

ANKARA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İKLİM DEĞİŞİKLİĞİNİN ROSSO, MORİTANYA'DAKİ ÇELTİK TARIMINDA  
SULAMA SUYU İHTİYACINA ETKİSİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Mohamed AMAH

TARIMSAL YAPILAR VE SULAMA ANA BİLİM DALI

ANKARA  
2026

Her hakkı saklıdır

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### İKLİM DEĞİŞİKLİĞİNİN ROSSO, MORİTANYA'DAKİ ÇELTİK TARIMINDA SULAMA SUYU İHTİYACINA ETKİSİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Mohamed AMAH

Ankara Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Tarımsal Yapılar ve Sulama Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Yusuf Ersoy YILDIRIM

Bu çalışma Moritanya'nın Rosso bölgesinde çeltik tarımı için gerekli su miktarına iklim değişikliğinin etkisi incelemektir, Senegal Nehri Vadisi, gıda güvenliği için hayati öneme sahiptir, ancak Sahel'deki değişen hava ve iklim koşulları ürün yetiştirmeyi zorlaştırıyor. Rosso Bölgesinde çeltik (*Oryza sativa* L.) sulama suyu gereksinimleri (IRR) üzerindeki yaklaşan iklim değişikliğinin etkilerinin kapsamlı bir nicel değerlendirmesini sunmaktadır. İki radyasyon zorlama senaryosu (RCP 4.5 ve RCP 8.5) altında, 2020'den 2099'a kadar dört gelecek zaman diliminde ürün su dengesini simüle etmek için FAO CROPWAT 8.0 modelini ve Dünya Bankası İklim Değişikliği Bilgi Portalından alınan CMIP6 iklim projeksiyonlarını kullanmaktadır. Çalışma, Normal ve Karşı sezonlar ile farklı ekim tarihlerindeki su talebini analiz etmektedir. Artan hava sıcaklıkları ve yükselen bitki su tüketimi (ETc) nedeniyle, tüm senaryolarda sulama suyu ihtiyacının istikrarlı ve sürekli bir artış gösterdiğini ortaya koymaktadır. Sonuçlara göre RCP 4.5 yaklaşık %2-5, RCP 8.5 senaryosunda ise %12,4'e Artacağına göstermektedir, Karşı mevsimde yağışların su ihtiyacını karşılama kapasitesinin (yağış tamponu) azaldığı, normal mevsimin ise yağıştan bağımsız olduğu belirlenmiştir. Çalışma, su tasarrufu sağlamak ve termal stresi azaltmak için ekim tarihlerinin optimize edilmesini önermektedir Dolayısıyla en uygun tarihleri normal sezon için 5 Şubat, karşı sezon için ise 25 Ağustos olarak göstermektedir.

Çalışma, Rosso'da çeltik tarımının hidrolojik olarak sürdürülebilir olmasına rağmen, üretimin "su maliyetinin" önemli ölçüde artmasının muhtemel olduğunu ortaya koymaktadır. Bölgesel su dengesini ve verimi sürdürülebilirlik adına tarım politikalarının büyüme ve verime odaklı yöntemlere geçmesi gerekmektedir.

**Ocak 2026, 59 sayfa**

**Anahtar kelimeler:** İklim Değişikliği, Sulama Suyu Talebi, Çeltik (*Oryza sativa*), CROPWAT, RCP 4.5/8.5, Moritanya, Senegal Nehri Havzası

## ABSTRACT

Master Thesis

### CLIMATE CHANGE IMPACTS ON IRRIGATION WATER REQUIREMENTS FOR RICE CULTIVATION IN ROSSO, MAURITANIA

Mohamed AMAH

Ankara University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Agricultural Structures And Irrigation Department

Supervisor : : Prof. Dr. Yusuf Ersoy YILDIRIM

Senegale reaver is considered as the valley food of mauritania in this study we are examining the impacts of the climate changes of water requirement for rice cultivation It presents a comprehensive quantitative assessment of the impacts of impending climate change on irrigation water requirements (IRR) of rice (*Oryza sativa* L.) in the Rosso Region. It uses the FAO CROPWAT 8.0 model and CMIP6 climate projections from the World Bank Climate Change Information Portal to simulate crop water balance in four future time periods from 2020 to 2099 under two radiation forcing scenarios (RCP 4.5 and RCP 8.5). The study analyzes water demand during Normal and Counterseasons and at different planting dates. It reveals a steady and sustained increase in irrigation water requirements across all scenarios due to rising air temperatures and increasing plant water consumption (ETc). According to the results, RCP 4.5 shows an increase of approximately 2-5%, while in the RCP 8.5 scenario it increases to 12.4%. It was determined that the capacity of rainfall to meet water needs (rainfall buffer) decreases in the counterseason, while the normal season is independent of rainfall. The study suggests optimizing planting dates to conserve water and reduce thermal stress. Therefore, it indicates the most suitable dates as February 5th for the normal season and August 25th for the counterseason.

The study reveals that although rice farming in Rosso is hydrologically sustainable, the "water cost" of production is likely to increase significantly. To maintain regional water balance and yield, agricultural policies need to shift towards growth and yield-oriented methods.

**January 2026, 59 pages**

**Key Words:** Climate Change, Irrigation Water Demand, Rice (*Oryza sativa*), CROPWAT, RCP 4.5/8.5, Mauritania, Senegal River Basin

## ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR

Türkiye'deki lisansüstü eğitimimi sürdürebilmem için bana paha biçilmez bir destek ve fırsat sağlayan Türkiye Burslarına ve Yurtdışı Türkler ve Akraba Topluluklar Başkanlığı'na (YTB) en içten şükranlarımı sunarım.

Danışmanıma en derin ve yürekten teşekkürlerimi sunmak isterim, Prof. Dr. Yusuf Ersoy YILDIRIM, bu araştırma boyunca gösterdiği rehberlik, sabır ve bilimsel öngörülerini için. Kendisinin uzmanlığı, Rosso'daki iklim değişikliği etkileri üzerine olan bu tezin şekillenmesinde hayati bir rol oynamakla kalmamış; aynı zamanda verdiği danışmanlık, CROPWAT simülasyonları ve veri analizi sırasında karşılaştığım her türlü zorluğun üstesinden gelmem için gereken motivasyonu da sağlamıştır.

Bu çalışmanın veri altyapısını sağlayan kurumlara, özellikle CMIP6 veri projeksiyonları için Dünya Bankası İklim Değişikliği Bilgi Portalı'na ayrıca teşekkür ederim.

Bana destek gösteren ve her daim arkamda olan aileme ve arkadaşlarıma derin minnetlerimi sunarım.

Mohamed Amah  
Ankara , Ocak 2026

## İÇİNDEKİLER

### TEZ ONAY SAYFASI

ETİK.....	i
ÖZET.....	ii
ABSTRACT .....	iii
ÖNSÖZ VR TEŞEKKÜR.....	iv
KISALTMALAR LİSTESİ.....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	viii
1. GİRİŞ .....	1
2. LİTERATÜR TARAMASI .....	3
2.1 RCP4.5–RCP8.5 Senaryoları Kapsamında CWD, IR ve WA’nın Orta- ve Uzun-Vadeli Dinamikleri ve Model Belirsizliği .....	4
2.2 Bölgesel CWD–IR–WA Projeksiyonları: Risk Değerlendirmesi ve Uygulanabilir Adaptasyon Stratejileri .....	5
2.3 Afrika’da Çeltik Üretimine İlişkin İklim Etkilerin Mekanizmaları ve Adaptasyon Seçenekleri .....	7
2.3.1 Afrika’da çeltik üzerine iklim etkisi çalışmalarının kapsamı, eksiklikleri ve model kısıtları.....	9
2.3.2 Çalışmanın amaçları ve ORYZA2000 tabanlı modelleme yaklaşımı .....	10
2.4 Vaka Çalışmaları.....	10
2.4.1 BSNR (Benin) — CROPWAT uygulaması .....	10
2.4.2 Ba nehri havzası .....	11
2.4.3 Amol (İran) — CROPWAT & HadCM3 projeksiyonları.....	13
2.5 M’Pourie (Rosso, Mauritania): Senegal Nehri Su Kalitesi ve Sulamaya Uygunluğu.....	14
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	17
3.1 Araştırma Metodolojisi Akış Şeması .....	17
3.1.1 Çalışma alanı .....	18
3.1.2 İklim verileri ve senaryolar .....	20
3.2 Yöntem .....	21
3.2.1 Referans evapotranspirasyonun (ET <sub>o</sub> ) hesaplanması .....	22
3.2.2 Bitki su tüketimi (ET <sub>c</sub> ) ve sulama suyu ihtiyacının belirlenmesi .....	23
3.2.3 Simülasyon senaryoları.....	24
4. BULGULAR ve TARTIŞMA.....	25

<b>4.1 Araştırma Bulguları.....</b>	<b>26</b>
<b>4.1.1 RCP 4.5 Kapsamında sulama ihtiyaçlarının değerlendirilmesi normal sezon (Ekim Tarihi: 05 Şubat).....</b>	<b>26</b>
<b>4.1.2 Normal sezon (Ekim Tarihi: 15 Şubat).....</b>	<b>28</b>
<b>4.1.3 Normal sezon ekim tarihi 25 Şubat .....</b>	<b>31</b>
<b>4.2 RCP 4.5 Karşı Mevsim Kapsamında Sulama İhtiyaçlarının Değerlendirilmesi .....</b>	<b>33</b>
<b>4.2.1 Karşı mevsim (Ekim Tarihi: 5 Ağustos) .....</b>	<b>33</b>
<b>4.2.2 Karşı sezon ekim tarihi: 15 Ağustos .....</b>	<b>34</b>
<b>4.2.3 Karşı mevsim ekim tarihi: 25 Ağustos .....</b>	<b>36</b>
<b>4.2.4 RCP 4.5 Normal sezon ve karşı sezon karşılaştırılması ve değerlendirmesi.....</b>	<b>37</b>
<b>4.3 RCP 8.5 NORMAL Mevsim Kapsamında Sulama İhtiyaçlarının Değerlendirilmesi .....</b>	<b>39</b>
<b>4.3.1 RCP 8.5 Normal sezon ekim tarihi: 05 Şubat.....</b>	<b>39</b>
<b>4.3.2 RCP 8,5 Normal sezon ekim tarihi: 15 Şubat.....</b>	<b>40</b>
<b>4.3.3 Normal sezon RCP 8,5 normal sezon ekim tarihi : 25 Şubat.....</b>	<b>42</b>
<b>4.3.4 RCP 8.5 Karşı sezon ekim tarihi: 5 Ağustos.....</b>	<b>44</b>
<b>4.3.5 RCP 8.5 Karşı sezon ekim tarihi: 15 Ağustos.....</b>	<b>45</b>
<b>4.3.6 RCP 8.5 Karşı mevsim ekim tarihi: 25 Ağustos .....</b>	<b>47</b>
<b>4.3.7 Normal sezonlarda sulama ihtiyaçlarının karşılaştırılması RCP 4.5 ve RCP 8.5 .....</b>	<b>48</b>
<b>4.3.8 Karşı sezon sulama gereksinimlerinin karşılaştırılması RCP 4.5 ve RCP 8.5 .....</b>	<b>50</b>
<b>4.3.9 Normal sezon sulama gereksinimlerinin karşılaştırma analizi RCP 4.5 ve RCP 8.5 .....</b>	<b>51</b>
<b>4.4 İklim Değişikliğine Karşı Alternatif Ürün Önerisi .....</b>	<b>53</b>
<b>5. SONUÇ.....</b>	<b>54</b>
<b>5.1 Politika ve Uygulama Önerileri .....</b>	<b>55</b>
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>57</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>59</b>

## KISALTMALAR LİSTESİ

CMIP6	(Coupled Model Intercomparison Project Phase 6) Bağlaşık Model Karşılaştırma Projesi - 6. Faz
CWR	(Crop Water Requirements ) Bitki Su İhtiyacı
ETc	(Crop Evapotranspiration ) Bitki Su Tüketimi / Bitki Evapotranspirasyonu
ETo	(Reference Evapotranspiration) Referans Evapotranspirasyon
FAO	(Food and Agriculture Organization of the United Nations) Birleşmiş Milletler Gıda ve Tarım Örgütü
GCM	(General Circulation Models) Genel Dolaşım Modelleri
GHG	(Greenhouse Gas )Sera Gazı
IPCC	(Intergovernmental Panel on Climate Change ) Hükümetler arası İklim Değişikliği Paneli
IWR	(Irrigation Water Requirement ) Sulama Suyu İhtiyacı
Kc	(Crop Coefficient ) Bitki Katsayısı
NIR	(Net Irrigation Requirement ) Net Sulama İhtiyacı
OMVS	(Organisation pour la Mise en Valeur du fleuve Sénégal) Senegal Nehri Kalkınma Örgütü
RCP	(Representative Concentration Pathways )Temsili Konsantrasyon Yolları
SONADE	(Société Nationale de Développement Rural )Ulusal Kırsal Kalkınmaşirketi - Moritanya
WBG	World Bank Group (Dünya Bankası Grubu)
°C	Santigrat Derece (Sıcaklık)
Ha	Hektar
Kg	Kilogram
Km	Kilometre
M	Metre
m <sup>3</sup>	Metreküp
Mm	Milimetre
Mm/decade	Milimetre/10 gün

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1 Araştırma metodolojisi akış şeması .....	18
Şekil 3.2 Köppen-Geigere göre Moritanya iklim sınıflandırması.....	18
Şekil 3.3 Moritanya aylık sıcaklık ve yağış ortalaması.....	19
Şekil 3.4 Araştırma alanı harita üzerinde .....	19
Şekil 3.5 Kc değerleri.....	23
Şekil 4.1 RCP 4.5 ve RCP 8.5 NRML sezon karşılaştırması.....	49
Şekil 4.2 MISIR bitkisi sulama gereksinimi .....	53

## ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1 Rosso bölgesine ait referans dönemi (1995-2014) Uzun yıllık ortalama iklim verileri .....	22
Çizelge 4.1 RCP 4.5 kapsamında Çeltik için öngörülen sulama gereksinimleri normal sezon ekim tarihi: 05 Şubat Rosso, Moritanya .....	27
Çizelge 4.2 RCP 4.5 normal sezon ekim tarihi: 15 Şubat .....	29
Çizelge 4.3 RCP 4.5 normal sezon, ekim tarihi: 25 Şubat .....	31
Çizelge 4.4 RCP 4.5 karşı sezon ekim tarihi: 05 Ağustos .....	33
Çizelge 4.5 RCP 4.5 karşı sezon, ekim tarihi 15 Ağustos .....	35
Çizelge 4.6 RCP 4.5 karşı sezon, ekim tarihi: 25 Ağustos .....	36
Çizelge 4.7 RCP 4.5 senaryosu altında normal sezon ve karşı sezon sulama suyu ihtiyaçlarının karşılaştırılması (mm/sezon) .....	38
Çizelge 4.8 RCP 8.5 Normal sezon ekim tarihi 05 Şubat .....	39
Çizelge 4.9 RCP 8.5 normal sezon ekim tarihi: 15 Şubat .....	41
Çizelge 4.10 RCP 8.5 Normal sezon ekim tarihi: 25 Şubat .....	43
Çizelge 4.11 RCP 8.5 Karşı sezon ekim tarihi: 05 Ağustos .....	44
Çizelge 4.12 RCP 8.5 Karşı sezon ekim tarihi: 15 Ağustos .....	46
Çizelge 4.13 RCP 8.5 Karşı sezon ekim tarihi: 25 Ağustos .....	47
Çizelge 4.14 Normal sezon RCP 4,5 VE RCP 8,5 karşılaştırılması .....	48
Çizelge 4.15 karşı sezon rcp 4,5 ve rcp 8,5 karşılaştırılması .....	51
Çizelge 4.16 Normal sezon sulama gereksinimlerinin karşılaştırma analizi (RCP 4.5 ve RCP 8.5 .....	52

## 1. GİRİŞ

Günümüzde iklim değışikliği, karşı karşıya olduğumuz en önemli çevresel zorluklardan biri olarak kabul edilmekte ve , tarım üzerindeki etkisi giderek daha da inkâr edilemez hale gelmektedir(IPCC, 2021). Dünyanın dört bir yanındaki çiftçiler, sıcaklıkların artması, yağışların tahmin edilemez olması ve buharlaşmanın artması nedeniyle su yönetimi konusunda sorunlar yaşamaktadır. Bu durum özellikle sulamaya dayalı tarım sistemleri için geçerlidir.

Bu değışkenler, çeltik gibi fazla su ihtiyacı olan bitkilerin üretimi için doğrudan bir tehdit oluşturur. Batı Afrika'nın tarımı büyük ölçüde yüzey sularına ve mevsimsel yağışlara bağlı olduğu için iklim değışikliği açısından bir "sıcak nokta" olarak kabul edilebilir (Niang vd., 2014). Güney Moritanya'nın Senegal Nehri kıyısında yer alan Rosso bölgesi ülkenin çeltik üretiminin merkezi olup bölge giderek daha fazla baskı altında kalmaktadır.

Meteorolojik verileri incelendiğinde , yağışların giderek daha az güvenilir hale geldiğini, ortalama sıcaklıkların yükseldiğini ve nehir akışlarının mevsimlere göre daha az öngörülebilir hale geldiğini göstermektedir. Tüm bunlar, Trarza bölgesinde çeltik tarımının uzun vadeli sürdürülebilirliğini riske atmaktadır (El Ezza vd., 2024).

Küresel iklim modelleri, Batı Afrika'da hem orta (RCP 4.5) hem de yüksek emisyonlu (RCP 8.5) senaryolarda tarım için su talebinde önemli bir artış olduğunu göstermektedir (Gbode vd., 2022). Araştırmalar, özellikle çeltik gibi çok fazla suya ihtiyaç duyan bitkiler için, tarım için mevcut su miktarı ile ihtiyaç duyulan su miktarı arasındaki farkın 2040'tan sonra çok daha büyük olacağını göstermektedir. Mevcut bölgesel su yönetim sistemlerinin bu eğilime uyum sağlamakta zorluk çekmesi riski oldukça yüksektir (Sultan ve Gaetani, 2018). Buna ek olarak, mevcut tarım yöntemleri genellikle bu artan kıtlığı hafifletmekte başarısız olmakta ve bu da yerel çiftçilerin uyum kapasitelerini iyileştirmesine acil ihtiyaç olduğunu ortaya koymaktadır (Sarr, 2015).

Çeltik üretimi Rosso ekonomisi için çok önemli olmasına rağmen, yeterince iyi planlama yapılmamaktadır. Mevcut altyapı ve sulama planlarının çoğu son 50 yılın iklim verilerine dayanmaktadır. Bu iklim verileri, önümüzdeki 50 yıl için geçerli olmayabilecektir. Bölgenin ortalama sıcaklıkların artmasına rağmen , bunun çeltik için tam olarak ne anlama geldiği bilinmemektedir. Çiftçiler ve planlamacılar, 2050 yılında bir hektar çeltik için şu andakinden ne kadar daha fazla suya ihtiyaç duyacağını bilmemektedir. Moritanya'nın bu duruma bir tedbir almaması halinde çeltik alanlarını Senegal Nehri'nin sürdürülebilir sınırlarının ötesine doğru genişletebilir.

Bu çalışmada, genel iklim uyarılarından kesin ve ölçülebilir sulama gereksinimlerine odaklanarak bu eksikliği gidermek hedeflenmiştir. Bu araştırmanın temel amacı, Rosso bölgesinde çeltik yetiştiriciliği için mevcut ve gelecekteki sulama suyu gereksinimlerini (IRR) incelemek ve bu gereksinimlerin çeşitli iklim değişikliği senaryoları altında nasıl dalgalanacağını analiz etmektir.

Araştırma, bunu başarmak için üç özel hedefe odaklanmaktadır:

Dünya Bankası'nın CMIP6 veri setindeki RCP 4.5 ve RCP 8.5 senaryolarını kullanarak sıcaklık, yağış, rüzgâr ve nemin 2020 ile 2099 yılları arasında nasıl değişeceğini incelemek (World Bank Group, 2024).

Çeltiğin yılın farklı zamanlarında ve ne zaman ekilmesi gerektiğini belirlemek için FAO CROPWAT 8.0 programını kullanmak (FAO, 2023).

Bu çalışma yalnızca akademik bir çalışma olmayıp, Senegal Nehri Vadisi'nin geleceği için gerçek dünyada öneme sahiptir. Bu çalışma gelecekteki su ihtiyaçlarını öngörerek ve yerel planlamacılar için önemli bir başvuru kaynağı oluşturacaktır. Rosso bölgesinde çeltik üretimini uzun vadede koruyacak ve iklim risklerini yönetecek bilimsel temelli planlar yapılmasına katkı sunacaktır.

## 2. LİTERATÜR TARAMASI

Bu bölüm, araştırma konusu ile ilgili önceki çalışmaları kapsamaktadır. Özellikle iklim değişikliği ve etkileri, iklim parametrelerinin tahmininde kullanılan modeller, bitkilerin ne kadar suya ihtiyacı olduğu ve sulama için ne kadar su gerekli olduğunu tahmin etmek için kullanılan teknikler ve çeltik yetiştiriciliğinde kısıtlı sulama teknikleri hakkında kaynaklar sunulmuştur.

İklim değişkenliği ve değişimi, Batı Afrika'daki tarımsal üretim ve su kaynakları yönetimini önemli ölçüde etkilemektedir. Bölgeye yönelik yapılan araştırmalar; Bitki Su Talebi (CWD), Sulama Suyu İhtiyacı (IR) ve Suyun Bulunabilirliği (WA) parametrelerinin mevcut durumunu ve gelecekteki değişimlerini ortaya koymuştur (Gbode vd., 2022). Bu analizlerde; tarımsal meteorolojik ve hidrolojik değişkenleri türetmek amacıyla gözlemlenen ve simüle edilen günlük yağış, minimum sıcaklık, maksimum sıcaklık ve buharlaşma verileri kullanılmıştır.

Gelecek projeksiyonlarında, üç farklı bölgesel iklim modelinden elde edilen yüksek çözünürlüklü veriler; Temsili Konsantrasyon Yolları (RCP) 4.5 ve 8.5 senaryoları altında değerlendirilmiştir. Mevcut CWD, IR ve WA özelliklerinin analizi, modellerden elde edilen ortalama çıktılarının, hâkim mekânsal desenleri başarılı bir şekilde yeniden ürettiğini göstermiştir. Ayrıca model, güney kıyısı boyunca uzanan nemli bölgeleri, kurak kuzey bölgelerinden bazı model sapmalarına rağmen doğru bir şekilde ayırt edebilmiştir.

Model sonuçları ayrıca, yıllık su temini döngüsünü ve su talebi eğrilerinin çift tepeli yapısını tutarlı bir şekilde yansıtmaktadır. Geleceğe yönelik projeksiyonlar incelendiğinde; Gbode vd. (2022) tarafından yapılan çalışmadan elde edilen sonuçlar, 21. yüzyılın sonuna doğru referans döneme kıyasla CWD'de ortalama 0.808 mm/gün ve IR'de 1.244 mm/gün artış olacağını öngörmektedir.

Model sonuçlarına göre; Bitki Su Talebi (CWD) ve Sulama Suyu İhtiyacında (IR) en yüksek artışın öngörüldüğü kritik bölgeler Senegal, Güney Mali ve Batı Burkina Faso

olarak belirlenmiştir. Genel projeksiyonlar, 21. yüzyılın sonuna doğru Suyun Bulunabilirliği (WA) değerlerinde ortalama-0.418 mm/gün oranında bir azalma olacağını tahmin etmektedir. WA parametresindeki en belirgin düşüşlerin ise Gine ve Batı Afrika'nın doğu kesimlerinde yoğunlaşacağı öngörülmektedir.

Mevcut yeraltı suyu kaynaklarının henüz tam kapasiteyle kullanılmıyor olmasına rağmen; küresel ısınmanın su arzını (WA) azaltma ve su talebini (CWD) artırma yönündeki tehdidi, sulama planlaması ve yönetim stratejilerinin ölçeğinin dikkatle belirlenmesini zorunlu kılmaktadır. Bu çalışmadan elde edilen bulgular, tarım ve su yöneticilerinin sulu tarım alanlarının sürdürülebilirliğini sağlamak adına geliştirecekleri stratejiler için kritik bir veri tabanı oluşturmaktadır (Gbode vd., 2022).

### **2.1 RCP4.5–RCP8.5 Senaryoları Kapsamında CWD, IR ve WA'nın Orta- ve Uzun-Vadeli Dinamikleri ve Model Belirsizliği**

Orta vadede, ortalama yıllık CWD ve IR'nin 0,6 mm artması beklenirken, RCP 4.5 ve RCP 8.5 projeksiyonları arasında kayda değer bir fark gözlenmemiştir. Yıllık CWD ve IR'deki artışın 21. yüzyılın sonlarına doğru devam etmesi öngörülmektedir. Ayrıca, RCP 8.5 senaryosunun, RCP 4.5'e kıyasla daha yüksek sulama gereksinimlerine yol açtığı vurgulanmıştır. İki senaryo arasındaki bu belirgin fark, sera gazı emisyonlarının azaltılmasının gelecekteki sulama suyu ihtiyaçlarını doğrudan etkileyeceğini göstermektedir.

Tespit edilen artan talep ve RCP 8.5 senaryosunun yarattığı güçlü etki, farklı lokasyonlar için yürütülen önceki çalışmalarla uyum içindedir (Gbode vd., 2022). Bölgedeki öngörülen değişiklikler; Gine ve Batı Afrika'nın doğu kesimlerinin çoğunda, özellikle Nijerya, Güney Benin ve Togo'da su varlığında (WA) bir düşüş olduğunu ortaya koymaktadır. Ancak yapılan istatistiksel analizler, yüzyılın sonu ve RCP 8.5 senaryoları için bu düşüşün istatistiksel olarak anlamlı düzeyde olmadığını göstermektedir (Gbode vd., 2022).

Ayrıca su varlığının (WA); Gine, Sierra Leone, Liberya, Güney Fildişi Sahili ve Güney Gana'nın bazı bölgelerinde, özellikle orta vadeli projeksiyonlarda ve RCP 8.5 senaryosu altında önemli ölçüde artacağı öngörülmektedir. Bireysel modeller arasında yapılan karşılaştırmalar, IR'deki artış eğilimi konusunda üç modelin de hemfikir olduğunu ve topluluk ortalamasıyla tutarlı sonuçlar verdiğini göstermektedir. Modeller arası duyarlılık incelendiğinde ise; CCLM modelinin iklim değişikliğine daha güçlü bir tepki verdiği, SMHI-RCA modelinin ise en düşük duyarlılığı gösterdiği belirlenmiştir (Gbode vd., 2022).

Benzer şekilde su varlığındaki (WA) öngörülen değişikliklerin karşılaştırılması da üç modelin yüzyılın sonuna kadar WA'daki düşüş konusunda hemfikir olduğunu, ancak bu sinyalin yakın gelecekte tutarlı olmadığını göstermektedir. Yakın gelecek projeksiyonlarında modeller arasında uyumsuzluk olması beklenmektedir; zira model belirsizliği ve içsel iklim değişkenliği bu dönemdeki belirsizliğin temel kaynaklarıdır. Yüzyıl sonu projeksiyonlarında ise senaryo belirsizliğinin baskın olduğu vurgulanmıştır (Gbode vd., 2022).

Ayrıca, gelecekteki yağış ve buharlaşma değişimlerinin, özellikle Sahel'de ve bölgenin büyük bir bölümünde çoğunlukla negatif olduğu belirtilmiştir. Bu düşüş orta ve uzak gelecek dönemlerinde yoğunlaşmakta ve istatistiksel olarak anlamlı hale gelmektedir. Bu sonuçlar, Batı Afrika için iklim projeksiyonlarının giderek daha sıcak ve kuru olduğunu gösteren geçmiş çalışmalarla da tutarlılık göstermektedir (Gbode vd., 2022). Bu iklim senaryoları altında Sulama Suyu İhtiyacının (IR) her iki gelecek dönemde de artacağı öngörülmektedir.

## **2.2 Bölgesel CWD–IR–WA Projeksiyonları: Risk Değerlendirmesi ve Uygulanabilir Adaptasyon Stratejileri**

Gbode vd. (2022), Batı Afrika'da CWD, IR ve WA parametrelerinin özelliklerini ve gelecekteki iklim değişikliğinin bu parametreler üzerindeki etkisini değerlendirmiştir. Araştırmacılar, mevcut ve gelecek dönemler için bu hidrolojik değişkenleri türetmek

amacıyla bölgesel iklim modeli simülasyon topluluklarını (RCM ensembles) kullanmışlardır.

Çalışmada; tarihsel bir dönemin (1976-2005), orta gelecek (2041-2070) ve uzak gelecek (2071-2100) olmak üzere iki farklı projeksiyon dönemiyle ve iki farklı emisyon senaryosu altında karşılaştırması yapılmıştır (Gbode vd., 2022). Bölgesel iklim modeli simülasyonlarından türetilen CWD, IR ve WA verileri, öncelikle mevcut özelliklerin yeniden üretilmesi aşamasında doğrulanmıştır.

Bölgesel iklim modeli simülasyonlarından türetilen CWD (Bitki Su Talebi), IR (Sulama Suyu İhtiyacı) ve WA (Su Varlığı) verileri, öncelikle mevcut özelliklerin yeniden üretilmesi aşamasında doğrulanmıştır. Sonuçlar, modelden türetilen çıktıkların topluluk ortalamasının, bitki su talebi ve sulama gereksiniminin hâkim mekânsal desenlerini başarılı bir şekilde yeniden ürettiğini göstermektedir. Özellikle Gine Körfezi kıyısındaki su fazlası veren alanlar, bazı model sapmalarına (bias) rağmen, 10° K enleminin kuzeyindeki su açığı olan bölgelerden doğru bir şekilde ayırt edilmiştir.

Topluluk modeli ayrıca yıllık su temini döngüsünü ve CWD ile IR eğrilerinin çift tepeli (bimodal) yapısını tutarlı bir şekilde simüle etmiştir. Projeksiyonlar, CWD ve IR değerlerinin gelecekteki daha sıcak iklim koşullarında artış göstereceğini ortaya koymaktadır. CWD ve IR parametrelerinde en yüksek artışın beklendiği bölgeler çoğunlukla Sahel kuşağında yer almaktadır. En güçlü artış, 21. yüzyılın sonunda ve RCP 8.5 senaryosu altında kaydedilmiştir.

Yapılan analizlere göre; yüzyılın sonuna kadar CWD'nin Savan ve Sahel bölgelerinde günde 0.75-1.05 mm; IR'nin ise yine aynı bölgelerin bazı kısımlarında günde 1-1.4 mm artması öngörülmektedir (Gbode vd., 2022).

Öte yandan, gelecekteki su varlığının (WA), özellikle yüzyılın sonunda ve RCP 8.5 senaryosu altında azalması beklenmektedir. RCP 4.5 senaryosunda; Gine, Sierra Leone, Liberya, Fildişi Sahili'nin güneyi ve Güney Gana'da düşüşler öngörülmektedir. Su

varlığındaki (WA) bu düşüş, özellikle Gine Sahili'nin güneydoğu kısımlarında daha belirgindir. Bölgedeki en büyük düşüş, RCP 8.5 senaryosu için yüzyılın sonunda Gine ve Batı Afrika'nın doğu kesimlerinin çoğunda günde 0.5-0.7 mm'ye varan oranlarda kaydedilmiştir.

Günümüzde bölgedeki kişi başına düşen su kaynağı potansiyeli, özellikle de yeraltı suyu rezervleri karşılaştırıldığında, Batı Afrika'nın Avrupa ve Asya'ya kıyasla daha fazla kaynağa sahip olduğu belirtilmektedir (Gbode vd., 2022).

Ancak bölgedeki sulu tarım için hem yüzey hem de yeraltı suyu kaynaklarının mevcut kullanım oranı, gelişmekte olan diğer bölgelere kıyasla oldukça düşüktür. Potansiyel kaynakların yetersiz kullanımı ile gelecekteki iklim tehditleri arasındaki bu denge göz önüne alındığında; sulamanın temkinli bir şekilde genişletilmesi ve suya daha az ihtiyaç duyan ürünlerin tercih edilmesi, yakın vadeli gıda güvenliğini arttırmak ve gelecekteki ürün kaybı riskini azaltmak adına önerilen temel uyum stratejileridir.

Sulama verimliliğinin artırılması gibi teknolojik adaptasyonlar da sorunları kısmen hafifletebilecek bir diğer stratejidir. Teknolojik açıdan mümkün olduğu takdirde, yeraltı suyunun etkin bir şekilde kullanılması; yüzey sulama suyu talebini düşürerek ve aşırı tuzlanma nedeniyle arazilerin kullanım dışı kalması riskini azaltarak, iklim değişikliğinin birçok olumsuz etkisini hafifletebilir (Gbode vd., 2022).

### **2.3 Afrika'da Çeltik Üretimine İlişkin İklim Etkilerin Mekanizmaları ve Adaptasyon Seçenekleri**

Van Oort ve Zwart (2018) tarafından yürütülen çalışma , İklim değişikliğinin Afrika'daki çeltik üretimi üzerindeki olası etkilerini nicel olarak değerlendiren öncü araştırmalardan biridir. Çalışmada; sulu tarım sistemleri (kurak ve yağışlı mevsim) ve yağmura dayalı sistemlerdeki (yayla ve ova) çeltik verimi üzerindeki etkiler simüle edilmiştir. Adaptasyon stratejisi olarak, daha yüksek sıcaklık toplamına ihtiyaç duyan çeltik çeşitlerinin kullanımı modellenmiştir. Dört farklı RCP iklim değişikliği senaryosu için

çeltik verimleri tahmin edilmiş ve verim düşüşlerinin temel nedenleri belirlenmiştir (van Oort ve Zwart, 2018).

Adaptasyon önlemleri alınmadığı takdirde, artan sıcaklıklar nedeniyle büyüme döneminin kısalmasının verim üzerinde olumsuz bir etkiye sahip olduğu gözlemlenmiştir (2000 başlangıç yılına kıyasla, 2070 yılında RCP 8.5 senaryosunda %24 azalma). Yüksek sıcaklık isteğine sahip çeşitlerin kullanılması durumunda ise büyüme döneminin uzunluğunun başlangıç koşullarıyla aynı kalacağı öngörülmektedir. Bu adaptasyon seçeneğiyle, yağmurla beslenen çeltik verimlerinin sınırlı bir miktar (%8) artacağı, ancak su kısıtlamalarına tabi olmaya devam edeceği belirtilmiştir (van Oort ve Zwart, 2018).

Doğu Afrika'da sulanan çeltik verimlerinin, daha uygun sıcaklık koşulları ve CO<sub>2</sub> gübrelmesi etkisiyle artış göstereceği tahmin edilmektedir. Batı Afrika'da ise yağışlı mevsimde sulanan çeltik veriminin, adaptasyonlu ve adaptasyonsuz durumlarda sırasıyla %21 veya %7 oranında değişeceği öngörülmektedir. Adaptasyon olmadan Batı Afrika'da kurak mevsimde sulanan çeltik veriminin %45 oranında azalacağı; adaptasyon önlemleriyle bu azalmanın önemli ölçüde hafifletilerek %15 seviyelerine çekileceği hesaplanmıştır (van Oort ve Zwart, 2018).

Bu düşüşün temel nedeninin, aşırı yüksek sıcaklıklarda fotosentez hızının azalması olduğu saptanmıştır. Ayrıca simüle edilen ısı kısırlığının (sterilite) kayda değer bir artış göstermediği ve verim düşüşünde belirleyici bir faktör olmadığı tespit edilmiştir (van Oort ve Zwart, 2018).

Bu bulguların çıkarımları aşağıdaki gibidir. Doğu Afrika'nın iklim değişikliğinden faydalanabilmesi için, daha uygun sıcaklıklardan ve artan CO<sub>2</sub> konsantrasyonlarından tam olarak faydalanmak amacıyla iyileştirilmiş su ve besin yönetimi gerekecektir. Batı Afrika için aşırı sıcaklıklarda fotosentez süreçleri ve ekim tarihlerini değiştirme gibi adaptasyon seçenekleri üzerine daha fazla araştırmaya ihtiyaç vardır (van Oort ve Zwart 2018).

### 2.3.1 Afrika'da çeltik üzerine iklim etkisi çalışmalarının kapsamı, eksiklikleri ve model kısıtları

Asya kıtası için sunulan kapsamlı iklim değişikliği etkisi çalışmaları, Afrika genelinde bugüne kadar sınırlı düzeyde kalmıştır. Sultan ve Gaetani (2016), Batı Afrika odaklı iklim değişikliği etkisi çalışmalarını incelemiş olup araştırmaların çoğunun çeltik dışındaki ürünler üzerinde yoğunlaştığını ortaya koymuştur (Sultan ve Gaetani, 2016).

Afrika'daki dokuz farklı tarım ürünü üzerine yapılan yakın tarihli bir başka çalışmada çeltik bitkisine yer verilmemiştir; bunun nedeninin çeltiğin Afrika'da nispeten küçük bir üretim payına sahip olması ve kullanılan modelin çeltik verimini simüle etme yeteneğinin bulunmaması olduğu belirtilmiştir (Rippke vd., 2016). Literatürde, Afrika'daki çeltik üretimi üzerindeki iklim değişikliği etkilerine odaklanan yalnızca üç yeni ve ülkeye özgü çalışma tespit edilmiştir. (Gerardeaux vd. (2012) ile Daccache vd. (2015), CERES-Rice modelini kullanmış ve sırasıyla Madagaskar ve Malavi'de iklim değişikliğinin çeltik üzerinde küçük çaplı olumlu etkileri olduğunu saptamışlardır (Gerardeaux vd., 2012; Daccache vd., 2015).

Adejuwon (2006) ise EPIC ürün modelini kullanarak Nijerya için yaptığı analizde; sıcaklık artışlarının +2/+3 °C seviyelerinde kalması durumunda verimin artacağını, ancak +4/+5 °C'lik değişimlerde verimin azalacağını öngörmüştür (Adejuwon, 2006). Liu vd. (2008) ve Lobell vd. (2008) tarafından yapılan iki küresel çalışma Batı ve Orta Afrika'daki çeltik veriminin iklim değişikliğiyle birlikte hafifçe azalacağını, Doğu ve Güney Afrika'daki verimin ise hafifçe artacağını tahmin etmiştir (Liu vd., 2008; Lobell vd., 2008).

Farklı modellerin kullanıldığı bu sınırlı sayıdaki çalışma, Afrika genelinde iklim değişikliğinin çeltik üzerindeki etkisine dair tutarlı veya kapsamlı bir projeksiyon sunmakta yetersiz kalmaktadır. Bu eksikliği gidermek amacıyla literatüre kazandırılan bu yeni çalışmada; daha fazla ülkeyi kapsayan ve standardize edilmiş (geliştirilmiş) tek bir model kullanılarak kapsamlı bir analiz ortaya konulmuştur (van Oort ve Zwart, 2018).

Bitki büyüme modelleri, farklı iklim senaryolarının olası etkilerini ölçmek için bir araç olarak kullanılabilir. Bu modeller, büyüme mevsimi boyunca birçok etkiyi ve fizyolojik etkileşimi bütünleştirir. Modellerde yer alan çok sayıda süreç, bazen verimdeki belirli değişikliklerin neden ortaya çıktığını daha az açık hale getirebilir. Olası iklim değişikliği etkilerini değerlendirmek için bir ürün büyüme modeli (ORYZA2000) kullanmanın yanı sıra; model, öngörülen verim artışlarının veya düşüşlerinin ana nedenlerini belirlemek için tanısal modda kullanılmıştır (van Oort ve Zwart, 2018).

### **2.3.2 Çalışmanın amaçları ve ORYZA2000 tabanlı modelleme yaklaşımı**

Çalışmanın temel amacı; iklim değişikliğinin Afrika'daki gelecekteki çeltik üretimi üzerindeki etkilerini simüle etmek ve bu etkilerin nedenlerini incelemektir. Bu kapsamda, ORYZA2000 modelinin uyarlanmış bir versiyonu (Van Oort vd., 2015) kullanılarak; yağışlı ve kurak mevsimlerde sulama sistemleri ile tipik ova ve yayla toprakları için yağmura dayalı sistemlerdeki çeltik verimleri simüle edilmiştir.

Dört iklim değişikliği senaryosunun tamamı için verim değişimleri, 2000'li yıllar ile 2070'li yıllar karşılaştırılarak analiz edilmiştir. Çiftçiler için bir adaptasyon seçeneği olarak, daha yüksek sıcaklık toplamına sahip çeşitlere geçişin etkileri de simüle edilmiştir. Sıcaklık toplamı, ürünün fenolojik aşamalar arasında ilerlemesi için ihtiyaç duyduğu kümülatif derece-gün sayısını ifade etmektedir (van Oort ve Zwart, 2018).

## **2.4 Vaka Çalışmaları**

### **2.4.1 BSBNR (Benin) — CROPWAT uygulaması**

Yarı kurak bölgelerde bitki su gereksinimlerini (CWR) anlamak; daha iyi sulama uygulamaları, planlama ve suyun verimli kullanımı için hayati önem taşımaktadır; zira bu bölgelerde yağış yoluyla su temini sınırlıdır. Batı Afrika'daki Benin'in Nijer Nehri (BSBNR) alt havzasında; çeltiğin (*Oryza sativa L.*) referans ETo ve gerçek bitki

evapotranspirasyon (ETc) değerleri ile sulama suyu gereksinimi CROPWAT modeli kullanılarak tahmin edilmiştir.

Çalışmada, 1942'den 2012'ye kadar olan uzun süreli iklim, bitki ve toprak verileri; Birleşmiş Milletler Gıda ve Tarım Örgütü'nün FAO-56 Sulama ve Drenaj Raporu'na dayanan CROPWAT modeli ile analiz edilmiştir. ETo'ı tahmin etmek için Penman-Monteith yöntemi kullanılmıştır. Çeltiğin fenolojik evrelerinden elde edilen bitki katsayıları (Kc); su dengesi yaklaşımıyla gerçek evapotranspirasyon (ETc) değerini ve sulama suyu gereksinimlerini (IR) tahmin etmek amacıyla modele uygulanmıştır.

Sonuçlar, BSBNR yıllık referans evapotranspirasyonunun (ETo) 1.967 mm olduğunu göstermiştir. En düşük aylık ETo değeri 123 mm ile yağmur mevsiminin ortasındaki ağustos ayında, en yüksek değer ise 210 mm ile kurak mevsimde (mart ayında) gözlenmiştir. Bitki evapotranspirasyonu (ETc) ve bitki sulama gereksinimleri; yağmur mevsiminde sırasıyla 651 mm ve 383 mm, kurak mevsimde ise sırasıyla 920 mm ve 1.148 mm olarak hesaplanmıştır. Bu bulgular ışığında, ilgili mevsimler için sulama projelerinin su kullanım verimliliği açasından planlanabileceği vurgulanmıştır (Bouraima vd., 2015).

#### **2.4.2 Ba nehri havzası**

İklim değişikliği ve mevcut su kaynakları kıtlığı bağlamında, tropikal nehir havzalarında su kaynakları yönetimi için sulama suyu gereksinimlerinin değerlendirilmesi ve tahmini hayati önem taşımaktadır. Ba Nehri havzasındaki dört alt havzada yer alan tarımsal ürünlerin mevcut sulama suyu gereksinimini belirlemek amacıyla CROPWAT 8.0 modeli, ArcGIS yazılımı ve CMhyd modeli ile birlikte kullanılmıştır. Ayrıca CMIP6 modelinin senaryoları altında 2100 yılına kadar gelecek projeksiyonları oluşturulmuştur.

İklim değişikliğinin etkisi altında, özellikle Aşağı Ba Nehri havzasındaki 4. alt havzada kurak aylarda sulama suyu gereksiniminin artma eğiliminde olduğu gözlemlenmiştir. Çeltik, dört alt havza arasında en yüksek su gereksinimine sahip ürün olarak belirlenmiştir. Bu durum, yerel yöneticiler için önemli bir zorluk teşkil etmektedir.

Araştırmadan elde edilen sonuçların; ürün özellikleri, doğal koşullar, sosyo-ekonomik faktörler ve iklim değişikliğine uyum ile örtüşen sulama stratejilerinin planlanması için bir temel oluşturabileceği değerlendirilmektedir. Ayrıca bu çalışmanın; tropikal havzalarda su kaynaklarının rasyonel yönetimi ve kullanımında karar vericilere yardımcı olmak, her ürün türü için uygun sulama yöntemlerini seçmek ve ulusal planlamada ekonomik hesaplamaları dikkate almak adına referans niteliği taşıdığı vurgulanmıştır (Phan ve Do, 2025)

Ölçüm ve CROPWAT verilerine dayanılarak, Ba Nehri Havzası'ndaki dört alt havza için kapsamlı bir girdi veri seti oluşturulmuştur. Mevcut iklim koşullarında hesaplanan su talepleri arasında belirgin farklılıklar saptanmıştır. Analiz sonuçlarına göre yıllık ortalama su talebi; 1. alt havzada 1297 mm, 2. alt havzada 1394 mm, 3. alt havzada 1209 mm ve en yüksek talep ile 4. alt havzada 1417 mm olarak belirlenmiştir. CMIP6 senaryoları kapsamındaki gelecek projeksiyonları, alt havzalarda su ihtiyacının artacağına işaret etmekte olup, 4. alt havza için bu artışın senaryoya göre %12,1 ile %30,8 arasında değişeceği öngörülmüştür (Phan ve Do, 2025).

Bu bütünleşmiş yaklaşımın, tropikal nehir havzalarındaki sulama suyu taleplerinin hesaplanmasında ve tahmin edilmesinde etkili olduğu ortaya konulmuştur. CMIP6 modelinden elde edilen iklim verileri, havzadaki çeşitli mahsullerin sulama ihtiyaçlarını tahmin etmek amacıyla girdi senaryoları olarak kullanılmıştır. Genel değerlendirmede; sulama suyu ihtiyaçlarının, yağışlı ve kurak mevsimler arasında ve tropikal nehir havzalarındaki alt havzalar özelinde büyük dalgalanmalar gösterdiği belirlenmiştir. Bu durumun, su kaynaklarının söz konusu alt havzalara tahsisini güçleştirdiği vurgulanmıştır.

Hesaplama sonuçları, 4. alt havzanın bölgedeki su kıtlığının en yoğun yaşandığı alan olduğunu göstermektedir. Gelecekte, iklim değişikliği etkisiyle dört alt havzanın tamamında su ihtiyacının artacağı tahmin edilmektedir. Genel su ihtiyacında en yüksek artış oranı 3. alt havzada gözlemlense de mutlak su ihtiyacı en yüksek olan 4. alt havza, özellikle çeltik üretimi için Mayıs-Ağustos ayları arasındaki kurak mevsimde kritik artışlar göstermiştir (Phan ve Do, 2025). Elde edilen veriler; farklı ürün desenleri ve alt

havzalar özelinde, özellikle kurak mevsimdeki su kaynakları yönetimi ve su dağıtımını için bilimsel bir temel oluşturmaktadır.

İklim değışikliği bağlamında elde edilen sonuçlar ayrıca; artan endüstriyel gelişme, kentleşme ve turizm faaliyetleri nedeniyle su kaynaklarının azalmasıyla birlikte, tarımsal su ihtiyacının karşılanması giderek daha zorlu hale geleceğine işaret etmektedir. Bu nedenle, Ba Nehri havzasında sürdürülebilir ekonomik kalkınmayı sağlamak adına 4. alt havzadaki ürün deseni hakkında daha detaylı çalışmaların yapılması önerilmektedir (Phan ve Do, 2025).

#### **2.4.3 Amol (İran) — CROPWAT & HadCM3 projeksiyonları**

Amol tarımsal meteoroloji istasyonunda, 2016-2045 yılları arasındaki çeltik su tüketimi ve sulama suyu ihtiyacı; HadCM3 modelinin A2 senaryosu kapsamındaki meteorolojik projeksiyonlarına dayanılarak tahmin edilmiştir. Bu süreçte, çeltik sulama suyu ihtiyacının belirlenmesinde bitki katsayısı Kc yaklaşımı kullanılmıştır. Referans evapotranspirasyon ETo FAO Penman-Monteith yöntemi ile hesaplanmış sulama suyu ihtiyacı ise yerel meteorolojik parametrelerle kalibre edilen CROPWAT modeli aracılığıyla simüle edilmiştir (Gilanipour ve Gholizadeh, 2016).

Elde edilen sonuçlar, gelecekte hem bitki su tüketiminin hem de sulama suyu ihtiyacının düşüş eğilimi göstereceğine işaret etmektedir. 2016-2045 döneminde, A2 senaryosu altında çeltik su tüketimi ve sulama suyu ihtiyacının %9,9'un üzerinde bir oranda azalacağı öngörülmüştür. Analizler, bitki su tüketimindeki düşüşün temel nedeninin yağış artışı olduğunu; sulama suyu ihtiyacındaki belirgin azalmanın ise artan yağışlar ve sıcaklıktaki hafif yükselişin birleşik etkisinden kaynaklandığını ortaya koymuştur (Gilanipour ve Gholizadeh, 2016).

## 2.5 M'Pourie (Rosso, Mauritania): Senegal Nehri Su Kalitesi ve Sulamaya Uygunluğu

Tarımsal üretimi belirleyen kritik faktörlerden biri, M'Pourie Ovası'nın ana kanalındaki sulama suyunun mevcudiyetidir. Bu faktörün hem ürün desenini hem de sulama alanlarının kapasitesini doğrudan etkilediği bilinmektedir. Moritanya'nın Rosso bölgesindeki ana Senegal Nehri kanalı, M'Pourie Ovası'ndan geçmektedir. Bu çalışma kapsamında; M'Pourie Ovası'ndaki ana kanaldan temin edilen ve tarımsal üretimde kullanılan suyun fizikokimyasal kalitesinin değerlendirilmesi amaçlanmıştır (El Ezza vd., 2024).

2021-2022 yılları arasında gerçekleştirilen izleme çalışmalarında; pH, sıcaklık, elektriksel iletkenlik (EC), tuzluluk, kalsiyum, magnezyum, sodyum, potasyum, amonyum, bikarbonat, klorür, nitrit, nitrat, azot, sülfat ve Sodyum Adsorpsiyon Oranı (SAR) parametreleri analiz edilmiştir.

Analiz sonuçları, çalışmanın metodolojisi gereği Fas sulama suyu kalite standartları ve FAO kriterleri referans alınarak değerlendirilmiştir. Yapılan ölçümlerde, sulama suyunun ortalama pH değerinin 7.51 olduğu ve nötr bir karakter sergilediği tespit edilmiştir. Ancak, ortalama nitrit (5,16 mg/L) ve amonyum (0,41 mg/L) değerlerinin referans alınan standartları aştığı belirlenmiştir. Suyun mineralizasyon seviyesinin düşük olduğu, ortalama 52.22  $\mu$ S/cm olarak ölçülen düşük elektriksel iletkenlik değeri ile ilişkilendirilmiştir (El Ezza vd., 2024).

M'Pourie Ovası'nda kullanılan Senegal Nehri suyunun analiz sonuçlarına göre; Sodyum Adsorpsiyon Oranı (SAR) ve elektriksel iletkenlik değerleri bakımından suyun C1S1 sınıfına girdiği saptanmıştır. Bu sınıflandırma, suyun düşük tuzluluğa sahip olduğunu ve alkalileşme riskinin düşük olması nedeniyle sulama suyu olarak kullanıma uygun olduğunu ortaya koymaktadır (El Ezza vd., 2024).

Birçok ülkede su talebi artık mevcut arzı aşmaktadır. Dünya nüfusu artmaya devam ettikçe, doğal su kıtlıklarının daha sık görüleceği öngörülmektedir (Gu vd., 2019; Hussain

vd., 2019). Araştırmalar, 2025 yılına kadar dünya çapında tahmini 3,5 milyon insanın su kıtlığıyla karşı karşıya kalabileceğini göstermektedir (Guterres, 2017). Sonuç olarak araştırmacılar, bu sorunu hafifletmek amacıyla geleneksel olmayan su kaynaklarını araştırmaya yönelmiştir.

Sulama, tatlı suyun ana tüketicisi olarak tanımlanmakta ve tarım arazilerindeki toplam tatlı su kullanımının yaklaşık %80'ini oluşturmaktadır (Rizzo vd., 2020). Bu oranın 2030 yılına kadar %15 daha artacağı tahmin edilmektedir (Guterres, 2017; Dünya Bankası, 2017). Bu durumun, Kuzey Afrika ve Orta Doğu gibi hâlihazırda kıtlıkla mücadele eden bölgeler başta olmak üzere, su krizlerini daha da derinleştireceği değerlendirilmektedir (El Ezza vd., 2024).

Çalışma, Moritanya'nın birincil tarım bölgesi olan Rosso'daki (Trarza) M'Pourie ovasında gerçekleştirilmiştir. 1980'lerde pilot çiftlik olarak kurulan ova, 1.500 hektarlık geniş bir alanı kaplamaktadır. Ovada, Senegal Nehri vadisinden beslenen bir makine dairesi ve bir pompa istasyonu bulunmakta olup, alan üç idari birime (tugaya) ayrılmıştır. Kooperatifler 850 hektarlık alanı yönetirken, kalan kısım 1.500 hektarlık alanı kapsamaktadır. Ovanın bulunduğu Trarza bölgesi, 16° 30' - 18° 30' enlemleri ile 14° - 16° boylamları arasında yer almakta olup, toplam yüzölçümü 33.000 km<sup>2</sup>'dir. Bölge, yoğun tarımsal faaliyetleriyle tanınmaktadır. Su örnekleme amacıyla, M'Pourie ovasının ana kanalının kenarı boyunca dokuz nokta seçilmiştir (El Ezza vd., 2024).

Farklı örneklerde gözlenen pH değerleri, Şekil 1'de gösterildiği gibi 6.9 ile 8.40 arasında değişmekte olup; bu değerler sulamada kullanılan suyun kalitesinin sağlanmasına ilişkin Fas yönetmeliklerine uygundur. PH seviyelerinin nötre yakın olması, sulama amaçları için avantaj sağlamaktadır. Benzer pH sonuçları; Kahimba vd. (2016), N'diaye vd. (2014) ve Nsiala Kimfuta (2012) tarafından da bildirilmiştir. Ayrıca, kaydedilen ortalama sıcaklık değeri 29,1 °C'dir ve bu değer, sulama suyu kalitesine ilişkin Fas yönetmelikleriyle uyumludur (El Ezza vd., 2024).

Rosso'daki M'Pourie ovasında tarım amaçlı kullanılan Senegal Nehri suyunun kalitesini değerlendirmeyi amaçlamıştır. Tarımsal uygulamaların yaygınlaşması nedeniyle yüzey

suyuna olan ihtiyacın artması göz önüne alındığında, bu husus büyük önem taşımaktadır. M'Pourie ovasından elde edilen bulgular, özellikle kabul edilebilir aralıkta kalan pH seviyeleri açısından önemli veriler sunmaktadır. Düşük mineralizasyon, suyun sulama için ideal olduğunu doğrularken; tuzluluk etkisi de genel tuzlulukla bağlantılı geçirgenlik sorunlarının bulunmadığını göstermektedir. Ancak tarım alanlarında gübre ve diğer kimyasalların aşırı kullanımının, sulama suyunda yüksek nitrit ve amonyum seviyelerine yol açtığı tespit edilmiştir (El Ezza vd., 2024).

### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

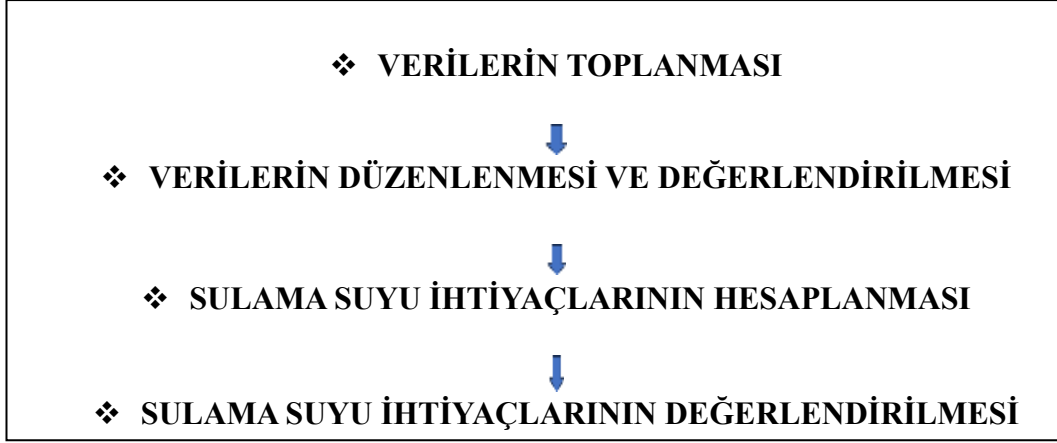
#### 3.1 Araştırma Metodolojisi Akış Şeması

Moritanya'nın Rosso bölgesine ait 1950-2022 yılları arasındaki sıcaklık, yağış ve rüzgâr hızı verileri ile RCP4.5 ve RCP8.5 iklim senaryolarına dayalı projeksiyonlar analiz edilmiştir.

Bölgedeki bitki su tüketimi ve sulama suyu ihtiyacını belirlemek amacıyla, meteoroloji istasyonundan temin edilen uzun yıllık gözlem verileri temel materyal olarak kullanılmıştır. Gelecek projeksiyonlarında; 2020-2039, 2040-2079 ve 2080-2099 dönemlerini kapsayan model çıktıları değerlendirilmiştir. \* Bitki su tüketimi hesaplamalarında, FAO-56 (Bölüm 6) metodolojisinde tanımlanan 'Tek Ürün Katsayısı Kc' yaklaşımı esas alınmıştır (Allen vd., 1998). Bu kapsamda, çeltik başlangıç Kcini gelişim, orta Kcmid ve son dönem Kcend katsayıları literatürden sağlanmıştır. Ancak modelin bölgeyi tam temsil edebilmesi adına; büyüme dönemlerinin uzunlukları ve ekim tarihleri standart tablolardan değil, Rosso bölgesindeki yerel çiftçilerin fiili ekim pratikleri ve Moritanya Tarım Kooperatiflerinin önerdiği fenolojik takvim verileriyle sentezlenerek oluşturulmuştur.

Sulama suyu ihtiyacının hesabında CROPWAT 8.0 ve CLIMWAT yazılımları kullanılmıştır.

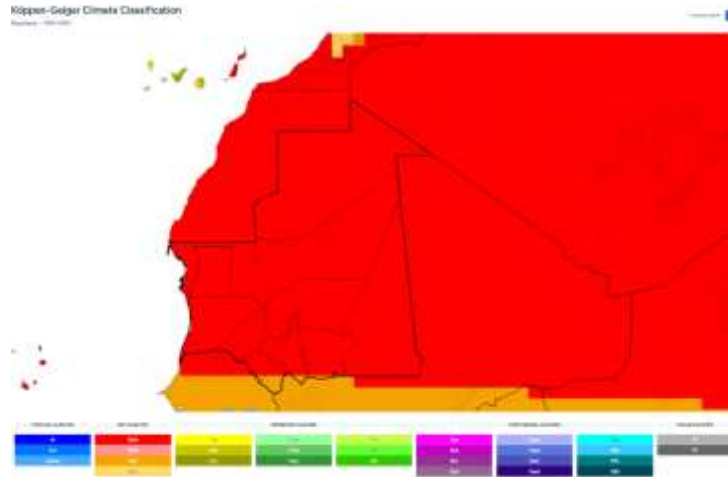
Çalışmada izlenen aşamalar ve metodolojik kurgu Şekil 3.1'de verilen akış diyagramında özetlenmiştir.



Şekil 3.1 Araştırma metodolojisi akış şeması

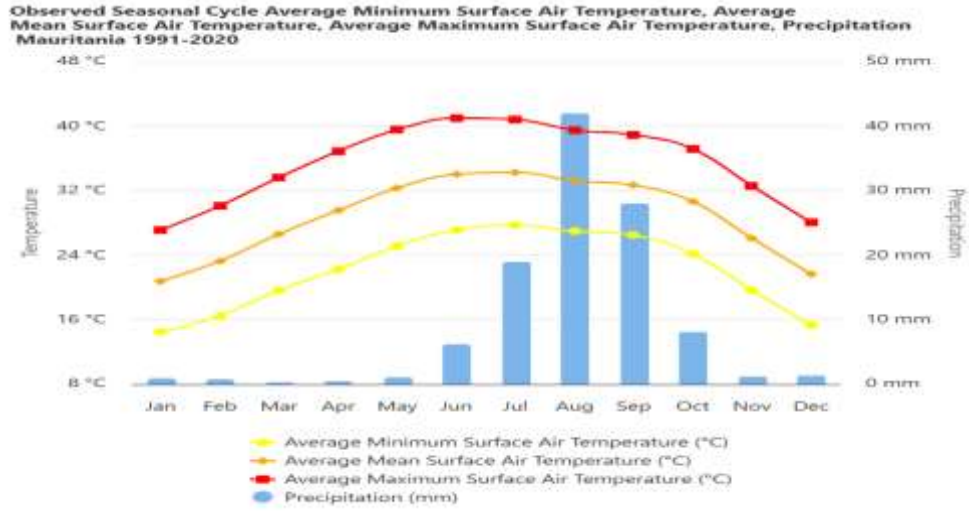
### 3.1.1 Çalışma alanı

Araştırma, Moritanya'nın güneybatısında, Senegal Nehri kıyısında yer alan Trarza bölgesine bağlı Rosso şehrinde yürütülmüştür. Çalışma alanı olarak, bölgenin en önemli sulu tarım merkezlerinden biri olan M'Pourie Ovası seçilmiştir. Yaklaşık olarak 16°30' Kuzey enlemi ve 15°48' Batı boylamı koordinatlarında yer alan bölge, Sahel kuşağında bulunmakta olup yarı kurak iklim özelliklerine sahiptir. Yıllık yağış miktarı düşüktür ve yağışlar genellikle Haziran-Eylül ayları arasındaki kısa bir mevsime yoğunlaşmıştır. Bu nedenle tarımsal üretim, büyük ölçüde Senegal Nehri'nden sağlanan yüzey sulamasına bağımlıdır. (El Ezza vd., 2024).



Şekil 3.2 Köppen-Geigere göre Moritanya iklim sınıflandırması

Bölgenin iklimsel karakteristiği, Dünya Bankası İklim Değişikliği Bilgi Portalı (CCKP) verileriyle detaylandırılmıştır. Şekil 3.2'de görüldüğü üzere çalışma alanı, Sıcak Çöl İklimi (BWh) ile Sıcak Yarı-Kurak İklim (BSh) geçiş kuşağında yer almaktadır. Şekil 3.2'deki 1991-2020 dönemi verileri incelendiğinde, ortalama hava sıcaklıklarının yılın büyük bölümünde 30°C'nin üzerinde seyrettiği görülmektedir. Yağış rejimi ise tek modlu (unimodal) bir dağılım göstermekte olup, yıllık yağışın neredeyse tamamı Ağustos ve Eylül aylarında düşmektedir. Bu klimatolojik yapı, bölgedeki tarımsal takvimi Normal Sezon (Kurak/Sulama) ve Karşı Sezon (Yağışlı) olmak üzere iki ana döneme ayırmaktadır.



Şekil 3.3 Moritanya aylık sıcaklık ve yağış ortalaması



Şekil 3.4 Araştırma alanı harita üzerinde

### 3.1.2 İklim verileri ve senaryolar

Çalışmada kullanılan tarihsel ve geleceğe yönelik iklim verileri Dünya Bankası İklim Değişikliği Bilgi Portalı veri tabanından temin edilmiştir (World Bank Group, 2024). Veri seti Bağlaşık Model Karşılaştırma Projesi Faz 6 (CMIP6) kapsamında üretilen küresel iklim modellerinin çıktularından oluşmaktadır. CMIP6 modellerinde iklim projeksiyonları Sosyo-Ekonomik Gelişme Yolları (SSP) ile entegre edilmiş olup çalışmada kullanılan senaryolar literatürdeki Temsili Konsantrasyon Yolları (RCP) ile ilişkilendirilmiştir (O'Neill vd., 2016).

Gelecek projeksiyonları için Hükümetler arası İklim Değişikliği Paneli (IPCC) tarafından tanımlanan ve atmosferdeki sera gazı birikimine bağlı radyatif zorlama düzeylerini ifade eden iki temel senaryo seçilmiştir (Van Vuuren vd., 2011):

- **SSP2-4.5 (RCP 4.5):** Toplam radyatif zorlamanın 2100 yılında  $4.5 \text{ W/m}^2$  seviyesinde dengelendiği stabilizasyon senaryosudur (Thomson vd., 2011). Bu senaryo sera gazı emisyonlarının yüzyıl ortasına kadar artış gösterip ardından uygulanan azaltım teknolojileri ve stratejileri ile düşüşe geçtiği bir projeksiyonu temsil etmektedir.
- **SSP5-8.5 (RCP 8.5):** Artan sera gazı emisyonlarına bağlı olarak radyatif zorlamanın 2100 yılında  $8.5 \text{ W/m}^2$  seviyesine ulaştığı yüksek emisyon senaryosudur (Riahi vd., 2011). Literatürde işlerin olağan akışı (business-as-usual) olarak tanımlanan bu senaryo herhangi bir iklim politikasının uygulanmadığı koşullarda oluşacak en yüksek enerji yoğunluğunu ve sera gazı birikimini ifade etmektedir.

Analizler 2020-2039, 2040-2059, 2060-2079 ve 2080-2099 olmak üzere dört farklı gelecek dönemini kapsamaktadır. Referans dönemi olarak 1950-2014 yılları arasındaki tarihsel veriler esas alınmıştır. Bitki su tüketimi ve sulama suyu ihtiyacını belirlemek amacıyla FAO tarafından geliştirilen CROPWAT 8.0 yazılımı kullanılmıştır (FAO, 2023).

İklim verilerinin modele entegrasyonu ve istatistiksel dönüşümleri CLIMWAT 2.0 aracı ile sağlanmıştır

### 3.2 Yöntem

Çeltik bitkisinin (*Oryza sativa L.*) farklı iklim senaryoları ve ekim tarihlerindeki su gereksinimleri, uluslararası literatürde standart kabul edilen FAO-56 Penman-Monteith yöntemi temel alınarak hesaplanmıştır (Allen vd., 1998).

Türkiye'deki tarımının tarihi oldukça eski olan bu bitkideki verim düzeyi, tıpkı dünyada olduğu gibi bizde de artmasına karşılık ekim alanı ve üretiminin devamlı değiştiği, gerek fiziki gerekse beşeri koşullardan dolayı azalıp çoğaldığı, istikrarın olmadığı görülmektedir. Ülkemizde özellikle Marmara Bölgesi çeltik tarımı için gerek iklim gerekse topografik açıdan en ideal koşulları ihtiva etmekte ve Türkiye çeltik üretiminin yarısından fazlasını bu bölgemiz temin etmektedir. Türkiye'de çeltik tarımının yaklaşık 500 yıllık bir geçmişinin olduğu bilinmekle beraber, tarımın ilk olarak nerede ve ne zaman başladığına dair kesin bir kanıt olmamakla birlikte, Anadolu'ya 15. yüzyılda Mısır'dan gelerek güneyden girdiği ve ilk ekimlerin Kastamonu ilinin Tosya ilçesinde yapıldığı görüşü hakimdir (Geçit vd., 2009). Nitekim ilk çeltik fabrikası da 1926 yılında yine Tosya'da kurulmuş; Cumhuriyet'in ilanından önce sadece Kastamonu, Maraş, Diyarbakır ve Bursa illerinde az miktarda çeltikin yetiştiriciliğinin yapıldığı ve üretimin daha çok büyük şehirlerdeki varlıklı ailelerce tüketildiği ifade edilmektedir (Türkoğlu, 1979).

Ancak, günümüzde geleneksel beslenme biçiminde ve makarnalık buğday mamulü olan bulgur tüketiminin çeltikten daha çok olduğu görülmektedir.

Çizelge 3.1 Rosso bölgesine ait referans dönemi (1995-2014) Uzun yıllık ortalama iklim verileri

Aylar	Ortalama Sıcaklık (°C)	Ortalama Yağış (mm)
Ocak	19,25	1,55
Şubat	21,75	1,70
Mart	24,87	0,94
Nisan	27,77	0,80
Mayıs	30,67	1,12
Haziran	33,18	2,70
Temmuz	33,88	9,45
Ağustos	33,40	23,45
Eylül	32,34	19,83
Ekim	29,57	6,67
Kasım	24,57	1,85
Aralık	20,24	2,17
<b>Yıllık Toplam / Ort.</b>	<b>27,62</b>	<b>72,23</b>

### 3.2.1 Referans evapotranspirasyonun (ET<sub>0</sub>) hesaplanması

Referans bitki evapotranspirasyonu ET<sub>0</sub> sıcaklık, nem, rüzgâr hızı ve güneşlenme süresi gibi iklim parametrelerine bağlı olarak FAO Penman-Monteith eşitliği ile hesaplanmıştır.

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

Eşitlikte;

ET<sub>0</sub>: referans ürün buharlaşması, mm d<sup>-1</sup>;

R<sub>n</sub>: ürün yüzeyindeki net radyasyon, MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>;

G: toprak ısı akışı, MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>; T: ortalama hava sıcaklığı, °C;

U<sub>2</sub>: 2 m yükseklikteki rüzgâr hızı, m s<sup>-1</sup>; (e<sub>a</sub> - e<sub>d</sub>): buhar basıncı açığı, kPa;

Δ: buhar basıncı eğrisinin eğimi, kPa °C<sup>-1</sup>;

Γ: psikrometrik sabit, kPa °C<sup>-1</sup>;

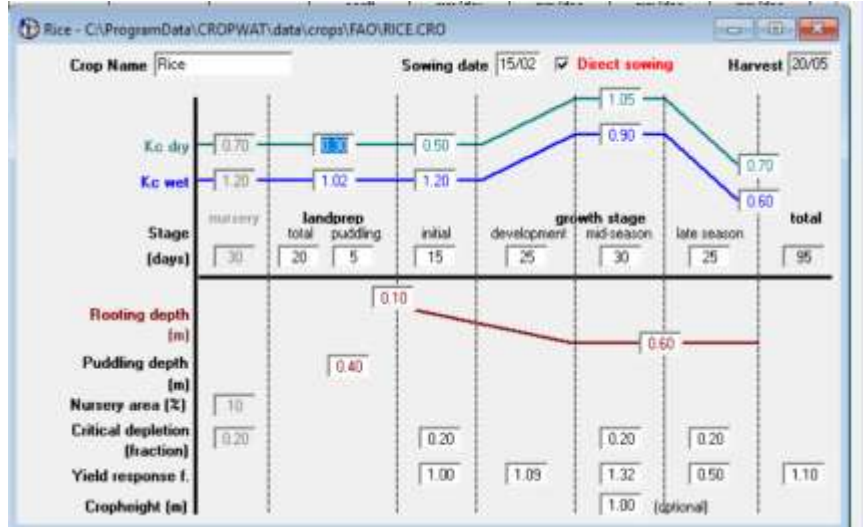
900: dönüşüm (Allen vd., 1998)

### 3.2.2 Bitki su tüketimi (ETc) ve sulama suyu ihtiyacının belirlenmesi

Çeltik bitkisine özgü su tüketimi (ETc), hesaplanan ETo değerlerinin bitki gelişim dönemlerine göre değişen bitki katsayıları (Kc) ile çarpılmasıyla elde edilmiştir (Denklemler)

$$ETc = Kc * ETo$$

Çalışmada kullanılan bitki katsayısı Kc değerleri ve büyüme evrelerinin süreleri (başlangıç, gelişim, orta ve son dönem); Senegal Nehri Vadisi'nin yerel iklim koşulları ve FAO-56 önerileri dikkate alınarak belirlenmiştir (Allen vd., 1998).



Şekil 3.5 Kc değerleri

Net sulama suyu ihtiyacı (IRR), hesaplanan bitki su tüketiminden ETc etkili yağışın çıkarılmasıyla elde edilmiştir. Etkili yağışın tahmin edilmesinde, CROPWAT 8.0 modelinde yer alan ve kurak/yarı kurak bölgeler için önerilen USDA Toprak Koruma Servisi (USDA Soil Conservation Service) yöntemi kullanılmıştır (FAO, 2023).

### 3.2.3 Simülasyon senaryoları

Rosso bölgesindeki çiftçilerin uygulamaları dikkate alınarak, iki ana üretim sezonu (Normal Sezon ve Karşı Sezon) için üçer farklı ekim tarihi belirlenmiş olup simülasyonları bu tarihler üzerinden yaptık.

1. **Normal Sezon (Kurak Sezon):** 05 Şubat, 15 Şubat ve 25 Şubat.
2. **Karşı Sezon (Yağışlı Sezon):** 05 Ağustos, 15 Ağustos ve 25 Ağustos.

Her bir ekim tarihi için RCP 4.5 ve RCP 8.5 senaryoları altında 2099 yılına kadar olan su ihtiyaçları onar yıllık ve yirmişer yıllık periyotlar halinde analiz edilmiştir.

#### 4. BULGULAR ve TARTIŞMA

Mevcut literatür Senegal Nehri Vadisindeki iklim koşullarına pirincin verdiği tepkinin su ihtiyacı sıcaklık duyarlılığı ve mevsimsel yağış dağılımıyla doğrudan ilişkili olduğunu göstermektedir. Önceki çalışmalar Rosso gibi bölgeler için önemli bir bilgi boşluğu olduğunu ve gelecekteki iklim senaryolarının tarla düzeyinde sulama talebini nasıl yeniden şekillendireceğini anlamının gerekliliğini vurgulamıştır. Bu bağlamda çalışma teorik bir çerçeveden pratik ölçüme geçiş yapmaktadır. Batı Afrika çeltik sistemlerindeki buharlaşma eğilimlerine ve yağış değişkenliğine baktıktan sonraki adım bu değişiklikleri Rosso için nicel verilere dönüştürecek bir çerçeve oluşturmaktır.

Analiz 5 Şubat'ta başlayıp haziran başında sona eren (normal) çeltik sezonunu, orta emisyon senaryosu (RCP 4.5) altında içermektedir. Geleceğe yönelik projeksiyonlar için, 1950-2014 dönemi tarihsel temel dönem olarak seçilmiştir. Trarza bölgesi için Dünya Bankası CMIP6 çoklu model topluluğundan elde edilen veriler dört zaman dilimi için analiz edilmiştir: 2020-2039, 2040-2059, 2060-2079 ve 2080-2099. Elde edilen veriler, CLIMWAT aracılığıyla CROPWAT modeli için uygun iklim dosyalarına dönüştürülmüştür. (FAO, 2023)

Senegal Nehri havzasında SONADER tarafından yönetilen alanlarda yaygın olarak kullanılan FAO-56 kılavuzları, bitki katsayılarını (Kc), köklenme derinliğini, büyüme aşamalarını ve toprak özelliklerini belirlemek için kullanılmıştır. Bu girdiler kullanılarak, CROPWAT 8.0 modeli, her projeksiyon aralığı için referans buharlaşma ( $ET_0$ ), bitki buharlaşması ( $ET_c$ ), etkili yağış ve net sulama suyu ihtiyaçlarını belirlemek için kullanılmıştır. 2020-2039 dönemini temel alan bu modelleme yapısı, tarımsal yönetim uygulamalarının aynı kalacağı varsayımıyla, yüzyılın ortasında ve sonunda meydana gelecek değişiklikleri göstermektedir. Bu yaklaşım, yükselen sıcaklıklar, değişen yağış düzenleri ve atmosferik talep gibi iklim değişikliği parametrelerinin Rosso'daki çeltik bitkisinin su ihtiyacı üzerindeki etkilerinin izole edilmesine olanak tanır. (Allen vd., 1998).

## 4.1 Araştırma Bulguları

### 4.1.1 RCP 4.5 Kapsamında sulama ihtiyaçlarının değerlendirilmesi normal sezon (Ekim Tarihi: 05 Şubat)

RCP 4.5 iklim senaryosu kapsamında, Rosso bölgesinde 05 Şubat (Normal Sezon) ekim tarihi için gerçekleştirilen simülasyon sonuçları ve hesaplanan sulama suyu ihtiyaçları Çizelge 4.1’de sunulmuştur. Elde edilen bulgular incelendiğinde; baz döneme (2020-2039) kıyasla gelecek projeksiyonlarında (2080-2099) bitki su tüketiminin yaklaşık %3,5 oranında artış gösterdiği tespit edilmiştir.

Sahil iklim kuşağında özellikle normal sezonda 05 Şubat gibi erken bir ekim tarihi seçimi stratejik bir agronomik kararı temsil eder. Bu ekim takvimi bitkinin karmaşık termal gereksinimlerini karşılayacak şekilde yapılandırılmıştır. Ayrıca bitkinin vejetatif gelişimini kış sonundaki nispeten serin haftalarda tamamlamasını sağlamak böylece kritik çiçeklenme ve tane dolum aşamalarını Mayıs ve haziran aylarında görülen maksimum sıcaklık stresinden önce gerçekleştirmektir.

Ancak 21. yüzyılın değişen iklim koşulları altında bu geleneksel ekim takviminin hidrolojik uygulanabilirliği önemli zorluklarla karşı karşıyadır. Bu bölümde Dünya Bankası (2024) veri tabanından temin edilen; mekansal çözünürlüğü istatistiksel olarak yerel ölçeğe indirgenmiş (statistically downscaled) ve hata düzeltmesi (bias-corrected) yapılmış CMIP6 projeksiyonları kullanılarak RCP4.5 stabilizasyon senaryosu altındaki ılımlı ısınmanın Rosso'nun sulama altyapısı üzerindeki spesifik etkileri ve erken ekim stratejisinin bitki su tüketimi ve sulama suyu gereksinimi (IRR) üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir.

FAO CROPWAT 8.0 modelinden elde edilen simülasyon sonuçları, projeksiyon dönemi (2020-2099) boyunca sulama suyu gereksinimlerinde (IRR) istikrarlı ve artan bir eğilim olduğunu göstermektedir. Yakın vadeli baz dönemi (2020-2039) için net sulama gereksinimi 1205.3 mm olarak hesaplanmıştır. Bu değer Senegal Nehri sistemindeki mevcut hidrolojik yük için bir referans noktası niteliğindedir.

Yüzyıl ilerledikçe bu yükün giderek belirginleştiği görülmektedir. Yüzyıl ortası döneminde (2040-2059) gereksinimin 1223.3 mm'ye yükseldiği tespit edilmiş. Bu artış eğilimi yüzyılın ikinci yarısı boyunca da devam etmektedir. 2060-2079 yılları arasında talep 1237.8 mm'ye yükselmekte ve nihayetinde 2080-2099 yılları arasındaki yüzyıl sonu projeksiyonunda 1247.5 mm'ye ulaşmaktadır.

Yaklaşık %3,5 oranındaki toplam artış tek başına değerlendirildiğinde ılımlı görünebilir, ancak su kıtlığı riski taşıyan bir havza için etkileri önemlidir. Hektar başına 42 mm'yi aşan bu artış mevcut verimi sürdürmek için gereken "su maliyetinin" yükseldiğini göstermektedir. Özellikle SONADER tarafından yönetilen ve binlerce hektarın eş zamanlı ekildiği büyük ölçekli sulama projelerinde tarla düzeyindeki bu kademeli artışın, nehirden milyonlarca metreküp ek su çekilmesine neden olacağı ve bunun da diğer sektörlerden gelen su talebi rekabetini artıracığı öngörülmektedir (OMVS, 2022).

Çizelge 4.1 RCP 4.5 kapsamında Çeltik için öngörülen sulama gereksinimleri normal sezon ekim tarihi: 05 Şubat Rosso, Moritanya

Projeksiyon Dönemi	Toplam ETC (mm/dec)	Etkili yağış (mm/dec)	Sulama İhtiyacı (mm/dec)	% Döneme Göre değişim oranı
2020–2039 (Baseline)	926.8	4.8	1205.3	—
2040-2059	944.5	5.1	1223.3	+1.5%
2060-2079	957.8	4.4	1237.8	+2.7%
2080-2099	966.9	4.1	1247.5	+3.5%

Burada rakamlara baktığımızda 926,8 mm'den yüzyılın sonuna doğru 966,9 mm'ye yükselen Bitki Evapotranspirasyonundaki artıştan kaynaklanmaktadır. 40 mm'lik artış atmosfer koşullarındaki değişikliklere doğrudan bir fizyolojik tepkiyi temsil etmektedir. RCP 4.5 yolunu takip eden Trarza bölgesinde ortam hava sıcaklıklarının yükselmesiyle birlikte buhar basıncı açığı (VPD) havadaki nem ile havanın maksimum nem kapasitesi arasındaki fark artar. Bu durum artan bir atmosferik talebe neden olarak çeltik örtüsünün turgor ve termal düzenlemeyi sürdürmek için ek su terlemesini zorunlu kılar.

Bu mevsimdeki yağışın etkisi asgari düzeydedir. Simülasyon Etkili Yağışın sürekli olarak düşük olduğunu ve mevsim başına 4,1 ila 5,1 mm arasında değiştiğini göstermektedir. Bu Rosso'daki normal mevsim çeltik üretimini hidrolik bir girişim olarak sınıflandırmakta ve ürünün yağış dinamiklerinden tamamen bağımsız olduğunu göstermektedir. Yağıştan tampon görevi gören karşı mevsimin aksine, normal mevsim bu koruyucu mekanizmadan yoksundur. Dolayısıyla, sulama planlamasındaki herhangi bir yanlışlık veya pompa çalışmalarındaki arızalar, meteorolojik telafinin olmaması nedeniyle doğrudan ürün su stresine yol açmaktadır.

5 Şubat ekim tarihinin daha sonraki tarihlere kıyasla istikrarlı olması, güvenilir bir adaptasyon stratejisi olduğunu göstermektedir. Ürün döngüsünün Şubat ve Mart gibi daha soğuk geçiş aylarıyla uyumlu hale getirilmesi ürünün geç kurak mevsimin karakteristik özelliği olan aşırı buharlaşma talebine maruz kalmasını en aza indirir. Bu "optimal" dönemde su talebindeki sürekli artış agronomik zamanlamanın tek başına iklim değişikliğinin etkilerini yeterince azaltamayacağını göstermektedir.

Bu ekim sezonunun sürdürülebilirliğini sağlamak için adaptasyonun salt takvim ayarlamalarının ötesine geçerek yapısal modernizasyonu da kapsamalı gerekmektedir. Artan ETc yükü su iletiminde daha yüksek verimlilik gerektirmektedir. Önemli sızıntı oranlarına sahip toprak kanallar ürün talebinin tarla düzeyinde 1247 mm'ye ulaştığı bir gelecekte giderek daha az pratik hale gelecektir.

#### **4.1.2 Normal sezon (Ekim Tarihi: 15 Şubat)**

Erken ekim döneminin değerlendirilmesinin ardından orta mevsim ekim stratejisinin hidrolojik etkileri analiz edilmiştir. 15 Şubat ekim tarihi Senegal Nehri Vadisi'nde yaygın kabul gören operasyonel bir uzlaşma noktasıdır. Ekim tarihinin on gün kaydırılması çiftçilere soğuk kış döneminin ardından arazi hazırlığı ve lojistik organizasyon için ek süre sağlamaktadır. Sıcaklık farklarının yüksek olduğu bu yarı kurak ortamda zamanlama kritik bir hidrolojik değişken niteliği taşır.

Takvim şubat ayından Mart ve Nisan aylarına doğru ilerledikçe Rosso'da sıcaklıklar belirgin şekilde artmaktadır. RCP 4.5 kapsamında yapılan simülasyonun temel amacı on günlük gecikmenin yaratacağı iklimsel dezavantajı ölçmektir. Bu durum bitkinin hassas üreme aşamasının kurak mevsimin en sıcak dönemlerine denk gelmesiyle oluşan ek su talebini kapsamaktadır.

Simülasyon sonuçları Şubat başına kıyasla yapısal olarak daha zorlu bir hidrolojik profil ortaya koymaktadır. 2020-2039 referans dönemi için net sulama ihtiyacı 1238.5 mm olarak belirlenmiştir. Bu değer 5 Şubat ekim tarihine kıyasla hektar başına yaklaşık 33 mm'lik bir artışa işaret etmektedir. Bu sonuç mevcut iklim koşullarında dahi su kullanım verimliliğinin ekim takviminden önemli ölçüde etkilendiğini göstermektedir.

Yüzyılın ortasında yani 2040-2059 sulama ihtiyacının 1253.2 mm seviyesine yükselmesi beklenmektedir. Bu durum RCP 4.5 senaryosundaki ısınma etkisiyle %1,2 oranında bir artışı yansıtır. Artış eğilimi 2060-2079 döneminde devam ederek talep 1272.6 mm ile zirveye ulaşmaktadır. Yüzyıl sonu projeksiyonu ise 1268.8 mm seviyesinde istikrar kazanmaktadır. Bu değer başlangıç dönemine göre yaklaşık %2,4 oranında bir artış olduğunu gösterir. Hektar başına yaklaşık 13.000 m<sup>3</sup> seviyesindeki mutlak su ihtiyacı sulama sistemine büyük bir yük getirmektedir. Bu tablo şubat ortası ekim aralığının uygulanabilir olsa da sürdürülebilirlik sınırlarına daha yakın olduğunu ve su kıtlığı riskine karşı toleransın azaldığını kanıtlamaktadır.

Çizelge 4.2 RCP 4.5 normal sezon ekim tarihi: 15 Şubat

Projeksiyon Dönemi	Toplam ETc (mm/dec)	Etkili Yağış (mm/dec)	Sulama Gereksinimi (mm/dec)	Baz Döneme Göre % Değişim
2020–2039 (Baz)	958,4	4,5	1238,5	—
2040–2059	973,1	4,8	1253,2	+1,2%
2060–2079	991,0	4,1	1272,6	+2,7%
2080–2099	999,9	4,0	1268,8	+2,4%

Sürekli yüksek su talebi bitki fenolojisinin atmosferik talep ile çakışmasından kaynaklanmaktadır. Ekimin Şubat ortasına ertelenmesi bitkinin çiçeklenme ve tane dolumu ile karakterize edilen ve fizyolojik su tüketiminin en yüksek olduğu orta gelişim dönemini Nisan ve Mayıs aylarına denk getirmektedir. Sahel kuşağında bu aylarda güneş radyasyonunda ve Buhar Basıncı Açığında belirgin bir artış gözlemlenmektedir. Simülasyon verileri bu fiziksel gerçeği doğrulamaktadır. Bitki Evapotranspirasyonu ETC yüzyılın sonuna doğru 958,4 mm seviyesinden yaklaşık 1000 mm seviyesine yükselmektedir. Bu artış bitkinin daha sıcak bir dönemde gelişmesi nedeniyle atmosferik su talebinin yükseldiğini göstermektedir. Bu mekanizma literatürde kapsamlı şekilde yer almaktadır. Allen vd. (1998) Penman-Monteith denklemindeki aerodinamik terimlerin Rosso kurak mevsimini karakterize eden sıcak ve rüzgârlı koşullarda baskın hale geldiğini vurgulamaktadır.

Etkili yağışın katkısı yüzyıl boyunca minimum düzeyde kalmış ve mevsim başına 4,0 ile 4,8 mm arasında değişim göstermiştir. Bu durum normal mevsimin tamamen sulamaya dayalı bir rejim olarak sınıflandırılmasını destekler niteliktedir. Yağış değişkenliğinin yönetimi zorlaştırdığı nemli tropikal sistemlerin aksine bu bağlamda yağışın yokluğu durumu basitleştirmekle birlikte riski artırmaktadır. Ürün tamamen sistemin hidrolik güvenilirliğine bağımlı durumdadır ve doğal süreçler kanallardaki herhangi bir açığı telafi edememektedir. Bu bulgu yarı kurak havzalarda iklim sinyalinin yağıştaki değişikliklerden ziyade sıcaklık ve evapotranspirasyon değişimleri yoluyla iletildiğini belirten Bouraima vd. (2015) ve Phan ve Do (2025) çalışmalarıyla örtüşmektedir.

5 ile 15 Şubat tarihleri arasında hektar başına yaklaşık 30-40 mm düzeyindeki değişim parsel ölçeğinde önemsiz görünebilir. Ancak Trarza deltasının 40.000 hektarlık toplam alanı dikkate alındığında bu durum milyonlarca metreküp su farkı oluşturmaktadır. Senegal Nehri'nin akışında artan değişkenlikle karakterize edilen gelecekteki bir iklimde su verimliliğinin optimize edilmesi optimum takvime tam uyum sağlanmasını gerektirecektir (OMVS, 2022). Bulgular lojistik açıdan mümkün olduğunda zamanlamanın bir su tasarrufu mekanizması olarak değerlendirilmesi gerektiğini ve yayım hizmetlerinin ekim işlemlerinin Şubat ortasına kadar tamamlanmasını teşvik etmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

#### 4.1.3 Normal sezon ekim tarihi 25 Şubat

Geç ekim işgücü sıkıntısı veya ekipman kısıtlamaları yaşayan çiftçiler için zaman zaman lojistik bir zorunluluk olsa da Sahel bağlamında önemli bir hidrolojik risk oluşturmaktadır. Mahsul takviminin şubat ortası döneminin on gün ötesine uzatılmasıyla fenolojik döngü kurak sezonun en şiddetli dönemine doğru ilerletilmektedir. Kritik büyüme aşamaları özellikle salkım başlangıcı ve çiçeklenme yılın en yüksek güneş radyasyonu ve en düşük bağıl nemiyle karakterize edilen Nisan ve mayıs aylarında gerçekleşmektedir.

Gelecekteki iklim senaryoları altında bu gecikmeyle ilişkili su maliyetini değerlendirmek amacıyla bu bölümde RCP 4.5 emisyon yörüngesi takip edilerek 25 Şubat ekim tarihi için sulama gereksinimleri modellenmiştir. World Bank Group (2024) veritabanından alınan aynı küçültülmüş CMIP6 çoklu model topluluk projeksiyonları ve FAO CROPWAT 8.0 modelleme çerçevesi kullanılarak yapılan analiz bu özel ekim aralığının etkisini ortaya koymaktadır. Çalışmanın amacı çağdaş tarım biliminde bilinen bir endişe olan geç ekimle ilişkili iklim değişikliği 21. yüzyılın öngörülen ısınma eğilimleri tarafından yoğunlaştırılıp yoğunlaştırılmadığını değerlendirmektir.

Çizelge 4.3 RCP 4.5 normal sezon, ekim tarihi: 25 Şubat

Projeksiyon Dönemi	Toplam ETc (mm/dec)	Etkili Yağış (mm/dec)	Sulama Gereksinimi (mm/dec)	Baz Döneme Göre % Değişim
2020–2039 (Baseline)	979.2	4.4	1260.6	—
2040–2059	998.1	4.6	1266.7	+0.5%
2060–2079	1013.7	4.1	1283.3	+1.8%
2080–2099	1028.0	3.8	1297.8	+3.0%

25 Şubat ekim tarihine ilişkin simülasyon sonuçları bu yöntemi normal mevsim alternatifleri arasında en fazla su gerektiren seçenek olarak sınıflandırmaktadır. 2020-2039 dönemi için temel sulama gereksinimi 1260,6 mm olarak belirlenmiştir. Bu değer 5

Şubat ekim tarihi için hesaplanan temel gereksinimden yaklaşık 55 mm daha fazladır. Bu yapısal farklılık hayati bir tarımsal gerçeğin altını çizmektedir. Rosso'nun yoğun sıcak koşullarında yalnızca 20 günlük bir gecikme bile su gereksinimlerinde önemli bir artışa yol açmaktadır. Bu durum geç ekilen ürünün en yüksek atmosferik talep döneminde olgunlaşması gerektiğinde ortaya çıkmakta ve bitki örtüsünün ısı stresini önlemek için optimum oranda terlemesini zorunlu kılmaktadır.

RCP 4.5 senaryosu altında yüzyıl ilerledikçe artan temel gereksinim iklim ısınmasıyla daha da belirginleşmektedir. 2080-2099 döneminde sulama talebi 1297,8 mm seviyesine yükselerek 13.000 m<sup>3</sup>/ha sınırına yaklaşmaktadır. Bu artışın temel katalizörü Bitki Evapotranspirasyonundaki sürekli artış olup son on yıllarda 1000 mm eşiği aşılarak 1028,0 mm seviyesine ulaşılmıştır. Bu eğilim Sahel'de sıcak hava dalgalarının sıklığında önemli bir artış öngören ve geç kurak mevsimde yetiştirilen ürünleri orantısız şekilde etkileyen Gbode vd. (2019) tarafından yürütülen bölgesel iklim modellemesiyle örtüşmektedir. Ayrıca veriler Etkili Yağışın herhangi bir rahatlama sağlamadığını ve yüzyılın sonunda minimum 3,8 mm seviyesine düştüğünü göstermektedir. Bu durum geç mevsim pirincinin atmosferik ısınmanın tüm etkilerine maruz kaldığını ve sulama taleplerini hafifletecek doğal yağış tamponundan yoksun olduğunu doğrulamaktadır.

Bölgesel su yönetimi açısından sonuçlar önem arz etmektedir. Gecikmeli ekimle ilişkili iklim değişikliği yalnızca teorik bir mesele olmayıp pompalama taşıma ve uygulama gerektiren önemli miktarda suyu ifade etmektedir. Trarza çevresinin önemli bir bölümü kredi gecikmeleri tohum kıtlığı veya makine sorunları nedeniyle gecikmiş ekime geçerse Senegal Nehri sistemindeki genel talep kritik düşük akışlı Nisan ve Mayıs aylarında artış gösterebilir. Bu durum yarı kurak sulama sistemlerinin zamansal değişikliklere karşı hassasiyeti konusunda Bouazzama vd. (2015) ve Ahmad vd. (2006) tarafından verilen uyarılarla örtüşmektedir. Dolayısıyla Rosso'daki uyum politikası operasyonel verimliliği yalnızca mühendislik açısından değil lojistik hususlar açısından da vurgulamalıdır. Çiftçilere erken ekim imkânı sağlamak etkili bir su tasarrufu teknolojisi oluşturmaktadır. 25 Şubat zaman diliminden kaçınmak iklim değişikliğinin sürdürülemez seviyelere ulaşmasından önce sulama talebini sınırlamak için mali açıdan ihtiyatlı bir yaklaşım olarak değerlendirilmektedir.

## 4.2 RCP 4.5 Karşı Mevsim Kapsamında Sulama İhtiyaçlarının Değerlendirilmesi

### 4.2.1 Karşı mevsim (Ekim Tarihi: 5 Ağustos)

5 Ağustos ekim tarihi Rosso 'da karşı mevsim geçişi için mümkün olan en erken fırsatı teşkil etmektedir. Bu tarih ürünün yerleşme evresini Sahel yağmur mevsiminin zirvesine (Ağustos-Eylül) denk getirdiği için stratejik bir tarımsal öneme sahiptir. Kasım ve aralık ayları gibi daha soğuk ve kurak dönemlerin başlamasından önce ilk sulama ihtiyaçlarını hafifletmek amacıyla vejetatif evredeki muson yağmurlarından yararlanılması hedeflenmektedir.

Çizelge 4.4 RCP 4.5 karşı sezon ekim tarihi: 05 Ağustos

Projeksiyon Dönemi	Toplam ETc (mm/dec)	Etkili Yağış (mm/dec)	Sulama Gereksinimi (mm/dec)	Baz Döneme Göre % Değişim
2020–2039 (baseline)	619.2	72.0	827.6	—
2040–2059	629.6	67.6	845.1	+2.1%
2060–2079	639.3	63.0	859.8	+3.9%
2080–2099	646.0	60.9	870.0	+5.1%

5 Ağustos ekim tarihi için simülasyon bulguları tipik mevsime göre belirgin bir hidrolojik avantaj ortaya koymaktadır. 2020-2039 dönemi için hesaplanan 827,6 mm düzeyindeki temel sulama gereksinimi kurak mevsim ekimi için gereken yaklaşık 1200 mm seviyesinden belirgin şekilde daha düşüktür. Bu ayırım karşı mevsimin bölgesel su ekonomisindeki temel işlevini vurgulamaktadır. Mahsul döngüsünün nemli muson sonrası evreyle senkronize edilmesiyle atmosferik buharlaşma talebi buhar basıncı açıklarının azalması ve bulut örtüsünün artması nedeniyle doğal olarak azalmaktadır.

Bununla birlikte RCP 4.5 altındaki zamansal yörünge bu avantajın sürekli olarak azaldığını göstermektedir. Yüzyıl boyunca sulama talebi istikrarlı bir şekilde artarak 2080-2099 yılları arasında 870,0 mm seviyesine ulaşmaktadır. %5,1 oranındaki bu artış

ikili bir iklim mekanizması tarafından tetiklenmektedir. Artan ETC bağlamında bitki buharlaşması 619,2 mm seviyesinden 646,0 mm seviyesine yükselmektedir. Sahel 'de ortalama sıcaklıklar yükseldikçe özellikle nispeten daha ılıman olan Ekim ve Kasım aylarında atmosferik talep yoğunlaşmaktadır. Azalan yağış verimliliği kapsamında ise etkili yağış 72,0 mm seviyesinden 60,9 mm seviyesine düşmektedir. Bu katkı genel gereksinime kıyasla küçük olsa da yaşanan azalma sulama sistemini kaybedilen her milimetrelilik yağışı telafi etmeye zorlamaktadır.

Veriler 5 Ağustos ekim tarihinin tipik mevsime göre önemli ölçüde su verimli olmasına rağmen iklim değişikliği etkilerinden muaf olmadığını göstermektedir. Sulama talebindeki artış mütevazı olmakla birlikte ihmal edilebilir değildir. Bu durum Sahel hidrolojik döngüsünün yoğunlaşmasıyla ilgili Sultan ve Gaetani (2016) bulgularıyla örtüşmektedir. Bu döngüde yağışlar artan sıcaklıklarla birlikte giderek daha öngörülemez hale gelmektedir.

Trarza'daki su yöneticileri için bu veriler erken karşı mevsimin su tasarrufu odaklı tarım politikasının temel bir unsuru olmaya devam edeceğini göstermektedir. Bununla birlikte yağışların ilk aşamaları yeterince karşılayacağı varsayımı giderek daha savunulamaz hale gelmektedir. Yüzyıl sonuna doğru etkili yağış miktarı mevsim başına 60 mm seviyesine düştüğünden sistem geleneksel yağışlı aylarda bile kapsamlı bir sulama olanağı sağlayacak ve üretim potansiyelini erken mevsim kuraklıklarına karşı koruyacak şekilde tasarlanmalıdır.

#### **4.2.2 Karşı sezon ekim tarihi: 15 Ağustos**

Ekimin ağustos başı penceresinden on gün sonraya ertelenmesiyle Generatif evresinin zamanlamasının iyileştirilmesi hedeflenmektedir. Bu strateji çiçeklenmenin Başakçılara fiziksel zarar verme potansiyeli taşıyan muson yağmurlarının en yoğun olduğu dönemden sonra gerçekleşmesini sağlarken aynı zamanda ürünün ocak ayının en soğuk gecelerinden önce olgunlaşmasına olanak tanımaktadır. Bu zaman dilimi vejetatif gelişme evresini yılın en yağışlı haftaları olan ağustos sonu ve Eylül ayına denk getirmektedir. Bu planın RCP 4.5 çerçevesinde analiz edilmesi sıcaklıklar arttıkça ve yağış düzenleri değiştikçe bu

tarımsal en uygun noktanın uygulanabilir olmaya devam edip etmediğinin tespit edilmesini sağlamaktadır.

Çizelge 4.5 RCP 4.5 karşı sezon, ekim tarihi 15 Ağustos

Projeksiyon Dönemi	Toplam ETc (mm/dec)	Etkili Yağış (mm/dec)	Sulama Gereksinimi (mm/dec)	Baz Döneme Göre % Değişim
2020–2039 (Baseline)	613.4	70.6	816.9	—
2040–2059	619.9	66.3	828.5	+1.4%
2060–2079	633.6	61.6	847.6	+3.8%
2080–2099	764.1*	67.5	972.8*	+19.1%

Ağustos ortası ekim tarihi için simülasyon sonuçları net bir hidrolojik örüntü ortaya koymaktadır. 2020-2039 baz döneminde sulama ihtiyacı 816,9 mm olarak belirlenmiştir. Bu değer ağustos başı ekim tarihine göre yaklaşık 11 mm daha düşüktür. Bu düşüş marjinal olarak azalan Bitki Evapotranspirasyonuna (619,2 mm yerine 613,4 mm) ve benzer etkili yağış tüketimine bağlanmaktadır. Kısa vadede Ağustos ortasına geçiş aralık ayındaki olgunlaşma evresine özgü daha düşük sıcaklıklardan yararlanılarak bir su tasarrufu yaklaşımı niteliği taşımaktadır.

Bununla birlikte RCP 4.5 kapsamındaki uzun vadeli tahmin olası bir duyarlılığa işaret etmektedir. Su talebindeki artış 2060'lara kadar %3,8 ile ılımlı seyretse de yüzyıl sonu tahmini (2080-2099) sulama ihtiyaçlarında 972,8 mm seviyesine ulaşan önemli bir artış göstermektedir. Bu ani yükseliş 21. yüzyılın sonlarında ürünün fenolojik zamanlamasının CMIP6 topluluğu tarafından tahmin edilen yüksek sezon sonu sıcaklığı veya düşük bağıl nem dönemiyle çakışabileceğini göstermektedir. Bu doğrusal olmayan tepkiler Sahel iklim sisteminin karmaşıklığını vurgulamaktadır. Mevcut durumda en uygun olan ekim tarihi gelecekte belirli sıcaklık stresi dönemlerine karşı duyarlı hale gelebilir.

Yüzyıl sonundaki bu anomaliye rağmen ağustos ortası dönemi projeksiyon ufkunun büyük bir bölümünde erken ekim için güvenilir bir alternatif görevi görmektedir. Etkili

yağış katkısı su dengesinin temel ancak ikincil bir unsurdur. Veriler 15 Ağustos tarihinin şu anda geçerli olmasına rağmen dikkatli ve uzun vadeli bir gözetim gerektirdiğini ortaya koymaktadır. Yüzyıl sonu ısınma eğilimleri öngörüldüğü şekilde gerçekleşirse orta sezon dönemi hidrolojik faydalarını kaybedebilir ve bu durum yönetimi en iyi ekim programını yeniden değerlendirmeye zorlayabilir.

#### 4.2.3 Karşı mevsim ekim tarihi: 25 Ağustos

25 Ağustos ekim tarihi geç karşı mevsim yaklaşımını temsil etmektedir. Tarımsal açıdan bu durum stratejik bir optimizasyondan ziyade lojistik kredi veya arazi hazırlığındaki gecikmelerden kaynaklanan zorunlu bir karar niteliği taşımaktadır. Hidrolojik açıdan bakıldığında gecikmiş ekim tüm ürün döngüsünü Kasım ve Ocak aylarını kapsayan serin kurak mevsime kadar uzatmaktadır. Bu geçişin iki zıt etkisi bulunmaktadır. Olgunlaşma sırasında ortam sıcaklığının düşmesi nedeniyle buharlaşma azalırken kış sıcaklıklarının gerekli eşik değerlerin altına düşmesi durumunda soğuk şoku kaynaklı kısırlık riski artmaktadır. Kışların hafif bir ısınma göstermesinin öngörüldüğü RCP 4.5 senaryosunda soğuk riski azalmakta ve bu durum geç ekimi su tasarrufu için daha cazip bir strateji haline getirmektedir.

Çizelge 4.6 RCP 4.5 karşı sezon, ekim tarihi: 25 Ağustos

Projeksiyon Dönemi	Toplam ETc (mm/dec)	Etkili Yağış (mm/dec)	Sulama Gereksinimi (mm/dec)	Baz Döneme Göre % Değişim
2020–2039 (Baseline)	600.5	66.8	776.4	—
2040–2059	611.2	62.7	792.6	+2.1%
2060–2079	620.5	58.0	807.3	+4.0%
2080–2099	626.8	56.9	845.7	+8.9%

Ağustos sonu ekim tarihine ilişkin bulgular bu yöntemin önümüzdeki sezon için en su tasarruflu planlama alternatifi olduğunu açıkça ortaya koymaktadır. 776,4 mm düzeyindeki temel sulama talebi bu çalışmada incelenen tüm senaryolar arasında en

düşük değerdir. Bu miktar 5 Ağustos ekimine kıyasla hektar başına yaklaşık 50 mm daha azdır. Bu önemli azalma bitkinin en yüksek talep dönemlerinin yılın en soğuk ayları olan Kasım ve Aralık ile çakışması ve atmosferik talebin yıllık en düşük noktasına ulaşması nedeniyle azalan Bitki Evapotranspirasyonundan kaynaklanmaktadır (600,5 mm).

Yüzyıl boyunca bu su tasarrufu faydası devam etse de nihayetinde iklim değişikliği ağır basmaktadır. 2080-2099 yılları arasında sulama talebi temel döneme kıyasla yaklaşık %9 oranında bir artışı yansıtarak 845,7 mm seviyesine yükselmektedir. Son dönemdeki hızlı artış etkili yağış miktarındaki azalmaya (66,8 mm'den 56,9 mm'ye düşüş) ve kış aylarındaki kademeli ısınmaya bağlanmaktadır. Bu durum serin mevsim avantajını kademeli olarak azaltmaktadır.

Bu bulgular SONADER ve bölge planlamacıları için belirgin bir dengeyi ortaya koymaktadır. Gecikmeli ekim (25 Ağustos) sistem genelinde milyonlarca metreküp su tasarrufu sağlayarak en yüksek su kullanım verimliliğini sunmaktadır. Kış mevsiminin termal fren etkisi verimli şekilde kullanılarak mahsulün su kullanımını azaltılmaktadır. Bununla birlikte bu hidrolojik verimlilik tarımsal riskle bağlantılı olarak değerlendirilmelidir. RCP 4.5 ile ilişkili ısınma eğilimi soğuk kaynaklı kısırlığı etkili bir şekilde önlerse bu ekim tarihi su kıtlığıyla karakterize bir gelecek için en uygun adaptasyon stratejisi olarak ortaya çıkabilir. Tersine kış öngörülemezliği devam ederse suyun korunması verim istikrarını tehlikeye atabilir. Sonuç olarak 25 Ağustos aralığı güvenli uygulama için doğru meteorolojik tahminler gerektiren yüksek getirili bir yaklaşım olarak değerlendirilmelidir.

#### **4.2.4 RCP 4.5 Normal sezon ve karşı sezon karşılaştırılması ve değerlendirmesi**

RCP 4.5 senaryosu altında gerçekleştirilen simülasyonlar a baktığımızda Normal Sezon ile Karşı Sezon arasında bariz bir hidrolojik ayırım olduğunu ortaya koymaktadır. Her iki mevsimin farklı ekim tarihlerine göre temel (2020-2039) ve yüzyıl sonu (2080-2099) su ihtiyaçları ile değişim oranları Çizelge 4.7'de özetlenmiştir.

Çizelge 4.7 RCP 4.5 senaryosu altında normal sezon ve karşı sezon sulama suyu ihtiyaçlarının karşılaştırılması (mm/sezon)

Mevsim	Ekim Tarihi	2020–2039 (Baz)	2080–2099 (Yüzyıl Sonu)	Toplam Artış (mm)	Değişim Oranı (%)
Normal	05 Şubat	1205,3	1247,5	+42,2	+%3,5
Normal	15 Şubat	1238,5	1268,8	+30,3	+%2,4
Normal	25 Şubat	1260,6	1297,8	+37,2	+%3,0
Karşı	05 Ağustos	827,6	870,0	+42,4	+%5,1
Karşı	15 Ağustos	816,9	972,8	+155,9	+%19,1
Karşı	25 Ağustos	776,4	845,7	+69,3	+%8,9

Çizelge 4.7 incelendiğinde Normal Sezonun su talebinin Karşı Sezona kıyasla yapısal olarak çok daha yüksek olduğu görülmektedir. Normal sezonda ortalama su ihtiyacı 1200-1300 mm aralığında seyrederken Karşı Sezonda bu miktar 770-970 mm aralığına düşmektedir. Bu durum Karşı Sezon üretiminin hektar başına yaklaşık 400-450 mm su tasarrufu sağladığını ve bölgesel su yönetimi açısından stratejik bir öneme sahip olduğunu kanıtlamaktadır.

Ancak değişim oranlarına bakıldığında Karşı Sezonun iklim değişikliğine karşı daha hassas olduğu dikkat çekmektedir. Normal sezondaki artışlar %2,4 ile %3,5 arasında sınırlı kalırken Karşı Sezonda (özellikle 15 Ağustos ekiminde) artış oranı %19,1 seviyesine kadar çıkmaktadır. Bu bulgu Normal Sezonun halihazırda yüksek sıcaklıklarda gerçekleştiği için marjinal ısınmadan daha az etkilendiğini ancak Karşı Sezonun serin dönem avantajını kaybetmeye başladığını göstermektedir.

### 4.3 RCP 8.5 NORMAL Mevsim Kapsamında Sulama İhtiyaçlarının Değerlendirilmesi

#### 4.3.1 RCP 8.5 Normal sezon ekim tarihi: 05 Şubat

5 Şubat ekim tarihi Rosso'daki standart kurak sezon için mümkün olan en erken ekim dönemini teşkil etmektedir. Bu ekim takvimi kış sonlarında vejetatif büyümeye başlayarak ürünün termal koşullarını iyileştirmeyi ve böylece ürünün Mayıs ve Haziran aylarındaki aşırı sıcaklardan önce kritik üreme evrelerini tamamlamasını sağlamayı hedeflemektedir. Ancak yüksek emisyonlu RCP 8.5 senaryosu altında artan küresel sıcaklıklar bu termal avantaj için risk oluşturmaktadır.

Bu bölümde her zamanki gibi işleyen bir iklim senaryosu içinde erken ekim stratejisinin hidrolojik etkileri değerlendirilmiştir. Trarza bölgesi için iklim projeksiyonları World Bank Group (2024) veritabanından alınan CMIP6 çoklu model topluluğundan elde edilmiş ve dört gelecek zaman ufkunu kapsamıştır. Veriler CLIMWAT kullanılarak küçültülmüş ve FAO CROPWAT 8.0 modelinde standart FAO-56 ürün katsayılarıyla simüle edilmiştir (Allen vd., 1998). 2020-2039 zaman dilimi gelecekteki su stresinin boyutunu değerlendirmek için analitik temel değer (IR = 1209,2 mm) olarak kabul edilmiştir.

Çizelge 4.8 RCP 8.5 Normal sezon ekim tarihi 05 Şubat

Projeksiyon Dönemi	Toplam ETC (mm/dec)	Etkili Yağış (mm/dec)	Sulama Gereksinimi (mm/dec)	Baz Döneme Göre % Değişim
2020–2039 (baseline)	930.6	4.8	1209.2	—
2040–2059	958.8	4.7	1238.5	+2.4%
2060–2079	990.5	4.7	1271.1	+5.1%
2080–2099	1030.2	4.2	1299.6	+7.5%

RCP 8.5 kapsamında şubat başı ekim tarihi için simüle edilen sonuçlar su talebinde istikrarlı bir artış eğilimine işaret etmektedir. Net sulama ihtiyacı başlangıç dönemindeki 1209,2 mm seviyesinden yüzyıl sonuna kadar 1299,6 mm seviyesine yükselmektedir. Bu durum RCP 4.5 kapsamında gözlemlenen daha ılıman eğilimlerden önemli bir sapma olan %7,5 oranında toplam bir artışı ifade etmektedir. Bu erken ekim tarihi değerlendirilen planlar arasında en su tasarruflu seçenek olsa da artışın boyutu optimize edilmiş takvimlerin bile yüksek emisyonlu ısınmanın etkilerine duyarlı olduğunu göstermektedir.

Bu eğilimin temel faktörü tahmin döneminde 930,6 mm seviyesinden 1030,2 mm seviyesine yükselen Bitki Evapotranspirasyonundaki %10,7 oranındaki önemli artıştır. Bu artış ortam sıcaklığı ile buharlaşma gereksinimi arasındaki doğrudan ilişkiyi göstermektedir. Sahel ikliminin RCP 8.5 altında ısınmasıyla buhar basıncı açığı artmakta ve bu durum mahsulün fizyolojik işlevini sürdürdürebilmesi için ek su terlemesine neden olmaktadır. Bu bulgu Batı Afrika'daki kapsamlı iklim değerlendirmeleriyle örtüşmektedir (Gbode vd., 2019; Aich vd., 2020). İlgili çalışmalarda ısı kaynaklı buharlaşma stresinin 21. yüzyılda sulu tarımın önündeki temel engel olarak ortaya çıkacağı öngörülmektedir.

Etkili yağış ise mevsim başına 4,2 ile 4,8 mm arasında değişerek düşük kalmaktadır. Bu durum Rosso'daki kurak mevsim çeltik yetiştiriciliğinin doğal yağış yoluyla artan talebi karşılama yeteneği olmaksızın tamamen sulamaya bağımlı bir sistem olarak işlediğini doğrulamaktadır. Yüzyılın sonuna doğru etkili yağıştaki azalma nehir kaynaklarına olan bağımlılığı artırmaktadır.

#### **4.3.2 RCP 8,5 Normal sezon ekim tarihi: 15 Şubat**

15 Şubat ekim tarihi Rosso'da tipik büyüme sezonunun stratejik orta noktasını oluşturmaktadır. Bu dönem sezon başındaki soğuk durgunluk ve sezon sonundaki sıcaklık stresine ilişkili riskleri dengelemeyi hedeflemektedir. Yüksek emisyonlu RCP 8.5 senaryosunda bu denge hızla ısınan bir iklim tarafından tehdit edilmektedir. Bu analiz RCP 8.5 ile bağlantılı aşırı radyatif zorlamanın standart ekim tarihinin hidrolojik fizibilitesi üzerindeki etkisini değerlendirmeyi amaçlamaktadır.

Trarza bölgesi için iklim projeksiyonları önceki bölümlerle aynı metodolojik çerçeve kullanılarak World Bank Group (2024) veri tabanından elde edilmiştir. Bu projeksiyonlar CLIMWAT kullanılarak ölçeklendirilmiş ve FAO CROPWAT 8.0 modelinde simüle edilmiştir. Simülasyon standart toprak ve ürün parametrelerini koruyarak şiddetli iklim değişikliğinin su dengesi üzerindeki etkisini izole etmektedir (Allen vd., 1998). 1243,2 mm sulama oranıyla 2020-2039 yılları arasındaki zaman dilimi analitik temel değer olarak kabul edilmiştir.

Çizelge 4.9 RCP 8.5 normal sezon ekim tarihi: 15 Şubat

Projeksiyon Dönemi	Toplam ETc (mm/dec)	Etkili Yağış (mm/dec)	Sulama Gereksinimi (mm/dec)	Baz Döneme Göre % Değişim
2020–2039 (baz)	963,0	4.5	1243.2	
2040–2059	991,7	4.3	1273.0	+2.4%
2060–2079	1024,4	4.3	1293.5	+4.0%
2080–2099	1064,3	3.9	1335.1	+7.4%

RCP 8.5 senaryosu altında 15 Şubat ekim tarihi için yapılan simülasyon sonuçları artan su kıtlığı eğilimini göstermektedir. Net sulama ihtiyacı kısa vadede 1243,2 mm seviyesinden yüzyılın sonuna kadar 1335,1 mm seviyesine yükselmektedir. Bu durum toplamda %7,4 oranında bir artışa işaret etmektedir. Bu artış oranı aynı ekim tarihi için orta düzey RCP 4.5 senaryosunda gözlemlenen artış oranının iki katından fazladır. Bu önemli farklılık kontrolsüz emisyonlarla ilişkili iklim değişikliği vurgulamaktadır. Yüzyıl ilerledikçe RCP 8.5 senaryosunun termal zorlaması mahsulün su talebi profilini temelden değiştirmektedir.

Bu artışa katkıda bulunan ana faktör %10,5 oranında bir artışı yansıtan ve 963,0 mm seviyesinden 1064,3 mm seviyesine yükselen Bitki Evapotranspirasyonudur. Gözlemlenen artış şubat ortasındaki ekim tarihinin mahsulün üreme aşamalarını Nisan ve mayıs aylarında giderek daha yoğun ısı dalgalarına maruz bıraktığını göstermektedir. Sahel bölgesi için bölgesel iklim modelleri yüksek sıcaklıkların buhar basıncı açığını önemli ölçüde artıracığını ve bitkilerin hayatta kalması için daha fazla su buharlaşmasına

ihtiyaç duyulacağını öngörmektedir (Gbode vd., 2019; Aich vd., 2020). Etkili yağış miktarı aynı anda minimum düzeyde kalmakta ve azalan bir eğilim göstermektedir. Bu durum kurak mevsim çeltik üretiminin yağış girdilerinden tamamen bağımsız kalacağını doğrulamaktadır.

Bu bulgular Senegal Nehri Havzası bağlamında değerlendirildiğinde endişe verici bulunmaktadır. Rosso sulama alanı boyunca hektar başına mevsimsel su talebinde yaklaşık 100 mm düzeyindeki artış önemli bir ek su çekme gereksinimine yol açmaktadır. Bu yoğunlaşma Afrika çeltik sistemlerinin ısı kaynaklı su stresine karşı duyarlılığına ilişkin Van Oort ve Zwart (2018) uyarılarıyla örtüşmektedir. Ayrıca 5 Şubat ekim tarihine kıyasla 15 Şubat dönemi daha yüksek mutlak su tüketimi sergilemekte olup bu durum iklim ısınması ilerledikçe optimum ekim penceresinin daraldığını göstermektedir. RCP 8.5 koşulları altında ekimi sadece on gün ertelemek dahi su stresini artırmakta ve erken ekim takvimlerine tam uyumun temel bir adaptasyon stratejisi olarak önemini vurgulamaktadır.

#### **4.3.3 Normal sezon RCP 8,5 normal sezon ekim tarihi : 25 Şubat**

Normal mevsim çeltik mahsulünün orta emisyon senaryosu RCP 4.5 altında değerlendirilmesinin ardından Rosso için olası iklimsel geleceğin tüm yelpazesini kapsayacak şekilde yüksek emisyon yörüngesini RCP 8.5 analiz etmek önem arz etmektedir. RCP 8.5 senaryosu sera gazı emisyonlarında sürekli artışlarla işaretlenen ve yüzyılın sonuna kadar artan radyatif zorlama ve önemli bir ısınmayla sonuçlanan bir yörünge çizmektedir (IPCC, 2021).

Bu senaryonun hidrolojik sonuçlarını değerlendirmek amacıyla aynı tarımsal düzenleme korunmuş olup kurak mevsim pirinci 25 Şubat'ta ekilmiş ve Haziran başında hasat edilmiştir. Gecikmeli ekim dönemi mahsulü üreme aşamasında doğal olarak yüksek ortam sıcaklıklarına maruz bırakılmaktadır. RCP 8.5 altında ise bu maruziyet bölgesel ısınmada beklenen artışla daha da şiddetlenmektedir. İklimsel değişkenler Trarza bölgesi için World Bank Group (2023) veri tabanındaki CMIP6 çoklu model topluluğundan elde edilmiştir. Veriler CLIMWAT kullanılarak küçültülmüş ve FAO CROPWAT 8.0

modelinde standart FAO-56 parametreleri kullanılarak simüle edilmiştir (Allen vd., 1998). 2020-2039 zaman dilimi sonraki on yıllık değişimleri değerlendirmek için analitik temel değer (IR = 1265,7 mm) olarak kabul edilmiştir.

Çizelge 4.10 RCP 8.5 Normal sezon ekim tarihi: 25 Şubat

Projeksiyon Dönemi	Toplam ETc (mm/dec)	Etkili Yağış (mm/dec)	Sulama Gereksinimi (mm/dec)	Baz Döneme Göre % Değişim
2020–2039 (baseline)	984.1	4.3	1265.7	—
2040–2059	1012.9	4.2	1282.4	+1.3%
2060–2079	1045.7	4.1	1316.1	+4.0%
2080–2099	1086.1	4.0	1357.7	+7.3%

25 Şubat ekim tarihi için RCP 8.5 kapsamındaki simülasyon sonuçları su talebinde belirgin bir artış eğilimi ortaya koymaktadır. Net sulama ihtiyacı yakın vadede 1265,7 mm seviyesinden yüzyıl sonunda 1357,7 mm seviyesine yükselerek toplamda %7,3 oranında bir artış göstermektedir. Bu durum aynı ekim penceresi için stabilizasyon senaryosunda kaydedilen artış oranının iki katını aşmaktadır. Artışın temel faktörü projeksiyon döneminde 984,1 mm seviyesinden 1086,1 mm seviyesine yükselen Bitki Evapotranspirasyonudur. Mevsim başına 100 mm üzerindeki bu artış RCP 8.5 ısınma sinyaliyle artan atmosferik buharlaşma talebini yansıtmaktadır. Bu bulgular aşırı sıcakların kurak mevsim sonundaki ürünler üzerindeki etkisine dair Gbode vd. (2019) çalışmasıyla örtüşmektedir. Buna karşılık etkili yağışın 4,0 mm seviyesine düşmesi yüksek emisyonlu senaryolarda yağışın tamponlama kapasitesinin bulunmadığını doğrulamaktadır.

Senegal Nehri Vadisi'ndeki su yönetimi üzerindeki etkiler önem arz etmektedir. Mevsim başına 1350 mm seviyesini aşan sulama gereksinimi tarihsel koşullara göre tasarlanan hidrolik altyapı üzerinde baskı oluşturmaktadır. RCP 8.5 senaryosuyla ilişkili iklim değişikliği OMVS (2021) raporunda belirtildiği üzere tarım hidroelektrik ve kentsel talepler arasındaki su rekabetini yoğunlaştıracağı öngörülmektedir. Sonuç olarak en

yüksek su talebini gösteren 25 Şubat ekim tarihinin giderek sürdürülemez hale geleceği değerlendirilmektedir.

#### 4.3.4 RCP 8.5 Karşı sezon ekim tarihi: 5 Ağustos

RCP 8.5 yüksek emisyon senaryosuna göre bu dönem 21. yüzyıl için öngörülen en aşırı termal zorlamayı deneyimlemektedir. Devam eden ısınma ve artan atmosferik taleple belirlenen olağan işleyiş emisyon yörüngesinin bu kritik ekim tarihinin hidrolojik dengesini nasıl değiştirdiğini değerlendirmektedir.

Çizelge 4.11 RCP 8.5 Karşı sezon ekim tarihi: 05 Ağustos

Projeksiyon Dönemi	Toplam ETc (mm/dec)	Etkili Yağış (mm/dec)	Sulama Gereksinimi (mm/dec)	Baz Döneme Göre % Değişim
2020–2039 (Baz)	621,5	69,3	834,7	—
2040–2059	638,8	65,9	856,4	+2.4%
2060–2079	659,8	59,6	874,4	+5.1%
2080–2099	683,8	67,9	890,9	+7.5%

RCP 8.5 ile simüle edilen sonuçlar çeltik üretiminde hidrolojik sınırlamaların sürekli olarak yoğunlaştığını göstermektedir. Net sulama talebi 2020–2039 yılları arasında 834,7 mm başlangıç seviyesinden yüzyılın sonunda 890,9 mm seviyesine istikrarlı bir şekilde artmaktadır. Bu durum hektar başına %6,7 oranında bir artışla 56,2 mm yükselişi ifade etmektedir.

Öngörülen zaman diliminde 62,3 mm artan Bitki Evapotranspirasyonundaki doğrusal artış bu eğilimi etkileyen ana bileşendir. Bu yörünge RCP 8.5 senaryosunun artırılmış radyatif zorlamasıyla fiziksel olarak uyumludur (IPCC, 2021). Yüzey hava sıcaklıkları arttıkça buhar basıncı açığı genişlemekte ve bu da atmosferik nem talebini artırmaktadır.

Bitki yağış durumu ne olursa olsun fizyolojik işlevini sürdürmek için daha fazla su terlemek zorunda kalmaktadır.

Yağış dinamikleri arttıkça su yönetimi daha zor hale gelmektedir. Veriler testere dışı bir modele işaret etmektedir. Yüzyılın ortalarında yağış verimliliği önemli ölçüde azalarak 2060-2079 döneminde 59,6 mm seviyesine düşmekte ve sonraki on yıllarda küçük bir iyileşme görülmektedir. Sarr (2015) yağıştaki bu dalgalanmanın Batı Afrika'nın gelecekteki iklim koşullarının bir özelliği olduğunu belirtmektedir. Bu durum statik sulama planlamasını giderek daha riskli hale getirmektedir.

Bu sonuçlar Rosso sulama şebekesinin operasyonel gereksinimleri üzerinde bir değişiklik olduğunu göstermektedir. 5 Ağustos ekim tarihi önümüzdeki sezon için en iyi seçenek olmaya devam etse de su maliyetleri artacaktır. İklimin giderek daha kurak hale gelmesi nedeniyle çiftçilerin 2080 yılına kadar hektar başına şu anda kullandıklarından yaklaşık 560 m<sup>3</sup> daha fazla su kullanması beklenmektedir. Üretimi bu yüksek emisyon eğrisi içinde tutmak için tarımsal zamanlama ısınan iklimin termodinamik etkilerini tamamen telafi edemediğinden taşıma verimliliğini en üst düzeye çıkarmaya ve sızma kayıplarını en aza indirmeye odaklanması gerekmektedir.

#### **4.3.5 RCP 8.5 Karşı sezon ekim tarihi: 15 Ağustos**

15 Ağustos ekim tarihi karşı mevsim kampanyasının orta noktasını temsil etmektedir. Bu zaman çizelgesi vejetatif büyüme sırasında kalan muson neminin avantajlarını olgunlaşma dönemindeki geç mevsim sıcaklık stresi tehlikeleriyle dengelemeyi amaçlamaktadır. Ancak bu denge yüksek emisyonlu RCP 8.5 senaryosu altında giderek ısınan atmosfer koşulları tarafından zorlanmaktadır. Bu bölümde Ağustos ortası ekim döneminin 21. yüzyıl için en uç iklim projeksiyonlarına maruz kaldığı durumlarda ürün su dengesinin değişimi analiz edilmiştir.

Çizelge 4.12 RCP 8.5 Karşı sezon ekim tarihi: 15 Ağustos

Projection Period	Total ETc (mm/dec)	Effective Rain (mm/dec)	Irrigation Requirement (mm/dec)	% Change vs. Baseline
2020–2039 (baseline)	615.8	70.6	819.4	—
2040–2059	633.3	64.6	844.3	+3.0%
2060–2079	654.3	58.4	877.7	+7.1%
2080–2099	678.3	59.7	893.3	+9.0%

RCP 8.5 senaryosu altında 15 Ağustos ekim tarihi için yapılan simülasyon sonuçları yağmurla beslenen tarıma giderek daha elverişsiz bir hidrolojik ortamın oluştuğunu göstermektedir. Net sulama ihtiyacı 2020–2039 dönemindeki 819,4 mm temel değerden yüzyılın sonuna kadar 893,3 mm seviyesine yükselmektedir. Hektar başına 73,9 mm düzeyindeki bu toplam artış su bütçesinde önemli bir daralmaya işaret etmektedir. Karşı mevsim kurak mevsime kıyasla daha verimli kalsa da yüksek emisyon senaryosunun getirdiği iklim değişikliği Ağustos yağmurlarının sağladığı doğal avantajın büyük bir kısmını ortadan kaldırmaktadır.

Bu eğilimi belirleyen temel faktör projeksiyon ufukları boyunca 615,8 mm seviyesinden 678,3 mm seviyesine yükselen Bitki Evapotranspirasyonundaki doğrusal artıştır. Bu gidişat RCP 8.5 yolunun yüzey sıcaklığı anomalilerini yansıtmaktadır. Sahel atmosferi ısındıkça buhar basıncı açığı artmakta ve bitki örtüsünden su kaybı hızlanmaktadır. Bu olgu özellikle Ekim ve Kasım aylarındaki tane dolun aşamalarında daha belirgindir. Zira öngörülen ısınma buharlaşma talebindeki olağan mevsimsel düşüşü engellemektedir.

Eş zamanlı olarak Etkili Yağış istikrarsız bir eğilim göstermektedir. Yüzyılın ortalarında 2060-2079 döneminde 58,4 mm seviyesine kadar düşüş görülmekte ve son on yıllarda 60 mm civarında istikrar kazanmaktadır.

Rosso sulama şeması için su talebindeki %9,0 oranındaki artışın yönetimsel ve ekonomik sonuçları bulunmaktadır. Yüzyılın sonuna doğru 15 Ağustos ekim tarihi sistem kayıpları

varsayıldığında yaklaşık 9000 m<sup>3</sup>/ha brüt su temini gerektirecektir. Bu durum karşı sezonu normal sezonun kaynak yoğunluğuna yaklaştırmaktadır. Bu ekim döneminin sürdürülebilirliğini sağlamak amacıyla adaptasyon önlemleri sızma kayıplarını en aza indirmeye ve tarla düzeyinde uygulama verimliliğini artırmaya odaklanmalıdır.

#### 4.3.6 RCP 8.5 Karşı mevsim ekim tarihi: 25 Ağustos

Ağustos sonu ekim tarihine ilişkin simülasyon sonuçları önceki ekim dönemlerinden farklılaşan karmaşık bir gidişat ortaya koymaktadır. Net sulama ihtiyacı 781,5 mm düzeyindeki temel değerden yüzyıl sonuna kadar 878,4 mm seviyesine yükselmektedir. Hektar başına yaklaşık 100 mm düzeyindeki bu toplam artış %12,4 oranıyla mevsimsel senaryolar arasında kaydedilen en yüksek göreceli artışı temsil etmektedir.

Çizelge 4.13 RCP 8.5 Karşı sezon ekim tarihi: 25 Ağustos

Projection Period	Total ETc (mm)	Effective Rain (mm)	Irrigation Requirement (mm)	Baz Döneme Göre % Değişim
2020–2039 (Baseline)	602.9	64.3	781.5	—
2040–2059	625.0	61.0	808.6	+%3,5
2060–2079	641.5	55.5	862.1	+%10,3
2080–2099	665.0	62.9	878.4	+%12,4

Bu eğilimin temel nedeni serin mevsim avantajının azalmasıdır. Bitki buharlaşması %10,3 oranında artarak kış aylarının yüksek atmosferik buharlaşma talebini koruyacak kadar ısındığını göstermektedir. Özellikle 2060-2079 döneminde sulama ihtiyacında gözlemlenen ani artış doğal yağış tamponunun azalması ve termodinamik talebin artmasıyla açıklanmaktadır.

Bu sonuçlar geç ekim stratejisinin artık minimum su gerektirdiği varsayımının geçerliliğini yitirdiğini göstermektedir. Yüzyılın ikinci yarısında sulama şebekesinin

geleneksel olarak düşük talep gören aylarda dahi en yüksek yük hacimlerini karşılayacak şekilde donatılması gerekmektedir.

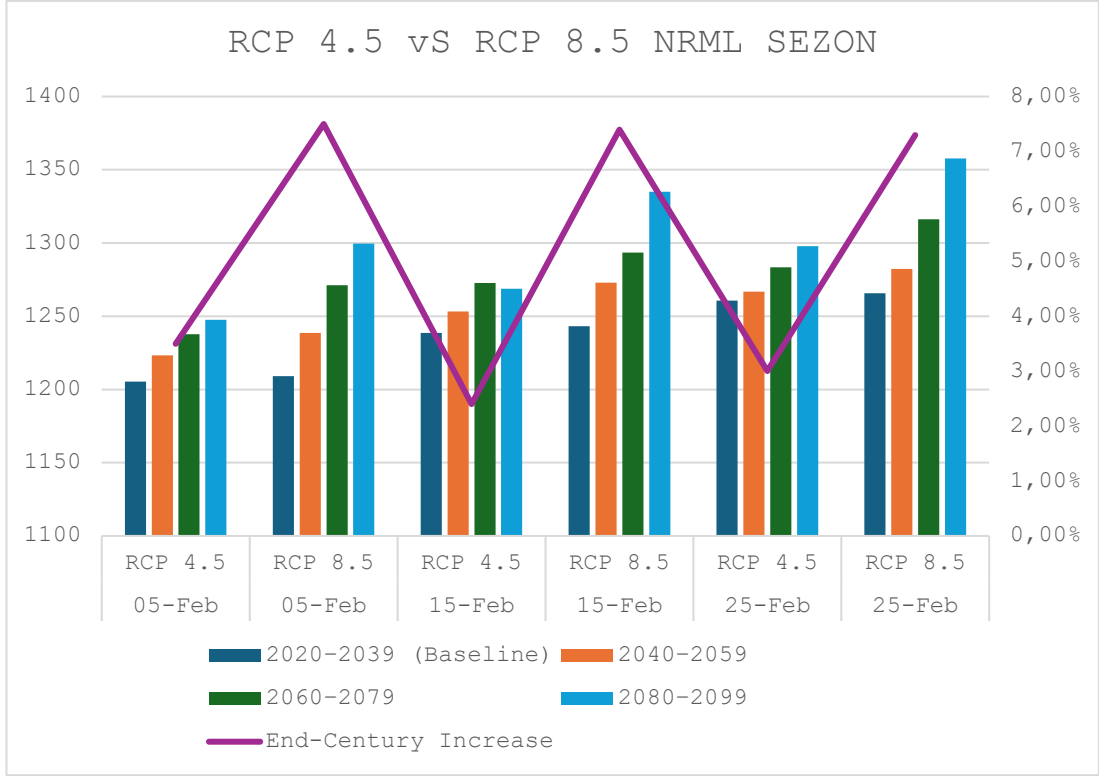
#### 4.3.7 Normal sezonlarda sulama ihtiyaçlarının karşılaştırılması RCP 4.5 ve RCP 8.5

Hem hafif stabilizasyon RCP 4.5 hem de yüksek emisyon RCP 8.5 senaryoları için simüle edilen sonuçların incelenmesi Rosso'daki çeltik tarımının geleceğine dair net bir tablo ortaya koymaktadır. Sonuçlar iklim değişikliği etkilerinin kısa vadede ani veya yıkıcı nitelikte olmayıp kümülatif bir karakter taşıdığını göstermektedir. Senegal Nehri Vadisi'ndeki sıcaklıklar kademeli olarak değişmekte olup bu durum çeltik bitkisinin fizyolojisini sınırlarına kadar zorlamaktadır. Sıcaklıklar yükseldikçe atmosferik buharlaşma talebi artmakta ve bitkilerin biyokütle üretimine devam edebilmesi için su ihtiyaçları yükselmektedir.

İncelenen 05 15 ve 25 Şubat ekim tarihleri Trarza bölgesindeki tarımsal işleyişi yansıtmaktadır. Çiftçiler bu tarihleri su temini personel kapasitesi ve makine performansına göre planlamaktadır. Bu çalışma gelecekteki iklim koşulları altında ekim tarihi seçiminin lojistik hususların ötesine geçerek su kullanım verimliliğini etkileyen kritik bir faktör haline geleceğini ortaya koymaktadır.

Çizelge 4.14 Normal sezon RCP 4,5 VE RCP 8,5 karşılaştırılması

Ekim Tarihi	Senaryo	2020–2039 (Baz)	2040–2059	2060–2079	2080–2099	% Değişim Oranı
05 Feb	RCP 4.5	1205.3	1223.3	1237.8	1247.5	+3.5%
05 Feb	RCP 8.5	1209.2	1238.5	1271.1	1299.6	+7.5%
15 Feb	RCP 4.5	1238.5	1253.2	1272.6	1268.8	+2.4%
15 Feb	RCP 8.5	1243.2	1273.0	1293.5	1335.1	+7.4%
25 Feb	RCP 4.5	1260.6	1266.7	1283.3	1297.8	+3.0%
25 Feb	RCP 8.5	1265.7	1282.4	1316.1	1357.7	+7.3%



Şekil 4.1 RCP 4.5 ve RCP 8.5 NRML sezon karşılaştırması

İki senaryonun karşılaştırılması Rosso'da sulamanın geleceğinin sürdürülebilirlik açısından kesin bir ayırmadan ziyade nüanslı bir yapı sergilediğini göstermektedir. RCP 4.5 kapsamında su talebindeki artış sürdürülebilir niteliktedir. Yüzyıl boyunca yaklaşık %2,5 ile %3,5 oranında artan bu ek gereksinim kanal kaplama gibi iletim verimliliği veya lazer tesviye gibi tarla içi su yönetimi iyileştirmeleriyle hafifletilebilir. Bu senaryoda uyum süreci optimizasyonu gerektirmektedir.

RCP 8.5 kapsamında sistem daha büyük bir stres altındadır. Sulama talebi ılımlı senaryonun yaklaşık iki katı olan %7,3 ile %7,5 oranında artış göstermektedir. Bu durum geç ekilen ürünler için hektar başına 90 ile 100 mm düzeyinde bir artış anlamına gelmektedir. Bölgesel düzeyde iklim değişikliği Senegal Nehri'nde düşük akışlı yıllarda artan pompalama maliyetlerine daha sıkı rotasyon programlarına ve esnekliğin azalmasına neden olmaktadır. Bu yüksek emisyonlu gelecekte uyum yeteneği yalnızca optimizasyonu değil aynı zamanda yapısal modernizasyonu da gerektirmektedir.

Her koşulda ve zaman diliminde 5 Şubat en güçlü ekim tarihi olarak öne çıkmaktadır. Çiftçiler ürün döngüsüne erken başlayarak vejetatif fazın kışın daha soğuk dönemlerinde gelişmesini sağlamakta ve böylece Nisan ile Mayıs aylarındaki yoğun buharlaşma talebine maruz kalmayı azaltmaktadır. Buna karşılık 25 Şubat ekim tarihi yüzyılın sonlarındaki RCP 8.5 koşullarında 1357,7 mm ile zirveye ulaşan en büyük su tüketimine neden olmaktadır. Bu durum ekimi ertelemenin ürünü yaklaşan ısınmanın şiddetine maruz bıraktığını doğrulamaktadır.

Tipik mevsimsel çalışma sıcaklık kaynaklı talebin üstünlüğünü vurgulasa da yalnızca kısmi bir anlatı sunmaktadır. Rosso'daki tarım takvimi iki mevsimden oluşmakta ve Karşı Mevsim belirgin şekilde bağımsız bir hidrolojik sistem altında işlemektedir. Sulama ve Batı Afrika musonu arasındaki etkileşim bu dönemde kritik bir unsurdur. Kurak normal mevsimin aksine karşı mevsim sulama gereksinimlerini azaltacak yağış olasılığını sunmakta ancak aynı zamanda yağış değişkenliği riskini de beraberinde getirmektedir. Rosso'nun çeltik sektörünün kırılganlığını kapsamlı bir şekilde değerlendirmek için yağış sıcaklık ve nem etkileşiminin gelecekteki su yönetimi için benzersiz bir dizi zorluk ve olasılık sunduğu Ağustos ekim dönemine odaklanmak zorunludur.

#### **4.3.8 Karşı sezon sulama gereksinimlerinin karşılaştırılması RCP 4.5 ve RCP 8.5**

Simülasyon sonuçlarının kapsamlı değerlendirmesi RCP 4.5 ve RCP 8.5 senaryoları altında tüm ekim tarihlerinin (05, 15 ve 25 Ağustos) karşılaştırılmasıyla gerçekleştirilmiştir. Çizelge 6.2 sulama ihtiyacının her yöntem için temel dönemden (2020–2039) yüzyılın sonuna (2080–2099) kadar gösterdiği değişimi sunmaktadır. Bu verilerin karşılaştırmalı analizi daha yüksek radyasyon zorlamasının ve ekim zamanlamasının Rosso'da çeltik yetiştiriciliğinin uzun vadeli sürdürülebilirliğini nasıl etkilediğini ortaya koymaktadır.

Çizelge 4.15 karşı sezon rcp 4,5 ve rcp 8,5 karşılaştırılması

Ekim Tarihi	Senaryo	2020–2039 (Baz)	2040–2059	2060–2079	2080–2099	Yüzyıl Sonu Artış
05 Ağu	RCP 4.5	827,6	845,1	859,8	870,0	%5,1
05 Ağu	RCP 8.5	834,7	856,4	874,4	890,9	%7,5
15 Ağu	RCP 4.5	816,9	828,5	847,6	972,8	%19,1
15 Ağu	RCP 8.5	819,4	844,3	877,7	893,3	%9,0
25 Ağu	RCP 4.5	776,4	792,6	807,3	845,7	%8,9
25 Ağu	RCP 8.5	781,5	808,6	862,1	878,4	%12,4

Çizelge 4.15'te sunulan karşılaştırmalı veriler Rosso'da karşı mevsim üretiminin hidrolojik geleceğinin tekdüze olmayıp seçilen emisyon senaryosu ile tarım takvimi arasındaki karmaşık etkileşime bağlı olduğunu göstermektedir. Mutlak hacimsel talep açısından 25 Ağustos ekim tarihi hem temel hem de son on yıllarda en düşük tüketimi kaydederek RCP 8.5 altında 878,4 mm en su tasarruflu seçenek olma özelliğini korumaktadır. Bununla birlikte yüksek emisyon senaryosu altında bu tarih için gözlemlenen belirgin %12,4 oranındaki artış küresel ısınmanın kış aylarının termal fren etkisini giderek aşındırdığının ve böylece geç ekimin geleneksel avantajlarını azalttığının kritik bir göstergesi niteliğindedir.

Bunun aksine 5 Ağustos ekim penceresi daha yüksek bir mutlak su ihtiyacı gerektirmekle birlikte RCP 8.5 altında %7,5 düzeyinde daha ılımlı bir artış göstermekte ve uzun vadede hidrolojik açıdan daha istikrarlı bir profil sunmaktadır. Veri setindeki dikkat çekici bir anomali RCP 4.5 senaryosu altında 15 Ağustos tarihi için öngörülen %19,1 oranındaki keskin artıştır. Bu bulgu orta düzeydeki istikrar senaryolarında bile yağış değişkenliğinin ortalama sıcaklık artışından daha acil bir su güvenliği riski oluşturabileceğini vurgulamaktadır.

#### 4.3.9 Normal sezon sulama gereksinimlerinin karşılaştırma analizi RCP 4.5 ve RCP 8.5

Normal sezon simülasyon sonuçlarının kapsamlı değerlendirmesi RCP 4.5 ve RCP 8.5 senaryoları altında tüm ekim tarihlerinin (05, 15 ve 25 Şubat) karşılaştırılmasıyla gerçekleştirilmiştir. Çizelge 4.15 sulama ihtiyacının her yöntem için temel dönemden

(2020–2039) yüzyılın sonuna (2080–2099) kadar gösterdiği değişimi sunmaktadır. Bu verilerin karşılaştırmalı analizi artan sera gazı emisyonlarının ve ekim zamanlamasının Rosso'da kurak mevsim çeltik yetiştiriciliğinin su yoğunluğu üzerindeki etkisini ortaya koymaktadır.

Çizelge 4.16 Normal sezon sulama gereksinimlerinin karşılaştırma analizi (RCP 4.5 ve RCP 8.5)

Ekim Tarihi	Senaryo	2020–2039 (Baz)	2040–2059	2060–2079	2080–2099	Yüzyıl Sonu Artış
05 Şub	RCP 4.5	1205,3	1223,3	1237,8	1247,5	%3,5
05 Şub	RCP 8.5	1209,2	1238,5	1271,1	1299,6	%7,5
15 Şub	RCP 4.5	1238,5	1253,2	1272,6	1268,8	%2,4
15 Şub	RCP 8.5	1243,2	1273,0	1293,5	1335,1	%7,4
25 Şub	RCP 4.5	1260,6	1266,7	1283,3	1297,8	%3,0
25 Şub	RCP 8.5	1265,7	1282,4	1316,1	1357,7	%7,3

Çizelge 4.16'da sunulan veriler emisyon senaryoları arasındaki makasın yüzyılın ikinci yarısında belirgin şekilde açıldığını göstermektedir. RCP 4.5 senaryosu altında su talebindeki artışlar %2,4 ile %3,5 aralığında kalarak yönetilebilir bir seviyede seyrederken RCP 8.5 senaryosunda bu oranlar iki kattan fazla artarak %7,3 ile %7,5 seviyelerine ulaşmaktadır.

Mutlak değerler açısından incelendiğinde 5 Şubat ekim tarihi her iki senaryoda da en düşük su tüketimini sağlayarak en dirençli seçenek olduğunu kanıtlamaktadır. Buna karşılık 25 Şubat ekim tarihi RCP 8.5 altında yüzyıl sonunda 1357,7 mm su ihtiyacına ulaşarak sistemin sürdürülebilirlik sınırlarını zorlamaktadır. Özellikle 15 Şubat ve 25 Şubat tarihlerinde RCP 8.5 senaryosunun getirdiği ek su ihtiyacı hektar başına yaklaşık 90-100 mm düzeyindedir. Bu durum yüksek emisyonlu bir gelecekte geç ekim stratejisinin büyük ölçekli sulama projeleri için ciddi bir hidrolik risk oluşturacağını doğrulamaktadır.

#### 4.4 İklim Değişikliğine Karşı Alternatif Ürün Önerisi

Simülasyon sonuçları, özellikle RCP 8.5 senaryosu altında ve kurak geçen Karşı Sezonda (Ağustos-Kasım), çeltik bitkisinin su talebinin mevcut su kaynaklarını zorlayacağını göstermiştir. Bu nedenle çalışma kapsamında, bir çözüm önerisi olarak; çok su tüketen çeltik yerine, daha az su isteyen Mısır (*Zea mays*) bitkisi denenmiştir.

Yapılan CROPWAT analizine göre; Karşı Sezon için Mısır bitkisi ekildiğinde, toplam su ihtiyacı ETc 641.9 mm, net sulama gereksinimi ise 514.2 mm olarak hesaplanmıştır. Bu değer, aynı dönemde çeltik bitkisinin tükettiği sudan yaklaşık %50 daha azdır.



Month	Decade	Stage	Kc	ETc	ETc	Eff rain	Irr. Req.
			coeff	mm/day	mm/dec	mm/dec	mm/dec
Aug	1	Init	0.30	1.79	10.8	13.1	0.0
Aug	2	Init	0.30	1.73	17.3	26.2	0.0
Aug	3	Deve	0.37	2.09	22.9	24.6	0.0
Sep	1	Deve	0.63	3.50	35.0	23.5	11.4
Sep	2	Deve	0.90	4.87	48.7	23.2	25.5
Sep	3	Mid	1.16	6.66	66.6	16.9	49.7
Oct	1	Mid	1.23	7.62	76.2	8.7	67.5
Oct	2	Mid	1.23	8.04	80.4	2.4	77.9
Oct	3	Mid	1.23	7.90	86.9	1.6	85.3
Nov	1	Late	1.21	7.62	76.2	0.1	76.1
Nov	2	Late	0.98	6.09	60.9	0.0	60.9
Nov	3	Late	0.69	4.19	41.9	0.0	41.9
Dec	1	Late	0.44	2.59	18.2	0.2	17.9
					<b>641.9</b>	<b>140.6</b>	<b>514.2</b>

Şekil 4.2 MISIR bitkisi sulama gereksinimi

## 5. SONUÇ

Moritanya tarım sektörünün karşı karşıya olduğu kritik bir soruyla başlatılmıştır: İklim değişikliğinin artan etkileri Senegal Nehri Vadisi'ndeki çeltik yetiştiriciliğinin hidrolojik sürdürülebilirliğini nasıl etkileyecektir? Bu araştırma FAO (2023) tarafından güncellenen CROPWAT 8.0 modelleme çerçevesini ölçeklendirilmiş CMIP6 iklim projeksiyonlarıyla birleştirerek Rosso'daki gelecekteki su talebinin niceliksel bir değerlendirmesini sunmuştur. Benzer kurak ve yarı kurak bölgelerde yapılan çalışmalar (Gilanipour ve Gholizadeh, 2016), bu modelleme yaklaşımının gelecekteki su stresini tahmin etmede yüksek güvenilirlik sağladığını doğrulamaktadır."

Analizler net ve güçlü bir sonuca varmaktadır. Hidrolojik istikrar dönemi sona ermiştir. İster ekim tarihi ister emisyon yörüngesi olsun simüle edilen her senaryoda çeltik için sulama suyu talebi 21. yüzyıl boyunca istikrarlı bir artış göstermektedir. Bu eğilim öngörülemeyen yağış düzenlerinden değil ısınan atmosferin sürekli termodinamik süreçlerinden kaynaklanmaktadır. Trarza bölgesinde sıcaklıklar arttıkça atmosferik buharlaşma talebi doğrusal bir çizgide artmakta ve bu durum her hektar ekilebilir arazinin bir iklim vergisi ödemesi gerektiği anlamına gelmektedir.

Araştırma özellikle üç belirleyici dinamiği vurgulamıştır:

- **Evapotranspirasyonun Hakimiyeti:** Normal bir mevsimde etkili yağış tarımsal su bütçesinin %1 oranından daha azını oluşturmaktadır. Sistem yalnızca hidrolik bir mekanizma olarak çalışmakta ve bu durum daha yüksek sıcaklıkların doğrudan nehirden daha fazla su çekilmesine yol açtığını göstermektedir.
- **Yağış Tamponunun Kötüleşmesi:** Mevsimsel yağışların tarihsel faydası Karşı Mevsim sırasında kaybolmaktadır. Yüksek emisyonlu RCP 8.5 senaryosunda, sıcaklık artışı ve buna bağlı evaporatif (buharlaşma) talep 2050 yılından sonra şiddetlenmekte ve yüzyıl sonu tahminleri sulama ihtiyaçlarının %12 ile %15 oranında artacağını göstermektedir.

- **Ekim Zamanı Yönetimi:** Agronomik adaptasyon sınırlı bir koruma sağlamaktadır. Şubat ayında erken ekim (Normal Sezon) ve ağustos ayında geç ekim (Karşı Sezon) iklim kaynaklı stresi önemli ölçüde azaltarak en verimli su yönetim stratejileri olarak belirlenmiştir.

Bu çalışma Rosso'da çeltik yetiştiricinin hala mümkün olduğunu ancak kaynak maliyetlerinin artacağını göstermektedir. Gıda güvenliği için suyun gölge fiyatı yükselmektedir. Bölge suyu yönetmek için geleneksel yöntemleri kullanmaya devam ederse artan maliyetler Senegal Nehri'nin su ihtiyacını karşılamasını zorlaştıracak ve bu da tarım hidroelektrik ve ekolojik hizmetler arasındaki rekabeti daha da şiddetlendirecektir.

### 5.1 Politika ve Uygulama Önerileri

Hidrolojik rejimdeki bu değişikliklere rağmen çeltik üretiminin gelecekte de sürdürülebilirliğini sağlamak için SONADER ve bölge planlamacıları tarafından aşağıdaki adımların atılması önerilmektedir:

- **Ekim Takviminin Kurumsallaştırılması:** 5 Şubat (Normal Sezon) ve 25 Ağustos (Karşı Sezon) ekim tarihleri sadece birer öneri olarak değil kurumsal hedefler olarak değerlendirilmelidir. Çiftçilerin bu ideal zaman aralıklarına ulaşabilmeleri için tohum tedariki ve kredi dağıtım lojistiğinin bu takvimle tam uyumlu hale getirilmesi gerekmektedir.
- **Hidrolik Verimliliğe Yatırım:** Sistem, en kötü senaryolarda talebin hektar başına neredeyse 100 mm artabileceği bir gelecekte, mevcut su kayıplarını tolere edemeyecektir. Rosso ve M'Pourie ovasındaki ana kanalların mevcut durumu göz önüne alındığında (El Ezza vd., 2024), mühendislik odaklı en etkili adaptasyon; iletim kayıplarını azaltmak için ikincil kanalların kaplanmasıdır.
- **Havza Ölçeğinde Muhasebe:** OMVS havza modellerinde iklim değişikliği kaynaklı beklenen talep artışının hesaba katılması şarttır. Bu çalışma talebin yüzyıl içinde %5 ila %15 oranında artacağını ortaya koymuştur. Gelecekteki su

taahsisleri yalnızca tarihsel ortalamalara dayandırılmaz bu termodinamik artış dikkate alınmalıdır.

- **Alternatif Ürün Deseni Potansiyeli:** Bölgesel su bütçesi üzerindeki baskıyı hafifletmek ve tarımsal direnci artırmak amacıyla, özellikle atmosferik buharlaşma talebinin zirve yaptığı Karşı Sezon üretim deseninde stratejik bir değişikliğe gidilmelidir. Mevcut "Çeltik Monokültürü" (art arda çeltik ekimi) uygulamasının sürdürülemez olduğu anlaşılmıştır. Bunun yerine, bu çalışmada yapılan simülasyonlarla sulama suyu ihtiyacında yaklaşık %50 oranında tasarruf (514 mm) sağladığı tespit edilen; "Normal Sezonda Çeltik- Karşı Sezonda Mısır (*Zea mays*) veya Yem Bitkisi" rotasyon modelinin uygulanması, bölgesel bir iklim adaptasyon politikası olarak kurumsallaştırılmalıdır.

Rosso'nun iklime dayanıklılığı tesadüfe değil ileri görüşlü planlamaya bağlıdır. Moritanya bugün artan su talebinin termodinamik gerçekliğini kabul ederek geleceğin iklim baskılarıyla başa çıkabilecek dirençli bir gıda sistemi inşa edebilecektir.

## KAYNAKLAR

- Ahmad, M. D., Biggs, T., Turrall, H. Ve Scott, C. A. 2006. Application of SEBAL and CROPWAT for evaluating water productivity in paddy systems of South Asia. *Agricultural Water Management*, 84(3), 293–301.
- Aich, V., Akumaga, U., Adeyemi, O. Ve Hattermann, F. F. 2020. The influence of climate change on water resources in the Upper Niger Basin. *Science of the Total Environment*, 742, 140504.
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D. Ve Smith, M. 1998. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56. FAO, Rome.
- Bouazzama, B., Bahri, A. Ve Kuper, M. 2015. Water demands and irrigation planning for rice utilizing CROPWAT in semi-arid areas. *Agricultural Water Management*, 159, 14–25.
- Bouraima, A. K., Zhang, W. Ve Wei, C. 2015. Irrigation water requirements of rice using CROPWAT model in Northern Benin. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 8(2), 58–64.
- Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences  
<https://www.cjees.ro/viewtopic.php?TopicId=1057> Erişim Tarihi: 11.01.2026.
- El Ezza, H. D., Cheikh, M. F., et al. 2024. Water Resource Impacts of Irrigation: The Case of the Main Irrigation Canal from the M'Pourie Plain to Rosso in Mauritania. *NEPT Journal*, 23(1), 112-120.
- FAO. (2023). *CROPWAT 8.0 Model Description*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Erişim Linki: <https://www.fao.org/land-water/databases-and-software/cropwat/en/>
- FAO. 2023. CROPWAT 8.0 and CLIMWAT 2.0 Documentation. Land and Water Division, FAO, Rome.
- Gbode, I. A., Adelekan, I. O., Ogunjobi, K. O. Ve Olapido, E. A. 2019. Anticipated alterations in climate extremes across West Africa as indicated by CORDEX simulations. *Theoretical and Applied Climatology*, 137, 3021–3036.
- Gbode, I. E., Diro, G. T., Intsiful, J. D. Ve Dudhia, J. 2022. Current conditions and projected changes in crop water demand, irrigation requirement, and water availability over West Africa. *Atmosphere*, 13(7), 1155.
- Gilanipour, J. Ve Gholizadeh, B. 2016. Prediction of Rice Water Requirement Using FAO-CROPWAT Model in North Iran under Future Climate Change. *Preprints.org*. <https://doi.org/10.20944/preprints201610.0134.v1>.
- IPCC. 2021. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge.
- OMVS. 2021. Rapport annuel concernant les ressources en eau et la gestion du barrage de Diama. Organisation pour la Mise en Valeur du fleuve Sénégal, Dakar.

- OMVS. 2022. Senegal River Basin Water Management Report 2022. Organisation pour la Mise en Valeur du fleuve Sénégal, Dakar.
- O'Neill, B. C., Tebaldi, C., van Vuuren, D. P., Eyring, V., Friedlingstein, P., Hurtt, G., ... & Sanderson, B. M. (2016). The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6. *Geoscientific Model Development*, 9(9), 3461-3482. Erişim Linki (DOI): <https://doi.org/10.5194/gmd-9-3461-2016>
- Phan, T. T., Nguyen, H. L. Ve Bui, V. L. 2025. Application of the CROPWAT 8.0 and cmhyd models to assess irrigation water requirements in the Ba River Basin under climate change scenarios. *Civil and Environmental Engineering Journal*, 5(2), 169–179.
- Riahi, K., Rao, S., Krey, V., Cho, C., Chirkov, V., Fischer, G., ... & Rafaj, P. (2011). RCP 8.5—A scenario of comparatively high greenhouse gas emissions. *Climatic Change*, 109, 33-57. Erişim Linki (DOI): <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0149-y>
- Sarr, B. 2015. A review of the present and future climate of West Africa. *Frontiers in Environmental Science*, 3, 58.
- Sultan, B. Ve Gaetani, M. 2016. Agriculture in West Africa in the twenty-first century: Climate change and impacts scenarios. *Frontiers in Plant Science*, 7, 1262.
- Thomson, A. M., Calvin, K. V., Smith, S. J., Kyle, G. P., Volke, A., Patel, P., ... & Wise, M. A. (2011). RCP4.5: a pathway for stabilization of radiative forcing by 2100. *Climatic Change*, 109, 77-94. Erişim Linki (DOI): <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0151-4>
- Van Oort, P. A. J. Ve Zwart, S. J. 2018. The effects of climate change on rice production in Africa and the factors contributing to simulated yield variations. *Global Change Biology*, 24(3), 1029–1045.
- Van Vuuren, D. P., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., ... & Rose, S. K. (2011). The representative concentration pathways: an overview. *Climatic Change*, 109, 5-31. Erişim Linki (DOI): <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0148-z>
- World Bank Group. 2024. Climate Change Knowledge Portal (CCKP): Mauritania. Web Sitesi: <https://climateknowledgeportal.worldbank.org/country/mauritania>. Erişim Tarihi: 18.12.2025.