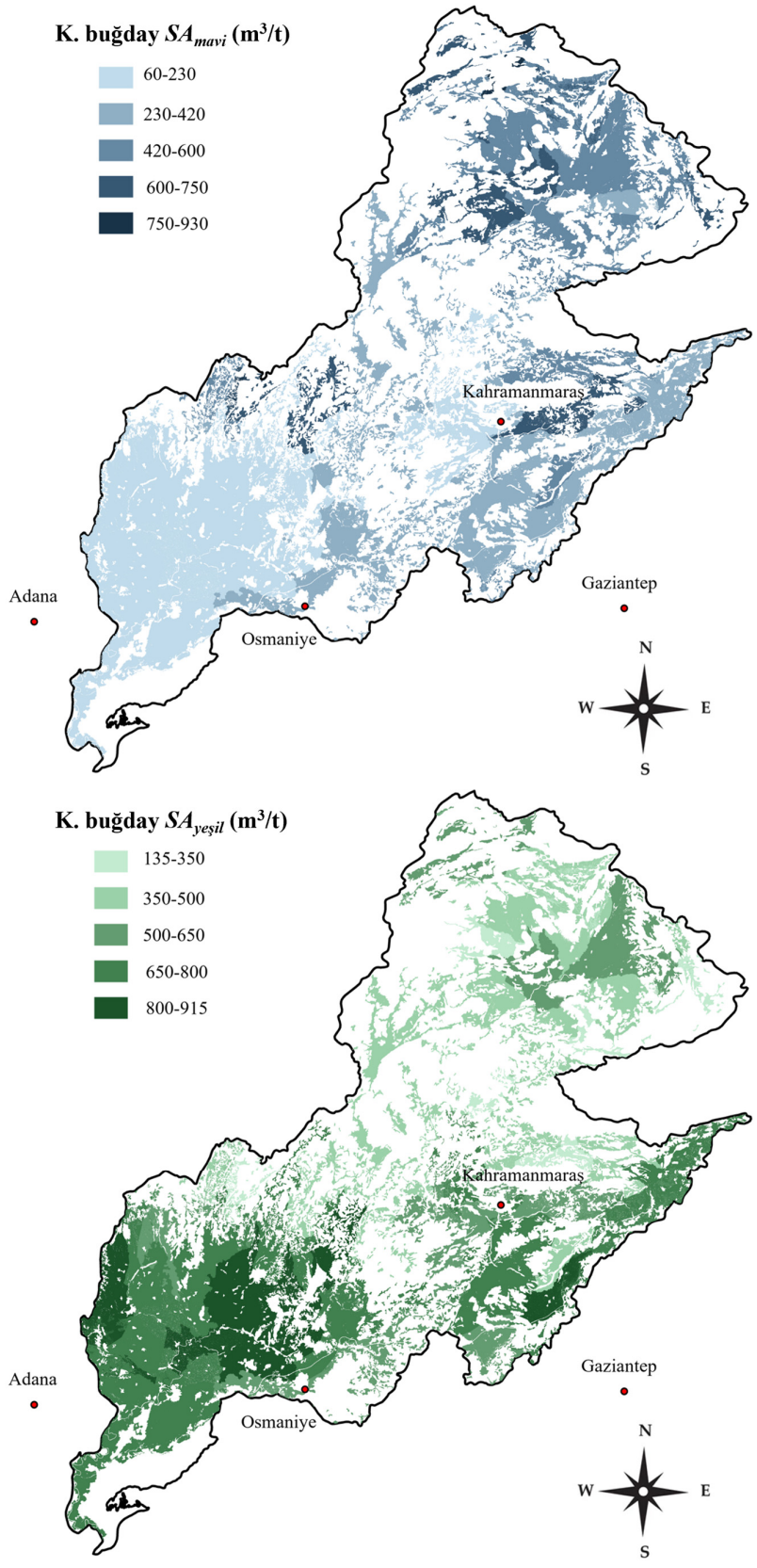
yoğunlaştığı gözlemlenmiştir. Havza genelindeki en homojen yeşil SA dağılımı, mavi su ayak izinde olduğu gibi mısır üretiminde izlenmiştir. Arpanın yeşil su ayak izinin havza kuzeyinde yaklaşık olarak 200-400 m^3/t aralığında dağılım gösterdiği, güney kesimlerde ise bu dağılımın 800-1000 m^3/t aralığında seyrettiği belirlenmiştir. Kışlık buğdayda ise havzanın güney kesimleri ile Kahramanmaraş, Gaziantep ve Adıyaman arasında yeşil su ayak izinde belirgin bir artış gerçekleşmiş ve yaklaşık 700-900 m^3/t aralığında bir dağılım görülmüştür. Buna karşın, bu dağılım havzanın üst kısımlarında yaklaşık 200-400 m^3/t aralığında seyretmiştir. Durum buğdayının yeşil SA dağılımı genel itibari ile kışlık buğdayına paralellik gösterse de Kahramanmaraş ve Adıyaman arasında kışlık buğdaydan farklı olarak yeşil SA nispeten daha düşük gerçekleşmiştir. Genellikle mavi ve yeşil su ayak izinin ters orantılı olarak değişmesinin beklenmesine karşın, pamuğun yeşil su ayak izi Gaziantep-Adıyaman hattında mavi su ayak izinde olduğu gibi yüksek çıkmıştır. Bu bölgede, pamuk üretiminin su ihtiyacının diğer bölgelere nispeten çok daha fazla olması, yeşil ve mavi su ayak izinin her ikisinin de yüksek olmasına neden olmuştur. Benzer bir durum ayçiçeği ve patates üretiminde de görülmektedir.



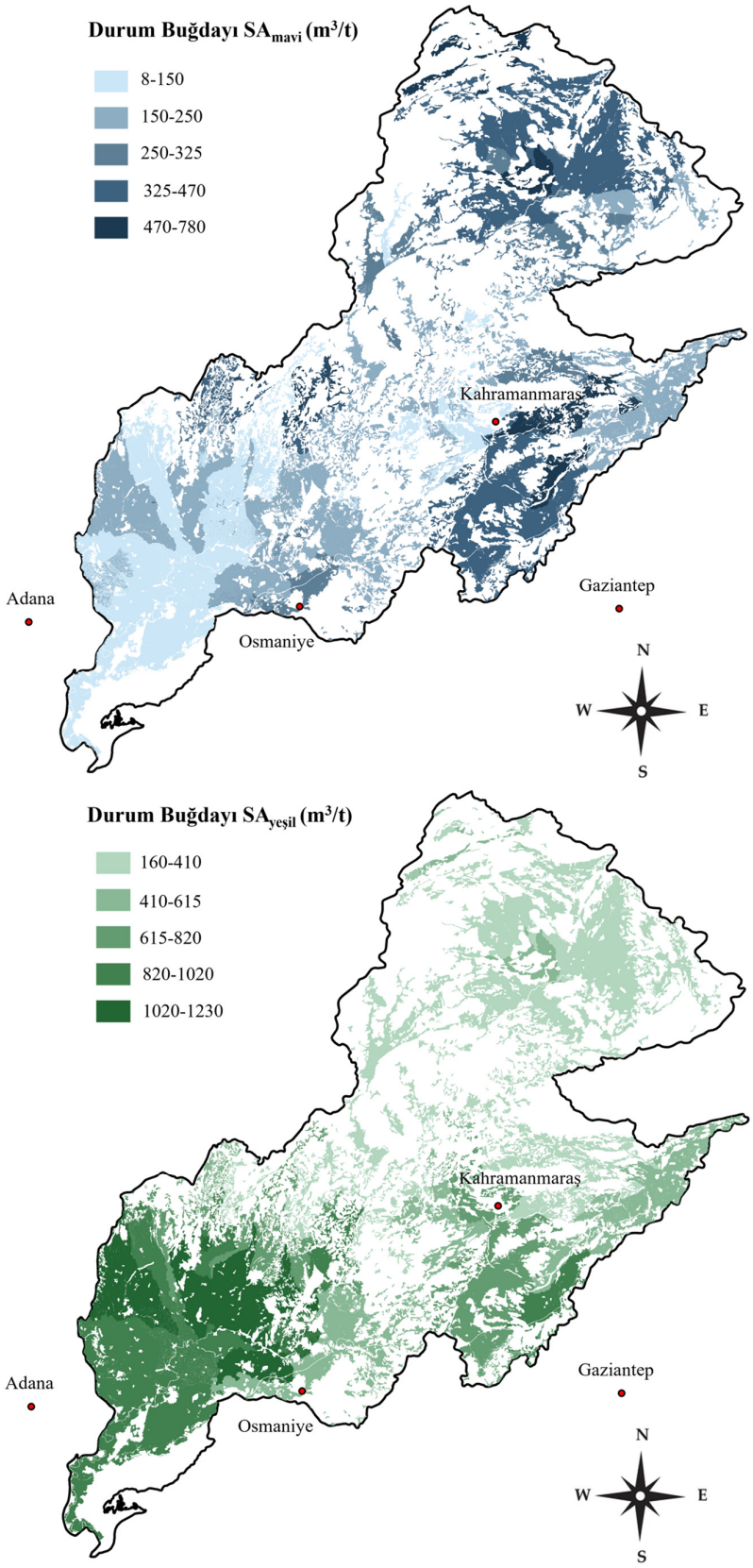
Şekil 4.6. Arpanın mavi ve yeşil su ayak izinin alansal dağılımı



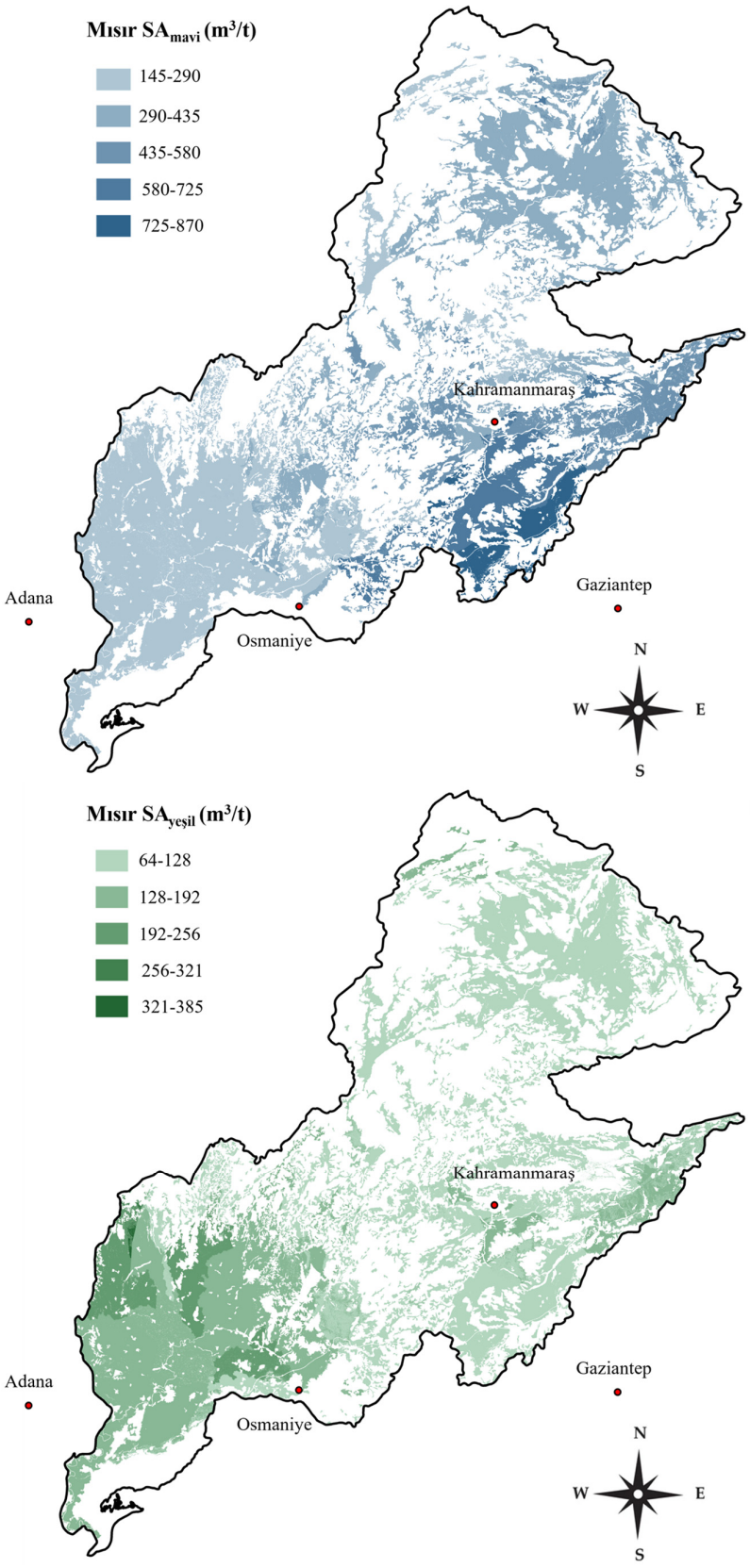
Şekil 4.7. Ayçiçeğinin mavi ve yeşil su ayak izinin alansal dağılımı



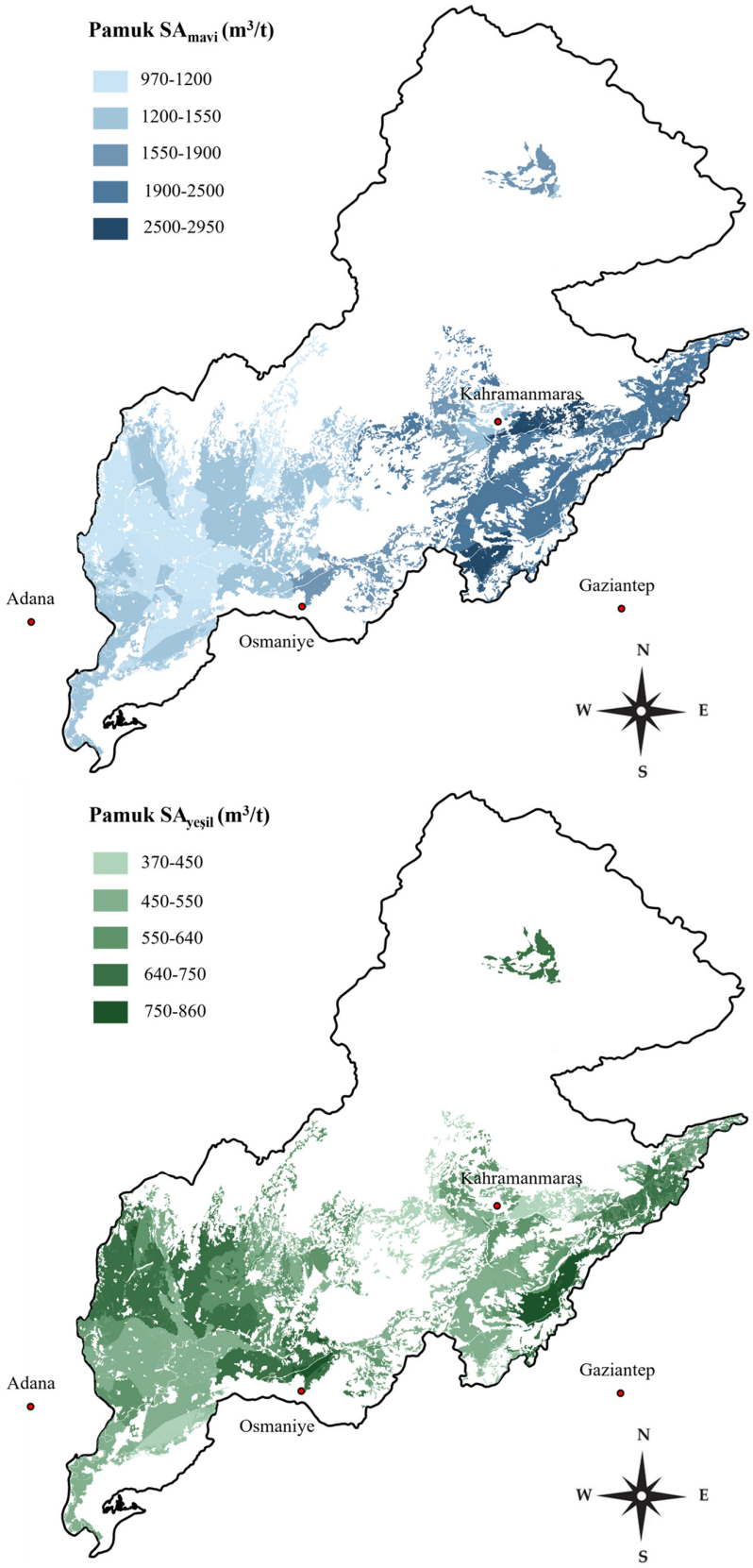
Şekil 4.8. Kışlık buğdayın mavi ve yeşil su ayak izinin alansal dağılımı



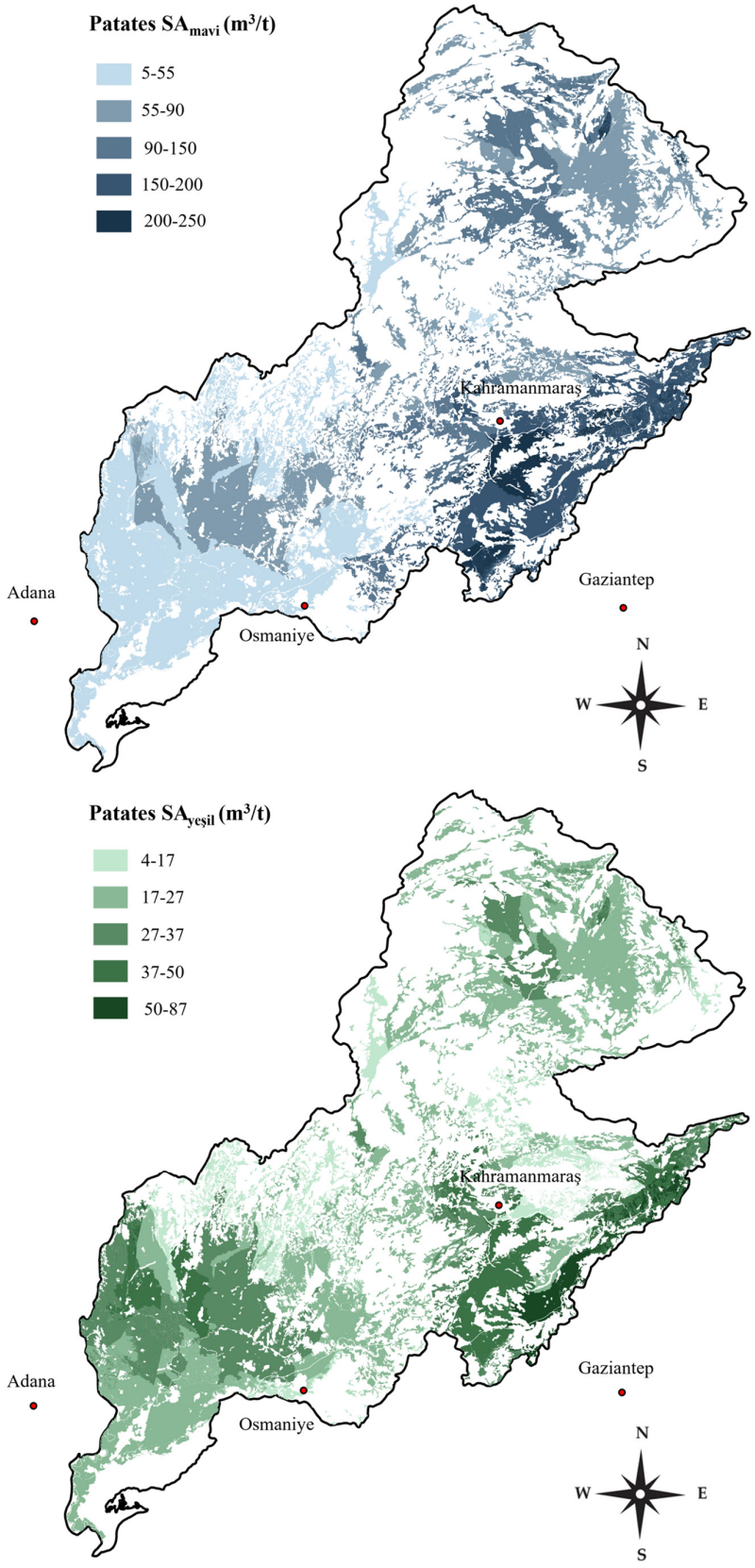
Şekil 4.9. Durum buğdayının mavi ve yeşil su ayak izinin alansal dağılımı



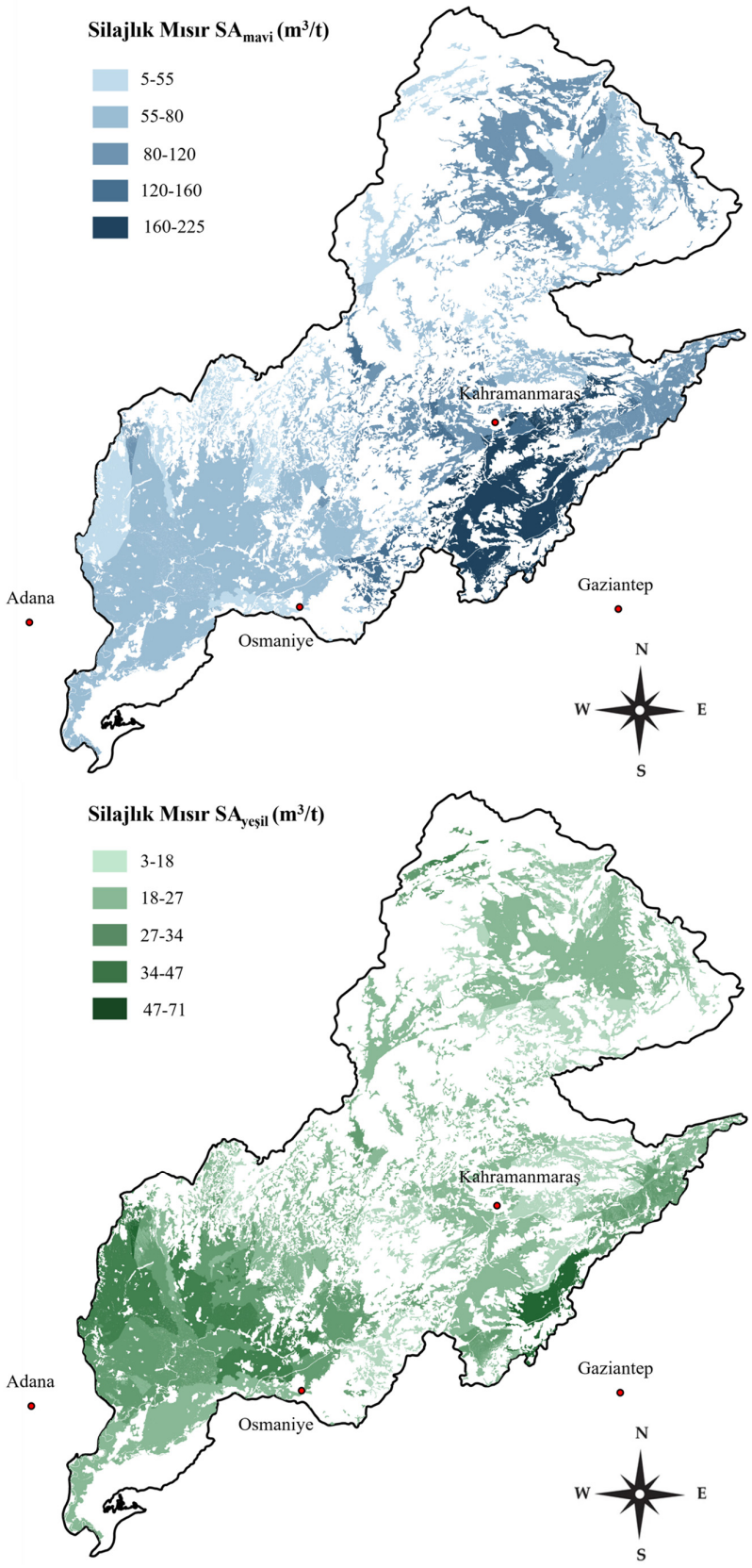
Şekil 4.10. Mısırın mavi ve yeşil su ayak izinin alansal dağılımı



Şekil 4.11. Pamuğun mavi ve yeşil su ayak izinin alansal dağılımı



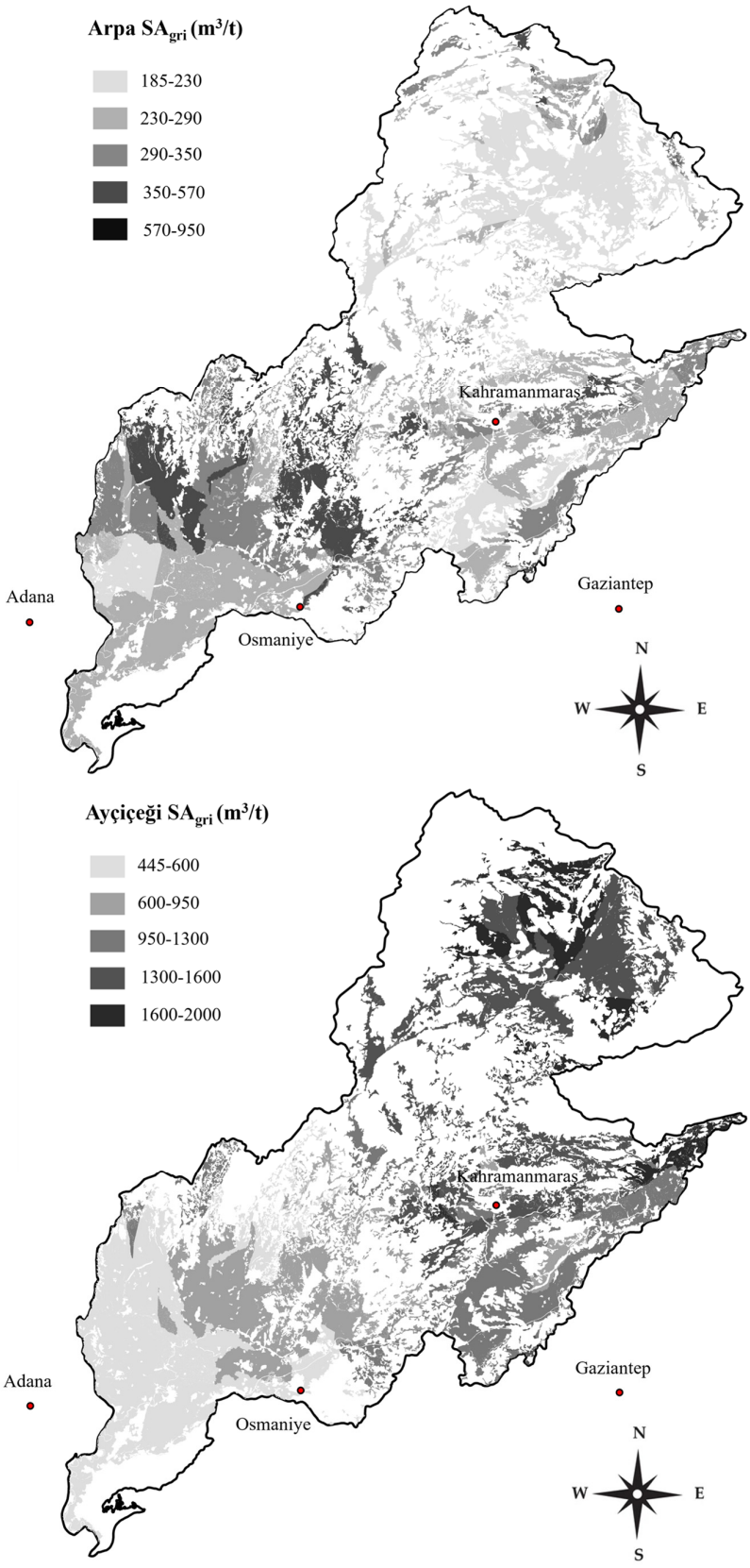
Şekil 4.12. Patatesin mavi ve yeşil su ayak izinin alansal dağılımı



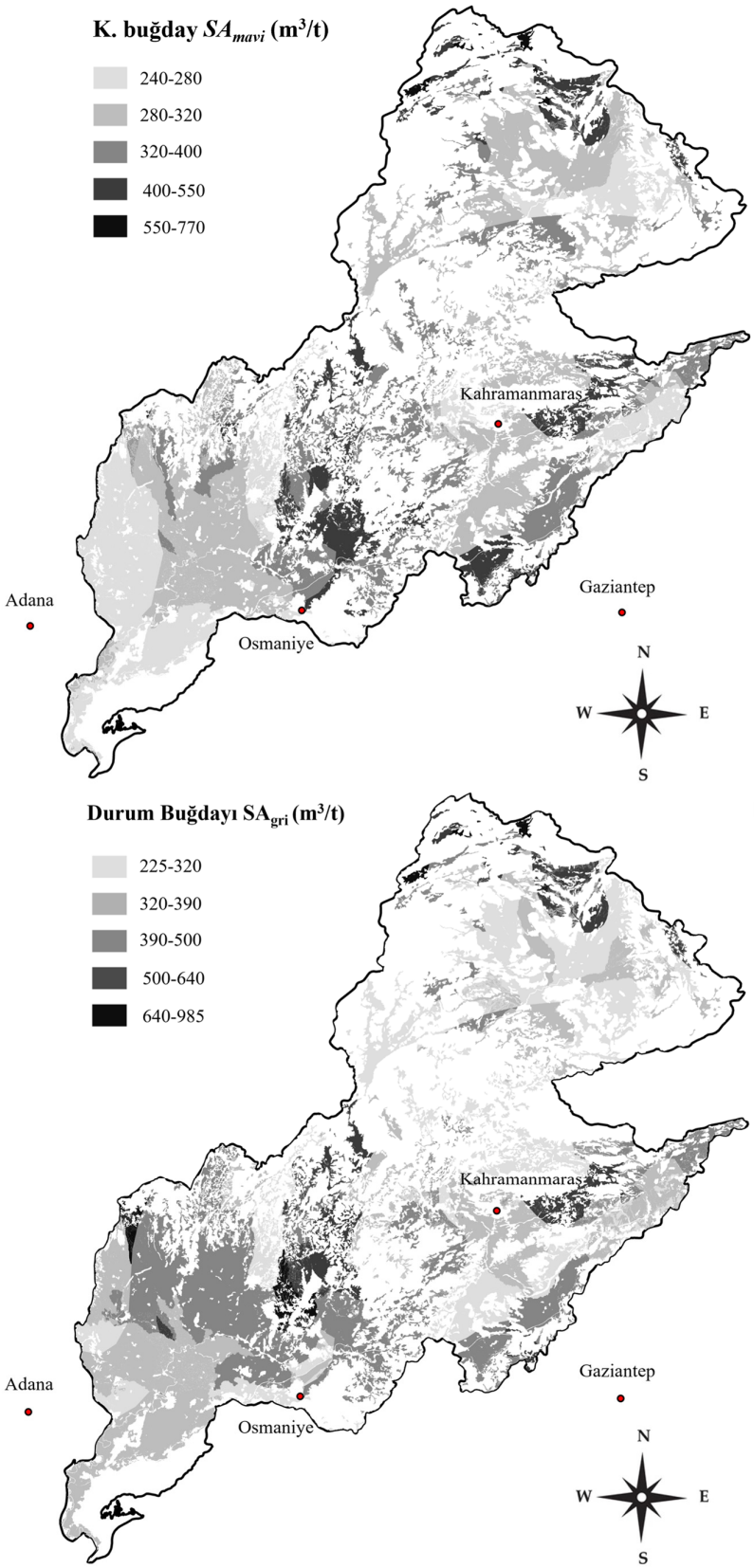
Şekil 4.13. Silajlık mısırın mavi ve yeşil su ayak izinin alansal dağılımı

4.3.2. Gri SA haritaları

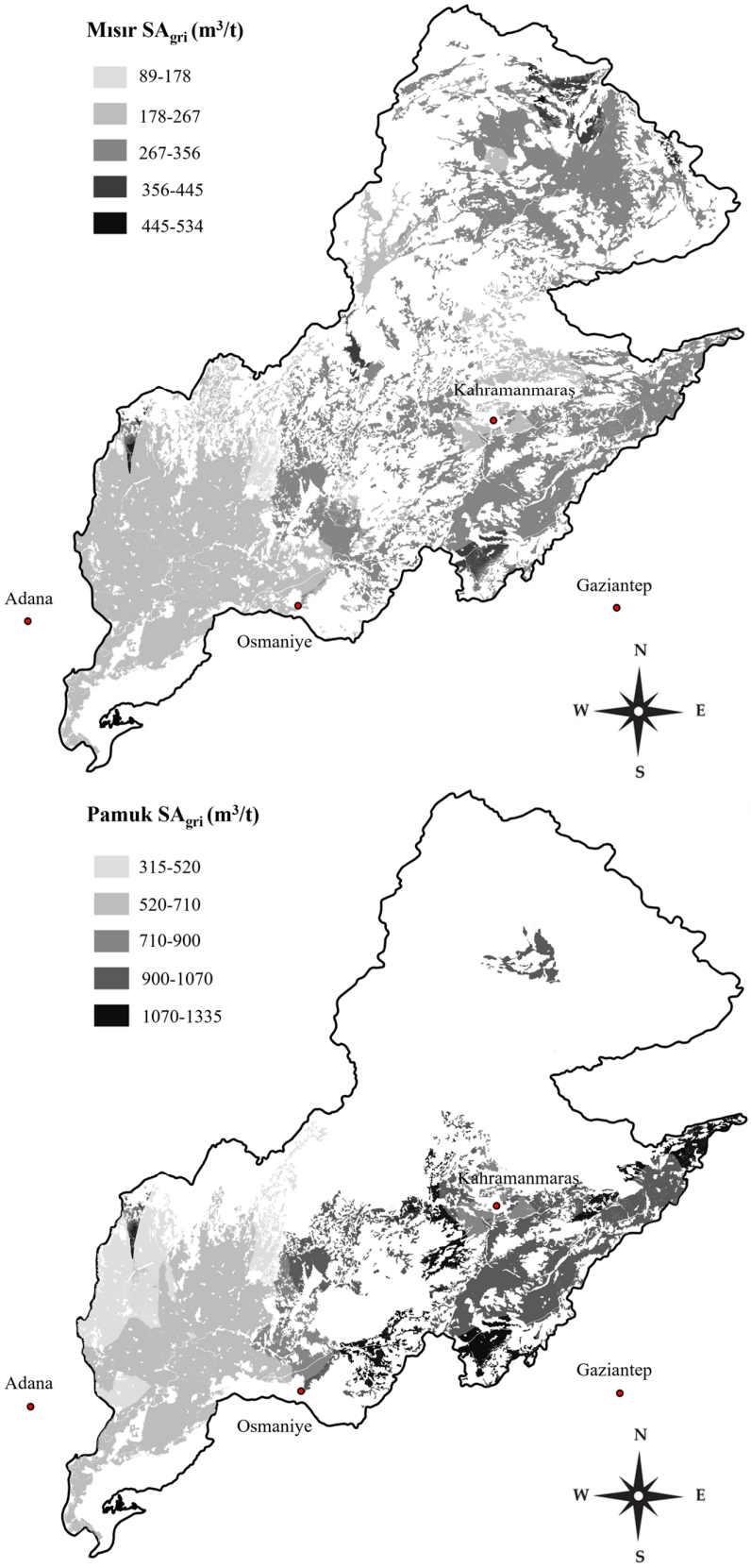
Şekil 4.14-4.17'de havzada yetişen ürünlerin gri su ayak izlerinin dağılımı gösterilmiştir. Gri SA, yeşil ve mavi su ayak izinden farklı olarak yağıştan, bitki su tüketiminden ve diğer iklimsel parametrelerden bağımsız olarak oluşmaktadır. Gri SA, toprak özelliklerinin ve bitkilerin besin ihtiyaçlarının bir fonksiyonu olarak oluşmaktadır. Arpanın gri su ayak izinin, havzanın orta kesimlerinde 400-900 m^3/t aralığında değiştiği, diğer bölgelerde ise 200-400 m^3/t aralığında ve nispeten daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Ayçiçeğinin gri su ayak izinin havzanın orta ve kuzey kesimlerinde oldukça yüksek olduğu ve bazı bölgelerde 2000 m^3/t'a kadar ulaştığı görülmektedir. Bununla birlikte, Adana-Osmaniye aralığında nispeten daha düşük bir gri SA dağılımı (450-600 m^3/t) izlenmektedir. Kışlık buğdayın ve durum buğdayının gri su ayak izi diğer ürünlere göre oldukça heterojen bir dağılım göstermiştir. Kışlık buğdayın gri su ayak izi havza genelinde 240-770 m^3/t aralığında, durum buğdayının ise 225-985 m^3/t aralığında değişmektedir. Mısır ve silajlık mısırda ise gri su ayak izi havza genelinde daha homojen dağılım göstermiştir. Mısırın gri su ayak izi genel itibari ile 100-350 m^3/t aralığında değişirken, silajlık mısır veriminin nem içeriğinden dolayı daha yüksek olması sebebiyle genel itibari ile 35-90 m^3/t arasında değişim göstermiştir. Patatesin gri su ayak izi havzanın üst kısımlarında artacak şekilde havza genelinde 20-150 m^3/t aralığında dağılırken, pamukta Kahramanmaraş, Gaziantep ve Adıyaman çevresinde yaklaşık 1000 m^3/t olmak üzere havza genelinde 315 ile 1335 m^3/t arasında değişim göstermiştir.



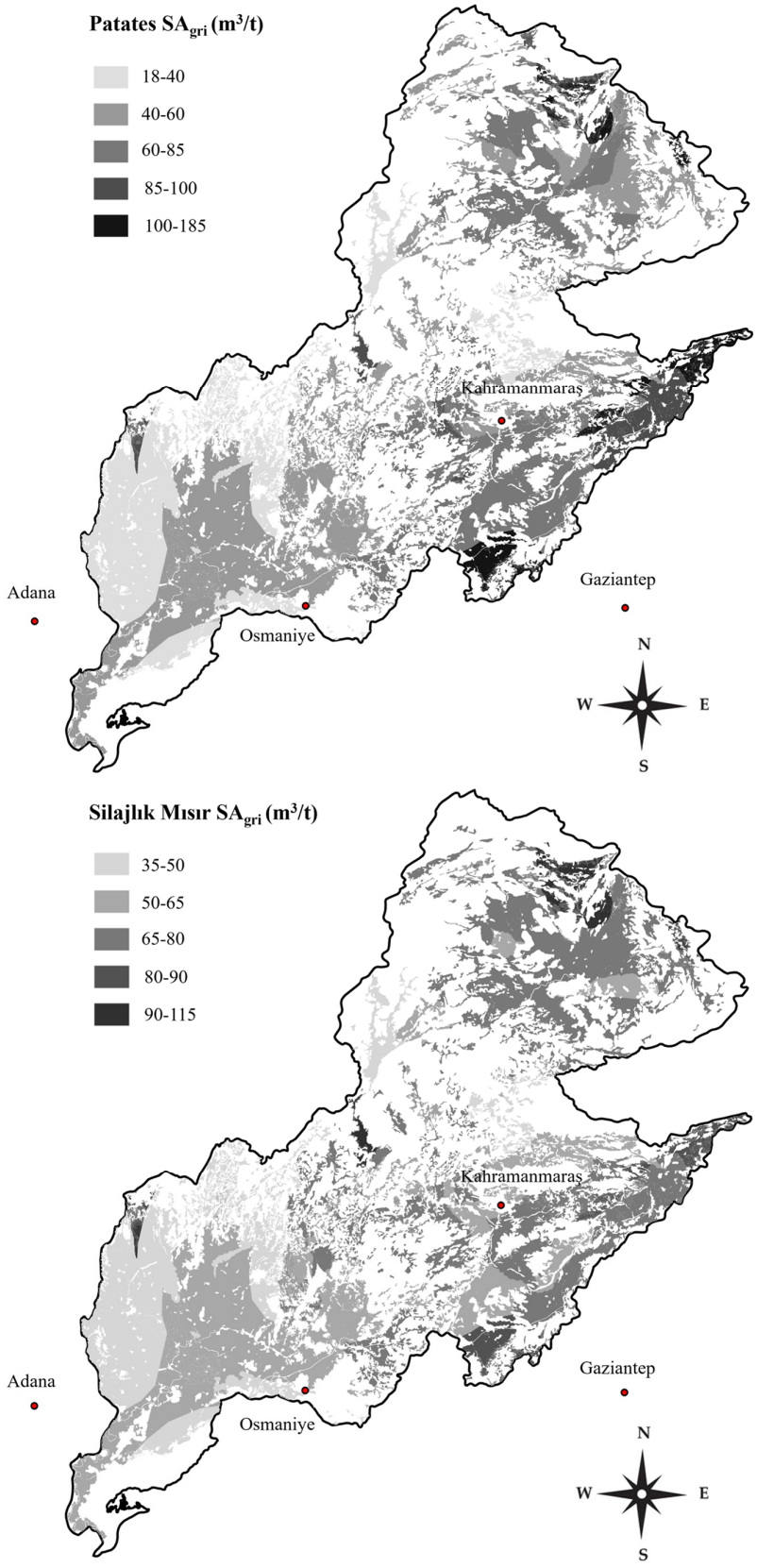
Şekil 4.14. Arpa ve ayçiçeğinin gri su ayak izinin alansal dağılımı



Şekil 4.15. K. buğday ve durum buğdayının gri su ayak izinin alansal dağılımı



Şekil 4.16. Mısır ve pamuğun gri su ayak izinin Ceyhan alansal dağılımı

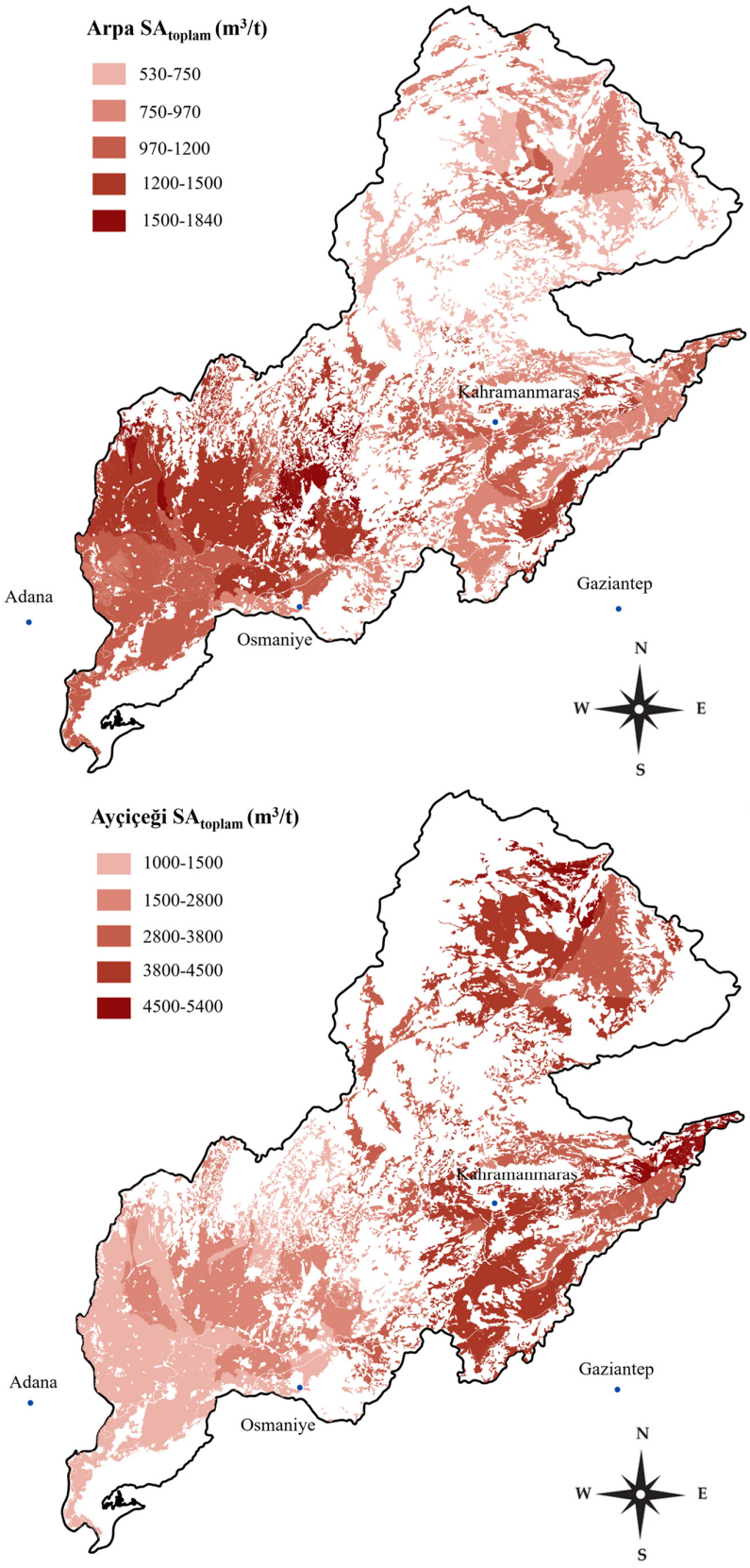


Şekil 4.17. Patates ve silajlık mısırın gri su ayak izinin alansal dağılımı

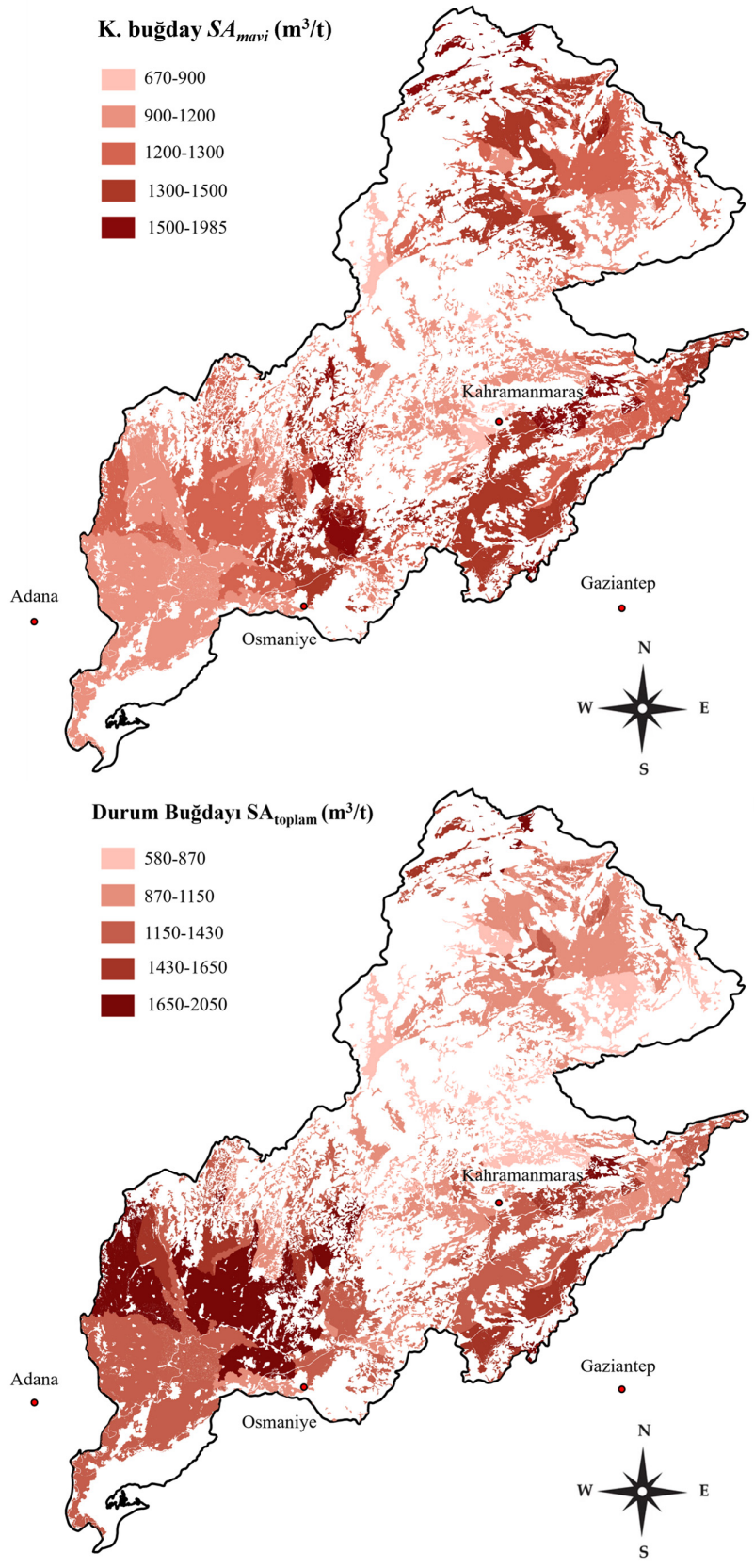
4.3.3. Toplam SA haritaları

Toplam SA, içerisinde gri SA bileşenini de barındırması nedeniyle su tüketiminin direk bir göstergesi değildir. Bununla birlikte toplam SA, beşerî faaliyetlerin su kaynakları üzerindeki toplam etkisini göstermesinden dolayı su yönetimi açısından önemli bir göstergedir. Arpanın toplam su ayak izi havzanın güney ve orta kesimlerinde yaklaşık 1000-1800 m^3/t arasında değişmekle beraber, havza genelinde 530 ile 1840 m^3/t arasında değişim göstermiştir. Ayçiçeğinde bu değer, Ceyhan Havzası'nın yukarı kesimlerinde 3000-5000 m^3/t arasında değişmesine karşın, havza genelinde 1000-5400 m^3/t aralığında değişmiştir. Bunların dışında toplam SA, havza genelinde kışlık buğdayda 240-770 m^3/t, durum buğdayında 580-2050 m^3/t, mısırda 225-1350 m^3/t, silajlık mısırda 65-340 m^3/t, pamukta 1920-4425 m^3/t ve patateste 35-475 m^3/t aralığında bir dağılım göstermiştir (Şekil 4.18-21).

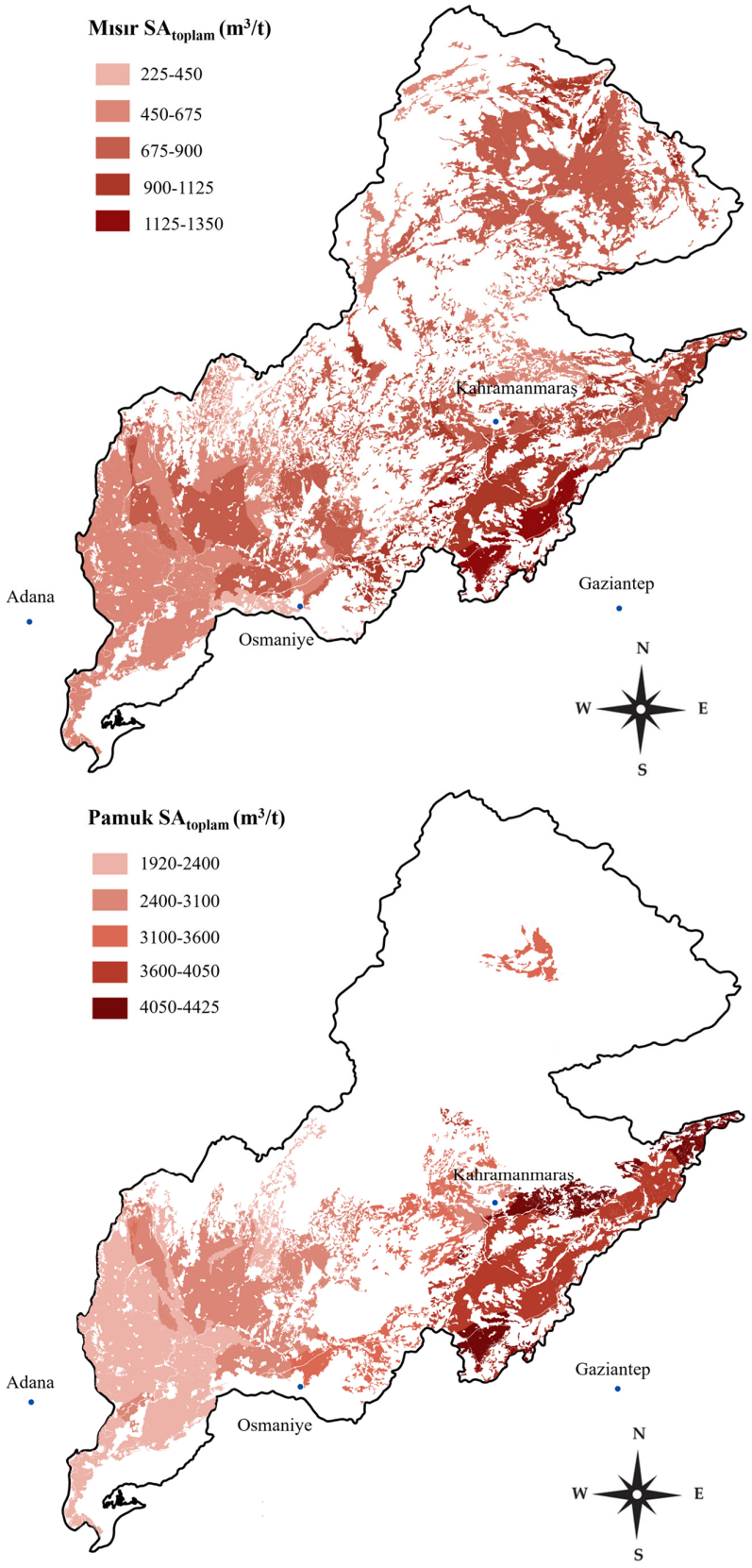
Şekil 4.18-21'de toplam SA haritaları göz önüne alındığında arpa ve durum buğdayının havzanın kuzey kesimlerinde, ayçiçeği, mısır, silajlık mısır, pamuk ve patatesin ise güney kesimlerde, kışlık buğdayının ise havzanın orta kısımlarının batı tarafında ve güney bölgelerinde yetiştirilmesinin, su kaynakları üzerindeki insan etkilerini azaltma konusunda yarar sağlayacağı söylenebilir. Bununla birlikte, mavi su ayak izinin tatlı su kaynakları üzerinde kritik öneme sahip olması nedeniyle ayrıca değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu bağlamda, özellikle ayçiçeği ve pamuğun Kahramanmaraş ve çevresi ile havzanın kuzey kesimlerinde oldukça fazla mavi su ayak izine sahip olmaları nedeniyle, havzanın güney kesimlerinde yetiştirilerek, tatlı su kaynaklarının daha verimli kullanımının sağlanabileceği öngörülmektedir. Bununla birlikte diğer ürünlerinde genel itibari ile havzanın güneyinde daha düşük mavi su ayak izine sahip oldukları belirlenmiştir. Fakat, silajlık mısır ve patatesin havzanın tamamında nispeten daha düşük ortalama mavi su ayak izine sahip olmaları ve mısırın daha homojen bir mavi SA dağılımına sahip olması nedeniyle, bu ürünlerin Kahramanmaraş ve çevresi ile havzanın kuzey kesimlerinde ekilmesi su kaynaklarının sürdürülebilirliği açısından uygun olacağı düşünülmektedir.



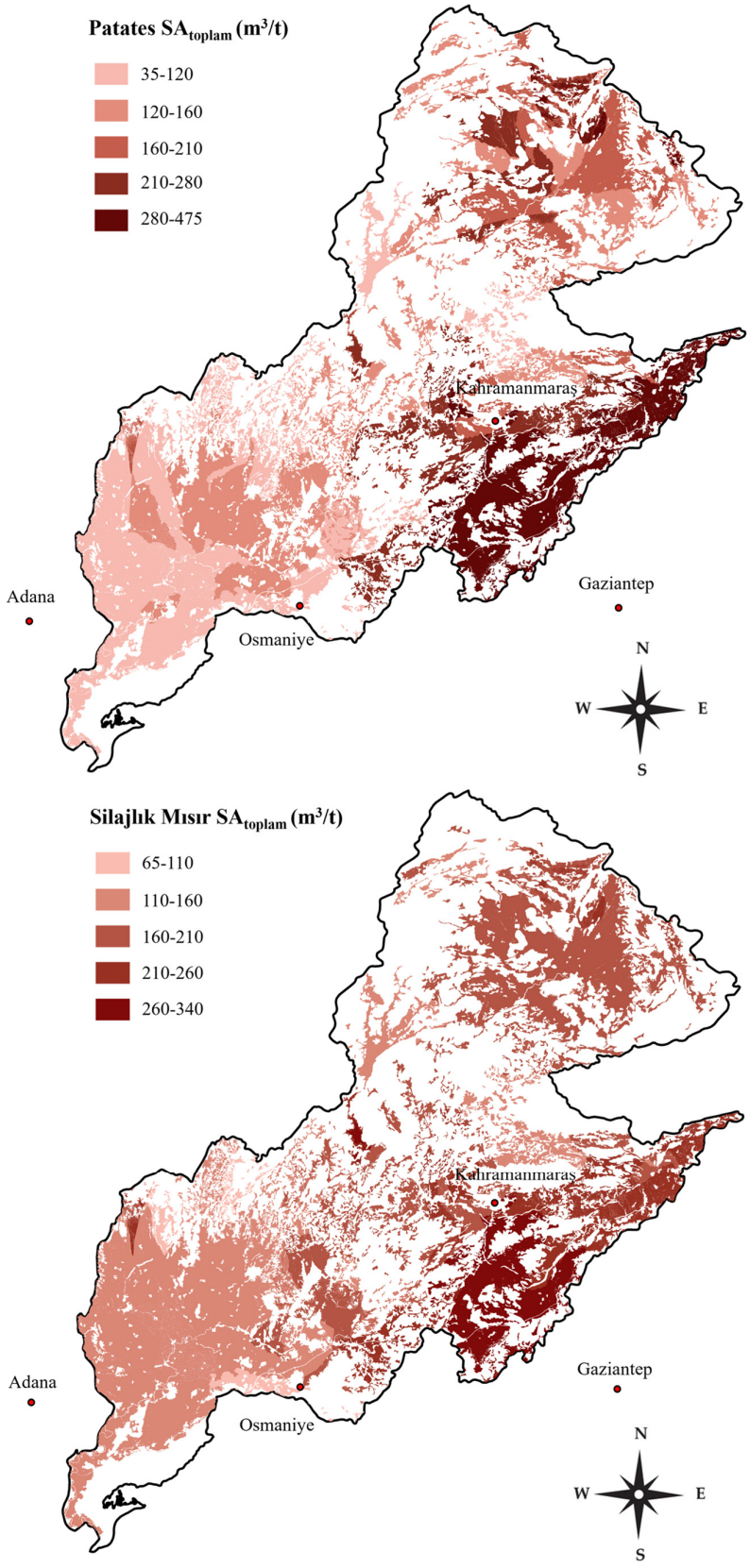
Şekil 4.18. Arpa ve ayçiçeğinin toplam su ayak izinin alansal dağılımı



Şekil 4.19. Kışlık buğday ve durum buğdayının toplam su ayak izinin alansal dağılımı



Şekil 4.20. Mısır ve pamuğun toplam su ayak izinin alansal dağılımı

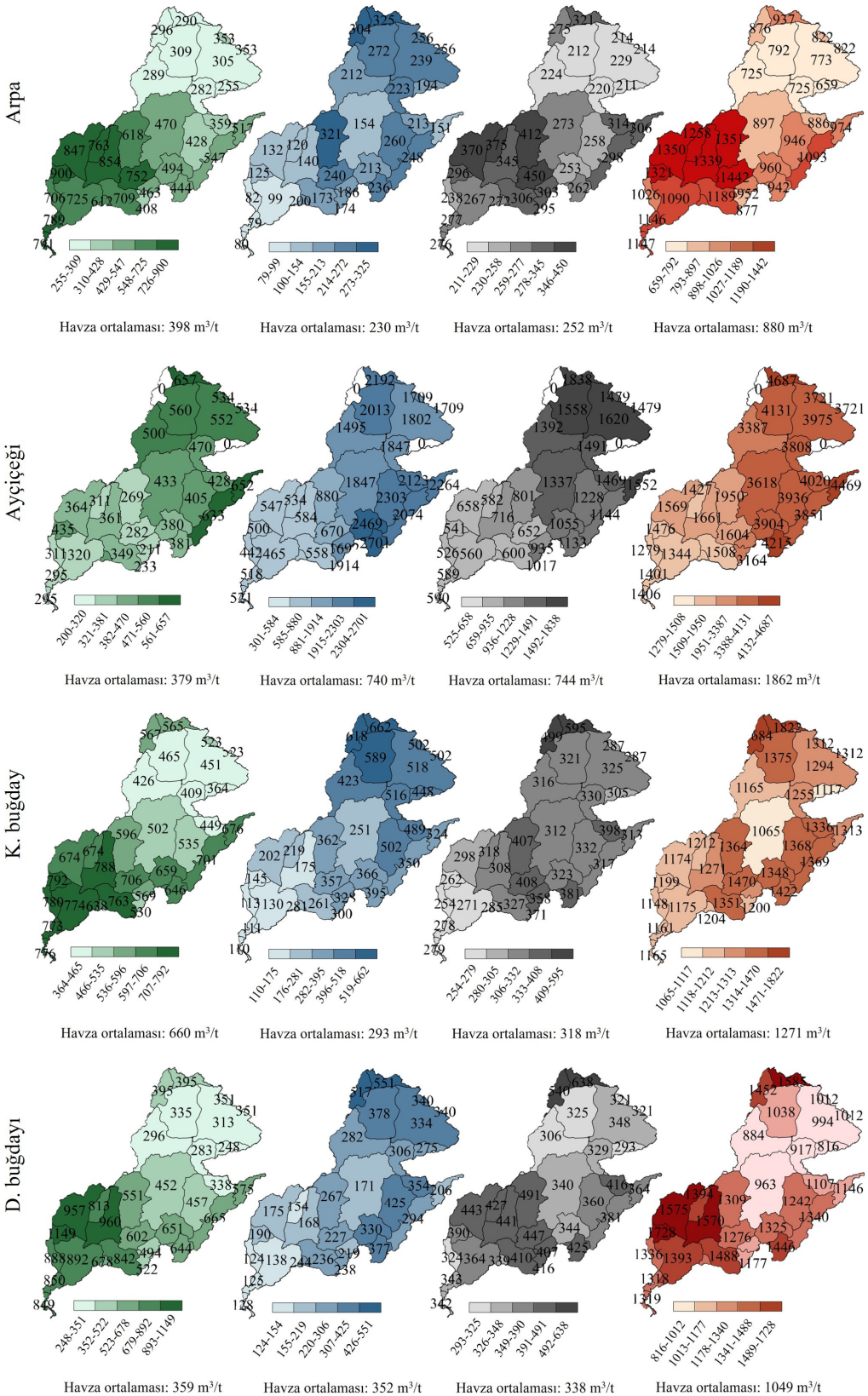


Şekil 4.21. Patates ve silajlık mısırın toplam su ayak izinin alansal dağılımı

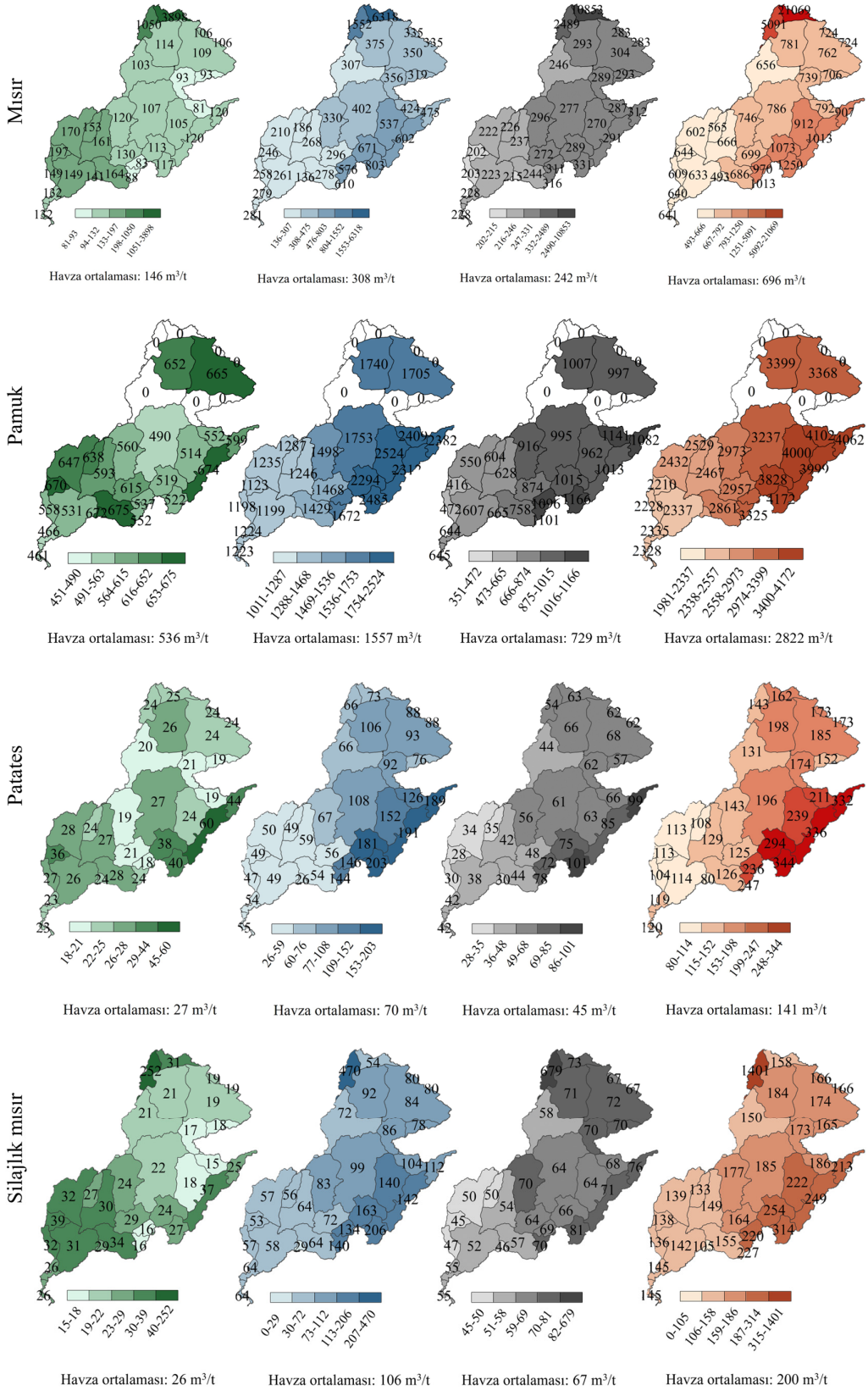
Burada sadece SA indikatörü üzerinden değerlendirme yapıldığının, nihai değerlendirmenin havzanın sosyoekonomik yapısı, su mevcudiyeti dağılımı, çiftçi alışkanlıkları, ürünlerin ekonomik getirileri ve ülkenin tarımsal üretim stratejileri gibi parametrelerin birlikte değerlendirilerek çok boyutlu bir stratejinin oluşturulması gerektiğinin altı çizilmelidir. Buna karşın, su odaklı tarımsal üretim stratejilerinin oluşturulmasında en önemli parametrelerinden birinin SA indikatörünün olacağı, SA odaklı bir değerlendirmenin tarımsal üretimin ve su kaynaklarının sürdürülebilirliği açısından önemli katkılar sağlayacağı düşünülmektedir.

4.3.4. İlçe ölçekli SA analizleri

Tarımsal üretim istatistiklerinin ilçe ölçeğinde olması nedeniyle, mevcut durumdaki tarımsal üretimin SA perspektifinden değerlendirilebilmesi için ilçe bazlı SA verilerinin ortaya konması gerekmektedir. Bu bağlamda, Bölüm 4.3'te HRU ölçeğindeki SA verileri ile Ceyhan Havzası'nda sınırları bulunan ilçelerin ortalama su ayak izleri hesaplanmıştır (Denklem 3.67). Mevcut çalışma kapsamında incelenen ürünlerin ilçe ölçekli ortalama mavi, yeşil, gri ve toplam su ayak izleri Şekil 4.22 ve 23'te görselleştirilmiştir. Burada arpa üretiminde en büyük toplam SA Düziçi, Andırın ve Kozan'da, ayçiçeği ve kışlık buğday üretiminde Gürün, Gölbaşı ve Nurdağı'nda, Durum buğdayı üretiminde Gürün, Kozan ve Kadirli'de, mısır üretiminde Gürün, Sarız ve Türkoğlu'nda, pamuk üretiminde Çağlayancerit, Gölbaşı ve Dulkadiroğlu'nda, patates üretiminde Pazarcık, Nurdağı ve Gölbaşı'nda ve son olarak Silajlık mısır üretiminde Sarız, Nurdağı ve Türkoğlu'nda görülmüştür. Yeşil SA genellikle Kozan, Kadirli ve Pazarcık ilçelerinde yüksek iken, mavi SA Dulkadiroğlu, Afşin ve Gürün ilçelerinde yüksektir.



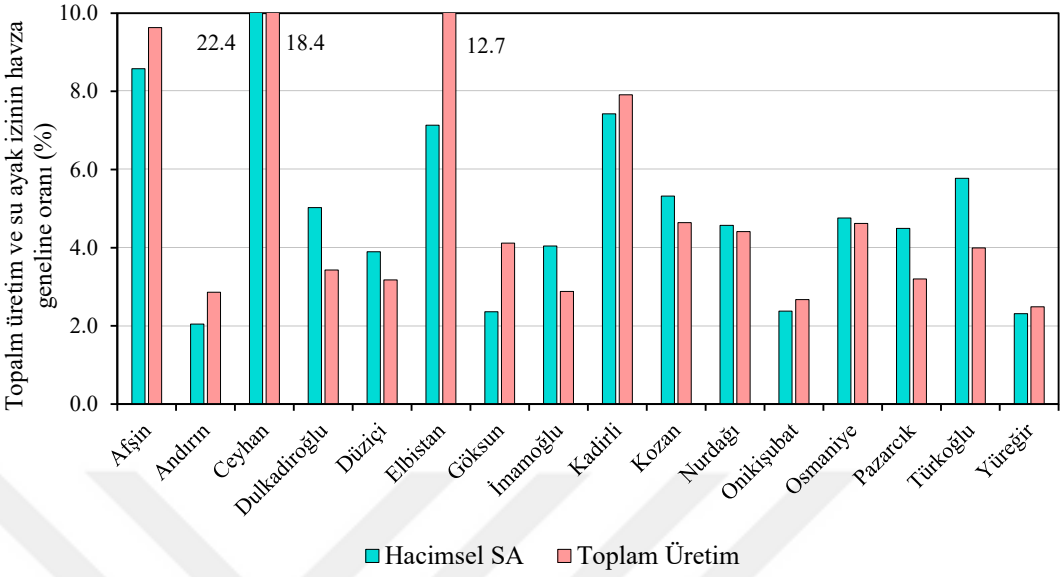
Şekil 4.22. Arpa, ayçiçeği, kışlık buğday ve durum buğdayın ilçe bazlı sırası ile yeşil, mavi, gri ve toplam su ayak izi haritaları



Şekil 4.23. Mısır, pamuk, patates ve silajlık mısırın ilçe bazlı sırası ile yeşil, mavi, gri ve toplam su ayak izi haritaları

Şekil 4.22 ve 4.23'e göre su yönetimi perspektifinden, Ceyhan Havzası'nda arpa yetiştiriciliği açısında en uygun ilçeler, Afşin, Elbistan ve Ceyhan; ayçiçeği için Ceyhan, Sarıçam ve İmamoğlu; kışlık buğday için Onikişubat, Ceyhan ve Sarıçam; durum buğdayı için Göksun, Onikişubat ve Ekinözü; mısır için Ceyhan, Kozan ve Sarıçam; Pamuk için Ceyhan, Sarıçam ve İmamoğlu; patates ve silajlık mısır için Sarıçam, İmamoğlu ve Kozan olarak sıralanabilir. Mevcut durumda TUİK istatistiklerine göre ise mısır Elbistan, Nurdağı ve Andırın'da yoğun olarak ekilmektedir. Fakat, Şekil 4.23'te bu bölgelerde mısırın hem toplam su ayak izinin hem de mavi su ayak izinin yüksek olduğu görülmektedir. Benzer bir durum pamuk yetiştiriciliğinde de görülmektedir. Dulkadiroğlu'nda pamuğun toplam ve mavi su ayak izi oldukça yüksek olmasına rağmen, havza genelinde Ceyhan'dan sonra en yoğun pamuk yetiştiriciliği bu yörede yapılmaktadır. Öte yandan, kışlık buğdayın mavi su ayak izinin en yüksek olduğu ilçelerden biri Afşin olmasına rağmen (Şekil 4.22) yine bu bölgede kışlık buğday üretiminin yüksek olduğu tespit edilmiştir. Son olarak, Afşin'de ayçiçeğinin toplam su ayak izinin, havza ortalamasının 2 katından fazla olmasına rağmen, havzada en yüksek ayçiçeği üretiminin yapıldığı bölgelerdendir. Su tüketimi göz ardı edilerek gerçekleştirilen bu gibi tarımsal uygulamalar, havzanın ortalama su ayak izini artırmaktadır. Bu durum, kurak ve yarı kurak bölgelerdeki su mevcudiyeti üzerindeki baskıyı ciddi oranda artırmaktadır. Öte yandan, Ceyhan Havzası'nda yetiştirilen arpa ve patates, diğer ürünlere nispeten su yönetimi perspektifinden daha uygun bir dağılım göstermektedir. Havzada arpa en yoğun olarak Elbistan ve Afşin'de, patates ise Ceyhan'da yetiştirilmektedir. Şekil 4.22'de arpanın toplam su ayak izinin Elbistan ve Afşin'de havza ortalamasının altında olduğu, Şekil 4.23'te ise patatesin mavi ve toplam su ayak izinin Ceyhan'da havza ortalamasının oldukça altında kaldığı görülmektedir.

Su kaynakları üzerindeki antropojenik etkinin genel bir çerçevesinin çizilmesi için mahsullerin toplam hacimsel su ayak izlerinin değerlendirilmesi önem arz etmektedir. Burada hacimsel SA, birim üretim başına su tüketimini gösteren su ayak izinden farklı olarak toplam su tüketimini metreküp olarak ifade etmektedir (Denklem 3.68). Hacimsel SA sayesinde, havza su kaynaklarına insani müdahalenin yoğunluğu net bir şekilde ortaya konabilmektedir. Bu sebeple, mevcut çalışmada incelenen ürünlerin ilçe ölçeğindeki ortalama toplam hacimsel su ayak izleri hesaplanarak Şekil 4.32'de görselleştirilmiştir. Ayrıca bazı ilçelerde yetiştirilen ürünlerin toplam üretim miktarlarının ve toplam hacimsel su ayak izlerinin, havza geneli içerisindeki oranları Şekil 4.24'te gösterilmiştir.

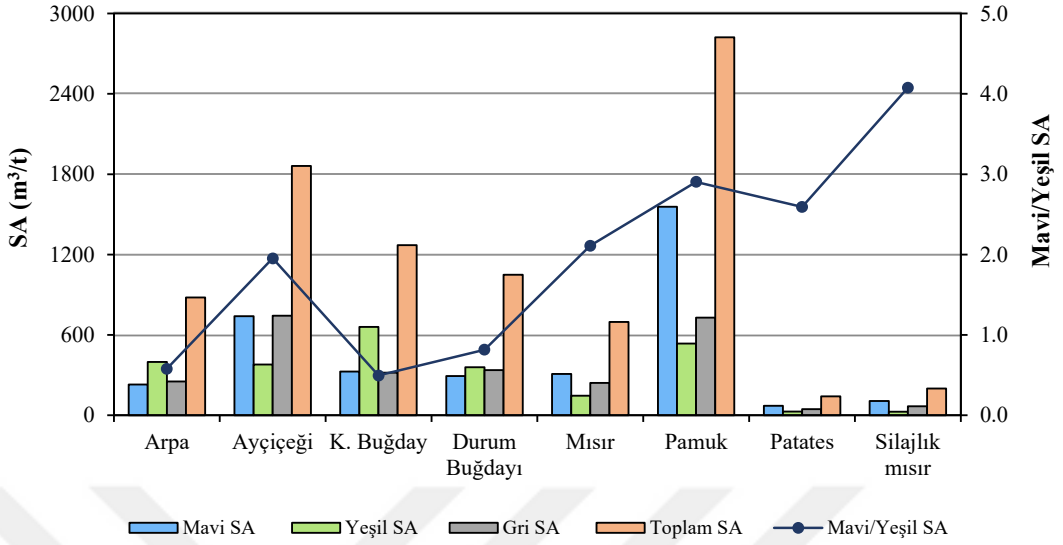


Şekil 4.24. İlçe bazında üretim miktarı ve SA oranları

Şekil 4.32'de mevcut durumda (S0 senaryosu) havza genelinde en yüksek mavi, yeşil, gri ve toplam hacimsel su ayak izinin, tarımsal üretim yoğunluğunun yüksek olması nedeniyle Ceyhan ilçesinde olduğu görülmektedir. Bununla birlikte, Şekil 4.24'te Ceyhan ilçesinde, mevcut çalışmada incelenen ürünlerin havza içerisindeki toplam üretiminin %18.4'lük kısmı üretilmesine karşın, havzadaki toplam hacimsel su ayak izinin %22.4'lük kısmının burada gerçekleştiği görülmektedir. Benzer şekilde Dulkadiroğlu, Düziçi, İmamoğlu, Kozan, Nurdağı, Osmaniye Merkez, Pazarcık ve Türkoğlu'nda da hacimsel SA oranının üretim oranından daha yüksek olduğu görülmektedir. Buna karşın Afşin, Andırın, Elbistan, Göksun, Kadirli ve Onikişubat ilçelerinde Hacimsel SA oranının toplam üretim oranından daha düşük olduğu görülmektedir.

4.3.5. Ceyhan Havzası genelinde SA analizi

Havza genelinde mevcut üretim koşullarındaki SA verilerinin belirlenebilmesi için halihazırdaki ürün deseni haritasının net olarak bilinmesi gerekmektedir. Fakat Bölüm 3.6'da da ifade edildiği üzere havzanın mevcut durumdaki ürün deseni haritası veri seti bulunmamaktadır. Bu nedenle, havza genelinde mevcut üretim koşullarındaki ortalama SA değerleri, ilçelerin ortalama SA verileri ve ilçelerin havza içerisinde kalan alanlarındaki üretim miktarları ile Denklem 3.68 ve 3.69'daki gibi hesaplanmıştır. Tablo 4.6 ve Şekil 4.25'te Ceyhan Havzası'nda yetiştirilen 8 farklı ürünün, 2011-2020 yılları arasındaki üretim miktarlarına göre ortalama su ayak izleri gösterilmiştir.



Şekil 4.25. Ceyhan Havzası genelinde ürünlerin mevcut üretim koşullarındaki su ayak izi ortalamaları

Tablo 4.6. Ceyhan Havza'sında mahsullerin mevcut üretim koşullarındaki su ayak izleri

	SA (m^3/t)				Hacimsel SA (10^6 m^3)			
Ürün	**Mavi SA**	**Yeşil SA**	**Gri SA**	**Toplam SA**	**Mavi SA**	**Yeşil SA**	**Gri SA**	**Toplam SA**
Arpa	230	398	252	880	25.4	43.9	27.8	97.1
Ayçiçeği	740	379	744	1862	76.4	39.1	76.8	192.3
K. Buğday	293	660	318	1271	228.7	514.2	247.7	990.6
D. Buğdayı	352	359	338	1049	49.5	50.5	47.5	147.5
Mısır	308	146	242	696	289.0	136.7	226.7	652.4
Pamuk	1557	536	729	2822	240.3	82.6	112.5	435.5
Patates	70	27	45	141	6.2	2.4	4.0	12.6
S. mısır	106	26	67	200	53.7	13.4	34.2	101.3

Ceyhan havzası genelinde ortalama toplam su ayak izi en düşük ürünler 141 m^3/t ile patates ve 200 m^3/t ile silajlık mısır olarak belirlenmiştir. Patates ve silajlık mısırın diğer ürünlere göre oldukça düşük su ayak izine sahip olmalarının temel nedeni, nispeten düşük su ihtiyaçlarının olması ve yüksek mahsul verimlerinin olmasıdır. Bununla birlikte, havza genelinde en yüksek toplam su ayak izine sahip ürünler, pamuk ve ayçiçeği olarak belirlenmiştir (sırasıyla 2822 ve 1862 m^3/t). Bu ürünlerin etkili bir su yönetimi açısından, havza içerisindeki üretim miktarı ve dağılımının dikkatli değerlendirilmesi gerekmektedir. Fakat, pamuk ve ayçiçeğinin Ceyhan Havzası'ndaki üretim miktarlarının diğer ürünlere göre nispeten daha düşük olması (Tablo 3.7), buğday ve mısırın havza içerisinde en çok yetiştirilen ürünler olmaları ve bu ürünlerin ayçiçeği ve pamuktan sonra

en yüksek mavi su ayak izine sahip olmaları nedeniyle, su kaynaklarının sürdürülebilirliği perspektifinden havzadaki en kritik ürünlerin buğday ve mısır olduğu düşünülmektedir.

Yağmur suyu tüketiminin bir göstergesi olan yeşil su ayak izinin belirlenmesi toprak nemi kullanım verimliliğini göstermesi açısından önemlidir. Mavi ve gri SA indikatörlerinin aksine yeşil su ayak izinin yüksek olması direkt olarak olumsuz bir durumun göstergesi değildir. Çünkü havzanın toplam yeşil su ayak izinin yüksek olması, toprak neminin ürün getirisi olmaksızın atmosfere geri dönerek israf olmadığını göstermektedir. Bununla birlikte, havzanın yeşil su mevcudiyetinin havza iklim koşullarına uygun tarımsal ürünlere tahsis edilmesi, mevcut su miktarı ile maksimum ürün getirisi sağlanması açısından önem arz etmektedir. Ceyhan Havzası'nda en yüksek ortalama yeşil su ayak izinin kışlık buğday ve pamuk üretiminde (sırasıyla 660 ve 536 m^3/t) gerçekleştiği tespit edilmiştir. Dolayısıyla bu ürünlerin, efektif yağışın yüksek olduğu bölgelerde yetiştirilmesi, yeşil su mevcudiyetinin daha etkili kullanımının sağlaması açısından önemlidir. Öte yandan, havza genelinde en düşük yeşil su ayak izine sahip ürünler, yüksek verimleri nedeniyle silajlık mısır ve patates olarak belirlenmiştir. Ayrıca Ceyhan Havzası'nda en yüksek üretim miktarına sahip olan mısırın da yeşil su ayak izinin, diğer ürünlere nispeten oldukça düşük olduğu görülmektedir (146 m^3/t).

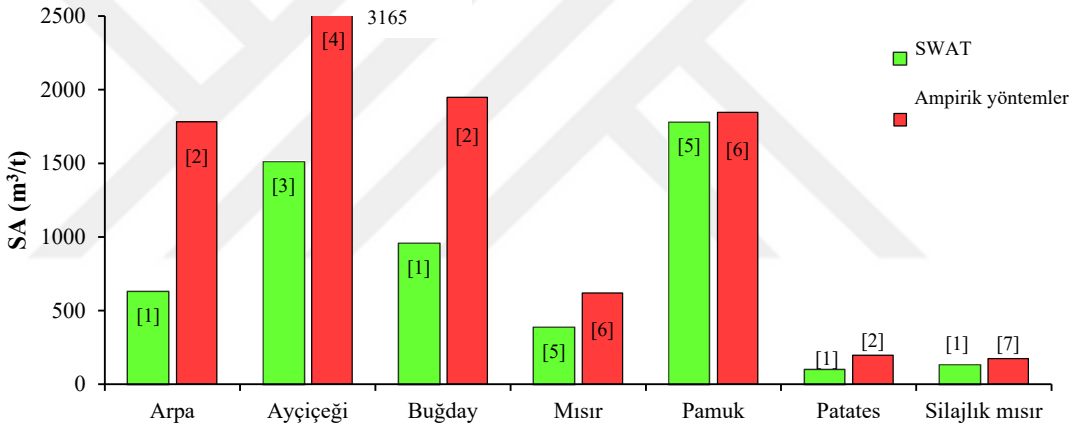
Havza genelinde pamuk ve ayçiçeğinin diğer mahsullere nispeten oldukça yüksek mavi su ayak izine sahip olduğu belirlenmiştir. Bu durum, pamuk ve ayçiçeği yetiştiriciliğinin tatlı su kaynakları üzerinde baskın bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Buna karşılık, tatlı su tüketiminin sadece mavi SA miktarı ile değerlendirilmesi bütüncül bir yaklaşım sunmamaktadır. Ürünlerin mavi su ayak izlerinin, aynı ürünlerin yeşil su ayak izlerine oranlarının da dikkate alınması büyük öneme sahiptir. Bu oranın yüksek olması, ürünün yağmur suyundan yeterince faydalanamadığını ve gelişiminin büyük ölçüde yüzey ve yer altı su kaynaklarına bağımlı olduğunu göstermektedir. Dolayısıyla bir ürünün mavi su ayak izi miktarsal olarak düşük olsa bile, mavi/yeşil SA oranı yüksek ise, ürünün yeşil SA tüketim verimliliğinin düşük olduğu söylenebilir. Dolayısıyla bu ürünlerin yoğun tarımsal uygulamalarda, su kaynakları üzerinde baskı oluşturacağı dikkate alınmalıdır. Mevcut çalışmada Ceyhan Havzası genelinde silajlık mısır, pamuk, patates, mısır ve ayçiçeğinin yüksek mavi/yeşil SA oranına sahip olduğu görülmekle beraber, arpa, buğday ve durum buğdayında bu oranın düşük olduğu ve dolayısıyla yeşil su kullanım verimliliğinin yüksek olduğu tespit edilmiştir (Şekil 4.25).

Mavi ve yeşil su ayak izine benzer bir şekilde çalışma alanında en düşük gri su ayak izi de patates ve silajlık mısır yetiştiriciliğinde gerçekleşmektedir (sırasıyla 45 ve 67 m^3/t). Öte yandan, mevcut çalışmada Ceyhan Havzası'nda ortalama gri su ayak izi en yüksek ürün 744 m^3/t ile ayçiçeği olduğu tespit edilmiştir. Tarım ve Orman Bakanlığı'nın web sitesinde yayınlanan *Türkiye Gübre ve Gübreleme Rehberi*'nde (Güçdemir, 2006) Akdeniz Bölgesi'nde ayçiçeğinin azotlu gübre gereksiniminin, diğer ürünlere nispeten bir miktar fazla olması da bu durumu desteklemektedir.

4.3.6. SA verilerinin literatür karşılaştırması

Literatürde her bir mahsulün SA değerinin, çalışmalar arasında varyasyonunun yüksek olduğu görülmektedir. Bu durumun iki temel sebebi vardır. Birincisi hesaplama yöntemlerindeki farklılıklardır. Hidrolojik model tabanlı su ayak izi çalışmalarında, SA değerleri genellikle ampirik yöntemlere göre daha düşük olarak hesaplanmaktadır. Şekil 4.26'da SWAT modeli ve ampirik yöntemlerle gerçekleştirilmiş SA çalışmalarının bazıları karşılaştırılmıştır. Luan, vd. (2018) Çin'deki Heteo sulama bölgesinde SWAT modeli ile yaptıkları çalışmalarında buğdayın, mısırın ve ayçiçeğinin toplam su ayak izini (gri SA hariç) sırasıyla 1036, 774 ve 1510 m^3/t olarak hesaplamışlardır. Ampirik yöntemlerle gerçekleştirilen diğer çalışmalarda ise bu değerler sırasıyla 1619, 1028 ve 3165 m^3/t olarak hesaplanmıştır (Luan, vd., 2018). Xie vd. (2020), SWAT modelini kullanarak Çin'de yaptıkları çalışmada, mısır, pamuk ve ayçiçeğinin mavi ve yeşil toplam su ayak izlerini sırasıyla 385, 1779, 600 m^3/t olarak hesaplamışlardır. Bu sonuçlar, mevcut çalışma ile paralel olmasına karşın, aynı bölgede ampirik yöntemler kullanılarak yapılan Yin vd. (2019)'nin çalışmalarında mısırın, pamuğun ve ayçiçeğinin mavi ve yeşil toplam su ayak izleri Xie vd. (2020)'nin çalışmalarından daha yüksek bir şekilde sırasıyla, 619, 1846 ve 1437 m^3/t olarak belirlemişlerdir (Xie vd., 2020). Mevcut çalışmada da ürünlerin SA değerleri, ampirik çalışmalardan daha düşük çıkmıştır. Muratoglu ve Avanoz (2021), 2008-2019 yıllarını kapsayacak şekilde Türkiye geneli yaptıkları çalışmalarında buğday, arpa ve patatesin mavi ve yeşil toplam su ayak izlerini sırasıyla 1948, 1782 ve 197 m^3/t olarak hesaplamışlardır. Mevcut çalışmada ise bu değerler sırası ile 953, 628 ve 97 m^3/t olarak belirlenmiştir. Bu iki çalışma arasındaki farklılığın diğer önemli sebebinin mekânsal farklılıklar olduğunun altı çizilmelidir. Türkiye geneli çalışmada, özellikle arpa ve buğdayın su ayak izi Doğu Anadolu Bölgesi'nde çok yüksek seviyelere ulaştığı için ülke ortalaması artmaktadır. Bir başka ampirik çalışmada Erdem

(2021), Ceyhan Havzası'nda silajlık mısırın su ayak izini 174 m^3/t olarak hesaplarken, mevcut çalışmada bu değer 132 m^3/t olarak belirlenmiştir. Bu durumun temel sebebi, su tüketimi hesaplamalarında her iki yöntemde de ideal koşullarda gerçekleşen buharlaşmanın (ET_c) kullanılmasına karşın, mahsul verimi veri setlerinde farklılıklar olmasıdır. Ampirik yöntemlerde ideal koşullardaki ürün veriminin kullanılamaması nedeniyle SA, mevcut koşullardaki verim istatistikleri ile belirlenmektedir. Buna karşın, mevcut çalışmada hidrolojik model kullanılması sayesinde ideal koşullardaki mahsul verimleri hesaplanarak SA değerlendirmelerinde kullanılmıştır. Şekil 4.2'de de görüldüğü üzere mahsul verimi veri setlerindeki bu farklılık, ampirik çalışmalarda daha düşük mahsul verimi veri setinin kullanılmasına ve dolayısıyla daha yüksek SA hesaplanmasına neden olmaktadır.



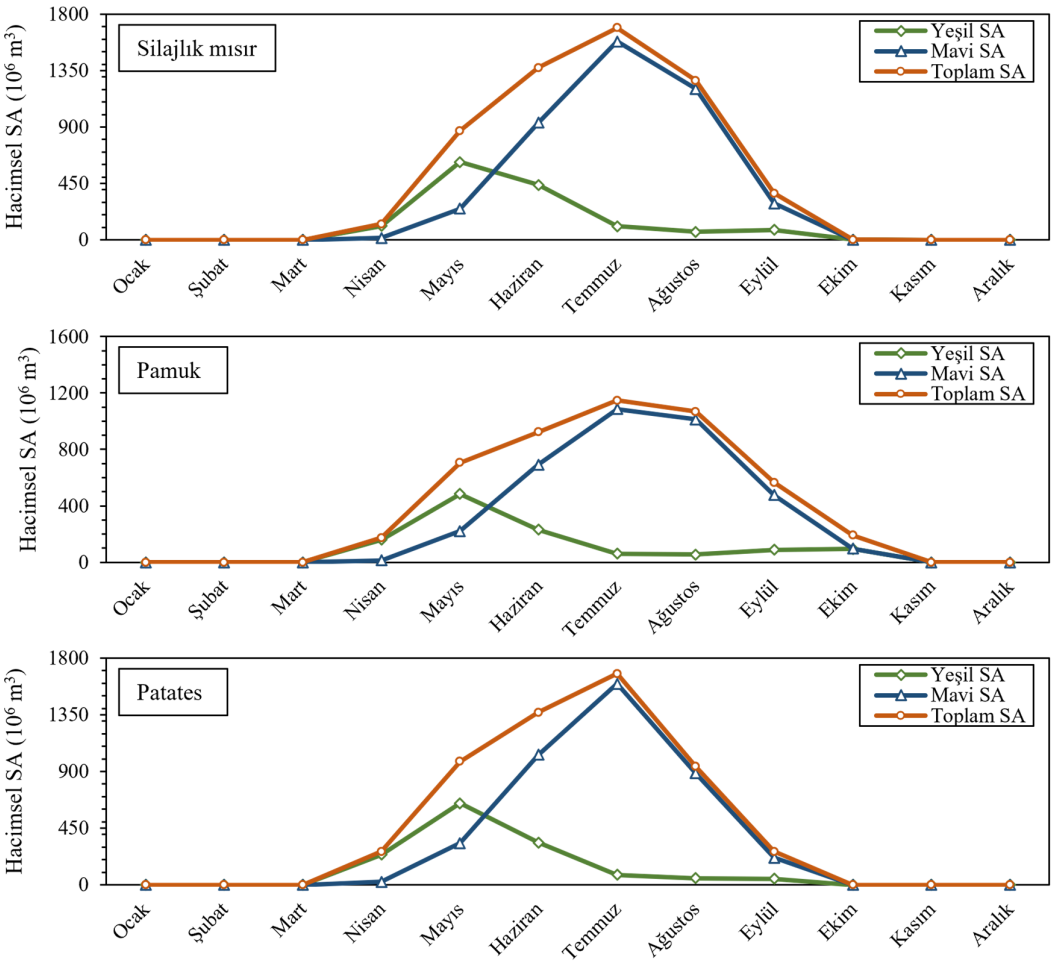
Şekil 4.26. SWAT modeli ve ampirik yöntemlerin karşılaştırılması*

***Veri kaynakları:** Mevcut çalışma [1], Muratoglu ve Avanoz (2021) [2], Luan, vd. (2018) [3], Mekonnen ve Hoekstra (2011b) [4], Xie vd. (2020) [5], Yin vd. (2019) [6], Erdem (2021) [7]

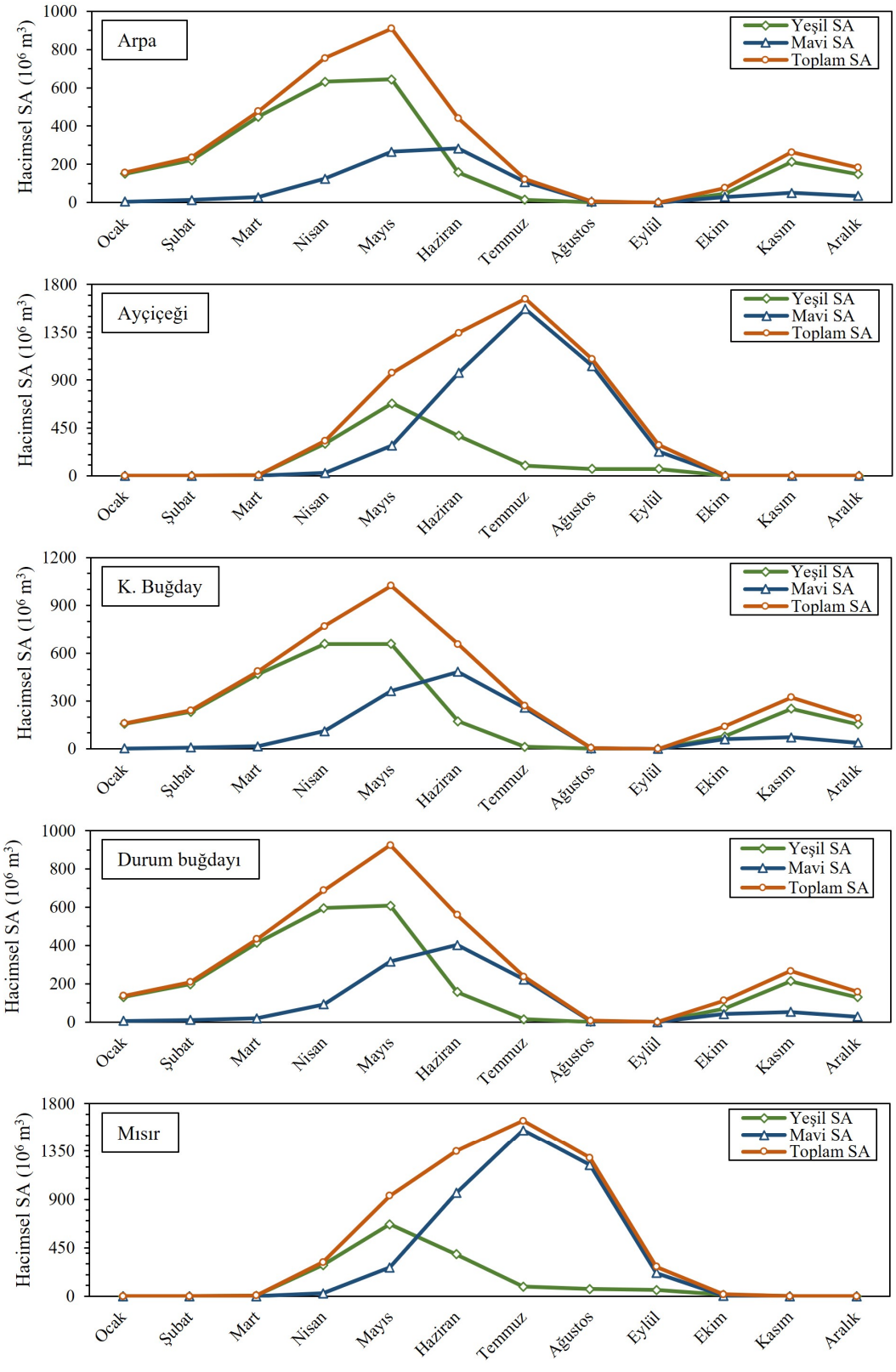
SA sonuçlarındaki farklılığının ikinci temel nedeni çalışmaların mekânsal ve zamansal farklılıklardır. Örneğin, mısırın mavi ve yeşil toplam su ayak izi Duan et al (2016) Çin'de 730, Bulsink vd. (2010) Endonezya'da 2470 ve Ababaei ve Etedali (2017) İran'da 1958 m^3/t, Arrien, Aldaya ve Rodriguez (2021) Arjantin'in Buenos Aires kentinde 320 m^3/t olarak hesaplamışlardır. Mevcut çalışmada ise bu değer Ceyhan Havzası için 454 m^3/t olarak bulunmuştur. Burada sonuçlar arasındaki farklılık üzerinde mekânsal farklılıkların yanı sıra zamansal farklılıkların ve mevcut çalışmada hesaplama yöntemindeki farklılığın olduğu da unutulmamalıdır.

4.4. Su Ayak İzindeki Zamansal Değişimler

Tarımsal üretimde, mahsullerin su ayak izleri, yıllık ve aylık ölçekte büyük farklılıklar göstermektedir. Buna karşın, literatürde SA çalışmalarının büyük bir çoğunluğunda mahsullerin su ayak izleri yıllık veya uzun yıllık ortalamalar bağlamında incelenmiştir. Bununla birlikte mevcut çalışma kapsamında, hidrolojik model kullanılması sayesinde yüksek zamansal çözünürlüklü sonuçlar elde edilebilmiştir. Ceyhan Havzası genelinde incelenen ürünlerin aylık ölçekte mavi ve yeşil su ayak izleri Şekil 4.27 ve 28'de gösterilmiştir.



Şekil 4.27. Silajlık mısır, pamuk ve patatesin aylık su ayak izi değişimleri



Şekil 4.28. Arpa, ayçiçeği, kışlık buğday, durum buğdayı ve mısırın aylık su ayak izi değişimleri

Bu çalışma kapsamında incelenen ürünlerin mavi ve yeşil su ayak izlerinin ekim-hasat tarihlerine ve ürünlerin su tüketim ihtiyaçlarına bağlı olarak genellikle Mayıs ve Temmuz aylarında maksimuma ulaştığı belirlenmiştir. Arpa, kışlık buğday ve durum buğdayının mavi ve yeşil su ayak izlerinin bitki ekim tarihinden itibaren, Kasım ayında lokal maksimuma ulaştığı, sonrasında bir miktar düşüş ile Aralık ve Ocak aylarında yatay seyrettiği görülmüştür. Bu durumun, Ekim ve Kasım aylarında, Aralık ve Ocak aylarına nispeten ortalama sıcaklığın, güneşlenme zamanı ve miktarının daha yüksek olması sonucu bitki su tüketiminin daha fazla gerçekleşmesi nedeniyle oluştuğu düşünülmektedir. Bununla birlikte, bu ürünlerin Aralık ayı itibari ile, TAGEM'in bitki su tüketimleri raporunda da belirtildiği üzere (TAGEM, 2017), bitki gelişiminin gerçekleştiği ve yaprak sayısının arttığı 2. ve 3. bitki büyümesi dönemine girmeleri ve Mayıs ayına kadar bu fenolojik sürecin devam etmesi nedeniyle, mahsul su ayak izlerinin Ocak-Mayıs ayları arasında lineere yakın bir şekilde artış göstererek Mayıs ayında maksimuma ulaştığı görülmektedir. Haziran, Temmuz ve Ağustos aylarında, sıcaklığın ve güneşlenmenin artması ile ET_0 artmaktadır. Fakat Mayıs ayı sonrasında arpa, kışlık buğday ve durum buğdayının 4. büyüme dönemine girmeleri nedeniyle mahsul katsayılarında (K_c) düşüş gerçekleşmektedir (Ek 7). Dolayısıyla, bu ürünlerin Mayıs ve Ağustos ayları arasında mavi ve yeşil toplam su ayak izlerinin neredeyse sabit bir eğim ile azalarak Ağustos ayında sıfırlandığı belirlenmiştir.

Ayçiçeği, mısır, silajlık mısır, pamuk ve patatesin Mart-Nisan aylarında ekim sürecinin başlaması ve Haziran-Ağustos ayları arasında bitki gelişiminin sona ermesi sonucunda, bu ürünlerin mavi ve yeşil toplam su ayak izleri buğday ve arpaya göre bir miktar ileriye ötelenmiş ve Temmuz ayında maksimuma ulaştığı gözlemlenmiştir. Temmuz ayından itibaren bitki gelişiminin tamamlanması ile K_c'nin düşmesinin yanında, sıcaklık ve güneşlenmenin de azalması sonucu ET_0'ın da azalması, mavi ve yeşil toplam su ayak izinin önemli ölçüde düşmesine neden olmuştur. Fakat pamukta diğer ürünlerden farklı olarak 2. ve 3. bitki büyüme dönemlerinin nispeten daha uzun olması sebebiyle, ağustos ayında da mavi ve yeşil toplam su ayak izi oldukça yüksek oluşmuş ve bu değer kasım ayında sıfırlanmıştır. Bu sonuçlar, ülkemizde Ankara ilinde mısır ürünü için aylık ölçekli gerçekleştirilen Muratoğlu vd. (2023)'nin çalışması ile paralel göstermektedir.

Yeşil SA, bitki su ihtiyacının yanı sıra toprak özelliklerinin, yağış miktarının ve sıklığının bir fonksiyonu olarak oluşmaktadır. Dolayısıyla yeşil SA, mavi su ayak izinden farklı olarak direkt bitki büyüme süreçleriyle doğru orantılı olarak değişim göstermemektedir. Sonbahar ve kış aylarında ekilen arpa, kışlık buğday ve durum

buğdayında, Nisan ve Mayıs aylarında yüksek yağış miktarı ve kar erimeleri nedeniyle artan toprak nemi sonucu maksimuma ulaşmıştır. Burada dikkat edilmesi gereken en önemli hususlardan biri, bu ürünlerin yeşil su ayak izi Ekim-Mart ayları arasında neredeyse toplam su ayak izine eşit olması, diğer aylarda ise toplam su ayak izinin altında kalmasıdır. Bu durum, arpa, kışlık buğday ve durum buğdayı için Ceyhan Havzası'nda efektif yağışın, Ekim-Mart ayları arasında neredeyse tek başına bitki büyümesi için yeterli olduğunu ve sulama ihtiyacının çoğunlukla oluşmadığını göstermektedir. Buna paralel olarak, arpa, kışlık buğday ve durum buğdayının mavi su ayak izi, beklenildiği gibi Ekim-Mart döneminde sıfıra yaklaşmış, Nisan-Haziran aylarında efektif yağışın azalması ve bitki su ihtiyacının artması nedeniyle mavi su ayak izinde artış gözlemlenmiştir. Dolayısıyla bu ürünler için, sulama suyu ihtiyacı bakımından en kritik periyodun Mayıs-Temmuz arası olduğu söylenebilir. Farklı ürünlerin aylık mavi su ayak izlerinin incelendiği Zhuo vd. (2016)'nin çalışmasında da mevcut çalışmaya paralel bir şekilde mavi su ayak izinin genellikle Mayıs-Temmuz ayları arasında maksimuma ulaştığı gösterilmiştir.

Mevcut çalışmada ayçiçeği, mısır, silajlık mısır ve patatesin genellikle bahar aylarında ekilmeleri nedeniyle, maksimum yeşil SA yaza doğru ötelenerek Mayıs ayında gerçekleşmiştir. Öte yandan, Mart-Nisan ayları arasında efektif yağışın tek başına bitki su ihtiyacını karşıladığı, Nisan ayından itibaren bitki su tüketimin artması ve efektif yağışın yetersiz kalması sebebiyle mavi su ayak izinin arttığı izlenmiştir. Temmuz ayında mavi SA maksimuma ulaşmış ve bu aydan itibaren hasat zamanına kadar mavi SA, toplam su ayak izinin çok büyük bir çoğunluğunu oluşturmuştur. Dolayısıyla bu ürünlerin Haziran ayından itibaren büyük oranda sulama suyuna bağımlı olarak gelişim gösterdiği söylenebilir.

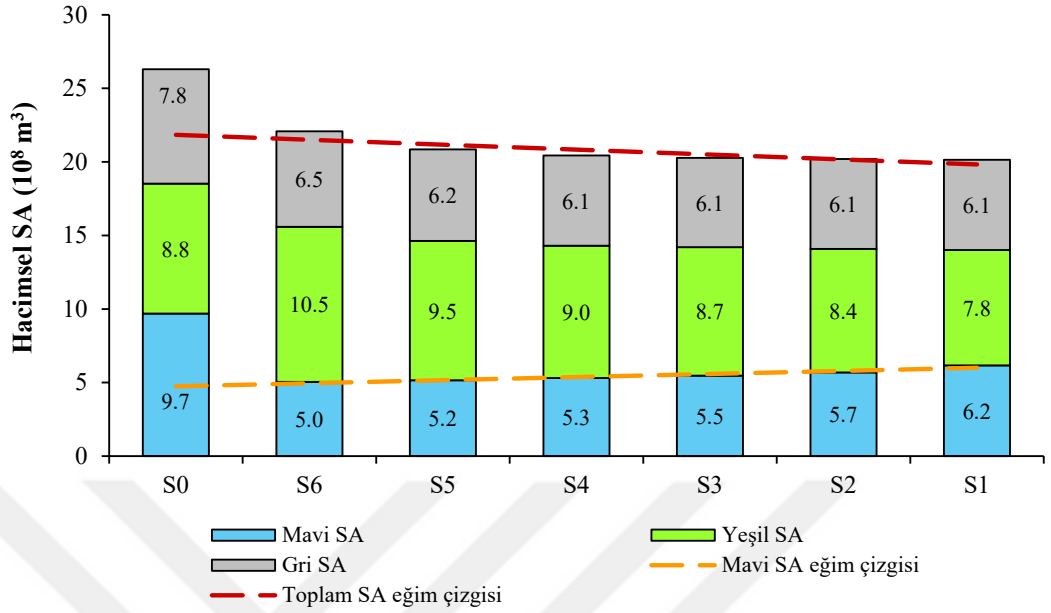
Aylık SA grafikleri, tatlı su kaynaklarının kısıtlı olduğu bölgelerde, su stresinin yönetilebilmesi için önemli bilgiler sunmaktadır. Mavi su ayak izinin aynı dönemlerde yoğunlaştığı mısır, silajlık mısır, ayçiçeği, pamuk ve patates gibi ürünlerin su kaynaklarının yetersiz olduğu bölgelerde aynı anda yetiştirilmesi, özellikle Haziran, Temmuz ve Ağustos aylarında tatlı su kaynakları üzerinde ciddi baskı oluşturacaktır. Bu durumda, bitki su ihtiyaçları yeterince sağlanamayacak ve ürünlerde verim düşüşleri oluşacaktır. Bu nedenle, mavi su ayak izleri pik değere farklı dönemlerde ulaşan, örneğin arpa ve ayçiçeğinin aynı bölgede ekilmesi, tatlı su kaynaklarının daha verimli bir şekilde kullanılmasını ve etkili bir tarımsal üretimi sağlayabileceği düşünülmektedir.

4.5. Ürün Deseni Optimizasyonu

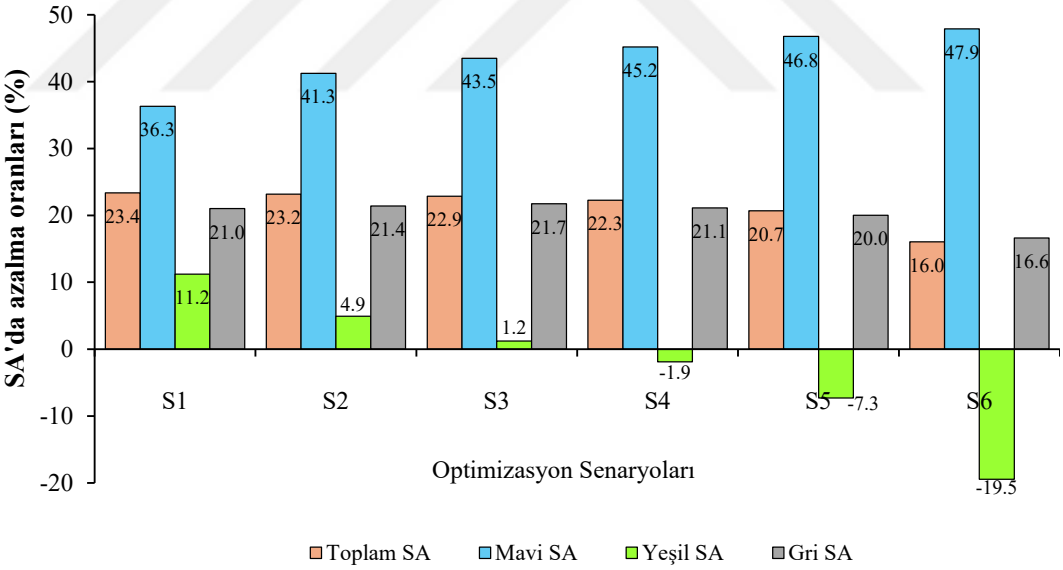
Dünya genelindeki toplam su tüketiminin %92'lik kısmının tarım kaynaklı gerçekleştiği göz önüne alındığında (Hoekstra vd., 2012; Nouri vd., 2019), bu sektörde su kullanımında gerçekleştirilecek ufak iyileşmelerin bile su stresi üzerinde çok büyük etkileri olacağı öngörülmektedir. Tarım sektöründe su tüketiminin azaltılmasına yönelik kullanılabilecek en önemli yöntemlerden biri ürün deseni optimizasyonudur. Literatürde bu alanda yapılan çalışmaların büyük çoğunluğunda net ekonomik getirinin artırılması hedeflenmiş olup, kısıtlı miktarda çalışmada su odaklı ürün deseni optimizasyonu çalışması bulunmaktadır (Bölüm 2.4).

Mevcut çalışmada su odaklı ürün deseni optimizasyonu gerçekleştirilmiş olup Denklem 3.71, 3.72 ve 3.73'te verilen kısıtların tamamı sağlanmıştır. Fakat, optimizasyon algoritmasının su ayak izini minimize etmeye odaklı kurgulanmasından dolayı Denklem 3.71'de verilen kısıt doğrultusunda, bitkisel üretim miktarlarının da minimize edilmeye zorlandığı görülmüştür. Dolayısıyla bitkisel üretim miktarlarında genel itibari ile %1-2 arasında düşüşler yaşanmıştır. Bu durumun önüne geçmek adına Denklem 3.71 ve 3.72'deki maksimum ve minimum üretim kriterlerinin aralığı daraltılabilir. Fakat, bazı HRU'ların nispeten geniş alana sahip olmaları nedeniyle, maksimum ve minimum üretim kısıtları daraltıldığı zaman algoritmanın çözüm alanı oldukça küçülecek ve optimum çözümlerden uzak sonuçlar elde edilecektir. Bu sebeple mevcut çalışmada en çok %2'lik üretim kayıpları göz ardı edilmiştir.

Havza genelinde incelenen ürünlerin farklı optimizasyon senaryoları altında yeşil, mavi, gri ve toplam hacimsel su ayak izleri Şekil 4.29'da gösterilmiştir. Ayrıca, optimizasyon senaryolarının etkinliğinin net bir şekilde anlaşılabilmesi amacıyla Şekil 4.30'da mevcut duruma göre su ayak izlerinde gerçekleşen düşüş oranları gösterilmiştir.



Şekil 4.29. Havza genelinde mevcut durumdaki ve optimizasyon senaryoları altındaki yeşil, mavi, gri ve toplam hacimsel su ayak izlerin karşılaştırılması



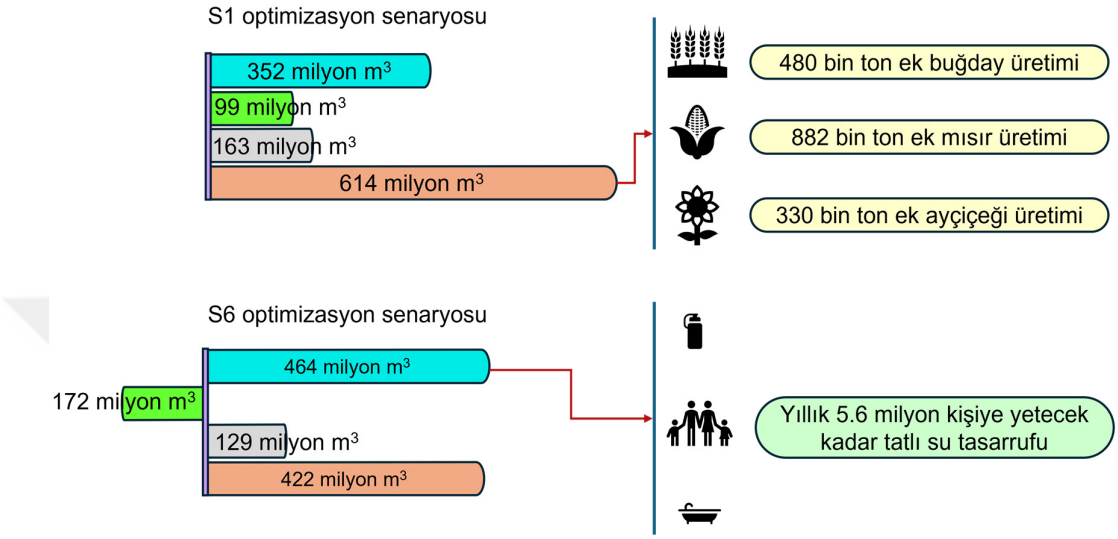
Şekil 4.30. Optimizasyon senaryolarının su ayak izindeki iyileşme oranlarının karşılaştırılması

Şekil 4.30'da S1 senaryosunda, sadece ürün deseni ayarlaması yapılarak, mevcut duruma göre toplam su ayak izinde yaklaşık olarak %23.4'lik bir düşüşün, sağlanabileceği görülmektedir. Bununla birlikte S6 senaryosunda mavi su ayak izinde %47.9'luk bir düşüş öngörülmüştür. S2, S3, S4 ve S5 senaryolarında toplam su ayak izinde sırasıyla %23.2, 22.9, 22.3 ve 20.7 oranlarında düşüş sağlanırken, mavi su ayak

izinde ise sırasıyla %41.3, 43.5, 45.2 ve 46.8'lik bir düşüş ortaya konmuştur. Tarım sektöründeki su kullanım yoğunluğu dikkate alındığında bu oranlarda su tüketim iyileştirmelerinin, küresel iklim değişikliği ile artan su baskısını hafifletmede çok büyük katkı sağlayabileceği düşünülmektedir. Nitekim, S1 senaryosuna göre Ceyhan Havzası'nda toplam su ayak izinde yıllık 614 milyon m^3'lük iyileşme sağlanabilecektir. S2 ve S3 senaryolarında S1'e çok yakın olarak toplam su ayak izinde sırasıyla 610 ve 601 milyon m^3'lük azalma gerçekleşmiştir. S4, S5 ve S6 senaryolarında ise toplam su ayak izinde sırasıyla 585, 544 ve 422 milyon m^3'lük bir azalma sağlanmıştır. Burada optimizasyon senaryoları arasında amaç fonksiyonu ağırlıklarına bağlı olarak toplam su ayak izinde 193 milyon m^3'e varan farklılıklar görülmektedir. Dolayısıyla, SA optimizasyonlarında havza karakteristiğine uygun amaç fonksiyonlarının belirlenmesi son derece önemlidir. Öte yandan, toplam su ayak izindeki azalmanın, yeşil ve gri su bileşenlerini de içermesi nedeniyle doğrudan su tasarrufunu göstermediği unutulmamalıdır. Bunun yerine, toplam su ayak izi, doğal su kaynakları üzerindeki antropojenik etkiyi temsil etmektedir. Fakat, tarımsal üretimdeki toplam su ayak izi azaltılarak, doğal kaynaklar üzerindeki insan müdahalesinin sınırları daha verimli bir şekilde kullanılabilir ve yeni üretim fırsatlarının oluşturulması sağlanabilir. Örneğin, S1 senaryosunda toplam su ayak izindeki azalma sayesinde, su kaynakları üzerindeki insani etki değişmeksizin, bölgede yıllık 480 bin ton ek buğday üretimi gerçekleştirilebilir (Şekil 4.31). Bu durum Türkiye'de kişi başı yıllık tüketimler göz önüne alındığında (179.3 kg (TEPGE, 2023)) su kaynaklarındaki insani müdahale değişmeksizin yıllık 2.7 milyon kişinin tüketimini sağlayacak kadar ve yıllık 1.8 milyon kişinin günlük enerji ihtiyacını karşılayacak kadar ek buğday üretiminin yapılabileceğini göstermektedir. Benzer şekilde, ürün deseni ayarlaması sayesinde yıllık 882 bin ton ek mısır üretimi veya 330 bin ton ek ayçiçeği üretimi için gerekli olan su tahsisi sağlanabilecektir.

Mavi SA, yüzey ve yeraltı suyu kullanımını temsil etmesi nedeniyle su ayak izi konseptindeki en önemli bileşendir. Mavi su ayak izinde gerçekleştirilecek iyileşme, doğrudan su tasarrufu olarak değerlendirilebilir. Mevcut çalışmada, S1, S2, S3, S4 ve S5 senaryolarında ürün deseni optimizasyonu ile Ceyhan Havzası'nda sırasıyla 352, 400, 421, 438 ve 453 milyon m^3 yıllık tatlı su tasarrufu sağlanabileceği gösterilmiştir. Öte yandan, S6 senaryosunda diğerlerinden farklı olarak, toplam su ayak izindeki azalmanın neredeyse tamamının mavi su ayak izinden sağlandığı görülmekte olup, S6 senaryosunda mavi su ayak izinde yıllık 464 milyon m^3'lük tatlı su tasarrufunun sağlanabileceği ortaya konmuştur. Ülkemizde kişi başı günlük su tüketim istatistikleri (TUİK, 2022) göz önüne

alındığında, sadece Ceyhan Havzası'nda S6 senaryosundaki ürün deseni optimizasyonu sonucu sağlanan tatlı su tasarrufu ile potansiyel olarak yıllık 5.6 milyon kişiye yetecek kadar ek su tahsisinin yapılabileceği görülmektedir (Şekil 4.31).



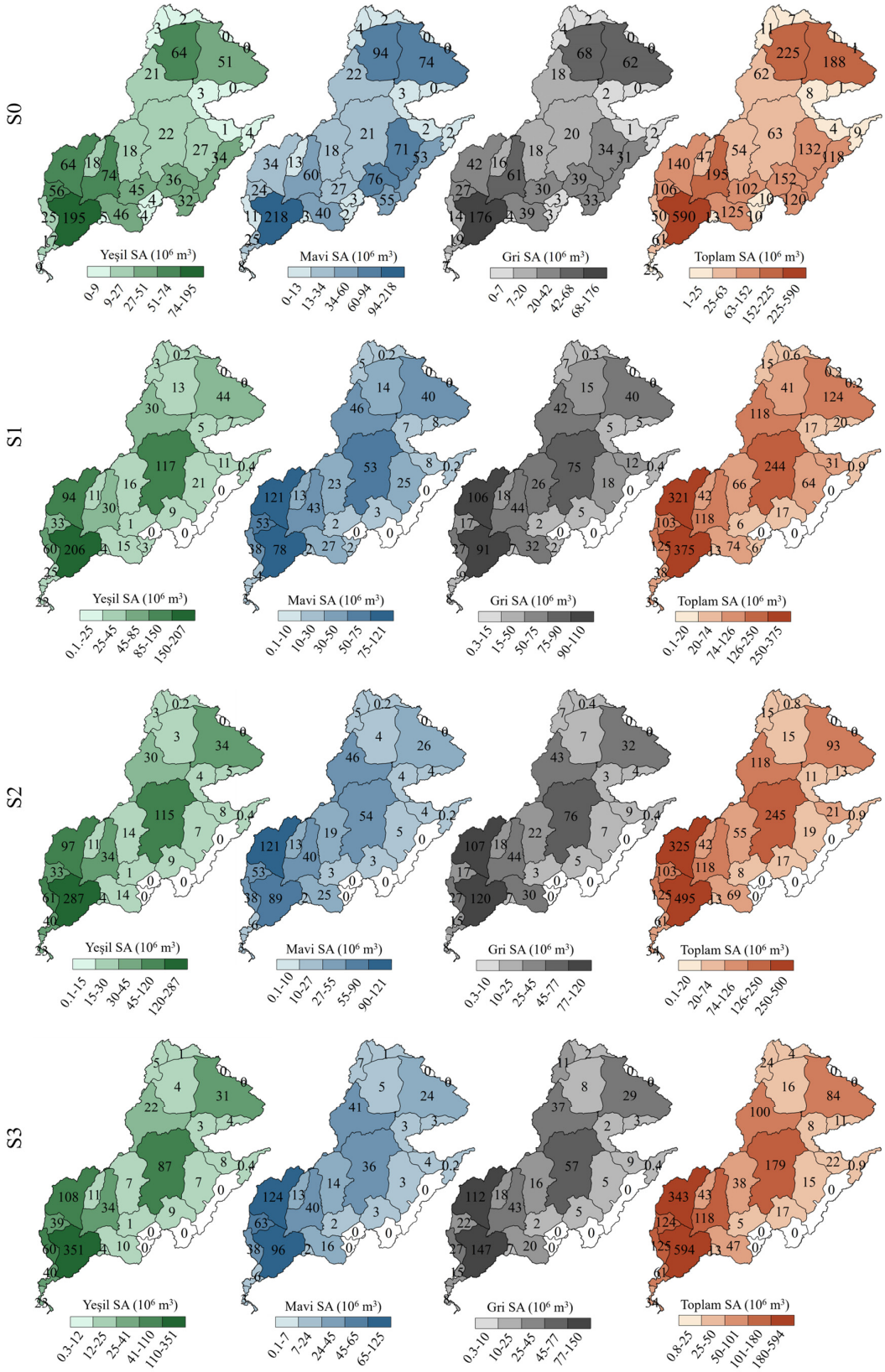
Şekil 4.31. Ürün deseni optimizasyonunun potansiyel faydaları

S1 senaryosunda amaç fonksiyonunun toplam SA olması ve S6 senaryosuna doğru toplam su ayak izinin optimizasyonda öneminin azalması nedeniyle, toplam su ayak izinde en büyük düşüş S1 senaryosunda görülmüş ve S6 senaryosuna doğru toplam su ayak izindeki azalma düşmüştür. Öte yandan, S6 senaryosuna doğru amaç fonksiyonu içerisinde mavi su ayak izinin önem katsayısı artması nedeniyle, S1 senaryosundan S6 senaryosuna doğru mavi su ayak izindeki azalma beklenilen bir şekilde artış göstermiştir. Yeşil su ayak izindeki azalma oranı da toplam su ayak izine benzer şekilde S1'den S6'ya doğru düşmüştür. Hatta, S4, S5 ve S6 senaryolarında yeşil su ayak izinde mevcut duruma göre artış gözlemlenmiştir. Gri su ayak izindeki azalma ise S1'den S3'e doğru artmış, daha sonra S6'ya doğru tekrar düşmüştür. Gri su ayak izinde en düşük azalma S6 senaryosunda %16.6 oranında gerçekleşmiştir.

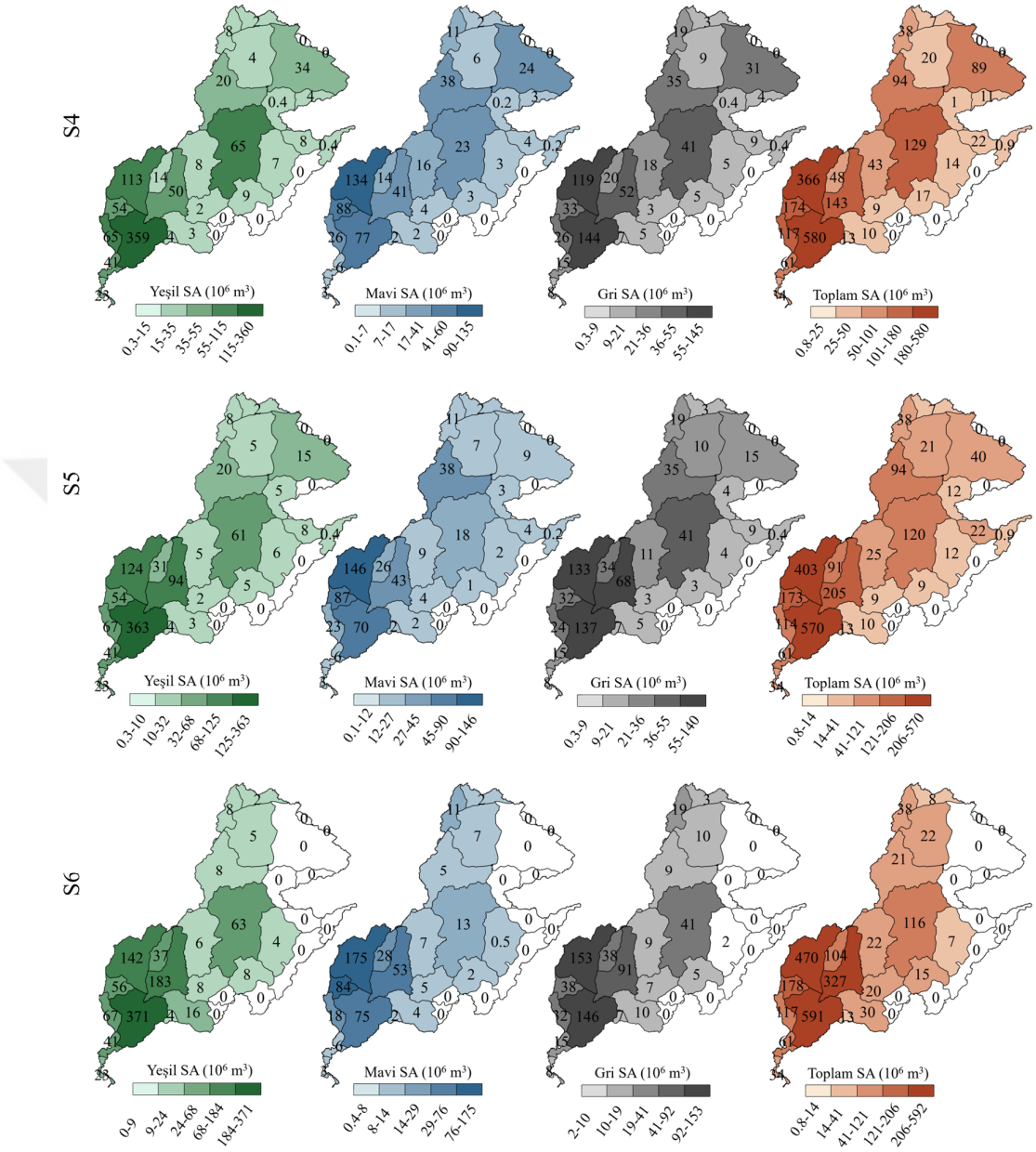
S1 senaryosunda mavi su ayak izinin diğer senaryolara nispeten daha az düşmesi ve yeşil su ayak izinin ise tam tersi olarak daha fazla azalması, yeşil su kullanım verimliliğinin nispeten daha düşük olmasına neden olacaktır. Dolayısıyla S1 senaryosu, yeşil su mevcudiyetinin kısıtlı olduğu kurak bölgelerde uygun çözüm sağlayabilir. Öte yandan gri su ayak izinin daha fazla düşmesi nedeniyle, su kirliliğinin yüksek olduğu ve kirliliği bertaraf edebilecek tatlı su mevcudiyetinin bulunmadığı bölgeler için S3 tercih

nedeni olabilir. Buna karşın S6 senaryosu, mavi su ayak izindeki yüksek düşüş ve yeşil su kullanımındaki artış nedeniyle, tatlı su kaynaklarının kısıtlı olduğu bölgelerde hem yüzey ve yeraltı su kullanımını azaltması hem de yeşil su kullanım verimliliğini artırması nedeniyle etkili bir çözüm sağlayacağı düşünülmektedir. Öte yandan, S5 senaryosunda toplam ve gri su ayak izinde S1'e yakın bir azalmanın görülmesi ve mavi su ayak izinde neredeyse S6 senaryosundaki kadar azalmanın sağlanması nedeniyle, S5 senaryosunun en optimum çözüm sağlayacağı düşünülmektedir (Şekil 4.30).

Mevcut durum ve optimizasyon senaryoları sonucunda ilçe ölçeğinde yeşil, mavi, gri ve toplam hacimsel su ayak izleri Şekil 4.32 ve 33'te gösterilmiştir. S1 senaryosunda toplam su ayak izinin Kozan ve Onikişubat ilçelerine doğru kaydığı Afşin, Dulkadiroğlu ve Türkoğlu'nda büyük oranda azaldığı görülmektedir. S3, S4, S5 ve özellikle S6'da toplam su ayak izinde havzanın güneyine doğru yoğunlaşmanın arttığı belirlenmiştir. Yeşil su ayak izinin tüm senaryolarda genellikle güney kesimlerde arttığı ve S6 senaryosuna doğru güney kesimlerde yeşil su ayak izinin daha da yoğunlaştığı tespit edilmiştir. Öte yandan, yeşil su ayak izinin Onikişubat'ta 4-5 katına kadar çıktığı, buna karşın özellikle Nurdağı ve Afşin'de tüm optimizasyon senaryolarında dramatik düşüşler gözlemlenmiştir. Mavi su ayak izinin ise tüm senaryolarda Ceyhan ve Kozan bölgesinde en yüksek olduğu ve mevcut duruma göre Afşin ve Elbistan'da önemli oranda azaldığı görülmüştür. Bununla birlikte İmamoğlu ve Göksun'da bütün senaryolarda mavi SA mevcut duruma göre artış göstermiş olup, özellikle Kozan'da S6 senaryosunda 5 kata kadar artmıştır. Bu durum sulama suyu tüketimi bakımından Afşin ve Elbistan'ın tahıl grubu üretimine elverişli olmamasına karşın üretim miktarının fazla olduğunu, Kozan'ın ise minimum sulama suyu kullanımı hedeflerine uygun bir bölge olduğu, fakat mevcut durumda Kozan'daki bu potansiyelden yeterince yararlanılamadığı söylenebilir. Gri SA ise genellikle toplam SA ile doğru orantılı olarak değişim göstermiştir.



Şekil 4.32. S0, S1, S2 ve S3 senaryolarında tüm ürünlerin ilçe ölçeğinde ortalama hacimsel su ayak izleri (10^6 m^3)

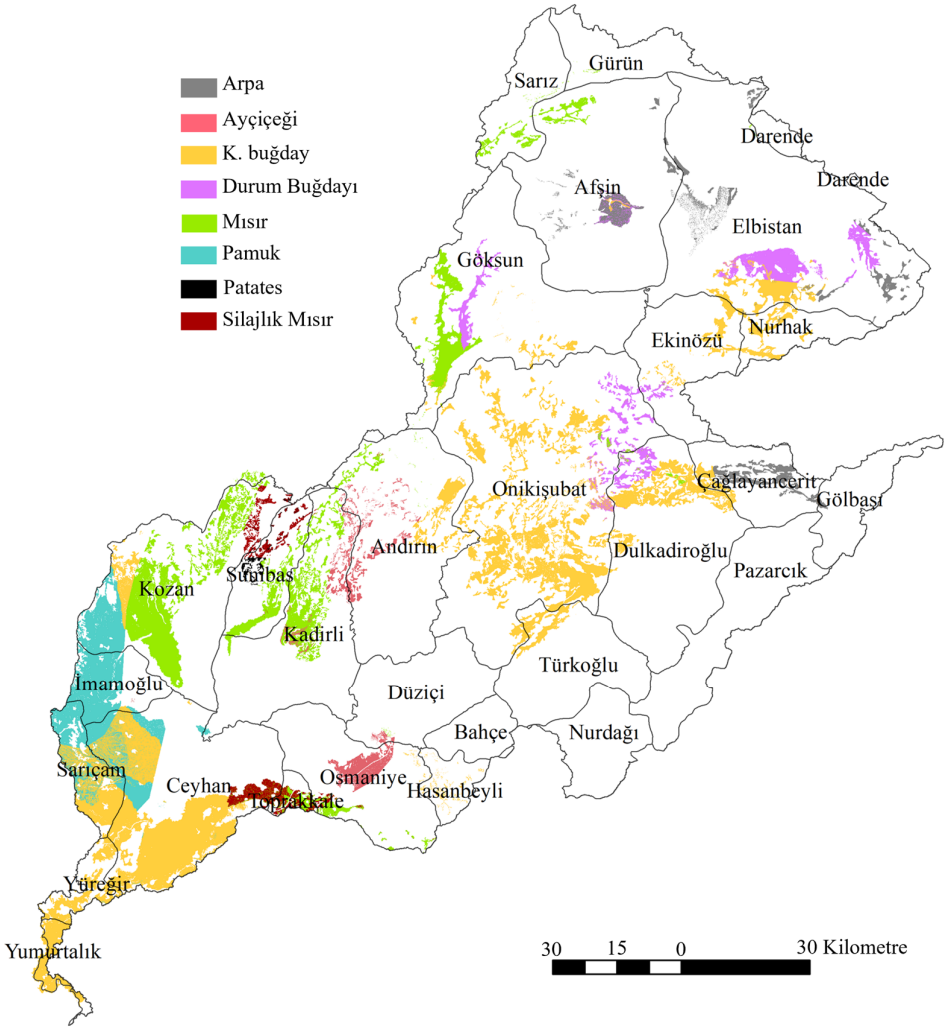


Şekil 4.33. S4, S5 ve S6 senaryolarında tüm ürünlerin ilçe ölçeğinde ortalama hacimsel su ayak izleri (10^6 m^3)

Ek 9-14'te, farklı optimizasyon senaryoları altında havza içindeki ilçelerde potansiyel toplam ekili alanlar (incelenen sekiz ürün için) gösterilmiştir. Burada, Elbistan ve Onikişubat'taki toplam ekili alanın, toplam su ayak izinin öncelikli olduğu S1'den mavi su ayak izinin öncelikli olduğu S6'ya doğru dramatik bir şekilde azaldığı görülmektedir. Bu durumda Elbistan ve Onikişubat'ta, tahıl ekiminin toplam su ayak izini azaltmak için uygun olduğu, ancak mavi su ayak izini azaltmak için diğer ilçelerin tercih edilmesinin daha uygun bir çözüm olacağı söylenebilir. Buna karşılık, Ceyhan ve Kadirli'de ekili

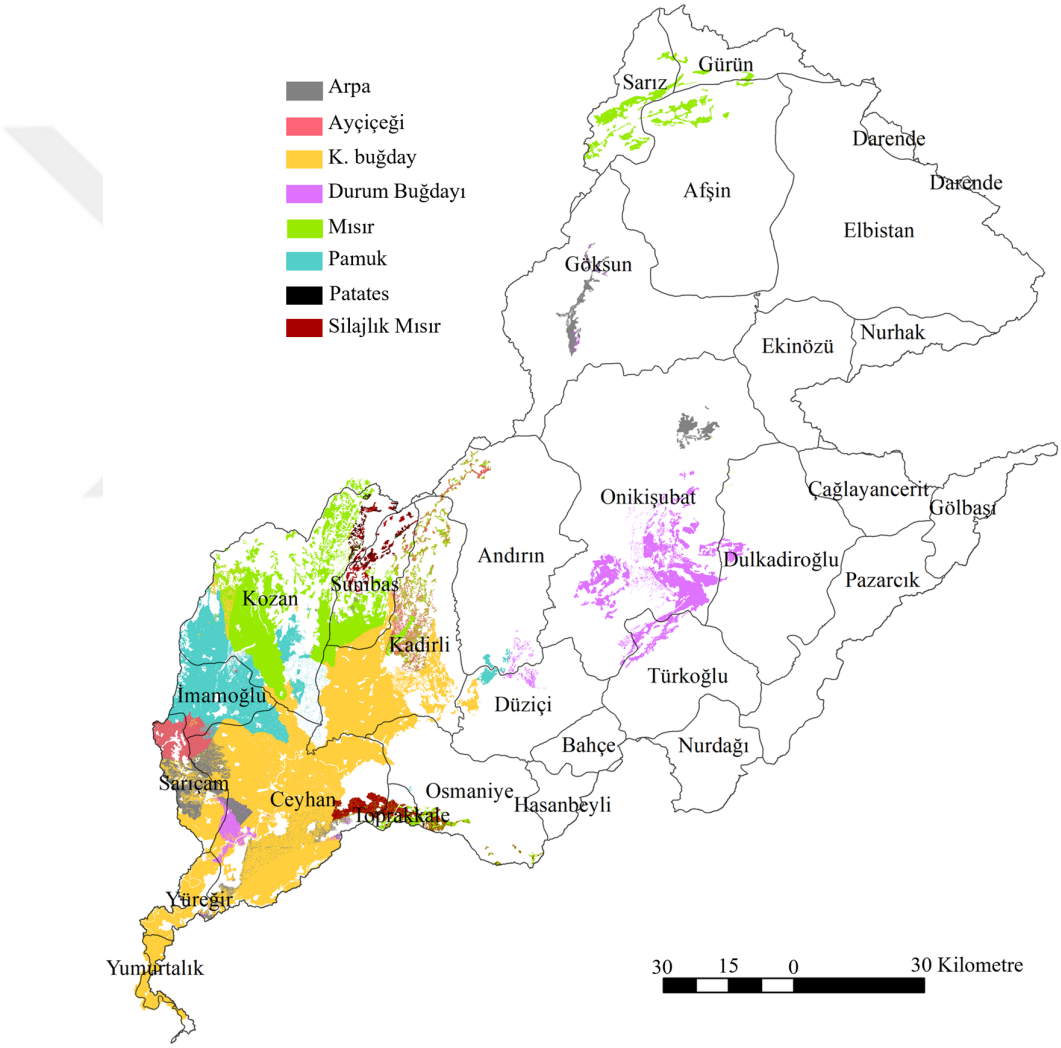
alanlar genellikle S1'den S6'ya doğru artmaktadır. Dolayısıyla bu ilçelerin mavi su ayak izinin azaltılması için uygun bölgeler olduğu söylenebilir.

Şekil 4.34-36'da sırasıyla S1, S6 ve S5 senaryolarına göre mevcut çalışma kapsamında incelenen ürünlerin Ceyhan Havzası'ndaki dağılımı gösterilmiştir. S2, S3 ve S4 senaryolarındaki ürün dağılımı haritaları Ek 15-17'de gösterilmiştir. S1 senaryosuna göre arpanın Afşin, Çağlayancerit ve Elbistan'da; ayçiçeğinin Andırın ve Osmaniye'de, durum buğdayının Onikişubat ve Elbistan'da, mısırın Göksun, Kozan, Sumbas ve Kadirli'de, pamuğun Kozan, Ceyhan, Sarıçam ve İmamoğlu'nda, silajlık mısırın ise Ceyhan, Toprakkale, Sumbas ve Kozan'da daha yoğun olarak yetiştirilmesinin toplam su ayak izini minimize etmek için uygun çözüm sağlayacağı görülmektedir.



Şekil 4.34. S1 senaryosuna göre Ceyhan Havzası'nda mahsul dağılımı

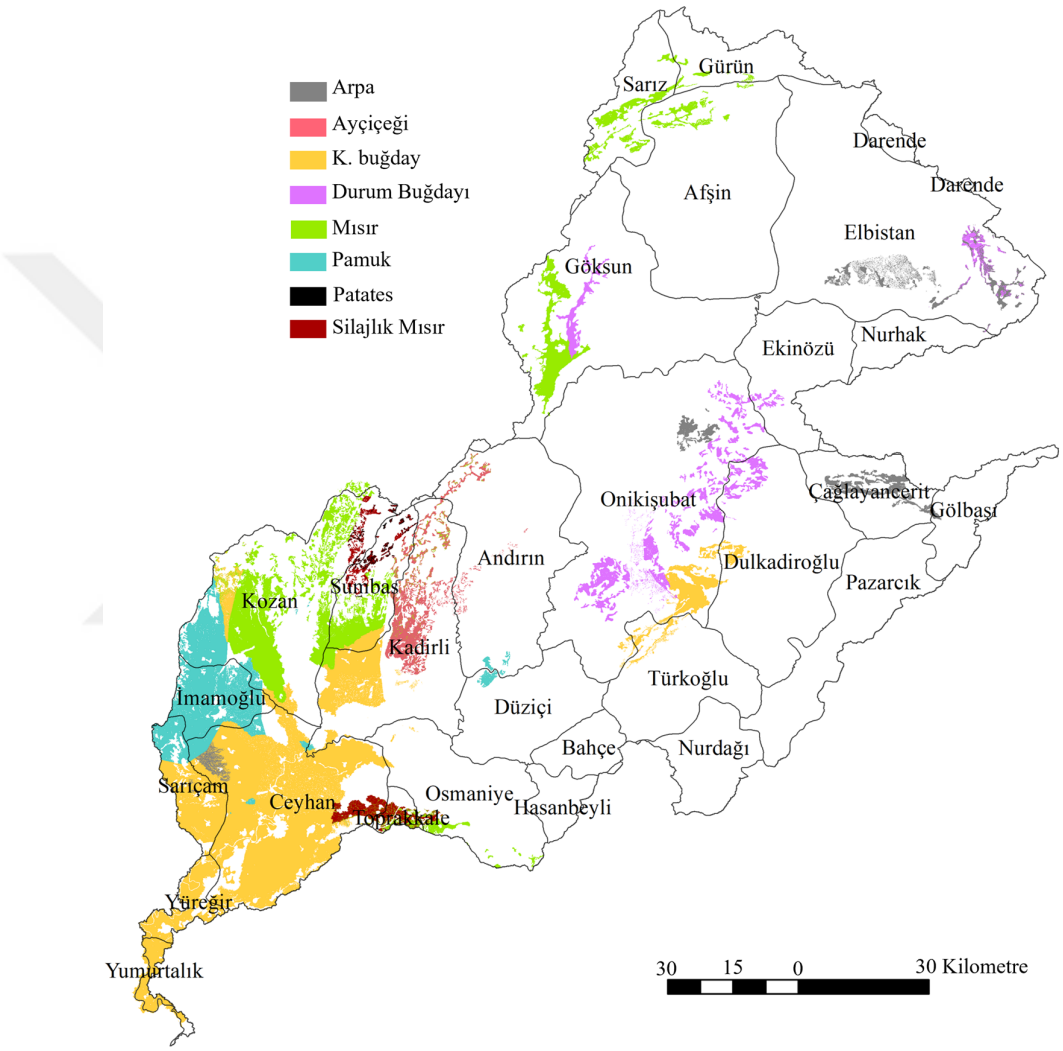
Mahsullerin mavi su ayak izlerinin genellikle havzanın güney kesiminde daha düşük olması nedeniyle, sadece mavi su ayak izinin minimize edildiği S6 senaryosunda beklenilen bir şekilde ekili alanların büyük ölçüde havzanın güneyinde yoğunlaştığı görülmektedir (Şekil 4.35). Pratikte tahıl üretiminin havza içerisinde bir bölgede yoğunlaştırılması pek mümkün değildir. Bununla birlikte, S6 senaryosu ürün deseni düzenlemesi ile havzadaki tahıl üretiminin mavi su ayak izindeki potansiyel azaltmayı göstermesi açısından önemlidir.



Şekil 4.35. S6 senaryosuna göre Ceyhan Havzası'nda mahsul dağılımı

Öte yandan, S5 senaryosu hem mavi hem de toplam su ayak izinde yüksek miktarda düşüş sağlaması nedeniyle en ideal çözüm sağladığı düşünülmektedir. Ayrıca, S5 senaryosunda tarımsal ürün dağılımının S6'ya göre nispeten daha homojen olarak dağılması da uygulanabilirlik açısından S5 senaryosunu ön plana çıkarmaktadır (Şekil

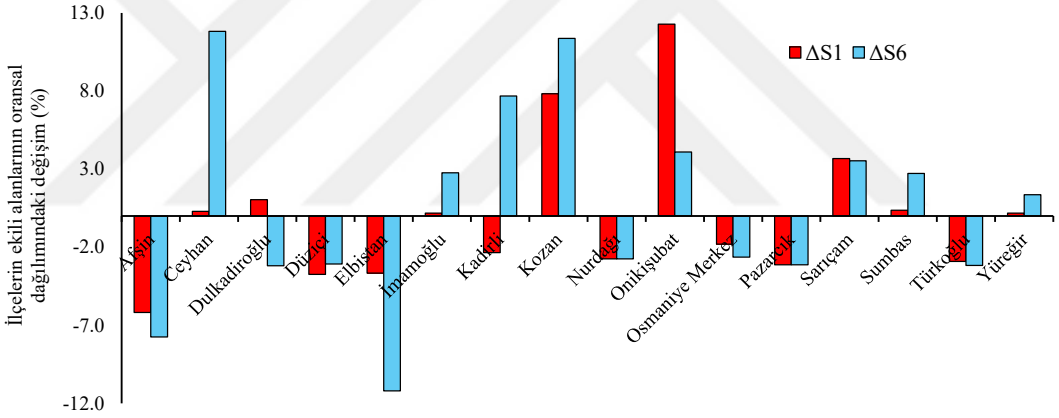
4.36). Bu senaryoya göre kışlık buğdayın havzanın güney kesimlerinde; arpanın genellikle kuzey kesimlerde, durum buğdayının havzanın orta kesimlerinde, mısırın havzanın batı sınırında, pamuk, ayçiçeği ve silajlık mısırın ise havzanın güneyinde yetiştirilmesinin mavi ve toplam su ayak izini büyük ölçüde azaltacağı öngörülmektedir.



Şekil 4.36. S5 senaryosuna göre Ceyhan Havzası'nda mahsul dağılımı

Öte yandan, optimizasyon senaryoları altında tahıl grubuna tahsis edilen ilçe ölçeğindeki ekim alanlarının mevcut duruma göre değişimi, ilçenin tahıl yetiştiriciliğine uygunluğu hakkında önemli bilgiler vermektedir. Denklem 3.76 ve 3.77 kullanılarak S1 ve S6 senaryosundaki ilçe ölçeğindeki tarım tahsisinin S0'a göre değişimi hesaplanmış ve Şekil 4.37'de görselleştirilmiştir. Sarıçam, Kozan ve Onikişubat'ta S1 senaryosuna göre tahıl grubuna tahsis edilen tarım alanlarının yüksek oranlarda artması nedeniyle bu bölgelerin toplam su ayak izini azaltmak için uygun olduğu fakat yeterince

değerlendirilemediği söylenebilir. Buna karşın, Afşin, Düziçi, Elbistan, Nurdağı, Pazarcık ve Türkoğlu'nun toplam SA perspektifinden tahıl üretimine yeterince elverişli olmadığı, bu bölgelerdeki ekili alanların başka ilçelere kaydırılması gerektiği söylenebilir. Öte yandan, Ceyhan ve Kozan'a S6 senaryosunda tahsis edilen tarım arazisinin büyük oranda artması nedeniyle su tasarrufu açısından yüksek potansiyele sahip olduğu fakat bu potansiyelden etkili bir şekilde yararlanılmadığı, Afşin ve Elbistan'ın ise tam tersine su tüketimi açısından verimsiz bölgeler olduğu ancak buralarda gereğinden fazla tahıl üretimi yapılarak su israfına neden olunduğu söylenebilir. Ayrıca, Ceyhan'da ΔS6'nın ΔS1'den oldukça yüksek olması, bu bölgede mavi SA tasarrufunun, yeşil ve gri su ayak izine göre çok daha baskın olduğunu göstermektedir. Buna karşın, Onikişubat'ta ΔS1'in ΔS6'dan yüksek olması nedeniyle, bu bölgede yeşil ve gri SA tasarrufunun daha baskın olduğu söylenebilir.

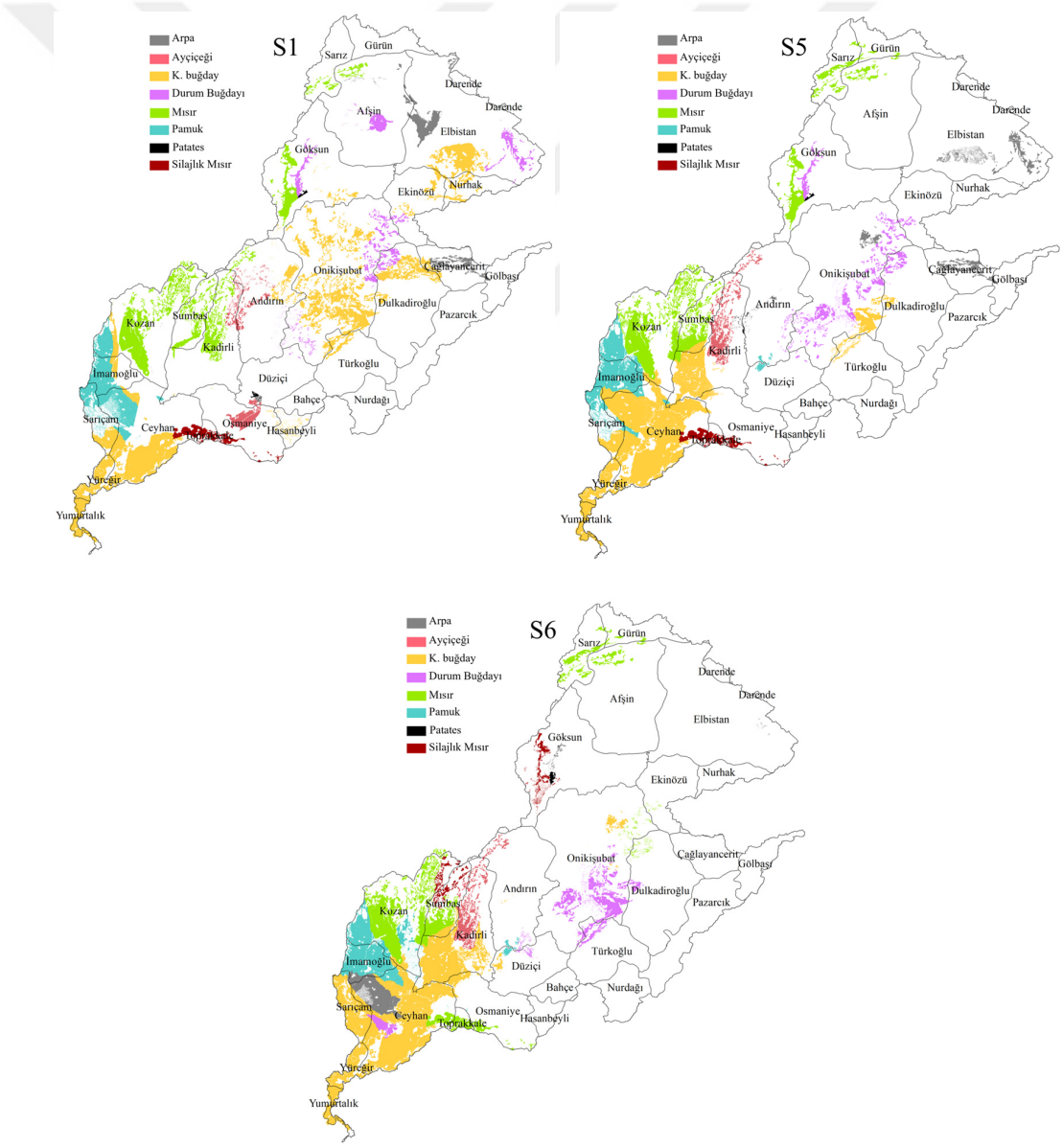


Şekil 4.37. S1 ve S6 senaryolarına göre ilçe düzeyinde ekili alanların dağılımındaki değişim

4.5.1. Kümelenmiş ürün deseni optimizasyonu

SWAT modelinde oluşturulan ve modelde en küçük parseli temsil eden HRU'lar iç içe bir vaziyette dağılım göstermektedirler. Bu sebeple optimum ürün deseni haritalarında, mahsul dağılımı bazı bölgelerde iç içe olmuştur. Örneğin Şekil 4.35'te Sarıçam ilçesinde kışlık buğday ve arpa iç içe ve nispeten karmaşık bir dağılım oluşturduğu görülmektedir. Bu durum kısa aralıklarla ürün çeşidinin değişmesine ve dolayısıyla karar vericiler için bazı bölgelerde uygulanması zor dağılımların oluşmasına neden olmaktadır. Bu karmaşıklığın giderilmesi için optimizasyon algoritmasına Denklem 3.74 ve 3.75'teki kısıtlar eklenerek aynı alt havza içerisinde sadece bir ürün çeşidinin yetiştirilmesi sağlanmıştır. Bu sayede ürün deseni önerilerinin karar vericiler

için daha net olacağı ve uygulanabilirliğinin arttırılacağı düşünülmektedir. Şekil 4.38'de S1, S5 ve S6 senaryoları için kümelenmiş ürün deseni haritaları gösterilmiştir. Burada kümelenmiş dağılım haritalarının genel itibari ile optimum haritalara bağlı kaldığı, bazı bölgelerde haritanın daha sadeleştiği görülmektedir. Örneğin, optimum S1 senaryosunda Sarıçam'da kışlık buğday ve pamuk iç içe dağılmışken (Şekil 4.34), kümelenmiş dağılımda bu ürünlerin net bir sınır ile ayrıldığı görülmektedir. Öte yandan, optimum S6 senaryosunda Kadirli bölgesinde kışlık buğday mısır ve ayçiçeği karmaşık bir dağılım oluştururken (Şekil 4.35), kümelenmiş dağılımda bu bölge kışlık buğday ve ayçiçeğine tahsis edilmiş, mısır ise başka bölgelere kaydırılmıştır.



Şekil 4.38. S1, S5 ve S6 senaryolarına göre kümelenmiş optimum mahsul dağılımı

Kümeleme işlemi ürün dağılımının daha net bir şekilde haritalanmasını sağlamasına rağmen, optimizasyon algoritmasına ek kısıtlar eklenmesi nedeniyle performansta düşüşler yaşanmıştır. Tablo 4.7'de optimum ve kümelenmiş dağılımdaki su ayak izinde azalma oranları karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, optimum dağılımların su tüketimindeki potansiyel azalma miktarlarını açıkça ortaya koyduğu, kümelenmiş dağılımların ise uygulanabilirlik açısından daha avantajlı olduğunu söylenebilir.

Tablo 4.7. Optimum ve kümelenmiş optimum dağılıma göre su ayak izindeki iyileşmenin (%) karşılaştırılması*

Optimizasyon senaryosu	Yeşil SA	Mavi SA	Gri SA	Toplam SA
S1	11.2 (13.2)	36.3 (34.3)	21.0 (20.0)	23.4 (23.0)
S5	-7.3 (-7.7)	46.8 (46.2)	20.0 (19.0)	20.7 (20.1)
S6	-19.5 (-19.6)	47.9 (47.2)	16.6 (15.9)	16.0 (15.5)

*Parantez içindeki değerler kümelenmiş dağılımdaki azalma oranlarını göstermektedir.

4.6. Çalışmanın Kısıtları

Mevcut çalışmada, çalışma alanının geniş olması, gerekli veri sayısının fazla olması, hidrolojik süreçlerdeki karmaşıklar, SA teorisindeki eksiklikler gibi sebeplerle bazı kısıtlar bulunmaktadır.

SWAT modeli oluşturulurken toprak özellikleri ile ilgili gerçek saha koşullarında gerçekleştirilen yüksek çözünürlüklü veriler olamaması sebebi ile FAO'nun küresel haritası kullanılmıştır. Bu haritanın nispeten düşük çözünürlükte olması çalışma açısından kısıt oluşturmaktadır. Fakat, FAO toprak özellikleri haritasının birçok önceki çalışmada kullanılıp tatmin edici sonuçlar vermesi, bu çalışma için yeterli bulunmuştur. Bununla birlikte, havza içerisindeki güncel durumdaki ürün deseni net olarak bilinmemektedir. Bu sebeple, mevcut durumdaki SA hesaplamaları TUİK'ten temin edilen ilçe bazlı tarımsal üretim istatistikleri ve ilçe ölçekli ortalama su ayak izleri üzerinden gerçekleştirilmiştir. Öte yandan, sulama ve gübreleme gibi tarımsal yönetim uygulamaları da SA üzerinde etkilidir. Fakat, havza alanının geniş olması sebebiyle HRU ölçeğinde sulama ve gübreleme miktarı ve zamanlamasının tespit edilmesi mümkün değildir. Bu sebeple, model tarafından kullanıcıya sunulan otomatik gübreleme ve sulama işlemi ile çalışılmıştır.

SA hesaplamalarında gerçek buharlaşmanın (ET_a) belirlenememesi sebebiyle, hemen hemen bütün çalışmalarda bitkilerin su sıkıntısı çekmediği ve optimum koşullar altında yetiştirildiği varsayılarak ET_c üzerinden hesaplamalar gerçekleştirilmektedir. Mevcut çalışma kapsamında da SA hesaplamaları SWAT modeli vasıtasıyla ET_c

üzerinden gerçekleştirilmiştir. Bu durum gerçek SA değerlerinin %10 doğrulukta belirlenememesine neden olmakla beraber, su yönetimi stratejilerinin oluşturulması için yeterli doğrulukta sonuçlar elde edilebilmektedir. Bununla birlikte, gri SA metodolojisinin tam olarak gelişmemiş olması sebebiyle SA hesaplamalarının genelinde yaşanan ve Bölüm 3.5.5.2.'de ifade edilen gri SA kısıtları mevcut çalışmada da kısıt oluşturmuştur. Öte yandan, her bir HRU'da yıl boyunca sadece bir ürün yetiştirildiği varsayılmış, aynı tarlada yıl içerisinde 2. ürün yetiştirildiği durumlar göz ardı edilmiştir. Bununla birlikte, çalışmada nadasa bırakma uygulamaları da göz ardı edilmiş olup, havzadaki tüm tarımsal alanların ekilebilir olduğu varsayılmıştır. Ceyhan Havzası'nda özellikle arpa gibi bazı ürünler genellikle kuru tarım ile yetiştirilmektedir. Fakat bu çalışmada ideal ekim şartları için ürün deseni ayarlaması yapılmış olup, bütün ürünlerin sulu tarım uygulamaları ile yetiştirildiği varsayılmıştır.

5. SONUÇ

Literatürde, su ayak izi çalışmalarının genellikle ampirik yöntemlerle gerçekleştirildiği, ancak son yıllarda hidrolojik model tabanlı SA çalışmalarında artan bir eğilim olduğu gözlemlenmektedir. Mevcut çalışmada, hidrolojik modelleme çalışmalarında sıklıkla kullanılan ve doğruluğu literatürde kabul görmüş SWAT modeli ile SA analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu sayede, çalışma alanının SA haritaları yüksek mekânsal ve zamansal çözünürlükle oluşturulmuştur. Dolayısıyla, literatürdeki çoğu çalışmanın aksine, su ayak izindeki alansal değişimler daha net bir şekilde yakalanabilmiş ve aylık ölçekli SA değerlendirmeleri yapılabilmiştir. Ayrıca, çalışma alanı olarak daha önce SWAT modeli oluşturulmamış olan Ceyhan Havzası seçilerek, havzanın kalibrasyon ve validasyon parametreleri ortaya konmuştur.

Öte yandan, literatürde ürün deseni ayarlamalarının genellikle maksimum ürün verimliliğine odaklanarak mahsul odaklı gerçekleştirildiği ve çok az bir kısmının SA perspektifinden yürütüldüğü tespit edilmiştir. Bunun yanında, su odaklı çalışmalarda düşük mekânsal çözünürlükle çalışıldığı ve dolayısıyla net bir ürün deseni önerisinin getirilmediği görülmüştür. Mevcut çalışmada gerçekleştirilen hidrolojik model tabanlı SA analizleri sayesinde su odaklı ürün deseni optimizasyonu, yüksek alansal çözünürlükle gerçekleştirilerek, optimum mahsul dağılımları net bir şekilde ortaya konabilmiştir. Son olarak, benzer çalışmalardan farklı olarak su yönetimi perspektifinden ayrı bir öneme sahip olan mavi SA, optimizasyon algoritmasında farklı oranlarda ağırlıklandırılmış ve çeşitli senaryolar altında mahsul desenleri oluşturularak havza karakteristiğine en uygun dağılım araştırılmıştır.

Bu çalışma kapsamında Ceyhan Havzası'nın kuzey kesimlerine doğru genellikle mahsullerin mavi su ayak izinin arttığı, buna karşın yeşil su ayak izinin havzanın güney kesimlerinde daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Ayrıca bu çalışmada detaylı SA haritaları sayesinde mevcut tarım deseni, su yönetimi perspektifinden değerlendirilmiştir. Buna göre, mısırın Elbistan, Andırın ve Nurdağı'nda yoğun olarak yetiştirildiği fakat bu bölgelerde mavi ve toplam su ayak izinin oldukça yüksek olduğu belirlenmiştir. Benzer bir şekilde Afşin'de ayçiçeğinin toplam su ayak izi havza ortalamasının 2 katında fazla olmasına rağmen, buranın havzada en yoğun ayçiçeği tarımının yapıldığı yerlerden olduğu gözlemlenmiştir. Havzada yetiştirilen diğer ürünlerde de benzer durumların olduğu görülmüş olup, bu durum Ceyhan Havzası'nda su odaklı tarımın yapılmadığını ve uygun olmayan tarım deseni nedeniyle büyük miktarda su kaybının gerçekleştiğini

göstermektedir. Bu bağlamda, su stresi ile karşı karşıya kalan ülkemizde, su kıtlığı ile mücadelede tarım deseni ayarlamalarının kritik öneme sahip olduğu ve su odaklı tarım konusunda geniş kapsamlı planlamaların sürdürülebilir kaynak yönetimi açısından elzem olduğu düşünülmektedir.

Aylık SA analizlerinde arpa, kışlık buğday ve durum buğdayının toplam su ayak izleri Mayıs ayında maksimuma ulaşırken, ayçiçeği, mısır, silajlık mısır ve patatesin Temmuz ayında en yüksek seviyeye çıktığı gözlemlenmiştir. Burada, su ayak izlerindeki zamansal değişikliklerin belirlenmesiyle, mahsullerin sulama suyuna ihtiyaç duydukları dönemler tespit edilmiştir. Dahası, mahsullerin mavi su ihtiyacının en yüksek seviyeye ulaştığı dönemler belirlenerek, toplam sulama suyu ihtiyacının pik değerinin azaltılması ve su talebinin zaman içindeki değişiminin daha dengeli hale getirilebilmesi için çeşitli mahsul ekimi kombinasyonu önerileri getirilmiştir. Buna göre, patates, silajlık mısır, ayçiçeği ve mısırın mümkün olduğunca aynı bölgede ekilmemesinin sulama sistemlerindeki yoğunluğu azaltacağı düşünülmektedir. Ayrıca, tarımsal alanlardaki aylık sulama ihtiyacının belirlenmesi sayesinde havzadaki sulama suyu arzı planlamalarının daha verimli bir şekilde gerçekleştirilebileceği ön görülmektedir.

Bu tez kapsamında ürün deseni ayarlamasının su kaynakları üzerinde oldukça ciddi oranlarda etkili olduğu tespit edilmiş olup, S1 senaryosunda toplam su ayak izinde %23.4 (614 milyon m^3) oranında ve S6 senaryosunda mavi su ayak izinde %47.9 (464 milyon m^3) oranında azalma sağlanabileceği gösterilmiştir. Ürün deseni optimizasyonunun, kişisel su tasarrufu tedbirlerine göre su stresi ile mücadelede çok daha etkin bir yöntem olduğu açıkça görülmüştür. Öyle ki, havzada yaşayan yaklaşık 1.8 milyon kişinin tamamı kişisel su tasarrufu tedbirlerine uymaları durumunda yıllık yaklaşık 54 milyon m^3'lük tatlı su tasarrufunun sağlanabilmesine karşın, üretim miktarı değişmeksizin sadece ürün deseni optimizasyonu ile 8-9 kat daha fazla tatlı su tasarrufu potansiyeli ortaya konmuştur. Buna göre mevcut çalışmada, ürün deseni optimizasyonu sonucunda Ceyhan Havzası'ndaki nüfusun yaklaşık 3 katının (5.6 milyon) günlük ihtiyacını karşılayacak kadar tatlı su tasarrufunun yapılabileceği belirlenmiştir. Ayrıca bu çalışma ile ürün deseni ayarlamasının, literatürde SA azaltma yöntemlerinde kullanılan malçlama, damla sulama ve kısıtlı sulama gibi yöntemlerden çok daha etkili olabileceği gösterilmiştir.

Sonuç olarak bu çalışmada Ceyhan Havzası'nda tarımsal üretimin mavi, yeşil ve gri SA bileşenlerinin alansal ve zamansal değişimleri ayrıntılı olarak belirlenmiş, ürün deseni optimizasyonu ile potansiyel su tasarrufu çözümleri ortaya konmuştur. Ancak,

dikkat edilmesi gereken önemli bir husus, çiftçi alışkanlıkları ve ekonomik beklentiler gibi nedenlerin optimum ürün deseninin uygulanabilirliğini güçleştirmesidir. Bu bağlamda, gelecekteki araştırmalarda, ekonomik analizlerin ve su mevcudiyeti değerlendirmelerinin yapılarak, ürün deseni ayarlamalarının pratikte uygulanabilirliğini artırmaya yönelik çalışmaların yapılabileceği düşünülmektedir. Geniş kapsamlı stratejik planlamalar ile ve çiftçileri uygun tarım desenlerine yönlendirmek amacıyla gerekli teşvik mekanizmalarının oluşturulmasıyla, diğer yöntemlere kıyasla daha az maliyetli ve etkin su yönetimi stratejilerinin geliştirilebileceğine inanmaktayız.

6. KAYNAKLAR

Ababaei, B. ve Etedali, R. H.,2017, Water Footprint Assessment of Main Cereals in Iran, *Agricultural Water Management*, *179*, 401–411. doi:10.1016/j.agwat.2016.07.016

Abbas, T., Hussain, F., Nabi, G., Boota, M. W. ve Wu, R. S.,2019, Uncertainty Evaluation of SWAT Model for Snowmelt Runoff in a Himalayan Watershed, *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, *30*(2), 265–279. doi:10.3319/TAO.2018.10.08.01

Abbaspour, K. C., Vejdani, M. ve Haghighat, S.,2007, SWAT-CUP Calibration and Uncertainty Programs for SWAT, *Environmental Science, Engineering*, *43*(5), 1077–1087. doi:10.13031/2013.3000

Abd Rashid, A. F. ve Yusoff, S.,2015, A Review of Life Cycle Assessment Method for Building Industry, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *45*, 244–248. doi:10.1016/j.rser.2015.01.043

Abdulkareem, J. H., Pradhan, B., Sulaiman, W. N. A. ve Jamil, N. R.,2018, Review of Studies on Hydrological Modelling in Malaysia, *Modeling Earth Systems and Environment*, *4*(4), 1577–1605. doi:10.1007/s40808-018-0509-y

Adgolign, T. B., Rao, G. V. R. S. ve Abbulu, Y.,2016, WEAP Modeling of Surface Water Resources Allocation in Didessa Sub-Basin, West Ethiopia, *Sustainable Water Resources Management*, *2*(1), 55–70. doi:10.1007/s40899-015-0041-4

Agarwal, S., Patil, J. P., Goyal, V. V. ve Singh, A.,2019, Assessment of Water Supply–Demand Using Water Evaluation and Planning (WEAP) Model for Ur River Watershed, Madhya Pradesh, India, *Journal of The Institution of Engineers (India): Series A*, *100*, 21–32. doi:https://doi.org/10.1007/s40030-018-0329-0

Akinbile, C. O., Ogundipe, A. ve Davids, R. O.,2020, Crop Water Requirements, Biomass and Grain Yields e Estimation for Upland Rice Using CROPWAT, AQUACROP and CERES Simulation Models, *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, *22*(2), 1–20.

Akiner, M. E. ve Akkoyunlu, A.,2012, Modeling and Forecasting River Flow Rate From the Melen Watershed, Turkey, *Journal of Hydrology*. doi:10.1016/j.jhydrol.2012.06.031

Akoko, G., Le, T. H., Gomi, T. ve Kato, T.,2021, A Review of SWAT Model Application in Africa, *Water (Switzerland)*, *13*(9). doi:10.3390/w13091313

Aktürk, E.,2019, Uzaktan Algılama ve Coğrafi Bilgi Sistemleri Yardimiyla Türkiye ve Fitocoğrafik Bölgelerinin Arazi Örtüsü Durumunun ve Zamana Bağlı Arazi Örtüsü Değişiminin İncelenmesi, Doktora tezi, *Kastamunu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kastamonu.

Akyürek, Z., Kentel, E., Yanmaz, M., Merzi, N., Aksu, H. ve Yakut, M.,2019, Kavramsal Hidrolojik Model ile Hidrolojik Döngü Parametrelerinin Elde Edilmesi,

TUBİTAK 1003 Projesi.

Aldaya, M. M. ve Hoekstra, A. Y.,2010, The Water Needed for Italians to Eat Pasta and Pizza, *Agricultural Systems*, *103*(6), 351–360. doi:10.1016/j.agsy.2010.03.004

Allan, J.,1993, Fortunately there are substitutes for water otherwise our hydropolitical futures would be impossible., *Overseaes development administration*, 13–26.

Allen, R., Pereira, L., Raes, D. ve Smith, M.,2006, FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56, *Agronomy* (C. 9). doi:10.3390/agronomy9100614

Altın, T. B., Sarış, F. ve Altın, B. N.,2020, Determination of Drought Intensity in Seyhan and Ceyhan River Basins, Turkey, by Hydrological Drought Analysis, *Theoretical and Applied Climatology*, *139*(1–2), 95–107. doi:10.1007/s00704-019-02957-y

Aouissi, J., Benabdallah, S., Lili Chabaâne, Z. ve Cudennec, C.,2016, Evaluation of Potential Evapotranspiration Assessment Methods for Hdrological Modelling With SWAT—Application in Data-scarce Rural Tunisia, *Agricultural Water Management*, *174*, 39–51. doi:10.1016/j.agwat.2016.03.004

Arnold, J. G., Moriasi, D. N., Gassman, P. W., Abbaspour, K. C., White, M. J., Srinivasan, R., … Jha, M. K.,2012, SWAT: Model Use, Calibration, and Validation, *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, *55*(4), 1491–1508.

Arnold, J. G., Srinivasan, R., Muttiah, R. S. ve Williams, J. R.,1998, Large Area Hydrologic Modeling and Assessment Part I: Model Development, *Journal of the American Water Resources Association*. doi:10.1111/j.1752-1688.1998.tb05961.x

Arnold, Jeffrey G. ve Williams, J. R.,1987, Validation of SWRRB - Simulator for Water Resources in Rural Basins., *Journal of Water Resources Planning and Management*, *113*(2), 107–114. doi:10.1061/(asce)0733-9496(1987)113:2(243)

Arrien, M. M., Aldaya, M. M. ve Rodriguez, C. I.,2021, Water Footprint and Virtual Water Trade of Maize in the Province of Buenos Aires, Argentina, *Water (Switzerland)*, *13*(13). doi:10.3390/w13131769

Arslan, C.,2019, Burdur Alt Havzası Entegre Su Kaynakları Yönetiminin Belirlenmesinde WEAP (Water Evaluation and Planning System) Modelinin Kullanılması, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara.

Arunrat, N., Pumijumnong, N., Sereenonchai, S., Chareonwong, U. ve Wang, C.,2020, Assessment of Climate Change Impact on Rice Yield and Water Footprint of Large-scale and Individual Farming in Thailand, *Science of the Total Environment*, *726*, 137864. doi:10.1016/j.scitotenv.2020.137864

Askar, M. A.,2020, İklim Değişikliğinin Seyhan Havzası Su Kaynakları Üzerindeki Etkilerinin SWAT Modeli İle Değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Adana.

Atlas, M.,2008, Çok Amaçlı Programlama Çözüm Tekniklerinin Sınıflandırılması, *Anadolu Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, *68*, 47–68.

Avanoz, Z.,2020, Türkiye'de Tarımsal Üretimin Su Ayak İzinin Hesaplanması, Yüksek Lisans Tezi, *Batman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Batman.

Awasthi, N. ve Kumar, M.,2021, Soil and Water Assessment Tool (SWAT) Modelling: A Review, *International Journal of Innovative Science and Research Technology*, *6*(8), 1084–1087. doi:10.1007/978-0-387-35973-1_1231

Awika, J. M.,2011, Major Cereal Grains Production and Use around the World, *American Chemical Society*, 1–13. doi:10.1021/bk-2011-1089.ch001

Bayazıt, M.,2013, Hidroloji. İstanbul: Birsen Yayınevi.

Bhardwaj, R. L.,2013, Effect of Mulching on Crop Production Under Rainfed Condition - A Review, *Agricultural Reviews*, *34*, 188–197. doi:DOI- 10.5958/j.0976-0741.34.3.003

Bocchiola, D.,2015, Impact of Potential Climate Change on Crop Yield and Water Footprint of Rice in the Po Valley of Italy, *Agricultural Systems*, *139*, 223–237. doi:10.1016/j.agsy.2015.07.009

Bocchiola, D., Nana, E. ve Soncini, A.,2013, Impact of Climate Change Scenarios on Crop Yield and Water Footprint of Maize in the Po valley of Italy, *Agricultural Water Management*, *116*, 50–61. doi:10.1016/j.agwat.2012.10.009

Borah, D. K. ve Bera, M.,2003, SWAT Model Background and Application Reviews, *American Society of Agricultural and Biological Engineers*. doi:10.13031/2013.14000

Bosznay, M.,1989, Generalization of SCS Curve Number Method, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, *115*(1), 139–144. doi:10.1061/(asce)0733-9437(1989)115:1(139)

Boulay, A., Hoekstra, A. Y. ve Vionnet, S.,2013, Complementarities of Water-Focused Life Cycle Assessment and Water Footprint Assessment, *Enviromental Science and Technology*, 11926–11927. doi:dx.doi.org/10.1021/es403928f

Brentrup, F., Kü, J., Kuhlmann, H. ve Lammel, J.,2001, Application of the Life Cycle Assessment Methodology to Agricultural Production: an Example of Sugar Beet Production With Different Forms of Nitrogen Fertilisers, *European Journal of Agronomy*, *14*, 221–233.

Brentrup, F., Küsters, J., Kuhlmann, H. ve Lammel, J.,2004, Environmental Impact Assessment of Agricultural Production Systems Using the Life Cycle Assessment m Aethodology: I. Theoretical Concept of a LCA Method Tailored to Crop Production, *European Journal of Agronomy*, *20*(3), 247–264. doi:10.1016/S1161-0301(03)00024-8

Budaklı Çarpıcı, E. ve Çelik, N.,2011, Farklı Bitki Sıklıkları ve Azot Dozlarının Silajlık Mısırın Stoma Özellikleri Üzerine Etkileri, *U. Ü. Ziraat Fakültesi Dergisi*, *86*, 79–

86.

Bulsink, F., Hoekstra, A. Y. ve Booij, M. J.,2010, The Water Footprint of Indonesian Provinces Related to the Consumption of Crop Products, *Hydrology and Earth System Sciences*, *14*(1), 119–128. doi:10.5194/hess-14-119-2010

Burgan, H. İ.,2019, Akım Ölçümü Olmayan Kuruyan Akarsular İçin Debi Süreklilik Çizgisi Modeli, Doktora Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü,* İstanbul.

Caro, D., Alessandrini, A., Sporchia, F. ve Borghesi, S.,2021, Global Virtual Water Trade of Avocado, *Journal of Cleaner Production*, *285*, 124917. doi:10.1016/j.jclepro.2020.124917

Çetin, M., İbrikçi, H. ve Karnez, E.,2017, Akdeniz Bölgesinde Yer Alan Sulama Alanında Mevcut Sulama Suyu ve Azot Yönetiminin Değerlendirilmesi ve Geliştirilmesi (AIMMED), *Tubitak 2508 Projesi*.

Çevre Yönetimi Genel Müdürlüğü.,2016, Ceyhan Havzası Kirlilik Önleme Eylem Planı.

Chapagain, A. . ve Hoekstra, A. .,2004, Water Footprints of Nations, *Institute for Water Education* (C. 1).

Chapagain, A. K. ve Hoekstra, A. Y.,2003, Virtual Water Flows Between Nations in Relation to Trade in Livestock and Livestock Products, *UNESCO-IHE Institute for Water Education* (C. 49). doi:10.2166/wst.2004.0456

Chapagain, A. K. ve Hoekstra, A. Y.,2011, The Blue, Green and Grey Water Footprint of Rice From Production and Consumption Perspectives, *Ecological Economics*, *70*(4), 749–758. doi:10.1016/j.ecolecon.2010.11.012

Chapagain, A. K., Hoekstra, A. Y., Savenije, H. H. G. ve Gautam, R.,2006, The Water Footprint of Cotton Consumption: An Assessment of The Impact of Worldwide Consumption of Cotton Products on The Water Resources in The Cotton Producing Countries, *Ecological Economics*, *60*(1), 186–203. doi:10.1016/j.ecolecon.2005.11.027

Chathuranika, I. M., Gunathilake, M. B., Baddewela, P. K., Sachinthanie, E., Babel, M. S., Shrestha, S., … Rathnayake, U. S.,2022, Comparison of Two Hydrological Models, HEC-HMS and SWAT in Runoff Estimation: Application to Huai Bang Sai Tropical Watershed, Thailand, *Fluids*, *7*(8). doi:10.3390/fluids7080267

Chen, S., Chen, F., Zhu, L., Li, Q., Wang, X. ve Wang, L.,2023, A Spatial Water Footprint Assessment of Recycled Cotton T-Shirts: Case of Local Impacts in Selected China Provinces, *Sustainability (Switzerland)*, *15*(1). doi:10.3390/su15010817

Chen, Y., Marek, G. W., Marek, T. H., Porter, D. O., Brauer, D. K. ve Srinivasan, R.,2021, Modeling Climate Change Impacts on Blue, Green, and Grey Water Footprints and Crop Yields in the Texas High Plains, USA, *Agricultural and Forest Meteorology*, *310*(September), 108649. doi:10.1016/j.agrformet.2021.108649

Chouchane, H., Hoekstra, A. Y., Krol, M. S. ve Mekonnen, M. M.,2015, The Water Footprint of Tunisia From an Economic Perspective, *Ecological Indicators*, *52*, 311–319. doi:10.1016/j.ecolind.2014.12.015

Chukalla, A. D., Krol, M. S. ve Hoekstra, A. Y.,2015, Green and Blue Water Footprint Reduction in Irrigated Agriculture: Effect of Irrigation Techniques, Irrigation Strategies and Mulching, *Hydrology and Earth System Sciences*, *19*(12), 4877–4891. doi:10.5194/hess-19-4877-2015

Connor, R. ve Coates, D.,2023, The United Nations World Water Development Report 2023, *United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization*. doi:10.4324/9781849773355

CORINE.,2018, CORINE,. 5 Ekim 2021 tarihinde https://land.copernicus.eu/en/products/corine-land-cover adresinden erişildi.

Costa, M. R., Moreira, M. C., da Silva, D. D., de Alencar, K. M. ve Coelho, C. D.,2021, Water Footprint of Soybean, Cotton, and Corn Crops in the Western Region of Bahia State, *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, *26*(5), 971–978. doi:10.1590/S1413-41522020041

Cuceoglu, G., Abbaspour, K. C. ve Ozturk, I.,2017, Assessing the Water-Resources Potential of Istanbul by Using a Soil and Water Assessment Tool (SWAT) Hydrological Model, *Water (Switzerland)*.

Cui, Y., Geng, Z., Zhu, Q. ve Han, Y.,2017, Review: Multi-objective Optimization Methods and Application in Energy Saving, *Energy*, *125*, 681–704. doi:10.1016/j.energy.2017.02.174

D'Ambrosio, E., Gentile, F. ve De Girolamo, A. M.,2020, Assessing The Sustainability In Water Use at The Basin Scale Through Water Footprint Indicators, *Journal of Cleaner Production*, *244*, 118847. doi:10.1016/j.jclepro.2019.118847

D'Ambrosio, E., Ricci, G. F., Gentile, F. ve De Girolamo, A. M.,2020, Using Water Footprint Concepts For Water Security Assessment of a Basin Under Anthropogenic Pressures, *Science of the Total Environment*, *748*, 141356. doi:10.1016/j.scitotenv.2020.141356

Dalin, C., Konar, M., Hanasaki, N., Rinaldo, A. ve Rodriguez-Iturbe, I.,2012, Evolution of the Global Virtual Water Trade Network, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *109*(16), 5989–5994. doi:10.1073/pnas.1203176109

Dang, Y., Qin, L., Huang, L., Wang, J., Li, B. ve He, H.,2022, Water Footprint of Rain-fed Maize in Different Growth Stages and Associated Climatic Driving Forces in Northeast China, *Agricultural Water Management*, *263*(November 2021), 1–11. doi:10.1016/j.agwat.2022.107463

Davis, K. F., Rulli, M. C., Seveso, A. ve D'Odorico, P.,2017, Increased Food Production and Reduced Water Use Through Optimized Crop Distribution, *Nature Geoscience*, *10*(12), 919–924. doi:10.1038/s41561-017-0004-5

Daylan, B., Demirer, G., Cılız, N., Baydar, G., Kara, H., Toprak, D. ve Ulutaş, F.,2011, Yaşam Döngüsü Analizi, (Y. Çağlayan, Ed.). Sürdürülebilir Üretim ve Tüketim Yayınları.

De Girolamo, A. M., Miscioscia, P., Politi, T. ve Barca, E.,2019, Improving Grey Water Footprint Assessment: Accounting for Uncertainty, *Ecological Indicators*, *102*(October 2018), 822–833. doi:10.1016/j.ecolind.2019.03.040

Deihimfard, R., Rahimi-Moghaddam, S., Collins, B. ve Azizi, K.,2022, Future Climate Change Could Reduce Irrigated and Rainfed Wheat Water Footprint in Arid Environments, *Science of the Total Environment*, *807*, 150991. doi:10.1016/j.scitotenv.2021.150991

Devi, G. K., Ganasri, B. P. ve Dwarakish, G. S.,2015, A Review on Hydrological Models, *Aquatic Procedia*, *4*(2214–241X), 1001–1007. doi:https://doi.org/10.1016/j.aqpro.2015.02.126.

Ding, D., Zhao, Y., Guo, H., Li, X., Schoenau, J. ve Si, B.,2018, Water Footprint for Pulse, Cereal, and Oilseed Crops in Saskatchewan, Canada, *Water (Switzerland)*, *10*(11). doi:10.3390/w10111609

Direk, M.,2012, Tarım Tarihi ve Deontoloji (2. Baskı.). Konya: Eğitim yayınevi.

Dong, H., Geng, Y., Sarkis, J., Fujita, T., Okadera, T. ve Xue, B.,2013, Regional Water Footprint Evaluation in China: A Case of Liaoning, *Science of the Total Environment*, *442*, 215–224. doi:10.1016/j.scitotenv.2012.10.049

Duan, P., Qin, L., Wang, Y. ve He, H.,2016, Spatial Pattern Characteristics of Water Footprint for Maize Production in Northeast China, *Journal of the Science of Food and Agriculture*, *96*(2), 561–568. doi:10.1002/jsfa.7124

Duru, U., Arabi, M. ve Wohl, E. E.,2018, Modeling Stream Flow and Sediment Yield Using the SWAT Model: a Case Study of Ankara River basin, Turkey, *Physical Geography*. doi:10.1080/02723646.2017.1342199

Dutal, H.,2020, Körsulu Deresi Yağış Havzasının WEPP (Water Erosion Prediction Project) ve SWAT (Soil Water Assessment Tool) Modelleri Kullanılarak Havza Amenajmanı Bakımından Planlanması Üzerine Araştırmalar, Doktora Tezi, S*ütçü İmam Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kahramanmaraş.

El-Sadek, A. ve Irvem, A.,2014, Evaluating the Impact of Land Use Uncertainty on the Simulated Streamflow and Sediment Yield of the Seyhan River Basin Using the SWAT Model, *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, *38*(4), 515–530. doi:10.3906/tar-1309-89

Elbeltagi, A., Aslam, M. R., Malik, A., Mehdinejadiani, B., Srivastava, A., Bhatia, A. S. ve Deng, J.,2020, The Impact of Climate Changes on the Water Footprint of Wheat and Maize Production in the Nile Delta, Egypt, *Science of the Total Environment*, *743*, 140770. doi:10.1016/j.scitotenv.2020.140770

Ercin, A. E. ve Hoekstra, A. Y.,2014, Water footprint scenarios for 2050: A global analysis, *Environment International*, *64*, 71–82. doi:10.1016/j.envint.2013.11.019

Ercin, A. E., Mekonnen, M. M. ve Hoekstra, A. Y.,2013, Sustainability of National Consumption From a Water Resources Perspective: The Case Study for France, *Ecological Economics*, *88*, 133–147. doi:10.1016/j.ecolecon.2013.01.015

Erdem, E.,2021, Seyhan, Ceyhan ve Asi Havzalarında Tarımsal Su Ayak İzi Analizi, Yüksek Lisans Tezi, *Batman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Batman.

Erdoğan, M.,2007, Veri Türü, Kalitesi ve Üretim Yöntemine Göre Sayısal Yüksekli Modeli (SYM) Standartlarının Belirlenmesi, Doktora Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.

Ergün, N., Aydoğan, S., Sayim, İ., Karakaya, A. ve Çelik Oğuz, A.,2017, Arpa (Hordeum vulgare L.) Köy Çeşitlerinde Tane Verimi ve Bazı Tarımsal Özelliklerin İncelenmesi, *Tarla Bitkileri Merkez Araştırma Enstitüsü Dergisi*, *26*(2), 27–36. doi:10.21566/tarbitderg.366381

Etedali, R. H., Ahmadaali, K., Gorgin, F. ve Ababaei, B.,2019, Optimization of the Cropping Pattern of Main Cereals and Improving Water Productivity: Application of the Water Footprint Concept, *Irrigation and Drainage*, *68*(4), 765–777. doi:10.1002/ird.2362

Ewaid, S. H., Abed, S. A. ve Al-Ansari, N.,2019, Water Footprint of Wheat in Iraq, *Water (Switzerland)*, *11*(3), 1–12. doi:10.3390/w11030535

Ewaid, S. H., Abed, S. A., Chabuk, A. ve Al-Ansari, N.,2021, Water Footprint of Rice in Iraq, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *722*(1). doi:10.1088/1755-1315/722/1/012008

Fader, M., Rost, S., Müller, C., Bondeau, A. ve Gerten, D.,2010, Virtual Water Content of Temperate Cereals and Maize: Present and Potential Future Patterns, *Journal of Hydrology*, *384*(3–4), 218–231. doi:10.1016/j.jhydrol.2009.12.011

FAO.,2020, The State of Food Security and Nutrition in the World 2020, *The State of Food Security and Nutrition in the World 2020*. doi:10.4060/ca9692en

FAO.,2021a, Progress on Level of Water Stress Global Status and Accelaration Needs For SDG Indicator.

FAO.,2021b, The State of Food Security and Nutrition in the World 2021, *In Brief to The State of Food Security and Nutrition in the World 2021*. doi:10.4060/cb5409en

FAOSTAT.,2022, Crop and Livestock Production,. 10 Mart 2022 tarihinde https://www.fao.org/faostat/en/#data adresinden erişildi.

FAOSTAT.,2024, Crops and Livestock Products,. 15 Ocak 2024 tarihinde https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL adresinden erişildi.

Feng, B., Zhuo, L., Xie, D., Mao, Y., Gao, J., Xie, P. ve Wu, P.,2021, A Quantitative Review of Water Footprint Accounting and Simulation for Crop Production Based on Publications During 2002–2018, *Ecological Indicators*, *120*, 106962. doi:10.1016/j.ecolind.2020.106962

Finnveden, G., Hauschild, M. Z., Ekvall, T., Guinée, J., Heijungs, R., Hellweg, S., … Suh, S.,2009, Recent Developments in Life Cycle Assessment, *Journal of Environmental Management*, *91*(1), 1–21. doi:10.1016/j.jenvman.2009.06.018

Franke, N. A., Boyacioglu, H. ve Hoekstra, A. Y.,2013, Grey Water Footprint Accounting: Tier 1 Supporting Guidelines, *UNESCO-IHE Institute for Water Education*.

Fu, M., Guo, B., Wang, W., Wang, J., Zhao, L. ve Wang, J.,2019, Comprehensive Assessment of Water Footprints and Water Scarcity Pressure for Main Crops in Shandong Province, China, *Sustainability (Switzerland)*, *11*(7). doi:10.3390/su11071856

Fu, Y., Zhao, J., Wang, C., Peng, W., Wang, Q. ve Zhang, C.,2018, The Virtual Water Flow of Crops Between Intraregional and Interregional in Mainland China, *Agricultural Water Management*, *208*(April), 204–213. doi:10.1016/j.agwat.2018.06.023

Garofalo, P., Ventrella, D., Kersebaum, K. C., Gobin, A., Trnka, M., Giglio, L., … Castellini, M.,2019, Water Footprint of Winter Wheat Under Climate Change: Trends and Uncertainties Associated to the Ensemble of Crop Models, *Science of the Total Environment*, *658*, 1186–1208. doi:10.1016/j.scitotenv.2018.12.279

Giovanni, L. D.,2017, Methods and Models for Combinatorial Optimization Heuristics for Combinatorial Optimization, 1–15.

Gleick, P. H.,1993, Water in Crisis: A Guide to the World's Fresh Water Resources, *Water in Crisis* içinde .

Gobin, A., Kersebaum, K. C., Eitzinger, J., Trnka, M., Hlavinka, P., Takáč, J., … Zoumides, C.,2017, Variability in the Water Footprint of Arable Crop Production Across European Regions, *Water (Switzerland)*, *9*(2). doi:10.3390/w9020093

Govere, S., Nyamangara, J. ve Nyakatawa, E. Z.,2020, Climate Change Signals in the Historical Water Footprint of Wheat Production in Zimbabwe, *Science of the Total Environment*, *742*, 140473. doi:10.1016/j.scitotenv.2020.140473

Güçdemir, I.,2006, Türkiye Gübre ve Gübreleme Rehberi. http://www.tarim.gov.tr/Belgeler/SagMenuVeriler/ToprakSuGubreTavsiyeVerileri.pdf adresinden erişildi.

Guine, J. B., Gorrée, M., Heijungs, R., Huppes, G., Kleijn, R. ve Wrisberg, M. N.,2002, How to Know If and When Its Time to Commission a Life Cycle Assessment, *ICCA*.

Guinee, J., Heijungs, R., Zamagni, A., Masoni, P., Ekvall, T. ve Rydberg, T.,2011, Life Cycle Assessment: Past, Present, and Future, *Enviromental Science and Technology*, *45*(1), 90–96.

Gunantara, N.,2018, A Review of Multi-Objective Optimization: Methods and Its Applications, *Cogent Engineering*, *5*(1), 1–16. doi:10.1080/23311916.2018.1502242

Günay, E. ve Çelik, O.,2021, Türkiye'de Kırdan Kente Göçün Harris-Todaro Modeli Çerçevesinde Değerlendirilmesi: 1985-2020 Dönemi İçin Bir Eş Bütünleme Analizi, *IV. Uluslararası Kahramanmaraş Yönetim, Ekonomi ve Siyaset Kongresi* içinde (ss. 131–145).

Gungor, K., Karakaya, N., Evrendilek, F. ve Akgul, S.,2016, Spatiotemporal Modeling of Watershed Nutrient Transport Dynamics: Implications for Eutrophication Abatement, *Ecological Informatics journal*, *34*, 52–69.

Güngör, Ö.,2018, SWAT Modeli Kullanılarak Filyos Çayı Havzası'nın Hidrolojik Analizi, Doktora Tezi, *Bülent Ecevit Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Zonguldak.

Halwatura, D. ve Najim, M. M. M.,2013, Application of the HEC-HMS Model for Runoff Simulation in a Tropical Catchment, *Environmental Modelling and Software*, *46*, 155–162. doi:10.1016/j.envsoft.2013.03.006

Han, Y., Jia, D., Zhuo, L., Sauvage, S., Sánchez-Pérez, J. M., Huang, H. ve Wang, C.,2018, Assessing the Water Footprint of Wheat and Maize in Haihe River Basin, Northern China (1956-2015), *Water (Switzerland)*, *10*(7), 1–18. doi:10.3390/w10070867

Hao, L., Su, X. ve Singh, V. P.,2018, Cropping Pattern Optimization Considering Uncertainty of Water Availability and Water Saving Potential, *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, *11*(1), 178–186. doi:10.25165/j.ijabe.20181101.3658

Hastings, E. ve Pegram, G.,2012, Literature Review for the Applicability of Water Footprints in South Africa. Water Research Commission.

Her, Y., Frankenberger, J., Chaubey, I. ve Srinivasan, R.,2015, Threshold Effects in HRU Definition of The Soil and Water Assessment Tool, *Transactions of the ASABE*, *58*(2), 367–378. doi:10.13031/trans.58.10805

Hirwa, H., Peng, Y., Zhang, Q., Qiao, Y., Leng, P., Tian, C. ve Yang, G.,2022, Virtual Water Transfers in Africa : Assessing Topical Condition of Water Scarcity , Water Savings , and Policy Implications, *Science of the Total Environment*, *835*(April), 155343. doi:10.1016/j.scitotenv.2022.155343

Hoekstra, A. Y. ve Chapagain, A. K.,2007, Water Footprints of Nations: Water Use by People as a Function of Their Consumption Pattern, *Water Resources Management*, *21*(1), 35–48. doi:10.1007/s11269-006-9039-x

Hoekstra, A.Y ve Hung, P. .,2002, Virtual Water Trade: A Quantification of Virtual Water Flows Between Natıons in Relation to Internatıonal Crop Trade., *IHE DELFT*. doi:10.4324/9780203867785

Hoekstra, A Y, Chapagain, A. K., Aldaya, M. M. ve Mekonnen, M. M.,2009, Water footprint manual, State of the art 2009, *Water Footprint Network*.

Hoekstra, Arjen Y.,2016, A Critique on The Water-scarcity Weighted Water Wootprint in LCA, *Ecological Indicators*, *66*, 564–573. doi:10.1016/j.ecolind.2016.02.026

Hoekstra, Arjen Y. ve Chapagain, A. K.,2008, Globalization of Water: Sharing the Planet's Freshwater Resources, *Globalization of Water: Sharing the Planet's Freshwater Resources*. Oxford, UK: Blackwell Publishing. doi:10.1002/9780470696224

Hoekstra, Arjen Y., Chapagain, A. K., Aldaya, M. M. ve Mekonnen, M. M.,2011, The Water Footprint Assessment Manual. Setting the Global Standard, *Social and Environmental Accountability Journal* (C. 31). doi:10.1080/0969160x.2011.593864

Hoekstra, Arjen Y., Chapagain, A. K., Aldaya, M. M. ve Mekonnen, M. M.,2012, The Water Footprint Assessment Manual, *The Water Footprint Assessment Manual*. doi:10.4324/9781849775526

Hoekstra, Arjen Y., Mekonnen, M. M., Chapagain, A. K., Mathews, R. E. ve Richter, B. D.,2012, Global Monthly Water Scarcity: Blue Water Footprints Versus Blue Water Availability, *PLoS ONE*, *7*(2). doi:10.1371/journal.pone.0032688

Huang, J., Zhang, H. L., Tong, W. J. ve Chen, F.,2012, The Impact of Local Crops Consumption on the Water Resources in Beijing, *Journal of Cleaner Production*, *21*(1), 45–50. doi:10.1016/j.jclepro.2011.09.014

Hysa, A.,2018, Utilizing CORINE Land Cover Data in Diverse Spatial Decision Making and Management Processes. Ph.D. Thesis, İstanbul Technical University Graduate School of Science Engineering and Techology, İstanbul.

Irmak, S.,2008, Evapotranspiration, *Encyclopedia of Ecology* içinde (ss. 1432–1438). doi:10.1111/lic3.12596

Irvem, A. ve El-Sadek, A.,2018, Evaluation of Streamflow Simulation By SWAT Model for The Seyhan River Basin, *Çukurova Tarım Gıda Bil. Der. Çukurova J. Agric. Food Sci*, *33*(2), 99–110.

ISO 14046.,2014, Environmental Management. Water Footprint. Principles, Requirements and Guidelines.

Jain, S., Ramesh, D. ve Bhattacharya, D.,2021, A Multi-Objective Algorithm for Crop Pattern Optimization in Agriculture, *Applied Soft Computing*, *112*, 107772. doi:10.1016/j.asoc.2021.107772

Jamshidi, S., Imani, S. ve Delavar, M.,2020, Impact Assessment of Best Management Practices (BMPs) on the Water Footprint of Agricultural Productions, *International Journal of Environmental Research*, *14*(6), 641–652. doi:10.1007/s41742-020-00285-y

Jefferies, D., Muñoz, I., Hodges, J., King, V. J., Aldaya, M., Ercin, A. E., … Hoekstra, A. Y.,2012, Water Footprint and Life Cycle Assessment as Approaches to Assess Potential Impacts of Products on Water Consumption. Key Learning Points From Pilot Studies on Tea and Margarine, *Journal of Cleaner Production*, *33*, 155–166. doi:10.1016/j.jclepro.2012.04.015

Jeswani, H. K. ve Azapagic, A.,2011, Water Footprint: Methodologies and a Case Study

for Assessing The Impacts of Water Use, *Journal of Cleaner Production*, *19*(12), 1288–1299. doi:10.1016/j.jclepro.2011.04.003

Jia, D., Wang, C., Han, Y., Huang, H. ve Xiao, H.,2022, Impact of Climate Change on the Yield and Water Footprint of Winter Wheat in the Haihe River Basin, China, *Atmosphere*, *13*(4), 1–14. doi:10.3390/atmos13040630

Jouma, N.,2019, Sultan Sazlığı'nda İklim Değişikliği ve Arazi Kullanımı/Örtüsü Değişimlerinin Erkilerinin SWAT ile Modellenmesi, Doktora Tezi, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kayseri.

Kabal, C.,2019, Evaluation of The Alternatives To Improve Water Qualty In Gürdük Watershed Using SWAT Model, Master's Thesis, *Middle East Technical University, Graduate School of Natural and Applied Sciences*, Ankara.

Karim C. Abbaspour.,2015, SWAT-CUP: SWAT Calibration and Uncertainty Programs - A User Manual, *eawag aquatic research* (C. 130).

Kaya, Y., Orta, H., Uludağ, A., Üremiş, İ., Özder, N., Özer, N. ve Beşer, N.,2021, Ayçiçeği Tarımı, *Tarım Gündem*, (January).

Klöpffer, W.,1997, Life Cycle Assessment: From the Beginning to the Current State, *Environmental Science and Pollution Research*, *4*(4), 223–228. doi:10.1007/BF02986351

Kobuliev, M., Liu, T., Kobuliev, Z., Chen, X., Gulakhmadov, A. ve Bao, A.,2021, Effect of Future Climate Change on the Water Footprint of Major Crops in Southern Tajikistan, *Regional Sustainability*, *2*(1), 60–72. doi:10.1016/j.regsus.2021.01.004

Köse Gül, E.,2017, The Productivity Of Turkey's Agricultural Production On Provincial Basis, Master's Thesis, *The Institute of Social Sciences of Yıldırım Beyazt University*, Ankara.

Kumar, M. D. ve Singh, O. P.,2005, Virtual Water in Global Food and Water Policy Making: Is There a Need for Rethinking?, *Water Resources Management* (C. 19). doi:10.1007/s11269-005-3278-0

Leng, M., Yu, Y., Wang, S. ve Zhang, Z.,2020, Simulating the Hydrological Processes of a Meso-Scale Watershed on the Loess Plateau, China, *Water*. doi:10.3390/w12030878

Liu, J., Zehnder, A. J. B. ve Yang, H.,2009, Global Consumptive Water Use for Crop Production: The Importance of Green Water and Virtual Water, *Water Resources Research*, *45*(5). doi:10.1029/2007WR006051

Liu, Q., Niu, J., Wood, J. D. ve Kang, S.,2022, Spatial Optimization of Cropping Pattern in The Upper-Middle Reaches of The Heihe River Basin, Northwest China, *Agricultural Water Management*, *264*(January), 107479. doi:10.1016/j.agwat.2022.107479

Liu, W., Antonelli, M., Liu, X. ve Yang, H.,2017, Towards Improvement of Grey Water

Footprint Assessment: With an Illustration for Global Maize Cultivation, *Journal of Cleaner Production*, *147*, 1–9. doi:10.1016/j.jclepro.2017.01.072

Liu, X., Guo, P., Li, F. ve Zheng, W.,2019, Optimization of planning structure in irrigated district considering water footprint under uncertainty, *Journal of Cleaner Production*, *210*(April), 1270–1280. doi:10.1016/j.jclepro.2018.10.339

Liu, Z., Wang, Y., Xu, Z. ve Duan, Q.,2019, Conceptual Hydrological Models, *Handbook of Hydrometeorological Ensemble Forecasting*, 389–411. doi:10.1007/978-3-642-39925-1_22

Lovarelli, D., Bacenetti, J. ve Fiala, M.,2016, Water Footprint of crop productions: A review, *Science of the Total Environment*, *548–549*, 236–251. doi:10.1016/j.scitotenv.2016.01.022

Lu, J., Sun, G., McNulty, S. ve Amatya, D. M.,2005, A comparison of six potential evapotranspiration methods, *Journal of the American Water Resources Association*, *41*(3), 621–633. doi:https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2005.tb03759.x

Luan, Xiaobo, Wu, P., Sun, S., Wang, Y. ve Gao, X.,2018, Quantitative study of the crop production water footprint using the SWAT model, *Ecological Indicators*, *89*(June 2017), 1–10. doi:10.1016/j.ecolind.2018.01.046

Luan, XiaoBo, Yin, Y. L., Wu, P. Te, Sun, S. K., Wang, Y. B., Gao, X. R. ve Liu, J.,2018, An Improved Method For Calculating The Regional Crop Water Footprint Based On a Hydrological Process Analysis, *Hydrology and Earth System Sciences*, *22*(10), 5111–5123. doi:10.5194/hess-22-5111-2018

Madaka, H., Babbitt, C. W. ve Ryen, E. G.,2022, Opportunities for Reducing the Supply Chain Water Footprint of Metals Used in Consumer Electronics, *Resources, Conservation and Recycling*, *176*(October 2021), 105926. doi:10.1016/j.resconrec.2021.105926

Mahlakeng, M.,2023, Lesotho's White Gold: A Potential Source for Virtual Water Trade, *Wilberforce Journal of the Social Sciences*, *8*(2), 135–154. doi:10.36108/wjss/3202.80.0270

Masud, M. B., McAllister, T., Cordeiro, M. R. C. ve Faramarzi, M.,2018, Modeling Future Water Footprint of Barley Production in Alberta, Canada: Implications for Water Use and Yields to 2064, *Science of the Total Environment*, *616–617*, 208–222. doi:10.1016/j.scitotenv.2017.11.004

Matuštík, J. ve Kočí, V.,2021, What is a Footprint? A Conceptual Analysis of Environmental Footprint Indicators, *Journal of Cleaner Production*, *285*. doi:10.1016/j.jclepro.2020.124833

Mekonnen, M. M. ve Hoekstra, A. Y.,2010, A Global and High-resolution Assessment of the Green, Blue and Grey Water Footprint of Wheat, *Hydrology and Earth System Sciences*, *14*(7), 1259–1276. doi:10.5194/hess-14-1259-2010

Mekonnen, M. M. ve Hoekstra, A. Y.,2011a, National Water Footprint Accounts: The

Green, Blue and Grey Water Footprint of Production and Consumption, *UNESCO-IHE Institute for Water Education*, *15*(5), 1577–1600. doi:10.5194/hess-15-1577-2011

Mekonnen, M. M. ve Hoekstra, A. Y.,2011b, The Green, Blue And Grey Water Footprint of Crops and Derived Crop Products, *Hydrology and Earth System Sciences*, *15*(5), 1577–1600. doi:10.5194/hess-15-1577-2011

Mekonnen, M.M. ve Hoekstra, A. Y.,2018, Global Anthropogenic Phosphorus Loads to Freshwater and Associated Grey Water Footprints and Water Pollution Levels: A High-Resolution Global Study, *Water Resources Research*, *54*(1), 345–358. doi:10.1002/2017WR020448

Mekonnen, Mesfin M. ve Hoekstra, A. Y.,2014, Water Footprint Benchmarks for Crop Production: A First Global Assessment, *Ecological Indicators*, *46*, 214–223. doi:10.1016/j.ecolind.2014.06.013

Meng, J., Chen, G. Q., Shao, L., Li, J. S., Tang, H. S., Hayat, T., … Alsaadi, F.,2014, Virtual Water Accounting for Building: Case Study for E-town, Beijing, *Journal of Cleaner Production*, *68*, 7–15. doi:10.1016/j.jclepro.2013.12.045

Mialyk, O., Schyns, J. F., Booij, M. J. ve Hogeboom, R. J.,2022, Historical Simulation of Maize Water Footprints With a New Global Gridded Crop Model ACEA, *Hydrology and Earth System Sciences*, *26*(4), 923–940. doi:10.5194/hess-26-923-2022

Miguel Ayala, L., van Eupen, M., Zhang, G., Pérez-Soba, M., Martorano, L. G., Lisboa, L. S. ve Beltrao, N. E.,2016, Impact of Agricultural Expansion on Water Footprint in the Amazon Under Climate Change Scenarios, *Science of the Total Environment*, *569–570*, 1159–1173. doi:10.1016/j.scitotenv.2016.06.191

Moreira, L. L., Schwamback, D. ve Rigo, D.,2020, Different calibration procedures for flows estimation using SWAT model, *Journal of Applied Water Engineering and Research*, 205–218. doi:10.1080/23249676.2020.1787246

Mubako, S., Lahiri, S. ve Lant, C.,2013, Input-output Analysis of Virtual Water Transfers: Case Study of California and Illinois, *Ecological Economics*, *93*, 230–238. doi:10.1016/j.ecolecon.2013.06.005

Muratoglu, A.,2020a, Assessment of Wheat's Water Footprint and Virtual Water Trade: a Case Study for Turkey, *Ecological Processes*, *9*(1), 1–16. doi:10.1186/s13717-020-0217-1

Muratoglu, A.,2020b, Grey water footprint of agricultural production: An assessment based on nitrogen surplus and high-resolution leaching runoff fractions in Turkey, *Science of the Total Environment*, *742*, 140553. doi:10.1016/j.scitotenv.2020.140553

Muratoglu, A.,2021, Water Footprint: Concept and Methodology, *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences*, 1–9. doi:10.1016/b978-0-12-821139-7.00034-9

Muratoğlu, A.,2020, Assessment of Water Footprint of Production: A case Study for Diyarbakır Province, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, *35*(2), 845–858. doi:10.17341/gazimmfd.543933

Muratoglu, A. ve Avanoz, Z.,2021, Spatial Analysis of Blue and Green Water Footprints of Agricultural Crop Patterns: Turkey, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Water Management*, *174*(6), 291–308. doi:10.1680/jwama.20.00085

Muratoğlu, A., Bilgen, G. K., Angın, I. ve Kodal, S.,2023, Performance Analyses of Effective Rainfall Estimation Methods for Accurate Quantification of Agricultural Water Footprint, *Water Research*. doi:https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.120011

Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R. ve Williams, J. R.,2011, Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2009, *Science of The Total Environment* (C. 543).

Nouri, H., Stokvis, B., Galindo, A., Blatchford, M. ve Hoekstra, A. Y.,2019, Water Scarcity Alleviation Through Water Footprint Reduction in Agriculture: The Effect of Soil Mulching and Drip Irrigation, *Science of the Total Environment*, *653*, 241–252. doi:10.1016/j.scitotenv.2018.10.311

Novoa, V., Ahumada-Rudolph, R., Rojas, O., Sáez, K., de la Barrera, F. ve Arumí, J. L.,2019, Understanding Agricultural Water Footprint Variability to Improve Water Management in Chile, *Science of the Total Environment*, *670*, 188–199. doi:10.1016/j.scitotenv.2019.03.127

Osama, S., Elkholy, M. ve Kansoh, R. M.,2017, Optimization of The Cropping Pattern in Egypt, *Alexandria Engineering Journal*. doi:10.1016/j.aej.2017.04.015

Özbay, H., Yaprak, A. E. ve Turan, N.,2019, Assessing Water Quality in the Ceyhan River Basin (Turkey) With the Use of Aquatic Macrophytes, *Chemistry and Ecology*, *35*(10), 891–902. doi:10.1080/02757540.2019.1668928

Özür Karakaş, N. ve Ataol, M.,2018, Türkiye'de CORINE Verilerinin Kullanılmasına Dair Değerlendirme, *ÇKÜ Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, *9*(2), 110–130.

P. W. Gassman, M. R. Reyes, C. H. Green ve J. G. Arnold.,2007, The Soil and Water Assessment Tool: Historical Development, Applications, and Future Research Directions, *Transactions of the ASABE*, *50*(4), 1211–1250. doi:10.13031/2013.23637

Pechlivanidis, I., Jackson, B. ve Mcintyre, N.,2011, Catchment scale hydrological modelling : A review of model types , calibration approaches and uncertainty analysis methods in the context of recent developments in technology and applications, *Global Nest*, (February 2016).

Peker, İ. B. ve Cüceoğlu, G.,2022, SWAT (Soil and Water Assessment Tool) Modeline Genel Bir Bakış ve Modelin Türkiye ' deki Uygulamaları An Overview of SWAT (Soil and Water Assessment Tool) Model and Its Applications in Turkey, *İtü Dergisi, E*, (February), 9–26.

Peker, I. B. ve Sorman, A. A.,2021, Application of SWAT Using Snow Data and Detecting Climate Change Impacts in the Mountainous Eastern Regions of Turkey, *Water (Switzerland)*, *13*(14). doi:10.3390/w13141982

Peña, C. A. ve Huijbregts, M. A. J.,2014, The Blue Water Footprint of Primary Copper Production in Northern Chile, *Journal of Industrial Ecology*, *18*(1), 49–58. doi:10.1111/jiec.12036

Pereira, J. L. J., Oliver, G. A., Francisco, M. B., Cunha, S. S. ve Gomes, G. F.,2022, A Review of Multi-objective Optimization: Methods and Algorithms in Mechanical Engineering Problems, *Archives of Computational Methods in Engineering*, *29*(4), 2285–2308. doi:10.1007/s11831-021-09663-x

Rajendran, M., Gunawardena, E. R. N. ve Dayawansa, N. D. K.,2020, Runoff Prediction in an Ungauged Catchment of Upper Deduru Oya Basin, Sri Lanka: A Comparison of HEC-HMS and WEAP Models, *International Journal of Progressive Sciences and Technologies (IJPSAT)*, *18*(2), 121–129.

Rath, A., Samantaray, S. ve Swain, P. C.,2019, Optimization of The Cropping Pattern Using Cuckoo Search Technique, *Studies in Fuzziness and Soft Computing* (C. 374). Springer International Publishing. doi:10.1007/978-3-030-03131-2_2

Reddy, K. S., Maruthi, V., Pankaj, P. K., Kumar, M., Pushpanjali, Prabhakar, M., … Koradia, A. K.,2022, Water Footprint Assessment of Rainfed Crops with Critical Irrigation under Different Climate Change Scenarios in SAT Regions, *Water (Switzerland)*, *14*(8). doi:10.3390/w14081206

Rosegrant, M. W., Ringler, C. ve Zhu, T.,2009, Water For Agriculture: Maintaining Food Security Under Growing Scarcity, *Annual Review of Environment and Resources*, *34*, 205–222. doi:10.1146/annurev.environ.030308.090351

Salmoral, G., Aldaya, M. M., Chico, D., Garrido, A. ve Llamas, M. R.,2011, The Water Footprint of Olives and Olive oil in Spain, *Spanish Journal of Agricultural Research*, *9*(4), 1089–1104. doi:10.5424/sjar/20110904-035-11

Salmoral, Gloria, Willaarts, B. A., Garrido, A. ve Guse, B.,2017, Fostering integrated land and water management approaches: Evaluating the water footprint of a Mediterranean basin under different agricultural land use scenarios, *Land Use Policy*, *61*, 24–39. doi:10.1016/j.landusepol.2016.09.027

Santhi, C., Arnold, J. G., Williams, J. R., Dugas, W. A., Srinivasan, R. ve Hauck, L. M.,2001, Validation of the SWAT Model on a Large River Basin With Point and Nonpoint Sources, *Journal of the American Water Resources Association*, *37*(5).

Sao, D., Kato, T., Tu, L. H., Thouk, P., Fitriyah, A. ve Oeurng, C.,2020, Evaluation of Different Objective Functions Used in the SUFI-2 Calibration Process of SWAT-CUP on Water Balance Analysis: A case Study of the Pursat River Basin, Cambodia, *Water (Switzerland)*, *12*(10), 1–22. doi:10.3390/w12102901

Sarış, F.,2021, Türkiye'de Evsel Su Tedarik ve Tüketim İstatistiklerinin Değerlendirilmesi, *Coğrafi Bilimler Dergisi*, *19*, 195–216. doi:10.33688/aucbd.883794

Severo Santos, J. F. ve Naval, L. P.,2020, Spatial and Temporal Dynamics of Water Footprint for Soybean Production in Areas of Recent Agricultural Expansion of the Brazilian Savannah (Cerrado), *Journal of Cleaner Production*, *251*. doi:10.1016/j.jclepro.2019.119482

Shreedhar, R., Hiremath, C. G. ve Shetty, G. G.,2015, Optimization of Cropping pattern using Linear Programming Model for Markandeya Command Area, *6*(October), 1311–1326.

Shrestha, S., Chapagain, R. ve Babel, M. S.,2017, Quantifying the Impact of Climate Change on Crop Yield and Water Footprint of Rice in the Nam Oon Irrigation Project, Thailand, *Science of the Total Environment*, *599–600*, 689–699. doi:10.1016/j.scitotenv.2017.05.028

Siad, S. M., Iacobellis, V., Zdruli, P., Gioia, A., Stavi, I. ve Hoogenboom, G.,2019, A Review of Coupled Hydrologic and Crop Growth Models, *Agricultural Water Management*, *224*. doi:10.1016/j.agwat.2019.105746

Siebert, S. ve Döll, P.,2010, Quantifying Blue and Green Virtual Water Contents in Global Crop Production as Well as Potential Production Losses Without Irrigation, *Journal of Hydrology*, *384*(3–4), 198–217. doi:10.1016/j.jhydrol.2009.07.031

Souissi, A., Mtimet, N., Thabet, C., Stambouli, T. ve Chebil, A.,2019, Impact of Food Consumption on Water Footprint and Food Security in Tunisia, *Food Security*, *11*(5), 989–1008.

Stanhill, G.,2004, Evapotranspiration, *Encyclopedia of Soils in the Environment* içinde (C. 4, ss. 502–506). doi:10.1016/B0-12-348530-4/00359-3

Su, X., Li, J. ve Singh, V. P.,2014, Optimal Allocation of Agricultural Water Resources Based on Virtual Water Subdivision in Shiyang River Basin, *Water Resources Management*, *28*(8), 2243–2257. doi:10.1007/s11269-014-0611-5

Su Yönetimi Genel Müdürlüğü.,2018, Ceyhan Havzası Taşkın Yönetim Planı. http://taskinyonetimi.ormansu.gov.tr/_engine//_engine/file.axd?file=/Dokumanlar/Havzalar/ceyhan/Ceyhan_Taşkın Yönetim Planı.pdf adresinden erişildi.

Su Yönetimi Genel Müdürlüğü.,2019, Ceyhan Havzası Kuraklık Yönetim Planı.

Sun, J. X., Yin, Y. L., Sun, S. K., Wang, Y. B., Yu, X. ve Yan, K.,2021, Review on Research Status of Virtual Water: The Perspective of Accounting Methods, Impact Assessment and Limitations, *Agricultural Water Management*, *243*(July 2020). doi:10.1016/j.agwat.2020.106407

Sun, S. K., Wu, P. T., Wang, Y. B. ve Zhao, X. N.,2012, Impacts of Climate Change on Water Footprint of Spring Wheat Production: the Case of an Irrigation District in China, *Spanish Journal of Agricultural Research*, *10*(4), 1176. doi:10.5424/sjar/2012104-3004

T.C. Orman ve Su İşleri Bakanlığı Su Yönetimi Genel Müdürlüğü.,2016, İklim Değişikliğinin Su Kaynaklarına Etkisi Projesi,.

TAGEM.,2017, Türkiyede'de Sulanan Bitkilerin Bitki Su Tüketimleri, *T.C Gıda Tarım ve Hayvancılık Bakanlığı*.

Tanriverdi, Ç., Alp, A., Demirkiran, A. R. ve Üçkardeş, F.,2010, Assessment of Surface Water Quality of the Ceyhan River Basin, Turkey, *Environmental Monitoring and Assessment*, *167*(1–4), 175–184. doi:10.1007/s10661-009-1040-4

Temesgen, B., Eching, S., Davidoff, B. ve Frame, K.,2005, Comparison of Some Reference Evapotranspiration Equations for California. doi:10.1061/(ASCE)0733-9437(2005)131:1(73) CE

TEPGE.,2023, Tarım Ürünleri Piyasaları, Buğday, *Tepge*. https://arastirma.tarimorman.gov.tr/tepge/Belgeler/PDF Tarım Ürünleri Piyasaları/2023-Temmuz Tarım Ürünleri Raporu/BUĞDAY TÜP HAZİRAN 2023-TEPGE.pdf adresinden erişildi.

Thavhana, M. P., Savage, M. J. ve Moeletsi, M. E.,2018, SWAT Model Uncertainty Analysis, Calibration and Validation for Runoff Simulation in The Luvuvhu River Catchment, South Africa, *Physics and Chemistry of the Earth*, *105*, 115–124. doi:10.1016/j.pce.2018.03.012

Thornthwaite, C. W., Wilm, H. G., Colman, E. A., Cummings, N. W., Croft, A. R., Gisborne, H. T., … Taylor, C. A.,1944, Report of the Committee on Transpiration and Evaporation, *Eos, Transactions American Geophysical Union*. doi:10.1029/TR024i002p00401

Todini, E.,2007, Hydrological Catchment Modelling : Past , Present and Future, *Hydrology and Earth System Sciences*, *11*(1), 468–482.

Tolomio, M. ve Casa, R.,2020, Defining Irrigation Thresholds in Remote Sensing-based Decision Support Systems: A Review of Crop Models Mechanistic Descriptions of Crop water Stress, *EGU General Assembly 2020* içinde . doi:https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-5792

Tsakmakis, I. D., Zoidou, M., Gikas, G. D. ve Sylaios, G. K.,2018, Impact of Irrigation Technologies and Strategies on Cotton Water Footprint Using AquaCrop and CROPWAT Models, *Environmental Processes*, *5*, 181–199. doi:10.1007/s40710-018-0289-4

TUİK.,2022, Türkiye İstatistikleri 2022.

Vanham, D. ve Bidoglio, G.,2014, The Water Footprint of Milan, *Water Science and Technology*, *69*(4), 789–795. doi:10.2166/wst.2013.759

Veettil, A. V. ve Mishra, A. K.,2016, SWAT Water Security Assessment Using Blue and Green Water Footprint Concepts, *Journal of Hydrology*, *542*, 589–602. doi:10.1016/j.jhydrol.2016.09.032

Vivekanandan, N., Viswanathan, K. ve Sanjeev, G.,2009, Optimization of cropping pattern using goal programming approach, *Opsearch*, *46*(3), 259–274. doi:10.1007/s12597-009-0017-y

Wang, L., Li, L., Xie, J., Luo, Z., Sumera, A., Zechariah, E., … Chen, Y.,2022, Does Plastic Mulching Reduce Water Footprint in Field Crops in China? A Meta-analysis, *Agricultural Water Management*, *260*(August 2021), 107293. doi:10.1016/j.agwat.2021.107293

Wang, Y., Jiang, R., Xie, J., Zhao, Y., Yan, D. ve Yang, S.,2019, Soil and Water Assessment Tool (SWAT) Model: A Systemic Review, *Journal of Coastal Research*, *93*(sp1), 22–30. doi:10.2112/SI93-004.1

Wang, Z., Huang, K., Yang, S. ve Yu, Y.,2013, An Input-output Approach to Evaluate the Water Footprint and Virtual Water Trade of Beijing, China, *Journal of Cleaner Production*, *42*, 172–179. doi:10.1016/j.jclepro.2012.11.007

Wichelns, D.,2015, Virtual Water and Water Footprints do not Provide Helpful Insight Regarding International Trade or Water Scarcity, *Ecological Indicators*, *52*, 277–283. doi:10.1016/j.ecolind.2014.12.013

Winchell, M. W., Srinivasan, R. S., Luzio, M. ve Arnold, J.,2013, ARCSWAT 2.1 Interface for SWAT2005 User's Guide, *Soil and Water*.

Xie, P., Zhuo, L., Yang, X., Huang, H., Gao, X. ve Wu, P.,2020, Spatial-temporal variations in blue and green water resources, water footprints and water scarcities in a large river basin: A case for the Yellow River basin, *Journal of Hydrology*, *590*(June), 125222. doi:10.1016/j.jhydrol.2020.125222

Yaykıran, S.,2016, Sakarya Havzası'nın Yüksek Çözünürlüklü Hidrolojik Modelin Yapılandırılması, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.

Yin, J., Lu, Y. ve Ou, Z.,2019, Regional Agricultural Water Footprint and Crop Water Consumption Study in Yellow River Basin, China, *Applied Ecology and Environmental Research*, *17*(3), 5539–5559. doi:10.15666/aeer1703_55395559

Yoo, S. H., Choi, J. Y., Lee, S. H. ve Kim, T.,2014, Estimating Water Footprint of Paddy Rice in Korea, *Paddy and Water Environment*, *12*(1), 43–54. doi:10.1007/s10333-013-0358-2

Yuce, M. I. ve Esit, M.,2021, Drought Monitoring in Ceyhan Basin, Turkey, *Journal of Applied Water Engineering and Research*, *9*(4), 293–314. doi:10.1080/23249676.2021.1932616

Yuce, M. I., Esit, M. ve Kalaycioglu, V.,2022, Investigation of Trends in Extreme Events: a Case Study of Ceyhan Basin, Turkey, *Journal of Applied Water Engineering and Research*. doi:10.1080/23249676.2022.2113462

Yuemei, H., Xiaoqin, Z., Jianguo, S. ve Jina, N.,2007, Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantificaiton of Accuracy in Watershed Simulation, *American Society of Agricultural and Biological Engineers*.

Zäpfel, G., Braune, R. ve Bögl, M.,2010, Metaheuristic Search Concepts: A Tutorial With Applications to Production and Logistics, *Metaheuristic Search Concepts: A Tutorial with Applications to Production and Logistics*. doi:10.1007/978-3-642-

11343-7

Zhai, Y., Zhang, T., Ma, X., Shen, X., Ji, C., Bai, Y. ve Hong, J.,2021, Life Cycle Water Footprint Analysis of Crop Production in China, *Agricultural Water Management*, *256*(July), 107079. doi:10.1016/j.agwat.2021.107079

Zhan-Ming, C. ve Chen, G. Q.,2013, Virtual Water Accounting for the Globalized World Economy: National Water Footprint and International Virtual Water Trade, *Ecological Indicators*, *28*, 142–149. doi:10.1016/j.ecolind.2012.07.024

Zhang, X., Ren, L. ve Kong, X.,2016, Estimating spatiotemporal variability and sustainability of shallow groundwater in a well-irrigated plain of the Haihe River basin using SWAT model, *Journal of Hydrology*, *541*, 1221–1240. doi:10.1016/j.jhydrol.2016.08.030

Zhao, D., Hubacek, K., Feng, K., Sun, L. ve Liu, J.,2019, Explaining virtual water trade: A spatial-temporal analysis of the comparative advantage of land, labor and water in China, *Water Research*, *153*, 304–314. doi:10.1016/j.watres.2019.01.025

Zhao, Q., Liu, J., Khabarov, N., Obersteiner, M. ve Westphal, M.,2014, Impacts of Climate Change on Virtual Water Content of Crops in China, *Ecological Informatics*, *19*, 26–34. doi:10.1016/j.ecoinf.2013.12.005

Zhao, W. J., Sun, W., Li, Z. L., Fan, Y. W., Song, J. S. ve Wang, L. R.,2013, A review on SWAT model for stream flow simulation, *Advanced Materials Research*, *726–731*, 3792–3798. doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.726-731.3792

Zheng, J., Wang, W., Ding, Y., Liu, G., Xing, W., Cao, X. ve Chen, D.,2020, Assessment of Climate Change Impact on the Water Footprint in Rice Production: Historical Sİmulation and Future Projections at two Representative Rice Cropping Sites of China, *Science of the Total Environment*, *709*, 136190. doi:10.1016/j.scitotenv.2019.136190

Zhu, K., Xie, Z., Zhao, Y., Lu, F., Song, X., Li, L. ve Song, X.,2018, The Assessment of Greenwater Based on The SWAT Model: A Case Study In The Hai River Basin, China, *Water (Switzerland)*, *10*(6). doi:10.3390/w10060798

Zhuo, L., Mekonnen, M. M., Hoekstra, A. Y. ve Wada, Y.,2016, Inter- and Intra-annual Variation of Water Footprint of Crops and Blue Water Scarcity in the Yellow River Basin (1961-2009), *Advances in Water Resources*, *87*, 29–41. doi:10.1016/j.advwatres.2015.11.002

Zoidou, M., Tsakmakis, I. D., Gikas, G. D. ve Sylaios, G.,2017, Water Footprint for Cotton Irrigation Scenarios Utilizing CROPWAT and AquaCrop Models, *European Water*, *59*, 285–290.

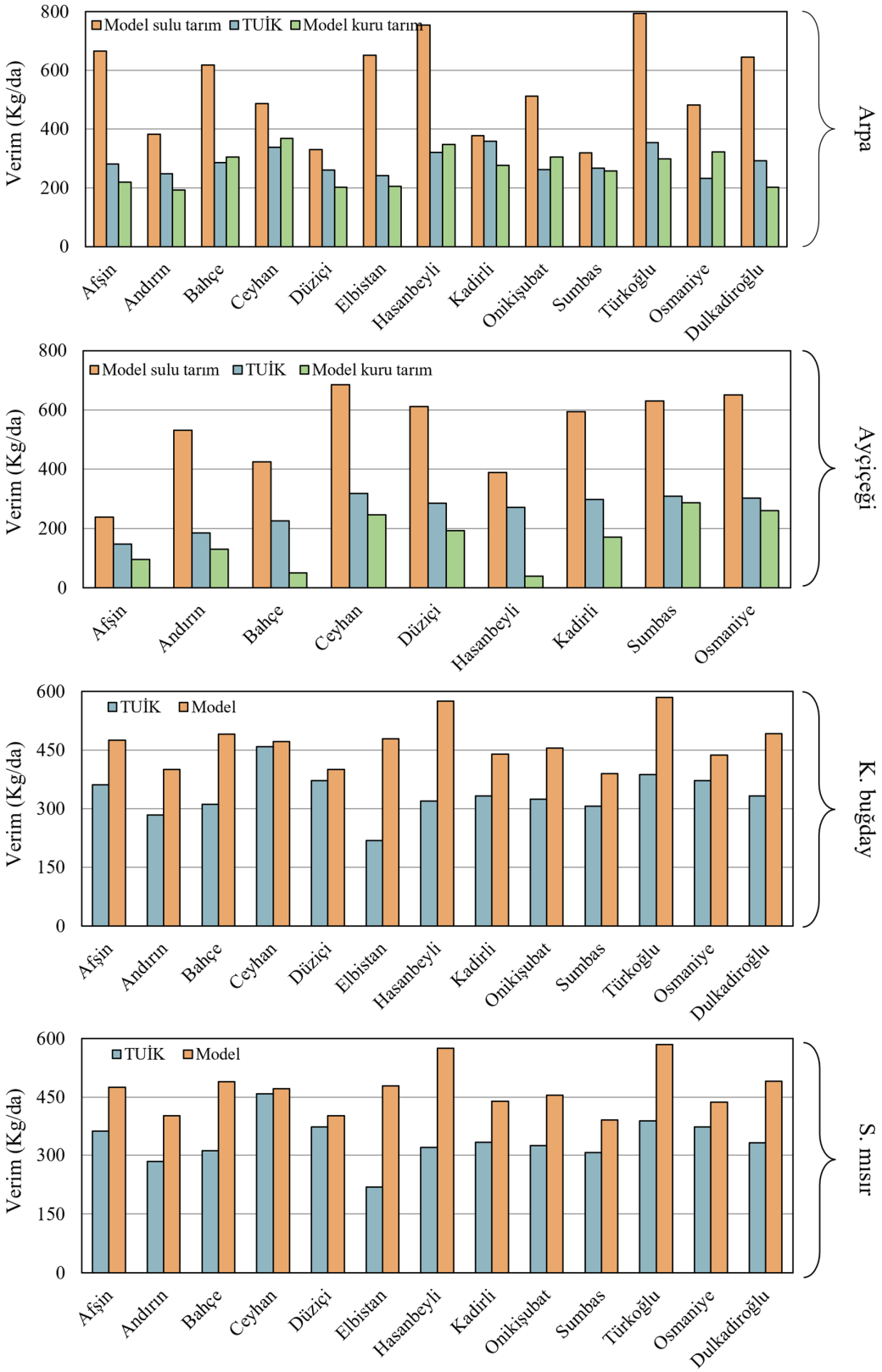
7. EKLER

Ek 1. Karaahmet ve Kadirli AGİ kalibrasyon parametrelerinin nihai değerleri

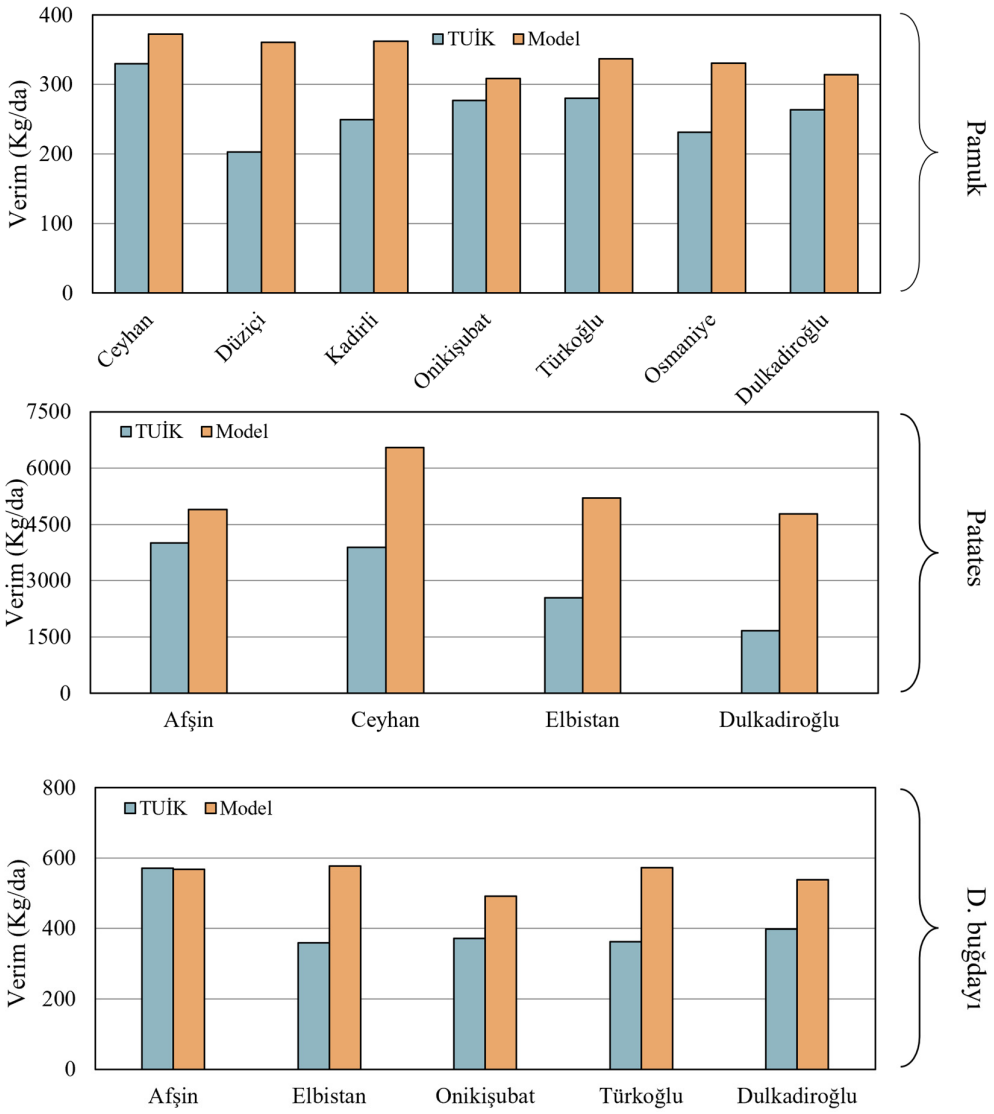
Parametre	Kalibrasyon çeşidi	Nihai değer	Minimum değer	Maximum değer
Karaahmet AGİ kalibrasyon parametreleri				
PLAPS.sub	V	367.5	-100	500
TLAPS.sub	V	-7	-20	20
SFTMP.bsn	V	0.18	-5	5
SMTMP.bsn	V	-2.28	-5	5
SMFMX.bsn	V	3.75	0	10
SMFMN.bsn	V	0.72	0	10
TIMP.bsn	V	0.81	0.1	1
CN2.mgt	R	0,06	-0.11	0.3
SURLAG.hru	V	17,04	13.5	22
SLSUBBSN.hru	R	-0.29	-0.35	0,07
SOL_Z(..).sol	R	-0.26	-0.34	0,07
SOL_AWC(..).sol	R	-0.74	-0.97	-0.38
SOL_BD(..).sol	R	-0.17	-0.35	0.38
RCHRG_DP.gw	V	0.15	0.1	0.5
GW_REVAP.gw	V	0.14	0,05	0.18
GW_DELAY.gw	V	8.36	0	32
SHALLST.gw	V	2386	1810	2481
Kadirli AGİ kalibrasyon parametreleri				
PLAPS.sub	V	389	-100	500
TLAPS.sub	V	-7.5	-20	20
SFTMP.bsn	V	-1.55	-5	5
SMTMP.bsn	V	3.18	-5	5
SMFMX.bsn	V	4,05	0	10
SMFMN.bsn	V	4.38	0	10
TIMP.bsn	V	0.16	0.1	1
CN2.mgt	R	0.13	-0.12	0.33
ESCO.hru	V	0.83	0.70	0.85
SOL_Z(..).sol	R	0.43	0.28	0.7
SOL_AWC(..).sol	R	-0.63	-0.9	-0.27
GW_REVAP.gw	V	0.16	0.1	0.2
GWQMN.gw	V	121.8	0	800
REVAPMN.gw	V	177.24	0	224

Ek 2. Hemite ve Misis AGİ kalibrasyon parametrelerinin nihai değerleri

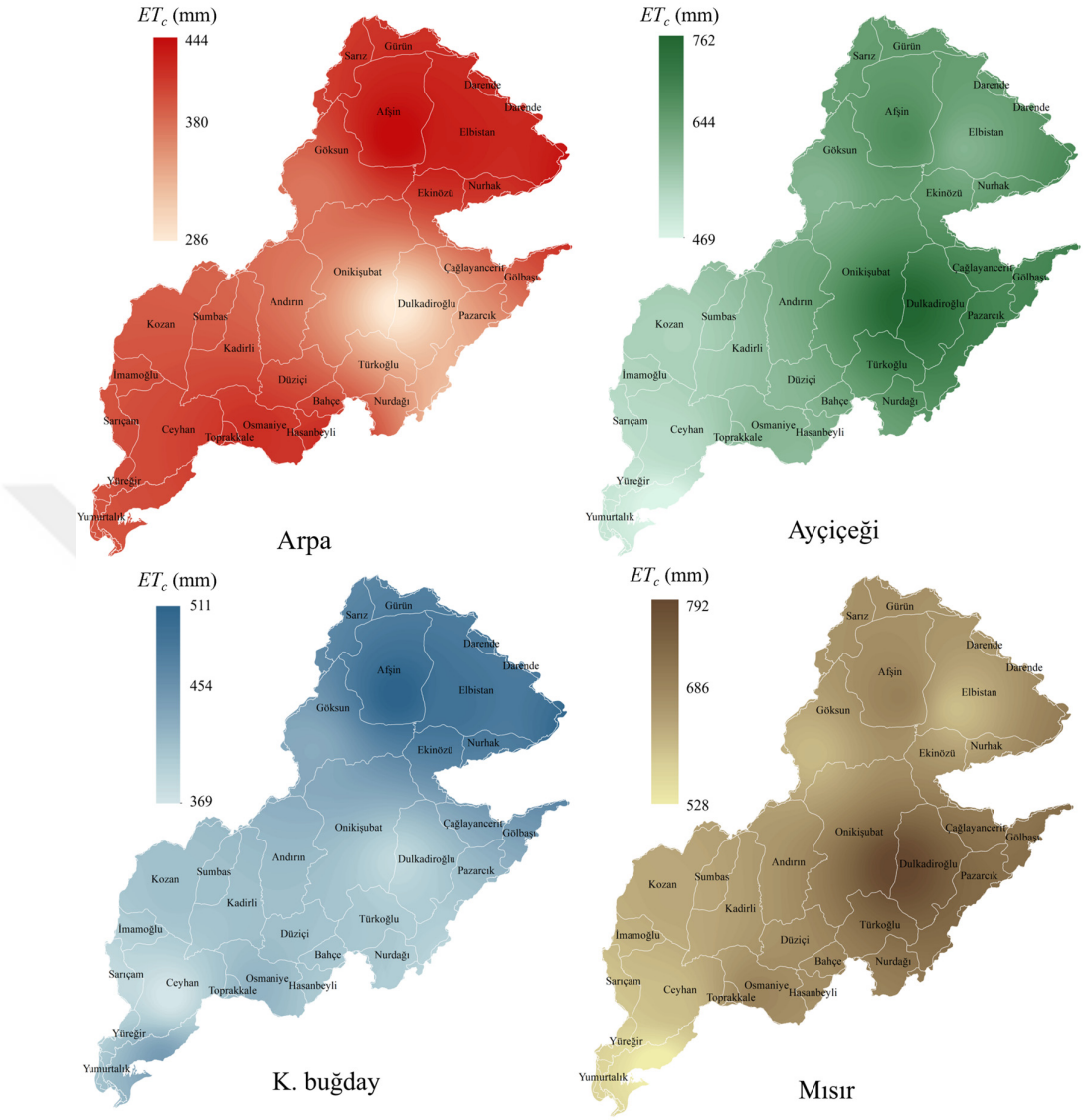
Parametre	Kalibrasyon çeşidi	Nihai değer	Minimum değer	Maximum değer
Hemite AGİ kalibrasyon parametreleri				
PLAPS.sub	V	-82.5	-350	350
TLAPS.sub	V	-12.25	-25	25
SFTMP.bsn	V	0.7	-5	5
SMTMP.bsn	V	-4.34	-5	5
SMFMX.bsn	V	1.46	0	10
SMFMN.bsn	V	5.14	0	10
TIMP.bsn	V	0.29	0.1	1
CN2.mgt	R	0,025	-0.25	0.25
ESCO.hru	V	0.92	0.75	1
SOL_Z(..).sol	R	-0,09	-0.2	0.35
SOL_AWC(..).sol	R	0.21	0.15	0.5
EPCO.hru	V	0.25	0.1	0.4
GWQMN.gw	V	1106	580	1750
SOL_BD(..).sol	R	0.28	0,05	0.65
ALPHA_BF.gw	V	0.6	0.4	0.8
RCHRG_DP.gw	V	0.19	0	0.5
Misis AGİ kalibrasyon parametreleri				
PLAPS.sub	V	339.5	-100	500
TLAPS.sub	V	-18.3	-30	30
SUB_SFTMP	V	4.61	-5	5
SUB_SMTMP	V	2.88	-5	5
SUB_SMFMX	V	1.5	0	10
SUB_SMFMN	V	1,07	0	10
SUB_TIMP	V	0.36	0.1	1
CN2.mgt	R	0.03	-0.15	0.22
ESCO.hru	V	0.96	0.72	1.00
EPCO.hru	V	0.19	0.00	0.37
SURLAG.hru	V	6.96	3.30	10.00
SLSUBBSN.hru	R	0.01	-0.12	0.28
SOL_Z(..).sol	R	0.25	-0.11	0.35
SOL_AWC(..).sol	R	0.31	0.26	0.90
RCHRG_DP.gw	V	0.99	0.60	1.00
GW_REVAP.gw	V	0.10	0.06	0.16
GWQMN.gw	V	737.26	205	895.00
ALPHA_BNK.rte	V	0.47	0.1	0.57
CH_K2.rte	V	120.10	85	130.00



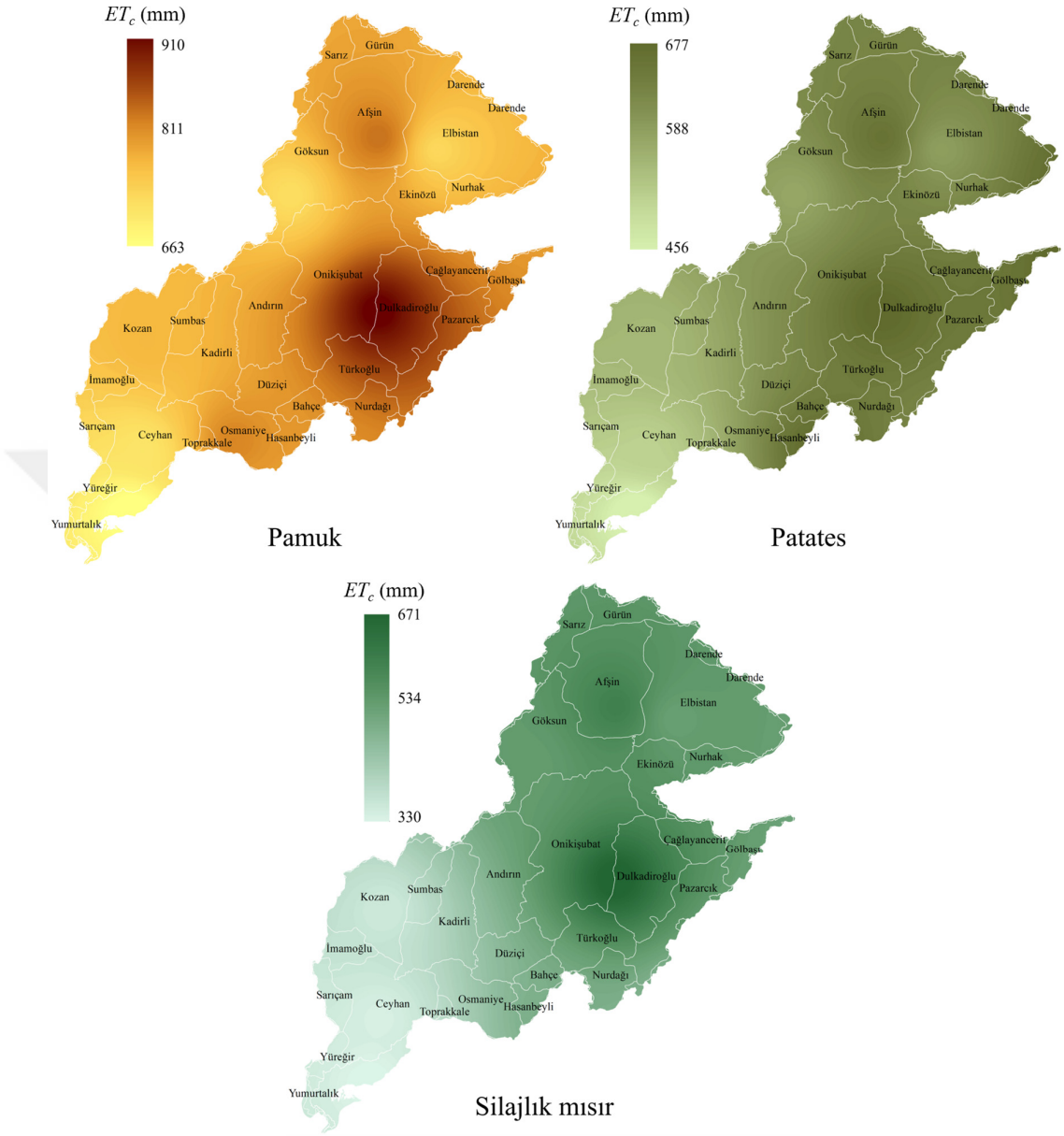
Ek 3. Arpa, ayçiçeği, k. Buğday ve silajlık mısırın TUİK verim istatistikleri ile modelin karşılaştırılması



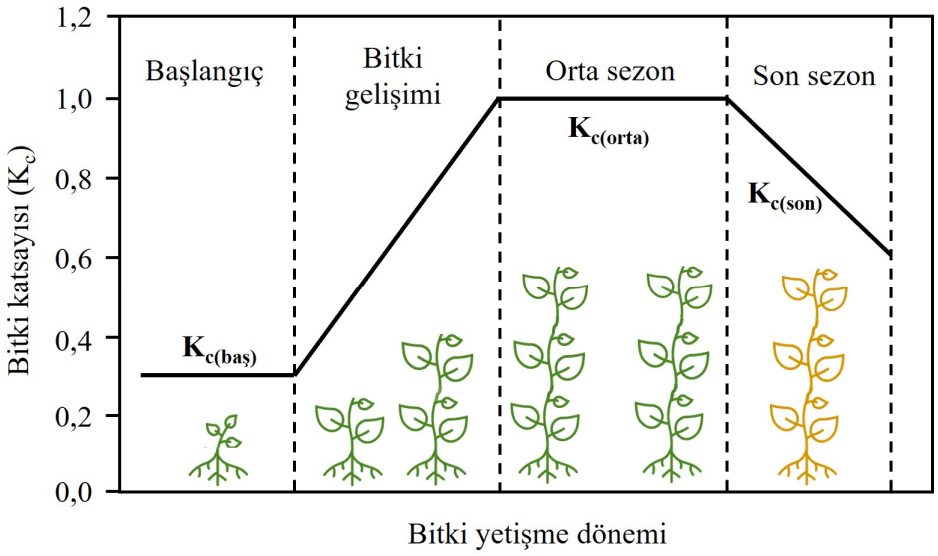
Ek 4. Pamuk, patates ve durum buğdayının TUİK verim istatistikleri ile modelin karşılaştırılması



Ek 5. Arpa ayçiçeği, k. buğday ve mısırın ET_c'lerinin Ceyhan Havzası'nda dağılımı (TAGEM 2017)



Ek 6. Pamuk, patates ve silajlık mısırın ETc'lerinin Ceyhan Havzası'nda dağılımı (TAGEM 2017)



Ek 7. Bitki büyüme dönemleri ve bitki katsayısı
(Irmak (2008) ve Avanoz (2020)'dan uyarlanmıştır.)

Ek 8. Farklı senaryolar altında, havza genelindeki yeşil, mavi, gri ve toplam hacimsel su ayak izlerinin karşılaştırılması (10^6 m^3)

SA Senaryoları	Yeşil SA	Mavi SA	Gri SA	Toplam SA
S0	883	969	777	2629
S1	784	617	614	2015
S2	839	569	611	2019
S3	872	548	608	2028
S4	900	531	613	2044
S5	947	516	622	2085
S6	1055	505	648	2207

Ek 9. S1 optimizasyon senaryosuna göre ürünlerin ilçelerdeki ekim alanları (da)

İlçe	Arpa	Ayçiçeği	K. buğday	D. Buğdayı	Mısır	Pamuk	Patates	S. Mısır
Afşin	4925	0	265	980	2202	0	0	0
Andırın	0	3868	4701	0	1454	0	0	0
Bahçe	0	0	0	0	0	0	0	0
Çağlayancerit	5806	0	2062	0	0	0	0	0
Ceyhan	0	0	48926	0	454	10976	0	3476
Darende	0	0	0	0	4	0	0	0
Dulkadiroğlu	0	0	12187	2927	378	0	0	0
Düziçi	0	507	0	0	50	0	0	0
Ekinözü	3	0	3478	934	33	0	0	0
Elbistan	6836	0	6677	11552	49	0	0	0
Göksun	0	0	2463	3679	9928	0	0	0
Gölbaşı	246	0	0	0	0	0	0	0
Gürün	0	0	0	0	92	0	0	0
Hasanbeyli	0	0	830	0	0	0	0	0
İmamoğlu	0	0	255	0	0	14914	0	8
Kadirli	0	3208	0	0	12416	183	2	24
Kozan	0	0	3905	0	29602	11081	132	2114
Nurdağı	0	0	0	0	0	0	0	0
Nurhak	91	0	4055	0	0	0	0	0
Onikişubat	0	0	45687	4952	325	0	0	0
Osmaniye	0	6293	162	0	2078	0	0	488
Pazarcık	0	0	0	0	0	0	0	0
Sarıçam	0	0	11946	0	0	8745	0	0
Sarız	0	0	0	0	2121	0	0	0
Sumbas	0	0	0	0	5532	0	1271	1655
Toprakkale	0	0	0	0	1387	0	0	1960
Türkoğlu	0	0	3550	0	0	0	0	0
Yumurtalık	0	0	5647	0	0	0	0	0
Yüreğir	0	0	6703	0	0	11	0	0

Ek 10. S2 optimizasyon senaryosuna göre ürünlerin ilçelerdeki ekim alanları (da)

İlçe	Arpa	Ayçiçeği	K. buğday	D. Buğdayı	Mısır	Pamuk	Patates	S. Mısır
Afşin	8	0	0	27	2202	0	0	0
Andırın	0	3024	4533	0	1224	0	0	0
Bahçe	0	0	0	0	0	0	0	0
Çağlayancerit	5690	0	0	0	0	0	0	0
Ceyhan	0	0	69736	0	460	11001	0	3470
Darende	0	0	0	0	4	0	0	0
Dulkadiroğlu	0	0	1408	2006	1206	0	0	0
Düziçi	0	731	0	0	50	0	0	0
Ekinözü	2337	0	447	676	291	0	0	0
Elbistan	7057	0	24	13160	49	0	0	0
Göksun	0	0	1899	3679	10353	0	0	0
Gölbaşı	246	0	0	0	0	0	0	0
Gürün	0	0	0	0	126	0	0	0
Hasanbeyli	0	0	0	0	0	0	0	0
İmamoğlu	0	0	255	0	0	14891	0	0
Kadirli	0	4064	906	0	10775	183	2	24
Kozan	0	0	4442	0	29602	11150	174	2073
Nurdağı	0	0	0	0	0	0	0	0
Nurhak	2834	0	469	140	0	0	0	0
Onikişubat	0	0	44099	5203	1060	0	0	0
Osmaniye	0	5959	231	0	2134	0	0	432
Pazarcık	0	0	0	0	0	0	0	0
Sarıçam	0	0	12090	0	0	8601	0	0
Sarız	0	0	0	0	2125	0	0	0
Sumbas	0	147	0	0	5380	0	1232	1667
Toprakkale	0	0	0	0	1275	0	0	2072
Türkoğlu	0	0	3550	0	0	0	0	0
Yumurtalık	0	0	5854	0	0	0	0	0
Yüreğir	0	0	10836	0	0	88	0	0

Ek 11. S3 optimizasyon senaryosuna göre ürünlerin ilçelerdeki ekim alanları (da)

İlçe	Arpa	Ayçiçeği	K. buğday	D. Buğdayı	Mısır	Pamuk	Patates	S. Mısır
Afşin	0	0	0	0	2464	0	0	0
Andırın	0	3119	0	0	1130	0	0	0
Bahçe	0	0	0	0	0	0	0	0
Çağlayancerit	5806	0	0	0	0	0	0	0
Ceyhan	0	2311	86267	0	495	8955	0	3435
Darende	0	0	0	0	4	0	0	0
Dulkadiroğlu	0	0	1408	2865	191	0	0	0
Düziçi	0	391	0	0	134	0	0	0
Ekinözü	2064	0	0	934	33	0	0	0
Elbistan	7107	0	0	11612	49	0	0	0
Göksun	0	1	1309	3671	10518	0	0	0
Gölbaşı	246	0	0	0	0	0	0	0
Gürün	0	0	0	0	621	0	0	0
Hasanbeyli	0	0	0	0	0	0	0	0
İmamoğlu	0	178	764	0	0	17076	0	0
Kadirli	0	4066	910	0	10773	183	1	25
Kozan	0	37	5678	0	29977	11152	676	1570
Nurdağı	0	0	0	0	0	0	0	0
Nurhak	2933	0	0	0	0	0	0	0
Onikişubat	0	0	31656	6035	232	0	0	0
Osmaniye	0	3707	231	0	2220	0	0	332
Pazarcık	0	0	0	0	0	0	0	0
Sarıçam	0	0	11935	0	0	8672	0	0
Sarız	0	0	0	0	3446	0	0	0
Sumbas	0	251	0	0	5302	0	708	2169
Toprakkale	0	0	0	0	1151	0	0	2167
Türkoğlu	0	0	3550	0	0	0	0	0
Yumurtalık	0	0	5854	0	0	0	0	0
Yüreğir	0	0	10851	0	0	79	0	0

Ek 12. S4 optimizasyon senaryosuna göre ürünlerin ilçelerdeki ekim alanları (da)

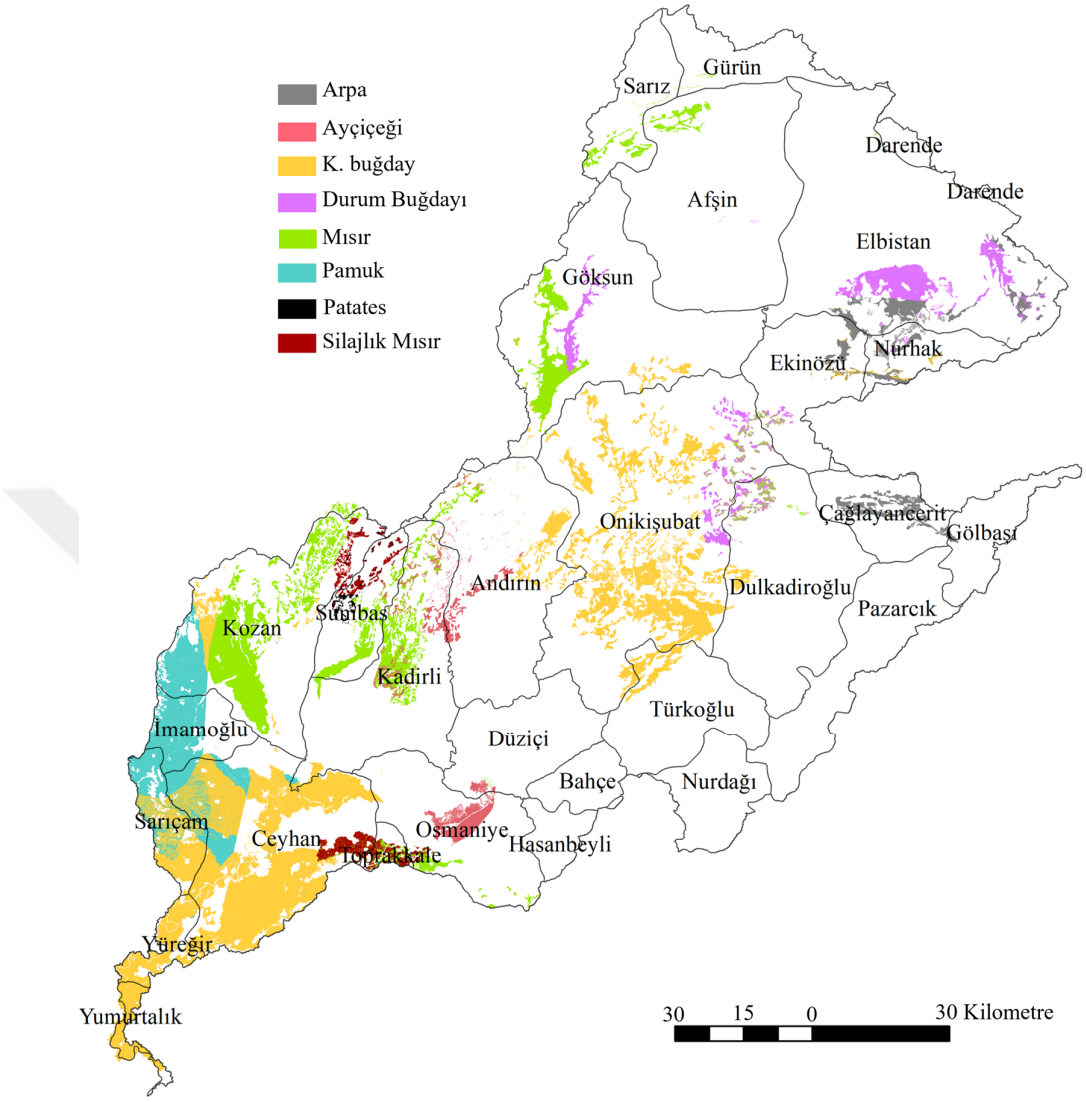
İlçe	Arpa	Ayçiçeği	K. buğday	D. Buğdayı	Mısır	Pamuk	Patates	S. Mısır
Afşin	0	0	0	0	2956	0	0	0
Andırın	0	3141	0	0	1036	607	0	0
Bahçe	0	0	0	0	0	0	0	0
Çağlayancerit	5806	0	0	0	0	0	0	0
Ceyhan	0	2619	90723	0	495	4210	0	3435
Darende	0	0	0	0	0	0	0	0
Dulkadiroğlu	0	0	1408	3076	0	0	0	0
Düziçi	0	0	0	0	0	865	0	0
Ekinözü	68	0	0	966	0	0	0	0
Elbistan	9412	0	0	10997	0	0	0	0
Göksun	0	0	0	3679	10578	0	0	0
Gölbaşı	246	0	0	0	0	0	0	0
Gürün	0	0	0	0	970	0	0	0
Hasanbeyli	0	0	0	0	0	0	0	0
İmamoğlu	0	178	764	0	0	22888	0	0
Kadirli	0	7355	4926	0	7476	183	22	4
Kozan	0	0	4851	0	31874	12519	698	1549
Nurdağı	0	0	0	0	0	0	0	0
Nurhak	2597	0	0	0	0	0	0	0
Onikişubat	0	0	22383	6253	14	0	0	0
Osmaniye	0	0	251	0	2144	0	0	408
Pazarcık	0	0	0	0	0	0	0	0
Sarıçam	0	920	14396	0	0	5291	0	0
Sarız	0	0	0	0	5571	0	0	0
Sumbas	0	366	403	0	5447	0	645	2244
Toprakkale	0	0	0	0	1194	0	0	2123
Türkoğlu	0	0	3550	0	0	0	0	0
Yumurtalık	0	0	5854	0	0	0	0	0
Yüreğir	0	0	10931	0	0	0	0	0

Ek 13. S5 optimizasyon senaryosuna göre ürünlerin ilçelerdeki ekim alanları (da)

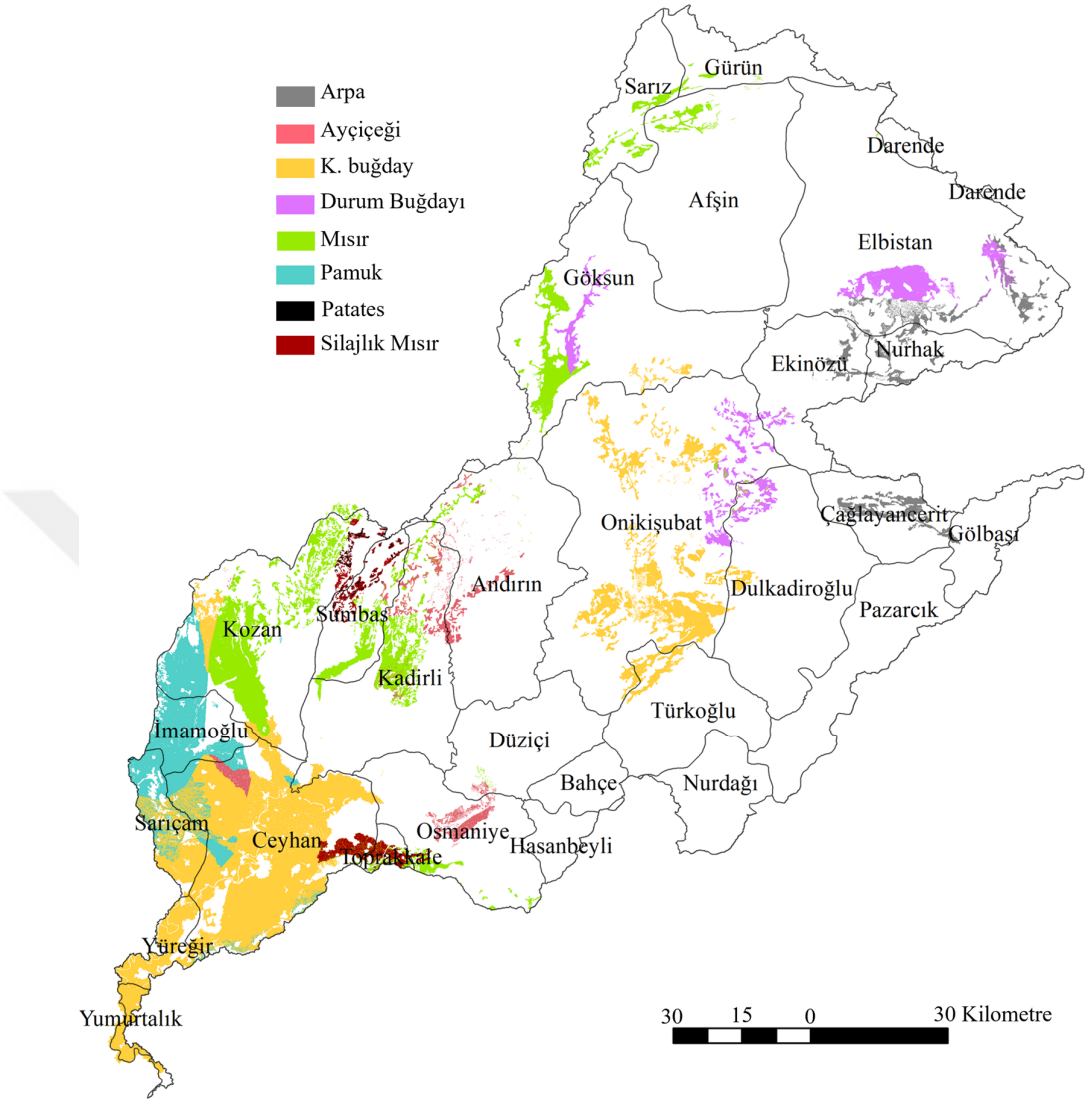
İlçe	Arpa	Ayçiçeği	K. buğday	D. Buğdayı	Mısır	Pamuk	Patates	S. Mısır
Afşin	0	0	0	0	3057	0	0	0
Andırın	0	1897	0	0	189	607	0	0
Bahçe	0	0	0	0	0	0	0	0
Çağlayancerit	5806	0	0	0	0	0	0	0
Ceyhan	2133	0	91103	0	473	4323	0	3457
Darende	0	0	0	0	0	0	0	0
Dulkadiroğlu	0	0	1408	3076	0	0	0	0
Düziçi	0	0	0	0	0	865	0	0
Ekinözü	0	0	0	966	0	0	0	0
Elbistan	7365	0	0	2461	0	0	0	0
Göksun	0	0	0	3679	10558	0	0	0
Gölbaşı	246	0	0	0	0	0	0	0
Gürün	0	0	0	0	974	0	0	0
Hasanbeyli	0	0	0	0	0	0	0	0
İmamoğlu	0	0	942	0	0	22823	0	0
Kadirli	0	12377	16271	0	2235	183	2	24
Kozan	0	23	4985	0	34497	12525	462	1784
Nurdağı	0	0	0	0	0	0	0	0
Nurhak	19	0	0	9	0	0	0	0
Onikişubat	2582	0	8400	17495	14	0	0	0
Osmaniye	0	0	322	0	2146	0	0	420
Pazarcık	0	0	0	0	0	0	0	0
Sarıçam	85	0	15379	0	0	5228	0	0
Sarız	0	0	0	0	5571	0	0	0
Sumbas	0	717	2262	0	9170	0	924	1988
Toprakkale	0	0	0	0	1276	0	0	2071
Türkoğlu	0	0	1790	5	0	0	0	0
Yumurtalık	0	0	5854	0	0	0	0	0
Yüreğir	0	0	10931	0	0	0	0	0

Ek 14. S6 optimizasyon senaryosuna göre ürünlerin ilçelerdeki ekim alanları (da)

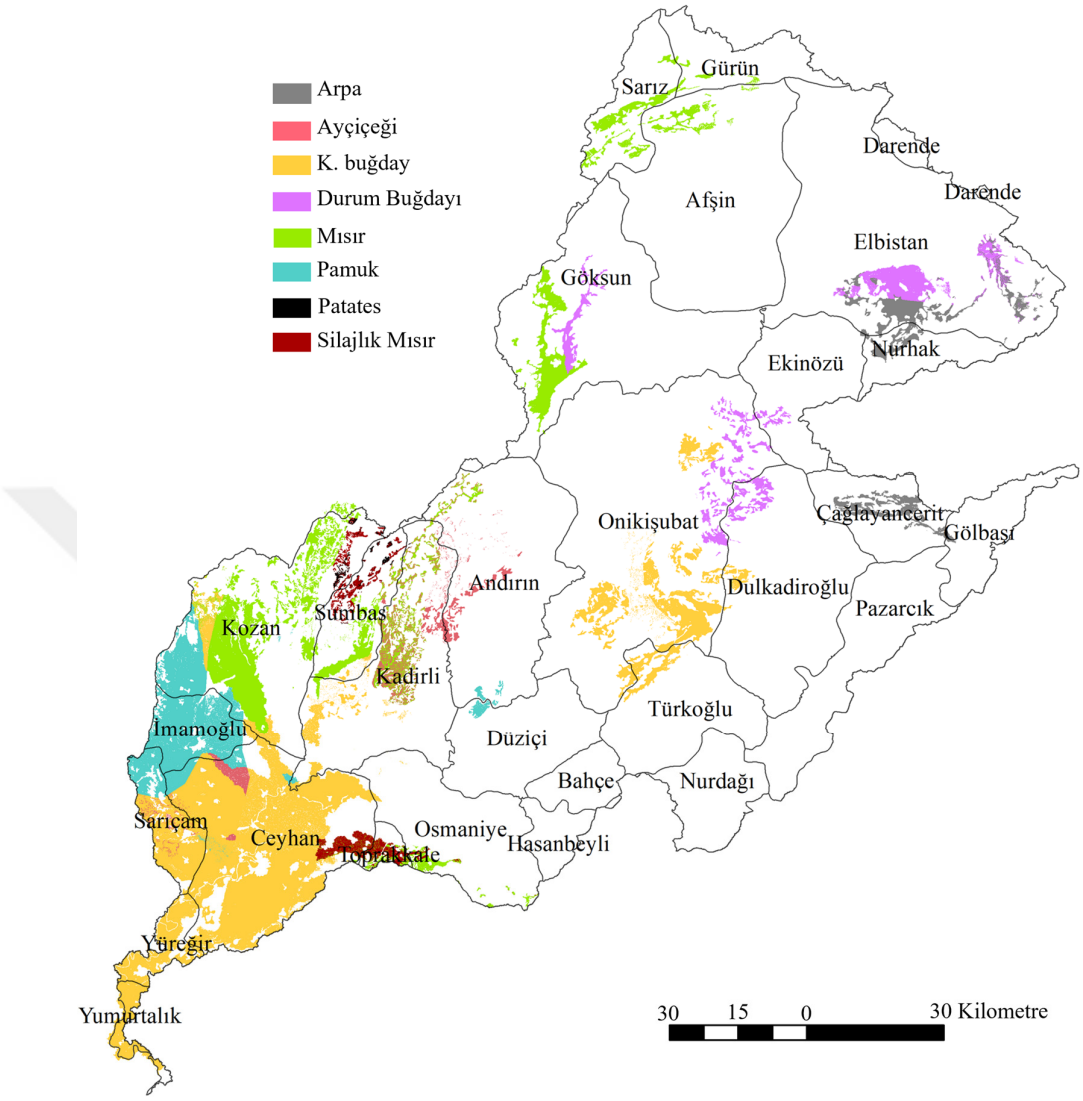
İlçe	Arpa	Ayçiçeği	K. buğday	D. Buğdayı	Mısır	Pamuk	Patates	S. Mısır
Afşin	0	0	0	0	3233	0	0	0
Andırın	0	839	0	542	574	607	0	0
Bahçe	0	0	0	0	0	0	0	0
Çağlayancerit	0	0	0	0	0	0	0	0
Ceyhan	6891	2053	83942	3413	495	4563	0	3435
Darende	0	0	0	0	0	0	0	0
Dulkadiroğlu	0	0	0	1408	20	0	0	0
Düziçi	0	0	1283	674	0	865	0	0
Ekinözü	0	0	0	0	0	0	0	0
Elbistan	0	0	0	0	0	0	0	0
Göksun	3181	0	0	339	0	0	0	0
Gölbaşı	0	0	0	0	0	0	0	0
Gürün	0	0	0	0	1083	0	0	0
Hasanbeyli	0	0	0	0	0	0	0	0
İmamoğlu	80	1908	1015	0	0	21341	0	0
Kadirli	0	5877	37681	0	6733	185	6	19
Kozan	89	0	3578	0	37254	17101	870	1212
Nurdağı	0	0	0	0	0	0	0	0
Nurhak	0	0	0	0	0	0	0	0
Onikişubat	2560	0	0	21698	11	0	0	0
Osmaniye	0	0	3811	0	1636	32	0	930
Pazarcık	0	0	0	0	0	0	0	0
Sarıçam	5983	4603	8996	484	0	625	0	0
Sarız	0	0	0	0	5571	0	0	0
Sumbas	151	391	3048	0	10237	0	542	2337
Toprakkale	0	0	0	0	1566	0	0	1781
Türkoğlu	0	0	0	2786	0	0	0	0
Yumurtalık	0	0	5854	0	0	0	0	0
Yüreğir	470	0	10297	164	0	0	0	0



Ek 15. S2 senaryosuna göre Ceyhan Havzası'nda mahsul dağılımı



Ek 16. S3 senaryosuna göre Ceyhan Havzası'nda mahsul dağılımı



Ek 17. S4 senaryosuna göre Ceyhan Havzası'nda mahsul dağılımı

8. ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı :
Uyruğu :

EĞİTİM

Derece	Adı, İlçe, İl	Bitirme Yılı

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görevi

UZMANLIK ALANI

YABANCI DİLLER

YAYINLAR