

T.C.
BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
İKTİSAT ANABİLİM DALI

İKLİM DEĞİŞİKLİĞİNİN MAHSUL VERİMİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

RABİA ÖZDEMİR

TEZ DANIŐMANI

DOÇ. DR. MUHAMMED BENLİ

BİLECİK, 2025

10749104

T.C.
BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
İKTİSAT ANABİLİM DALI

İKLİM DEĞİŞİKLİĞİNİN MAHSUL VERİMİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

RABİA ÖZDEMİR

TEZ DANIŐMANI

DOÇ. DR. MUHAMMED BENLİ

BİLECİK, 2025

10749104

BEYAN

'İklim Değişikliğinin Mahsul Verimi Üzerindeki Etkisi' adlı yüksek lisans hazırlık ve yazımı sırasında bilimsel araştırma ve etik kurallarına uyduğumu, başkalarının eserlerinden yararlandığım bölümlerde bilimsel kurallara uygun olarak atıfta bulunduğumu, kullandığım verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı, tezin herhangi bir kısmının Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunulmadığımı, aksinin tespit edileceği muhtemel durumlarda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Bu çalışmanın, Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP), TÜBİTAK veya benzeri kuruluşlarca desteklenmesi durumunda; projenin ve destekleyen kurumun adı proje numarası ile birlikte, ETİK KURUL onayı alınması durumunda ise ETİK KURUL tarih karar ve sayı bilgilerinin beyan edilmesi gerekmektedir.	
DESTEK ALINMIŞTIR	DESTEK ALINMAMIŞTIR
<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Destek alındı ise;	
Destekleyen kurum;	
Desteğin Türü	Proje Numarası
1- BAP (Bilimsel Araştırma Projesi)	
2- TÜBİTAK	
Diğer;.....	
.....	
ETİK KURUL onayı var ise;	
ETİK KURUL karar tarih/sayı:/.....

Rabia Özdemir

Tarih

.....

İmza

.....

ÖN SÖZ

Yüksek lisans sürecim boyunca edindiğim bilgi ve deneyimleri, bu tez çalışmasıyla akademik bir zemine taşımanın mutluluğunu yaşıyorum. Tez süreci, sadece bilimsel gelişimime değil; sabır, disiplin ve sorumluluk gibi kişisel becerilerime de önemli katkılar sağlamıştır.

Çalışmam boyunca rehberliği, bilgi birikimi ve değerli katkılarıyla bana yol gösteren her aşamada destek olan danışmanım Doç. Dr. Muhammed BENLİ'ye en içten teşekkürlerimi sunarım. Onun yönlendirmeleri, bu tezin şekillenmesinde büyük rol oynamıştır.

Ayrıca bu süreçte bana sabırla destek olan aileme, moral ve motivasyonunu daima yanımda hissettiren dostlarıma da teşekkür ederim.

Hazırladığım bu tezin, alan yazına katkı sağlamasını ve sonraki çalışmalara ilham vermesini temenni ederim.

Rabia Özdemir

2025

ÖZET

İKLİM DEĞİŞİKLİĞİNİN MAHSUL VERİMİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİ

Bu çalışma, Türkiye’de buğday, patates, pirinç, muz ve soya fasulyesi ürünlerinin verimliliklerinin iklim değişkenleri (sıcaklık, yağış ve CO₂ seviyesi) karşısındaki tepkilerini ampirik olarak analiz etmektedir. Ampirik analizde, Otoregresif Gecikmesi Dağıtılmış (ARDL - Autoregressive Distributed Lag) modeli kullanılmış ve hem uzun dönemli eşbütünleşme ilişkileri hem de kısa dönemli dinamik etkiler ürün bazında detaylı şekilde incelenmiştir. Buğday ve patates üretiminde iklim değişkenleri ile uzun dönemli denge ilişkisi tespit edilmişken; pirinç, muz ve soya fasulyesi için yalnızca kısa dönemli etkiler gözlemlenmiştir.

Çalışmanın bulgularına göre buğday verimi, ılımlı sıcaklık artışları ve CO₂ seviyeleri altında olumlu etkilenmekte; ancak aşırı sıcaklıklar ve fazla yağış, verimi düşürmektedir. Patates üretimi de benzer şekilde ılımlı iklim koşullarından fayda sağlarken, yüksek sıcaklık ve aşırı yağış koşulları üretimi olumsuz etkilemektedir. Pirinç, muz ve soya fasulyesi ise uzun dönemli iklim değişkenlerine tepki vermemekte, fakat kısa vadeli dalgalanmalardan etkilenmektedir. Özellikle CO₂ gübreleme etkisi, muz ve soya üretiminde verimi artırırken; ani sıcaklık artışları veya aşırı yağışlar ile CO₂'nin birlikte yükselmesi, bu ürünlerde verimi düşürücü bir etki yaratmaktadır.

Çalışmada elde edilen bulgular, Türkiye tarımının iklim değişikliğine karşı ürün bazlı, hedefe yönelik adaptasyon stratejilerine ihtiyaç duyduğunu ortaya koymaktadır. Bu bağlamda, buğday ve patates için uzun vadeli kaynak yönetimi, kuraklık ve sıcaklık toleranslı tohum çeşitlerinin geliştirilmesi ve sulama altyapısının güçlendirilmesi önerilmektedir. Pirinç, muz ve soya için ise kısa vadeli iklim dalgalanmalarına karşı esnek üretim planlaması, kısa çevrimli çeşitlerin kullanımı, tahmin sistemlerinin yaygınlaştırılması ve etkin nem kontrolü öne çıkmaktadır. Ayrıca, politika düzeyinde hassas tarım teknolojilerine teşvik sağlanması, çiftçi eğitimlerinin yaygınlaştırılması ve iklim dayanıklı tarım uygulamalarının yaygınlaştırılması önerilmektedir.

Bu çalışma, iklim değişikliğinin tarımsal üretime olan etkilerinin ürün özelinde değerlendirilmesinin ne denli önemli olduğunu vurgulamakta ve sürdürülebilir gıda güvenliği ile kırsal kalkınma hedefleri doğrultusunda uygulanabilir öneriler sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: İklim Değişikliği, Tarımsal Verimlilik, ARDL.

ABSTRACT
THE IMPACT OF CLIMATE CHANGE ON CROP YIELD

This study provides a comprehensive empirical analysis of how climate variables—namely temperature, precipitation, and CO₂ levels—affect the yields of five key crops in Türkiye: wheat, potatoes, rice, bananas, and soybeans. Utilizing the Autoregressive Distributed Lag (ARDL) framework, the research explores both long-run cointegration relationships and short-run dynamic responses to climatic changes on a crop-specific basis.

The findings reveal that wheat and potato yields exhibit a stable long-term relationship with climate variables. Wheat benefits from moderate increases in temperature and CO₂, yet is negatively affected by extreme heat and excessive precipitation. Similarly, potato yields are positively associated with moderate climate conditions but decline under prolonged heat and waterlogging. On the other hand, rice, banana, and soybean yields do not show any long-run association with climate variables, indicating that their responses are confined to short-run fluctuations. Notably, while CO₂ fertilization positively affects banana and soybean yields, its interaction with excessive heat or rainfall can generate compounded stress effects, reducing productivity.

The results underscore the need for differentiated climate adaptation strategies across crops. For wheat and potatoes, long-term adaptive responses such as breeding for heat and drought resistance, improved irrigation systems, and altered planting schedules are essential. For rice, bananas, and soybeans, flexible short-term strategies including weather-based advisories, short-cycle cultivars, and advanced drainage infrastructure are critical. At the policy level, the study recommends supporting precision agriculture, expanding farmer education programs, and fostering institutional collaborations for region-specific adaptation planning.

By identifying crop-specific climate sensitivities, this study contributes to the growing body of literature on agricultural climate resilience and offers actionable insights for safeguarding Türkiye's food security and rural livelihoods in the face of increasing climate variability.

Keywords: Climate Change, Agricultural Productivity, ARDL.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖN SÖZ.....	i
ÖZET.....	ii
ABSTRACT.....	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
TABLolar LİSTESİ	v
KISALTMALAR VE SİMGELER LİSTESİ.....	vi
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR TARAMASI	4
2.1. Simülasyon Temelli Modellemelerle Yapılmış Çalışmalar	4
2.2. İstatistiksel ve Ekonometri Tabanlı Analizler.....	11
2.3. Meta-Analizler ve Çoklu Model Karşılaştırmaları	15
2.4. Deneysel ve Gözlemsel Çalışmalar.....	20
2.5. Yöntemsel Katkıları ve Özgün Modelleme Yaklaşımları	21
2.6. Bölgesel Değerlendirmeler ve Uyum Stratejileri.....	24
3. VERİLER VE METODOLOJİ.....	26
4. AMPİRİK SONUÇLAR.....	30
4.1. Buğday	31
4.2. Patates.....	37
4.3. Pirinç.....	43
4.4. Muz	50
4.5. Soya Fasulyesi.....	53
SONUÇ	57
KAYNAKÇA	63

TABLULAR LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 3.1. Değişkenlere İlişkin Özet Bilgiler.....	26
Tablo 3.2. Tanımlayıcı İstatistikler.....	26
Tablo 4.1. Birim Kök Testleri.....	31
Tablo 4.2. ARDL Sonuçları (Buğday).....	32
Tablo 4.3. ARDL Sonuçları (Patates).....	37
Tablo 4.4. ARDL Sonuçları (Pirinç).....	43
Tablo 4.5. Kısa Dönem Sonuçları (Pirinç).....	47
Tablo 4.6. ARDL Sonuçları (Muz).....	50
Tablo 4.7. Kısa Dönem Sonuçları (Muz).....	51
Tablo 4.8. ARDL Sonuçları (Soya Fasülyesi).....	53
Tablo 4.9. Kısa Dönem Sonuçları (Soya Fasülyesi).....	54

KISALTMALAR VE SİMGELER LİSTESİ

- ARDL:** Otoregresif Gecikmesi Dağıtılmış
- ECM:** Hata Düzeltme Modeli
- LM:** Lagrange Çarpanı
- AIC:** Akaike Bilgi Kriteri
- RCM:** Bölgesel İklim Modeli
- ECT:** Hata Düzeltme Terimi
- CUSUM:** Kümülatif Toplam Kontrol Grafiği
- GCM:** Genel Dolaşım Modeli
- VECM:** Vektör Hata Düzeltme Modeli
- MRI:** Japonya Meteoroloji Araştırma Enstitüsü Modeli
- NAO:** Kuzey Atlantik Salınımı
- NINO:** El Niño Etki Göstergesi
- ENSO:** El Niño – Güney Salınımı
- DTR:** Günlük Sıcaklık Aralığı
- FMOLS:** Tam Düzeltilmiş En Küçük Kareler Yöntemi
- GSYH:** Gayri Safi Yurtiçi Hasıla
- PDSI:** Palmer Kuraklık Şiddet İndeksi
- ADF:** Augmented Dickey-Fuller
- PP:** Phillips–Perron

1. GİRİŞ

Türkiye'nin tarım sektörü, ülke ekonomisinin belkemiğini oluşturmakta; kırsal kesimlerin geçim kaynağını sağlaması, ihracat gelirlerine katkıda bulunması ve artan nüfusun gıda güvenliğini temin etmesi açısından hayati bir rol oynamaktadır. Tarımsal açıdan dünyanın en çeşitli ülkelerinden biri olan Türkiye, buğday, pirinç, soya fasulyesi, muz ve patates gibi pek çok temel ürünü üretmektedir. Ancak son yıllarda, iklim değişikliği bu sektörde giderek büyüyen bir tehdit oluşturmaktadır. Artan sıcaklıklar, düzensizleşen yağış desenleri ve atmosferdeki CO₂ seviyelerinin yükselmesi gibi faktörler, ürün gelişimini, verim istikrarını ve genel tarımsal sürdürülebilirliği olumsuz etkilemektedir (Bozoğlu vd., 2019). Bu iklimsel değişkenlerin tarımsal verim üzerindeki etkilerini anlamak, Türkiye'nin tarımının gelecekteki dayanıklılığını artırmak açısından kritik öneme sahiptir. Özellikle iklim dalgalanmalarının şiddetlendiği günümüz koşullarında, ülkenin tarım politikalarının bu yeni gerçekliğe uyum sağlaması her zamankinden daha elzemdir.

Sıcaklık, yağış ve atmosferik CO₂ gibi iklimsel değişkenlerin tarımsal verim üzerindeki etkileri oldukça karmaşıktır ve çoğu zaman ürün türüne göre önemli ölçüde farklılık gösterir (Hatfield vd., 2011; Meng vd., 2017; Makowski vd., 2020). Örneğin sıcaklık, ürünün ısı toleransına ve gelişim evresine bağlı olarak büyümeyi ya teşvik eder ya da engeller (Kaushal vd., 2016). Ilıman sıcaklıklar büyüme hızını artırıp gelişim sürecini hızlandırabilirken, aşırı sıcaklıklar bitkilerde stres yaratabilir, fotosentezi sekteye uğratabilir ve nihayetinde verimi düşürebilir (Sharkey, 2005; Zhu vd., 2021; Bernacchi vd., 2023). Benzer şekilde, yağış su temini açısından hayati önem taşır; ancak aşırı yağış, özellikle suya duyarlı ürünlerde, toprakta su baskınlarına, besin maddesi yıkanmasına ve oksijen yetersizliğine neden olarak bitki gelişimini olumsuz etkileyebilir (Kaur vd., 2020; Loreti ve Striker, 2020). Atmosferdeki CO₂ ise fotosentezin temel girdilerinden biri olmakla birlikte, etkisi her zaman net değildir. C₃ fotosentez yoluna sahip birçok üründe CO₂ artışı fotosentez oranını yükselterek verim artışına katkı sağlayabilir; ancak bu potansiyel fayda, su ve sıcaklık gibi diğer sınırlayıcı faktörlerin varlığında sınırlı kalabilir (Lawlor ve Mitchell, 1991; Bishop vd., 2019; Boretti ve Florentine, 2019).

Tarım ürünlerinin iklimsel değişkenlere verdikleri tepkilerin farklılık göstermesi, ürün verimi ile iklim faktörleri arasındaki hem kısa vadeli hem de uzun vadeli ilişkilerin incelenmesini zorunlu kılmaktadır. Eşbütünleşme (cointegration) analizi, ürün verimi ile sıcaklık, yağış ve CO₂ gibi çevresel değişkenler arasında uzun dönemli bir denge ilişkisi olup olmadığını test etmenin etkili bir yoludur. Eğer eşbütünleşme tespit edilirse, bu durum iklim

değişkenlerinin ürün verimi üzerinde kalıcı bir etkisi olduğunu ve kısa vadeli sapmaların zamanla uzun vadeli dengeye geri döndüğünü gösterir. Bu tür ürünler için hem uzun vadeli eğilimlerin hem de ani tepkilerin anlaşılması, iklim etkilerinin kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesi açısından kritik önemdedir. Buna karşın, eşbütünleşme ilişkisi olmayan ürünlerde kısa vadeli dinamikler belirleyicidir; bu da verimin, uzun vadeli eğilimlerden ziyade, anlık iklim dalgalanmalarına karşı daha hassas olduğunu ortaya koyar. Kısa ve uzun dönem etkileri birbirinden ayırt etmek, özellikle her bir ürünün ihtiyacına uygun iklim uyum politikaları geliştirmek isteyen karar alıcılar ve çiftçiler açısından büyük önem taşımaktadır.

Bu çalışmada Türkiye'de buğday, patates, soya fasulyesi, muz ve pirinç olmak üzere beş temel ürünün verimlerini analiz etmek amacıyla Gecikmesi Dağıtılmış Otoregresif (Autoregressive Distributed Lag – ARDL) modeli kullanılmaktadır (Pesaran ve Shin, 1998; Pesaran vd., 2001). ARDL modeli aracılığıyla, her bir ürünün veriminin sıcaklık, yağış ve CO₂ seviyeleriyle eşbütünleşik olup olmadığı değerlendirilebilmekte ve eşbütünleşme tespit edildiği durumlarda hem kısa hem de uzun vadeli katsayılar tahmin edilebilmektedir. Bu kapsamda çalışma, aşağıdaki üç temel araştırma sorusuna odaklanmaktadır:

i. Hangi ürünler iklim değişkenleriyle uzun vadeli bir eşbütünleşme ilişkisi göstermektedir? Eşbütünleşmenin varlığı, ürün verimlerinin çevresel koşullara karşı istikrarlı ve kalıcı bir bağımlılık gösterip göstermediğini ortaya koyarak, bu ürünlerin iklim eğilimlerine karşı dirençli mi yoksa hassas mı olduğuna dair önemli ipuçları sunar.

ii. Kısa vadeli dinamikler, özellikle uzun dönemli eşbütünleşme ilişkisi olmayan ürünlerde, verimi nasıl etkilemektedir? Eşbütünleşmenin bulunmadığı ürünlerde verimdeki değişimler, anlık iklim dalgalanmalarıyla şekillendiği için sıcaklık, yağış ve CO₂'ye verilen kısa dönemli tepkilerin anlaşılması gerekir.

iii. Sıcaklık, yağış ve CO₂ faktörleri ürünler arasında nasıl etkileşim göstermektedir ve bu etkileşimlere bağlı olarak hangi ürün-özellik yönetim stratejileri iklim risklerini azaltabilir? Her bir iklim değişkeninin ve bunların etkileşimlerinin farklı ürünler üzerindeki etkilerini anlayarak, iklim değişikliğine karşı verimi optimize edecek uyum politikaları geliştirilebilir.

Bu çalışmadan elde edilen bulgular, Türkiye'de tarımsal planlamaya ve iklim uyum stratejilerine yön vererek, farklı iklim koşulları altında her bir ürünün özgül ihtiyaçlarına dair kapsamlı içgörüler sunacaktır. Özellikle buğday ve patates gibi ürünlerde uzun dönemli iklim değişkenleriyle kurulan kalıcı ilişkilerin tarımsal dirençlilik açısından belirleyici olabileceği göz önünde bulundurulduğunda, elde edilen sonuçlar bu ürünlerin zaman içinde iklim koşullarına nasıl uyum sağladığını ortaya koyacaktır. Öte yandan, pirinç, soya fasulyesi ve muz

gibi ürünlerde kısa dönemli dinamiklere odaklanmak, ani çevresel dalgalanmalara karşı nasıl daha etkili bir şekilde önlem alınabileceğine dair yol gösterici olacaktır. Bu bağlamda, iklim değişkenlerine uzun vadeli bağımlılığı olan ve olmayan ürünler arasında yapılan ayırım, sürdürülebilir tarımsal üretkenliği desteklemeye yönelik hedefe dönük müdahale alanlarının daha net bir şekilde belirlenmesine olanak tanıyacaktır.

Bu yönüyle çalışma, iklim değişikliği ve tarım ilişkisini ele alan literatüre Türkiye bağlamında özgün bir katkı sunmaktadır. Literatürdeki pek çok çalışma, iklim değişkenlerinin tarımsal verim üzerindeki etkilerini Güney Avrupa, Güneydoğu Asya ve Kuzey Amerika gibi bölgelerde incelemişken, bu çalışma aşağıda listelenen yönleriyle ilgili literatüre önemli bir katkı sağlamaktadır:

- i. Türkiye’de beş temel ürün (buğday, pirinç, soya fasulyesi, muz ve patates) için sıcaklık, yağış ve CO₂’nin kısa ve uzun dönemli etkilerini ARDL sınır testleri yöntemiyle analiz etmesi,
- ii. İklim değişkenleri arasındaki etkileşimleri dikkate alan kapsamlı bir çözümleme sunarak, bu faktörlerin birlikte ürün verimi üzerindeki bileşik etkilerine dair daha derinlemesine bir bakış sağlaması.

Türkiye’nin yarı kurak tarım yapısına özgü koşulları merkeze alması sayesinde, bu çalışma yalnızca yerel bağlamı değil, benzer iklimsel zorluklarla karşı karşıya olan diğer bölgeler için de genellenebilir politik ve bilimsel çıkarımlar sunmaktadır.

2. LİTERATÜR TARAMASI

İklim değışikliği, küresel tarım sistemlerini tehdit eden en önemli çevresel sorunlardan biridir. Artan sıcaklıklar, değışen yağış rejimleri ve atmosferdeki CO₂ seviyelerindeki yükselme gibi etkenlerin tarımsal üretim üzerindeki etkileri, farklı yöntemlerle yapılan birçok çalışmada incelenmiştir. Bu bölümde, literatürde yer alan başlıca çalışmalar içeriklerine göre gruplandırılarak ve her biri ayrıntılı şekilde açıklanarak sunulmaktadır.

2.1. Simülasyon Temelli Modellemelerle Yapılmış Çalışmalar

Aggarwal ve Mall (2002), Hindistan'daki farklı agroklimatik bölgelerde sulanan çeltik (rice) üretimi üzerinde iklim değışikliğinin olası etkilerini değerlendirmektedir. Çalışmada, iki farklı ürün simülasyon modeli (CERES-Rice ve ORYZA1N) kullanılarak çeşitli iklim senaryoları ve farklı azot (N) yönetimi düzeyleri altında iklim değışikliğinin doğrudan etkileri analiz edilmiştir. Bulgular, iklim değışikliğinin tarımsal üretim üzerindeki etkilerinin, kullanılan model türüne, yönetim düzeyine ve bölgesel koşullara göre önemli ölçüde değışebileceğini ortaya koymaktadır. Özellikle, daha düşük sıcaklıklara sahip güney ve batı Hindistan bölgelerinde, çeltik veriminin iklim değışikliğine karşı daha yüksek duyarlılık gösterdiği belirlenmiştir. En iyimser senaryolarda verim artışı %3.5 ile %33.8 arasında değışirken, en kötümser senaryolarda dahi %1.0 ila %16.8 arasında pozitif etki gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, düşük azot yönetimi koşullarında verim artışı daha sınırlı kalmıştır. Çalışma, modelden kaynaklanan belirsizliklerin ve yönetim düzeylerinin, iklim değışikliği etkisinin tahmininde %32'ye kadar yanlılığa neden olabileceğine dikkat çekmektedir. Ayrıca, bu tür analizlerde ortalama verim ve ortalama iklim değışkenleri yerine, ürün gelişimi ve fotosentezdeki eşik tepkilerin göz önünde bulundurulması gerektiği vurgulanmaktadır.

Türkiye özelinde, Özdoğan (2011), atmosferik CO₂ konsantrasyonlarındaki artış ve buna bağlı iklim değışikliklerinin kuzeybatı Türkiye'deki kışlık buğday verimi üzerindeki potansiyel etkilerini değerlendiren modelleme temelli bir çalışma gerçekleştirmiştir. Çalışmada, üç farklı geleceğe dönük zaman dilimi ve üç emisyon senaryosu kapsamında dört küresel sirkülasyon modeli (GCM) kullanılmıştır. Tüm modellerde, özellikle yüksek emisyon senaryoları altında, büyüme sezonu ortalama sıcaklıklarında tutarlı bir artış saptanmış; buna karşılık yağış miktarında değışen oranlarda azalmalar gözlemlenmiştir. Yalnızca atmosferik CO₂ seviyesindeki artış dikkate alındığında —iklim değışkenliği hariç tutulduğunda— fotosentez ve su kullanım etkinliğindeki iyileşmeler sayesinde buğday veriminde hafif bir artış görülmüştür. Ancak sıcaklık ve yağış değışimleri hesaba katıldığında, kışlık buğday veriminde

kullanılan modele bağılı olarak %5 ile %35 arasında önemli düşüşler tespit edilmiştir. Çoklu model ortalaması, tüm senaryolarda verimde %20'nin üzerinde azalma öngörmektedir. Verim düşüşünün temel nedenleri olarak, fenolojik gelişimin hızlanmasına bağılı olarak tane doldurma süresinin kısalması ve artan terleme ile azalan yağışın neden olduğu su stresi öne çıkmaktadır. Bu bulgular, Türkiye'nin yarı kurak bölgelerinde yağmura bağımlı buğday üretiminin kırılganlığını ortaya koymakta ve gelecekte sahada yapılacak deneysel çalışmalar ile yeni iklim koşullarına uyum sağlayabilecek, daha uzun tane doldurma süresine sahip buğday çeşitlerinin geliştirilmesi gereğini vurgulamaktadır.

Yang vd. (2014), Çin'in Kuzey Çin Ovası'ndaki beş temsili sahada, artan CO₂ seviyesi, sıcaklık ve yağışın ayrı ayrı ve etkileşimli etkilerini değerlendirmek üzere EPIC (Environmental Policy Integrated Climate) modelini kullanarak bir simülasyon çalışması yürütmüştür. Çalışmada, 2085–2100 dönemine yönelik A1B senaryosuna dayalı olarak MIROC iklim modeli tarafından sağlanan iklim verileri, istatistiksel olarak kalibre edilerek simülasyonlara dâhil edilmiştir. Bulgulara göre, CO₂ seviyesinin 680 ppm'e yükseltilmesi, kışlık buğday verimini sulanan tarlalarda %24.8, yağmura dayalı (rainfed) alanlarda ise %43.1 oranında artırmaktadır. Ortalama maksimum sıcaklığın 4.9 °C ve minimum sıcaklığın 4.8 °C artması, sulanan alanlarda verimi %5.2 artırırken, yağmura dayalı alanlarda %7.2 oranında azaltmaktadır. Yağışın yıllık 317 mm artışı ise sulanan alanlarda verimi %5.5 azaltırken, yağmura bağılı alanlarda %30.1 oranında bir artışa yol açmaktadır. CO₂, sıcaklık ve yağışın eş zamanlı artışlarının etkileşimli etkileri de incelenmiş; CO₂ seviyesi sabitken (370 ppm) sıcaklık ve yağışın verim üzerindeki etkileri sulanan ve yağmura bağılı alanlarda sırasıyla %–0.9 ve %–1.9 olarak bulunmuştur. Ancak CO₂ konsantrasyonu 680 ppm'e yükseltildiğinde, bu üç değişkenin birlikte artışı sulanan alanlarda ortalama %23.1, yağmura dayalı alanlarda ise %27.7 oranında verim artışı sağlamıştır. Ayrıca, iklim değişikliği senaryosu altında kışlık buğday büyüme dönemindeki sıcaklık stresine maruz kalınan gün sayısı azalırken, azot stresi günlerinin önemli ölçüde arttığı gözlemlenmiştir. Çalışma, Kuzey Çin Ovası'nda iklim değişikliğine uyum kapsamında uygun yönetim stratejileri veya genotip adaptasyonlarının belirlenmesine katkı sunmaktadır.

Yano vd. (2007), Türkiye'nin Akdeniz iklim kuşağında yer alan bir bölgede buğday-mısır ürün rotasyonu için iklim değişikliğinin tarımsal üretim ve sulama suyu talebi üzerindeki etkilerini simülasyon yöntemiyle incelemiştir. Çalışmada, 1990–2100 dönemi için üç genel sirkülasyon modeli (CGCM2, ECHAM4 ve MRI) ve 2070–2079 dönemi için bir bölgesel iklim modeli (RCM) kullanılarak SRES-A2 senaryosu kapsamında iklim projeksiyonları oluşturulmuştur. SWAP (Soil-Water-Atmosphere-Plant) modeli aracılığıyla, hem su dengesi

hem de bitki gelişimi hesaplanmış, sonuçlar 1994–2003 dönemi baz alınarak değerlendirilmiştir. Model projeksiyonlarına göre, CGCM2, ECHAM4 ve MRI senaryoları sırasıyla 163 mm, 163 mm ve 105 mm düzeyinde yağış azalışı ve 4.3°C, 5.3°C ve 3.1°C düzeyinde sıcaklık artışı öngörmektedir. Sıcaklık artışı buharlaşma talebini artırmakta, ancak artan CO₂ seviyesine bağlı olarak buğday tarlalarındaki gerçek evapotranspirasyonun (ETa) CGCM2 verisine göre %28, RCM verisine göre ise %8 azalacağı tahmin edilmiştir. Buğday için sulama suyu ihtiyacının artacağı, mısır için ise ETa ve sulama suyu ihtiyacının CGCM2'ye göre sırasıyla %24 ve %15, RCM'ye göre ise %28 ve %22 azalacağı öngörülmektedir. Artan sıcaklık, buğday için büyüme süresini 24 gün, mısır için ise 9 gün kısaltarak her iki üründe de biyokütle birikimini azaltmıştır. Bununla birlikte, CO₂ gübreleme etkisiyle birlikte değerlendirildiğinde CGCM2 ve RCM projeksiyonları buğday veriminde sırasıyla %16 ve %36 artış, mısır veriminde ise sırasıyla %25 azalış ve %3 artış göstermektedir. Bu sonuçlar, iklim değişikliğinin etkilerinin ürün türü ve iklim senaryolarına göre farklılaştığını ve CO₂ artışının kısmen telafi edici bir rol oynayabildiğini ortaya koymaktadır.

İklim değişikliğinin tarımsal sistemler üzerindeki etkilerini anlamak için kullanılan modelleme yaklaşımları, özellikle su dengesi, toprak nemi ve verim üzerine olan etkileri değerlendirmede önem taşımaktadır. Bu kapsamda Savabi ve Stockle (2001), atmosferik CO₂ artışı ve sıcaklık yükselmesinin mahsul verimi, bitki örtüsü, su dengesi ve toprak erozyonu üzerindeki etkilerini değerlendiren bir simülasyon çalışması gerçekleştirmiştir. Çalışma sonuçlarına göre, sıcaklık artışı buharlaşma-terleme (ET) miktarında önemli bir artışa, soya bitkisinin örtücülüğünde ve veriminde düşüşe, toprak neminde azalmaya ve hafif düzeyde toprak kaybına neden olmuştur. Buna karşılık, atmosferik CO₂ seviyesindeki artış, mısır verimi ve yaprak örtüsünde anlamlı bir artış sağlamış; ayrıca ET, kök bölgesindeki toprak nemi, yüzey akışı ve su kaynaklı erozyonda hafif azalmalar gözlemlenmiştir. Bu bulgular, iklim değişikliğinin çok yönlü etkilerini anlamada CO₂ artışı ile sıcaklık etkilerinin birlikte değerlendirilmesinin önemini ortaya koymaktadır.

Guoju vd. (2005), Çin'in yarı kurak bir bölgesi olan Haiyuan'da 2001–2003 yılları arasında yürüttükleri saha deneyiyle, artan atmosferik CO₂ yoğunluğu ve sıcaklığın yağmurla beslenen ilkbahar buğdayı verimi üzerindeki etkilerini incelemiştir. Deneysel tasarımda CO₂ konsantrasyonu 360'tan 450 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ 'e yükseltilmiş, ortalama günlük sıcaklık ise sırasıyla 0.8 °C ve 1.8 °C artırılmıştır. Bulgular, 450 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ CO₂ konsantrasyonu ve 0.8 °C sıcaklık artışının buğday verimini yaklaşık %5.3 oranında artırdığını göstermektedir. Buna karşın, aynı CO₂ artışıyla birlikte 1.8 °C sıcaklık artışı, verimde yaklaşık %5.7'lik bir azalmaya yol açmıştır.

Bu sonuçlar, önümüzdeki 30 yıl içinde Çin'in yarı kurak bölgelerinde küresel iklim değişikliğinin potansiyel etkilerine ışık tutmaktadır. Çalışmada ayrıca iklim değişikliğinin yol açtığı verim kayıplarının 30 mm'lik ek sulama ile telafi edilebileceği, 60 mm ve 90 mm'lik sulamaların ise verimi sırasıyla %3.8 ve %10.1 oranında artırabileceği ortaya konmuştur. Bu bağlamda, söz konusu bölgelerde iklim değişikliğinin etkilerini dengelemek amacıyla ek sulama uygulamaları önemli bir adaptasyon stratejisi olarak öne çıkmaktadır.

Alexandrow ve Hoogenboom (2000), 20. yüzyıl boyunca Bulgaristan'da gözlemlenen iklim değişkenliğini inceleyerek bu değişkenliğin tarımsal üretim üzerindeki etkilerini değerlendirmiştir. Çalışmada, sıcaklık ve yağış trendleri analiz edilmiş; 1970'lerin sonlarından itibaren yılın sıcak yarısında toplam yağış miktarında genel bir azalma tespit edilmiştir. Ortalama yıllık sıcaklıkta ise anlamlı bir değişiklik gözlenmemiştir. Tarımsal üretim ile iklimsel değişkenler (sıcaklık ve yağış) arasındaki ilişkileri açıklamak üzere çoklu regresyon modelleri geliştirilmiştir. Ayrıca, farklı küresel iklim modeli (GCM) senaryoları kullanılarak geçici iklim değişikliği projeksiyonları oluşturulmuş ve bu senaryolar altında mısır ve kışlık buğday verimlerinin nasıl etkileneceği Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT v3.5) ile değerlendirilmiştir. Simülasyon sonuçlarına göre, CO₂ düzeyinin sabit tutulduğu (330 ppm) senaryolarda, artan sıcaklık ve azalan yağış miktarı nedeniyle özellikle mısırdaki, aynı zamanda buğdayda da verim düşüşleri öngörülmüştür. Bu düşüşler, büyüme döneminin kısalması ve su stresinden kaynaklanmaktadır. Ancak, CO₂'nin doğrudan etkileri hesaba katıldığında, tüm senaryolar altında kışlık buğday veriminde artış gözlemlenmiştir. Bu durum, CO₂ güdümlü fotosentez artışının kuraklık koşullarındaki olumsuz etkileri kısmen dengeleyebileceğini göstermektedir. Ayrıca, iklim değişikliğinin mısır üretimi üzerindeki potansiyel olumsuz etkilerini azaltmak amacıyla erken ekim tarihleri ve yeni hibrit çeşitlerin kullanımı gibi uyum önlemleri önerilmiştir. Bu çalışma, iklim değişikliğinin ürün verimi üzerindeki etkilerinin değerlendirilmesinde hem doğrudan iklimsel etkilerin hem de CO₂ güdümlü fizyolojik tepkilerin birlikte analiz edilmesi gerektiğini vurgulamakta; ayrıca bölgesel düzeyde uyum stratejilerinin geliştirilmesinin önemine dikkat çekmektedir.

Asseng vd. (2004), gelecekteki iklim değişikliği koşulları altında buğday üretimini değerlendirmek amacıyla APSIM-Nwheat simülasyon modelinin performansını farklı agro-ekolojik bölgelerdeki saha verileriyle test etmişlerdir. Meksika'nın Obregon bölgesinde yapılan gözlemler, sıcaklıkta 1.7 °C'lik bir artışın çiçeklenme süresini 11 gün kısalttığını ve toplam biyokütle ile verimde azalmaya yol açtığını göstermiştir. Model bu etkileri genel olarak başarılı bir şekilde simüle etmiş, ancak dördüncü ve beşinci yıllarda sıcaklık artışına rağmen gözlenen

biyokütle artışını açıklamakta yetersiz kalmıştır. Yeni Zelanda'nın Lincoln bölgesindeki yağmurdan korunaklı deneylerde, su stresinin zamanlaması ve süresi ile verim arasındaki ilişki model tarafından başarıyla yansıtılmıştır. Bu deneylerde su stresine bağlı olarak verim 10 t/ha'dan 4 t/ha'a kadar düşmüştür. Batı Avustralya'daki saha çalışmalarında da terminal su stresinin büyümeyi ve verimi ciddi biçimde düşürdüğü, model tarafından tutarlı şekilde temsil edilmiştir (verim < 0.5 t/ha). ABD'de yürütülen Maricopa Yükseltilmiş CO₂ (FACE) deneylerinde ise yüksek CO₂ seviyesinin kuru ve yüksek azotlu koşullarda verimi artırdığı, buna karşılık ıslak ve düşük azotlu ortamlarda anlamlı bir etki yaratmadığı gözlemlenmiştir; model bu farklılıkları da başarıyla yansıtmıştır. Duyarlılık analizleri, CO₂ artışının verim üzerinde pozitif etkiler yaratabildiğini, ancak bu etkinin azotun sınırlayıcı olmadığı durumlarda geçerli olduğunu ortaya koymuştur. Yüksek sıcaklık ve azalan su mevcudiyeti hem verimi hem de azot uygulamasına verilen tepkiyi düşürmüştür. Ayrıca, yükseltilmiş CO₂ koşullarında tahıl protein konsantrasyonunun azaldığı, fakat bu azalmanın yeterli azot uygulaması ile sınırlı düzeyde kaldığı belirlenmiştir. Evapotranspirasyonun ise CO₂ artışıyla azaldığı; yüksek sıcaklıkta ise azot düzeyine bağlı olarak artabildiği veya azalabildiği gösterilmiştir. Akdeniz iklimine sahip Batı Avustralya'da, verim üzerindeki toplam etki genel olarak pozitif olmakla birlikte, mevsimsel yağış dağılımına bağlı olarak değişkenlik göstermiştir. Tüm bu bulgular, APSIM-Nwheat modelinin iklim değişikliğinin yönsel etkilerini değerlendirmede uygun bir araç olduğunu göstermektedir. Ancak, simülasyon sonuçları ile gözlemler arasındaki bazı önemli farklılıklar, model çıktılarının dikkatli yorumlanması gerektiğine işaret etmektedir. Ayrıca, mevcut deneylerin yalnızca sınırlı iklim senaryolarını temsil ettiği ve çoklu faktöryel etkileşimlerin büyük bölümünün test edilmediği de vurgulanmıştır.

Bannayan vs. (2011), İran'ın kuzeydoğusunda 1983–2005 dönemine ait gözlemlere dayalı olarak buğday ve arpa gibi kuru tarım (rainfed) ürünlerinde iklim değişkenliği ile verim arasındaki ilişkileri incelemişlerdir. Çalışma, özellikle yağış ve sıcaklık gibi temel iklimsel değişkenlerin yanı sıra Arctic Oscillation (AO), North Atlantic Oscillation (NAO) ve NINO 3.4 gibi üç büyük ölçekli iklim indeksi üzerinden tarımsal verim üzerindeki etkileri analiz etmiştir. Bulgular, iklim-verim ilişkilerinin mekânsal olarak heterojen olduğunu ortaya koymaktadır. Bölgesel düzeyde yapılan analizlerde, güney kesiminin aşırı sıcak koşullara sahip olması nedeniyle maksimum sıcaklığın arpa ve buğday verimi üzerinde belirleyici ve sınırlayıcı bir unsur olduğu belirlenmiştir. Bu bölgede yıllar arası sıcaklık değişkenliği, ürün verimindeki dalgalanmaların temel nedenidir. Kuzey kesiminde ise NINO 3.4 indeksinin, yani El Niño–Güney Salınımı (ENSO) ile ilişkili iklim dalgalanmalarının, verim üzerinde belirgin bir etkisi

olduğu saptanmıştır. Merkez bölgede ise NAO indeksi ile verim arasında istikrarlı ve anlamlı bir ilişki gözlenmiştir. Bu bulgular, büyük ölçekli atmosferik döngülerin yerel tarımsal üretim üzerinde farklı yönlerde ve şiddetlerde etkili olabileceğini göstermekte; aynı zamanda sıcaklık değişkenliğinin özellikle sıcak bölgelerde kuru tarım için temel bir verim kısıtı oluşturduğunu ortaya koymaktadır. Çalışma, iklimsel faktörlerin ürün bazlı ve bölgeye özgü olarak değerlendirilmesinin gerekliliğine dikkat çekmekte ve bu tür analizlerin tarımsal planlama açısından kritik rol oynayabileceğini vurgulamaktadır.

Bu değerlendirmelere ek olarak, Kang vd. (2009) tarafından sunulan derleme çalışması, iklim değişikliğinin tarımsal üretim üzerindeki etkilerinin modellenmesine dair önemli metodolojik çıkarımlar sunmuştur. Araştırma, daha yüksek mekânsal çözünürlük sunan iklim projeksiyonlarının gelecekte daha isabetli sonuçlar vereceğini savunmakta; model belirsizliklerinin azaltılması için çoklu iklim model çıktılarının kullanılması gerektiğini vurgulamaktadır. Çalışma ayrıca, sulama alanlarının artırılmasıyla toplam üretimin yükselebileceğini; ancak bunun çevresel bozulma riski doğurabileceğini ifade etmektedir. Yüksek sıcaklık ve yağış dalgalanmalarının toprak nem dengesini bozarak büyüme süresini kısaltacağı ve su kullanım verimliliğini düşüreceği öngörülmektedir. Modelleme sonuçlarına göre verimin sıcaklıktan çok yağış değişimlerine duyarlı olduğu ve özellikle yüksek su tutma kapasitesine sahip toprakların gelecekteki kuraklık risklerini hafifletmede avantaj sağlayacağı belirtilmiştir.

Krishnan vd. (2007), Hindistan'ın doğusunda 10 farklı bölgeden elde edilen veriyle ORYZA1 ve INFOCROP modelleri yardımıyla yaptıkları simülasyonlarda, sıcaklıktaki her 1°C'lik artışın pirinç verimini ortalama %6.7–7.2 oranında azaltabileceğini, buna karşılık CO₂ seviyesinin 700 ppm'ye çıkması durumunda verim artışlarının %30 ila %56'ya ulaşabileceğini göstermiştir. Ancak model sonuçları bölgelere göre değişiklik göstermekte olup, özellikle yüksek sıcaklıklarda başak sterilitésinin verimi sınırlayıcı etkisine dikkat çekilmiştir. Çalışma, uygun ekim tarihleri ve yüksek sıcaklıklara dayanıklı çeşitlerin kullanılmasıyla bu olumsuz etkilerin hafifletilebileceğini önermektedir.

Laux vd. (2010) tarafından Sahra altı Afrika'daki yağmura bağlı tarım sistemleri üzerine yapılan çalışmada, gelecekteki CO₂ artışının olumlu etkilerinin sıcaklık ve yağış değişimlerinden kaynaklı olumsuzlukları 2020'li yıllarda kısmen dengeleyebileceği belirtilmiştir. Özellikle, ekim tarihine yönelik uyarlamalar sayesinde yer fıstığı ve mısır veriminde %15–30 arasında artış sağlanabileceği öngörülmüştür. Çalışma, optimal ekim

zamanının belirlenmesinin kurak bölgelerde verim kaybını önemli ölçüde azaltabileceğini vurgulamaktadır.

Marcinkowski ve Piniewski (2024), Polonya'da SWAT modeliyle yürüttükleri çalışmada, CO₂ artışı, azot stresi ve sıcaklık gibi faktörlerin arpa, kolza, silaj mısır ve patates üzerindeki etkilerini inceleyerek, iklim değişikliğinin tarımsal üretkenlik üzerindeki potansiyel tehditlerini ortaya koymuştur.

Morel vd. (2021), yüksek enlemlerdeki (55°N üzeri) pedoklimatik koşullarda iklim değişikliğinin potansiyel tarımsal etkilerini değerlendirmek amacıyla dört yıllık ürünün (arpa, yem mısırı, yulaf ve yazlık buğday) verim duyarlılığını modellemiştir. Çalışmada, İsveç'in farklı bölgelerinde (55–64°N) yer alan beş istasyon verisi kullanılarak APSIM bitki gelişim modeli aracılığıyla iki set simülasyon gerçekleştirilmiştir. İlk set, 1980–2005 arası günlük iklim verilerine dayanırken; ikinci set, sıcaklık, yağış ve CO₂ seviyelerinde kademeli artışlar içeren senaryolarla gelecekteki iklim koşullarını temsil etmektedir. Sonuçlara göre, arpa ve yulaf verimleri 1 °C'lik sıcaklık artışıyla en üst seviyeye ulaşmakta, yazlık buğday için bu eşik kuzeydeki istasyonda 4 °C'ye kadar çıkmaktadır. Yem mısırının ise 2–3 °C sıcaklık artışıyla optimal verim sağladığı, ancak kuzeydeki enlemlerde 5 °C ile maksimum verime ulaştığı görülmüştür. Verim değişimlerinin yaklaşık %89'u sıcaklık ve CO₂ artışlarıyla, %11'i ise yağış değişkeniyle açıklanmıştır. Ayrıca, kuzey bölgelerde sıcaklık artışlarıyla birlikte yem mısırı, yulaf ve buğday için ürün kaybı riski azalmıştır. Çalışma, su stresi yaşanmadığı takdirde yüksek enlemlerdeki (özellikle İskandinav ülkeleri gibi) tarım alanlarının ılımlı sıcaklık artışlarından fayda sağlayabileceğini ve bu bölgelerde iklim değişikliğinin potansiyel olarak pozitif etkiler yaratabileceğini ortaya koymaktadır.

Nonhebel (1996), Avrupa'nın çeşitli bölgelerinde buğday üretiminin iklim değişikliğine karşı olası tepkilerini değerlendirmek amacıyla SUCROS87 temelli bir bitki gelişim simülasyon modeli kullanmıştır. Çalışmada, 13 farklı Batı Avrupa istasyonundan elde edilen tarihsel günlük hava verileri esas alınarak, hem potansiyel (optimal su koşulları altında) hem de su sınırlı koşullarda bitki büyümesi simüle edilmiştir. Potansiyel üretim koşullarında 3 °C'lik bir sıcaklık artışının, gelişme döneminin kısalması nedeniyle tüm lokasyonlarda buğday verimini düşürdüğü belirlenmiştir. Öte yandan, atmosferik CO₂ konsantrasyonunun iki katına çıkarılması fotosentetik asimilasyon oranlarını artırarak verimde %40'lık bir artışa neden olmuştur. Bu iki etkinin birlikte değerlendirilmesi, etkilerin neredeyse lineer biçimde toplandığını göstermiştir ve toplamda 1–2 ton/ha'lık bir verim artışı ortaya çıkmıştır. Ancak suyun sınırlayıcı olduğu koşullarda, iklim değişkenlerine verilen tepkiler farklılık göstermiştir.

Sıcaklık artışı, potansiyel üretime kıyasla daha küçük bir verim kaybına yol açarken; CO₂ artışı, daha büyük bir verim artışı sağlamıştır. Bu iki etkinin birleşimi ise mevcut duruma kıyasla yaklaşık 3 ton/ha düzeyinde önemli bir verim artışı ile sonuçlanmıştır. Ayrıca hem sıcaklık hem de CO₂ artışı, bitkinin su ihtiyacını azaltmış ve böylece yıllar arası verim dalgalanmaları azalmıştır. Çalışmanın genel sonucu, eğer yağış desenlerinde büyük bir değişiklik yaşanmazsa, sıcaklık artışının olumsuz etkilerinin CO₂ zenginleşmesinin olumlu etkileriyle telafi edilebileceği ve buğday veriminde net bir düşüş yaşanmayacağı yönündedir. Bu sonuçlar, gelecekteki üretim planlamasında ve iklim adaptasyon stratejilerinde önemli öngörüler sunmaktadır.

2.2. İstatistiksel ve Ekonometri Tabanlı Analizler

İklim değişikliğinin tarımsal üretim üzerindeki etkilerini ortaya koyan önemli çalışmalardan biri olan Schlenker ve Roberts (2008), özellikle sıcaklık dağılımının mahsul verimi üzerindeki etkisini detaylı şekilde incelemiştir. Amerika Birleşik Devletleri'nde il düzeyinde mısır, soya ve pamuk verimlerini içeren bir panel veri seti ile gün içi sıcaklık dağılımlarını yüksek çözünürlükte kapsayan hava durumu verilerini eşleştirmişlerdir. Bulgulara göre, mısır için 29 °C, soya için 30 °C ve pamuk için 32 °C'ye kadar sıcaklık artışı verimi artırmakta; ancak bu eşiklerin üzerindeki sıcaklıklar verim üzerinde ciddi düşümlere yol açmaktadır. Dahası, verim kaybının sıcaklık artışı sonrasındaki eğimi, verim artışının önceki eğiminden çok daha dik olup, sıcaklığın optimal seviyeyi aşmasının tarımsal üretim açısından oldukça yıkıcı olabileceğini göstermektedir. Bu doğrusal olmayan ve asimetric ilişki hem zaman serisi hem de yatay kesit analizlerinde tutarlı biçimde gözlemlenmiştir. Bu bulgular, mahsul türü içinde (örneğin mısır için) sınırlı uyum potansiyeline işaret etmektedir; zira çapraz kesit analizinde yer alan çiftçiler halihazırda sıcak iklim koşullarına adapte olmuş olsa da, verim düşüşü yine de gözlemlenmektedir. Mevcut üretim bölgeleri dikkate alındığında, yüzyılın sonuna kadar en yavaş ısınma senaryosunda mısır ve soya veriminde %31–43, en hızlı ısınma senaryosunda ise %67–79 oranında düşüş öngörülmektedir. Bu çalışma, özellikle sıcaklık eşiklerinin ötesindeki etkilerin şiddetli olduğunu vurgulayarak, tarımsal üretimde olası büyük ölçekli kayıplara karşı küresel gıda güvenliğini tehdit eden iklimsel riskleri ortaya koymaktadır.

Verón vd. (2015), Arjantin'in Pampas bölgesinde 1971–2012 döneminde gözlemlenen iklim eğilimlerinin başlıca tarımsal ürün verimleri üzerindeki etkisini değerlendirmişlerdir. Panel veri modelleri ve birinci farklara dayalı regresyon analizleri kullanılarak, bu dönemdeki büyüme mevsimi yağış miktarı (P), ortalama sıcaklık (T) ve gündüz-gece sıcaklık farkı (DTR) değişkenlerinin buğday, mısır ve soya verimleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bulgular,

iklimdeki yönlü değişimlerin verim artış hızını yavaşlattığını ortaya koymuş ve bu eğilimlerin, iklim değişimi olmasaydı potansiyel olarak elde edilebilecek verim artışlarını yaklaşık %15–20 oranında azalttığını göstermiştir. Özellikle sıcaklık (T) ve DTR, verim üzerinde yağıştan (P) daha belirleyici faktörler olarak öne çıkmıştır. Çalışma, mısırdaki %5.4, buğdayda %5.1 ve soya fasulyesinde %2.6 oranında ortalama verim kaybı yaşandığını ve bu kayıpların 2013 üretici fiyatlarıyla ekonomik karşılığının yaklaşık 1.1 milyar dolar olduğunu belirtmektedir. Elde edilen sonuçlar, tarımsal verim üzerindeki iklimsel baskıların artmakta olduğunu ve bölgesel düzeyde verim artışlarının önünde önemli bir engel teşkil ettiğini göstermektedir.

Türkiye özelinde ampirik bir katkı, Ozkan ve Akcaoz (2002) tarafından sunulmuştur. Çalışmalarında, Türkiye'nin Çukurova bölgesinde 1975–1999 döneminde iklim değişkenleri ile buğday, mısır ve pamuk verimi arasındaki ilişki analiz edilmiştir. Her bir ürünün fenolojik evrelerine (ekim, çiçeklenme ve hasat) göre hizalanmış 27 iklim değişkeni kullanılarak Doğrusal Pertürbasyon Modeli (LPM) uygulanmıştır. Sonuçlar, bu kritik büyüme dönemlerindeki sıcaklığın verim değişkenliği üzerinde en etkili iklimsel faktör olduğunu göstermiştir. Model, buğday, mısır ve pamuk verimindeki değişimin sırasıyla %46,1, %57,2 ve %74,5'ini açıklamış olup, en yüksek verim istikrarsızlığı mısırdaki gözlemlenmiştir. Bu bulgular, Türkiye'nin tarım politikalarında özel uyum stratejilerinin önemini vurgulamakta; özellikle gerçek zamanlı iklim bilgilerinin yaygınlaştırılması ve başlıca tarım ürünleri için iklim risk yönetiminin kurumsallaştırılması gerektiğini ortaya koymaktadır.

Türkiye özelinde iklim değişikliğinin tarımsal üretime etkisini ele alan çalışmalardan biri olan Sen vd. (2012), 21. yüzyıl boyunca Türkiye için yüksek çözünürlüklü bir bölgesel iklim modeli (ICTP-RegCM3) kullanarak A2 emisyon senaryosu kapsamında geleceğe yönelik projeksiyonlar üretmiştir. Simülasyon sonuçları, özellikle yaz aylarında batı bölgelerde 5–7 °C'ye kadar, kış aylarında ise doğu bölgelerde 3.5 °C'lik sıcaklık artışları öngörmektedir. Yağış açısından bakıldığında, güneybatı bölgelerde %40'a varan azalmalar beklenirken, Doğu Karadeniz ve kuzeydoğu Anadolu bölgelerinde %25'e kadar artışlar söz konusu olabilmektedir. İklim projeksiyonlarının tarımsal üretim üzerindeki etkilerini değerlendiren modellemeler, özellikle birinci ve ikinci ürün mısır için büyüme sezonlarının kısalacağını ve verimlerin önemli ölçüde azalacağını ortaya koymaktadır. Bu sonuçlar, artan sıcaklıklar ve azalan yağış miktarları ile birlikte kuraklık olaylarının sıklığı, şiddeti ve süresindeki artışların bir sonucu olarak değerlendirilmektedir. Ayrıca, Türkiye'nin batı, güney ve iç bölgelerinde daha kurak iklim sınıflarına doğru bir kayma öngörülmektedir. Çalışma, iklim değişikliğinin sadece tarımsal üretim değil, aynı zamanda sosyo-ekonomik koşullar üzerinde de ciddi etkiler yaratabileceğini

vurgulamakta; bu nedenle politika yapıcılar ve ilgili sektörler için iklim kaynaklı tarımsal risklere karşı zamanında ve uygun önlemlerin alınmasının önemine işaret etmektedir.

Attavanich ve McCarl (2014), atmosferik karbondioksit (CO₂), iklim değişkenleri ve tarımsal üretim teknolojisindeki gelişmelerin tarım ürünleri verimi üzerindeki etkilerini değerlendiren kapsamlı bir ekonometrik analiz sunmuşlardır. 1950–2009 dönemine ait havuzlanmış veriler ile serbest hava CO₂ zenginleştirme (FACE) deneylerinden elde edilen verileri birleştiren çalışmada, özellikle atmosferik CO₂'nin gözlemlenen verim üzerindeki katkısını izole etmeye yönelik yöntemsel bir çaba öne çıkmaktadır. Ekonometrik analizler, C3 türü ürünler (soya fasulyesi, pamuk ve buğday) için CO₂ artışının doğrudan verim artışına yol açtığını ortaya koyarken, C4 türü ürünler (mısır ve sorgum) için doğrudan bir etki saptanmamış; ancak bu ürünlerin kuraklık stresi altında CO₂ artışından dolayı fayda sağladıkları belirlenmiştir. Çalışma ayrıca teknolojik ilerlemenin ürün verimleri üzerindeki etkisinin doğrusal olmadığını göstermiştir. Modelde atmosferik CO₂ etkisi göz ardı edildiğinde, teknolojik ilerlemenin verim artışındaki payı olduğundan fazla tahmin edilmekte; bu hata oranı pamuk için %51, soya için %15, buğday için %17, mısır için %9 ve sorgum için %1 düzeyindedir. İklimsel ortalama koşullar ve iklim değişkenliği de verim düzeyleri ile verim oynaklığı üzerinde istatistiksel olarak anlamlı etkilere sahiptir. Genel olarak, CO₂ güdümlü gübreleme etkisinin, iklim değişikliğinin olumsuz etkilerini dengelediği ve birçok bölgede net verim artışları sağladığı ortaya konmuştur. Bu bağlamda, CO₂ artışının ortalama verimler üzerindeki olumlu etkisi mısır için %7–22, sorgum için %4–47, soya için %5–26, pamuk için %65–96 ve buğday için %3–35 aralığında tahmin edilmiştir. Bu bulgular, iklim değişikliği etkilerini değerlendiren ekonometrik modellerde CO₂ seviyelerinin dikkate alınmasının önemine işaret etmekte ve özellikle ürün türlerine göre farklılaşan tepkilerin analiz edilmesini gerektiren bir yapıyı ortaya koymaktadır.

Chandio vd. (2021) ise Türkiye özelinde 1980–2016 dönemine ait yıllık zaman serisi verilerini kullanarak, buğday ve çeltik üretimi üzerindeki iklimsel (CO₂ emisyonu, ortalama sıcaklık ve yağış) ve iklim dışı (ekili alan, tarımsal kredi, tarım işgücü) faktörlerin uzun ve kısa dönem etkilerini analiz etmişlerdir. ARDL ve Johansen eşbütünleşme testlerine dayalı olarak yapılan tahminlerde, CO₂ emisyonu ve sıcaklığın hem uzun hem kısa vadede buğday üretimini olumsuz etkilediği; yağışın ise pozitif etkiler yarattığı görülmüştür. Ekili alan ve tarımsal kredi gibi yapısal faktörler, buğday üretimini anlamlı ve olumlu yönde etkilemiştir. Pirinç üretimi açısından ise CO₂ emisyonunun olumsuz etkisi devam etmekle birlikte; sıcaklık ve yağış değişkenlerinin pozitif etkiler yarattığı, ancak uzun vadede kredi kullanımının üretimi olumsuz

etkileyebileceği belirlenmiştir. VECM Granger nedensellik analizleri, hem iklimsel hem de iklim dışı faktörlerin ürün üretimi üzerinde nedensel etkileri olduğunu doğrulamıştır. Çalışma, iklim değişikliğinin buğday ve çeltik üretimi üzerinde zararlı etkiler yarattığını; bu nedenle ısıya dayanıklı çeşitlerin geliştirilmesini ve çiftçilere iklim değişikliği konusunda güncel bilgi sağlanmasını önermektedir.

Bu literatüre küresel ölçekte katkı sunan Demirhan (2020) ise dünya buğday üretimi, CO₂ emisyonları ve yüzey sıcaklığı anomalileri arasındaki ilişkiyi ARDL modeliyle incelemiş; söz konusu değişkenler arasında anlamlı bir eşbütünleşme ilişkisi olduğunu tespit etmiştir. Hem kısa hem uzun vadeli etkilerin istatistiksel olarak anlamlı olduğu saptanmış ve sistemin dengesizliğe karşı hızlı bir şekilde düzeldiği gösterilmiştir. Bu bulgular, küresel iklim değişikliğinin buğday üretimi üzerinde doğrudan ve gecikmeli etkiler doğurabildiğini ve bu etkinin iklim şoklarına duyarlı olduğunu ortaya koymaktadır.

Türkiye özelinde kırsal kuraklık derecelerine göre bölgesel ayırım getiren Doğan ve Kan (2019) çalışması ise, 1997–2016 döneminde panel FMOLS ve VECM yöntemlerini kullanarak, sıcaklık artışının her üç kuraklık bölgesinde de buğday verimini düşürdüğünü; yağış artışının ise verimi artırdığını bulgulamıştır. Elde edilen katsayılar, sıcaklıkta %1’lik artışın sırasıyla şiddetli, orta ve hafif kuraklık bölgelerinde verimi %0.84, %0.43 ve %0.48 oranında azalttığını; yağışta %1’lik artışın ise aynı bölgelerde sırasıyla %0.20, %0.12 ve %0.09 oranında verimi artırdığını ortaya koymuştur. Bu sonuçlar, Türkiye’de iklimsel tepkilerin bölgesel olarak farklılaştığını ve uyum politikalarının kuraklık düzeyine göre çeşitlendirilmesi gerektiğini göstermektedir.

Lobell vd. (2007), Kaliforniya’da 1980–2003 döneminde 12 temel ürünün verimi ile üç iklimsel değişken (maksimum sıcaklık, minimum sıcaklık, yağış) arasındaki ilişkileri analiz etmiştir. Çalışma, 2–3 iklimsel değişkenle ürün verimindeki varyansın büyük bölümünün açıklanabileceğini göstermiştir. Özellikle narenciye ve ceviz üretiminde olumlu etkiler gözlenmişken, avokadoda olumsuz etkiler tespit edilmiştir. Ayrıca çalışmada, verim-tahmin ilişkilerinin kısa vadeli üretim tahminleri ve uzun vadeli iklim projeksiyonları için temel oluşturabileceği vurgulanmaktadır.

Lobell ve Field (2007) tarafından yürütülen küresel ölçekteki analizde, dünyanın en yaygın altı tarım ürününde (buğday, mısır, arpa vb.) yıllık verim değişiminin %30’dan fazlasının sadece mevsimlik sıcaklık ve yağış değişkenleriyle açıklanabildiği ortaya konmuştur. Özellikle buğday, mısır ve arpa veriminin artan sıcaklığa karşı negatif tepki verdiği, 1981

sonrası iklim ısınmasının bu üç üründe yıllık toplamda 40 milyon ton üretim kaybına ve yaklaşık 5 milyar dolarlık zarar doğurduğu tahmin edilmiştir. Bu etkilerin, aynı dönemdeki teknolojik kazanımlarla karşılaştırıldığında küçük olsa da, iklimsel değişimin tarımsal üretimi halihazırda olumsuz etkilemeye başladığını göstermesi açısından önemlidir.

Bu bağlamda Lobell ve Field (2008) çalışması, atmosferik CO₂ artışının ürün verimi üzerindeki etkisini doğrudan tespit etmenin zorluklarına dikkat çekmektedir. Ulusal ölçekteki verim ve CO₂ artış verilerini karşılaştıran çalışmada, yıllık CO₂ artışının verim üzerindeki etkilerinin düşük olduğu ve teknoloji gibi diğer etkenlerle karıştığı belirtilmiştir. Ancak birçok ülkenin verisinin birleştirilmesiyle daha güvenilir sonuçlara ulaşılabileceği ve bu yaklaşımın kontrollü deneylere tamamlayıcı bir nitelik kazandırabileceği savunulmuştur. Bu yaklaşım, özellikle geniş coğrafyalarda sahadan elde edilen verilerin model belirsizliklerini azaltmada kullanılabileceğine işaret etmektedir.

2.3. Meta-Analizler ve Çoklu Model Karşılaştırmaları

Son dönemde, iklim değişikliğinin tarımsal üretim üzerindeki potansiyel etkilerini daha kapsamlı değerlendirmek amacıyla meta-analizlere dayalı çalışmaların sayısı artmaktadır. Bu bağlamda, Qin vd. (2023), iklim değişikliği ve adaptasyon önlemlerinin buğday, mısır ve pirinç verimleri üzerindeki etkilerini incelemek üzere 68 akademik çalışmadan elde edilen 1842 gözleme dayalı geniş bir veri seti oluşturmuştur. Çalışmada, maksimum ve minimum sıcaklık, ortalama sıcaklık, yağış ve CO₂ konsantrasyonlarındaki değişimlere karşı ürün verimlerinin tepkileri yerel polinom yaklaşımıyla analiz edilmiş; ardından, sınırlı veri alt kümesi üzerinden doğrusal karma regresyon modeli uygulanmıştır. Bulgulara göre, her 1 °C'lik maksimum sıcaklık artışı ürün verimini ortalama %4.21 oranında düşürmekte, buna karşılık yağıştaki her %1'lik artış ürün verimini %0.43 oranında yükseltmektedir. Bununla birlikte, yüksek CO₂ konsantrasyonları ve uygun tarımsal yönetim stratejileri sıcaklık artışlarının olumsuz etkilerini telafi edebilmektedir. Özellikle, adaptasyon önlemleri alınan senaryolarda ürün verimi, adaptasyon uygulanmayan senaryolara göre %64.09 daha yüksek bulunmuştur. Ayrıca, çoklu iklim modeli kullanımı simülasyon belirsizliğini azaltmakta ve daha güvenilir tahminler sunmaktadır. Bu bulgular, gelecekteki tarım politikalarının yönlendirilmesi ve iklim değişikliğine dayanıklı üretim sistemlerinin oluşturulması açısından önemli çıkarımlar sunmaktadır.

Wilcox ve Makowski (2014), gelecekteki iklim değişikliklerinin buğday verimi üzerindeki etkilerine ilişkin belirsizlikleri azaltmak amacıyla, bilgisayar tabanlı simülasyonlara dayanan 90 çalışmanın sonuçlarını meta-analiz yoluyla incelemiştir. Çalışma, sıcaklık, yağış ve

CO₂ yoğunluğundaki değişimlerin buğday verimine olan etkilerinin birbirini dengelemesi nedeniyle, genel verim yönünün (artış mı, azalış mı) belirsiz olduğunu vurgulamaktadır. Bulgulara göre, ortalama sıcaklık artışı 2.3 °C'yi aştığında, yağış değişimi sıfır ya da negatif olduğunda ve CO₂ yoğunluğu 395 ppm'in altında kaldığında, simüle edilen verimlerin %50'sinden fazlası kayıpla sonuçlanmaktadır. Ancak, yüksek CO₂ konsantrasyonları (>640 ppm) +2 °C'ye kadar olan sıcaklık artışları ve %20'ye kadar olan yağış azalmasının olumsuz etkilerini telafi edebilmekte ve ortalama olarak verim artışlarına yol açabilmektedir. Bununla birlikte, elde edilen sonuçların lokasyon bazında büyük farklılıklar göstermesi, topoğrafya, toprak özellikleri ve tarım uygulamalarındaki çeşitliliğe bağlanmaktadır. Ayrıca çalışmanın zararlılar, hastalıklar, yabancı otlar ve iklim değişkenliği gibi önemli faktörleri dışarda bırakması, bulguların yorumlanmasında dikkatli olunması gerektiğini ortaya koymaktadır.

Batı Afrika özelinde yapılan çalışmalarda, iklim değişikliğinin yağışa bağlı tarım sistemleri üzerindeki kırılgan etkileri öne çıkmaktadır. Bu bağlamda, Roudier vd. (2011) tarafından gerçekleştirilen meta-analiz çalışması, Batı Afrika'da iklim değişikliğinin mahsul verimleri üzerindeki etkilerini değerlendirmek amacıyla 16 çalışmadan elde edilen bulgulara dayalı bir veri tabanı oluşturmuştur. Analiz sonucunda, ürün verim değişimleri %-50 ile %90 arasında geniş bir aralıkta tahmin edilmekle birlikte, medyan değer yaklaşık %11'lik bir kayba işaret ettiği belirlenmiştir. Gerek ampirik gerekse süreç-temelli ürün modelleri iklim değişikliğinin genel olarak olumsuz etkiler yarattığını ortaya koyarken, Ricardian yaklaşımlar çalışmalara göre değişken ve çelişkili sonuçlar vermiştir. Coğrafi farklılıklar açısından değerlendirildiğinde, sıcaklık ve kuraklık etkilerinin daha belirgin olduğu kuzey bölgelerde (Sudano-Sahelian ülkeleri) verim kayıpları daha yüksek (%18) bulunmuş, güney bölgelerde (Guinean ülkeleri) ise bu oran daha düşük (%13) olmuştur. Ayrıca, ısınmanın şiddetine bağlı olarak ürün verimindeki kayıpların arttığı ve yüksek ısınma senaryolarında medyan verim kaybının %15'e ulaştığı gözlemlenmiştir. Sıcaklık artışının iklim modellerinde öngörülen yağış değişimlerine kıyasla daha belirgin olması nedeniyle, verim düşüşlerinin ana kaynağının sıcaklık artışı olduğu vurgulanmaktadır. Bununla birlikte, yağıştaki değişimlerin (artış veya azalış) bu etkiyi hafifletme veya şiddetlendirme potansiyeli taşıdığı da belirtilmiştir. Öte yandan, atmosferik CO₂ konsantrasyonlarındaki artışa bağlı olarak ortaya çıkan karbon gübreleme etkisinin ürün verimlerindeki değişimlerin yönünü ve büyüklüğünü belirlemede önemli bir rol oynayabileceği ifade edilmiştir. Ancak Batı Afrika'da temel gıda ürünlerinin büyük ölçüde C₄ bitkileri (ör. mısır, darı, sorgum) olması nedeniyle bu pozitif etkinin bölge için sınırlı kaldığı belirtilmiştir.

Waha vd. (2013), Sahra Altı Afrika'da mısır üretimini sınırlayan başlıca agroklimatik değişkenleri belirlemeyi amaçlamış ve özellikle sıcaklık artışları ile yağış miktarındaki değişimlerin ayrı ayrı ve birlikte mısır verimi üzerindeki etkilerini incelemiştir. LPJmL adlı süreç tabanlı bir küresel bitki örtüsü modeli kullanılarak, A1b senaryosu altında 2056–2065 ve 2081–2090 dönemleri için sentetik iklim verileriyle simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Çalışmada CO₂ gübreleme etkisi göz önünde bulundurulmamıştır. Bulgular, verim değişikliklerinin bölgelere göre farklılaştığını göstermiştir. Yüksek rakımlı serin bölgelerde sıcaklık artışları verimi artırırken, daha geniş alanlarda (örneğin Mozambik, Zambiya, Sahel ve Doğu Afrika'nın bazı bölümleri) sıcaklık artışı %3 ila %20 arasında verim kaybına yol açmıştır. Yağış sezonunun kısalması ve yağış miktarının azalması ise %30'a varan verim kayıplarına neden olmuş ve sıcaklık artışından daha belirleyici bir etki göstermiştir. Araştırma, gelecekteki tarım politikaları, ıslah programları ve tarımsal adaptasyon stratejilerinde hangi stres faktörlerinin öncelikli ele alınması gerektiği konusunda önemli çıkarımlar sunmakta ve aynı zamanda küresel bitki örtüsü modellerinin su ve sıcaklık stresi bağlamında geliştirilmesi gerektiğine dikkat çekmektedir.

Zimmermann vd. (2017), iklim değişikliğinin Avrupa tarımsal üretimi, arazi kullanımı ve çevresel etkiler üzerindeki etkilerinin, yalnızca biyofiziksel değişkenlere değil, aynı zamanda çiftçilerin uyum stratejilerine de bağlı olduğunu vurgulamaktadır. Bu kapsamda çalışmada, 2050 yılına kadar olan süreçte Avrupa Birliği'ne (EU27) üye 27 ülkede, altı önemli ürün türü için mahsul verimleri, arazi kullanımı, üretim ve çevresel etkilerin, ürünlerin ekim zamanlarına ve termal zaman gereksinimlerine yapılan adaptasyonlara ne ölçüde duyarlı olduğu değerlendirilmiştir. Bu amaçla, mahsul, ekonomik ve çevresel bileşenleri entegre eden bir modelleme yaklaşımı uygulanmıştır. Çalışma üç farklı yönetim senaryosu altında simülasyonlar gerçekleştirmiştir: (i) mevcut ürün yönetiminde değişiklik yapılmayan durum (NoAd), (ii) maksimum verimi sağlayacak şekilde ekim tarihi ve termal zaman adaptasyonu (Opt), ve (iii) daha temkinli bir adaptasyon stratejisi (Act). Bulgulara göre, yalnızca iklim değişikliği ve artan CO₂ etkileri dikkate alındığında, NoAd senaryosunda verim değişimleri -%6 ile +%21 arasında değişirken, Opt senaryosunda bu değişim +%12 ile +%53 arasında gerçekleşmiştir. Act senaryosunda ise değişim -%2 ile +%27 arasında kalmıştır. Teknolojik ilerlemenin de hesaba katıldığı durumlarda verim artışları +%17 ile +%51'e ulaşmıştır. Ancak, ürün yönetim varsayımlarının tarımsal üretim, arazi kullanımı ve çevresel etkiler üzerindeki duyarlılığı, piyasaların ve ekonomik optimizasyonun yön verdiği kaynak ve arazi tahsis mekanizmaları nedeniyle daha sınırlı kalmıştır. Çalışma, iklim değişikliği etkilerini analiz eden

modellerde, ekim tarihleri ve ürünlerin termal zaman gereksinimleri gibi yönetim değişkenlerinin dikkate alınmasının sonuçları önemli ölçüde etkileyebileceğini ortaya koymaktadır.

Zhao vd. (2017), dünya genelinde kalori ihtiyacının üçte ikisini karşılayan dört temel tarım ürünü olan buğday, pirinç, mısır ve soyanın küresel sıcaklık artışından nasıl etkilendiğini değerlendirmek amacıyla çok yönlü bir analiz gerçekleştirmiştir. Çalışma, global grid-temelli ve lokal nokta-temelli modeller, istatistiksel regresyonlar ve arazi bazlı ısınma deneyleri olmak üzere dört farklı analitik yöntemeye dayanan geniş kapsamlı bir literatür derlemesine dayanır. Tüm yöntemlerden elde edilen bulgular, ülke ve saha düzeylerinde de tutarlılık göstererek, sıcaklık artışının ürün verimleri üzerinde küresel ölçekte genel olarak olumsuz etkiler yarattığını ortaya koymuştur. CO₂ gübreleme etkisi, etkili adaptasyon uygulamaları ve genetik iyileştirme dikkate alınmadığında, küresel ortalama sıcaklıkta meydana gelecek her 1°C'lik artışın buğday verimini ortalama %6.0, pirinç verimini %3.2, mısır verimini %7.4 ve soya verimini %3.1 oranında azaltacağı hesaplanmıştır. Bununla birlikte, bölgesel ve ürün bazında bazı olumlu etki tahminleri de mevcuttur. Yöntemler arası farklılıkların çoklu analiz yoluyla ele alınması, gelecekteki iklim değişikliklerinin tarımsal üretim üzerindeki etkilerine dair öngörülerin güvenilirliğini artırmakta ve gıda güvenliğinin sağlanabilmesi için ürün ve bölge odaklı adaptasyon stratejilerinin gerekliliğini vurgulamaktadır.

Modelleme çalışmaları iklim değişikliğine ilişkin tahminlerde giderek daha fazla önem kazanırken, Makowski vd. (2015), farklı ürün gruplarına (mısır, buğday, çeltik) ilişkin çok sayıda süreç-temelli simülasyon çıktısının istatistiksel olarak nasıl temsil edilebileceğini ortaya koymuştur. Rassal-katsayı (random-coefficient) regresyonları kullanılarak geliştirilen istatistiksel modellerin, karmaşık tarımsal simülasyon modellerine alternatif olarak hem CO₂ hem de sıcaklık seviyeleri arasında enterpolasyon yapabildiği ve verim eşikleri tanımlayabildiği gösterilmiştir. Bulgular, buğday için +2°C'lik sıcaklık artışının, CO₂ artışı ile telafi edilebileceğini; ancak mısır için bunun çok daha yüksek CO₂ artışı gerektirdiğini göstermiştir. Ayrıca, simülasyon belirsizliklerinin sıcaklık artışıyla daha fazla arttığı da ortaya konmuştur.

Bu kapsamı daha da genişleten Makowski vd. (2020), CO₂, sıcaklık ve yağış değişimlerinin mahsul verimi üzerindeki bireysel ve birleşik etkilerini deneysel ve model temelli çalışmalar üzerinden küresel ölçekte sentezlemiştir. Çalışma, C3 ve C4 bitkileri arasında farklılaşan tepkilere dikkat çekmiştir. Bulgulara göre, C3 bitkileri için hem CO₂ artışı (+100 ppm başına yaklaşık +9%) hem de adaptasyon stratejileri (+7.25%) sıcaklık artışının negatif etkisini dengelemeye yetmektedir (örneğin +4°C artışta bile net pozitif etki mümkündür). Buna

karşılık, C4 bitkisi olan mısırdaki CO₂ artışının etkisi sınırlı kalmakta ve anlamlı bir adaptasyon etkisi gözlemlenmemektedir. Bu durum, +4°C'lik sıcaklık artışında yaklaşık %10 verim kaybıyla sonuçlanmaktadır. Ayrıca mısır için pozitif verim etkisi elde edebilmek adına CO₂ seviyesinin çok daha fazla artırılması gerektiği vurgulanmaktadır. Adaptasyon etkilerine ilişkin belirsizliklerin özellikle soya ve pirinç için yüksek olduğu, mısırdaki ise sınırlı veri nedeniyle bu etkinin ölçülemediği ifade edilmektedir. Çalışma, CO₂ artışının olumlu etkilerinin ihmal edilmemesi gerektiğini ve iklim değişikliği senaryolarında adaptasyon stratejilerinin etkinliğine dair bilgi eksikliğinin önemli bir araştırma alanı olduğunu ortaya koymaktadır.

Tahıl verimi ve besin kalitesinin iklim değişikliğine bağlı çevresel stres faktörlerinden nasıl etkilendiğini ortaya koyan önemli bir meta-analiz çalışması Ben Mariem vd. (2021) tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma, artan atmosferik CO₂ konsantrasyonu, yükselen sıcaklık ve kuraklık stresinin C3 tahıllarının verim ve besin bileşimi üzerindeki etkilerini sistematik olarak incelemiştir. Bulgular, artan [CO₂] düzeyinin tane sayısını artırarak tahıl verimini ve nişasta birikimini teşvik ettiğini, ancak protein ve mineral içeriğini düşürerek besin kalitesini olumsuz etkilediğini ortaya koymaktadır. Buna karşılık, sıcaklık artışı ve kuraklık stresinin her ikisi de verim üzerinde doğrudan olumsuz etkiye sahip olup, özellikle kuraklığın daha güçlü bir stres faktörü olduğu belirtilmiştir. Yüksek sıcaklık, bin tane ağırlığını (TGW) azaltarak verimi düşürmekte; sıcaklık ve kuraklık ise nişasta içeriğini azaltırken protein ve mineral yoğunluğunu artırmaktadır. Bu bulgular, iklim değişikliğinin yalnızca üretim miktarına değil, aynı zamanda gıda güvenliği açısından kritik olan tahıl besin kalitesine de önemli etkileri olduğunu göstermektedir. Çalışmanın meta-analitik yapısı sayesinde, farklı deneysel ve modelleme çalışmalarından elde edilen bulgular karşılaştırmalı olarak sentezlenmiş ve C3 tahıllarının gelecekteki üretim potansiyellerine dair genel bir perspektif sunulmuştur.

2.4. Deneysel ve Gözlemsel Çalışmalar

Cabas vd. (2010), Kanada'nın güneybatı Ontario bölgesinde 26 yıllık bir veri seti üzerinden mısır, soya ve kışlık buğday verimi üzerine iklimsel ve iklim dışı faktörlerin etkisini analiz etmişlerdir. Ortalama ürün veriminin kullanılan girdi miktarındaki artışla birlikte arttığı; ancak bu artış hızının azalan marjinal getiriye tabi olduğu belirlenmiştir. En belirleyici iklimsel unsurun büyüme dönemi uzunluğu olduğu vurgulanırken, sıcaklık ve yağış değişkenliğindeki artışın ortalama verimi düşürdüğü ve verim varyansını artırdığı gösterilmiştir. Ayrıca, mevsimsel ve aylık iklim modellerinin verim varyansını yeterince açıklamada yetersiz kaldığı ifade edilmiştir. İleriye dönük projeksiyonlar, büyüme dönemi uzamasının getireceği verim artışlarının, sıcaklık ve yağıştaki oynaklık artışlarıyla yalnızca kısmen dengeleneceğini; ancak

teknolojik ilerlemelerin geçmişte olduğu gibi gelecekte de bu etkiyi dengeleme potansiyeli taşıdığını ortaya koymuştur.

İklim değişikliğinin tarımsal üretim üzerindeki etkilerinden biri olan karbon gübreleme etkisi (CO₂ fertilization effect), özellikle atmosferdeki CO₂ konsantrasyonundaki artışla birlikte bitki büyümesi ve verimliliğinde potansiyel artışları gündeme getirmiştir. Ancak bu etkinin tarihsel olarak ne ölçüde gerçekleştiği daha az bilinmektedir. Bu bağlamda Sakurai vd. (2014), Amerika Birleşik Devletleri, Brezilya ve Çin gibi başlıca soya üreticisi ülkelerde tarihsel atmosferik CO₂ artışının soya verimi üzerindeki etkisini ampirik olarak incelemiştir. 2002–2006 yılları arasındaki ortalama verimlerin, 1980 yılındaki atmosferik CO₂ düzeyleri temel alınarak yapılan simülasyonlarla karşılaştırıldığında, ABD’de %4.34, Brezilya’da %7.57 ve Çin’de %5.10 daha yüksek olduğu bulunmuştur. Bu bulgular, CO₂ artışının geçmiş dönemdeki soya verimini anlamlı şekilde artırdığını göstermekte ve iklim değişikliğinin tarım üzerindeki etkilerinin değerlendirilmesinde atmosferik CO₂ seviyelerinin dikkate alınmasının gerekliliğine işaret etmektedir.

Bu bulgulara teorik bir derinlik katan DaMatta vd. (2010), CO₂ zenginleşmesi ve sıcaklık artışının fizyolojik etkilerini sistematik olarak incelemiştir. Çalışma, C3 bitkilerinin yükselen CO₂ koşullarında daha fazla fotosentez yaparak daha fazla hasat edilebilir ürün ürettiğini; hem C3 hem de C4 bitkilerinin su kullanım etkinliğini artırabileceğini göstermektedir. Bununla birlikte, bu doğrudan olumlu etkilerin artan sıcaklık ve yağış rejimi değişimleri gibi stres koşulları altında büyük ölçüde bastırılabilirliği belirtilmektedir. Ayrıca, CO₂ artışına bağlı olarak gıda kalitesinde —örneğin protein ve mineral içeriklerinde— düşüş yaşanabileceğine dikkat çekilmiştir. Çalışma, yalnızca verim değil aynı zamanda besin kalitesinin de iklim değişikliği altında önemli bir araştırma konusu hâline geldiğini vurgulamakta ve gıda güvenliği bağlamında bu alandaki araştırmaların önceliklendirilmesini önermektedir.

Högy vd. (2013) tarafından Almanya’da gerçekleştirilen bir arazi deneyinde, ilkbahar arpası üzerinde ılımlı sıcaklık artışı ve yağış rejimi değişikliğinin verim ve kalite üzerindeki etkileri incelenmiştir. Sıcaklık artışının yağışa göre daha belirgin etkiler yarattığı ve bin dane ağırlığında düşüşe neden olduğu belirlenmiştir. Sıcaklık artışı; amino asit konsantrasyonlarında artış, ancak nişasta, fruktoz ve rafinoz gibi karbonhidratlarda azalış ile ilişkilendirilmiştir. Yağış değişimleri ise nispeten daha az etkili olmuş, yalnızca bazı minerallerin ve amino asitlerin konsantrasyonlarını etkilemiştir. Bu bulgular, iklim değişikliğinin sadece verim düzeyi değil, aynı zamanda kalite bileşenleri üzerinde de önemli etkilere sahip olabileceğini göstermektedir.

Streck (2005), atmosferdeki karbondioksit (CO₂) konsantrasyonundaki artışın ve buna bağlı olarak küresel sıcaklıklardaki yükselişin bitkilerin büyüme, gelişim ve verim süreçleri üzerindeki etkilerini değerlendiren kapsamlı bir literatür derlemesi sunmaktadır. Çalışma, fotosentez için temel substrat olan CO₂'nin artmasının bitkiler açısından genel olarak verim artırıcı bir rol oynadığını vurgulamaktadır. Özellikle C3 fotosentez yoluna sahip bitkiler (buğday, pirinç, soya gibi) bu artıştan C4 bitkilerine kıyasla daha fazla fayda sağlamaktadır. Artan atmosferik CO₂ düzeyi, yaprak ile atmosfer arasındaki CO₂ gradyanını büyütürken fotosentetik aktiviteyi ve dolayısıyla biyokütleyi artırmaktadır. Ancak çalışmada dikkat çekilen önemli bir husus, bu olumlu etkinin küresel ısınmanın getireceği sıcaklık artışlarıyla dengelenebileceği, hatta bazı durumlarda olumsuz etkilere dönüşebileceğidir. Özellikle kritik büyüme dönemlerinde sıcaklık artışı, bitki fizyolojisi üzerinde baskı yaratarak verimi düşürebilir ve CO₂ artışının sağladığı potansiyel kazanımları nötralize edebilir. Bu durum, iklim değişikliğinin tarımsal üretim üzerindeki net etkisinin, CO₂ gübreleme etkisi ile sıcaklık stresinin etkileşimine bağlı olduğunu ve bu ilişkinin bölgesel iklim koşulları ile tarımsal ürün bazında farklılık göstereceğini ortaya koymaktadır.

2.5. Yöntemsel Katkılar ve Özgün Modelleme Yaklaşımları

İklim değişkenliği altında ensemble tabanlı tarımsal verim değerlendirmeleri literatürünü genişleten Pirttioja vd. (2015), ilkbahar ve kışlık buğdayın (*Triticum aestivum*) çok çeşitli iklim koşullarına nasıl tepki verdiğini Impact Response Surface (IRS) metodolojisi ile incelemiştir. Çalışmada, süreç tabanlı 26 farklı tarımsal ürün modelinden oluşan bir ensemble (topluluk) kullanılarak Finlandiya, Almanya ve İspanya'da iklimsel olarak farklı üç bölgede buğday verimleri simüle edilmiştir. IRS'ler, sıcaklıkta (-2 ila +9 °C) ve yağışta (-%50 ila +%50) sistematik değişiklikler içeren sentetik hava verileri temelinde oluşturulmuş; atmosferik CO₂ seviyesi sabit olarak 360 ppm'de tutulmuştur. Sonuçlar, modeller arası farklılıklara rağmen, ensemble medyan verimlerinin genellikle artan sıcaklık ve azalan yağışla birlikte düştüğünü, buna karşılık yağış artışının verimi iyileştirdiğini ortaya koymuştur. Verimin sıcaklığa olan hassasiyeti özellikle Finlandiya'daki sahada belirgin şekilde yüksek çıkarken, Almanya ve İspanya'da daha karmaşık duyarlılık tepkileri gözlemlenmiştir. Dikkat çekici şekilde, daha yüksek sıcaklık artışlarında yağışın etkisi azalmış, bu da birikimli stres etkisini ortaya koymuştur. IRS yöntemi, karmaşık model davranışlarını sentezlemede, verim duyarlılıklarını tanımlamada ve model belirsizliklerini (özellikle vernalizasyon, sıcaklık stresi ve kuraklık gibi süreçlerde) vurgulamada etkili bulunmuştur. Bu bulgular, bu gibi süreçlerin tarımsal ürün modellerinde daha fazla iyileştirilmesi gerektiğini göstermektedir.

Tubiello ve Ewert (2002), yükselen atmosferik CO₂ seviyelerinin tarımsal üretkenlik üzerindeki etkilerini değerlendirmek üzere kullanılan bitki büyüme modellerini eleştirel biçimde gözden geçirdikleri çalışmalarında, bu alandaki modelleme yaklaşımları, bileşen modüller, model geçerliliği ve karşılaştırmaları üzerine kapsamlı bir değerlendirme sunmuşlardır. 1995 sonrası döneme ait hakemli literatürü inceleyerek yaptıkları analizde, tarımsal iklim değişikliği çalışmalarının yaklaşık %20'sinin iklim değişikliği etkilerini konu aldığını, bunların da yalnızca yarısının yükseltilmiş CO₂ düzeylerinin mahsul verimi üzerindeki etkilerini açık biçimde analiz ettiğini belirtmişlerdir. Yazarlar, en çok kullanılan mahsul modellerinin genellikle mevcut yükseltilmiş CO₂ deneylerinden elde edilen verilerle en az test edilmiş olanlar olduğunu vurgulamışlardır. Bu durumun, iklim değişikliği senaryoları altında mahsul verimine ilişkin tahminlere duyulan güveni sınırladığına dikkat çekmişlerdir. Çalışma, modelleme güvenilirliğini artırmak adına, mevcut arazi deneyleriyle model değerlendirmelerinin sürdürülmesi, zararlılar, hastalıklar ve yabancı otlar gibi sınırlayıcı faktörlere daha fazla odaklanması ve zamansal-mekânsal ölçekleme sorunlarına dikkat edilmesi gibi önerilerde bulunmuştur. Bu bağlamda, çalışmaları iklim değişikliği altında mahsul modelleme literatüründe metodolojik gelişim açısından önemli bir dönüm noktası niteliğindedir.

Zscheischler vd. (2017), tarımsal üretimin iklim koşullarına olan duyarlılığını doğrusal yaklaşımların ötesine taşıyarak, sıcaklık ve yağış gibi temel iklim değişkenlerinin tarım ürünleri üzerindeki etkilerini daha gerçekçi bir şekilde analiz etmenin yollarını araştırmıştır. Avrupa örneği üzerinden yürütülen çalışmada, sıcaklık ve yağış değişkenleri arasındaki iki değişkenli (bivariate) iklim koşullarının “return period” (tekrar süresi) esas alınarak değerlendirilmesi önerilmiş ve bu yöntemle tahıl verim değişkenliğinin daha yüksek oranda açıklanabildiği ortaya konmuştur. Bivariate return period'lara dayalı modeller, doğrudan sıcaklık ve yağışa dayalı geleneksel doğrusal modellerin ortalama %36'lık açıklayıcılığına kıyasla %42'lik bir açıklayıcılık sunmuştur. Bulgular, ürün verimlerinin çoğunlukla sıcak ve kurak koşullardan soğuk ve nemli koşullara doğru arttığını ve yaz aylarındaki maksimum sıcaklıkların ürünler üzerinde en belirleyici etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Çalışma, sıcaklık ve yağış değişkenlerinin çok değişkenli ve doğrusal olmayan etkilerini birlikte ele almanın, iklim-verim ilişkilerini daha derinlemesine analiz etme olanağı sunduğunu ve bu ilişkinin geleneksel yaklaşımların gösterdiğinden daha güçlü olabileceğini ortaya koymaktadır.

Bu çok boyutlu süreci sistem düzeyinde ele alan Fuhrer (2003), tarımsal ekosistemler üzerinde CO₂, sıcaklık, toprak nemi ve troposferik ozonun doğrudan ve dolaylı etkilerini

kapsamlı bir şekilde tartışmıştır. Çalışma, C3 bitkilerinin CO₂ artışına karşı daha yüksek kaynak kullanım etkinliği ve verim artışı gösterebildiğini; ancak sıcaklık artışı ile bu avantajların azaldığını ortaya koymuştur. Ayrıca, C4 yabancı otların daha rekabetçi hâle gelmesi, zararlıların kıştan sağ çıkma oranlarının artması ve türler arası etkileşimlerin bozulması gibi sistemsel riskler tanımlanmıştır. Özellikle düşük girdili veya yaygın tarım sistemlerinin iklim değişikliğinden daha olumsuz etkilenebileceği belirtilmiştir.

Hatfield vd. (2011), iklim değişikliği bağlamında sıcaklık, CO₂ ve ozon etkilerini bütüncül biçimde ele alarak, bu değişkenlerin etkileşimli yapısının bitki gelişimini, su kullanım etkinliğini ve ürün stres toleransını dönüştürdüğünü ifade etmiştir. Bölgesel farklılıkların, ürün türleri arasındaki tepkisel değişkenliği daha da karmaşıklaştırdığı belirtilmiştir. Örneğin, sıcaklık artışının ABD'nin güneyinde soya veriminde %2.4 azalma, orta batısında ise %1.7 artış yaratabileceği öngörülmektedir. Ayrıca, sıcaklığın kritik gelişme evrelerinde eşik değerleri aşma sıklığını artırması, verim üzerinde doğrudan zarar riskini büyütmektedir. CO₂ artışı su kullanım verimliliğini iyileştirse de, yüksek sıcaklık altında bu kazanımlar sınırlandırılabilir. Bu çerçevede çalışmada, tarımsal üretim sistemlerinin iklimsel değişkenlik karşısında dayanıklı hâle getirilmesi yönünde uyarlanabilir stratejilere ihtiyaç olduğu vurgulanmaktadır.

Najafi vd. (2018), küresel gıda güvenliğini tehdit eden nüfus artışı, su krizi, ormansızlaşma ve iklim değişikliği gibi sorunlar karşısında, geçmiş verim değişimlerinin iklimsel ve teknolojik belirleyicilerini açıklamaya yönelik özgün bir analiz sunmaktadır. Çalışma, 1961–2013 dönemini kapsayan ülke düzeyinde tarımsal verim tahmini için çok düzeyli (multilevel) bir istatistiksel model geliştirmiştir. Bu model, hem büyük ölçekli hem de bölgesel iklim göstergelerini, aynı zamanda teknolojik ilerlemenin bir temsili olarak kişi başına düşen GSYH'yi bir arada kullanarak yapısal ilişkileri eşzamanlı biçimde tahmin etmektedir. ENSO (El Niño – Güney Salınımı), Palmer Kuraklık Şiddet İndeksi (PDSI), jeopotansiyel yükseklik anomalileri (GPH), tarihsel CO₂ konsantrasyonları ve kişi başına GSYH gibi değişkenler modele dâhil edilmiştir. Kısmi havuzlama (partial pooling) yöntemiyle ülkeler arası varyans azaltılmış ve güvenilir tahminler elde edilmiştir. Bulgular, bu çoklu iklim ve sosyoekonomik değişkenlerin çoğu ülke için tarımsal verim dalgalanmalarını açıklamada oldukça etkili olduğunu göstermektedir. Özellikle PDSI ve GPH'nin etkileri bölgelere göre pozitif veya negatif yönde değişebilmiş, bazı ülkelerde ise iklimsel faktörlerin belirleyici rol oynamadığı görülmüştür. Modelin dış örneklemeler üzerindeki başarısı, gelecekteki verim tahminlerinde kullanılabilir sağlam bir çerçeve sunduğunu göstermektedir. Bu yönüyle

çalışma, sadece ampirik bulgular değil, aynı zamanda küresel düzeyde uyarlanabilir yeni bir yöntemsel yaklaşım da geliştirmiştir.

2.6. Bölgesel Değerlendirmeler ve Uyum Stratejileri

İklim değişikliğinin bölgesel tarımsal üretim üzerindeki etkilerini inceleyen çalışmalardan biri olan Singh vd. (1998), Kanada İklim Merkezi'nin genel dolaşım modeli (CCC-GCM) verilerini kullanarak, atmosferik CO₂ kaynaklı iklim değişikliğinin Quebec ve çevresindeki tarım sistemlerine etkilerini değerlendirmiştir. FAO'nun mahsul modeli aracılığıyla yapılan simülasyonlar, büyüme mevsimi uzunluğu ve büyüme derecesi günleri gibi agroklimatik göstergelerdeki değişimlerin farklı ürün grupları üzerindeki etkilerini analiz etmiştir. Elde edilen bulgulara göre, tarımsal bölgeye ve ürün tipine bağlı olarak, mısır ve sorgum gibi C₄ bitkileri için %20'ye kadar verim artışı tahmin edilirken; buğday ve soya fasulyesi gibi C₃ bitkilerinde %20–30 arasında verim düşüşleri öngörülmüştür. Bu verim değişimlerinin temel nedenleri arasında olgunlaşma hızlarındaki artış, nem stresindeki değişiklikler ve ürünlerin optimum termal büyüme koşullarındaki kaymalar öne çıkmaktadır. Çalışma, bu tür potansiyel üretim kaymalarının, iklim değişikliğine uyum sağlamaya yönelik uygun stratejilerin geliştirilmesini gerekli kıldığına işaret etmektedir.

Tatar (2016), küresel iklim değişikliğinin Türkiye'nin başlıca tarla ürünleri üzerindeki potansiyel etkilerini ele alan çalışmada, sıcaklık artışlarının 21. yüzyılın sonunda 3.2 °C'ye ulaşabileceğine yönelik tahminler çerçevesinde, Türkiye'nin sürdürülebilir tarım ve gıda güvenliği açısından karşı karşıya olduğu zorluklara dikkat çekmiştir. Türkiye'nin iklim değişikliğine uyum ve etkilerini azaltmaya yönelik ulusal eylem planlarını uygulamaya koymasına rağmen, tarım sektörüne dair etkilerin genellikle genel değerlendirmelerle sınırlı kaldığı ve ürün bazlı analizlerin eksik olduğu vurgulanmıştır. Bu bağlamda, çalışmada Türkiye'de yaygın olarak yetiştirilen buğday, arpa, mısır, ayçiçeği ve pamuk gibi temel tarla bitkilerinin gelişim süreçleri, verim ve üretim düzeyleri üzerinde iklim değişikliğinin fizyolojik etkileri detaylı biçimde ele alınmıştır. Tatar'a (2016) göre, iklim değişikliği bu ürünlerde hem üretim miktarını hem de kaliteyi tehdit edebilecek potansiyel sonuçlara sahiptir ve bu durum, tarım politikalarının ürün bazında yeniden yapılandırılmasını gerekli kılmaktadır.

Genel olarak literatür, CO₂ artışının özellikle C₃ bitkileri için olumlu etkiler sağlayabileceğini, ancak sıcaklık artışları ve yağış rejimindeki bozulmaların bu olumlu etkileri büyük ölçüde bastırdığını göstermektedir. En fazla risk altındaki bölgeler, mevcutta su stresi yaşayan ve uyum kapasitesi sınırlı olan bölgelerdir. Ekim tarihlerinin değiştirilmesi, dayanıklı

Çeşitlerin kullanılması ve sulama sistemlerinin iyileştirilmesi gibi uyum stratejileri verim kayıplarını azaltmak için kritik öneme sahiptir. Gelecekteki çalışmalarda, aşırı hava olayları, ekonomik geri besleme mekanizmaları ve pest-hastalık etkileri gibi faktörlerin de dahil edilmesi önerilmektedir.

Kızıldeniz vd. (2022), buğdayın küresel gıda güvenliğindeki stratejik rolüne dikkat çekerek, iklim değişikliğinin buğday üretimi üzerindeki olumsuz etkilerini kapsamlı biçimde tartışmıştır. Aşırı hava olaylarının artışı ile birlikte 2100 yılına kadar buğday üretiminde %23'e varan düşüşler yaşanabileceği öngörülmektedir. Bu bağlamda, çalışmada iklim değişikliği senaryoları doğrultusunda uyum ve azaltım stratejilerinin (düşük karbon teknolojileri, kapasite geliştirme, yeni çeşitlerin ıslahı vb.) geliştirilmesi gerektiği vurgulanmıştır.

3. VERİLER VE METODOLOJİ

Bu çalışma, Türkiye’de beş temel tarım ürününün — buğday, patates, pirinç, soya fasulyesi ve muz — verimleri üzerinde sıcaklık, yağış ve atmosferik CO₂ gibi temel iklim değişkenlerinin etkisini incelemektedir. Analizde, 1981–2020 dönemine ait zaman serisi verileri kullanılarak ARDL sınır testi yaklaşımı uygulanmıştır. Tüm değişkenler doğal logaritmik forma dönüştürülmüş olup, bu sayede tahmin edilen katsayılar esneklik olarak yorumlanabilmektedir. Analizde kullanılan verilere ilişkin özet bilgiler Tablo 3.1’de, değişkenlerin tanımlayıcı istatistikleri ise Tablo 3.2’de sunulmaktadır.

Tablo 3.1. Değişkenlere İlişkin Özet Bilgiler

<i>Hedef Değişken</i>	<i>Temsili Değişken</i>	<i>Sembol</i>	<i>Tanım</i>	<i>Kaynak</i>
Ürün Verimi	Ürün verimleri	<i>YIELD</i>	Verimler hektar başına ton cinsinden ölçülmüştür.	Our World in Data
Sıcaklık	Yüzey sıcaklığı	<i>TEMP</i>	Yıllık ortalama yüzey sıcaklığı (Santigrat derece). Kara, deniz ve iç su yüzeylerini kapsayan; yerden 2 metre yükseklikte ölçülen hava sıcaklığıdır.	Our World in Data
Yağış	Yağış miktarı	<i>PREC</i>	Birim alana düşen yıllık toplam yağış miktarı (mm).	T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı
Karbon Emisyonu	CO ₂ emisyonları	<i>CO2</i>	Fosil yakıtlar ve sanayi kaynaklı CO ₂ emisyonları (Arazi kullanım değişikliği dahil değildir).	Our World in Data

Tablo 3.2. Tanımlayıcı İstatistikler

<i>Değişken</i>	<i>Gözlem Sayısı</i>	<i>Ortalama</i>	<i>Standart Sapma</i>	<i>Minimum</i>	<i>Maksimum</i>	<i>Çarpıklık</i>	<i>Bastıklık</i>
<i>WHEAT</i>	40	2.257	0.347	1.758	2.965	0.507	2.096
<i>POTATO</i>	40	26.122	5.233	16.487	35.377	-0.075	2.261
<i>RICE</i>	40	6.225	1.426	4.379	9.056	0.345	1.622
<i>BANANA</i>	40	36.314	13.873	16.000	65.505	0.374	2.238
<i>SOYBEAN</i>	40	3.021	0.947	0.882	4.421	-0.038	1.962
<i>TEMP</i>	40	11.404	0.889	9.256	13.329	0.118	2.945
<i>PREC</i>	40	577.85	65.157	445.000	717.000	0.066	2.574
<i>CO2</i>	40	240 m	108 m	79.2 m	431 m	0.250	1.841
<i>ln_WHEAT</i>	40	0.803	0.150	0.564	1.087	0.314	1.996
<i>ln_POTATO</i>	40	3.242	0.210	2.803	3.566	-0.487	2.622

Tablo 3.2. Tablonun Devamı

<i>ln_RICE</i>	40	1.803	0.227	1.477	2.203	0.186	1.499
<i>ln_TEMP</i>	40	2.431	0.078	2.225	2.590	-0.112	3.058
<i>ln_PREC</i>	40	6.353	0.114	6.098	6.575	-0.191	2.537
<i>ln_CO2</i>	40	19.186	0.495	18.187	19.881	-0.370	2.078

Kaynak: Yazar hesaplamaları

Bu çalışmada ARDL modelleme çerçevesi kullanılarak, ürün verimleri ile çevresel faktörler arasındaki kısa ve uzun vadeli ilişkiler analiz edilmektedir. ARDL yaklaşımı, her bir ürün veriminin iklim değişkenleriyle eşbütünleşik olup olmadığını belirlemeye olanak tanımaktadır. Bu sayede, ilgili ürünün iklim koşullarına karşı uzun dönemli, istikrarlı bir bağımlılık gösterip göstermediği ya da esas olarak kısa vadeli dalgalanmalardan mı etkilendiği değerlendirilebilmektedir.

Nitekim ARDL modeli, farklı bütünleşme derecelerine sahip değişkenleri $I(0)$ ya da $I(1)$ aynı anda analiz edebilme esnekliğine sahiptir ve bu yönüyle veri setimize oldukça uygundur. Geleneksel eşbütünleşme analizlerinin aksine ARDL yaklaşımı, tüm değişkenlerin aynı bütünleşme derecesine sahip olmasını gerektirmez (Pesaran ve Shin, 1998; Pesaran vd., 2001; Hassler ve Wolters, 2006; Kripfganz ve Schneider, 2023). Diğer bir ifadeyle, ARDL modeli $I(0)$ ve $I(1)$ bütünleşme düzeyine sahip değişkenlerin birlikte tahmin edilmesine imkân tanımaktadır; ancak yöntemin geçerliliği için hiçbir değişkenin $I(2)$ düzeyinde olmaması gerekmektedir. Bu özellik, bütünleşme derecelerindeki farklılıkların model kurulumuna engel teşkil etmemesini sağlamak ve modelin tanımlama hatasına karşı duyarlılığını azaltmaktadır.

ARDL yaklaşımının bir diğer avantajı, kısa dönemli dinamiklerle uzun dönemli denge ilişkilerini aynı model yapısı içerisinde birlikte değerlendirebilmesidir. Bu ikili yapı sayesinde geçici etkiler göz ardı edilmeden, sistemin uzun vadeli davranışları da analiz edilebilmektedir.

ARDL modelleri, tüm açıklayıcı değişkenlerin gecikme yapısını dikkate alarak zaman içerisinde yayılmış etkileri analiz edebilmektedir. Bu yaklaşım, açıklayıcı değişkenler arasındaki korelasyonu doğal biçimde azaltarak çoklu doğrusal bağlantı (multicollinearity) sorununu sınırlandırmakta ve modelin tahmin güvenilirliğini artırmaktadır. Ayrıca gecikmeli bağımlı değişkenin modele dâhil edilmesi, içsellikten (endogeneity) kaynaklanabilecek sapmaların önüne geçmekte ve tahmin edilen katsayıların geçerliliğini güçlendirmektedir. Tarımsal analiz bağlamında düşünüldüğünde, iklimsel ve ekonomik değişimlerin ürün verimi üzerindeki etkilerinin zaman içerisinde gecikmeli olarak ortaya çıkabildiği dikkate alındığında, bu yapı önemli bir avantaj sağlamaktadır.

ARDL modelleri, küçük örneklem büyüklüklerinde dahi istatistiksel olarak güvenilir sonuçlar verebilme kapasitesine sahiptir. Bu durum, özellikle uzun dönemli zaman serisi verilerinin sınırlı olduğu çalışmalarda yöntemi daha uygulanabilir hâle getirmektedir. Son olarak, ARDL yaklaşımının temel bileşeni olan sınır testi, uzun dönemli ilişkilere dair güçlü istatistiksel kanıt sunmakta ve bu ilişkilerin sahte regresyon (spurious regression) olasılığına karşı geçerliliğini sağlamaktadır.

Her bir ürün ile iklim değişkenleri (sıcaklık, yağış ve CO₂) arasındaki ürün-özel ilişkileri belirleyebilmek amacıyla, ARDL modeli her ürün için ayrı ayrı tahmin edilmiştir.

Ürün verimi için genel ARDL (p, q_1, q_2, q_3) modeli Denklem 1’de gösterildiği şekilde ifade edilebilir:

$$\Delta YIELD_t = \alpha + \sum_{i=1}^p \phi_i \Delta YIELD_{t-i} + \sum_{j=0}^{q_1} \beta_j \Delta TEMP_{t-j} + \sum_{k=0}^{q_2} \gamma_k \Delta PREC_{t-k} + \sum_{l=0}^{q_3} \delta_l \Delta CO2_{t-l} + \theta ECT_{t-1} + \varepsilon_t \quad (1)$$

Burada, $YIELD_t$, her bir ürün için yıl t ’deki logaritmik dönüşümü alınmış verimi temsil etmektedir; $TEMP_t$, $PREC_t$ ve $CO2_t$ ise sırasıyla logaritmik dönüşümü alınmış sıcaklık, yağış ve CO₂ düzeylerini göstermektedir. ECT_{t-1} , eşbütünleşme ilişkisinden türetilen hata düzeltme terimi olup, eşbütünleşme bulunan ürünler için uzun dönemli denge ilişkisinin bir göstergesidir. ε_t ise hata terimini temsil etmektedir.

Ayrıca, iklim değişkenlerinin birlikte etkilerini analiz edebilmek amacıyla, her bir ürünün ARDL modeline $TEMP \times PREC$, $TEMP \times CO_2$ ve $PREC \times CO_2$ etkileşim terimleri de bağımsız değişken olarak dâhil edilmiştir.

Uzun dönemli bir ilişkinin varlığını değerlendirebilmek amacıyla aşağıdaki adımlar izlenmiştir:

i. Durağanlık Testleri: Tahmin sürecine başlamadan önce, tüm değişkenlerin bütünleşme derecelerini belirlemek amacıyla Augmented Dickey-Fuller (ADF) ve Phillips-Perron (PP) testleri uygulanmıştır. Bu adım, ARDL yaklaşımının yalnızca $I(0)$ veya $I(1)$ düzeyinde bütünleşik değişkenler için geçerli olması nedeniyle önem taşımaktadır; zira $I(2)$ veya daha yüksek düzeyde bütünleşik değişkenlerin modelde yer alması yöntemin geçerliliğini ortadan kaldırmaktadır (Pesaran vd., 2001).

ii. Sınır Testi (Bounds Testing) Uygulaması: Her bir ürün için, ürün verimi ile iklim değişkenleri (sıcaklık, yağış ve CO₂) arasında uzun dönemli bir ilişki olup olmadığını test etmek

amacıyla ARDL sınır testi yaklaşımı uygulanmıştır. Sınır testi kapsamında elde edilen F-istatistiği, kritik değerlerle karşılaştırılarak eşbütünleşme olup olmadığına karar verilmektedir (Kripfganz ve Schneider, 2023):

- F-istatistiği üst sınır değerini aşarsa, uzun dönemli bir ilişkinin varlığı kabul edilir.
- F-istatistiği alt sınır değerinin altında kalırsa, uzun dönemli bir ilişkinin bulunmadığı sonucuna varılır.
- F-istatistiği sınır değerler arasında kalırsa, sonuç belirsiz (kararsız) olarak değerlendirilir.

iii. Hata Düzeltme Modeli (ECM) Tahmini: Uzun dönemli eşbütünleşme ilişkisinin tespit edildiği ürünler için, hem kısa dönemli hem de uzun dönemli dinamikleri birlikte analiz edebilmek amacıyla hata düzeltme modeli (Error Correction Model – ECM) tahmin edilmiştir. ECM modelinde yer alan hata düzeltme terimi ECT_{t-1} , verimin uzun dönemli denge seviyesinden sapmalara karşı ne hızla geri döndüğünü göstermektedir. Bu terimin negatif ve istatistiksel olarak anlamlı olması, kısa dönemli dalgalanmaların ardından verimin denge düzeyine geri döndüğünü ifade eder.

iv. Sadece Kısa Dönemli İlişki Taşıyan Ürünler: Uzun dönemli eşbütünleşme ilişkisi tespit edilmeyen ürünler için, analiz kısa dönemli katsayılar üzerinden yürütülmektedir. Bu durumda, ARDL modelinde farkı alınmış değişkenlerden elde edilen katsayılar, sıcaklık, yağış ve CO₂'deki değişimlerin ürün verimi üzerindeki anlık etkilerini ortaya koymakta ve bu etkilerin kalıcı olmadığı varsayılmaktadır.

4. AMPİRİK SONUÇLAR

Bu bölümde, buğday, patates, pirinç, soya fasulyesi ve muz ürünleri için tarımsal verim ile çevresel değişkenler (sıcaklık, yağış ve CO₂) arasındaki ilişkileri ortaya koyan ampirik bulgular sunulmaktadır. ARDL modelleme yaklaşımıyla elde edilen sonuçlar ayrıntılı biçimde aktarılmakta; hangi ürünlerde uzun dönemli eşbütünleşme ilişkisi bulunduğu ve tüm ürünler için tahmin edilen kısa dönemli katsayıların ne tür etkiler taşıdığı değerlendirilmektedir. Bulgular, öncelikle kısa dönemli dinamikler ele alınarak sunulmakta, ardından her bir ürün özelinde uzun dönemli ilişkiler ayrıntılandırılmaktadır.

İlerleyen bölümlerde ayrıntılı biçimde ele alınacak önemli bir hususa burada önceden değinmekte yarar vardır. Yaptığımız analiz, buğday ve patates ürünleri için iklim değişkenleriyle (sıcaklık, yağış ve CO₂ seviyeleri) uzun dönemli bir eşbütünleşme ilişkisi olduğunu ortaya koymaktadır. Bu bulgu, söz konusu değişkenlerin zaman içerisinde bu ürünlerin verimleri üzerinde kalıcı bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Dolayısıyla, buğday ve patates için hem kısa hem de uzun dönemli katsayılar yorumlanmakta; çevresel faktörlerdeki değişimlere verilen anlık tepkiler ve uzun vadeli uyum süreçleri birlikte değerlendirilmektedir. Uzun dönemli katsayılar, çevresel değişkenlerin ürün verimi üzerindeki kalıcı etkilerini yansıtırken; kısa dönemli katsayılar, iklim değişkenliğine verilen daha ani ve geçici tepkileri yansıtmaktadır.

Buna karşılık, pirinç, soya fasulyesi ve muz ürünleri için eşbütünleşme ilişkisine dair herhangi bir kanıt elde edilmemiştir. Bu durum, söz konusu ürünlerin verimlerinin, bu çalışmanın kapsamındaki açıklayıcı değişkenlerle (sıcaklık, yağış ve CO₂ düzeyleri) istikrarlı ve kalıcı bir uzun dönem ilişkisi taşımadığını göstermektedir. Bu nedenle, bu ürünler özelinde analizler yalnızca kısa dönemli dinamiklere odaklanmaktadır. Kısa dönem katsayıları üzerinden yapılan değerlendirmeler, bu ürünlerin sıcaklık, yağış ve CO₂'deki dalgalanmalara karşı verdikleri anlık ve görece daha değişken tepkileri yakalamamıza olanak tanımaktadır. Bu da, ilgili ürünlerin uzun vadeli uyum süreçlerinden ziyade, kısa vadeli çevresel değişkenliklere karşı daha yüksek duyarlılık gösterdiğini ortaya koymaktadır.

Eşbütünleşme ilişkisi bulunan ve bulunmayan ürünler arasındaki bu ayrım, farklı ürün türlerinin iklim koşullarına nasıl tepki verdiğine dair önemli içgörüler sunmaktadır. Bu bulgu, çevresel değişimlere karşı her bir ürünün özgül verim dinamiklerine uygun biçimde geliştirilecek uyum odaklı tarımsal yönetim stratejileri açısından da anlamlı politik çıkarımlar taşımaktadır.

Daha önce de ifade edildiği üzere, ARDL modellemesine geçmeden önce değişkenlerin durağanlık özelliklerinin kontrol edilmesi gerekmektedir. Tablo 4.1’de ADF ve PP birim kök testlerinin sonuçları sunulmaktadır. Bulgular, analizde yer alan hiçbir değişkenin ikinci mertebeden bütünleşik olmadığını, başka bir deyişle I(2) olmadığını göstermektedir.

Tablo 4.1. Birim Kök Testleri

<i>Değişken</i>	<i>ADF</i>		<i>PP</i>	
	<i>C</i>	<i>C/T</i>	<i>C</i>	<i>C/T</i>
$CO2_t$	-2.508(0)	-2.033(0)	-3.977(11)***	-1.618(8)
$\Delta CO2_t$	-6.098(0)***	-6.713(0)***	-6.100(2)***	-7.937(9)***
$TEMP_t$	-0.712(1)	-7.078(0)***	-0.757(8)	-7.317(6)***
$\Delta TEMP_t$	-10.869(0)***	-5.910(3)***	-26.691(16)***	-28.363(15)***
$PRECIP_t$	-6.829(0)***	-6.768(0)***	-10.020(22)***	-11.642(26)***
$\Delta PRECIP_t$	-6.968(1)***	-6.855(1)***	-26.624(22)***	-28.496(21)***
$WHEAT_t$	-0.380(1)	-5.706(0)***	-1.278(2)	-5.842(3)***
$\Delta WHEAT_t$	-13.243(0)***	-13.142(0)***	-29.778(37)***	-49.329(37)***
$RICE_t$	-0.863(1)	-2.708(0)	-0.819(18)	-2.686(2)
$\Delta RICE_t$	-8.075(0)***	-7.972(0)***	-8.857(13)***	-8.832(14)***
$POTATO_t$	-2.124(2)	-3.394(1)*	-1.710(11)	-2.865(6)
$\Delta POTATO_t$	-5.890(1)***	-6.081(1)***	-7.525(6)***	-8.387(9)***
$SBEAN_t$	-1.830(1)	-7.893(0)***	-3.700(4)***	-7.077(4)***
$\Delta SBEAN_t$	-7.866(0)***	-7.700(0)***	-8.782(1)***	-8.450(1)***
$BANANA_t$	-1.073(0)	-3.348(0)*	-0.760(7)	-3.348(0)*
$\Delta BANANA_t$	-6.793(1)***	-6.678(1)***	-10.151(13)***	-9.994(13)***
$TEMP \times PREC$	-6.710(0)***	-6.819(0)***	-7.263(11)***	-11.704(22)***
$\Delta(TEMP \times PREC)$	-6.981(1)***	-6.866(1)***	-26.891(23)***	-30.375(22)***
$TEMP \times CO2$	-2.408(0)	-1.823(0)	-4.041(8)***	-1.364(7)
$\Delta(TEMP \times CO2)$	-5.992(0)***	-6.682(0)***	-5.992(1)***	-7.181(6)***
$PREC \times CO2$	-2.896(0)*	-6.136(0)***	-2.701(1)*	-6.279(7)***
$\Delta(PREC \times CO2)$	-6.755(1)***	-6.682(1)***	-20.343(29)***	-28.999(23)***

Not: ADF testi için parantez içinde verilen gecikme uzunlukları Schwarz Bilgi Kriteri’ne (SIC) göre belirlenmiştir. PP testi için uygun bant genişlikleri ise Newey-West yöntemiyle hesaplanmıştır. *** $p < 0.01$, ** $0.01 < p < 0.05$, * $0.05 < p < 0.10$

4.1. Buğday

Bu bölümde, Türkiye’de buğday verimine ilişkin ARDL analizinden elde edilen ampirik bulgular sunulmakta; sıcaklık, yağış ve atmosferik CO₂ gibi iklim değişkenleriyle olan uzun ve kısa dönemli ilişkiler incelenmektedir. Analiz, modele ilişkin optimal gecikme uzunluğunun Akaike Bilgi Kriteri (AIC) ile belirlenmesine ve hata düzeltme modelinden (ECM) elde edilen katsayılarla dayanmaktadır. Sonuçlar Tablo 4.2’de özetlenmektedir.

Tablo 4.2. ARDL Sonuçları (Buğday)

Model: $F(WHEAT_t/TEMP_t, PREC_t, CO2_t, TEMP \times PREC_t, TEMP \times CO2_t, PREC \times CO2_t)$			
Optimal Gecikme Uzunluğu: (2, 2, 2, 2, 2, 1, 2)		F-istatistiği: 5.476**	
Anlamlılık Düzeyi	Kritik Değerler		
	Alt Sınır	Üst Sınır	
% 1	3.800	5.643	
% 5	2.797	4.211	
% 10	2.353	3.599	
Hata Düzeltme Modeli			
Değişken	Katsayı	Standart Hata	t-istatistiği
<i>C</i>	-6791.130***	1083.531	-6.268
$\Delta WHEAT_{t-1}$	-0.556***	0.116	-4.809
$\Delta TEMP_t$	389.714**	147.387	2.644
$\Delta TEMP_{t-1}$	-613.946***	165.492	-3.710
$\Delta PREC_t$	236.853*	125.080	1.894
$\Delta PREC_{t-1}$	-449.036***	123.100	-3.648
$\Delta CO2_t$	13.623	32.091	0.425
$\Delta CO2_{t-1}$	12.491***	2.870	4.351
$\Delta TEMP \times PREC_t$	-50.151*	26.402	-1.900
$\Delta TEMP \times PREC_{t-1}$	95.510***	25.814	3.700
$\Delta TEMP \times CO2_t$	-3.966	5.978	-0.663
$\Delta PREC \times CO2_t$	1.005*	0.522	1.927
$\Delta PREC \times CO2_{t-1}$	-1.992***	0.464	-4.290
ECT_{t-1}	-0.658***	0.105	-6.268
Uzun Dönem Katsayıları			
<i>TEMP</i>	2223.352*	1264.872	1.758
<i>PREC</i>	1829.405*	940.200	1.946
<i>CO2</i>	-120.904***	36.055	-3.353
<i>TEMP</i> × <i>PREC</i>	-390.371*	200.010	-1.952
<i>TEMP</i> × <i>CO2</i>	13.236***	4.281	3.092
<i>PREC</i> × <i>CO2</i>	8.469*	4.234	2.000
Tanımsal Tests			
χ^2_{SER}	0.025 (0.975)	R^2	0.943
χ^2_{HET}	1.075 (0.426)	R^2_{Adj}	0.882
χ^2_{NORM}	1.588 (0.452)	F_{ist}	15.535 (0.000)
χ^2_{RAMSEY}	0.059 (0.812)	<i>Cusum</i>	Durağan
<i>DW</i>	1.915	<i>Cusum(sqr)</i>	Durağan

Not: Parantez içinde verilen değerler olasılık değerleridir. χ^2_{SER} , χ^2_{HET} , χ^2_{NORM} ve χ^2_{RAMSEY} sırasıyla Breusch-Godfrey LM otokorelasyon testi, Breusch-Pagan değişen varyans testi, Jarque-Bera normallik testi ve model belirtim hatası test istatistiklerini ifade etmektedir. Cusum ve Cusum of Squares (kareler toplamı) testleri ise modelin yapısal kararlılığını ölçmektedir. Küçük örneklem hacmi nedeniyle, sınır testi için kritik değerler Narayan (2005)'ten alınmıştır: Durum III – sabit terimli ve trendsiz model. *** $p < 0.01$, ** $0.01 < p < 0.05$, * $0.05 < p < 0.10$.

Sınır testi için hesaplanan F-istatistiği 5.476'dır ve %5 anlamlılık düzeyinde istatistiksel olarak anlamlıdır. Bu sonuç, buğday verimi ile iklimsel faktörler arasında eşbütünlüşme

ilişkinin varlığına işaret etmekte olup, buğday verimi ile seçilen iklim değişkenleri arasında istikrarlı ve uzun dönemli bir ilişkinin bulunduğunu teyit etmektedir.

ARDL modelinde kısa dönem katsayıları, çevresel faktörlerin buğday verimi üzerindeki anlık veya geçici etkilerini yansıtmaktadır. Hata düzeltme teriminin (ECT) katsayısı -0.658 olup, t-istatistiği -6.268 ile yüksek düzeyde anlamlıdır. Bu sonuç, önceki dönemdeki dengesizliklerin yaklaşık %65.8'inin mevcut dönemde giderildiğini göstermekte ve uzun dönem dengesine hızlı bir şekilde geri dönüşün gerçekleştiğini ortaya koymaktadır.

Sıcaklığın buğday verimi üzerindeki etkisi, farklı gecikme dönemlerinde değişkenlik göstermektedir; bazı gecikme terimlerinde pozitif, bazılarında ise negatif ve istatistiksel olarak anlamlı katsayılar gözlenmiştir. Bu durum, artan sıcaklıkların bazı dönemlerde buğday verimini artırabileceğini, ancak diğer dönemlerde verimi olumsuz etkileyebileceğini göstermektedir. Bu farklılık, muhtemelen buğday gelişimi için uygun sıcaklık eşikleri ile aşırı sıcaklıkların yol açtığı stres koşulları arasındaki farktan kaynaklanmaktadır. Özellikle hassas büyüme evrelerinde yüksek sıcaklıklar, ısı stresi oluşturarak verimi azaltabilmektedir (Yang vd., 2013; Ullah vd., 2022). Öte yandan, soğuk geçen dönemlerde sıcaklıkların ılımlı şekilde artması, vejetatif dönemin uzamasına olanak tanıyarak buğday verimine olumlu katkı sağlayabilir (Lizana ve Calderini, 2013; Du vd., 2022).

Cari döneme ait sıcaklık değişkeninin pozitif ve istatistiksel olarak anlamlı katsayısı (389.714), kısa vadede sıcaklık artışlarının buğday verimini olumlu etkilediğini göstermektedir. Bu sonuç, çimlenme ve erken büyüme evreleri gibi sıcaklığa duyarlı gelişim süreçlerinin desteklenmesiyle ilişkilendirilebilir (Khaeim vd., 2022). Buna karşılık, gecikmeli sıcaklık teriminin negatif ve anlamlı katsayısı (-613.946; t-istatistiği = -3.710), bir önceki dönemdeki yüksek sıcaklık maruziyetinin buğday verimini olumsuz etkilediğini ortaya koymaktadır (Asseng vd., 2011). Bu bulgu, yüksek sıcaklıkların kümülatif etkisiyle tahıl dolumu gibi kritik süreçlerin sekteye uğradığını ve bu durumun zamanla verim düşüşlerine neden olabileceğini göstermektedir (Tiwari vd., 2017; Ullah vd., 2022).

Cari döneme ait yağış değişkeninin katsayısı pozitif (236.853) ve sınırdan anlamlılık düzeyindedir. Bu bulgu, kısa vadede yağış artışlarının buğday verimini olumlu yönde etkileyebileceğini göstermektedir (Howard vd., 2016; Chandio vd., 2021). Özellikle su temininde kısıtlılık yaşanan bölgelerde, artan yağış miktarı toprak nemliliğini artırarak buğdayın büyüme ve gelişme süreçlerini destekleyebilir. Bununla birlikte, bir dönem gecikmeli yağış değişkeninin katsayısı negatif ve istatistiksel olarak anlamlıdır (-449.036). Bu durum, bir

önceki dönemde aşırı yağışların buğday üretimini olumsuz etkileyebileceğini ortaya koymaktadır. Aşırı yağışlar, su baskınlarına, besin maddesi yıkanmasına veya zararlı organizmaların çoğalmasına yol açarak bir sonraki dönemde bitki gelişimini sekteye uğratabilir (Kim vd., 2024).

Cari döneme ait CO₂ emisyonlarının katsayısı (13.623) istatistiksel olarak anlamlı değildir. Bu durum, atmosferik CO₂ konsantrasyonundaki kısa vadeli değişimlerin buğday verimi üzerinde doğrudan ve gözlemlenebilir bir etkisinin olmadığını göstermektedir (Conroy vd., 1994; Gifford, 1995). Buna karşılık, bir dönem gecikmeli CO₂ değişkeninin katsayısı pozitif (12.491) ve yüksek düzeyde anlamlıdır. Bu bulgu, geçmiş dönemdeki CO₂ artışlarının cari dönemde buğday verimini olumlu yönde etkilediğini ortaya koymaktadır. Bu durum, C₃ fotosentez yoluna sahip bitkilerde görülen ve daha yüksek CO₂ seviyelerinin fotosentezi ile biyokütle üretimini artırarak verimi yükselttiği bilinen “CO₂ gübreleme etkisi” ile açıklanabilir. Bu gecikmeli pozitif etki, mevcut literatürle de örtüşmektedir; zira CO₂, belirli koşullar altında tarımsal verimi artıran bir unsur olarak sıkça vurgulanmaktadır (Seneweera ve Norton, 2011; Taylor ve Schlenker, 2021).

Sıcaklık, yağış ve CO₂ arasındaki etkileşim terimleri, bu değişkenlerin birlikte ele alındığında bireysel etkilerinden farklı sonuçlar doğurabileceğini ortaya koyarak daha incelikli ilişkileri gözler önüne sermektedir. Cari döneme ait $TEMP \times PREC$ etkileşim teriminin katsayısı negatif (-50.151) ve sınırdan anlamlılık düzeyindedir. Bu durum, sıcaklıkla birlikte artan yağış miktarının kısa vadede buğday verimi üzerinde olumsuz bir etkisi olabileceğine işaret etmektedir (Hatfield vd., 2011). Bu bulgu, özellikle yüksek sıcaklıklarla birleşen aşırı nem koşullarının, buğdayda fizyolojik stres veya hastalıklara yatkınlığı artırarak verimi düşürmesine bağlanabilir. Buna karşın, bir dönem gecikmeli $TEMP \times PREC$ etkileşim terimi pozitif (95.510) ve istatistiksel olarak anlamlıdır. Bu sonuç, önceki dönemde yaşanan yüksek sıcaklık ve yağışın birlikte oluşturduğu koşulların, cari dönemde buğday verimi üzerinde olumlu etkiler doğurabileceğini göstermektedir. Bu etki, özellikle toprakta artan nem rezervlerinin büyüme döneminde olumlu katkı sunması yoluyla açıklanabilir (Kumar vd., 2023).

Cari döneme ait $TEMP \times CO_2$ etkileşim teriminin katsayısı istatistiksel olarak anlamlı değildir (-3.966). Bu durum, sıcaklık ile CO₂ düzeylerinin birlikte ele alındığında kısa vadede buğday verimi üzerinde anlamlı bir birleşik etkisinin bulunmadığını göstermektedir.

Cari döneme ait $PREC \times CO_2$ etkileşim teriminin katsayısı pozitif (1.005) ve sınırdan anlamlıdır. Bu durum, yağış ile CO_2 'nin birlikte ele alındığında kısa vadede verim üzerinde olumlu bir etkisi olduğunu, muhtemelen yeterli toprak nemi koşullarında fotosentetik verimliliğin artması yoluyla bu etkinin ortaya çıktığını göstermektedir. Buna karşılık, gecikmeli $PREC \times CO_2$ teriminin katsayısı negatif ve istatistiksel olarak anlamlıdır (-1.992). Bu bulgu, CO_2 ve yağış seviyelerinin uzun süre yüksek seyretmesinin, toprak doygunluğu ya da besin dengesi bozulması gibi etkenler nedeniyle buğday verimini olumsuz etkileyebileceğini göstermektedir (Yu vd., 2022).

Uzun dönemli katsayılar, yüzey sıcaklığı, yağış, CO_2 emisyonları ve bu değişkenlerin etkileşimlerinin buğday verimi üzerindeki kalıcı etkilerine ışık tutmaktadır. Kısa dönemli dinamiklerin aksine, bu uzun dönemli ilişkiler, çevresel faktörlerdeki sürekli değişimlerin zaman içinde buğday verimi dengesini nasıl etkilediğini yansıtır. Uzun dönem katsayıları, geçici dalgalanmaların etkisi ortadan kalktıktan sonra çevresel faktörlerin buğday verimi üzerindeki kalıcı etkilerine dair önemli bilgiler sunar. Buna göre, CO_2 'nin buğday verimi üzerindeki pozitif ve istatistiksel olarak anlamlı katsayısı, uzun dönemde atmosferik CO_2 seviyelerindeki artışın buğday üretkenliğini artırabileceğini göstermektedir (Dubey vd., 2015). Bu uzun dönemli “ CO_2 gübreleme etkisi”, artan CO_2 yoğunluğunun fotosentezi ve muhtemelen su kullanım etkinliğini artırarak buğday verimini olumlu yönde etkileyebileceğini işaret etmektedir.

Uzun dönemli sıcaklık katsayısının pozitif ve sınırdan anlamlı bulunması, sıcaklık artışlarının uzun vadede buğday verimini olumlu etkileyebileceğini göstermektedir. Bu etki, sıcaklığın bitki büyüme hızlarını artırması ve büyüme sezonunu uzatması yoluyla üretimi desteklemesinden kaynaklanabilir; özellikle de sıcaklık artışları buğdayın gelişimi için optimal aralıklar içinde kaldığı sürece bu durum verim açısından faydalı olabilir (Ottman vd., 2012). Ancak, bu etkinin sınırdan anlamlılığı, söz konusu ilişkinin bölgesel iklim koşulları ve uygulanan tarımsal adaptasyon stratejilerine bağlı olarak değişkenlik gösterebileceğine işaret etmektedir.

Uzun dönemli yağış katsayısının pozitif ve sınırdan anlamlı olması, zaman içinde artan yağış miktarının buğday verimini olumlu etkilediğini göstermektedir. Sürekli nem temini, bitki gelişimini ve toprak besin maddelerinin alımını destekleyerek daha yüksek verim seviyelerini teşvik eder (Kumar vd., 2023). Bu uzun vadeli fayda, özellikle üretimin büyük ölçüde yağışa bağlı olduğu kuru tarım sistemlerinde daha da önem kazanmaktadır.

CO₂ emisyonları için elde edilen negatif ve yüksek derecede anlamlı uzun dönem katsayısı, atmosferik CO₂ seviyelerindeki kalıcı artışların buğday verimini uzun dönemde azaltabileceğini göstermektedir. CO₂'nin gübreleme etkileri göz önüne alındığında bu olumsuz etki ilk bakışta çelişkili görünse de, uzun süreli CO₂ artışları zamanla diğer çevresel faktörleri değiştirebilir veya bazı stres unsurlarını (örneğin sıcaklık artışı, toprak pH'ındaki değişimler) tetikleyerek buğday üzerindeki olumsuz etkileri artırabilir (Alonso vd., 2009; Zhang vd., 2018). Bu sonuç, aşırı CO₂ düzeylerinin belirli fizyolojik stresleri şiddetlendirebileceğini veya bitkinin optimal gelişim koşullarını bozabileceğini ve bu durumun başlangıçta gözlenen olumlu etkileri gölgede bırakabileceğini düşündürmektedir.

Etkileşim terimleri, sıcaklık, yağış ve CO₂ arasındaki karmaşık dinamikleri ortaya koymakta olup, bu değişkenlerin birlikte ortaya çıkardığı etkilerin, her birinin bireysel etkisinden farklılaştığını vurgulamaktadır. Sıcaklık ve yağış arasındaki negatif ve marjinal anlamlı uzun dönemli etkileşim katsayısı, bu iki değişkenin eşzamanlı artışı durumunda buğday veriminde azalmaya yol açabileceğini göstermektedir. Bu durum, yüksek sıcaklık ve yüksek yağışın birlikte oluşturduğu koşullarda, tarımsal üretim için kritik bir stres eşiğinin aşılmasına işaret edebilir. Örneğin, aşırı nem nedeniyle hastalıkların yaygınlaşması ya da toprakta meydana gelen bozulmalar gibi olumsuzluklar, bitki sağlığını zayıflatarak verim üzerinde olumsuz etkiler yaratabilir (Conradie vd., 2021; Fan vd., 2022).

Sıcaklık ve CO₂ arasındaki pozitif ve yüksek derecede anlamlı etkileşim katsayısı, uzun vadede bu iki faktörün birlikte buğday verimini artırdığını göstermektedir. Bu etki, muhtemelen CO₂ gübreleme etkisinin fotosentez ve su kullanım verimliliğini artırarak bitkilerin yüksek sıcaklıklardan daha etkin yararlanmasına olanak tanimasından kaynaklanmaktadır (Gonsamo vd., 2021). Bu etkileşim özellikle yarı kurak bölgelerde önemli olabilir; zira artan CO₂ seviyeleri, sıcaklığın olumsuz etkilerini kısmen telafi edebilir. Öte yandan, yağış ve CO₂ arasındaki pozitif ve marjinal anlamlı etkileşim, her iki değişkenin artmasının sinerjik bir etki yaratarak uzun vadede buğday verimine katkı sağladığını göstermektedir. Bu sonuç, yeterli toprak nemi ile CO₂ zenginleşmesinin birlikte optimal fotosentetik faaliyetleri ve bitki gelişimini desteklemesiyle açıklanabilir (Li vd., 2003). Ayrıca artan yağış, CO₂ ile zenginleşmiş topraktaki besin maddelerinin alımını kolaylaştırabilir; bu da buğday veriminin artışı için elverişli koşullar yaratır (Van Vuuren vd., 1997).

Uzun döneme ilişkin sonuçlar, sıcaklık ve yağışın buğday verimine bireysel olarak olumlu katkı sağladığını, ancak CO₂'nin tek başına ele alındığında anlamlı bir şekilde olumsuz etki yarattığını ortaya koymaktadır. Bununla birlikte, etkileşim terimleri, CO₂'nin sıcaklık veya

yağışla birlikte değerlendirildiğinde bazı olumsuz etkileri hafifletebildiğini ve uygun koşullar altında buğday verimini artırabileceğini göstermektedir. Bu bulgular, çevresel faktörlerin yalnızca tekil etkilerinin değil, aynı zamanda etkileşimli etkilerinin de analiz edilmesinin önemini vurgulamaktadır. Zira bu tür etkileşimler, iklim değişikliği karşısında ürün dayanıklılığı ve verimliliğini anlamak açısından kritik öneme sahiptir. Tarımsal uygulamalarda, özellikle sıcaklık ve nem koşullarını dengelemeye yönelik uyum stratejileri geliştirmek, uzun vadeli bu dinamiklerden faydalanarak buğday veriminin korunmasını veya artırılmasını sağlayabilir.

Ayrıca, uygulanan tanısal testler modelin istatistiksel açıdan güvenilir olduğunu göstermektedir. Breusch-Godfrey LM testi, modelde otokorelasyonun olmadığını ortaya koyarken; Breusch-Pagan testi, kalıntılarda değişen varyans sorununa rastlanmadığını göstermektedir. Jarque-Bera normallik testi sonuçları, hata terimlerinin normal dağıldığını teyit etmekte ve bu durum yapılan çıkarımların geçerliliğini güçlendirmektedir. CUSUM ve CUSUM of squares testleri ise model katsayılarının zaman içinde istikrarlı kaldığını ortaya koymakta, dolayısıyla model sonuçlarının güvenilirliğini artırmaktadır.

4.2. Patates

Bu bölümde, Türkiye'deki patates verimi üzerine gerçekleştirilen ARDL analizinin ampirik sonuçları sunulmaktadır. Bulgular, hem iklim değişkenleriyle olan uzun dönemli ilişkileri hem de kısa dönemli dinamikleri kapsamlı biçimde ele almaktadır. Analiz, model için AIC ile belirlenen optimal gecikme uzunluklarına ve ECM tarafından elde edilen katsayılara dayanmaktadır. Elde edilen sonuçlar Tablo 4.3'te sunulmaktadır.

Tablo 4.3. ARDL Sonuçları (Patates)

Model: $F(POTATO_t/TEMP_t, PREC_t, CO2_t, TEMP \times PREC_t, TEMP \times CO2_t, PREC \times CO2_t)$			
Optimal Gecikme Uzunluğu: (2, 2, 2, 2, 2, 2)		F-istatistiği: 6.354***	
		Kritik Değerler	
Anlamlılık Düzeyi		Alt Sınır	Üst Sınır
% 1		3.800	5.643
% 5		2.797	4.211
% 10		2.353	3.599
Hata Düzeltme Modeli			
Değişken	Katsayı	Standart Hata	t-istatistiği
<i>C</i>	-2279.411***	273.933	-8.321
$\Delta POTATO_{t-1}$	0.2760***	0.110	2.498
$\Delta TEMP_t$	-220.548**	79.688	-2.768
$\Delta TEMP_{t-1}$	-487.973***	97.457	-5.007
$\Delta PREC_t$	-75.488	67.618	-1.116

Tablo 4.3. Tablonun Devamı

$\Delta PREC_{t-1}$	-485.471***	80.771	-6.010
$\Delta CO2_t$	-25.165	19.3114	-1.303
$\Delta CO2_{t-1}$	51.535***	15.808	3.260
$\Delta TEMP \times PREC_t$	16.973	14.260	1.190
$\Delta TEMP \times PREC_{t-1}$	101.391***	16.849	6.018
$\Delta TEMP \times CO2_t$	5.647	3.603	1.567
$\Delta TEMP \times CO2_{t-1}$	-8.185**	2.969	-2.757
$\Delta PREC \times CO2_t$	-0.573*	0.280	-2.046
$\Delta PREC \times CO2_{t-1}$	-1.661***	0.282	-5.893
ECT_{t-1}	-0.838***	0.101	-8.321
Uzun Dönem Katsayıları			
<i>TEMP</i>	575.145	424.066	1.356
<i>PREC</i>	507.065	328.672	1.543
<i>CO2</i>	-36.623*	18.361	-1.995
<i>TEMP</i> × <i>PREC</i>	-106.205	69.655	-1.525
<i>TEMP</i> × <i>CO2</i>	4.992*	2.569	1.943
<i>PREC</i> × <i>CO2</i>	1.826	1.431	1.276
Tanısal Testler			
χ^2_{SER}	0.691 (0.516)	R^2	0.987
χ^2_{HET}	0.950 (0.531)	R^2_{Adj}	0.972
χ^2_{NORM}	0.550 (0.760)	F_{ist}	66.274 (0.000)
χ^2_{RAMSEY}	2.453 (0.137)	<i>Cusum</i>	Durağan
<i>DW</i>	2.197	<i>Cusum(sqr)</i>	Durağan

Not: Parantez içinde verilen değerler olasılık değerleridir. χ^2_{SER} , χ^2_{HET} , χ^2_{NORM} ve χ^2_{RAMSEY} sırasıyla Breusch-Godfrey LM otokorelasyon testi, Breusch-Pagan değişen varyans testi, Jarque-Bera normallik testi ve model belirtim hatası test istatistiklerini ifade etmektedir. Cusum ve Cusum of Squares (kareler toplamı) testleri ise modelin yapısal kararlılığını ölçmektedir. Küçük örneklem hacmi nedeniyle, sınır testi için kritik değerler Narayan (2005)'ten alınmıştır: Durum III – sabit terimli ve trendsiz model. *** $p < 0.01$, ** $0.01 < p < 0.05$, * $0.05 < p < 0.10$.

Sınır testi için hesaplanan F-istatistiği 6.354 olup, %1 düzeyinde anlamlıdır. Bu sonuç, patates verimi ile iklimsel faktörler arasında eşbütünleşme ilişkisinin varlığını göstermektedir. Dolayısıyla, seçilen iklim değişkenleri ile patates verimi arasında istikrarlı ve uzun dönemli bir ilişki olduğu doğrulanmaktadır.

Patates verimi için elde edilen ARDL sonuçları, çevresel faktörlerin ve bu faktörler arasındaki etkileşimlerin hem kısa dönemli hem de uzun dönemli dinamikler üzerindeki etkilerini ortaya koymaktadır. Modelin kısa dönem katsayıları, bu çevresel değişkenlerin patates verimi üzerindeki anlık etkilerini yansıtmaktadır. ECT katsayısı -0.838 olup %1 düzeyinde yüksek derecede anlamlıdır. Bu bulgu, patates veriminde meydana gelen kısa vadeli dengesizliklerin yaklaşık %83.8'inin bir sonraki dönemde düzeltildiğini göstermektedir. Dolayısıyla, çevresel şoklar sonrası sistemin uzun dönemli dengeye hızlı bir şekilde geri döndüğü anlaşılmaktadır.

Gecikmeli patates verimi değişkeninin katsayısı 0.276 olup istatistiksel olarak anlamlıdır ve cari verim ile pozitif bir ilişkiyi ortaya koymaktadır. Bu durum, verimde bir süreklilik etkisine işaret etmektedir: önceki dönemdeki yüksek verim, mevcut dönemdeki verimi olumlu yönde etkileyebilir. Bu etki, toprak yapısında iyileşme ya da besin maddesi düzeylerinde artış gibi kalıcı olumlu toprak koşullarının devam etmesiyle açıklanabilir. Ayrıca, bu süreklilik, önceki dönemdeki başarılı tarımsal uygulamaların yarattığı olumlu ortamın, sonraki dönemdeki verimi desteklemesi şeklinde de yorumlanabilir.

Sonuçlar, çeşitli gecikmelerde sıcaklık (*TEMP*) değişkeni için hem pozitif hem negatif anlamlı katsayılar ortaya koymakta ve bu durum, bu değişkenin patates verimi üzerindeki etkisinin karmaşık ve anlık olduğunu göstermektedir. Mevcut sıcaklığın katsayısı -220.548 olup %5 düzeyinde istatistiksel olarak anlamlıdır; bu da sıcaklıktaki ani artışların patates verimini olumsuz etkilediğini göstermektedir. Bu sonuç, patatesin serin iklim bitkisi olması nedeniyle yüksek sıcaklık altında fizyolojik stres yaşamasını yansıtmaktadır (Momčilović, 2019). Yüksek sıcaklıklar, proteinlerin parçalanma hızını artırarak ve fotosentetik verimliliği azaltarak, büyümenin kritik evrelerini sekteye uğratabilir; bu da genel verim üzerinde azaltıcı bir etki yaratır. Daha da belirgin olan gecikmeli sıcaklık etkisi (katsayı: -487.973, %1 düzeyinde anlamlı), yüksek sıcaklığa uzun süre maruz kalmanın stresi artırdığını ve ciddi verim kayıplarına yol açtığını göstermektedir. Bu durum muhtemelen hücrel bütünlüğün bozulması, yumru kalitesinin düşmesi ve yumrulara depolanan karbonhidratların hızla tükenmesi gibi kümülatif zararların bir sonucudur (Busse vd., 2019). Kısa vadeli sıcaklık tepkisi, patatesin optimum büyüme için istikrarlı ve ılıman sıcaklıklara ihtiyaç duyduğunu ve uzun süreli ısı artışlarının verim için ciddi bir çevresel tehdit oluşturduğunu vurgulamaktadır.

Yağışın etkisi, patates yetiştiriciliği için su dengesinin önemini vurgulamaktadır. Cari döneme ait yağış değişkeninin katsayısı (-75.488) istatistiksel olarak anlamlı değildir; bu da kısa vadeli yağış dalgalanmalarının patates verimi üzerinde belirgin bir etkisinin olmadığını göstermektedir. Bu durum, patatesin kısa vadeli su değişkenliğine tolerans gösterebildiğini, özellikle nem ihtiyacının tamamlayıcı sulama yoluyla karşılandığı ya da yağış seviyelerinin yönetilebilir sınırlar içinde kaldığı durumlarda geçerli olabilir (Zhao vd., 2024). Ancak gecikmeli yağış değişkeninin anlamlı şekilde negatif katsayısı (-485.47), önceki dönemdeki aşırı yağışın mevcut dönem patates verimi üzerinde önemli ölçüde olumsuz bir etkisi olduğunu göstermektedir. Bu durum büyük olasılıkla aşırı toprak neminin oksijen mevcudiyetini kısıtlaması, kök fonksiyonlarını bozması ve mantar hastalıkları gibi patojenleri teşvik etmesiyle ilgilidir; bu faktörlerin tümü büyümeyi engelleyerek verimi düşürür (Vanongeval & Gobin,

2023; Kim vd., 2024). Patates, bu tür nem dengesizliklerine karşı oldukça hassastır ve uzun süreli yoğun yağış, kök gelişimini engelleyen olumsuz toprak koşullarına yol açarak verimliliği azaltabilir (King vd., 2020; Murillo vd., 2021).

CO₂'nin etkisi, ürünün atmosferik değişimlere verdiği tepkiyi ortaya koymaktadır. Cari döneme ait CO₂ değişkeninin katsayısı -25.165 olup istatistiksel olarak anlamlı değildir. Bu durum, kısa vadeli CO₂ yoğunluğu dalgalanmalarının patates verimi üzerinde belirgin bir etkisi olmadığını göstermektedir. Bu sonuç, patatesin tek bir büyüme döngüsü içerisinde CO₂ değişimlerine hemen tepki vermemesinden kaynaklanıyor olabilir (Lee vd., 2020). Öte yandan, gecikmeli CO₂ değişkenine ait pozitif ve istatistiksel olarak anlamlı katsayı (51.535), önceki dönemdeki CO₂ artışlarının mevcut dönem patates verimine olumlu katkı sağladığını göstermektedir. Bu gecikmeli etki, CO₂'nin gübreleme etkisine atfedilebilir; bu etki, C₃ bitkilerinden biri olan patatesteki fotosentez ve su kullanım etkinliğini artırır. Zamanla yükselen CO₂ konsantrasyonları, biyokütle üretimini artırabilir ve yumru oluşumunu destekleyerek verimde artış sağlayabilir (Donnelly vd., 2001). Ancak bu olumlu etkinin gözlenebilmesi belirli bir süre gerektirir; bu da bitki fizyolojisindeki uyum süreçleriyle ilişkili olabilir.

Etkileşim terimleri, çevresel faktörlerin birlikte nasıl etki gösterdiğine dair bireysel etkilerden farklı sonuçlar ortaya koyan önemli bilgiler sunmaktadır. Sıcaklık ve yağışın kısa dönemli etkileşimi pozitif yönlüdür ancak istatistiksel olarak anlamlı değildir (katsayı: 16.973). Bu durum, bu iki iklim değişkeninin kısa vadede birlikte göstermiş olduğu dalgalanmaların patates verimi üzerinde belirgin bir etkisinin olmadığını göstermektedir. Ancak, gecikmeli $TEMP \times PREC$ etkileşimi pozitif ve yüksek düzeyde anlamlıdır (katsayı: 101.391). Bu bulgu, önceki döneme ait sıcaklık ve yağış koşullarının birlikte ele alındığında mevcut dönemde patates verimini artırıcı bir etkide bulunduğunu göstermektedir. Bu sonuç, geçmişteki dengeli sıcaklık ve yağış koşullarının toprak nemi ve yapısında olumlu etkiler yaratarak, takip eden dönemde patates büyümesi için elverişli ortamların oluşmasına katkı sağladığını işaret etmektedir.

Sıcaklık ve CO₂'nin kısa dönemli etkileşimi (katsayı: 5.647) istatistiksel olarak anlamlı değildir; bu durum, bu iki değişkende meydana gelen ani değişimlerin patates verimi üzerinde ölçülebilir bir etkisinin bulunmadığını göstermektedir. Öte yandan, gecikmeli $TEMP \times CO_2$ etkileşim terimi negatif ve anlamlıdır (katsayı: -8.185); bu da yüksek sıcaklıkların artan CO₂ seviyeleriyle birlikte uzun süreli etkisinin zararlı olduğunu göstermektedir. Bu olumsuz etki, sıcaklıkla birlikte CO₂'ye maruz kalmanın bitki fizyolojisinde stres yaratması, solunum

oranlarını değiştirmesi ve zamanla fizyolojik dengenin bozulmasına yol açmasıyla açıklanabilir (Kiongo vd., 2024).

Yağış ve CO₂'nin kısa dönemli etkileşim terimi istatistiksel olarak marjinal düzeyde anlamlı ve negatiftir (katsayı: -0.573). Bu durum, her iki değişkenin de mevcut seviyelerinin yüksek olduğu dönemlerde verimin hafifçe azaldığını, bunun muhtemelen su stresi ile değişen CO₂ dinamiklerinin birlikte olumsuz bir etki yaratmasından kaynaklandığını göstermektedir. Gecikmeli $PREC \times CO_2$ etkileşim terimi de negatif ve yüksek düzeyde anlamlıdır (katsayı: -1.661); bu da yüksek yağış ve CO₂ seviyelerinin uzun vadede verime zarar verdiğini göstermektedir. Bu olumsuz etki, aşırı nemin neden olduğu olumsuz toprak koşulları ya da artan CO₂ ile birlikte bozulan besin dengesi gibi etkenlerle açıklanabilir.

Uzun dönemde sıcaklık, yağış, CO₂ düzeyleri ve bunların etkileşimleri, patates verimi üzerinde daha keskin etkiler ortaya koymaktadır. Sıcaklık değişkeninin pozitif ancak istatistiksel olarak anlamlı olmayan katsayısı, zamanla meydana gelen ılımlı sıcaklık artışlarının patates verimi üzerinde olumlu bir etki yaratabileceğini işaret etmektedir. Kısa dönemde yüksek sıcaklıklara karşı hassasiyet gösteren patatesin, uzun vadede artan sıcaklıklara karşı uyum geliştirme potansiyeline sahip olabileceği; bu durumun da bölgesel tarım uygulamalarındaki değişiklikler veya adaptasyon stratejileri ile ilişkili olabileceği değerlendirilmektedir. Ancak, bu ilişkinin istatistiksel olarak anlamlı olmaması, söz konusu etkinin ancak uygun çevresel koşullar (rneğin yeterli nem düzeyleri) altında ortaya çıkabileceğini ve genel olarak güvenilir ya da güçlü bir etki olarak değerlendirilemeyeceğini göstermektedir.

Yağış değişkeni için uzun dönemli katsayının pozitif ancak istatistiksel olarak anlamlı olmaması, zaman içinde artan yağış miktarlarının patates verimini destekleyebileceğini işaret etmektedir. Bu etki, özellikle kurak dönemlerde mahsul direncini artıracak istikrarlı su mevcudiyetinden kaynaklanabilir. Bununla birlikte, katsayının anlamlı olmaması, artan yağışın olası olumlu etkilerinin sıcaklık düzeyi ve toprak drenaj kapasitesi gibi diğer çevresel faktörlere bağlı olarak önemli lde değişebileceğini göstermektedir (Petrova vd., 2021).

Uzun dönemli analizde, karbondioksit değişkeninin negatif ve %10 düzeyinde marjinal olarak anlamlı katsayısı, atmosferik CO₂ düzeylerinde süregelen artışların patates verimi üzerinde olumsuz bir etkisi olabileceğini göstermektedir. Her ne kadar CO₂ gübreleme etkisi yoluyla bitki büyümesini başlangıçta destekleyebilse de, bu uzun dönemli olumsuz etki, yüksek CO₂ ortamlarının neden olabileceği ısı stresi ve toprak besin dengesizlikleri gibi dolaylı etkileri yansıtıyor olabilir. Zaman içinde, artan CO₂ seviyeleri birikimli fizyolojik streslere yol açarak

patates gelişimini bozabilir; bu da CO₂'nin başlangıçta sağladığı potansiyel faydaların sürekli maruziyet durumunda azalabileceğini ya da tersine dönebileceğini göstermektedir (Finnan vd., 2005).

Ortak etkileşim terimleri, çevresel koşulların uzun vadede patates verimi üzerindeki bileşik etkilerini, tekil etkilerin açıklamakta yetersiz kaldığı şekillerde ortaya koymaktadır. $TEMP \times PREC$ etkileşim katsayısının negatif ancak istatistiksel olarak anlamsız olması, sıcaklık ve yağışın eşzamanlı artışının zaman içinde patates verimini hafifçe azaltabileceğini işaret etmektedir. Bu durum, yüksek sıcaklık ve nem seviyelerinin bir araya gelerek hastalıkların yayılmasını, nem kaynaklı fizyolojik stresleri ya da aşırı su birikimini tetikleyebileceği koşullarda ortaya çıkabilir. Her ne kadar anlamlı olmasa da, bu bulgu, patatesin dengeli bir çevresel profil gerektirdiği ve sıcaklık ile nem düzeylerinin uzun süreli yüksek seyretmesinin verimi olumsuz etkileyebileceği görüşüyle örtüşmektedir (Campbell vd., 2021).

Pozitif ve marjinal olarak anlamlı $TEMP \times CO_2$ etkileşim katsayısı, artan CO₂ düzeylerinin zaman içinde yüksek sıcaklıkların olumsuz etkilerini bir ölçüde dengeleyebileceğini göstermektedir. Yükselen CO₂ konsantrasyonları, fotosentezi ve su kullanım verimliliğini artırarak patatesin ılımlı sıcaklık artışlarına karşı daha dirençli hale gelmesini sağlayabilir. Bu bulgu, CO₂'nin sıcaklık kaynaklı stres üzerinde sınırlı da olsa hafifletici bir rol oynayabileceğini ima etmektedir; ancak etkileşimin yalnızca marjinal düzeyde anlamlı olması, söz konusu olumlu etkinin belirli çevresel eşiklere bağlı olabileceğini göstermektedir (Yandell vd., 1988).

Yağış ve CO₂ etkileşim katsayısının pozitif ancak istatistiksel olarak anlamlı olmaması, her iki değişkenin birlikte uzun vadede patates verimi üzerinde sınırlı düzeyde olumlu bir etki yaratabileceğini göstermektedir. Bu durum, artan CO₂ düzeylerinin fotosentezi desteklemesi ve yeterli yağışın su stresi riskini azaltarak besin alımını kolaylaştırmasıyla açıklanabilir. Ancak etkinin anlamlı olmaması, söz konusu pozitif etkinin genel geçer olmayabileceğini ve yalnızca belirli çevresel koşullar altında ortaya çıkabileceğini düşündürmektedir.

Özetle, uzun döneme ilişkin bulgular, sıcaklık ve yağış değişkenlerinin patates verimi üzerinde bireysel olarak olumlu etkiler öngördüğünü, ancak bu etkilerin istatistiksel olarak anlamlı olmadığını ortaya koymaktadır. Bu durum, söz konusu çevresel koşulların ancak belirli destekleyici faktörler mevcut olduğunda verimi artırabileceğini göstermektedir. Buna karşılık, CO₂ değişkeni marjinal olarak anlamlı ve negatif bir etki sergilemekte olup, bu durum uzun

vadeli yüksek CO₂ seviyelerinin fizyolojik ya da çevresel stres unsurlarını artırarak verim potansiyelini sınırlayabileceğine işaret etmektedir.

Etkileşim terimleri, uzun dönemde CO₂'nin belirli ölçüde sıcaklık kaynaklı stresi hafifletebileceğini işaret etse de, bu etkinin sınırlı kaldığını göstermektedir. Öte yandan, sıcaklık ve yağışın eşzamanlı artışı verim üzerinde olumsuz etkiler yaratabilir. Genel olarak uzun dönem bulguları, patates üretiminin en verimli olduğu koşulların istikrarlı ve ılıman çevresel ortamlar olduğunu ortaya koymaktadır; aşırı sıcaklık veya nem koşulları, üretim üzerinde baskı oluşturabilir. CO₂ başlangıçta büyümeyi teşvik edebilse de, uzun vadeli etkilerinin sınırlı kalabileceği veya hatta olumsuz olabileceği bulgusu, patates yetiştiriciliğinde iklim değişikliğine karşı dirençli stratejilerin geliştirilmesi gerekliliğini vurgulamaktadır.

Ek olarak, gerçekleştirilen tanı (diagnostic) testlerinin sonuçları modelin istatistiksel olarak sağlam olduğunu göstermektedir. Breusch-Godfrey LM otokorelasyon testi ve Breusch-Pagan değişen varyans (heteroscedasticity) testi, sırasıyla otokorelasyon ve değişen varyans sorunlarının bulunmadığını ortaya koyarak tahminlerin güvenilirliğini desteklemektedir. Jarque-Bera normallik testi, artık terimlerin normal dağıldığını doğrulamakta ve bu da çıkarımların geçerliliğini artırmaktadır. Son olarak, CUSUM ve CUSUM of squares istikrar testleri modelin parametrelerinin zaman içinde tutarlı kaldığını göstermektedir; bu da modelin uzun dönemli geçerliliğine ve yorumlarının güvenilirliğine önemli katkı sunmaktadır.

4.3. Pirinç

Bu bölüm, Türkiye'deki pirinç verimine ilişkin ARDL analizinin ampirik sonuçlarını sunmaktadır. Analiz, iklim değişkenleriyle olan hem kısa dönemli hem de uzun dönemli ilişkileri vurgulamaktadır. Model, AIC kullanılarak belirlenen optimal gecikme uzunluklarına dayanmaktadır ve ilgili katsayı tahminleri ECM aracılığıyla elde edilmiştir. Bulgular Tablo 4.4'te özetlenmiştir.

Tablo 4.4. ARDL Sonuçları (Pirinç)

Model: $F(RICE_t/TEMP_t, PREC_t, CO_2_t, TEMP \times PREC_t, TEMP \times CO_2_t, PREC \times CO_2_t)$			
Optimal Gecikme Uzunluğu: (1, 0, 1, 1, 2, 1, 1)		F-istatistiği: 2.034	
Kritik Değerler			
Anlamlılık Düzeyi	Alt Sınır	Üst Sınır	
%1	3.800	5.643	
%5	2.797	4.211	
%10	2.353	3.599	
Hata Düzeltme Modeli			
Değişken	Katsayı	Standart Hata	t-istatistiği

Tablo 4.4. Tablonun Devamı

C	587.749***	139.314	4.219
$\Delta PREC_t$	-451.039***	86.488	-5.215
$\Delta CO2_t$	138.567***	28.690	4.830
$\Delta TEMP \times PREC_t$	96.149***	18.213	5.279
$\Delta TEMP \times PREC_{t-1}$	0.026**	0.011	2.312
$\Delta TEMP \times CO2_t$	-24.573***	5.239	-4.690
$\Delta PREC \times CO2_t$	-2.060***	0.355	-5.802
ECT_{t-1}	-0.179***	0.042	-4.219
Uzun Dönem Katsayıları			
$TEMP$	-775.623	1338.832	-0.579
$PREC$	-743.793	1078.579	-0.690
$CO2$	99.837	129.650	0.770
$TEMP \times PREC$	166.459	231.318	0.720
$TEMP \times CO2$	-12.665	20.846	-0.608
$PREC \times CO2$	-5.554	5.831	-0.953
Tanısal Testler			
χ^2_{SER}	0.455 (0.641)	R^2	0.961
χ^2_{HET}	0.213 (0.995)	R^2_{Adj}	0.940
χ^2_{NORM}	26.075 (0.000)	F_{ist}	45.778 (0.000)
χ^2_{RAMSEY}	0.077 (0.784)	$Cusum$	Durağan
DW	1.929	$Cusum(sqr)$	Durağan

Not: Parantez içinde verilen değerler olasılık değerleridir. χ^2_{SER} , χ^2_{HET} , χ^2_{NORM} ve χ^2_{RAMSEY} sırasıyla Breusch-Godfrey LM otokorelasyon testi, Breusch-Pagan değişen varyans testi, Jarque-Bera normallik testi ve model belirtim hatası test istatistiklerini ifade etmektedir. Cusum ve Cusum of Squares (kareler toplamı) testleri ise modelin yapısal kararlılığını ölçmektedir. Küçük örneklem hacmi nedeniyle, sınır testi için kritik değerler Narayan (2005)'ten alınmıştır: Durum III – sabit terimli ve trendsiz model. *** $p < 0.01$, ** $0.01 < p < 0.05$, * $0.05 < p < 0.10$.

F-istatistiği tüm anlamlılık düzeylerinde kritik değerlerin altında kaldığı için eşbütünleşme (cointegration) bulunmadığı sonucuna ulaşılmıştır. Bu durum, değişkenlerin (Sıcaklık, Yağış, CO₂ ve etkileşim terimleri) pirinç verimiyle istikrarlı bir uzun dönem ilişkisi içinde olmadığını göstermektedir. Dolayısıyla gözlemlenen ilişkiler geçicidir ve kalıcı, uzun vadeli bir denge durumunu ifade etmez.

Uzun dönemli bir ilişki olmadığından, yorumlamalar yalnızca kısa dönem dinamiklerine odaklanmaktadır. Bu durum, sıcaklık, yağış ya da CO₂ düzeylerindeki değişimlerin pirinç verimi üzerinde geçici etkiler yaratabileceği, ancak bu etkilerin zamanla kalıcı hale gelmeyeceği anlamına gelir. Örneğin, yağış için negatif ve anlamlı katsayının bulunması, kısa dönemde yağış artışlarının pirinç verimini olumsuz etkilediğini göstermektedir. Bu sonuç, aşırı yağışın neden olduğu su baskınlarının, kökler için gerekli olan toprak havalanmasını ve oksijen mevcudiyetini azaltmasıyla açıklanabilir (Colmer, 2002). Pirinç genellikle sulu koşullarda yetiştirilse de, aşırı veya kontrolsüz yağışlar bitkinin ideal büyüme ortamını bozabilir; bu durum, fazla nemin dikkatle yönetilmesi gerektiğini göstermektedir (Smith & Mohanty, 2018).

Öte yandan, CO₂ için pozitif ve anlamlı katsayı, CO₂ seviyelerindeki artışların kısa vadede pirinç verimini olumlu etkilediğini göstermektedir. Bu etki, yükselen CO₂ seviyelerinin fotosentezi ve büyümeyi artırdığı 'CO₂ gübreleme etkisini' yansıtmakta olup, özellikle C₃ bitkilerinden biri olan pirinçte uygun koşullar altında kısa dönemli verim artışına yol açabilmektedir (Lv et al., 2020).

Sıcaklık, yağış ve CO₂ arasındaki etkileşim terimleri, bu faktörlerin pirinç verimini bireysel etkilerinin ötesinde nasıl etkilediğine dair önemli içgörüler sunmaktadır. Cari $TEMP \times PREC$ etkileşim katsayısı pozitif ve yüksek derecede anlamlıdır (96.149) ve bu da sıcaklık ile yağışın birleşik etkisinin kısa dönemde pirinç verimini desteklediğini göstermektedir. Bu durum, uygun sıcaklık koşullarının artan nemi tolere edebilme kapasitesini artırarak, pirincin su ve ısı gereksinimlerinin dengelenmesi yoluyla büyümeye katkı sağladığını işaret edebilir. Gecikmeli $TEMP \times PREC$ etkileşim katsayısı da pozitif ve anlamlıdır (0.026) ve bu da geçmişteki uygun sıcaklık ve yağış koşullarının güncel pirinç verimine olumlu yansımalarının sürdüğünü göstermektedir. Bu gecikmeli pozitif etki, daha önceki dönemdeki sıcaklık ve yağış dengesi sayesinde toprak neminin korunması ve bitki sağlığının desteklenmesi yoluyla verimi artırıcı bir ortam yaratıldığını düşündürmektedir (Agrawal vd., 1983).

$TEMP \times CO_2$ etkileşim teriminin negatif ve anlamlı katsayısı, sıcaklık ve CO₂ düzeylerindeki ani artışların kısa vadede pirinç verimini olumsuz etkilediğini göstermektedir. Bu sonuç, CO₂ tek başına büyümeyi teşvik edebilecek olsa da, yüksek sıcaklıklarla birlikte ortaya çıktığında bitkide stres yaratabileceğini ima etmektedir. Bu stres, artan solunum oranları veya diğer fizyolojik değişiklikler nedeniyle, yüksek sıcaklık koşullarında CO₂'nin olumlu etkisini dengeleyebilir ya da ortadan kaldıracaktır (Roy vd., 2024). $PREC \times CO_2$ etkileşimi için bulunan negatif ve anlamlı katsayı ise, yüksek yağış ve yüksek CO₂ seviyelerinin birlikte kısa dönemde pirinç verimini olumsuz etkilediğini ortaya koymaktadır. Bu sonuç, aşırı suyla birlikte yükselen CO₂'nin birleşik stres etkisi yaratabileceğini ve bu durumun, sulu ortamda bitkinin besin ve gaz dengelerini bozarak büyümeyi engelleyebileceğini göstermektedir (Greenway vd., 2006).

Bu çevresel faktörlerin pirinç verimi üzerinde uzun vadeli bir etkisi olmadığından, kısa vadeli değişimlere (örneğin mevsimsel hava koşulları ve CO₂ dalgalanmaları) yanıt veren uyarlanabilir tarım uygulamaları pirinç üretimi açısından daha etkili olabilir. Bu uygulamalar arasında, yağışlı sezonlarda su baskınını önlemek için sulamanın ayarlanması ya da sıcaklık dalgalanmalarına daha uygun, iklime uyumlu pirinç çeşitlerinin kullanılması yer alabilir.

Özetle, eşbütünleşme ilişkisinin bulunmaması durumunda analiz yalnızca kısa vadeli etkiler üzerine odaklanmaktadır. *TEMP*, *PREC* ve *CO2* gibi çevresel faktörler pirinç verimini geçici olarak etkilemekte, ancak bu etkiler istikrarlı ve uzun dönemli bir ilişki oluşturmamaktadır. Bu durum, söz konusu faktörlerin yönetiminin kısa dönemde verimi optimize etmeye yardımcı olabileceğini, ancak ek müdahaleler veya uyum stratejileri olmadan kalıcı verim artışları sağlamalarının muhtemel olmadığını göstermektedir.

Ancak, eşbütünleşme bulunmadığı için modelin, daha önce verilen ECM yerine birinci farklar şeklinde yeniden tanımlanması gerekmektedir. ECM, değişkenler arasında istikrarlı bir uzun dönem ilişkisi olduğunu varsayar; bu da hem kısa dönem dinamiklerini hem de uzun dönem dengeye yönelik ayarlamaları modelleyebilmek için eşbütünleşmeye dayanır. Eşbütünleşme olmadığında bu varsayım geçerliliğini yitirir ve aşağıdaki sorunlar ortaya çıkar:

- ECM’de hata düzeltme terimi, dengenin yeniden sağlanma hızını yakalamak için kritik öneme sahiptir. Eşbütünleşme yoksa anlamlı bir uzun dönem dengesi de yoktur; dolayısıyla bu terim istatistiksel olarak geçersiz hale gelir ve yorumlanması uygun değildir.
- ECM’deki uzun dönem katsayıları, değişkenler arasındaki istikrarlı denge ilişkilerini açıklar. Eşbütünleşme olmadan bu katsayıları yorumlamak yanıltıcı olur; zira bunlar, uzun dönemli bir ilişki bulunmadığında istikrarlı uzun dönem etkilerini yansıtmaz.
- Modelin birinci farklara göre yeniden tanımlanması, yalnızca kısa vadeli etkiler üzerine odaklanılmasına olanak tanır ve bağımsız değişkenlerdeki değişimlerin pirinç verimi artışı üzerindeki anlık etkilerini doğru biçimde yansıtır. Bu yaklaşım, var olmayan uzun dönem denge ilişkilerini varsaymaktan kaçınarak yalnızca gerçekçi kısa dönem davranışlarının modellenmesini sağlar.
- Birinci fark modelinin kullanılması, verinin istatistiksel özellikleriyle de uyumludur; bu sayede kısa vadeli ilişkilerin tahmininde tutarlılık ve sağlamlık (robustness) elde edilir. Bu yeniden düzenleme, çevresel faktörlerdeki anlık değişimlerin pirinç verimi üzerindeki etkilerinin net ve geçerli biçimde analiz edilmesini mümkün kılar ve uzun dönem istikrarı yanlış yorumlama riskini ortadan kaldırır.

Yeniden düzenlenen modelde, yalnızca farklanmış terimlerin kullanıldığı bir ARDL yapısı uygulanmış ve bu sayede yalnızca kısa dönem dinamiklerine odaklanılmıştır. Bu modelleme yaklaşımı, CO₂ seviyeleri, yağış, sıcaklık ve bunların etkileşimindeki değişimlerin pirinç verimi artışı üzerindeki anlık etkilerine dair önemli içgörüler sunmaktadır. Yalnızca kısa dönem katsayılarının analiz edilmesiyle, ilk analizde var olmadığı belirlenen

uzun dönem ilişkisine dayanmaktan kaçınılmıştır. Elde edilen sonuçlar Tablo 4.5'te özetlenmiştir.

Tablo 4.5. Kısa Dönem Sonuçları (Pirinç)

Model: $F(RICE_t/TEMP_t, PREC_t, CO2_t, TEMP \times PREC_t, TEMP \times CO2_t, PREC \times CO2_t)$			
Optimal Gecikme Uzunluğu: (1, 1, 0, 0, 0, 0)			
Kısa Dönem Katsayıları (Koşullu ECM)			
<i>Değişken</i>	<i>Katsayı</i>	<i>Standart Hata</i>	<i>t-istatistiği</i>
<i>C</i>	0.020	0.015	1.399
$\Delta RICE_{t-1}$	-0.984***	0.169	-5.812
$\Delta TEMP_{t-1}$	-257.086*	143.771	-1.788
$\Delta PREC_t$	-396.832***	122.237	-3.246
$\Delta CO2_t$	82.619**	32.443	2.547
$\Delta TEMP \times PREC_t$	83.864***	25.601	3.276
$\Delta TEMP \times CO2_t$	-14.217**	6.074	-2.341
$\Delta PREC \times CO2_t$	-1.618***	0.455	-3.558
$\Delta(\Delta TEMP_t)$	-262.259*	144.164	-1.819

Not: *** $p < 0.01$, ** $0.01 < p < 0.05$, * $0.05 < p < 0.10$.

Pirinç verimine ilişkin kısa dönem sonuçları, çevresel değişkenlerin (sıcaklık, yağış, CO₂) ve bunların etkileşimlerinin pirinç üretimi üzerindeki ani etkilerini ortaya koymakta; eşbütünleşme ilişkisinin bulunmaması nedeniyle yalnızca geçici ve kalıcı olmayan etkilere odaklanılmaktadır.

Gecikmeli pirinç verimine ait -0.984 değerindeki katsayının %1 düzeyinde anlamlı ve negatif olması, pirinç üretiminde negatif otokorelasyon olduğunu göstermektedir. Bu durum, önceki dönemdeki yüksek verimin mevcut dönemde daha düşük verimle ilişkili olduğunu ifade eder. Bu da, yüksek verimli bir sezonun ardından besin maddesi tükenmesi veya verim potansiyelini azaltan diğer faktörler nedeniyle üretimde döngüsel etkilerin ortaya çıktığına işaret edebilir.

TEMP değişkenine ait katsayının negatif ve anlamlı olması (-257.086; %10 düzeyinde anlamlı), kısa dönemde sıcaklık artışlarının pirinç verimini azalttığını göstermektedir. Bu durum, pirincin yüksek sıcaklıklara duyarlı olduğunu ve muhtemelen çiçeklenme ve dane doldurma gibi büyüme evrelerinin ısı stresi nedeniyle olumsuz etkilendiğini düşündürmektedir (Nath vd., 2022).

PREC değişkeni pirinç verimini anlamlı ve negatif yönde etkilemektedir; katsayısı -396.832 olup %1 düzeyinde anlamlıdır. Bu durum, aşırı yağışların pirinç üretimini olumsuz etkilediğini göstermektedir. Muhtemel nedenlerden biri, köklerin zarar görmesine ve besin alımının azalmasına yol açan su baskınlarıdır. Pirinç üretimi kontrollü su seviyelerine ihtiyaç

duyar; bu nedenle, aşırı yağış optimal büyüme koşullarını bozabilir (Talpur vd., 2013; Dos Santos vd., 2018).

CO₂'nin pirinç verimi üzerinde anlamlı ve pozitif bir etkisi vardır; katsayılar sırasıyla 82.619 (%5 düzeyinde anlamlı) ve 83.864 (%1 düzeyinde anlamlı) olarak bulunmuştur. Bu durum, atmosferdeki CO₂ seviyelerinin artmasının pirinç verimini artırdığını göstermektedir. Bu artış muhtemelen fotosentezi ve su kullanım verimliliğini artıran CO₂ gübreleme etkisinden kaynaklanmaktadır (Lv vd., 2020).

Etkileşim terimleri karmaşık etkiler göstermektedir. $TEMP \times PREC$ etkileşimi, -14.217 değerinde ve %5 düzeyinde anlamlı negatif bir katsayıya sahiptir; bu da yüksek sıcaklık ile aşırı yağışın birlikte görülmesinin verimi daha da düşürebileceğini göstermektedir. Bu etkileşim, ısı ve su baskınlığı gibi stres faktörlerinin birlikte pirinç bitkisi üzerinde birleşik bir olumsuz etki oluşturduğunu yansıtmaktadır. Diğer etkileşimler ise CO₂ varlığının sıcaklığın bazı olumsuz etkilerini hafifletebileceğini göstermektedir; ancak toplam etki, bu çevresel koşulların dengesine bağlı olarak değişmektedir (Baker vd., 1995).

$TEMP \times CO_2$ etkileşimi için elde edilen anlamlı ve negatif katsayı, sıcaklık ve CO₂ düzeylerinin eşzamanlı artışının pirinç verimini olumsuz etkilediğini göstermektedir. Bu durum, CO₂'nin tek başına büyümeyi destekleyici etkilerinin yüksek sıcaklık altında zayıfladığını veya tersine döndüğünü düşündürmektedir. Bunun nedeni, artan solunum hızları veya CO₂'nin olumlu etkilerini dengeleyen diğer fizyolojik stresler olabilir (Roy vd., 2024). $PREC \times CO_2$ etkileşimi için anlamlı negatif katsayı ise, yağış ve CO₂ düzeylerinin birlikte artmasının kısa vadede pirinç verimini düşürdüğünü ifade etmektedir. Bu olumsuz etki, fazla suyun yarattığı stresle birlikte, yükselen CO₂ seviyelerinde bozulan gaz alışverişi ya da besin alımı gibi etkenlerin bitki gelişimini sekteye uğratmasıyla açıklanabilir.

Özetle, pirinç üretiminde kısa dönemli dinamikler büyük ölçüde sıcaklık ve yağışa olan hassasiyet tarafından yönlendirilmektedir; yüksek sıcaklıklar ve aşırı yağışlar verim üzerinde olumsuz etki yaratmaktadır. Pirinç, özellikle su yönetimi zorluklarından etkilenmekte olup, ılıman sıcaklık koşullarından fayda görmektedir. CO₂'nin olumlu etkileri, fotosentezi artırarak verimi yükseltebileceğini göstermektedir. Ancak bu olumlu etki, şiddetli sıcaklık artışları veya aşırı yağışın yol açtığı olumsuzlukları dengelemeye yeterli değildir. Etkileşim terimleri, dengeli sıcaklık ve nem koşullarının pirinç verimini artırabileceğini; ancak CO₂ ile birlikte meydana gelen aşırı veya eşzamanlı artışların strese yol açarak verim potansiyelini zayıflatabileceğini ortaya koymaktadır.

Türkiye'de gözlemlenen CO₂ gübreleme etkileri, güney Avrupa ve Kuzey Afrika'daki yarı kurak bölgelerde yapılan çalışmalarla tutarlıdır; bu bölgelerde de artan CO₂ seviyeleri özellikle buğday ve patates gibi ürünlerin verimini artırmaktadır. Long vd. (2006) ve Ainsworth ve Rogers (2007) gibi çalışmalar, CO₂ zenginleşmesinin özellikle C₃ bitkilerinde fotosentezi ve su kullanım etkinliğini artırdığını ortaya koymuştur. Ancak bu faydalar genellikle yeterli su ve besin maddesi varlığına bağlıdır; bu da Türkiye'de yağış ile CO₂ etkileri arasındaki etkileşimi gösteren bulgularla örtüşmektedir.

Türkiye'de özellikle buğday ve pirinç için gözlemlenen doğrusal olmayan sıcaklık etkileri, Avustralya (Asseng vd., 2011) ve Amerika Birleşik Devletleri'nin güney bölgelerindeki (Lobell vd., 2012) bulgularla örtüşmektedir. Bu bölgelerde de verimin, ısı stresi nedeniyle belirli kritik sıcaklık eşiklerinin aşılmasıyla birlikte önemli ölçüde düştüğü rapor edilmiştir. Bu durum, uyum sağlayıcı tarımsal uygulamalara rehberlik edebilmek için ürüne özgü sıcaklık eşiklerinin belirlenmesinin önemini vurgulamaktadır.

Türkiye'de pirinç verimlerinin yağış değişkenliğine olan duyarlılığı, muson yağışları ve sulama olanaklarının suya bağımlı tarım sistemlerini büyük ölçüde etkilediği Güneydoğu Asya'daki çalışmalarla benzerlik göstermektedir. Wassmann vd. (2009) ve Peng vd. (2004) tarafından yapılan araştırmalar da benzer dinamiklere dikkat çekmektedir; bu çalışmalarda yağış değişkenliğinin özellikle pirinç için verim istikrarını belirleyen kritik bir unsur olduğu vurgulanmaktadır.

Bu bölgelerden elde edilen bulgular, Türkiye'nin tarımsal uyum önlemlerine yön verebilecek hassas sulama, ürün çeşitlendirmesi ve ısı ile kuraklığa dayanıklı genetik iyileştirmeler gibi stratejilere işaret etmektedir. Örneğin, Howell (2001) ve Hatfield vd. (2011) tarafından tartışılan stratejiler, iklim etkileriyle mücadelede entegre su yönetimi ve dayanıklı ürün çeşitlerinin önemini vurgulamaktadır.

Bu karşılaştırmalı analiz, elde edilen bulguları küresel bir çerçeveye oturtarak iklim değişikliğinin tarım üzerindeki etkilerinin hem evrensel hem de bağlama özgü doğasını ortaya koymaktadır. Bu çalışmaları tartışmaya dahil etmek, analize derinlik kazandırmakta ve elde edilen sonuçların dünya genelinde benzer iklim koşullarına sahip bölgelerde de geçerli olabileceğini vurgulamaktadır.

4.4. Muz

Bu bölümde, Türkiye'de muz verimi üzerine yapılan ARDL analizinin ampirik sonuçları sunulmakta ve iklim değişkenleriyle olan uzun dönemli ve kısa dönemli ilişkiler

vurgulanmaktadır. Analiz, model için AIC kriterine göre belirlenen optimal gecikme uzunluğuna ve ECM sonuçlarına dayanmaktadır. Bulgular Tablo 4.6’da gösterilmiştir.

Tablo 4.6. ARDL Sonuçları (Muz)

Model: $F(\text{BANANA}_t / \text{TEMP}_t, \text{PREC}_t, \text{CO2}_t, \text{TEMP} \times \text{PREC}_t, \text{TEMP} \times \text{CO2}_t, \text{PREC} \times \text{CO2}_t)$			
Optimal Gecikme Uzunluğu: (2, 2, 1, 2, 2, 2, 2)		F-istatistiği: 3.265	
		Kritik Değerler	
	Anlamlılık Düzeyi	Alt Sınır	Üst Sınır
	% 1	3.800	5.643
	% 5	2.797	4.211
	% 10	2.353	3.599
Hata Düzeltme Modeli			
Değişken	Katsayı	Standart Hata	t-istatistiği
C	4072.299***	773.590	5.264
$\Delta \text{BANANA}_{t-1}$	-0.268**	0.126	-2.134
ΔTEMP_t	169.492	277.240	0.611
ΔTEMP_{t-1}	1360.007***	321.561	4.229
ΔPREC_t	-658.205**	245.937	-2.676
ΔPREC_{t-1}	705.687***	247.369	2.853
ΔCO2_t	289.132***	68.416	4.226
ΔCO2_{t-1}	102.134*	52.649	1.940
$\Delta \text{TEMP} \times \text{PREC}_t$	138.757**	51.834	2.677
$\Delta \text{TEMP} \times \text{PREC}_{t-1}$	-145.477**	51.628	-2.818
$\Delta \text{TEMP} \times \text{CO2}_t$	-53.542***	12.721	-4.209
$\Delta \text{TEMP} \times \text{CO2}_{t-1}$	-22.187**	10.011	-2.216
$\Delta \text{PREC} \times \text{CO2}_t$	-2.583**	1.006	-2.569
$\Delta \text{PREC} \times \text{CO2}_{t-1}$	1.903**	0.875	2.176
ECT_{t-1}	-0.340***	0.065	-5.264
Uzun Dönem Katsayılar			
TEMP	-2549.841	3234.509	-0.788
PREC	-2344.749	2522.150	-0.930
CO2	177.313	151.107	1.173
TEMP \times PREC	492.713	532.485	0.925
TEMP \times CO2	-23.964	23.510	-1.019
PREC \times CO2	-8.851	10.570	-0.837
Tanısal Testler			
χ^2_{SER}	4.974 (0.022)	R^2	0.963
χ^2_{HET}	6.510 (0.000)	R^2_{Adj}	0.919
χ^2_{NORM}	2.140 (0.343)	F_{ist}	22.111 (0.000)
χ^2_{RAMSEY}	1.557 (0.230)	Cusum	Durağan
DW	2.102	Cusum(sqr)	Durağan

Not: Parantez içinde verilen değerler olasılık değerleridir. χ^2_{SER} , χ^2_{HET} , χ^2_{NORM} ve χ^2_{RAMSEY} sırasıyla Breusch-Godfrey LM otokorelasyon testi, Breusch-Pagan değişen varyans testi, Jarque-Bera normallik testi ve model belirtim hatası test istatistiklerini ifade etmektedir. Cusum ve Cusum of Squares (kareler toplamı) testleri ise modelin yapısal kararlılığını ölçmektedir. Küçük örneklem hacmi nedeniyle, sınır testi için kritik değerler Narayan (2005)’ten alınmıştır: Durum III – sabit terimli ve trendsiz model. *** $p < 0.01$, ** $0.01 < p < 0.05$, * $0.05 < p < 0.10$.

Muz için ARDL sonuçları, F-istatistiğinin (3.265) %1 anlamlılık düzeyindeki üst sınır kritik değerlerini aşmaması nedeniyle eşbütünleşme olmadığını göstermektedir. Bu durum, muz verimi ile çevresel faktörler arasında istikrarlı bir uzun dönem ilişkisi bulunmadığını ifade eder. Dolayısıyla analiz, kısa dönemli etkilere odaklanmaktadır. Sonuçlar Tablo 4.7’de özetlenmiştir.

Tablo 4.7. Kısa Dönem Sonuçları (Muz)

Model: F(BANANA _t / TEMP _t , PREC _t , CO2 _t , TEMP × PREC _t , TEMP × CO2 _t , PREC × CO2 _t)			
Optimal Gecikme Uzunluğu: (1, 2, 2, 2, 1, 2, 0)			
Kısa Dönem Sonuçları (Koşullu ECM)			
Değişken	Katsayı	Standart Hata	t-istatistiği
C	0.053	0.051	1.054
ΔBANANA _{t-1}	-1.207***	0.172	-7.005
ΔTEMP _{t-1}	-292.273	590.907	-0.495
ΔPREC _{t-1}	-422.893	282.954	-1.495
ΔCO2 _{t-1}	91.095	132.734	0.686
ΔTEMP × PREC _{t-1}	94.657	59.548	1.590
ΔTEMP × CO2 _{t-1}	-14.141	26.065	-0.543
ΔPREC × CO2 _t	-3.139**	1.243	-2.526
Δ(ΔTEMP _t)	-1.932	304.205	-0.006
Δ(ΔTEMP _{t-1})	656.433**	275.376	2.384
Δ(ΔPREC _t)	-640.832***	297.685	-2.153
Δ(ΔPREC _{t-1})	0.256	0.156	1.646
Δ(ΔCO2 _t)	248.181***	83.320	2.979
Δ(ΔCO2 _{t-1})	175.705**	72.920	2.410
Δ(ΔTEMP × PREC _t)	137.473**	62.839	2.188
Δ(ΔTEMP × CO2 _t)	-44.778***	15.291	-2.928
Δ(ΔTEMP × CO2 _{t-1})	-34.278**	14.313	-2.395

Not: *** p<0.01, ** 0.01< p<0.05, * 0.05< p<0.10.

Gecikmeli muz verimi katsayısı anlamlı ve negatiftir (-1.207, %1 anlamlılık düzeyinde anlamlıdır). Bu durum, muz üretiminde güçlü bir negatif otokorelasyon olduğunu göstermektedir; yani bir dönemde elde edilen yüksek verimler, bir sonraki dönemde daha düşük verimlerle sonuçlanma eğilimindedir. Bu durum, toprak besin maddelerinin tükenmesi, zararlı döngüleri veya yüksek verim dönemlerinin ardından bitkide oluşan stres gibi döngüsel üretim etkilerini yansıtır olabilir.

Gecikmeli sıcaklık değişkenine ait katsayı (-292.273) negatiftir ancak istatistiksel olarak anlamlı değildir; bu da geçmiş dönem sıcaklık dalgalanmalarının kısa dönemde muz verimi üzerinde kayda değer bir etkisinin olmadığını göstermektedir. Cari dönemdeki sıcaklık değişimi için katsayı çok küçük ve anlamsızdır (-1.932); bu da tek bir dönemdeki ani sıcaklık değişimlerinin verimi etkilemediğini göstermektedir. Öte yandan, gecikmeli sıcaklık değişiminin katsayısı pozitif ve anlamlıdır (656.433); bu da önceki dönemlerdeki sıcaklık

artışlarının kısa vadede muz verimini olumlu yönde etkileyebileceğini göstermektedir. Bu durum, ani değişimlerden ziyade kademeli ısınmanın, olgunlaşma için gerekli ısıyı sağlayarak strese yol açmadan büyümeyi desteklediğine işaret edebilir.

Gecikmeli yağış değişkeninin katsayısı negatiftir ancak istatistiksel olarak anlamlı değildir (-422.893); bu da geçmiş yağışların kısa vadede muz verimi üzerinde kayda değer bir etkisinin olmadığını göstermektedir. Cari dönemdeki yağış değişiminin katsayısı ise negatif ve anlamlıdır (-640.832); bu da ani yağış artışlarının muz verimini olumsuz etkilediğini göstermektedir. Bu durum, aşırı nemin köklerin oksijen alımını ve besin emilimini engellemesi gibi su stresi veya toprak doygunluğu etkilerinden kaynaklanabilir (Sabiiti vd., 2016).

Gecikmeli CO₂ değişkeninin katsayısı pozitif ancak anlamlı değildir (91.095); bu da geçmiş CO₂ seviyelerinin muz verimi üzerinde kayda değer bir kısa vadeli etkisinin olmadığını göstermektedir. Cari dönemdeki CO₂ değişiminin katsayısı pozitif ve anlamlıdır (248.181); bu da mevcut dönemdeki CO₂ artışının muz verimini artırdığını göstermektedir. Bu durum, fotosentez ve büyümeyi artıran CO₂ gübreleme etkisinden kaynaklanıyor olabilir. Gecikmeli CO₂ değişiminin katsayısı da pozitif ve anlamlıdır (175.705); bu da önceki dönemlerdeki CO₂ artışlarının muz verimine olumlu katkısının sürdüğünü, muhtemelen gelişmiş fotosentez ve büyüme verimliliğinin gecikmeli etkilerini yansıttığını göstermektedir.

$\Delta(\Delta TEMP \times PREC)$ değişkeni için elde edilen pozitif ve anlamlı katsayı, sıcaklık ve yağışın elverişli kombinasyonlarının kısa dönemde muz verimini desteklediğini göstermektedir. Bu durum, ılımlı bir ısınmanın yeterli nemle birleşerek ideal büyüme koşulları oluşturduğunu ve muzun gelişimini ve olgunlaşmasını teşvik ettiğini gösterebilir (Lobo ve Rojas, 2020). Anlık $TEMP \times CO_2$ etkileşimi için katsayının negatif ve anlamlı (-44.778) olması, sıcaklık ve CO₂'nin aynı anda artmasının kısa vadede muz verimini azalttığını göstermektedir. Bu durum, yüksek sıcaklıkların yükselen CO₂ ile birleşmesi sonucunda ortaya çıkan stres etkilerini yansıtabilir; örneğin artan solunum oranları ya da su dengesinin bozulması, CO₂'nin fotosentez üzerindeki olumlu etkilerini gölgede bırakabilir. Gecikmeli $TEMP \times CO_2$ etkileşiminin katsayısı da negatif ve anlamlıdır (-34.278), bu da sıcaklık ve CO₂'nin uzun süre yüksek seviyelerde seyretmesinin verim üzerinde olumsuz etkisini sürdürdüğünü göstermektedir. Bu kalıcı olumsuz etki, bu koşulların birikimli stres yaratarak zamanla optimal büyümeyi engellediğini gösterebilir. $\Delta(PREC \times CO_2)$ değişkeni için anlamlı negatif katsayı, yüksek yağış ve CO₂ seviyelerinin kısa vadede muz verimini azalttığını göstermektedir. Bu sonuç, yüksek CO₂ seviyelerinde aşırı nemin ya da topraktaki besin dengesizliklerinin bir araya

gelmesiyle oluşan birleşik stresin, muz bitkisinin bu koşullar altında gelişmesini engellediğini yansıtabilir.

Eşbütünleşme bulunmadığından kısa vadeli yorumlamada ECT yer almamaktadır. Bu durum, gözlemlenen etkilerin geçici olduğunu ve istikrarlı bir uzun dönem dengesine doğru bir hareketin söz konusu olmadığını göstermektedir.

4.5. Soya Fasulyesi

Bu bölüm, Türkiye’de soya fasulyesi verimine ilişkin ARDL analizinden elde edilen ampirik bulguları sunmakta olup, iklim değişkenleriyle olan uzun ve kısa dönemli ilişkiler üzerinde durulmaktadır. Analiz, model için AIC tarafından belirlenen optimal gecikme uzunluğuna ve ECM sonuçlarına dayanmaktadır. Bulgular Tablo 4.8’de özetlenmiştir.

Tablo 4.8. ARDL Sonuçları (Soya Fasulyesi)

Model: $F(SBEAN_t / TEMP_t, PREC_t, CO2_t, TEMP \times PREC_t, TEMP \times CO2_t, PREC \times CO2_t)$			
Optimal Gecikme Uzunluğu: (1, 0, 2, 2, 2, 2)		F-istatistiği: 1.131	
Kritik Değerler			
Anlamlılık Düzeyi	Alt Sınır	Üst Sınır	
% 1	3.800	5.643	
% 5	2.797	4.211	
% 10	2.353	3.599	
Hata Düzeltme Modeli			
Değişken	Katsayı	Standart Hata	t-istatistiği
C	-1599.646***	498.525	-3.209
$\Delta PREC_t$	-91.729	131.654	-0.697
$\Delta PREC_{t-1}$	339.118***	95.155	3.564
$\Delta CO2_t$	124.033***	39.356	3.152
$\Delta CO2_{t-1}$	-119.917***	35.003	-3.426
$\Delta TEMP \times PREC_t$	19.099	28.031	0.681
$\Delta TEMP \times PREC_{t-1}$	-68.678***	19.597	-3.504
$\Delta TEMP \times CO2_t$	-24.011***	7.165	-3.351
$\Delta TEMP \times CO2_{t-1}$	22.803***	6.560	3.476
$\Delta PREC \times CO2_t$	-0.299	0.618	-0.484
$\Delta PREC \times CO2_{t-1}$	0.582*	0.298	1.952
ECT_{t-1}	-0.221***	0.069	-3.209
Uzun Dönem Katsayıları			
TEMP	1582.820	1977.397	0.800
PREC	840.930	1244.161	0.676
CO2	43.897	109.286	0.402
TEMP \times PREC	-190.755	269.583	-0.708
TEMP \times CO2	-17.188	26.173	-0.657
PREC \times CO2	6.866	7.973	0.861

Tamamlayıcı Testler

Tablo 4.8. Tablonun Devamı

χ^2_{SER}	3.021 (0.074)	R^2	0.968
χ^2_{HET}	0.569 (0.862)	R^2_{Adj}	0.941
χ^2_{NORM}	5.537 (0.063)	F_{ist}	35.747 (0.000)
χ^2_{RAMSEY}	0.018 (0.895)	Cusum	Durağan
DW	2.566	Cusum(sqr)	Durağan değil

Not: Parantez içinde verilen değerler olasılık değerleridir. χ^2_{SER} , χ^2_{HET} , χ^2_{NORM} ve χ^2_{RAMSEY} sırasıyla Breusch-Godfrey LM otokorelasyon testi, Breusch-Pagan değişen varyans testi, Jarque-Bera normallik testi ve model belirtim hatası test istatistiklerini ifade etmektedir. Cusum ve Cusum of Squares (kareler toplamı) testleri ise modelin yapısal kararlılığını ölçmektedir. Küçük örneklem hacmi nedeniyle, sınır testi için kritik değerler Narayan (2005)'ten alınmıştır: Durum III – sabit terimli ve trendsiz model. *** $p < 0.01$, ** $0.01 < p < 0.05$, * $0.05 < p < 0.10$.

Soya fasulyesi verimi için ARDL sonuçları, F-istatistiğinin (1.131) üst sınır kritik değerlerini aşmaması nedeniyle eşbütünleşme olmadığını göstermektedir. Bu eşbütünleşme eksikliği, soya fasulyesi verimi ile çevresel değişkenler (sıcaklık, yağış, CO₂ ve etkileşimler) arasında istikrarlı bir uzun dönem denge ilişkisi bulunmadığını ifade eder.

Eşbütünleşme olmadığından yalnızca kısa dönemli yorumlar geçerlidir. Yeniden yapılandırılmış modelden elde edilen kısa dönem sonuçları Tablo 4.9'da sunulmaktadır.

Tablo 4.9. Kısa Dönem Sonuçları (Soya Fasülyesi)

Model: $F(SBEAN_t / TEMP_t, PREC_t, CO2_t, TEMP \times PREC_t, TEMP \times CO2_t, PREC \times CO2_t)$			
Optimal Gecikme Uzunluğu: (1, 1, 0, 0, 2, 2, 1)			
Kısa Dönem Sonuçları (Koşullu ECM)			
Değişken	Katsayı	Standart Hata	t-istatistiği
C	0.073***	0.026	2.846
$\Delta SBEAN_{t-1}$	-1.284***	0.160	-8.021
$\Delta TEMP_{t-1}$	72.628	180.842	0.402
$\Delta PREC_t$	-275.825	163.693	-1.685
$\Delta CO2_t$	132.978***	43.526	3.055
$\Delta TEMP \times PREC_{t-1}$	61.397*	34.803	1.764
$\Delta TEMP \times CO2_{t-1}$	-23.841***	7.989	-2.984
$\Delta PREC \times CO2_{t-1}$	-1.960**	0.793	-2.472
$\Delta(\Delta TEMP_t)$	96.739	178.546	0.542
$\Delta(\Delta TEMP \times PREC_t)$	59.276*	34.502	1.718
$\Delta(\Delta TEMP \times PREC_{t-1})$	0.021	0.018	1.162
$\Delta(\Delta TEMP \times CO2_t)$	-24.375***	8.019	-3.040
$\Delta(\Delta TEMP \times CO2_{t-1})$	0.110*	0.061	1.804
$\Delta(\Delta PREC \times CO2_t)$	-1.385**	0.670	-2.068

Not: *** $p < 0.01$, ** $0.01 < p < 0.05$, * $0.05 < p < 0.10$.

Gecikmeli soya fasulyesi verimi katsayısı anlamlı ve negatiftir (-1.284). Bu durum, güçlü bir negatif otokorelasyon olduğunu göstermektedir; başka bir deyişle, bir dönemde elde edilen yüksek verim, bir sonraki dönemde daha düşük verimle ilişkilidir. Bu durum, üretim döngülerine veya yüksek verim sezonlarının ardından ortaya çıkan stres etkilerine işaret

edebilir; söz konusu etkiler kaynak tükenmesi ya da zararlı döngüleri gibi nedenlerle ortaya çıkabilir.

Gecikmeli sıcaklık katsayısı (72.628) pozitif ancak istatistiksel olarak anlamlı değildir; bu da geçmişteki sıcaklık değişimlerinin kısa vadede soya fasulyesi verimi üzerinde anlamlı bir etkisi olmadığını göstermektedir. Anlık sıcaklık değişiminin katsayısı (96.739) da pozitiftir ve anlamlı değildir; bu da bir dönem içindeki ani sıcaklık değişimlerinin verimi güçlü şekilde etkilemediğini göstermektedir. Bu durum, soya fasulyesinin kısa vadeli sıcaklık dalgalanmalarına karşı belirli bir dayanıklılığa sahip olabileceğini düşündürmektedir (Kuzma ve Layzell, 1994).

Yağış için elde edilen negatif katsayı, yağış miktarındaki artışın soya fasulyesi verimini azaltabileceğini göstermektedir; ancak bu etki yalnızca marjinal olarak anlamlıdır. Aşırı yağış, bitkide su stresi veya besin maddelerinin yıkanmasına neden olarak, nem seviyeleri ürünün tolere edebileceği düzeyin üzerine çıktığında büyümeyi olumsuz etkileyebilir. Diğer taraftan, CO₂ için elde edilen anlamlı pozitif katsayı, kısa vadede CO₂ düzeylerindeki artışın soya fasulyesi verimi üzerinde olumlu bir etkisi olduğunu göstermektedir. Bu durum, C₃ bitkileri olan soya fasulyelerinde fotosentezi artıran ve büyüme verimliliğini yükselten CO₂ gübreleme etkisinden kaynaklanıyor olabilir.

Öte yandan, etkileşim terimleri sıcaklık, yağış ve CO₂'nin birlikte soya fasulyesi verimi üzerindeki etkilerini ortaya koymakta; bu birleşik etkilerin, her bir değişkenin tekil etkilerinden farklılaştığını göstermektedir. Gecikmeli $TEMP \times PREC$ etkileşim terimi (61.397) pozitif ve marjinal olarak anlamlıdır; bu da önceki dönemdeki uygun sıcaklık ve yağış kombinasyonunun mevcut dönemdeki soya fasulyesi verimine olumlu katkı sağlayabileceğini göstermektedir. Bu durum, geçmişteki dengeli sıcaklık ve nem koşullarının bitki için elverişli bir büyüme ortamı yaratarak verim potansiyelini artırdığını yansıtıyor olabilir. Anlık $TEMP \times PREC$ etkileşim katsayısı (59.276) da pozitif ve marjinal olarak anlamlı bulunmuştur; bu da ılımlı sıcaklık ve yeterli nemin birlikte sağlanmasının kısa vadede soya büyümesini ve verimini desteklediğine işaret etmektedir.

Gecikmeli $TEMP \times CO_2$ etkileşimi negatif ve yüksek derecede anlamlıdır (-23.841); bu da geçmişteki sıcaklık artışlarının yüksek CO₂ seviyeleriyle birleştiğinde verimi azaltabileceğini göstermektedir. Bu etki, her iki faktörün birlikte artmasıyla ortaya çıkan fizyolojik stresten kaynaklanabilir; zira yüksek sıcaklık ve CO₂ birlikte solunum oranlarını artırabilir veya besin ihtiyacını şiddetlendirebilir ve bu da CO₂'nin gübreleme etkisini geçersiz

kılabilir. Anlık $TEMP \times CO_2$ etkileşimi de negatif ve oldukça anlamlıdır (-24.375); bu da sıcaklık ve CO_2 'deki eş zamanlı artışların kısa vadede zararlı olduğunu pekiştirmektedir. Ancak, gecikmeli olarak gözlemlenen küçük ve pozitif bir etki (0.110, marjinal anlamlı) koşulların normale dönmesi durumunda bazı gecikmeli uyum faydalarının olabileceğini düşündürmektedir.

Anlık $PREC \times CO_2$ etkileşimi için negatif ve anlamlı katsayı, yüksek yağış ve CO_2 seviyelerinin birlikte soya fasulyesi verimini azalttığını göstermektedir. Bu olumsuz etki, yüksek CO_2 koşulları altında ortaya çıkan su stresi veya besin dengesizliklerinden kaynaklanabilir; bu durum soya fasulyesi için optimal büyüme ortamını bozabilir.

Özetle, etkileşim terimleri, sıcaklık ve yağışın dengeli birleşimlerinin verimi artırabileceğini ortaya koyarken, özellikle CO_2 ile birlikte gerçekleşen aşırılıkların bitki üzerinde stres yaratabileceğini ve bu durumun üretkenliği sınırlandırabileceğini vurgulamaktadır.

Burada ECT yer almamaktadır; çünkü değişkenler arasında eşbütünleşme bulunmamaktadır; bu da gözlemlenen kısa vadeli etkilerin geçici olduğunu ve uzun dönemli bir dengeye doğru bir hareketin parçası olmadığını göstermektedir.

SONUÇ

Bu çalışma, iklim değişkenlerinin — sıcaklık, yağış ve CO₂ düzeylerinin — Türkiye’de beş temel ürünün (buğday, patates, pirinç, muz ve soya fasulyesi) verimleri üzerindeki etkilerini kapsamlı biçimde analiz etmektedir. ARDL modeli kullanılarak yapılan analiz, iklim faktörlerine uzun vadeli bağımlılık gösteren ürünlerle yalnızca kısa dönemli tepkiler veren ürünler arasında ayırım yaparak, Türkiye tarımının iklim değişikliğine ürün bazında nasıl uyum sağlayabileceğine ilişkin önemli bulgular sunmaktadır.

Elde edilen ampirik bulgular, buğday ve patatesin iklim değişkenleriyle uzun dönemli bir denge ilişkisi sergilediğini göstermektedir; bu durum, söz konusu ürünlerin kalıcı iklim koşullarına tepki verdiğini işaret etmektedir. Buğday verimi, sıcaklık ve CO₂ düzeylerindeki ılımlı artışlardan fayda sağlamakta; bu artışlar büyüme ve fotosentez verimliliğini artırmaktadır. Ancak aşırı sıcaklık ve yoğun yağış, ısı stresi ve su baskını yoluyla verimi olumsuz yönde etkilemektedir. Uzun dönemde sıcaklığın buğday verimi üzerindeki etkisi pozitif ve katsayısı 2223.352 olup, ılımlı ısının önemli ölçüde fayda sağladığını göstermektedir. Yağışın da uzun dönemli etkisi pozitif; 1829.405’lik katsayı, artan yağışın buğday gelişimini desteklediğini ortaya koymaktadır. Buna karşılık, CO₂’nin etkisi negatiftir (katsayı: -120.904) ve bu durum, artan CO₂ seviyelerinin getirdiği azalan marjinal getiriler ya da stres faktörleriyle açıklanabilir. Etkileşim terimleri incelendiğinde, $TEMP \times PREC$ katsayısı -390.371 olup, aşırı ısı ve yağışın bir arada bulunmasının oluşturabileceği olası zorluklara işaret etmektedir. Diğer yandan, $TEMP \times CO_2$ (13.236) ve $PREC \times CO_2$ (8.469) etkileşimleri, sıcaklık ya da yağış ile CO₂’nin birlikte olumlu etkiler yaratabileceğini göstermektedir. Bu bulgular, buğday veriminin iklimsel etkileri azaltmaya yönelik uygulamalarla optimize edilebileceğini vurgulamaktadır. Bu uygulamalar arasında kuraklığa ve sıcağa dayanıklı çeşitlerin geliştirilmesi, ekim takvimlerinin aşırı sıcak dönemlerden kaçınacak şekilde yeniden düzenlenmesi ve su mevcudiyetini yönetmeye yönelik gelişmiş sulama tekniklerinin kullanılması sayılabilir. Uzun dönemli bağımlılık göz önünde bulundurulduğunda, buğday üreticileri ve politika yapıcılar iklimdeki kademeli değişimleri öngörmeli ve uygulamaları bu doğrultuda uyarlayarak verim istikrarını güvence altına almalıdır.

Benzer şekilde, patates üretimi de sıcaklık, yağış ve CO₂ düzeylerine uzun dönemli bir duyarlılık göstermektedir. Patates verimi, uzun süreli yüksek sıcaklık ve aşırı yağışa maruz kalma durumlarında önemli ölçüde azalma göstermektedir. Uzun vadede sıcaklığın patates verimi üzerindeki etkisi pozitif ve 575.145’lik katsayı, bu ürünün ılımlı sıcaklık koşullarından fayda sağlama kapasitesini yansıtmaktadır. Yağışın etkisi de pozitif; 507.065’lik katsayı,

artan yağışın patates gelişimini desteklediğini göstermektedir. Öte yandan, CO₂ etkisi negatiftir (katsayı: -36.623) ve bu durum, yüksek CO₂ seviyelerinde oluşabilecek stres koşullarını yansıtıyor olabilir. Etkileşim terimleri incelendiğinde, $TEMP \times PREC$ için -106.205'lik negatif katsayı, sıcaklık ve yağışın birlikte artmasının potansiyel zorluklar yaratabileceğine işaret etmektedir. Buna karşılık, $TEMP \times CO_2$ (4.992) ve $PREC \times CO_2$ (1.826) etkileşimleri, sıcaklık ya da yağış ile CO₂'nin birlikte olumlu etkiler oluşturabileceğini göstermektedir. Bu olumsuz yanıt, patatesin sıcaklık ve nem aşırılıklarına karşı duyarlılığını ve bu ürünün istikrarlı ve ılıman yetişme koşullarına olan gereksinimini yansıtmaktadır. CO₂'nin gecikmeli pozitif etkisi, kontrollü koşullar altında potansiyel bir faydaya işaret etse de, bu avantaj aşırı ısı ve su dengesizliklerinin neden olduğu stres tarafından dengelenebilir. Bu nedenle, uyum stratejileri patates için hassas su yönetimi uygulamalarına odaklanmalı; bu kapsamda, su baskını ve toprak bozulmasını önlemeye yönelik kontrollü drenaj sistemleri değerlendirilebilir. Ayrıca, sıcağa dayanıklı patates çeşitlerinin ıslahına yönelik çalışmalar ya da optimal sıcaklık koşullarına sahip bölgelerde üretim yapılması da iklim etkilerini hafifletmede etkili olabilir. Etkin su kullanımını ve sürdürülebilir sulama sistemlerini teşvik eden politikalar, giderek daha değişken hale gelen iklim koşulları karşısında patates üretiminin dayanıklılığını artırabilir.

Buna karşın, pirinç, muz ve soya fasulyesi verimleri ile incelenen iklim değişkenleri arasında uzun dönemli bir ilişki bulunmamaktadır; bu durum, söz konusu ürünlerin sıcaklık, yağış ve CO₂ dalgalanmalarına esas olarak kısa dönemli tepki verdiğini göstermektedir. Dolayısıyla, gözlemlenen ilişkiler geçicidir ve kalıcı, uzun dönemli bir denge durumunu yansıtmaz.

Pirinç için kısa dönemli sonuçlar, gecikmeli pirinç veriminin cari verimi negatif yönde etkilediğini ortaya koymaktadır (katsayı: -0.984). Bu durum, yüksek verimli sezonların ardından besin maddesi tükenmesi veya diğer artık etkilerden kaynaklanan çevrimsel üretim dinamiklerini işaret etmektedir. Sıcaklığın anlamlı ve negatif etkisi (-257.086) ise, çiçeklenme ve dane dolumu gibi hassas büyüme evrelerinde ısı stresinin pirinç verimini düşürdüğünü göstermektedir. Mevcut yağış da verimi negatif yönde etkilemektedir (-396.832); bu etki muhtemelen su baskınları ve besin maddesi dengesizliklerinden kaynaklanmaktadır. Öte yandan, CO₂ artışı pirinç verimini pozitif yönde etkilemektedir (82.619); bu durum, fotosentezin ve su kullanım etkinliğinin artmasından kaynaklanan CO₂ gübreleme etkisine işaret etmektedir. Etkileşim terimlerinden $TEMP \times PREC$ (83.864) kısa dönemde pozitif bir etki yaratırken, $TEMP \times CO_2$ (-14.217) ve $PREC \times CO_2$ (-1.618) etkileşimleri bu değişkenlerin birlikte olumsuz etkiler doğurduğunu göstermektedir. Bu durum, fizyolojik

süreçler veya toprak koşulları üzerindeki birleşik stres etkilerine işaret etmektedir. Pirinç üretiminde mevsimsel hava değişimlerine hızla yanıt verebilen uyarlanabilir yönetim uygulamaları—örneğin zamanında sulama ayarlamaları, ürün rotasyonu ve drenaj kontrolü—hayati öneme sahiptir. Ayrıca, ani sıcaklık ve yağış değişimlerine toleranslı pirinç çeşitlerinin geliştirilmesi ve kullanımı, iklimdeki artan oynaklığa karşı dayanıklılığı artırabilir.

Muz veriminde de eşbütünleşme kanıtı bulunmamakta olup, gözlemlenen etkilerin yalnızca kısa vadeyle sınırlı olduğunu göstermektedir. Sonuçlar, muz üretiminde güçlü bir negatif otokorelasyon olduğunu ortaya koymaktadır; bu durum, muhtemelen besin maddesi tükenmesi ya da stres döngülerini yansıtan anlamlı bir gecikmeli verim katsayısı (-1.207) ile ifade edilmektedir. Yağışlardaki ani artışlar, kök işlevini kısıtlayan toprak doygunluğu etkileri nedeniyle verimi anlamlı şekilde azaltmaktadır (-640.832). Öte yandan, hem mevcut dönemdeki (248.181) hem de gecikmeli (175.705) CO₂ artışları verimi anlamlı şekilde artırmakta olup, bu durum CO₂ gübreleme etkisini yansıtmaktadır. Önemli olarak, etkileşim terimleri, sıcaklık ve yağışın dengeli kombinasyonlarının büyümeyi destekleyebileceğini (pozitif $\Delta(\Delta TEMP \times PREC)$) ortaya koyarken; yüksek sıcaklık ve CO₂ seviyelerinin birlikte olması ($TEMP \times CO_2 = -44.778$ mevcut; -34.278 gecikmeli) verimi azaltmaktadır. Benzer şekilde, yüksek yağış ve CO₂ seviyeleri de anlamlı şekilde negatif bir etkileşim göstermektedir. Bu bulgular, Türkiye'de muz üretiminin kısa vadeli çevresel şoklarla başa çıkabilmek adına gelişmiş drenaj altyapısı ve dikkatli nem yönetimi ile desteklenmesi gerektiğini; ayrıca, iklime uyum sağlayabilen muz çeşitlerinin benimsenmesinin faydalı olabileceğini vurgulamaktadır.

Soya fasulyesi verimi de benzer şekilde yalnızca kısa dönemli bir dinamik sergilemekte olup, iklim değişkenleriyle eşbütünleşme ilişkisi bulunmamaktadır. Anlamlı ve negatif gecikmeli verim katsayısı (-1.284), üretim döngülerine işaret etmektedir. CO₂ düzeyleri hem mevcut dönemde hem de kümülatif olarak verimi anlamlı şekilde artırmakta olup, bu durum C₃ bitkilerinden biri olan soya fasulyesi için CO₂ gübreleme etkisinin önemini desteklemektedir. Buna karşılık, yağışın etkisi marjinal düzeyde negatif olup, bu durum aşırı suya bağlı stres ya da besin maddesi sızması gibi olumsuzluklara işaret edebilir. Etkileşim terimleri ise, sıcaklık ve yağışın dengeli kombinasyonlarının hem mevcut hem de bir önceki dönemde verim artışını desteklediğini göstermektedir. Öte yandan, sıcaklık ve CO₂ seviyelerindeki eşzamanlı artışlar, hem mevcut dönemde (-24.375) hem de gecikmeli olarak (-23.841) anlamlı ve negatif etkiler yaratmakta, bu da birleşik stres faktörlerinin verim üzerinde olumsuz etkiler doğurduğunu göstermektedir. Ayrıca, negatif ve anlamlı $PREC \times CO_2$ etkileşimi, aşırı nem ile yükselen CO₂ seviyelerinin birlikte görüldüğü koşullarda soya fasulyesinin kırılabilirliğini vurgulamaktadır. Bu

bulgular, Türkiye'de soya fasulyesi yetiştiriciliğinin kısa vadeli çevresel dalgalanmalara yanıt verebilecek su yönetimi stratejileri, kısa çevrimli dayanıklı çeşitler ve uyarlanabilir ekim kararları ile desteklenmesi gerektiğini göstermektedir.

Çalışmanın ürün bazlı bulguları, Türkiye tarım sektörü için iklim değişikliğine yönelik uyum stratejilerinin ürün özelinde şekillendirilmesinin önemini vurgulamaktadır. Bu bağlamda, tüm ürünler için tek tip bir uyum yaklaşımı yeterli olmayacaktır; çünkü buğday, patates, pirinç, muz ve soya fasulyesi çevresel değişimlere farklı tepkiler vermektedir. Uzun vadeli iklimsel eğilimlerden etkilenen buğday ve patates için, sürdürülebilir uyum stratejileri kademeli değişimlerin yönetilmesine ve istikrarlı büyümeyi destekleyecek kaynakların teminine odaklanmalıdır. Buna karşılık, pirinç, muz ve soya fasulyesi yetiştiriciliğinde kısa vadeli iklim değişkenliğinin etkilerini azaltmak için esnek ve uyarlanabilir yaklaşımlar benimsenmelidir.

Bu bulgular doğrultusunda daha somut adımlar atılabilmesi için aşağıdaki politika ve uygulama önerileri sunulmaktadır:

1. Buğday için:

- Çiftçilerin olası aşırı sıcak hava dalgaları veya yoğun yağışlar konusunda önceden bilgilendirilmesini sağlayacak gelişmiş erken uyarı sistemleri geliştirilmelidir.
- Türkiye'nin bölgesel iklim değişkenliğine uyumlu, ısı ve kuraklığa dayanıklı buğday çeşitlerinin geliştirilmesine yönelik araştırmalara daha fazla finansman sağlanmalıdır.
- Toprakta su tutma kapasitesini artırmak ve ani yağışlara karşı buğdayın hassasiyetini azaltmak amacıyla anıza ekim gibi toprak işleme yöntemlerinin benimsenmesi teşvik edilmelidir.

2. Patates için:

- Özellikle su birikimi riski yüksek bölgelerde entegre su kaynakları yönetim sistemleri hayata geçirilmelidir.
- İklim değişkenliğine bağlı verim kayıplarını telafi etmek amacıyla çiftçileri destekleyen tarım sigortası programları yaygınlaştırılmalıdır.
- Damla sulama ve nem sensörleri gibi hassas tarım teknolojilerinin geliştirilmesi ve kullanımı desteklenmelidir.

3. Pirinç için:

- Taşkın riski taşıyan alanlarda drenaj altyapısı güçlendirilmeli ve yüzen pirinç çeşitlerinin kullanımı yaygınlaştırılmalıdır.

- Çiftçilere mevsimsel risk değerlendirme becerileri kazandırılarak, ekim zamanlamasının uygun iklim pencerelerine göre yapılması sağlanmalıdır.

- Aşırı su koşullarına karşı toprak yapısını stabilize edecek şekilde dönüşümlü karık ekimi (rotational intercropping) pilot uygulamalarla desteklenmelidir.

4. Muz için:

- Yoğun yağış dönemlerinde toprak doyumunu önlemek adına drenaj ve arazi bazında su kontrol sistemleri modernize edilmelidir.

- Üretim döngüsü kaynaklı stresin azaltılması amacıyla kısa çevrimli muz çeşitleri ile dengeli besin yönetimi uygulamaları teşvik edilmelidir.

- Kısa vadeli sıcaklık ve yağış değişimlerine dair bölgesel hava durumu bilgilendirme sistemleri kurulmalıdır.

5. Soya fasulyesi için:

- Yetiştirme sezonundaki iklim dalgalanmalarına karşı ekim tarihlerinin yayılması (staggered planting) ve kısa süreli çeşitlerin kullanımı teşvik edilmelidir.

- Toprak yapısını korumak ve nem stresini azaltmak amacıyla muhafazalı toprak işleme (conservation tillage) ve malçlama uygulamaları desteklenmelidir.

- CO₂ ve ısı stresine birlikte dayanıklı çeşitlerin geliştirilmesine yönelik, Türkiye'nin iklim bölgelerine özgü ıslah programlarına yatırım yapılmalıdır.

6. Politika Düzeyinde Önlemler:

- Özellikle iklim etkilerine karşı kırılgan olan küçük ölçekli çiftçiler için hassas tarım teknolojilerine yönelik teşvik ve sübvansiyonlar artırılmalıdır.

- Sulama optimizasyonu ve iklime dayanıklı ürün tercihi gibi uyum uygulamalarının benimsenmesine odaklanan çiftçi eğitim programları yaygınlaştırılmalıdır.

- Bu çalışmanın bulgularına dayalı olarak bölge bazlı uyum stratejileri geliştirmek üzere akademik kurumlar ile tarımsal kooperatifler arasında işbirliği desteklenmelidir.

Sonuç olarak, bu çalışma tarımda iklim değişikliğine uyum konusundaki literatüre önemli bir katkı sunmakta; her bir tarım ürününün iklimsel faktörlere verdiği özgül tepkilerin anlaşılmasının, gıda güvenliği ve ekonomik istikrarın sürdürülmesi açısından hayati önem taşıdığını ortaya koymaktadır. İklim koşullarının değişmeye devam ettiği günümüzde, Türkiye'nin tarım sektörü bu bulgulardan büyük ölçüde fayda sağlayabilir; böylece yalnızca bilimsel temele dayalı değil, aynı zamanda pratikte uygulanabilir uyum önlemlerinin

geliştirilmesi mümkün olacaktır. Tarımsal uygulamaların her ürünün özgün ihtiyaçlarına göre uyarlanması yoluyla, Türkiye hem gıda arzını hem de kırsal geçim kaynaklarını koruyarak iklim değişikliğine karşı daha dirençli bir tarımsal gelecek inşa edebilir.

KAYNAKÇA

- Aggarwal, P. K., & Mall, R. K.** (2002). Climate change and rice yields in diverse agro-environments of India. II. Effect of uncertainties in scenarios and crop models on impact assessment. *Climatic Change*, 52(3), 331-343.
- Ainsworth, E. A., & Rogers, A.** (2007). The response of photosynthesis and stomatal conductance to rising [CO₂]: Mechanisms and environmental interactions. *Plant, Cell & Environment*, 30(3), 258-270.
- Alexandrov, V. A., & Hoogenboom, G.** (2000). The impact of climate variability and change on crop yield in Bulgaria. *Agricultural and Forest Meteorology*, 104(4), 315-327.
- Alonso, A., Pérez, P., & Martínez-Carrasco, R.** (2009). Growth in elevated CO₂ enhances temperature response of photosynthesis in wheat. *Physiologia Plantarum*, 135(2), 109-120.
- Asseng, S., Foster, I., & Turner, N. C.** (2011). The impact of temperature variability on wheat yields. *Global Change Biology*, 17(2), 997-1012.
- Asseng, S., Jamieson, P. D., Kimball, B., Pinter, P., Sayre, K., Bowden, J. W., & Howden, S. M.** (2004). Simulated wheat growth affected by rising temperature, increased water deficit and elevated atmospheric CO₂. *Field Crops Research*, 85(2-3), 85-102.
- Attavanich, W., & McCarl, B. A.** (2014). How is CO₂ affecting yields and technological progress? A statistical analysis. *Climatic Change*, 124(4), 747-762.
- Bannayan, M., Sadeghi Lotfabadi, S., Sanjani, S., Mohamadian, A., & Aghaalikhani, M.** (2011). Effects of precipitation and temperature on crop production variability in northeast Iran. *International journal of Biometeorology*, 55(3), 387-401.
- Ben Mariem, S., Soba, D., Zhou, B., Loladze, I., Morales, F., & Aranjuelo, I.** (2021). Climate change, crop yields, and grain quality of C₃ cereals: A meta-analysis of [CO₂], temperature, and drought effects. *Plants*, 10(6), 1052.
- Bernacchi, C. J., Ruiz-Vera, U. M., Siebers, M. H., DeLucia, N. J., & Ort, D. R.** (2023). Short-and long-term warming events on photosynthetic physiology, growth, and yields of field grown crops. *Biochemical Journal*, 480(13), 999-1014.
- Bishop, K. A., Leakey, A. D., & Ainsworth, E. A.** (2014). How seasonal temperature or water inputs affect the relative response of C₃ crops to elevated [CO₂]: a global analysis of open top chamber and free air CO₂ enrichment studies. *Food and Energy Security*, 3(1), 33-45.

- Boretti, A., & Florentine, S.** (2019). Atmospheric CO₂ concentration and other limiting factors in the growth of C₃ and C₄ plants. *Plants*, 8(4), 92.
- Bozoglu, M., Başer, U., Eroglu, N. A., & Topuz, B. K.** (2019). Impacts of climate change on Turkish agriculture. *Journal of International Environmental Application and Science*, 14(3), 97-103.
- Busse, J. S., Wiberley-Bradford, A. E., & Bethke, P. C.** (2019). Transient heat stress during tuber development alters post-harvest carbohydrate composition and decreases processing quality of chipping potatoes. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 99(5), 2579-2588.
- Cabas, J., Weersink, A., & Olale, E.** (2010). Crop yield response to economic, site and climatic variables. *Climatic Change*, 101(3), 599-616.
- Campbell, R., Ducreux, L. J., Mellado-Ortega, E., Hancock, R. D., & Taylor, M. A.** (2021). Toward the design of potato tolerant to abiotic stress. *Solanum Tuberosum: Methods and Protocols*, 387-399.
- Chandio, A. A., Gokmenoglu, K. K., & Ahmad, F.** (2021). Addressing the long-and short-run effects of climate change on major food crops production in Turkey. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(37), 51657-51673.
- Conradie, B., Piesse, J., & Strauss, J.** (2021). Impact of heat and moisture stress on crop productivity: Evidence from the Langgewens Research Farm. *South African Journal of Science*, 117(9-10), 1-7.
- Conroy, J. P., Seneweera, S., Basra, A. S., Rogers, G., & Nissen-Wooller, B.** (1994). Influence of rising atmospheric CO₂ concentrations and temperature on growth, yield and grain quality of cereal crops. *Functional Plant Biology*, 21(6), 741-758.
- DaMatta, F. M., Grandis, A., Arenque, B. C., & Buckeridge, M. S.** (2010). Impacts of climate changes on crop physiology and food quality. *Food Research International*, 43(7), 1814-1823.
- Demirhan, H.** (2020). Impact of increasing temperature anomalies and carbon dioxide emissions on wheat production. *Science of The Total Environment*, 741, 139616.
- Doğan, H. G., & Kan, A.** (2019). The effect of precipitation and temperature on wheat yield in Turkey: a panel FMOLS and panel VECM approach. *Environment, Development and Sustainability*, 21(1), 447-460.

- Donnelly, A., Craigon, J., Black, C. R., Colls, J. J., & Landon, G.** (2001). Elevated CO₂ increases biomass and tuber yield in potato even at high ozone concentrations. *New Phytologist*, *149*(2), 265-274.
- Du, X., Gao, Z., Sun, X., Bian, D., Ren, J., Yan, P., & Cui, Y.** (2022). Increasing temperature during early spring increases winter wheat grain yield by advancing phenology and mitigating leaf senescence. *Science of the Total Environment*, *812*, 152557.
- Dubey, S. K., Tripathi, S. K., & Pranuthi, G.** (2015). Effect of elevated CO₂ on wheat crop: mechanism and impact. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, *45*(21), 2283-2304.
- Fan, X., Zhu, D., Sun, X., Wang, J., Wang, M., Wang, S., & Watson, A. E.** (2022). Impacts of extreme temperature and precipitation on crops during the growing season in South Asia. *Remote Sensing*, *14*(23), 6093.
- Finnan, J. M., Donnelly, A., Jones, M. B., & Burke, J. I.** (2005). The effect of elevated levels of carbon dioxide on potato crops: a review. *Journal of Crop Improvement*, *13*(1-2), 91-111.
- Fuhrer, J.** (2003). Agroecosystem responses to combinations of elevated CO₂, ozone, and global climate change. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, *97*(1-3), 1-20.
- Gifford, R. M.** (1995). Whole plant respiration and photosynthesis of wheat under increased CO₂ concentration and temperature: long-term vs. short-term distinctions for modelling. *Global Change Biology*, *1*(6), 385-396.
- Gonsamo, A., Ciais, P., Miralles, D. G., Sitch, S., Dorigo, W., Lombardozzi, D., ... & Cescatti, A.** (2021). Greening drylands despite warming consistent with carbon dioxide fertilization effect. *Global Change Biology*, *27*(14), 3336-3349.
- Guoju, X., Weixiang, L., Qiang, X., Zhaojun, S., & Jing, W.** (2005). Effects of temperature increase and elevated CO₂ concentration, with supplemental irrigation, on the yield of rain-fed spring wheat in a semiarid region of China. *Agricultural Water Management*, *74*(3), 243-255.
- Hassler, U., and Wolters, J.** (2006). Autoregressive distributed lag models and cointegration. *Allgemeines Statistisches Archiv* 90: 59–74.
- Hatfield, J. L., Boote, K. J., Kimball, B. A., Ziska, L. H., Izaurralde, R. C., Ort, D., ... & Wolfe, D.** (2011). Climate impacts on agriculture: implications for crop production. *Agronomy journal*, *103*(2), 351-370.

- Högy, P., Poll, C., Marhan, S., Kandeler, E., & Fangmeier, A.** (2013). Impacts of temperature increase and change in precipitation pattern on crop yield and yield quality of barley. *Food Chemistry*, *136*(3-4), 1470-1477.
- Howard, J. C., Cakan, E., & Upadhyaya, K.** (2016). *Climate change and its impact on wheat production in Kansas*. Economics & Business Analytics Faculty Publications, University of New Haven.
- Howell, T. A.** (2001). Enhancing water use efficiency in irrigated agriculture. *Agronomy Journal*, *93*(2), 281-289.
- Kang, Y., Khan, S., & Ma, X.** (2009). Climate change impacts on crop yield, crop water productivity and food security—A review. *Progress in Natural Science*, *19*(12), 1665-1674.
- Kaur, G., Singh, G., Motavalli, P. P., Nelson, K. A., Orlowski, J. M., & Golden, B. R.** (2020). Impacts and management strategies for crop production in waterlogged or flooded soils: A review. *Agronomy Journal*, *112*(3), 1475-1501.
- Kaushal, N., Bhandari, K., Siddique, K. H., & Nayyar, H.** (2016). Food crops face rising temperatures: an overview of responses, adaptive mechanisms, and approaches to improve heat tolerance. *Cogent Food & Agriculture*, *2*(1), 1134380.
- Khaeim, H., Kende, Z., Balla, I., Gyuricza, C., Eser, A., & Tarnawa, Á.** (2022). The effect of temperature and water stresses on seed germination and seedling growth of wheat (*Triticum aestivum* L.). *Sustainability*, *14*(7), 3887.
- Kim, Y. U., Webber, H., Adiku, S. G., Júnior, R. D. S. N., Deswarte, J. C., Asseng, S., & Ewert, F.** (2024). Mechanisms and modelling approaches for excessive rainfall stress on cereals: Waterlogging, submergence, lodging, pests and diseases. *Agricultural and Forest Meteorology*, *344*, 109819.
- King, B. A., Stark, J. C., & Neibling, H.** (2020). *Potato irrigation management* (pp. 417-446). Springer International Publishing.
- Kiongo, S. C., Taylor, N. J., Franke, A. C., & Steyn, J. M.** (2024). Elevated Carbon Dioxide only Partly Alleviates the Negative Effects of Elevated Temperature on Potato Growth and Tuber Yield. *Potato Research*, 1-21.
- Kızıldeniz, T., Aydın, T. K., Göler, S., & Tuna, B.** (2022). Impact of Altered Precipitation and Temperature Climate Pattern Relation with Climate Change-Related Factors (High CO₂,

Elevated Temperature and Drought) on Wheat Production in Turkey. *Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 5(3), 1320-1333.

Knox, J., Daccache, A., Hess, T., & Haro, D. (2016). Meta-analysis of climate impacts and uncertainty on crop yields in Europe. *Environmental Research Letters*, 11(11), 113004.

Kripfganz, S., & Schneider, D. C. (2023). ardl: Estimating autoregressive distributed lag and equilibrium correction models. *The Stata Journal*, 23(4), 983-1019.

Krishnan, P., Swain, D. K., Bhaskar, B. C., Nayak, S. K., & Dash, R. N. (2007). Impact of elevated CO₂ and temperature on rice yield and methods of adaptation as evaluated by crop simulation studies. *Agriculture, ecosystems & environment*, 122(2), 233-242.

Kumar, S., Sharma, A., Pandey, S., Paul, S., Mishra, H., Kesarwani, A., ... & Tiwari, H. (2023). Response of Different Moisture Regimes and Nitrogen Sources on Soil Health, Growth and Yield Attributes of Wheat: A Comprehensive Review. *International Journal of Plant & Soil Science*, 35(20), 541-548.

Kuzma, M. M., & Layzell, D. B. (1994). Acclimation of soybean nodules to changes in temperature. *Plant physiology*, 106(1):263-270.

Laux, P., Jäckel, G., Tingem, R. M., & Kunstmann, H. (2010). Impact of climate change on agricultural productivity under rainfed conditions in Cameroon—A method to improve attainable crop yields by planting date adaptations. *Agricultural and Forest Meteorology*, 150(9), 1258-1271.

Lawlor, D. W., & Mitchell, R. A. C. (1991). The effects of increasing CO₂ on crop photosynthesis and productivity: a review of field studies. *Plant, Cell & Environment*, 14(8), 807-818.

Lee, Y. H., Sang, W. G., Baek, J. K., Kim, J. H., Shin, P., Seo, M. C., & Cho, J. I. (2020). The effect of concurrent elevation in CO₂ and temperature on the growth, photosynthesis, and yield of potato crops. *PloS One*, 15(10), e0241081.

Li, F., Kang, S., & Zhang, F. (2003). Effects of CO₂ enrichment, nitrogen and water on photosynthesis, evapotranspiration and water use efficiency of spring wheat. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 14(3), 387-393.

Lizana, X. C., & Calderini, D. F. (2013). Yield and grain quality of wheat in response to increased temperatures at key periods for grain number and grain weight determination:

considerations for the climatic change scenarios of Chile. *The Journal of Agricultural Science*, 151(2), 209-221.

Lobell, D. B., & Field, C. B. (2007). Global scale climate–crop yield relationships and the impacts of recent warming. *Environmental Research Letters*, 2(1), 014002.

Lobell, D. B., & Field, C. B. (2008). Estimation of the carbon dioxide (CO₂) fertilization effect using growth rate anomalies of CO₂ and crop yields since 1961. *Global Change Biology*, 14(1), 39-45.

Lobell, D. B., Cahill, K. N., & Field, C. B. (2007). Historical effects of temperature and precipitation on California crop yields. *Climatic Change*, 81(2), 187-203.

Lobell, D. B., Schlenker, W., & Costa-Roberts, J. (2012). Climate trends and global crop production since 1980. *Science*, 333(6042), 616-620.

Lobo, M. G., & Rojas, F. J. F. (2020). Biology and postharvest physiology of banana. In: Handbook of Banana Production, Postharvest Science, Processing Technology, and Nutrition, ed. Muhammad, S., Jasim, A., Lobo, M. G., 19-44. John Wiley & Sons Ltd., Hoboken, NJ.

Long, S. P., Ainsworth, E. A., Leakey, A. D. B., Nösberger, J., & Ort, D. R. (2006). Food for thought: Lower-than-expected crop yield stimulation with rising CO₂ concentrations. *Science*, 312(5782), 1918-1921.

Lopes, M. S. (2022). Will temperature and rainfall changes prevent yield progress in Europe?. *Food and Energy Security*, 11(2), e372.

Loreti, E., & Striker, G. G. (2020). Plant responses to hypoxia: signaling and adaptation. *Plants*, 9(12), 1704.

Makowski, D., Asseng, S., Ewert, F., Bassu, S., Durand, J. L., Li, T., ... & Zhu, Y. (2015). A statistical analysis of three ensembles of crop model responses to temperature and CO₂ concentration. *Agricultural and Forest Meteorology*, 214, 483-493.

Makowski, D., Marajo-Petizon, E., Durand, J. L., & Ben-Ari, T. (2020). Quantitative synthesis of temperature, CO₂, rainfall, and adaptation effects on global crop yields. *European Journal of Agronomy*, 115, 126041.

Marcinkowski, P., & Piniewski, M. (2024). Future changes in crop yield over Poland driven by climate change, increasing atmospheric CO₂ and nitrogen stress. *Agricultural Systems*, 213, 103813.

- Meng, F. C., Guo, J., Zhou, L., Xiong, M. M., & Zhang, L.** (2017). Interactive effects of temperature, CO₂ concentration and precipitation on growth and yield of crops. *Ying Yong Sheng tai xue bao= The Journal of Applied Ecology*, 28(12), 4117-4126.
- Momčilović, I.** (2019). Effects of heat stress on potato productivity and nutritive quality. *Hrana i ishrana*, 60(2), 43-48.
- Moore, F. C., & Lobell, D. B.** (2015). The fingerprint of climate trends on European crop yields. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(9), 2670-2675.
- Morel, J., Kumar, U., Ahmed, M., Bergkvist, G., Lana, M., Halling, M., & Parsons, D.** (2021). Quantification of the impact of temperature, CO₂, and rainfall changes on Swedish annual crops production using the APSIM model. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 5, 665025.
- Murillo, R. P., Cáceres, J. V., & Ruiz, J. L.** (2021). Dynamics of the Potato Root (*Solanum* Spp.) Under Different Levels of Soil Moisture, in the Geographical Region of Riobamba, Ecuador. *ESPOCH Congresses: The Ecuadorian Journal of STEAM*, 294-312.
- Najafi, E., Devineni, N., Khanbilvardi, R. M., & Kogan, F.** (2018). Understanding the changes in global crop yields through changes in climate and technology. *Earth's Future*, 6(3), 410-427.
- Narayan, P. K.** (2005). The saving and investment nexus for China: evidence from cointegration tests. *Applied Economics*, 37(17), 1979-1990.
- Nonhebel, S.** (1996). Effects of temperature rise and increase in CO₂ concentration on simulated wheat yields in Europe. *Climatic Change*, 34(1), 73-90.
- Ottman, M. J., Kimball, B. A., White, J. W., & Wall, G. W.** (2012). Wheat growth response to increased temperature from varied planting dates and supplemental infrared heating. *Agronomy Journal*, 104(1), 7-16.
- Ozkan, B., & Akcaoz, H.** (2002). Impacts of climate factors on yields for selected crops in the Southern Turkey. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 7(4), 367-380.
- Özdoğan, M.** (2011). Modeling the impacts of climate change on wheat yields in Northwestern Turkey. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 141(1-2), 1-12.

- Peng, S., Huang, J., Sheehy, J. E., Laza, R. C., Visperas, R. M., Zhong, X., ... & Cassman, K. G.** (2004). Rice yields decline with higher night temperature from global warming. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *101*(27), 9971-9975.
- Pesaran, M. H., and Y. Shin.** (1998). An autoregressive distributed-lag modelling approach to cointegration analysis. In *Econometrics and Economic Theory in the Twentieth Century: The Ragner Frisch Centennial Symposium*, ed. S. Steiner, 371–413. Cambridge: Cambridge University Press.
- Pesaran, M. H., Shin, Y., & Smith, R. J.** (2001). Bounds testing approaches to the analysis of level relationships. *Journal of Applied Econometrics*, *16*(3), 289-326.
- Petrova, L. I., Mitrofanov, Y. I., Gulyaev, M. V., & Pervushina, N. K.** (2021). Influence of various factors on crop formation and potato quality. *Ural Agrarian Bulletin*, *4*(207), 34-42.
- Pirttioja, N., Carter, T. R., Fronzek, S., Bindi, M., Hoffmann, H., Palosuo, T., ... & Rötter, R. P.** (2015). Temperature and precipitation effects on wheat yield across a European transect: a crop model ensemble analysis using impact response surfaces. *Climate Research*, *65*, 87-105.
- Qin, M., Zheng, E., Hou, D., Meng, X., Meng, F., Gao, Y., ... & Xu, T.** (2023). Response of wheat, maize, and rice to changes in temperature, precipitation, CO₂ concentration, and uncertainty based on crop simulation approaches. *Plants*, *12*(14), 2709.
- Roudier, P., Sultan, B., Quirion, P., & Berg, A.** (2011). The impact of future climate change on West African crop yields: What does the recent literature say?. *Global environmental change*, *21*(3), 1073-1083.
- Sabiiti, G., Ininda, J. M., Ogallo, L., Opijah, F., Nimusiima, A., Otieno, G., ... & Basalirwa, C.** (2016). Empirical relationships between banana yields and climate variability over Uganda. *Journal of Environmental and Agricultural Sciences*, *7*:03-13.
- Sakurai, G., Iizumi, T., Nishimori, M., & Yokozawa, M.** (2014). How much has the increase in atmospheric CO₂ directly affected past soybean production?. *Scientific Reports*, *4*(1), 4978.
- Savabi, M. R., & Stockle, C. O.** (2001). Modeling the possible impact of increased CO₂ and temperature on soil water balance, crop yield and soil erosion. *Environmental Modelling & Software*, *16*(7), 631-640.
- Schlenker, W., & Roberts, M. J.** (2008). *Estimating the impact of climate change on crop yields: The importance of nonlinear temperature effects* (No. w13799). National Bureau of Economic Research.

- Sen, B., Topcu, S., Türkeş, M., Sen, B., & Warner, J. F.** (2012). Projecting climate change, drought conditions and crop productivity in Turkey. *Climate Research*, 52, 175-191.
- Seneweera, S. and Norton, R. M.** 2011. Plant responses to increased carbon dioxide. Yadav, Shyam S., Redden, Robert J., Hatfield, Jerry L., Lotze-Campen, Hermann and Hall, Anthony E. (ed.) *Crop adaptation to climate change*. Chichester, West Sussex. United Kingdom. John Wiley & Sons. pp. 198-217
- Sharkey, T. D.** (2005). Effects of moderate heat stress on photosynthesis: importance of thylakoid reactions, rubisco deactivation, reactive oxygen species, and thermotolerance provided by isoprene. *Plant, Cell & Environment*, 28(3), 269-277.
- Singh, B., El Maayar, M., André, P., Bryant, C. R., & Thouez, J. P.** (1998). Impacts of a GHG-induced climate change on crop yields: effects of acceleration in maturation, moisture stress and optimal temperature. *Climatic change*, 38(1), 51-86.
- Streck, N. A.** (2005). Climate change and agroecosystems: the effect of elevated atmospheric CO₂ and temperature on crop growth, development, and yield. *Ciência Rural*, 35, 730-740.
- Tatar, Ö.** (2016). Climate change impacts on crop production in Turkey. *Lucrări Științifice* 59(2).
- Taylor, C. A., & Schlenker, W.** (2021). *Environmental drivers of agricultural productivity growth: CO₂ fertilization of US field crops* (No. w29320). National Bureau of Economic Research.
- Tiwari, A., Prasad, S., Jaiswal, B., Gyanendra, K., Singh, S., & Singh, K. N.** (2017). Effect of heat stress on yield attributing traits in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Int. J. Curr. Microbiol. App. Sci*, 6(12), 2738-2744.
- Tubiello, F. N., & Ewert, F.** (2002). Simulating the effects of elevated CO₂ on crops: approaches and applications for climate change. *European Journal of Agronomy*, 18(1-2), 57-74.
- Ullah, A., Nadeem, F., Nawaz, A., Siddique, K. H., & Farooq, M.** (2022). Heat stress effects on the reproductive physiology and yield of wheat. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 208(1), 1-17.
- Van Vuuren, M. M., Robinson, D., Fitter, A. H., Chasalow, S. D., Williamson, L., & Raven, J. A.** (1997). Effects of elevated atmospheric CO₂ and soil water availability on root biomass, root length, and N, P and K uptake by wheat. *New Phytologist*, 135(3), 455-465.

- Vanongeval, F., & Gobin, A.** (2023). Adverse Weather Impacts on Winter Wheat, Maize and Potato Yield Gaps in northern Belgium. *Agronomy*, *13*(4), 1104.
- Verón, S. R., De Abelleira, D., & Lobell, D. B.** (2015). Impacts of precipitation and temperature on crop yields in the Pampas. *Climatic change*, *130*(2), 235-245.
- Waha, K., Müller, C., & Rolinski, S.** (2013). Separate and combined effects of temperature and precipitation change on maize yields in sub-Saharan Africa for mid-to late-21st century. *Global and Planetary Change*, *106*, 1-12.
- Wassmann, R., Jagadish, S. V. K., Heuer, S., Ismail, A., Redona, E., Serraj, R., ... & Rosegrant, M.** (2009). Climate change affecting rice production: The physiological and agronomic basis for possible adaptation strategies. *Advances in Agronomy*, *101*, 59-122.
- Wilcox, J., & Makowski, D.** (2014). A meta-analysis of the predicted effects of climate change on wheat yields using simulation studies. *Field Crops Research*, *156*, 180-190.
- Yandell, B. S., Najar, A., Wheeler, R., & Tibbitts, T. W.** (1988). Modeling the effects of light, carbon dioxide, and temperature on the growth of potato. *Crop Science*, *28*(5), 811-818.
- Yang, P., Wu, W., Li, Z., Yu, Q., Inatsu, M., Liu, Z., ... & Tang, H.** (2014). Simulated impact of elevated CO₂, temperature, and precipitation on the winter wheat yield in the North China Plain. *Regional Environmental Change*, *14*(1), 61-74.
- Yang, X., Tang, X., Chen, B., Tian, Z., & Zhong, H.** (2013). Impacts of heat stress on wheat yield due to climatic warming in China. *Prog Geogr*, *32*(12), 1771-1779.
- Yano, T., Aydin, M., & Haraguchi, T.** (2007). Impact of climate change on irrigation demand and crop growth in a Mediterranean environment of Turkey. *Sensors*, *7*(10), 2297-2315.
- Yu, Y., Jiang, Z., Wang, G., Kattel, G. R., Chuai, X., Shang, Y., ... & Miao, L.** (2022). Disintegrating the impact of climate change on maize yield from human management practices in China. *Agricultural and Forest Meteorology*, *327*, 109235.
- Zhang, X., Högy, P., Wu, X., Schmid, I., Wang, X., Schulze, W. X., ... & Fangmeier, A.** (2018). Physiological and proteomic evidence for the interactive effects of post-anthesis heat stress and elevated CO₂ on wheat. *Proteomics*, *18*(23), 1800262.
- Zhao, C., Liu, B., Piao, S., Wang, X., Lobell, D. B., Huang, Y., ... & Asseng, S.** (2017). Temperature increase reduces global yields of major crops in four independent estimates. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *114*(35), 9326-9331.

Zhao, F., Zhang, Q., Lei, J., Wang, H., Zhang, K., & Qi, Y. (2024). Environmental factors influence the responsiveness of potato tuber yield to growing season precipitation. *Crop and Environment*, 3(2), 112-122.

Zhu, T., Fonseca De Lima, C. F., & De Smet, I. (2021). The heat is on: how crop growth, development, and yield respond to high temperature. *Journal of Experimental Botany*, 72(21), 7359-7373.

Zimmermann, A., Webber, H., Zhao, G., Ewert, F., Kros, J., Wolf, J., ... & de Vries, W. (2017). Climate change impacts on crop yields, land use and environment in response to crop sowing dates and thermal time requirements. *Agricultural Systems*, 157, 81-92.

Zscheischler, J., Orth, R., & Seneviratne, S. I. (2017). Bivariate return periods of temperature and precipitation explain a large fraction of European crop yields. *Biogeosciences*, 14(13), 3309-3320.