

İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ VE TARIMSAL ÜRETİM

Editör
BİHTER ÇOLAK ESETLİLİ



BİDGE Yayınları

İklim Değişikliği ve Tarımsal Üretim

Editör: Bihter Çolak Esetlili

ISBN: 978-625-372-898-4

1. Baskı

Sayfa Düzeni: Gözde YÜCEL

Yayınlama Tarihi: 2025-12-25

BİDGE Yayınları

Bu eserin bütün hakları saklıdır. Kaynak gösterilerek tanıtım için yapılacak kısa alıntılar dışında yayıncının ve editörün yazılı izni olmaksızın hiçbir yolla çoğaltılamaz.

Sertifika No: 71374

Yayın hakları © BİDGE Yayınları

www.bidgeyayinlari.com.tr - bidgeyayinlari@gmail.com

Krc Bilişim Ticaret ve Organizasyon Ltd. Şti.

Güzeltepe Mahallesi Abidin Daver Sokak Sefer Apartmanı No: 7/9 Çankaya /
Ankara



İÇİNDEKİLER

Giriş: İklim Değişikliği, Tarımsal Üretim ve Risk

Değerlendirme Çerçevesi 1

ECE GİZEM ÇAKMAK, TUĞBA DOĞAN GÜZEL, DENİZ SARI, HALDUN KARAN

Yüksek Çözünürlüklü Bölgesel İklim Simülasyonları 24

YURDANUR ÜNAL, CEMRE YÜRÜK SONUÇ, NİSA YAYLACI, İBRAHİM AKBAYIR

İklim Değişikliğinin Havzadaki Su Potansiyeli Üzerindeki

Etkilerinin Modellenmesi 74

ALİ ERTÜRK, CENK GÜREVİN, CEMRE YÜRÜK SONUÇ

Uydu Görüntüleri ve Cbs Tabanlı Tarımsal Veri Analizi123

MUSTAFA TOLGA ESETLİLİ, BİHTER ÇOLAK ESETLİLİ, EDANUR FIRAT, YUSUF KUTLU

Tarımsal Üretimde İklim Değişikliğine Uyum Stratejileri133

TUĞBA DOĞAN GÜZEL, ECE GİZEM ÇAKMAK, DENİZ SARI, HALDUN KARAN

BÖLÜM 0

GİRİŞ: İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ, TARIMSAL ÜRETİM VE RİSK DEĞERLENDİRME ÇERÇEVESİ

ECE GİZEM ÇAKMAK¹
TUĞBA DOĞAN GÜZEL²
DENİZ SARI³
HALDUN KARAN⁴

Giriş

İklim değışikliği, tarımsal üretim sistemleri üzerinde çok boyutlu ve giderek artan etkiler yaratan küresel bir çevre sorunu olarak karşımıza çıkmakta, sıcaklık artışı, yağış rejiminde değışim, ekstrem hava olaylarının sıklık ve şiddetindeki artış; tarımsal üretim sistemlerini doğrudan etkileyerek verim, kalite, üretim sürekliliği ve gıda güvenliği üzerinde belirleyici olmaktadır. Tarımsal üretimin

¹ Başuzman Araştırmacı, TÜBİTAK MAM, İklim ve Yaşam Bilimleri Başkan Yardımcılığı, Orcid: 0000-0001-7721-8866

² Başuzman Araştırmacı, TÜBİTAK MAM, İklim ve Yaşam Bilimleri Başkan Yardımcılığı, Orcid: 0000-0002-8636-4408

³ Kıdemli Başuzman Araştırmacı, TÜBİTAK MAM, İklim ve Yaşam Bilimleri Başkan Yardımcılığı, Orcid: 0000-0002-8095-9718

⁴ Kıdemli Başuzman Araştırmacı, TÜBİTAK MAM, İklim ve Yaşam Bilimleri Başkan Yardımcılığı, Orcid: 0000-0003-2388-1261

büyük ölçüde iklim koşullarına bağımlı olması, iklim değişikliğini bu sektör açısından yalnızca çevresel bir mesele olmaktan çıkararak ekonomik, sosyal ve stratejik bir risk alanı haline de getirmektedir.

Özellikle havza ölçeğinde ele alındığında, iklim değişikliğinin tarımsal üretim üzerindeki etkileri su kaynakları, toprak özellikleri, arazi kullanımı ve üretim desenleri ile etkileşim halinde ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle iklim değişikliğinin tarım sektörü üzerindeki etkilerinin değerlendirilmesi, yalnızca iklim ekstremlerindeki değişimlerin analiz edilmesiyle sınırlı kalmamakta; hidrolojik süreçlerin, tarımsal alanların mekânsal dağılımının ve üretim sistemlerinin kırılganlık düzeylerinin birlikte ele alınmasını gerektirmektedir. Bu bütüncül yaklaşım, özellikle havza bazlı planlama ve uyum stratejilerinin geliştirilmesi açısından kritik öneme sahiptir.

İklim değişikliğinin tarımsal üretim üzerindeki etkilerinin anlaşılmasında risk değerlendirme yaklaşımı temel bir araç olarak öne çıkmaktadır. İklim riski; iklim kaynaklı tehlikelerin, tarımsal sistemlerin bu tehlikelere maruziyeti ve sistemlerin kırılganlık düzeyleri ile birlikte değerlendirilmesi sonucunda ortaya çıkan potansiyel etkileri ifade etmektedir. Bu çerçevede, risk analizleri yalnızca mevcut durumun değerlendirilmesini değil, aynı zamanda geleceğe yönelik senaryoların oluşturulmasını ve uyum seçeneklerinin belirlenmesini de mümkün kılmaktadır.

Son yıllarda iklim bilimi ve veri teknolojilerindeki gelişmeler, tarımsal üretimde iklim değişikliği etkilerinin daha ayrıntılı ve mekânsal olarak hassas biçimde analiz edilmesine olanak sağlamıştır. Yüksek çözünürlüklü bölgesel iklim simülasyonları, küresel iklim projeksiyonlarının yerel ve havza ölçeğine indirgenmesine imkân tanırken; hidrolojik modelleme çalışmaları iklim değişikliğinin su potansiyeli üzerindeki etkilerinin nicel olarak değerlendirilmesini mümkün kılmaktadır. Bununla birlikte, uydu görüntüleri ve Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) tabanlı analizler,

tarımsal alanların zamansal ve mekânsal değişiminin izlenmesi, ürün desenlerinin belirlenmesi ve iklim etkilerinin sahaya yansımalarının ortaya konulmasında önemli bir rol oynamaktadır.

Bu bölümde, iklim değişikliği, tarımsal üretim ve risk değerlendirmesi arasındaki ilişkiler kavramsal bir çerçevede ele alınmıştır. Tarımsal üretim sistemlerinin iklim değişikliğine duyarlılığı, iklim kaynaklı tehlikeler, risk değerlendirme yaklaşımları, ölçek ve veri belirsizlikleri gibi temel konulara değinilmiş; bu çerçeve üzerinden kitabın devamında yer alan yüksek çözünürlüklü iklim simülasyonları, su potansiyeli modellemeleri, uydu görüntüleri ve CBS tabanlı tarımsal analizler ile uyum stratejilerine yönelik bölümlere kavramsal bir zemin hazırlanmaktadır. Böylece, bilimsel analizlerin karar alma süreçlerine nasıl entegre edilebileceğine ilişkin bütüncül bir perspektif sunulması hedeflenmektedir.

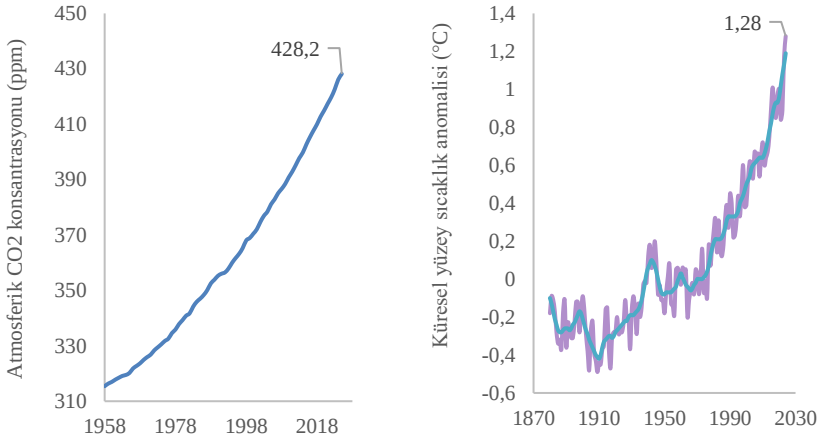
İklim Değişikliği Kavramı

İklim değişikliği, Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi (BMİDÇS)’nde “karşılaştırılabilir zaman dilimlerinde gözlenen doğal iklim değişikliğine ek olarak, doğrudan veya dolaylı olarak küresel atmosferin bileşimini bozan insan faaliyetleri sonucunda iklimde oluşan değişiklik” olarak tanımlanmaktadır (BMİDÇS, 1992). Atmosfer ve yeryüzü arasında gerçekleşen enerji akışlarındaki bozulmalar, örneğin, güneş radyasyonunun bulutlar, aerosoller, kar örtüsü, okyanuslar ve bitki örtüsüne bağlı olarak yutulma, iletme ve yansıtma-saçılma oranlarındaki dalgalanmalar, küresel sıcaklık artışında kritik rol oynamaktadır. Bunun yanında Dünya’nın yörüngesel hareketleri ile El Niño gibi doğal döngüler de iklim sistemini etkilemeye devam etmektedir. Ancak hızlı nüfus artışı, değişen tüketim alışkanlıkları, fosil yakıtlara dayalı enerji üretimi ve sanayileşme gibi antropojenik etkenler, günümüzde gözlenen ısınmanın ana nedeni olup, doğal

süreçlerle açıklanamayacak ölçüde hızlı bir iklim değişikliği eğilimi yaratmaktadır.

Sanayi devrimi sonrası atmosferdeki karbondioksit birikimi ve küresel ortalama sıcaklık artışı birlikte incelendiğinde iki değişken arasında güçlü bir ilişki olduğu görülmektedir. Veriler, 2024 yılı itibarıyla küresel yüzey sıcaklığının sanayi öncesi döneme göre yaklaşık 1,28°C yükseldiğini ortaya koymaktadır. Öte yandan atmosferik CO₂ konsantrasyonu ise Ekim 2025 itibarıyla 428,2 ppm seviyesine ulaşarak sanayi öncesi döneme kıyasla yaklaşık %50 oranında artış göstermiştir (Şekil 1) (NASA, 2025).

Şekil 1 Atmosferik karbondioksit konsantrasyonu (CO₂ ppm) (a) ve Küresel yüzey sıcaklığı (sıcaklık anomalisi, °C) (b) değişimi.



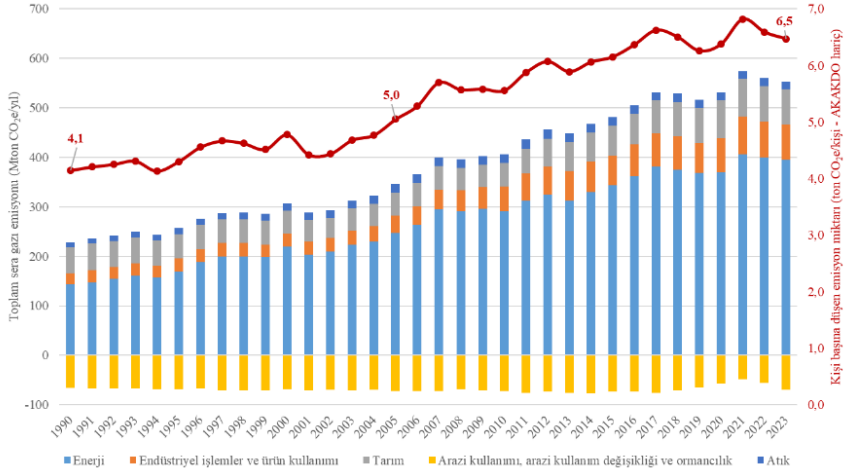
Bu göstergeler, sera gazı birikiminin hız kesmeden sürdüğünü ve küresel ısınmanın uzun vadeli ve kalıcı etkiler üretme ihtimalinin arttığını göstermektedir. Küresel ölçekte acil bir cevap üretilmesi gereken bu problemin çözümü amacıyla oluşturulan BMİDÇS'ye Türkiye, 2004 yılında 189. Taraf olarak katılmıştır. BMİDÇS altında hazırlanan ve küresel sıcaklık artışını 2°C'nin altında, tercihen 1,5°C ile sınırlamayı hedefleyen Paris Anlaşması ise 2015 yılında kabul edilmiştir. Türkiye, 22 Nisan 2016'da

imzaladığı Paris Anlaşması'nı 6 Ekim 2021'de onaylamıştır (ÇŞİDB, 2025).

Sera gazı emisyon azaltım hedeflerinin takip edilebilmesi amacıyla küresel ölçekte ülkeler ulusal sera gazı emisyon envanterleri hazırlamaktadır. Ülkemiz için her yıl Türkiye İstatistik Kurumu tarafından güncellenen Ulusal Sera Gazı Emisyon Envanteri'ne göre, Türkiye'nin toplam sera gazı emisyonu 2023 yılında yaklaşık 552 Mton CO₂e seviyesine ulaşmış olup, 1990 seviyesine kıyasla yaklaşık %142 oranında artış göstermiştir (Şekil 2). Toplam emisyonlarda ekonomik kriz veya pandemi etkilerinin görüldüğü 2001, 2008, 2013 ve 2019 yıllarında ani düşüşler meydana gelse de genel itibariyle ekonomik büyüme ve nüfus artışına bağlı artış trendi gözlenmektedir (TÜİK, 2025).

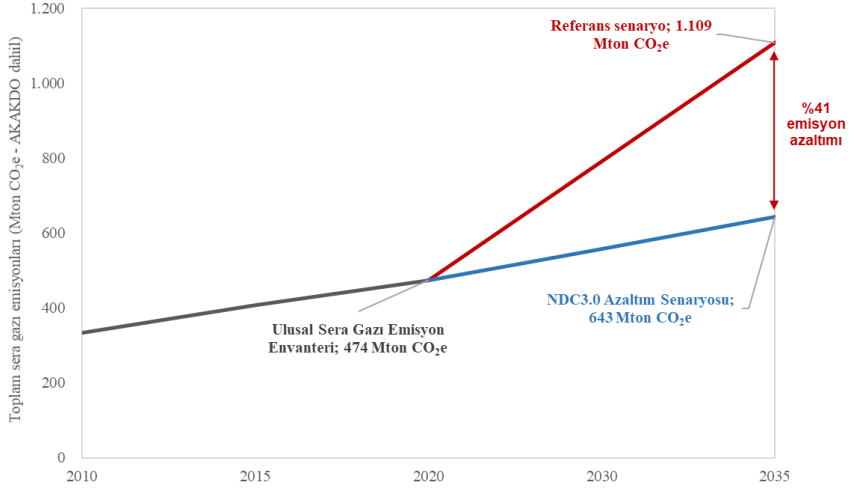
Bireysel tüketim alışkanlıklarının ve yaşam tarzı değişikliğinin etkisini daha iyi yansıtan bir parametre olarak kişi başına düşen emisyonlar ise 1990 yılındaki 4,1 ton CO₂e/kişi seviyesinden 2023 yılında 6,5 ton CO₂e/kişi seviyesine ulaşmıştır. Sektörel bazda bakıldığında tüm sektörlerde tüketilen fosil yakıtların yanması kaynaklı emisyonları temsil eden enerji sektörünün 2023 yılı toplam emisyonlarının %72'sini oluşturduğu görülmektedir. Tarım ve hayvancılık faaliyetleri kaynaklı emisyonları temsil eden ve enterik fermentasyon, toprak yönetimi, gübre kullanımı, biyokütle yakma gibi alt kategorileri içeren tarım sektörü emisyonları ise toplam emisyonların %13'ünü oluşturmaktadır. Gaz türü bazında ise CO₂ emisyonları toplamın %80,2'sini oluştururken, onu %11,6 ve %6,4 ile CH₄ ve N₂O'nun takip etmektedir (TÜİK, 2025).

Şekil 2 Türkiye'nin sera gazı emisyonlarının gelişimi ve sektörel bazda dağılımı (1990-2023).



Paris Anlaşması çerçevesinde ülkeler, sera gazı emisyonlarının azaltımına yönelik ulusal katkı beyanlarını (nationally determined contributions-NDCs) BMİDÇS Sekreteryası'na sunmakta ve belirli aralıklarla güncelleyerek iklim hedeflerini ortaya koymaktadır. Bu kapsamda Türkiye sera gazı azaltım hedeflerini 2025 yılında güncelleyerek, 2035 yılı için referans senaryoya kıyasla %41 seviyesinde emisyon azaltım taahhüdü belirlemiştir; ulusal ölçekte emisyonların 2038'de en yüksek seviyeye ulaşmasını ve 2053 itibarıyla net sıfıra inmesini hedefleyen kapsamlı bir dönüşüm yol haritası ortaya koymuştur (Şekil 3) (ÇŞİDB, 2025).

Şekil 3 Türkiye'nin sera gazı emisyon azaltım projeksiyonları.



Küresel ölçekte ise 2025 itibarıyla güncellenen ulusal sera gazı azaltım hedefleri değerlendirildiğinde, 2035 yılına kadar küresel emisyonlarda 2019 seviyelerine kıyasla yalnızca %12 seviyesinde azaltıma ulaşılabileceği öngörülmektedir (BMİDÇS, 2025). Ancak küresel ısınmanın 1,5°C’de tutulması için emisyonların 2025’ten önce zirve yapması ve 2030’a kadar 2019 seviyelerine göre %43 azaltılması gerekmektedir (IPCC, 2022). Bu tablo, küresel ölçekte emisyon azaltım çabaları sürse de sıcaklık artışının belirli ölçüde kaçınılmaz olduğunu; dolayısıyla uyum önlemlerinin gecikmeden hızlandırılmasının kritik önem taşıdığını göstermektedir. 2024 yılı, kayıtlara geçen en sıcak yıl olmuş; küresel ortalama sıcaklık, sanayi öncesi döneme göre yaklaşık 1,55°C daha yüksek gerçekleşmiştir. Bu kısa süreli aşımalar, 1,5°C sınırının uzun dönemli ortalama olarak kalıcı biçimde aşılması anlamına gelmese de tarımsal üretim, su kaynakları ve toplum sağlığı gibi ekosistemin kritik bileşenleri açısından geri döndürülemez etkiler yaratabilecek sonuçlara sahiptir (WMO, 2025).

Tarımsal Üretimde İklim Değişikliği Etkileri

Son yıllarda sıcak hava dalgaları, uzun süreli kuraklık dönemleri, düzensiz yağışlar, şiddetli fırtınalar, dolu ve sel olayları giderek daha sık ve daha yıkıcı hale gelmiştir. Bu durum özellikle tarımsal üretim, hayvancılık, su kaynakları yönetimi ve enerji arzı üzerinde belirgin baskılar oluşturmaktadır. Tarımsal üretim, iklim koşullarına yüksek bağımlılığı nedeniyle en kırılgan alanlardan biri olup, iklim değişikliği ile birlikte bitki gelişim dönemleri, rekolte, toprak ve hayvan sağlığı, meraların taşıma kapasitesi gibi kriterler üzerinde ciddi etkiler görülmektedir. Örneğin, kuraklık ve sıcak hava dalgaları ile birlikte bölgesel olarak değişen koşulların yem bitkileri üretimini azaltması, buna bağlı olarak hayvancılıkta yem maliyetlerinin artması; aşırı yağışlar ile tarla bitkilerinde zararlı ve hastalıkların artış göstermesi, mera alanlarında erozyon tahribatı ve hayvanlarda bulaşıcı hastalık riskinin yükselmesi öne çıkan etkiler arasındadır. İklim kaynaklı risklerdeki artış, tarım ve hayvancılık sistemlerinin iklim değişikliğine karşı daha dirençli hale getirilmesine yönelik entegre politika ve uygulamaların gerekliliğini vurgulamaktadır.

İklim değişikliği, tarımsal üretim sistemleri üzerinde çok boyutlu ve giderek artan etkiler yaratan küresel bir çevresel sorun olup, tarımsal üretimin iklim koşullarına yüksek derecede bağımlı olması nedeniyle bu sektör açısından yalnızca çevresel değil, aynı zamanda sosyoekonomik açıdan da önemli risk oluşturmaktadır. İklim değişikliğinin ekonomik büyüme, tarımsal verimlilik, yoksulluk, gıda güvenliği, sağlık, su kaynakları ve enerji sektörü açısından sosyoekonomik etkilerine ilişkin literatür taraması bulgularını ortaya koyan bir çalışmada, iklim değişikliğinin küresel ölçekte gayrisafi yurtiçi hasıla (GSYİH) üzerindeki etkisinin sınırlı seviyede olduğu, ancak özellikle gelişmekte olan ülkeler ölçeğinde kayıpların uzun vadede daha da arttığı değerlendirilmektedir. Tarımsal üretim, iklim değişikliğine karşı en kırılgan alanlardan biri

olarak öne çıkmakta; artan sıcaklıkların ürün verimini düşürdüğü, yağış artışlarının ise bazı bölgelerde verimi artırabildiği, ancak bu etkinin ürün türüne ve mekâna göre büyük farklılıklar gösterdiği belirtilmektedir. Özellikle Orta Doğu, Güney Asya ve Afrika'nın en çok etkilenecek bölgeler olarak öne çıktığı, bu alanlarda yağmura bağımlı tarım sistemlerinin yüksek risk altında olduğu, uzun vadede ürün verim kayıplarının gıda güvencesini ciddi biçimde tehdit ettiği ortaya konmaktadır. Tarımsal verim düşüşlerinin arazi değerlerinde azalma, ürün fiyatlarında artış ve gelir kayıpları yoluyla yoksulluk ve açlığı derinleştireceği; küresel ölçekte iklim değişikliği nedeniyle ciddi açlık riskiyle karşı karşıya kalabilecek nüfusun 2050 itibariyle iklim değişikliğinin olmadığı senaryolara göre %17 oranında artış göstereceği öngörülmektedir. Çalışmada ayrıca iklim değişikliğinin su kaynakları, sağlık ve enerji güvenliği üzerindeki etkilerinin de özellikle gelişmekte olan ülkeler açısından ağır olacağını göstermektedir. Afrika'da su kıtlığı riskinin, Asya'da ise taşkın riskinin baskın olduğu; iklim değişikliğinin hastalık yayılımını ve ölümleri artırarak zayıf sağlık sistemlerine sahip ülkelerde ciddi ekonomik ve sosyal maliyetler doğuracağı ifade edilmektedir. Genel itibariyle, iklim değişikliğinin etkilerinin mekânsal ve zamansal açıdan büyük farklılıklar gösterdiği, ancak olumsuz etkilerin gelişmekte olan ülkelere daha belirgin olduğu ve bu nedenle uyum politikalarının yerel koşulları ve öncelikli risk alanlarını dikkate alacak şekilde tasarlanması gerektiği vurgulanmıştır (Kofi Adam, P., 2024). Bu bağlamda, özellikle küçük ölçekli üreticiler ve iklime duyarlı bölgelerde yaşayan kırsal topluluklar, sınırlı finansal kaynaklar ve düşük uyum kapasiteleri nedeniyle iklim değişikliği risklerden orantısız biçimde etkilenmektedir. Tarımsal üretimde yaşanan istikrarsızlıklar, gıda güvencesi ve gıda güvenliği üzerinde baskı oluştururken, kırsal yoksulluk, geçim kaynaklarının çeşitlenememesi ve kırsal alanlardan göç gibi yapısal sorunların da derinleşmesine yol açabilmektedir. Bu nedenle iklim değişikliğinin tarım sektörü üzerindeki etkilerinin değerlendirilmesi, biyofiziksel

etkilerin yanı sıra sosyoekonomik boyutları da kapsayan bütüncül bir yaklaşımı gerekli kılmaktadır. İklim değişikliğinin tarımsal üretim üzerindeki olumsuz etkilerine karşı küçük ölçekli çiftçilerin uyum stratejilerini etkileyen sosyoekonomik faktörleri, Akdeniz ve Afrika bölgelerinden seçilen Fas, Mısır, İtalya ve Senegal örnekleri üzerinden incelemekte olan bir analize göre, eğitim düzeyi, tarımsal deneyim ve eğitim, tarımsal gelir, işletme büyüklüğü gibi faktörlerin, çiftçilerin iklim değişikliğine yönelik algıları ve uyum önlemlerini benimseme olasılığını anlamlı biçimde etkilediği değerlendirilmiştir. Eğitim ve altyapı eksikliklerinin özellikle Fas ve Senegal gibi gelişmekte olan ülkelerde uyum kapasitesini sınırladığı, buna karşılık İtalya ve Mısır'da daha yüksek eğitim düzeylerinin uyum önlemlerinin benimsenmesini artırdığı ortaya konulmuştur (Ahmed, O., ve diğ., 2025).

Tarımsal Üretimde İklim Değişikliği Risk Değerlendirme Yaklaşımları

Tarımsal üretimin iklim değişikliği karşısındaki kırılganlığını ölçmek ve etkili uyum stratejileri geliştirmek için kapsamlı bir risk değerlendirme sürecinin yürütülmesi gerekmektedir. Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli (Intergovernmental Panel on Climate Change-IPCC)'nin tanımladığı çerçevede iklim değişikliği riskleri; tehlike (hazard), maruziyet (exposure) ve kırılganlık (vulnerability) arasındaki etkileşimi dikkate alan üç boyutlu bir çerçevede ele alınmaktadır (IPCC, 2020). Tarımsal üretim açısından tehlike bileşeni altında, sıcak hava dalgaları, kuraklık, aşırı yağış, dolu, don olayları gibi üretimi doğrudan etkileyen iklimsel unsurların gerçekleşme olasılıkları değerlendirilmektedir. Maruziyet bileşeni altında, bu tehlikelere açık durumda bulunan tarım alanları, bu alanlarda yetiştirilen ürünler ve kritik tarımsal varlıkların (örn; seralar, depolama tesisleri, sulama kanalları) tehlikeyle temas düzeyi değerlendirilmektedir. Olumsuz etkilenme eğilimini ortaya koyan kırılganlık ise toprak sağlığı, su

kaynaklarına erişim, tarımla uğraşan nüfusun sosyo-ekonomik koşulları, teknik bilgi düzeyi, erken uyarı sistemlerine erişim, sulama ve drenaj sistemlerinin teknik kapasitesi, sigorta uygulamalarının yaygınlığı gibi faktörlere bağlı olarak değişmektedir. Bu üç bileşenin birlikte değerlendirilmesi, tarımsal üretimde iklim risklerinin hangi koşullarda arttığının ve hangi alanlarda uyum önlemlerinin önceliklendirilmesi gerektiğini belirlemek açısından kritik öneme sahiptir. Dolayısıyla tarımsal üretimde iklim değişikliği risk değerlendirmesi, disiplinler arası bir analiz çerçevesine ihtiyaç duymaktadır.

Risk değerlendirme çalışmalarında iklim projeksiyonları ve senaryo analizleri temel rol oynamaktadır. IPCC'nin yeni nesil sosyo-ekonomik yörüngeleri temsil eden SSP (Ortak Sosyoekonomik Yollar-Shared Socio-economic Pathways) senaryoları, sıcaklık artışı, yağış rejimi değişimi ve aşırı hava olayları gibi unsurların gelecekteki tarımsal üretim üzerindeki etkilerini modellemek için yaygın olarak kullanılmaktadır. Küresel ölçekte gerçekleştirilen en güncel değerlendirmeler tarımsal üretimde hem mevcut hem de geleceğe dönük ciddi risklere işaret etmektedir. Su kıtlığı, özellikle sulamaya bağımlı üretim yapan alanlarda üretim maliyetlerini artırmakta ve verimliliği kısıtlamaktadır. Aynı zamanda sel, fırtına ve sıcak hava dalgaları gibi aşırı olayların daha sık yaşanması, tarımsal üretim açısından yüksek verim kaybı riskleri doğurmaktadır. Özellikle temel gıda ürünlerinde (örneğin buğday, mısır, pirinç) verim düşüşlerinin artması beklenirken, zararlı ve hastalık baskısında artış ve hayvancılıkta ısı stresi kaynaklı üretkenlik kayıpları da öngörülmektedir. IPCC değerlendirmelerine göre birçok bölgede gıda güvenliği riskleri şimdiden artmış olup, özellikle sıcaklık artışının 1,5°C'yi aşması halinde bu risklerin daha da büyüyeceği öngörülmektedir. Küresel ölçekte mevcut durumda tarımsal üretime elverişli alanlarının %10'unun yüzyılın ortasında, %31 ila %34'ünün ise yüzyılın

sonunda iklim koşulları açısından uygunluğunu kaybetmesi öngörülmektedir. Tarımsal üretim ve su kaynakları yönetimi açısından dayanıklılığın artırılması için iklim değişikliğine uyum kapasitesini arttıracak stratejilerin hızlandırılması gerektiği vurgulanmaktadır (O'Neill, B. ve diğ., 2022; Campbell, B., 2022). Türkiye için yapılan çalışmalar da, sıcaklık ve kuraklık göstergelerinde güçlü artış eğilimlerine işaret ederek, tarımsal üretimde risk değerlendirmesinin önemini ortaya koymaktadır.

Tarımsal sistemlerin gelecekteki üretim performansını değerlendirmede bitki gelişim modelleri geniş ölçüde kullanılmaktadır. Bu çerçevede uygulanan istatistiksel modeller, geçmiş verilerden yararlanarak bitki verimi, hayvansal üretim ya da fiyatlar gibi çıktıları tahmin etmekte olup, veri aralığının dışında kalan koşullara (yeni iklim koşulları, farklı toprak özellikleri, uyum uygulamaları gibi) uygulanamadığı için gelecekteki iklim değişikliği etkilerini öngörmeye başarıları sınırlıdır. Buna karşılık dinamik simülasyon modelleri, bitki, hayvancılık ve uygulama düzeyindeki süreçleri temsil ederek hava durumu, toprak, yönetim gibi dış uyaranlara karşı sistemin zaman içindeki tepkilerini simüle etmektedir. Örneğin DSSAT-Decision Support System for Agrotechnology Transfer, AquaCrop, APSIM-Agricultural Production Systems sIMulator gibi modeller; farklı iklim senaryoları altında su tüketimi, verim kayıpları, stres dönemleri ve fenolojik değişimleri hesaplamak için etkili araçlar olarak değerlendirilmektedir. Dinamik modeller, taktik (örn; sulama zamanı) veya stratejik (örn; girdi kullanımına bağlı verim-maliyet dengesi) kararları desteklemek için çoklu çıktı üretme kapasitesine sahiptir. Ayrıca, modellerin gerçek sistem tepkileriyle karşılaştırılarak belirsizliklerinin değerlendirilmesi, son yıllarda önem kazanan bir ihtiyaçtır. Bu modeller özellikle buğday, mısır, pamuk, zeytin gibi Türkiye'de yaygın yetiştirilen ürün grupları

üzerinde iklim değışikliğinin etkilerini belirlemede kritik bilgiler sunmaktadır (Jones, J.W. ve diğ., 2017).

Ülkemizin farklı bölgelerinde iklim değışikliğinin tarımsal üretim üzerindeki etkilerinin değerdendirilmesine yönelik çeşitli çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Şen ve diğderleri, Trakya Bölgesi'nde buğday, kanola ve ayçiçeğı için RCP4.5 ve RCP8.5 senaryoları altında uygun alanları Crop Ecological Requirements Database-ECOCROP yazılımını kullanarak değerdendirmiş, özellikle buğday ekimi için uygun alanların belirgin seviyede azalacağını, öte yandan kanola üretimine artış, ayçiçeğı üretiminde ise genel bir değışim olmayacağını ortaya koymuştur (Şen, A.S., Huzur, D., Konukçu, F., 2024). Yetik ve Şen, mısır özelinde CropWat modelini kullanarak gerçekleştirdikleri simülasyonlarda yüzyılın sonunda mısır yetiştirme sezonunda evopotranspirasyon seviyesinin referans döneme kıyasla ortalama 0,49 mm/gün artacağı ve sulama ihtiyacının ise ortalama %7,37 yükseleceğini ortaya koymuştur. Ayrıca bitki özelinde evopotranspirasyon seviyesinin 480,1 mm'den 513,4 mm'ye çıkacağı hesaplanmış olup, bulgular Akdeniz iklim kuşağında mısır tarımında sulama planlamasının iklim değışikliğine uyum kapsamında yeniden düzenlenmesi gerektiğini göstermektedir (Yetik, A.K., Şen, B., 2022). Yeşilköy ve Şaylan, Trakya bölgesi özelinde gerçekleştirdikleri modelleme çalışmaları sonucunda iki farklı iklim senaryosu altında ortalama sıcaklık artışının yüzyılın sonunda 1,7-3,3°C aralığında olacağını, yağışların ayçiçeğı büyüme döneminde %10-33 oranında azalacağını, buna karşın kışın buğday büyüme sezonunda ise %9-25 oranında artacağını ortaya koymuştur. DSSAT modeli sonuçlarına göre ayçiçeğı veriminin tüm dönemlerde düşeceği, kışlık buğday veriminin Tekirdağ'da %25 oranında artacağı, Edirne ve Kırklareli'nde ise %29 oranında azalacağı öngörülmektedir (Yeşilköy, S., Şaylan, L., 2021). Konukçu ve diğderleri, Trakya'da orta ve uzun vadede 1,43°C ve 3,05°C seviyesinde sıcaklık artışı ve yağışlarda %12-14 seviyesinde

gerçekleşmesi öngörülen düşüşe bağlı olarak AquaCrop ve WOFOST- World Food Studies Simulation modelleri ile ortaya koydukları değerlendirmelerde buğday veriminde bazı bölgelerde %50'ye varan artış, bazı bölgelerde ise %34'e varan düşüş olacağını öngörmüştür (Konukçu, F., Deveci, H., Altürk, B., 2020). Şen ve diğerleri, WOFOST modelini kullanarak gerçekleştirdikleri çalışma, ülkemizin özellikle batı ve güney kıyılarında daha sık ve şiddetli kuraklıklarla birlikte birincil ve ikincil ürün mısır veriminde yüksek sıcaklık ve su stresi nedeniyle önemli düşüşler ve büyüme dönemlerinde kısılma yaşanacağını göstermektedir (Şen, B., Topçu, S., Türkeş, M., Şen, B., Warner, J.F., 2012).

Risk değerlendirmesinin bir diğer boyutunu ise uzaktan algılama, coğrafi bilgi sistemleri (CBS) ve erken uyarı sistemleri ile tarımsal alanların izlenmesini kapsayan yaklaşımlar oluşturmaktadır. Uydu tabanlı veriler (örn; NDVI-Normalized Difference Vegetation Index, EVI-Enhanced Vegetation Index, LST-Land surface temperature) bitki örtüsünün gelişimini, su stresini ve verim tahminlerini dinamik olarak değerlendirmeye olanak sağlamakta; meteorolojik erken uyarı sistemleriyle birleştirildiğinde tarımsal üretimde hem izleme hem de karar destek süreçlerini güçlendirmektedir (Bastiaanssen, W.G.M., Molden, D.J., Makin, I.W., 2000). Bu teknolojiler, özellikle kuraklık izleme, sel riski haritalama, sıcak hava dalgası uyarıları ve hastalık-zararlı erken tespitinde önemli katkı sağlamaktadır. Türkiye'de geliştirilen tarımsal erken uyarı sistemleri de (örn; TARBİL) bu yönüyle iklim risk değerlendirmesine kritik destek sunmaktadır.

Bu bilimsel ve teknolojik değerlendirmeler, iklim değişikliğinin tarımsal üretim üzerindeki etkilerini ortaya koymakla birlikte, risklerin yönetilebilmesi için ulusal ölçekte bütüncül uyum politikalarına duyulan ihtiyacı da açıkça göstermektedir. Bu nedenle, Türkiye'nin tarım sektörü için geliştirdiği ulusal uyum stratejileri, hem mevcut risklerin azaltılmasında hem de gelecekteki iklim

koşullarına dayanıklı üretim sistemlerinin oluşturulmasında kritik bir çerçeve sunmaktadır.

İklim Risklerinden Uyum Stratejilerine Geçiş

İklim değişikliği risk analizlerinin temel amacı, tarımsal üretimde uyum stratejilerinin geliştirilmesine bilimsel bir zemin oluşturmaktır. Risk değerlendirmeleri, hangi bölgelerin ve üretim sistemlerinin öncelikli müdahale gerektirdiğini ortaya koyarak, su yönetimi, ürün deseni değişikliği ve diğer uyum önlemlerinin planlanmasına katkı sağlamaktadır. Bu bağlamda, bilimsel analizlerin karar alma süreçlerine entegre edilmesi iklim değişikliğine uyum açısından kritik öneme sahiptir.

İklim değişikliği etkileri ile mücadelede tarımsal üretim açısından daha az su tüketen ürünlere geçiş, üretim ve geçim kaynaklarının çeşitlendirilmesi, ekim-dikim zamanlarının uyarlanması gibi bireysel önlemlerin daha yaygın olarak uygulandığı ancak son yıllarda ulusal ölçekte geliştirilen afet ve acil durum planlaması, sosyal koruma mekanizmaları, tarımsal yayım hizmetleri, sigorta uygulamaları gibi politika araçlarının da yaygınlaştığı görülmektedir. Bunun yanında iklim değişikliğine uyum amacıyla uygulanan ancak uzun vadede kırılganlığı azaltmak yerine artıran ya da yeni riskler yaratan politika ve uygulamaları tanımlayan maladaptasyon ise tarımsal üretim açısından önemli risk oluşturmaktadır. IPCC 6. Değerlendirme Raporu'na göre tarımsal kalkınma kapsamında uygulanan bazı faaliyetlerin, iklim değişikliğine uyum hedefi taşımamasına rağmen uzun vadede uyum kapasitesini olumsuz etkileyebildiği gösterilmiştir. Raporda maladaptasyon üç ana başlık altında sınıflandırılmıştır: kısa vadede fayda sağlarken gelecekteki uyum seçeneklerini kısıtlayan uygulamalar; kırılganlığı farklı toplumsal gruplara veya bölgelere kaydıran yaklaşımlar ve emisyonları artırarak ya da çevresel, sosyal ve ekonomik değerleri zayıflatarak sürdürülebilir kalkınmayı

olumsuz etkileyen stratejiler. Maladaptasyona verilen örnekler arasında su tasarrufu sağlayan damla veya yağmurlama sulama gibi teknolojilerin sulama yapılan alan miktarına bağlı olarak toplam su kullanımını arttırması, kahve ve kakao gibi ürünlerde tarımsal ormancılık (agroforestry) uygulamalarından yüksek girdili monokültüre dayalı üretim modellerine geçişin uzun vadede dayanıklılığı azaltması, dijital tarım uygulamaları gibi yüksek maliyetli teknolojilerin yalnızca belirli gruplar tarafından benimsenebilmesi ve büyük ölçekli sulama projelerinin su kaynakları ile ekosistemler üzerinde olumsuz etkiler yaratması gibi risklere yer almaktadır (Campbell, B., 2022; O'Neill, B., ve diğ., 2022).

Tarımsal üretimde iklim değişikliğine uyum kapasitesinin arttırılması için öne çıkan ilk alan, modern biyoteknoloji ve geleneksel ıslah yöntemleriyle iklim stresine daha dayanıklı çeşit ve ırkların geliştirilmesidir. Bununla birlikte, sosyoekonomik ve politik faktörler, özellikle riskin yüksek olduğu bölgelerde küçük ölçekli üreticilerin bu yeniliklere erişimini sınırlayabilmektedir. Üretim süreçlerinde ekim-dikim ve hasat zamanlarının değiştirilmesi, toprak işleme yöntemlerinin uyarlanması, hayvancılıkta otlatma ve sürü yönetiminin iklim koşullarına göre düzenlenmesi de önemli uyum uygulamaları arasında değerlendirilmektedir. Ürün, ırk ve üretim sistemlerinin iklim koşullarına daha uygun alternatiflerle değiştirilmesi yüksek bir potansiyel sunsa da, kültürel ve ekonomik engeller ile çeşitli çevresel ve ekonomik etkileşimlerin dikkate alınması da gerekmektedir. Su yönetimi, özellikle sulanabilir alanlarının arttırılması ve su verimliliğini artıran tekniklerin uygulanması yoluyla öne çıkan bir uyum alanı olmakla birlikte sulamanın çevresel ve sosyal etkilerinin dikkatle yönetilmesi gerekmektedir. Tarımsal sistemlerin çeşitlendirilmesi (ekim nöbeti, birlikte ekim, tarımsal ormancılık ve entegre üretim sistemleri vb.) iklim dayanıklılığını artırırken ekosistem ve gelir çeşitliliği

açısından da fayda sağlayabilmektedir. Ayrıca, hasat sonrası kayıpların azaltılması, depolama ve işleme tekniklerinin iyileştirilmesi ve soğuk zincirin güçlendirilmesi gibi tedarik zinciri önlemleri, iklim değişikliğinin gıda sistemleri üzerindeki etkilerini azaltmada önemli bir rol oynamaktadır (Campbell, B., 2022; O'Neill, B., ve diğ., 2022).

IPCC 6. Değerlendirme Raporu tarımsal üretimde iklim değişikliğine uyum eylemlerinin hayata geçirilmesi, hızlandırılması ve sürdürülebilmesi için önceliklendirilmesi gereken bir dizi kolaylaştırıcıyı tanımlamıştır. Uyum önlemlerinin çiftçi düzeyinde yaygınlaştırılmasını mümkün kılacak ortamı oluşturabilmek adına dikkatle ele alınması gereken bu kolaylaştırıcılar Tablo 1'de özetlenmiştir. Bu kapsamda politika ve kurumsal yapının güçlendirilmesi, sektörler arası ve çok düzeyli koordinasyonun artırılması, yoksulluk ve toplumsal cinsiyet temelli yapısal kırılganlıkların dikkate alınması, gençlerin sürece daha fazla dâhil edilmesi, paydaşların kapasite ve katılımının güçlendirilmesi, iklim bilgisi ve yayım hizmetlerinin geliştirilmesi ile sosyal koruma mekanizmalarının yaygınlaştırılması önemli katkılar sağlayacaktır. Tarım-gıda sistemlerinde beklenen dönüşümün, bu alanlarda uyumlu ve bütüncül yaklaşımların benimsenmesiyle desteklenmesi önerilmektedir (Campbell, B., 2022; O'Neill, B., ve diğ., 2022).

Tablo1 Tarımsal üretimde iklim değişikliğine uyum eylemlerini destekleyen kolaylaştırıcılar

Kolaylaştırıcı	Kapsamı
Yapısal Kırılganlıkların Ele Alınması	İklim değişikliği ve iklim dışı etkenlerin birlikte etkisi, özellikle küçük ölçekli üreticiler ekonomik koşulları açısından önem arz etmektedir. Yapısal kırılganlıklar kurumların kök nedenlerine odaklanan, sektörler arası ve çok düzeyli koordinasyon gerektiren bir yaklaşımla ele alınabilir. Bu açıdan toplumsal cinsiyet ve diğer sosyal eşitsizliklerin giderilmesi, kapsayıcı karar alma, kapasite geliştirme, hassas grupların kaynaklara erişimi, gençlerin

Kolaylaştırıcı	Kapsamı
	ve yerel bilginin sürece dahil edilmesi iklim dirençli dönüşüm için kritik önem arz etmektedir.
Siyasi Sahiplenme ve Süreklilik	Tüm yönetim düzeylerinde güçlü siyasi sahiplenme ve süreklilik, uyum eylemlerinin hızlandırılmasını sağlamaktadır. Uyum eylemlerinin yapısı gereği yüksek yatırım maliyetlerine sahip olmaları ve faydalarının daha uzun vadede ortaya konması nedeniyle politik kararlılıkla desteklenmeleri önem arz etmektedir. Kamu farkındalığının artırılması, uygulamaların takibi için şeffaflık ve hesap verebilirlik mekanizmalarının kurulumu, uyum önlemlerinin bütçe ve politika döngülerine entegre edilmesi ile izleme-değerlendirme süreçleri bu süreci destekleyebilecek adımlar arasında yer almaktadır.
Kurumsal Çerçevesel	Etkili bir uyum önlemleri stratejisi için kamu kurumları arasında koordinasyon sağlanması elzem olarak değerlendirilmektedir. Tek sektörlü politikalar, diğer hedeflerle çelişkilere ve uyumsuz uygulamalara yol açabileceğinden, esnek, çok sektörlü, kapsayıcı ve uzun vadeli planlama yaklaşımları, uyum eylemlerinin birçok sektör ve sistem için fayda üretmesini sağlayarak, maladaptasyon riskini azaltmaktadır.
Açık Hedef ve Önceliklere Sahip Politika, Piyasa ve Diğer Araçlar	Uyum ve sistem dönüşümünü destekleyen politika ve piyasa araçları arasında sübvansiyonların yeniden düzenlenmesi, olumsuz teşviklerin kaldırılması, sertifikasyonların geliştirilmesi, sürdürülebilir değer zincirlerine yatırım ve kapasite geliştirme sıralanabilir. Gıda tedarik zincirlerini kısaltmak ve yerel pazarları desteklemek odaklı kamu alımları ve yenilikçi kurumsal mekanizmalar üreticileri destekleyebilecek önlemler arasında değerlendirilmektedir.
Yeterli Finansal Kaynakların Harekete Geçirilmesi ve Erişimin Arttırılması	Finansman eksikliği en önemli engeller arasında değerlendirilmektedir. Mevcut durumda ağırlıklı olarak kamu yatırımlarına bağlı olan uyum finansmanının, özel sektör katılımı ile çeşitlendirilmesi, yenilikçi yatırım araçlarının ve emtia piyasalarının kullanımı, ölçüm ve kıyaslama altyapısının geliştirilmesi ile finansman akışının geliştirilebileceği değerlendirilmektedir.
Sigorta Mekanizmaları	Sigorta, özellikle tarımsal ürünlerin iklim risklerine karşı uyum kapasitesini arttırmak adına önemli bir finansal uyum aracıdır. Ürün ve alan bazlı tarım sigortaları uygulamaları, düşük maliyetle hava koşullarına bağlı

Kolaylaştırıcı	Kapsamı
	riskleri kapsayarak küçük üreticiler için erişilebilirlik sağlamaktadır.
Genişletilmiş İklim Hizmetleri, Yayım ve Erken Uyarı Sistemleri	Bilgi ve veri eksikliği, özellikle sosyoekonomik açıdan kırılgan üreticiler için önemli bir kısıt olarak değerlendirilmektedir. Yayım hizmetlerinin güçlendirilmesi, agroekoloji ve sürdürülebilir tarım uygulamaları ve ürün çeşitlendirme konularında bilgi aktarımı üreticilerin uyum kapasitelerinin artırılması mümkün olabilir. İklimsel parametrelere ilişkin öngörülerin yer aldığı erken uyarı sistemleri ile birlikte ürün bazlı piyasa koşulları gibi iklim dışı hizmetlerin de sunulması ile üretici bazında karar alma süreçlerinin iyileştirilmesi sağlanabilmektedir.
Sosyal Koruma	Sosyal korumayı içeren entegre ve çok sektörlü stratejiler etkili uyum yaklaşımları arasında öne çıkmaktadır. Hassas bölgelerde doğrudan mali desteklerin sağlanması, hava koşullarına bağlı sigorta uygulamaları, üretici birliklerince yönetilen depo vb. varlıkların oluşturulması gibi önlemler kısa vadede gıda güvenliğini desteklerken, uzun vadede dayanıklılığı artıran varlık birikimine katkı sağlayabilmektedir.

Bu çerçevede, ülkemizde seçilen üç havzada beklenen iklim değişikliğinin modellenmesi, su rezervlerinde öngörülen değişimlerin tahmin edilmesi, yeni iklim koşullarının tarımsal üretim üzerindeki etkilerinin değerlendirilmesi, üretim deseninin modellenmesi ve sosyoekonomik etkilerin belirlenmesine yönelik çalışmaları içeren **“ACLIFS – İklim Değişikliğinin Gıda Güvenliği Üzerindeki Etkilerinin Değerlendirilmesi ve Kırsal Toplulukların Dayanıklılığının Artırılması”** projesi Aralık 2023’te başlatılmıştır. Söz konusu proje kapsamında hazırlanan bu yayında, ilgili havzalarda gerçekleştirilen bölgesel iklim simülasyonları ile su potansiyeli üzerindeki etkilerin modellenmesine ilişkin çalışmaların sonuçlarına ikinci ve üçüncü bölümlerde yer verilmiştir. Havzalarda ürün deseni modellemesi amacıyla kullanılan uzaktan algılama temelli tekniklere ilişkin değerlendirmeler üçüncü bölümde sunulurken, son bölümde ise tarımsal üretimde iklim değişikliğine

uyum stratejilerinin belirlenmesine yönelik ulusal ölçekteki mevcut uygulamalar ile havza ölçeğinde geliştirilen öneriler ele alınmıştır.

Kaynaklar

- Ahmed, O., Faiz, M., Abdelali, L., Khoali, S., Pulvent, C., Mohamed, S., Mbaye, M.S., Glauben, T. (2025). Unlocking climate change resilience: socioeconomic factors shaping smallholder farmers' perceptions and adaptation strategies in Mediterranean and Sub-Saharan Africa regions. *Regional Sustainability*, s. 6-1, 100195.
- Bastiaanssen, W.G.M., Molden, D.J., Makin, I.W. (2000). Remote sensing for irrigated agriculture: examples from research and possible applications. *Agricultural Water Management*, s. 46/2, 137-155.
- BMİDÇS. (1992). *Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi*. Rio de Janeiro.
- BMİDÇS. (2025). *2025 NDC Synthesis Report*. Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi - United Nations Framework Convention on Climate Change: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/nationally-determined-contributions-ndcs/2025-ndc-synthesis-report#Just-transition> adresinden alındı
- Campbell, B. (2022). *Climate change impacts and adaptation options in the agrifood system – A summary of recent IPCC Sixth Assessment Report findings*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO).
- ÇŞİDB. (2025). *İklim Değişikliği*. T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı: <https://iklim.csb.gov.tr/> adresinden alındı
- IPCC. (2020). *The concept of risk in the IPCC Sixth Assessment Report: a summary of cross Working Group discussions*. Intergovernmental Panel on Climate Change.

IPCC. (2022). *The evidence is clear: the time for action is now. We can halve emissions by 2030*. Intergovernmental Panel on Climate Change: <https://www.ipcc.ch/2022/04/04/ipcc-ar6-wgiii-pressrelease/> adresinden alındı

Jones, J.W., Antle, J.M., Basso, B., Boote, K.J., Conant, R.T., Foster, I., Godfray, H.C.J., Herrero, M., Howitt, R.E., Janssen, S., Keating, B.A., Munoz-Carpena, R., Porter, C.H., Rosenzweig, C., Wheeler, T.R. (2017). Brief history of agricultural systems modeling. *Agricultural Systems*, s. 155, 204-254.

Kofi Adam, P. (2024). *The Socioeconomic Impact of Climate Change in Developing Countries in the Next Decades: A Review*. Johannesburg, South Africa: School of Economics and Finance, University of Witwatersrand.

Konukçu, F., Deveci, H., Altürk, B. (2020). Trakya Bölgesi'nde İklim Değişikliğinin Buğday Verimine Etkisinin AquaCrop ve WOFOST Modeller ile Tahmin Edilmesi. *Tekirdağ Ziraat Fakültesi Dergisi*, s. 17, 1, 77-96.

MBS. (2024). *Mevzuat Bilgi Sistemi*. <https://www.mevzuat.gov.tr/> adresinden alındı

NASA. (2025). *US National Aeronautics and Space Administration*. Global Climate Change- Vital Signs of the Planet: <https://climate.nasa.gov/vital-signs/carbon-dioxide/> ve <https://climate.nasa.gov/vital-signs/global-temperature/> adresinden alındı

O'Neill, B., M. van Aalst, Z. Zaiton Ibrahim, L. Berrang Ford, S. Bhadwal, H. Buhaug, D. Diaz, K. Frieler, M. Garschagen, A. Magnan, G. Midgley, A. Mirzabaev, A. Thomas, and R. Warren. (2022). *2022: Key Risks Across Sectors and Regions*. In: *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and*

Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK, New York, NY, USA. pp. 2411–2538, doi:10.1017/9781009325844.025: Cambridge University Press.

Şen, A.S., Huzur, D., Konukçu, F. (2024). Modelling the Adaptation of Some Cultural Plants Produced in Thrace Region to Climate Change. *Jorunal of Tekirdağ Agricultural Faculty*, s. 10.33462/jotaf.1312707.

Şen, B., Topçu, S., Türkeş, M., Şen, B., Warner, J.F. (2012). Projecting climate change, drought conditions and crop productivity in Turkey. *Climate Research*, s. 52, 175-191.

TÜİK. (2025). *Ulusal Sera Gazı Emisyon Envanteri Raporu - Turkish Greenhouse Gas Inventory (1990-2023)*. Türkiye İstatistik Kurumu.

WMO. (2025). *WMO confirms 2024 as warmest year on record at about 1.55°C above pre-industrial level.* World Meteorological Organization: https://wmo.int/news/media-centre/wmo-confirms-2024-warmest-year-record-about-155degc-above-pre-industrial-level?utm_source=chatgpt.com adresinden alındı

Yeşilköy, S., Şaylan, L. (2021). Yields and water footprints of sunflower and winter wheat under Different Climate Projections. *Journal of Cleaner Production*, s. 298,126780.

Yetik, A.K., Şen, B. (2022). Evaluation of the Impacts of Climate Change on Irrigation Requirements of Maize by CROPWAT Model. *Journal of Crop Health*, s. 75, 1297-1305.

BÖLÜM 0

YÜKSEK ÇÖZÜNÜRLÜKLÜ BÖLGESEL İKLİM SİMÜLASYONLARI

YURDANUR ÜNAL¹

CEMRE YÜRÜK SONUÇ²

NİSA YAYLACI³

İBRAHİM AKBAYIR⁴

Giriş

İklim değışikliğı, en yalın haliyle iklim sisteminin uzun dönemli ortalamalarında ve istatistiksel özelliklerinde onlarca yıl ve daha uzun zaman ölçeklerinde gözlenen kalıcı ve anlamlı değışimler olarak tanımlanır. Bu nedenle iklim değışikliğini yalnızca “ani, şiddetli ve önemli hava olayları” ile özdeşleştirmek kavramsal olarak yetersizdir. Aşırı olaylar, iklimdeki uzun dönemli kaymaların doğrudan kendisi değil, bu kaymaların en görünür sonuçlarıdır.

¹ Profesör, İstanbul Teknik Üniversitesi, İklim Bilimi ve Meteoroloji Mühendisliği Bölümü, Orcid: 0000-0003-2006-1372

² Doktor, İstanbul Teknik Üniversitesi, İklim Bilimi ve Meteoroloji Mühendisliği Bölümü, Orcid: 0000-0002-8585-1319

³ Mühendis, İstanbul Teknik Üniversitesi, İklim Bilimi ve Meteoroloji Mühendisliği Bölümü

⁴ Yüksek Mühendis, İstanbul Teknik Üniversitesi, İklim Bilimi ve Meteoroloji Mühendisliği Bölümü, Orcid: 0000-0001-8080-6829

Günümüzde bu kaymaların başlıca itici gücü, fosil yakıt kullanımı, sanayi süreçleri, arazi kullanımındaki dönüşümler ve belirli aerosol türleri gibi insan kaynaklı etmenlerdir. Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli'nin (IPCC) değerlendirme raporlarına göre, son yüzyıl boyunca gözlenen küresel ısınmanın büyük bölümü insan faaliyetlerine bağlı sera gazı birikiminden kaynaklanmakta, iklimin doğal değişim nedenleri bu ısınmanın yalnızca küçük bir kısmını açıklayabilmektedir (IPCC, 2014; IPCC, 2021). Buna bağlı olarak küresel ortalama yüzey sıcaklığı sanayi devrimi öncesine göre yaklaşık 1,1–1,3°C artmış ve bu eğilim ivmelenerek sürmektedir.

Sanayileşme öncesine göre 2°C ve üzerindeki ısınma düzeyleri, küresel ölçekte hem insan toplulukları hem de doğal ve ekolojik sistemler açısından “ciddi ve tehlikeli” risklerin olasılığını ve şiddetini belirgin biçimde artırmaktadır. 1,5°C ve 2°C gibi eşiklerin aşılması, tekil ve ani bir kırılma noktasından çok, iklim risklerinin doğrusal olmayan şekilde hızlandığı bir sürece işaret etmektedir (Oppenheimer ve diğ., 2014; IPCC, 2018). Bu ısınma seviyelerine yaklaştıkça ve bunlar aşıldıkça sıcak hava dalgaları, şiddetli yağışlar, fırtınalar, seller ve kuraklıklar gibi aşırı hava ve iklim olaylarının sıklığı, süresi ve şiddeti artar. Farklı afet türlerinin aynı zaman ve mekân içinde üst üste binmesiyle bileşik riskler güçlenir. Bu süreç ekosistemlerin işleyişini bozar, türlerin dağılım alanlarını ve göç yollarını değiştirir, bazı türler için yok olma riskini büyütür ve biyolojik çeşitlilikte geri döndürülmesi zor kayıplara yol açar. Dolaylı etkiler ise gıda güvenliği, su kaynakları, insan sağlığı, altyapı güvenliği ve ekonomik kalkınma üzerinde giderek daha karmaşık ve birbirini tetikleyen olumsuz sonuçlar üretir.

Artan sera gazı emisyonlarına bağlı küresel ısınmanın en kritik sonuçlarından biri, küresel ve bölgesel hidrolojik döngü üzerinde yarattığı dönüşümdür. Atmosferin ısınması, havanın nem taşıma kapasitesini artırır ve buharlaşma, terleme, yoğunlaşma ve yağış süreçlerinin mekânsal ve zamansal desenlerini değiştirir. Böylece su

döngüsü hem güçlenir hem de yeniden şekillenir. Birçok bölgede yalnızca toplam yağış miktarı değil, yağışın yıl içindeki dağılımı, yağış rejimleri ve yağışın tipi ile şiddeti de değişmektedir. Bir yandan kısa süreli şiddetli yağışlar ve taşkın riski artarken, diğer yandan uzun süreli meteorolojik, hidrolojik ve tarımsal kuraklıkların görülme olasılığı yükselmektedir (Brutsaert ve Parlange, 1998; Solomon ve diğ., 2007; Hagemann ve diğ., 2013; Dufresne ve diğ., 2013; IPCC, 2021; Pratap ve Markonis, 2022; Ehtasham ve diğ., 2024). Su kaynaklarının niceliğinde ve zamansal dağılımında ortaya çıkan bu değişimler, tarımsal üretim, havza ölçekli su yönetimi, ekosistem hizmetleri, hidroelektrik ve termik enerji üretimi, kentlerin içme suyu arz güvenliği ve kırsal geçim kaynakları üzerinde geniş kapsamlı etkiler doğurur. Etkilerin şiddeti ve yıkıcılığı, toplumların kırılganlık düzeyi, uyum kapasitesi, yönetim kalitesi ve mevcut sosyoekonomik eşitsizliklerle yakından ilişkilidir.

Son yıllarda küresel ortalama sıcaklıklardaki artış ve yağış rejimlerinde gözlenen kaymalar, iklimsel değişkenliği ve öngörülemezliği artırmış, hidrometeorolojik aşırı olayların sıklığı ve şiddetinde belirgin bir artışa yol açmıştır. IPCC'ye göre insan kaynaklı iklim değişikliği, atmosferik buharlaşma talebini artırarak Akdeniz havzası da dâhil olmak üzere birçok bölgede daha sık, daha uzun süreli ve daha şiddetli tarımsal ve ekolojik kuraklıkların ortaya çıkmasına katkıda bulunmaktadır (IPCC, 2021).

Akdeniz Havzası hem fiziksel iklim göstergeleri hem de iklim etkileri açısından küresel ölçekte bir “iklim değişikliği sıcak noktası” olarak kabul edilmektedir. Artan sıcaklıklar, değişen yağış rejimleri ve bunlara eşlik eden çok sayıda bileşik iklim tehlikesi bölgeyi ciddi biçimde tehdit etmektedir. 1980'lerden bu yana Akdeniz Havzası'ndaki yüzey sıcaklıklarının küresel ortalamadan daha hızlı arttığı gösterilmiştir. Mevcut iklim projeksiyonları, Akdeniz kara alanlarında gelecekteki ısınmanın küresel ortalamayı belirgin biçimde aşacağını ortaya koymaktadır (IPCC, 2021). Aynı

dönemde, bölgedeki yağışların da büyük ölçekli atmosferik dolaşım örüntülerindeki değişimlere yanıt olarak güçlü bir mekânsal ve zamansal değişkenlik sergilediği görülmektedir. Hadley hüccresinin genişlemesi ve fırtına izlerinin konum değiştirmesi gibi süreçler bu değişkenliğin önemli bileşenleridir (IPCC, 2021; Vicente-Serrano ve diğ., 2025).

Son birkaç on yıla ait gözlemler ve iklim modeli projeksiyonları, yağış paternlerinde belirgin bir rejim değişikliğinin ortaya çıkabileceğini ve Akdeniz’deki birçok alt havzada hâlihazırda genel bir azalma eğilimi bulunduğunu göstermektedir. Artan sıcaklık ile azalan ya da yağış paternlerindeki değişim eğilimlerinin birleşmesi, toprak nemi ve yenilenebilir su kaynakları üzerinde ek bir baskı yaratmaktadır ve havzadaki kuraklıkların sıklığını, süresini ve şiddetini şimdiden artırmış durumdadır. Küresel ortalama sıcaklıkların sanayi öncesine göre 2°C artması halinde Akdeniz havzasının birçok bölgesinde aşırı tarımsal kuraklık olaylarının sıklığının yüzde 150–200 aralığında artacağı, 4°C’lik bir ısınma senaryosunda ise bu artışın yüzde 200’ün üzerine çıkacağı öngörülmektedir (IPCC, 2022). Bu bulgular, Akdeniz Havzası’nda iklim değişikliğinin su kaynakları, tarımsal üretim ve ekosistemler üzerindeki baskıyı gelecekte daha da artıracağına işaret etmektedir.

Türkiye üzerindeki iklim değişimi, farklı yönleriyle pek çok çalışmada ele alınmıştır. Gözlemsel analizler ve geleceğe yönelik iklim projeksiyonlarının büyük kısmı, başlıca iklim değişkenleri olan sıcaklık, yağış ve uç olaylar üzerine odaklanmaktadır (Ünal ve diğ., 2025; Sonuç vd. 2023; 2025a; 2025b; Önal ve Ünal, 2003; Ünal, 2006; Önal ve Semazzi, 2009; Bozkurt ve diğ., 2012; Demircan, 2017; Önal, 2012). Bu çalışmalar, yüzyılın sonuna doğru sıcaklıkların daha da artacağını ve Güney Avrupa ile Akdeniz Havzası’nda yağışlarda önemli azalma eğilimleri görülebileceğini ortaya koymaktadır. Güneydoğu Avrupa ve Doğu Akdeniz bölgesinde yer alan Türkiye için, iklim değişikliğinin su

kaynaklarına ve hidrometeorolojik aşırılıklara etkilerinin değerlendirilmesinde, geleceğe yönelik projeksiyonların daha sofistike, yüksek çözünürlüklü modellerle gerçekleştirilmesi kritik önem taşır.

Yer Sistemi Modellerinin doğrudan bölgesel etki analizlerinde kullanımı, yaklaşık 100–400 km aralığındaki kaba yatay ızgara çözünürlüğü nedeniyle sınırlı kalmaktadır. Bu çözünürlük düzeyi, topoğrafya, arazi kullanımı, kıyı ile iç kesim karşıtlıkları, kara ile atmosfer etkileşimleri ve konvektif fırtınalar gibi küçük ölçekli süreçlerin gerçekçi biçimde temsil edilmesini güçleştirir. Ölçek uyumsuzluğunu azaltmak için çoğunlukla dinamik veya istatistiksel ölçek küçültme yaklaşımı kullanılır. Konveksiyona izin veren bölgesel iklim modellerinin kullanımı, özellikle karmaşık topoğrafyanın ve güçlü kara–deniz karşıtlıklarının hâkim olduğu Türkiye ve Akdeniz Havzası gibi bölgelerde ayrı bir önem taşımaktadır. Geleneksel, derin konveksiyonu parametrik olarak temsil eden bölgesel modeller, şiddetli kısa süreli yağışlar, yoğun konvektif fırtınalar, orografik yağış bantları ve gün içi yağış döngüsü gibi süreçlerde belirgin yanlılıklar üretebilmektedir. Yatay çözünürlüğün konveksiyona izin verecek düzeye indirilmesi, bu süreçlerin büyük bölümünün parametrizasyon yerine model denklemleri aracılığıyla doğrudan çözülmesini sağlar. Bu yaklaşım, bir gün içerisinde oluşan yağış uç değerlerinin istatistiksel dağılımlarının daha gerçekçi elde edilmesine, yerel sirkülasyonlar ile toprak nemi geri beslemelerinin daha iyi temsil edilmesine ve böylece taşkın, ani sel ve kısa süreli şiddetli yağış gibi etki odaklı göstergelerin daha güvenilir projeksiyonlarına imkân verir. Dolayısıyla, iklim risklerinin bölgesel ölçekte değerlendirilmesi ve uyum stratejilerinin tasarlanması için, konveksiyona izin veren yüksek çözünürlüklü modellerin kullanımı, yer sistem modellerinden elde edilen küresel iklim sinyalinin yalnızca bir ayrıntılandırması değil, aynı zamanda aşırı olay dinamiklerinin

fiziksel olarak tutarlı şekilde çözümlenmesi açısından da zorunlu bir adımdır.

Bu çalışma, Yer Sistemi Modellerinden elde edilen küresel iklim bilgisini ardışık dinamik ölçek küçültme adımlarıyla 12 km ve konveksiyona izin veren 2,5 km yatay çözünürlüğe indirgenmiş COSMO-CLM simülasyonları üzerinden ayrıntılandırarak, Türkiye'nin güney batısında iklim değişikliğine bağlı aşırı iklim olaylarını nicel olarak incelemeyi amaçlamaktadır. Temel hedef, tarihsel dönem (1995–2014) ile SSP3-7.0 senaryosu altında öngörülen iki gelecek on yıllık dönemde (2040–2049, 2070–2079) şiddetli yağışlar, ekstrem sıcaklıklar, kuraklık ve benzeri hidrometeorolojik aşırılıkların mekânsal ve zamansal özelliklerini, uluslararası literatürde yaygın olarak kullanılan tarımsal faaliyetleri etkileyen iklim endeksleri yardımıyla ortaya koymaktır. Bu çerçevede çalışma, bir yandan yüksek çözünürlüklü, konveksiyona izin veren bölgesel iklim benzeşimlerinin aşırı olay istatistiklerine sağladığı katkıyı değerlendirmeyi, diğer yandan da Türkiye ve çevresindeki iklim risklerinin etki ve uyum analizlerine temel oluşturabilecek iklim endekslerindeki beklenen değişimleri ortaya koymayı hedeflemektedir.

Çalışma Alanı

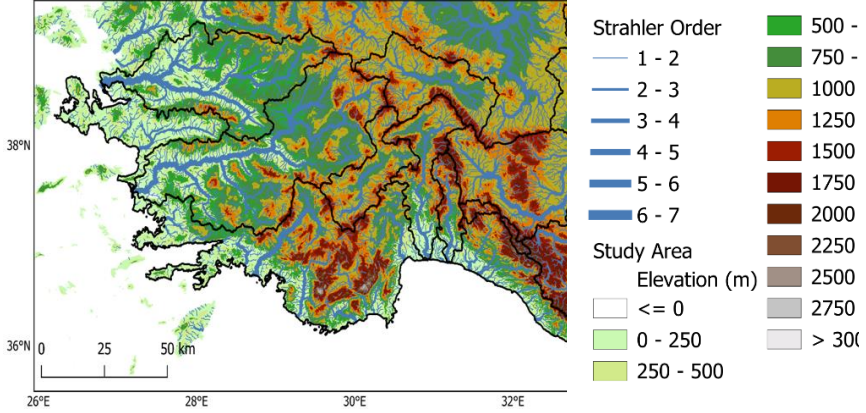
Bu çalışma, Türkiye'nin güneybatı kesimini kapsayan ve yaklaşık 27°–34° doğu boylamları ile 36°–39° kuzey enlemleri arasında yer alan bir bölgeye odaklanmaktadır. Şekil 1'de gösterildiği üzere, çalışma alanı batıda Ege Denizi, güneyde Akdeniz ile çevrili olup Doğu Akdeniz, Antalya, Burdur Gölleri, Batı Akdeniz, Büyük Menderes, Küçük Menderes, Konya ve Afyon-Akarçay havzalarının tamamını, Kuzey Ege, Susurluk, Sakarya ve Kızılırmak havzalarının ise kısmi bölümlerini içermektedir. Topografya, kıyı boyunca alçak kotlu vadiler ve ovalardan iç kesimlere doğru 1500–2000 m'ye ulaşan platolar ile 3000 m'yi

aşabilen dağ sıralarına kadar uzanan belirgin bir yükselti gradyanı sergilemekte, bu da karmaşık fizyografıyı ve güçlü orografik etkileri beraberinde getirmektedir. (Atalay, 1983).

Bölge, iklimsel açıdan Akdeniz ve karasal iklim tiplerinin yan yana ve iç içe geçtiği bir geçiş kuşağını temsil etmektedir. Kıyı ve deniz etkisine açık yamaçlarda Akdeniz iklimi hüküm sürmekte, sıcak ve kurak yazlar ile ılıman ve yağışlı kışlar gözlenmektedir. Daha yüksek rakımlarda Akdeniz dağ iklimi koşulları baskın hale gelirken, doğuya ve iç kesimlere doğru soğuk kışlar ve görece ılımlı yazlarla karakterize edilen karasal iklim özellikleri belirginleşmektedir. Bu iklimsel çeşitlilik, bitki örtüsüne ve arazi kullanımına da yansımakta, kıyı ve alçak kotlarda kızılçam ormanları, maki formasyonları ve zeytin, asma, turunçgil gibi yüksek değerli tarımsal ürünler öne çıkarken, iç kesimlerde bozkır formasyonları, kuraklığa dayanıklı meşe ormanları ve ağırlıklı olarak tahıl tarımı (buğday, arpa) ile sulamalı tarım alanları (örneğin şeker pancarı) baskın hale gelmektedir.

Subtropikal kuşak ile Akdeniz ve karasal iklimler arasındaki bu geçiş konumu, güneybatı Türkiye'yi hem biyocoğrafik hem de tarımsal açıdan yüksek öneme sahip, ancak aynı zamanda iklim değişikliğine karşı son derece hassas bir bölge haline getirmektedir. Toprak nemi dinamiklerindeki değişiklikler, artan kuraklık sıklığı ve şiddeti ile birleştiğinde, bölgenin tarımsal üretim kapasitesi, su kaynakları yönetimi ve ekosistem bütünlüğü üzerinde ciddi baskılar yaratma potansiyeline sahiptir. Bu nedenle, güneybatı Türkiye'de iklim aşırılıklarının mekânsal ve zamansal özelliklerinin yüksek çözünürlüklü iklim projeksiyonları ve iklim endeksleri yardımıyla ayrıntılı biçimde incelenmesi hem sektörel planlama hem de iklim uyum stratejilerinin geliştirilmesi açısından kritik önem taşımaktadır.

Şekil 1 Çalışma alanı ve topoğrafyası.



Yöntem

Bölgesel İklim Modeli COSMO-CLM

Çalışma kapsamında, yüzey-atmosfer etkileşimlerini daha gerçekçi biçimde temsil edebilmek amacıyla yaklaşık 2,5 km yatay çözünürlükte konveksiyon çözümlemesi yapabilen COSMO-CLM (Böhm ve diğ., 2006; Rockel ve diğ., 2008) bölgesel iklim modeli kullanılmıştır. COSMO-CLM, büyük ölçekli atmosferik sinyalleri daha ayrıntılı bölgesel ölçeklere indirgemek için CLM-Topluluğu tarafından Almanya Meteoroloji Servisi'nin Bölgesel Modeli (LM) temel alınarak geliştirilmiş bir sınırlı alan atmosfer modelidir. Modelin çıkışındaki temel amaç, hem operasyonel sayısal hava tahminlerinde (NWP) hem de konsorsiyum üyeleri tarafından yürütülen mezo-β ve mezo-γ ölçekli araştırmalarda kullanılabilecek yüksek çözünürlüklü atmosferik simülasyonlar üretmektir. Ayrıca, model lisans anlaşmaları kapsamında çeşitli ulusal meteoroloji hizmetleri, üniversiteler ve araştırma kurumları tarafından da yaygın olarak kullanılmaktadır.

Model, herhangi bir ölçek yaklaşımı kullanmaksızın nemli atmosfer koşullarında hidrostatik olmayan, sıkıştırılabilir akışın davranışını tanımlayan hidro-termodinamik denklemleri

çözmektedir (Böhm ve diğ., 2006). Araziyi takip eden döndürülmüş coğrafi koordinatlar ile tanımlanan sistem, yükseklik esasına dayalı hibrit Gal-Chen koordinat sistemini (Gal-Chen ve Somerville, 1975) temel alır. Yatayda Arakawa C tipi ızgara, düşeyde ise kademeli Lorenz grid yapısı kullanılmaktadır. Model denklemleri, ikinci mertebeden sonlu fark yöntemi ile sayısal olarak çözülmekte (Doms ve Baldauf, 2018) ve zaman entegrasyonu için Runge–Kutta tabanlı teknikler uygulanmaktadır.

Ayrıca, CCLM atmosferde gerçekleşen fiziksel süreçleri temsil etmek amacıyla, doğrudan çözülemeyen süreçler için mikrofizik, radyasyon, yüzey transfer şeması gibi çeşitli fiziksel parametrizasyonlar içermektedir. Model, mikrofizik şeması kapsamında iki kategorili buz şemasına ek olarak, konveksiyona izin veren çözünürlüklerde dikkate alınması gereken grezil (graupel) fazını da içeren üç kategorili buz şeması seçeneğine sahiptir (Seifert ve Beheng, 2006). Radyasyonun parametrizasyonu, radyatif transfer için genel denklemin δ -iki akım versiyonu ile formüle edilmektedir (Ritter ve Geleyn, 1992). Toprak neminin temsili ise, orografik su akışını da dikkate alan yeni bir formülasyona sahip 10 katmanlı TERRA_ML toprak modeli aracılığıyla gerçekleştirilmektedir (Schlemmer ve diğ., 2018).

Bölgesel İklim Modeli ile Dinamik Ölçek Küçültme Yaklaşımı

Bu çalışmada dinamik ölçek küçültme yöntemi benimsenmiş ve bölgesel iklim modeli olarak COSMO-CLM tercih edilmiştir. Model, Türkiye bölgesi üzerinde $0,11^\circ$ (yaklaşık 12 km) yatay çözünürlükte çalıştırılmıştır. Başlangıç ve yanal sınır koşulları, CMIP6 arşivinde yer alan MPI-ESM-HR modelinin çıktılarından türetilmiştir. Sürücü model MPI-ESM-HR'nin Türkiye üzerinde yüksek performans sergilediği daha önceki karşılaştırmalı çalışmalarla gösterilmiştir (Bağcı ve diğ., 2021). Dinamik ölçek küçültme sayesinde sürücü yer sistemi modelinin büyük ölçekli

iklim sinyali korunurken, 12 km çözünürlüğün sağladığı ayrıntı ile topoğrafik yükselti farkları, orografik yağış artışları, kara–deniz meltemleri ve sınır tabakası süreçleri daha gerçekçi biçimde temsil edilmektedir.

Bu 12 km çözünürlüklü bölgesel iklim simülasyonları temel alınarak tarihsel dönem (1995–2014) için ve SSP3-7.0 senaryosu altında iki gelecek on yıllık dönem (2040–2049 ve 2070–2079) için COSMO-CLM modeli ile konveksiyona izin veren yüksek çözünürlüklü benzeşimler Şekil 1 ile gösterilen çalışma alanı üzerinde gerçekleştirilmiştir. Yatay çözünürlük $0,025^\circ$ düzeyine (yaklaşık 2,5 km) indirilmiştir. Bu çözünürlük, derin konveksiyon parametrizasyonunun kapatılmasına ve yalnızca sığ konveksiyon süreçlerinin parametrik olarak temsil edilmesine olanak verir. Böylece derin konveksiyon ve orografik yağış süreçleri model tarafından açıkça çözülür. Günlük döngüler, topoğrafyadan kaynaklanan yerel rüzgâr sistemleri ve kıyı–iç kesim etkileşimleri gibi küçük ölçekli dinamik süreçler daha gerçekçi biçimde temsil edilebilir. Özellikle şiddetli yağışlar ve sıcak hava dalgaları gibi aşırı iklim olaylarının büyüklük ve sıklığındaki değişimlere ilişkin projeksiyonların güvenilirliği bu sayede artar. Her iki çözünürlük için kullanılan model konfigürasyonları Tablo 1 ile verilmiştir.

Tablo 1 Her iki çözünürlük için model konfigürasyonları.

	Çalışma Alanı	
Çözünürlük	0.11°	0.025°
Düşey Seviyeler	40 seviye	50 seviye
Başlangıç ve Sınır Verisi	MPI-ESM-HR	FNEST
Mikrofizik Şeması	2-Kategorili Buz Şeması	3-Kategorili Buz Şeması
Konveksiyon Şeması	Tiedtke, 1989	Shallow Tiedtke

	Çalışma Alanı	
Radyasyon Şeması	Ritter ve Geleyn, 1992	Ritter ve Geleyn, 1992
Arazi Yüzey Şeması	TERRA_ML (Heise ve diğ., 2006)	TERRA_ML
Arazi Kullanım Verisi	GLOBECOVER (Arino ve diğ., 2007)	GLOBECOVER
Toprak Verisi	FAO-DSMW (FAO, 2025)	FAO-DSMW
Dönemler	RF: 1995-2014, SSP3-7.0: 2015-2099	RF: 1995-2014, SSP3-7.0: 2040-2049, 2070-2079

Çalışmada kullanılan SSP3-7.0 senaryosu, 2100 yılına kadar yaklaşık 7 W m^{-2} ek ışınlamaya ulaşan yüksek zorlama düzeyine sahip bir iklim yörüngesini temsil etmektedir (O'Neill, B. ve diğ., 2016). Bölgesel ölçekte kritik iklim etkilerinin ve kırılganlıkların üst düzeyde incelenmesine imkân sağlayan güçlü bir iklim değişim stresi sunduğu için tercih edilmiştir. Son dönemde yapılan değerlendirmeler, SSP5-8.5/RCP8.5 gibi daha uç senaryoların uzun vadeli enerji yörüngeleri açısından daha az olası olduğunu vurgulamaktadır (Hausfather ve Peters, 2020; IPCC, 2021). Bu nedenle çalışmada SSP3-7.0'ın senaryosu tercihi güncel literatürle uyum göstermektedir. Model konfigürasyonunda yüzey yakınındaki akıların ve düşey çözünürlüğün artırılması, konveksiyonu tetikleyen fiziksel mekanizmaların daha doğru temsil edilmesini ve arazi kaynaklı yerel sirkülasyonların daha hassas hesaplanmasını hedefler. Bu amaçla konveksiyona izin verev iklim simülasyonlarında düşey model seviye sayısı 40'tan 50'ye çıkarılmıştır. Yüksek düşey çözünürlüklü bu tasarım, özellikle şiddetli yağışlar, sıcak hava dalgaları ve fırtınalar gibi aşırı iklim olaylarının benzeşimlerindeki tutarlılığı güçlendirir. Böylece etki ve uyum analizlerinin gerektirdiği yüksek mekânsal ayrıntı ile fiziğe dayalı temsiliyet birlikte sağlanmış olur.

Konveksiyona izin veren (< 3 km) çok yüksek mekânsal çözünürlüklü bölgesel iklim simülasyonları, fiziksel süreçleri daha iyi temsil etseler de; bulut mikrofiziği, radyasyon, yüzey-atmosfer etkileşimleri ve türbülans için kullanılan parametreleştirmelerden kaynaklanan belirsizlikleri, sürücü model ile sınır/başlangıç koşullarından taşınan yanlılıkları tamamen ortadan kaldıramaz. Noktasal gözlemler ile alansal ızgara hücreleri arasındaki temsil farkları, arazi kullanımı ve insan etkilerinin eksik ya da yalın tanımlanması da, iklim değişkenlerinin hem mutlak değerlerinde hem de istatistiksel dağılımlarında yanlılıklara yol açar. Bu yanlılıklar, hidroloji, tarımsal verim, enerji talebi ve insan sağlığı gibi mutlak değerlere duyarlı etki çalışmalarında sonuçları önemli ölçüde saptırabilir. Bu nedenle, durağanlık varsayımı dikkatle sınanarak ve mevsimsel ile alt-günlük zaman ölçekleri gözetilerek yapılacak bias düzeltmesi, hem ortalamanın hem de varyans/kuyruk davranışlarının yerel topoğrafya ve orografik yağış koşulları altında daha gerçekçi temsil edilmesini ve buna bağlı olarak etki değerlendirmelerinin güvenilirliğini sağlar.

Bu çalışmada iklim simülasyonlarının yatay çözünürlüğü 2,5 km olduğundan ve çalışma alanı için bu çözünürlükte gridlenmiş gözlemsel veri seti bulunmadığından, model çıktılarında bias düzeltmesi için basit delta değişimi yaklaşımı benimsenmiştir. Amaç, iklim değişkenlerinin (örneğin sıcaklık ve yağış) havza genelindeki ortalama mutlak değerlerini, gözleme dayalı havza ortalamalarına mümkün olduğunca yaklaştırmaktır. Bu kapsamda, modelin referans dönemine ait tüm alan üzerindeki yıllık ortalama sıcaklık ve yağış değerleri, ERA5-Land re-analiz verisinin karşılık gelen ortalamaları ile karşılaştırılmış; sıcaklık için fark, yağış için oran kullanılarak simülasyonların çalışma alanı ortalama koşulları re-analiz verisine yaklaştırılmıştır. Daha düşük çözünürlüklü verinin yüksek çözünürlüğe interpolate edilmesiyle elde edilecek bir alan verisi üzerinden grid bazında yanlılık düzeltmesi yapılmasından

özellikle kaçınılmıştır; zira bu tür bir yaklaşım, yüksek çözünürlüğün sunduğu ayrıntılı topoğrafya, arazi kullanım tipleri ve bunların büyük ölçek atmosfer sirkülasyonu ile etkileşimi sonucu ortaya çıkan yerel fiziksel ve dinamik süreçleri zayıflatacaktır. Bu nedenlerle, burada kullanılan delta değişimi yöntemi, modelin yerel iklim değişikliği sinyalini koruma açısından daha güvenli olup, mutlak değer transferi yerine gelecekteki nispi değişimi öne çıkardığı için kararlılık/stasyonellik varsayımına da daha az bağımlıdır.

Tarım Sektöründe Etkili İklim Endeksleri

Aşırı hava olaylarındaki gelecekteki değişimleri belirlemek, azaltım önlemlerinin geliştirilmesi, uyum stratejilerinin uygulanması ve iklim değişikliğinin etkilerinin yönetimine yönelik planlama yaklaşımlarının değerlendirmesi açısından hayati öneme sahiptir. Bu çalışma kapsamında, tarımsal üretim ve hayvancılık için önem arz eden Tablo 2’de listelenen iklim ekstrem endeksleri 0,025° çözünürlükte elde edilen COSMO-CLM simülasyonlarının çıktıları kullanılarak hesaplanmıştır. Her bir endeksin açıklaması yine Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2 Tarım sektöründe etkili iklim endeksleri ve açıklamaları.

TX35	Maksimum sıcaklığın 35 °C veya üstü olduğu gün sayısı
FD	Don günleri sayısı
Rx1gün	Günlük maksimum yağış miktarı
Rx5gün	5 günlük ardışık maksimum yağış miktarı
SPI	Standartlaştırılmış yağış endeksi
SPEI	Standartlaştırılmış yağış evapotranspirasyon endeksi
GDD	Büyüme derece günler

TX35, günlük maksimum sıcaklığın 35 °C veya üstü olduğu günlerin bir yıldaki sayısını ifade etmektedir (Denklem 1). Burada i güne denk gelmektedir.

$$TX35 = \sum_{i=1}^{365} \text{Eğer}(T_{maks_i} \geq 35 \text{ }^{\circ}\text{C}) \quad (1)$$

TX35 endeksi, bitkilerin maruz kaldığı sıcaklık stresi analizlerinde kullanılan bir göstergedir. 35 °C ve üstündeki sıcaklıklar bitkinin su stresine girmesine neden olarak evapotranspirasyonu artırır. Su stresine paralel olarak bitkinin fotosentez-solunum dengesi bozulur. Yüksek sıcaklıklarda fotosentez hızı azalırken, solunum hızı artar. Bu durum net karbon asimilasyonunu düşürdüğü için biyokütle de azalma meydana gelir (Zhao ve diğ., 2017). Yüksek sıcaklıklar ayrıca, bitkinin gelişim evrelerini etkileyerek tarımsal ürünlerin kimyasal bileşiminin ve ticari kalitesinin değişmesine neden olmaktadır. (Hatfield ve Prueger, 2015). Bu nedenle TX35 endeksi, birçok araştırmada büyüme koşullarındaki değişimleri ve sıcaklık stresinin ürün verimine olası etkilerini incelemek amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır.

Don olan günlerin sayısı (Frost Day), günlük minimum hava sıcaklığının 0 °C'nin altına düştüğü günlerin toplamıdır (Peterson vd., 2001). Bitkilerde don hasarı, özellikle çiçeklenme döneminde meydana geldiğinde ciddi ekonomik kayıplara neden olmaktadır (Rigby ve Porporato, 2008). Bu endeks, Dünya Meteoroloji Örgütü'nün (WMO) ETCCDI (Expert Team on Climate Change Detection and Indices) tarafından standartlaştırılmış iklimsel ekstrem göstergelerinden biridir (Peterson ve diğ., 2001). Denklem 2 kullanılarak elde edilmektedir.

$$FD = \sum_{i=1}^{365} \text{Eğer}(T_{min_i} < 0 \text{ }^{\circ}\text{C}) \quad (2)$$

Rx1gün (Denklem 3), belirli bir zaman dilimi içerisinde ölçülmüş en yüksek 1 günlük toplam yağış miktarıdır.

$$Rx1gün_j = \text{maks}(RR_{ij}) \quad (3)$$

Burada j periyodu, i ise ölçülen günlük yağış miktarını ifade etmektedir (Climdex, t.y.). Bu endeks belli bir periyot için yağış ekstremlerinin bulunmasında, aşırı yağışların sıklığı ve şiddetinin takibinde, şehir altyapısı planlamasında kullanılmaktadır (Felix ve diğ., 2021)

$Rx5gün$ ise belirli bir zaman dilimi içerisinde ardışık beş günün toplam yağış miktarının en yüksek değeridir. Denklem 4 ile hesaplanabilmektedir.

$$Rx5gün_j = \text{maks} (RR_{kj}) \quad (4)$$

Burada j periyodu, k ise son günü temsil etmektedir (Climdex, t.y.). Her iki endekste de kullanılan periyot; ay, mevsim veya yıl düzeyinde tanımlanabilmektedir (Met Éireann, 2022a; 2022b). Bu çalışmada söz konusu periyot yıllık ölçek olarak alınmıştır. $Rx5gün$, birkaç günden fazla süren yağışların etkisinin araştırılmasında (toprak doygunluğu, taşkın riski), tarımsal su yönetimi ve şehir altyapısı planlaması gibi birçok farklı yerde kullanılabilmektedir (European Environment Agency, t.y.). Küresel ısınmayla birlikte atmosferin nem tutma kapasitesinin artması, hem bu kısa süreli aşırı yağışların ($Rx1gün$) hem de uzun süreli yağış sistemlerinin toplam hacminin ($Rx5gün$) artmasına neden olmaktadır.

Çin'in Henan Eyaleti'nde 2000–2023 yılları arasında yapılan bir araştırma, aşırı yağış endeksleri ($Rx1gün$, $Rx5gün$, $R95p$, $R99p$) ile kışlık buğday verimi arasındaki ilişkiyi incelemiştir. Analiz sonuçları, şiddetli 1–5 günlük yağışların ($Rx1gün$, $Rx5gün$) neden olduğu toprak doygunluğu ve su baskınlarının buğday verimini azalttığını ortaya koymuştur. Bu olumsuz etkinin 1–2 yıllık gecikmeyle ortaya çıktığı ve ekstrem yağışların sonraki hasat dönemlerini olumsuz etkilediği tespit edilmiştir (Sheng ve diğ., 2025). Benzer bir riskin Hailu ve diğ., (2025) Etiyopya'nın Wereilu

bölgesinde 1982-2021 yıllarını kapsayan çalışmada da gözlemlenmiştir. İnovatif Trend Analizi (ITA) yöntemiyle incelenen veriler, Rx1gün ve Rx5gün göstergelerinde istatistiksel olarak anlamlı artış eğilimleri (sırasıyla 1,9 mm/10 yıl ve 9,6 mm/10 yıl) olduğunu göstermiştir. Artan yağış yoğunluğunun, bölgede toprak erozyonu, sel felaketleri ve dolayısıyla tarımsal verim kaybı riskini daha da artırdığı vurgulanmıştır (Hailu ve diğ., 2025).

Kuraklık ve bunun meteorolojik, hidrolojik ve tarımsal boyutlardaki gelişimi, doğa ve insan sistemleri arasındaki dinamik ilişkiler nedeniyle öngörülmesi güç bir süreçtir. Kuraklık olgusunu tanımlamak ve analiz etmek amacıyla çok sayıda çalışma gerçekleştirilmiş ve bu çalışmalarda genellikle kuraklık endekslerinden yararlanılarak olayların sınıflandırılması yapılmıştır. Bu endeksler arasında, McKee ve diğ., (1993) tarafından geliştirilen Standartlaştırılmış Yağış Endeksi (SPI), en yaygın biçimde kullanılan yöntemlerden biridir. SPI, yalnızca yağış verilerine dayanarak birden fazla birikim süreleri için tarihsel ortalamalardan yağış anomalilerini nicelendirir ve bu değerleri ortalaması sıfır olan normal dağılıma göre standartlaştırır. Pozitif SPI değerleri yağışın ortalamanın üzerinde olduğu nemli koşulları, negatif değerler ise ortalamanın altında kalan kuru koşulları temsil eder. Negatif değerlerin mutlak büyüklüğünün artması ise kuraklık şiddetinin yükseldiğini göstermektedir. SPI hesaplaması Denklem 5'te gösterilmektedir. Burada P , P^* ve σ sırasıyla standartlaştırılmış yağış, ortalama yağış ve yağışın standart sapmasına karşılık gelmektedir.

$$PI = (P - P^*) / \sigma \quad (5)$$

Tablo 3 SPI kuraklık endeksi kategorileri.

SPI Değerleri	Kategori
2,00 ve üzeri	Aşırı nemli
1,50 - 1,99 arası	Çok nemli
1,00 - 1,49 arası	Orta derecede nemli
-0,99 - 0,99 arası	Normal
-1,00 - 1,49 arası	Orta derecede kurak
-1,50 - 1,99 arası	Çok kurak
-2,00 ve altı	Aşırı kurak

Kaynak: (Hayes ve diğ., 1999)

Ancak SPI, yalnızca yağış verilerini temel alması nedeniyle sıcaklığın buharlaşma ve evapotranspirasyon üzerindeki etkilerini dikkate alamamaktadır. Bu sınırlılığı gidermek amacıyla geliştirilen Standartlaştırılmış Yağış-Evapotranspirasyon Endeksi (SPEI), potansiyel evapotranspirasyonu (PET) tahmin ederek hem yağışı hem de sıcaklığı hesaba katmakta ve böylece, iklim değişikliği koşullarında kuraklık dinamiklerini daha kapsamlı ve hassas bir biçimde değerlendirme olanağı sunmaktadır (Vicente-Serrano ve diğ., 2010). SPEI hesaplamalarında potansiyel evapotranspirasyonun (PET) bir temsili olarak, Hargreaves (1994) yaklaşımını izleyerek referans evapotranspirasyon (ET₀) kullandık. Penman-Monteith yönteminde parametre eksikliği nedeniyle güvenilir meteorolojik verilere duyulan ihtiyaçtan dolayı geliştirilmiş bu yöntem, yalnızca günlük maksimum ve minimum sıcaklık verilerini kullanması açısından pratik ve uygulanabilir bir alternatif sunmaktadır.

Büyüme Derece Günleri (GDD) endeksi, bitkilerin fenolojik gelişim evrelerini sıcaklık birikimi üzerinden niceliksel olarak modellemeye yarayan bir biyometeorolojik göstergedir. Bitkilerin büyüme için belirli bir eşik sıcaklığın üzerindeki ısı toplamına ihtiyaç duyması temel prensibine dayanır. Günlük ortalama sıcaklık ile bitki türüne özgü baz sıcaklık arasındaki farkın günlük olarak

hesaplanıp kümülatif olarak toplanmasıyla elde edilir. Bu yaklaşım, bitkilerin kritik fenolojik dönemlerinin (çiçeklenme, olgunlaşma vb.) sabit takvime günlerine göre öngörülmesi yerine termal enerji birikiminin dinamiklerine dayalı bir öngörü sağlar. Tarımsal planlama, ürün verim tahmini ve zararlı yönetim stratejilerinin geliştirilmesinde kilit rol oynarken, aynı zamanda iklim değişikliğinin bitki gelişim döngüleri ve tarımsal uygunluk alanlarındaki potansiyel kaymaların izlenmesi için de temel bir gösterge olarak kullanılmaktadır.

Sonuçlar

Konveksiyona İzin Veren İklim Projeksiyonları

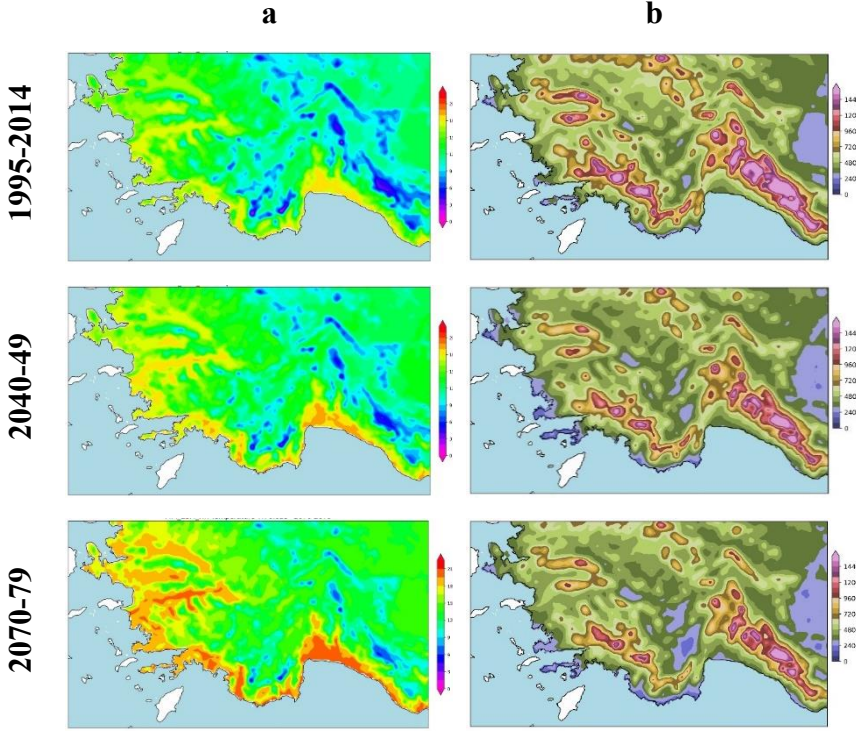
İklim değişikliği projeksiyonları çalışma alanındaki kara bölgelerinde öngörülen iklimin hafifçe daha sıcak ve nemli olacağını göstermektedir. Model ile gözlemler arasındaki yıllık ortalama yanlılık (bias) ise sıcaklık için yaklaşık olarak 1,5°C, yağış miktarı için ise 95 mm düzeyindedir. Bu da modelden gelen sonucun, gerçekte kaydedilen değerlerden daha sıcak ve daha fazla yağışlı bir iklimi gösterdiğini ortaya koymaktadır.

Şekil 2 COSMO-CLM ile 2,5 km çözünürlükte elde edilen iklim simülasyonlarının ERA5-Land verisi kullanılarak yanlılığı düzeltilmiş yıllık ortalama sıcaklık ve yağış dağılımlarını hem referans dönemi hem de SSP3-7.0 senaryosu altında gelecekteki iki on yıllık dönem için göstermektedir. Batıda Ege Denizi ve güneyde Akdeniz ile sınırlanan, iç kesimlerde ise Aydın, Boz, Gölge ve Batı Toros dağ sıralarıyla karakterize edilen çalışma alanı, belirgin karadeniz kontrastı ve güçlü orografik bariyerler nedeniyle karmaşık bir iklimsel yapıya sahiptir. Referans dönemde denizel etkinin belirgin olduğu Ege kıyıları ve Antalya Körfezi çevresinde yıllık ortalama sıcaklıklar göreceli olarak yüksek ve ılıman, iç kesimlere ve dağlık alanlara doğru gidildikçe yükselti artışıyla uyumlu biçimde daha düşüktür. Yağışın mekânsal dağılımı, hâkim rüzgâr yönleriyle

etkileşen orografik yükselme süreçleri sonucunda dağ sıraları boyunca maksimumlar, buna karşılık kıyı ovaları ve iç havzalarda görece minimumlar sergilemektedir.

Projeksiyon sonuçları, bölge genelinde sıcaklıkların anlamlı bir artış eğilimi gösterdiğini ortaya koymaktadır. Yıllık ortalama sıcaklık artışı 2040–2049 döneminde referans döneme göre yaklaşık $1,34^{\circ}\text{C}$, 2070–2079 döneminde ise $1,82^{\circ}\text{C}$ düzeyindedir (Şekil 3). Isınma sinyali hem enlemsel hem de orografik gradyanlar boyunca heterojen olup, özellikle dağlık bölgelerde ve nispeten düşük enlemlerde artış hızları daha yüksektir. Bu durum, karasal yüksek alanlarda yağış fazının kardan yağmura doğru kayması, kar örtüsü süresinin kısalması ve ilkbahar ile yaz mevsimlerinde hızlanan kar erimesiyle birleşerek yüzey yansıtıcılığının (albedosunun) azalmasına ve daha fazla güneş ışınımının yüzey tarafından absorbe edilmesine yol açmaktadır. Ortaya çıkan pozitif geri besleme, yüzyılın ilerleyen kesitlerinde dağlık alanlarda ve çevrelerindeki ısınmanın düz ovalara kıyasla daha hızlı olmasına neden olmaktadır. Çalışma alanında yıllık sıcaklık değişim aralıklarının ilk projeksiyon döneminde $0,90\text{--}1,82^{\circ}\text{C}$, ikinci projeksiyon döneminde ise $1,26\text{--}2,51^{\circ}\text{C}$ olarak hesaplanması, bu mekânsal farklılaşmayı nicel olarak da desteklemektedir.

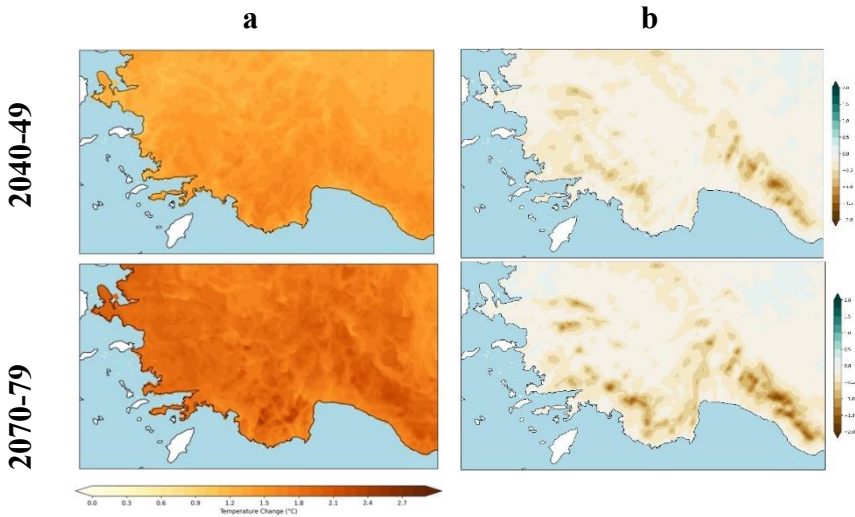
Şekil 2 Referans dönemi (1. satır) ile 2040–49 (2. satır) ve 2070–79 (3. satır) projeksiyon dönemleri için 0,025° çözünürlüklü MPI-ESM-HR_CCLM ile simüle edilen yıllık ortalama **a)** sıcaklık (°C) ve **b)** toplam yağış (mm) dağılımı.



Yağış rejiminde beklenen değişimler genel olarak bölge çapında kuraklaşma eğilimine işaret etmektedir. 2040–2049’da yağıştaki azalma daha çok orografik yükselmenin güçlü olduğu dağlık alanlarda ve bunların güney/doğu yamaçlarında belirgindir. 2070–2079’da ise azalma hem şiddet hem de yayılım bakımından artarak kıyı ve iç havzaları kapsayan geniş bir alanı etkilemektedir. Kıyı boyunca azalma görece daha sınırlı olsa da özellikle iç kesimlerde ve Batı Toroslar boyunca yıllık toplam yağışta belirgin kayıplar dikkat çekicidir. Hatta maksimum yıllık yağışta azalmalar Batı Toroslar üzerinde ilk dönemde yaklaşık 1,5 mm/gün, ikinci

dönemde 2,0 mm/gün değerlerine ulaşabilmektedir ve bu yükseltilerdeki sıcaklık artışları 2,5 °C ye yaklaşmaktadır. Yüzyılın sonuna doğru ısınmanın şiddetinin artması ve çalışma bölgesinin tamamına hâkim olması, bölgesel yağış desenlerinde de önemli değişikliklere yol açacaktır. Bununla birlikte tüm bölge üzerindeki genel eğilimden farklı olarak, 2040-49 döneminde çalışma alanının kuzey doğusunda yer alan Sakarya ve Konya ovaları, Haymana ve Cihanbeyli platoları üzerinde referans dönemine göre yıllık yağış toplamalarında küçük miktarlarda artışlar görülmekle birlikte 2070-2079 döneminde kısmi yağış artışlarının olduğu bölgeler yer almaktadır.

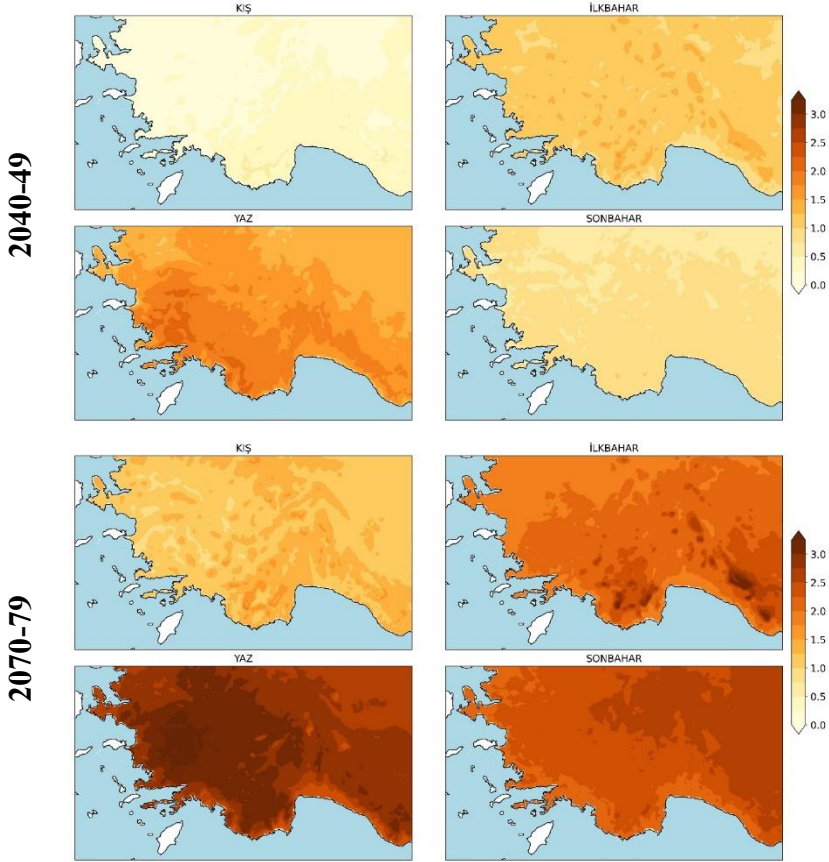
*Şekil 3 SSP3-7.0 senaryosu altında yıllık **a)** ortalama sıcaklık (°C) ve **b)** toplam yağış (mm/gün) değerlerinin referans döneme göre değişimi, 2040-49 (1. satır) ve 2070-79 (2. satır).*



Şekil 4a ve 4b'de sunulan iklim projeksiyonlarının referans döneme göre değişimi, incelenen bölgede sıcaklık rejiminin zaman içinde nasıl köklü bir dönüşüm geçireceğine işaret etmektedir. Bu dönüşüm, yalnızca ortalama sıcaklıklardaki mutlak artışla değil, aynı

zamanda mevsimler arasındaki farkların belirgin şekilde değişmesiyle kendini göstermektedir. Projeksiyonlar, 2040–49 döneminde mevsimsel sıcaklık artışlarının en yüksek düzeyde yaz mevsiminde, ikinci sırada ise ilkbaharda gerçekleşeceğini göstermektedir. 2070–79’da yaz mevsimi yine en hızlı ısınan dönem olurken, ikinci en hızlı artış sonbahara kaymaktadır. Söz konusu dönemler için öngörülen yaz mevsimi ısınma oranlarının sırasıyla 1,5°C ve 2,8°C'ye ulaşması, bu eğilimin ciddiyetini kanıtlamaktadır. Özellikle çalışma alanının kuzeydoğusundaki ova–plato sistemleri ve bitişik dağlık alanlarda sonbahar ısınması bölgesel ortalamanın üzerine çıkmaktadır. İkinci en büyük ısınma eğiliminin ilkbahar ve sonbaharda gözlemlenmesi ve bu artışların ikinci projeksiyon döneminde yaz değerlerine yaklaşması, mevsimsel örtüşmeye veya bir anlamda mevsimsel sıkışmaya işaret etmektedir. Bu durum, geçiş dönemlerinin (ilkbahar ve sonbahar), geçmişte yalnızca yaz aylarına özgü olduğu düşünülen sıcaklık değerlerini deneyimleyebileceği anlamına gelmektedir. Diğer bir deyişle, meteorolojik yaz mevsimi, takvimsel olarak genişleyerek ilkbahar ve sonbaharın bir kısmını içine almaktadır. Isınan ilkbahar ve sonbahar ayları, teorik olarak bitkiler için fotosentez ve büyüme sezonunun (vejetasyon süresi) uzamasına neden olabilir. Ancak bu potansiyel fayda, aşırı sıcakların neden olduğu ısı stresi, su talebinin artması ve toprak neminin hızla azalması gibi olumsuz koşullarla gölgelenebilir. Özellikle meyve ağaçlarının soğuklama ihtiyacının karşılanamaması veya çiçeklenme dönemindeki ani sıcak dalgalarının verimi düşürmesi gibi riskler tarımsal üretim desenlerini ve planlamalarını zorlayacaktır.

Şekil 4 Referans döneme göre mevsimsel sıcaklık farkları °C a) 2040-49 ve b) 2070-79.



Mevcut durum, incelenen bölgede yağış rejiminin belirgin bir mevsimselliğe sahip olduğunu göstermektedir (Şekil 5). Yağışlar, kış mevsiminde, özellikle yüksek rakımlı bölgelerde en yüksek seviyeye (≈ 8 mm/gün) ulaşarak, yıllık su bütçesinin önemli bir kısmını oluşturmaktadır. Buna karşılık, yaz mevsimi, yağışların belirgin şekilde azaldığı ve bölgenin hidrolojik kuraklık yaşadığı bir dönem olarak öne çıkmaktadır. İlkbahar ve sonbahar gibi geçiş mevsimleri ise, özellikle Akdeniz ve Ege kıyılarındaki dağlık kesimler için kritik bir nem kaynağı olmayı sürdürmektedir. Ancak, gelecek

projeksiyonları, bu geleneksel rejimde ciddi bir bozulmaya işaret etmektedir. Öngörülen SSP3-7.0 senaryosuna göre, **kış mevsimi yağışlarında, yüksek rakımlı bölgeler de dâhil olmak üzere, 3 mm/gün'e varan belirgin bir azalma** beklenmektedir. Bu azalma eğiliminin, ikinci en büyük düşüşle sonbahar mevsiminde de kendini göstermesi ve 2070-79 döneminde ilkbahara doğru uzanması, kurak koşulların yıl içindeki etki süresinin genişleyeceğine dair güçlü bir kanıt oluşturmaktadır. Yıllık toplam yağışta kuzeydoğuda gözlenen sınırlı artışlar ise kış-ilkbahar yerel sirkülasyon değişimleri nedeniyle olduğu aşikardır.

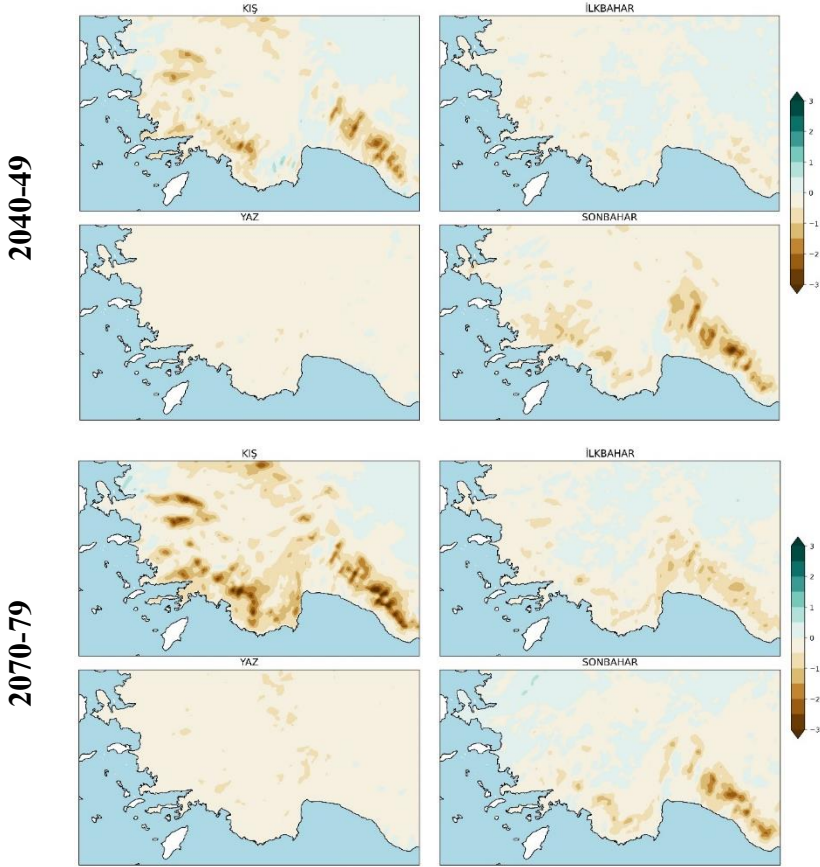
Kış yağışları, rezervuarların doldurulması, nehir akışlarının sürdürülmesi ve kurak yaz aylarında tarımsal faaliyetlerin desteklenmesi için hayati önem taşır. Kış yağışlarındaki azalma, potansiyel su kıtlığı, artan kuraklık koşulları ve mevcut su altyapısı üzerinde artan baskı gibi ciddi zorluklara yol açmaktadır. Tarımsal üretim için mevsimsel yağışlara büyük ölçüde bağımlı olan bölgeler, mahsul kaybı riskinin artmasıyla karşı karşıya kalabilir ve bu da önemli bir gıda güvensizliğine yol açabilir. Ayrıca, kuruma eğilimlerinin ilkbahara kadar uzaması bu zorlukları daha da şiddetlendirir, çünkü bu kritik dönemde yağışların azalması toprak nemi seviyelerinin düşmesine neden olabilir. Bu da mahsul verimini ve genel bitki örtüsü verimliliğini azaltarak, bu ekosistemlerin ve geçim kaynakları bunlara bağlı olan toplulukların karşılaştığı zorlukları daha da artıracaktır.

Bu mevsimsel kaymalar, fiziksel süreçler yoluyla hidrolojik rejimi doğrudan değiştirmektedir. Kış yağışları, kar birikimi ve yavaş yavaş eriyerek yeraltı sularını beslemesi ve rezervuarları doldurması nedeniyle bölgenin yıllık su güvencesinin temel taşıdır. Artan sıcaklık, karla kaplı gün sayısını ve kar su eşdeğerini azaltır, yağmur-kar ayrımını yağmur lehine kaydırır ve erimeyi öne çekip hızlandırır. Sonuçta hidrograf sıkışır; ilkbahar sonu-yaz başında kısa süreli, yüksek hacimli akış darbeleri taşkın riskini artırırken, yaz

boyunca beklenen yavaş ve sürekli salınım ortadan kalkar. Bu mekanizma, su talebinin zirvede olduğu yaz döneminde akımların belirgin biçimde zayıflamasına yol açar.

Bileşik etkide, ısınma ve yağış rejimindeki sapmalar potansiyel/gerçekleşen evapotranspirasyonu yükseltip beslenimi azaltarak hidrolojik bütçeyi negatife iter. Bunun doğal sonucu taban akımı ve düşük akım göstergelerinde zayıflama, akım sürekliliğinde kesinti ve kurak dönemlerde hidrografın sönümlenmesidir. Aşırı koşullarda sürekli akışlı kollar kesikli rejime geçebilir. Hatta küçük havzalar mevsimsel kuruma epizotları yaşayabilir. Bu sonuçlar yalnızca su arzının azalmasıyla sınırlı kalmayıp, sucul habitatların parçalanmasına, biyolojik çeşitlilikte gerilemeye ve ekosistem hizmetlerinde kayıplara neden olur. Ayrıca kuraklığı şiddetlendiren pozitif geri beslemelerin devreye girmesine neden olarak hem doğal sistemlerde hem de sosyo-ekonomik yapılarda zincirleme etkiler doğurabilir.

Şekil 5 Referans döneme göre mevsimsel yağış farkları (mm/gün) a) 2040-49 ve b) 2070-79.



Nehir akışı yalnızca su miktarı değil, aynı zamanda seyreltme kapasitesidir. Kurak dönemlerde düşük akım kirletici derişimini artırır (nitratlar, ağır metaller, tortular) ve daha sıcak suyun daha az çözülmüş oksijen tutmasıyla su kalitesini belirgin biçimde bozar.

Bahar ayları ve yaz mevsimindeki daha fazla ısınma yağış eksikliği ile birlikte ele alındığında, bu mevsimlerde daha kuru toprak ve bitki örtüsü, özellikle kuruyan kıyı zonlarında yangıcı yükünü artırarak orman yangınlarına karşı kırılganlığı yükseltebilir. Yüzyılın ilerleyen periyotlarında yangınların daha sık, şiddetli ve

geniş alanlı hale gelme olasılığı daha fazla olmaktadır. Yangın sonrası erozyon hızlanmasıyla kül ve tortu taşınımı su yollarını kirleterek su kalitesini de etkileyebilir.

Sıcaklık ve yağış rejimindeki değişimler nedeniyle tarımsal faaliyetler tehdit altındadır. Sulama için yaz aylarında azalan su ve artan sıcaklıklardan kaynaklanan artan mahsul su stresi, su tüketimi daha az olan mahsullere geçişi, marjinal tarım arazilerinin terk edilmesini ve azalan yeraltı su rezervlerine daha fazla bağımlılığı ve bu konuda çatışmaları beraberinde getirebilir. Ayrıca, büyüme mevsiminde sıcaklıkların artması büyüme derecesi günlerinin artması fenolojiyi öne çekip vejetasyon süresini uzatabilir. Ancak eşzamanlı sıcaklık ve yağışın birleşik etkisi ile artan kuraklık stresi, verim ve kaliteyi düşürerek bölgedeki su talebini daha da artırabilir.

Tarım Sektöründe Etkili İklim Endekslerinin Gelecek Dönem Projeksiyonları

İklim değişikliğinin etkilerinin projeksiyonu, yalnızca ortalama koşullardaki değişimleri değil, aynı zamanda ekstrem hava olaylarındaki eğilimleri ve bunların sektörel etkilerini niceliksel olarak belirlemeyi gerektirir. Bu çalışmada tarımsal açıdan önem arz eden iklim endeksleri konveksiyona izin veren iklim simülasyonundan elde edilen iklim değişkenleri kullanılarak referans dönemi ve gelecek iki on yıllık 2040-2049 ve 2070-2079 dönemleri için hesaplanmıştır.

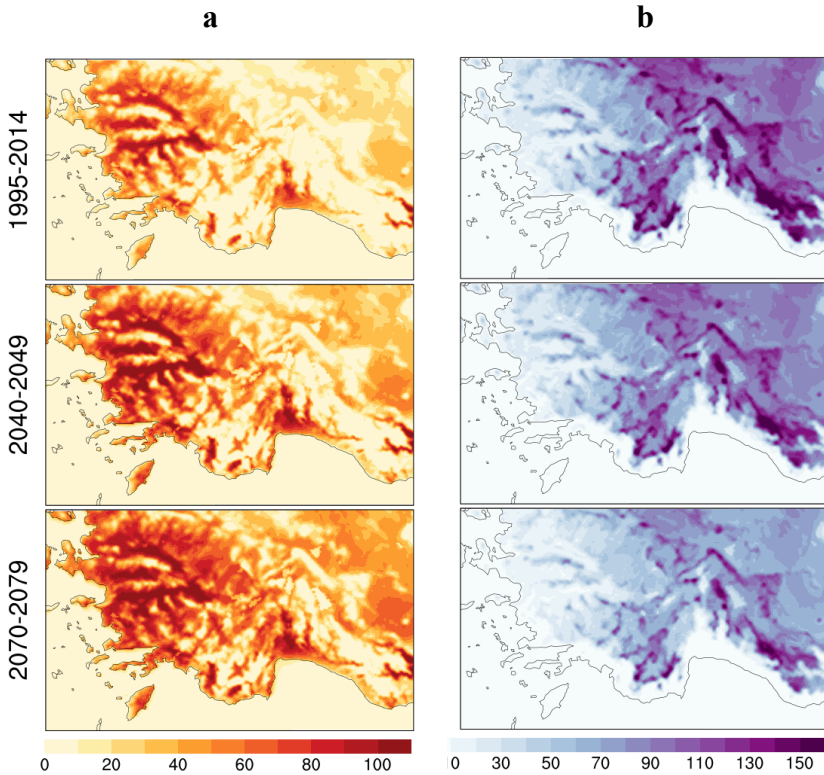
Aşırı sıcaklık olayları, bitki fizyolojisinden hidrolojik döngüye kadar uzanan bir dizi süreci aynı anda etkileyerek tarımsal üretim üzerinde baskı oluşturur. Yüksek sıcaklıklar atmosferin su tutma kapasitesini artırır. Sıcaklığa bağlı doymuş su buharı basıncı, Clausius–Clapeyron kanunuyla yaklaşık üstel artar ve her 1 °C sıcaklık yükselmesi atmosferdeki bulunacak maksimum su buharı miktarını yaklaşık %6-7 kadar artırır. Havanın su buharı tutma kapasitesi ile gerçekte içerdiği su buharı arasındaki fark (atmosferik

doygunluk açığı) hava ne kadar sıcak ve kuru ise o kadar açılır. Yükselen doygunluk açığı, bitkilerin su kaybını sınırlamak için stomalarını kapatmasına neden olur, bu savunma mekanizması ise net fotosentez hızını ve karbon birikimini düşürür. Özellikle tahıllarda bu durum verim ve kalite kaybına yol açar. Aynı zamanda, artan buharlaşma toprak nemini hızla tüketir ve sulama ihtiyacını artırır. Çalışma alanı üzerinde özellikle yağışın azalması ve mevsimsel kaymaları, toprak neminde azalma yaratarak yüzeyden olan gizli ısı akısını kısıtlar ve yüzey sıcaklığının daha fazla artmasına neden olur. Yüzey yakınındaki hava yeterince nemlenemez. Bu süreç hissedilir ısı akıları artırarak hava sıcaklığını yükseltir. Tüm bu süreç atmosferik doygunluk açığının büyümesine neden olur. Tersine, yeterli sulama/yaş yüzey koşullarında evapotranspirasyon yakın yüzeyi nemlendirip soğutarak atmosferik doygunluk açığını yerel ölçekte düşürme eğilimindedir. Bu çerçeve asıl belirleyen faktörlerin sıcaklık, nem adveksiyonu, yağış ile ilişkili olarak toprak nemi olduğu aşıkardır. Öte yandan, ortalama sıcaklıklardaki artış, fenolojik evrelerin ilkbaharda daha erken tarihlere kaymasına neden olmaktadır ki bu durum bitkileri ilkbaharın geç don olaylarına karşı savunmasız hale getirmektedir.

Bu çalışma kapsamında, maksimum sıcaklığın (T_{maks}) 35°C'yi aştığı gün sayısının ve minimum sıcaklığın (T_{min}) 0°C'nin altında kaldığı gün sayısının mekansal dağılımı analiz edilmiş ve Şekil 6'da referans (1995-2014) ve gelecek (2040-49, 2070-79) dönemleri için sunulmuştur. Referans döneminde (Şekil 6a), yüksek rakımlı bölgelerde (örneğin, Batı Toros Dağları ve iç kesimlerdeki dağlık bölgeler) 35 °C eşiğinin aşılması nadir görülmüştür. Öte yandan, Gediz, Küçük Menderes ve Büyük Menderes ovalarının merkezi kısımları ile Antalya Körfezi çevresinde yılda 60 günü aşan T_{maks} değerleri gözlemlenmektedir. İklim projeksiyonları, bu yoğun sıcak dönemlerin hem süreklilik hem de yayılım olarak önümüzdeki on yıllarda belirgin bir şekilde artacağını

göstermektedir. Özellikle Ege ve Akdeniz'in iç kesimlerine ve kıyı ovalarının daha geniş bir alanına yayılması beklenmektedir. Kara alanları üzerinde ortalama alındığında referans döneminde 26 gün olarak hesaplanan TX35 endeksinin, 2070'lerde yaklaşık 48 güne yükselmesi beklenmektedir. Pek çok kültür bitkisi için 30-35°C bandı, fotosentetik verimliliğin belirgin şekilde düştüğü kritik bir eşiktir. Dolayısıyla, TX35 sayısındaki bu belirgin artış sıcak hava dalgalarında bir artışa işaret ederken insan sağlığı ve tarım sistemleri üzerinde somut sonuçlar doğuracaktır.

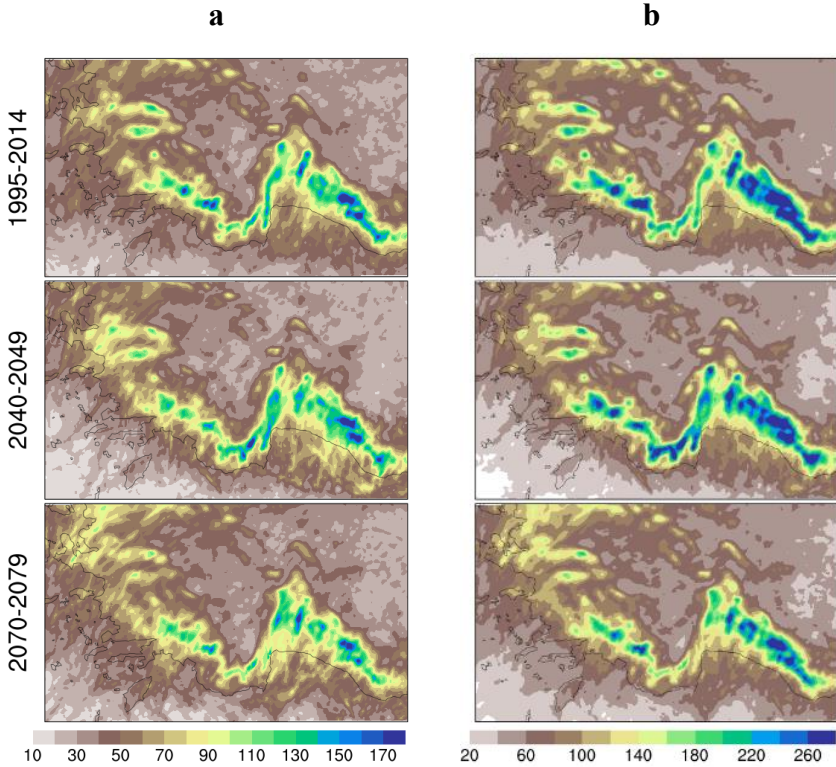
Şekil 6 1995-2014, 2040-2049 ve 2070-2079 dönemlerinde a) maksimum sıcaklığın 35°C'yi aştığı ortalama gün sayısı (TX35) ve b) don olan günlerin sayısı (FD).



Referans dönemi incelendiğinde, TX35 endeksinin aksine don olan günler (FD) en sık yüksek rakımlı bölgelerde, özellikle de yılda 130 günü aşan değerlere sahip Akdağlar, Batı Toros Dağları ve iç kesimlerdeki yüksek platolar ve dağlık alanlarda (Sultan Dağları vb.) görülmektedir. 2040-2049 döneminde, bölgenin büyük bölümünde donlu gün sıklığında genel bir azalma beklenmektedir. Alansal olarak 71 günlerde olan FD endeksinin, bu projeksiyon döneminde 65 günlere; 2070'li yıllarda ise 51 günlere kadar düşmesi öngörülmektedir. Bu azalma, özellikle yüksek kesimlere doğru daha belirgindir. Süresi göreceli olarak azalmakla birlikte yüksek dağlık bölgelerde hala don olan günler sıklıkla görülmektedir. 2070-2079 döneminde don olan günler önemli ölçüde azalırken, iç kesimlerde yer alan birçok ova ve dağ eteğindeki bölgede donlu gün sayısının yılda 50'nin altına düşeceği tahmin edilmektedir. Sadece rakımın 3000 metreye yaklaştığı dağların zirveleri donma noktasının altında 150 günden fazla kalacaktır.

Rx1gün ve Rx5gün endekslerinin üç farklı dönem (1995–2014, 2040–2049, 2070–2079) için mekânsal dağılımı Şekil 7a ve 7b ile sırasıyla gösterilmektedir.

Şekil 7 1995-2014, 2040-2049 ve 2070-2079 dönemlerinde a) Rx1gün ve b) Rx5gün.



Rx1gün endeksi, referans dönemi (1995–2014) boyunca özellikle dağlık kıyı kesimlerde, güneyde Batı Toroslar ve batıda Aydın Dağları boyunca, yüksek değerler ortaya koymaktadır. Bu bölgelerde yıllık maksimum günlük yağış miktarı 130 mm’nin üzerine çıkmaktadır. Bu durum kısa süreli, ani ve şiddetli yağışların orografik etkilerle tetiklendiğine işaret edebilir. Nispeten daha alçak kesim olan çalışma alanının kuzeybatı bölgelerinde Rx1gün, 50 mm’nin altında kalmaktadır. 2040–2049 döneminde, bu yüksek Rx1gün değerlerinin mekânsal deseninin genel olarak korunduğu görülmektedir. Ancak bazı bölgelerde (özellikle Muğla etrafındaki dağlık kesimlerde) azalma eğiliminin başladığı gözlemlenirken Batı

Toroslar ve Bey Dağları gibi bazı kesimlerde ise artış beklenmektedir. 2070–2079 dönemine gelindiğinde, Rx1gün değerlerinde daha belirgin bir azalma eğilimi ortaya çıkmaktadır. Özellikle bir önceki dönemde artış beklenen Bey Dağları civarında ve Antalya Körfezi çevresindeki kıyı bölgelerde aşırı günlük yağışların şiddetinin gelecekte zayıflayabileceği görülmektedir. Bununla birlikte, yüksek topoğrafyaya sahip alanlarda (Batı Toroslar) orografik etkiyle birlikte görece yüksek değerler korunmaktadır. Genel olarak kara alanları üzerindeki alansal ortalamaya bakıldığında ise her iki gelecek periyodunda da değerlerin benzer miktarlarda (55 mm civarında) seyretmesi öngörülmektedir.

Referans dönemi (1995–2014) boyunca, en yüksek Rx5gün değerleri özellikle Batı Toroslar boyunca, Geyik Dağları gibi dağlık kesimlerde görülmektedir. Bu bölgelerde 5 günlük en yoğun yağış toplamaları 260 mm'lere ulaşmaktadır. Bu durum, orografik yağışların etkisiyle yüksek topoğrafyaya sahip alanlarda kısa süreli fakat yoğun yağış olaylarının sık yaşandığını göstermektedir. 2040–2049 döneminde, bu yüksek Rx5gün değerlerinin mekânsal dağılımı genel olarak korunmakla birlikte, Rx1gün endeksinde olduğu gibi Batı Toroslar'ın Bey Dağları civarında artacağı tahmin edilmektedir. Bu artışlar gelecekte deniz yüzey suyu sıcaklıklarındaki yükselmeye bağlı olarak atmosferik sistemlerin hareketi sırasında daha fazla nem kazanması ve artan hava sıcaklıklarının atmosferin nem tutma kapasitesini güçlendirmesi sonucunda, kısa zamanda şiddetli yağışların oluşma ihtimalinin artmasıyla ilişkilidir. Diğer taraftan, çalışma alanının iç kesimlerinde öngörülen bir miktar azalma eğilimi, kısa süreli aşırı yağışların sıklığında veya şiddetinde kısmi bir zayıflamayı işaret edebilir. Referans döneminde karasal alanlarda ortalama 96 mm olan Rx5gün değerlerinin, 2070–2079 döneminde ise 88 mm seviyelerine gerilemesi, genel azalma eğiliminin daha belirgin hale geleceğini ortaya koymaktadır. SSP3-7.0 emisyon

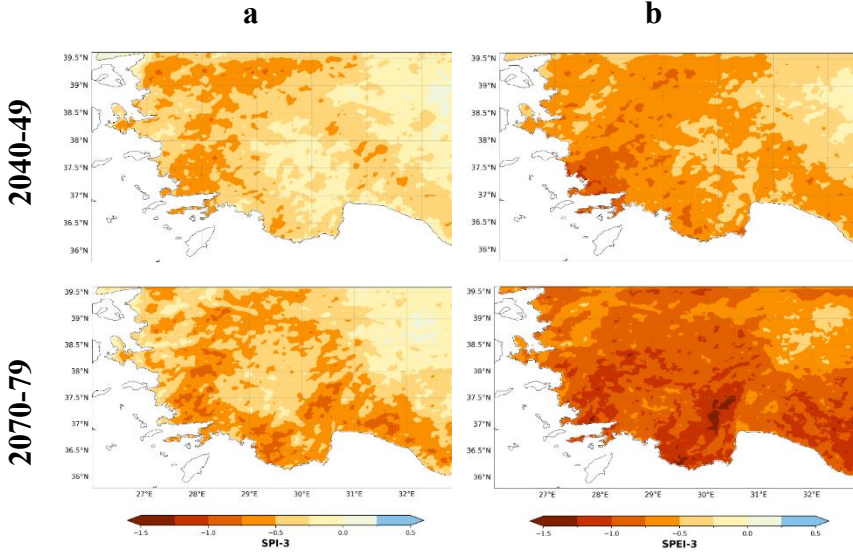
senaryosuna göre yapılan simülasyonlar, özellikle güney kıyı kesimlerinde, 2040–2049 döneminde artış beklenen Bey Dağları’nda bile, maksimum 5 günlük toplam yağış miktarlarının azalacağını işaret etmektedir. Buna karşın, Akhisar Ovası gibi daha alçak kesimlerin yer aldığı çalışma alanının kuzeybatısında Rx5gün endeksinde yaklaşık 20 mm artış öngörülmektedir.

Şekil 8, 2040-2049 ve 2070-2079 dönemleri için 3 aylık birikim periyodunda (SPI-3) Standartlaştırılmış Yağış ve Standartlaştırılmış Yağış-Evapotranspirasyon (SPEI-3) Endekslerindeki referans periyoduna göre tahmini değişimi göstermektedir. SPI-3 endeksi (Şekil 8a), yağışlardaki kısa vadeli dalgalanmaları yansıtarak meteorolojik kuraklık ve kısa vadeli yağışlı koşullar hakkında bilgi sağlamaktadır. 2040-2049 döneminin mekânsal örüntüsü, özellikle Ege kıyıları, güneybatı Anadolu ve Antalya Körfezi çevresinde negatif SPI-3 değerlerinin olduğunu ortaya koyarken, alanın bazı iç kesimleri ve kuzeydoğu kesimlerinde hafif pozitif değerler öngörmektedir. SPI-3 değerlerinde beklenen bu küçük azalma ve artışlar, referans dönemine kıyasla normale yakın koşulların devam edeceğini göstermektedir. 2070-2079 periyoduna geçildiğinde pozitif SPI-3 değerlerinin şiddetinin arttığı ve alansal olarak iç kesimlere doğru genişlediği öngörülmektedir. Bu negatif değerler, özellikle uç değerlerin -1,1’e ulaştığı kıyı ve alçak rakımlı bölgelerde yağışlarda bir azalmaya işaret etse de SPI-3 değerlerinin $\pm 0,99$ aralığında kalmasından dolayı normale yakın koşulların hüküm süreceği anlaşılmaktadır. Sonuç vd. (2025c), yalnızca yağışa bağlı olarak kuraklığı iredellemek yerine, yağış, sıcaklık ve toprak nemini kullanan bileşik kuraklık endeksi ile bölge üzerindeki kuraklık beklentilerini ve gelecekteki şiddetli kurak periyotların olasılıklarını incelemiştir. Bileşik olasılık istatistikleri, sıcak-kurutoprak olaylarında açık bir doğrusal olmayan artış olduğunu ortaya koymaktadır.

Yalnızca yağış değil, sıcaklığa bağlı evapotranspirasyon artışıyla oluşan su kayıplarını da dikkate alan SPEI-3 endeksi, genel olarak SPI-3 endeksine göre daha şiddetli kuraklık koşulları öngörmektedir. 2040–2049 dönemine ait SPEI-3 (Şekil 8b) değişimlerinde topoğrafyanın kuraklık dağılımı üzerinde belirgin bir etkisi gözlenmemektedir. Bu durum, kuraklık sinyalinin yerel yükselti farklılıklarından ziyade bölgesel iklim süreçleri tarafından yönlendirildiğini göstermektedir. Dönem boyunca çalışma alanı genelinde negatif anomalilerin hâkim olacağı (ortalama -0,52) öngörülmektedir. Özellikle batı kesimlerde değerlerin yer yer -1,1'e yaklaşması, bu bölgelerde kurak koşulların güçlenmesine yönelik açık bir eğilime işaret etmektedir. Bu eğilimin, ilerleyen dönemlerde daha da belirginleşmesi beklenmektedir. 2070'li yıllarda kuraklığa eğilimli bu bölgelerin orta derecede kurak kategorisine geçiş yapacağı tahmin edilmektedir. Çalışma alanı genelinde ortalama SPEI değerlerinin -0,85'e kadar gerilemesi ve özellikle yüksek bölgelerde -1,5'e düşmesi, çok kurak koşullara geçileceğini göstermektedir. Buna karşın, kuzeydoğudaki daha alçak alanlarda değerlerin -0,25 ile -0,5 arasında kalması, bu bölgelerin göreceli olarak **daha hafif kurak koşullar** yaşayacağını, ancak hâlâ normalin altında yağış-evapotranspirasyon dengesine sahip olacağını ortaya koymaktadır.

SPEI sonuçları, SPI'ye kıyasla daha şiddetli kuraklık koşullarına işaret etmektedir. Bu fark, azalan yağışlar ile artan sıcaklıkların birleşik etkisinin, toprak nemi üzerinde daha belirgin bir kurutucu etki oluşturmamasından kaynaklanmaktadır. Sıcaklık bileşeninin hesaba katılmasıyla ortaya çıkan bu artan kuraklık şiddeti, potansiyel evapotranspirasyon hesaplama yönteminin kuraklık değerlendirme sonuçlarını önemli ölçüde etkilediğini gösteren Zhou ve diğ. (2020) bulgularıyla da tutarlıdır. Dolayısıyla, SPEI gibi sıcaklık duyarlı endekslerin gelecekteki ısınma senaryoları altında kuraklık dinamiklerini daha gerçekçi biçimde temsil edebilir.

Şekil 8 2040-2049 ve 2070-2079 dönemlerinde a) SPI-3 ve b) SPEI-3.



Büyüme Derece Günü (GDD) endeksi belirli bir eşik sıcaklığın üzerinde eklenik olarak ısı birikimini ölçen ve bitkilerin fenolojik gelişim evrelerini (çimlenme, çiçeklenme, olgunlaşma) tahmin etmede yaygın olarak kullanılan agrometeorolojik bir göstergedir. Bu çalışmada, iki temel ürün için GDD hesaplamaları bitkinin biyolojisi ve bölgedeki geleneksel yetiştirme takvimine dayandırılmış parametrelerle yapılmıştır:

- Elma için: Baz sıcaklık 4,4°C olarak alınmış ve büyüme dönemi 15 Mart - 15 Eylül aralığı
- Buğday için: Baz sıcaklık 0°C olarak alınmış ve büyüme dönemi 1 Ocak - 1 Haziran

aralığı olarak tanımlanmıştır.

Şekil 9 ile sunulan bulgular, elma ve buğday için büyüme derecesi günlerindeki (GDD) mekansal değişiklikleri göstermekte ve tarihsel dönemi (1995–2014) SSP3-7.0 senaryosu altında 2040–

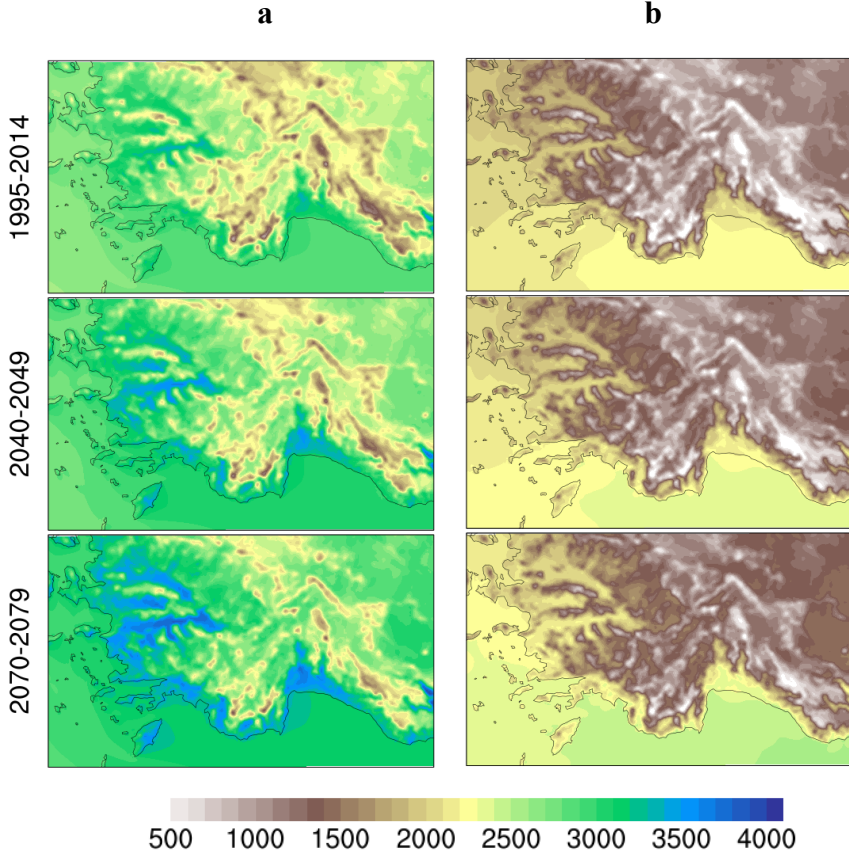
49 ve 2070–79 dönemi projeksiyonlarıyla karşılaştırmaktadır. Bu sonuçlar, ısınma eğilimlerinin iki sıcaklığa duyarlı mahsulün termal uygunluğu, fenolojisi ve verimlilik risklerini nasıl doğrudan değiştirdiğine dair değerli bilgiler sağlamaktadır.

Şekil 9a'da özetlenen elma için büyüme derecesi günleri (GDD) dağılımı, tarihsel dönemde (1995–2014) iç kesimlerin büyük bölümünde (2000-2500 GDD aralığında) orta düzey bir ısı birikiminin egemen olduğunu göstermektedir. Kıyı ve alçak rakımlı alanlarda ise mevcut değerlerin 3000 GDD değerlerine ulaştığı görülmektedir. Yüzyıl ortasında (2040–2049) GDD'nin özellikle iç ve alçak kesimlerde yaygın ve belirgin artışı, geçmişte marjinal kalan orta rakımlı alanları termal açıdan uygun hâle getirirken, kıyı kuşağında yüksek kaliteli elma üretimi için kabul gören optimal eşiklerin aşılmaya başladığına işaret etmektedir. Elmanın yüksek soğuklama ihtiyacı ve ölçülü ısı birikimi gereksinimi ve ısınan kış sıcaklıklarının bu ihtiyacı karşılamakta güçlük yaratması ile birlikte dikkate alındığında aşırı GDD birikimi kalite kayıplarını tetikleyebilir. Yüzyıl sonuna yaklaştıkça (2070–2079) özellikle güneybatı ve alçak havzalarda çok yüksek (> 3500 GDD) GDD alanlarının genişlemesiyle birlikte, geleneksel elma yetiştirme bölgelerinin önemli bir bölümünde üst termal optimumun aşılması beklenmekte olup, alansal ortalamanın da 2850'nin üzerine çıkması öngörülmektedir. Uygun termal koşullar büyük ölçüde yalnızca daha yüksek rakımlı sahalarda korunacaktır. Bu bulgular elma yetiştirme kuşaklarının yüksek rakımlara doğru kayacağını, soğuklama yetersizliği ve ısı stresine bağlı risklerin artacağını göstermektedir.

Şekil 9b'de sunulan buğdaya ilişkin GDD mekânsal dağılımı, referans dönemde (1995-2014), yüksek rakımlı iç bölgelerde ~ 1000 GDD'den alçak rakımlı kıyı ovalarında ~ 1900 GDD'ye uzanan bir ısı birikimi gradyanı göstermekte ve bilinen agro-ekolojik zonlamayı doğrulamaktadır. Yüzyıl ortası projeksiyonunda (2040-2049), özellikle kıyı ve alçak kotlarda GDD değerlerinde yaklaşık 200-300

birimlik bir artış öngörülmektedir. Bu artış, bitkinin fenolojik gelişim hızını artırarak başaklanma ve olgunlaşma evrelerine tarihsel ortalamalara kıyasla daha erken ulaşılmasına neden olmaktadır. Bu erkenci fenoloji, buğdayın verim potansiyelini azalmasına sebebiyet verebilir. Genel olarak yaz mevsimi sıcaklıklarının diğer mevsimlerden daha hızlı artması başaklanma gibi hassas fenolojik evrelerin, yaz ekstremlerine denk gelme olasılığını arttıracaktır. 2070-2079 dönemi projeksiyonlarında ise, GDD artışlarının yaygınlaşarak özellikle kıyı şeritlerinde 2100 GDD sınırını aşması beklenmektedir. Özellikle endişe verici olan, yüksek sıcaklık birikiminin ilkbahar ve sonbahar gibi geçiş dönemlerine doğru genişlemesidir. Bu durum, bitkilerin sıcak stresine maruz kaldığı süreyi uzatır ve susuzluk problemini daha da kötüleştirir. Çünkü yüksek sıcaklık, bitkilerin daha çok su tüketmesine ve toprağın daha çabuk kurummasına neden olur. Bu ikili baskı, bitkilerin erken ölümüne ve tanelerin küçük kalmasına yol açar. Bu da hem daha az ürün alınmasına hem de ürün kalitesinin düşmesine sebep olur.

Şekil 9 a) Elma ve b) Buğday için 1995-2014, 2040-2049 ve 2070-2079 periyotları için GGD dağılımı.



Tartışma

Bu çalışmada, Türkiye'nin güneybatısında iklim değişikliğinin neden olduğu aşırı olayları değerlendirmek amacıyla konveksiyona izin veren çözünürlükte (2,5 km) dinamik olarak ölçeği küçültülmüş COSMO-CLM simülasyonları kullanılarak, referans dönemi (1995–2014) ve SSP3-7.0 senaryosu altında gelecek iki on yıl (2040–2049, 2070–2079) için standart iklim endeksleri analiz edilmektedir. Böylece şiddetli yağışlar ve kuraklıkta

öngörülen değişiklikleri belirlemede yüksek çözünürlüklü, konveksiyona izin veren modellemenin katma değeri vurgulanmakta ve bölgesel iklim riski ve uyum değerlendirmeleri için bir temel oluşturulmaktadır.

İncelenen bölgede yaz mevsiminin her iki gelecek dönemde de en hızlı ısınan (dönemler için sırasıyla 1,5°C ve 2,8°C) mevsim olması beklenirken, ikinci en hızlı ısınan mevsimin 2040–2049 için ilkbahar, 2070–2079 için ise sonbahar olacağı öngörülmektedir. SSP3-7.0 senaryosu altında, kış yağışlarında yüksek rakımlar dâhil olmak üzere 3 mm/gün’e ulaşan belirgin bir azalma beklenmektedir. Bu eğilimin sonbaharda da belirgin şekilde görülmesi ve 2070–2079 döneminde ilkbahara uzanması, kurak koşulların yıl içi etkisinin genişleyeceğini işaret etmektedir. Yaz mevsimi ise yağışların en fazla azaldığı ve hidrolojik kuraklığın belirginleştiği dönem olarak öne çıkmaktadır. Sonuç olarak, gelecek iklim projeksiyonuna dair bulgular sadece bir ısınma trendini değil, aynı zamanda bölgenin mevsimsel karakterinin değiştiğini ve bunun da su kaynakları, gıda güvenliği ve biyolojik çeşitlilik üzerinde kademeli etkiler doğuracağını göstermektedir.

Bitki fizyolojisi, toprak süreçleri ve hidrolojik döngü üzerinde eşzamanlı ve çoğu zaman birikimli etkilere neden olan aşırı sıcaklık olaylarının tarımsal üretim üzerindeki baskısı göz önüne alınarak, bu çalışmada iki uç sıcaklık endeksine ilişkin gelecekteki değişimler incelenmiştir. Maksimum sıcaklığın 35 °C’yi aştığı gün sayısı (Tx35) ile minimum sıcaklığın 0 °C’nin altında kaldığı gün sayısı (FD) endekslerine dayalı bulgular, referans döneminde yüksek rakımlı alanlarda 35 °C eşiğinin nadiren aşıldığını, buna karşın donlu gün sayısının 130’un üzerinde seyrettiğini ortaya koymaktadır. SSP3-7.0 senaryosu altındaki projeksiyonlar, özellikle orta ve yüksek rakımlı bölgelerde don sıklığının belirgin bir şekilde azalmasına yol açan, giderek artan bir ısınma eğilimine işaret etmektedir.

Aşırı yağış ve kuraklık göstergeleri, iklim sisteminin hidrolojik döngü, toprak suyu ve ekosistem işleyişi üzerindeki etkilerini farklı mekanizmalar üzerinden yansıtan tamamlayıcı bileşenlerdir. Kısa süreli şiddetli yağışların akış rejimi ve taşkın/sel riski üzerindeki doğrudan etkileri Rx1gün ve Rx5gün endeksleriyle izlenirken, yağış açığı ile sıcaklık kaynaklı buharlaşma-terleme kayıplarının bileşik etkisi ise SPI/SPEI-3 gibi kuraklık endeksleri aracılığıyla ortaya konmaktadır. Referans döneminde Rx1gün ve Rx5gün endeksleri, orografik yağışların etkisiyle yüksek rakımlı bölgelerde kısa süreli ancak yoğun yağış olaylarının daha sık gerçekleştiğini göstermektedir. 2040–2049 döneminde her iki endeksin alansal ortalamalarının büyük ölçüde benzer kalması beklenirken, 2070–2079 döneminde özellikle güney kıyı şeridinde, hatta 2040–2049 döneminde artış öngörülen Bey Dağları da dahil olmak üzere, belirgin bir azalma olacağı tahmin edilmektedir. Diğer yandan SPEI-3 endeksi, yağış eksikliğinin yanı sıra sıcaklık artışına bağlı buharlaşma-terleme kaynaklı su kayıplarını da hesaba katmakta ve genel olarak SPI-3’e kıyasla daha yoğun kuraklık koşulları ortaya koymaktadır. 2070’li yıllarda kuraklık eğilimi gösteren alanların orta düzeyde kurak sınıfa geçmesi beklenirken, özellikle yüksek rakımlı bölgelerde SPEI-3 değerlerinin -1,5’un altına inmesi, bu kesimlerde şiddetli kuraklık koşullarının hâkim olacağına işaret etmektedir.

İklim değişiminin tarım üzerindeki olası etkilerini nicel olarak ortaya koymak, ürünlerin büyüme mevsimi boyunca maruz kaldıkları ısı birikimindeki mekânsal ve zamansal değişimleri değerlendirmek ve buna bağlı fenolojik kaymaları ile verim potansiyelindeki değişimleri irdelemek amacıyla bu çalışmada bölge üzerinde hakim iki tarımsal ürün olan elma ve buğday için GDD endeks değerlerindeki gelecek değişimleri hesaplanmıştır. Hesaplar, bitki biyolojisi ve bölgedeki yerleşik yetiştirme takvimleri esas alınarak, elma için baz sıcaklık 4,4°C ve büyüme dönemi 15 Mart–

15 Eylül ve buğday için ise baz sıcaklık 0°C ve büyüme dönemi 1 Ocak–1 Haziran olarak alınarak yapılmıştır. Yüzyıl sonuna yaklaşıldığında (2070–2079), çok yüksek GDD değerlerinin geniş bir alana yayılması ve özellikle kıyı kesimleri ile alçak havzalarda elma için 3500, buğday için ise 2100 eşik değerlerinin aşılması beklenmektedir. İklim değişikliği bağlamında elma ve buğday yetiştiriciliğine yönelik karşılaştırmalı değerlendirme, türlerin biyolojik özelliklerinden kaynaklanan belirgin kırılğanlıkları ortaya koymaktadır. Çok yıllık bir tür olan elma, katı soğuklama gereksinimleri nedeniyle ısınmaya karşı yüksek duyarlılık sergilemekte ve artan sıcaklıklar kırılğanlığı artırmaktadır. Bu durum, uygunluk alanlarında mekânsal değişime işaret etmekte ve termal uygunluğun rakım olarak daha yüksek kotlara ve enlemsel olarak daha kuzeye kayacağı öngörülmektedir. Buna karşılık yıllık bir kültür bitkisi olan buğday, daha geniş bir agronomik uyarlanabilirliğe sahiptir. GDD başlangıç artışları, ekim–hasat pencerelerinin geçici olarak genişlemesine olanak tanıyabilir. Ne var ki yüzyıl sonuna doğru ısınma senaryolarında aşırı GDD birikimi, fenolojik ilerlemeyi optimal sürelerin ötesinde hızlandırarak başta tane dolumu olmak üzere kritik süreçleri kısaltarak verim kayıplarına yol açabilir. Biyolojik tepkilerindeki bu farklılıklara rağmen, her iki ürün de artan evapotranspirasyon ve sulama gereksinimi, kuraklık kaynaklı verim düşüşleri, zararlı ve hastalık baskısının güçlenmesi ile toprak nemi tükenmesi ve ısı stresinin etkileşimi gibi, tarımsal üretkenliği birlikte tehdit eden önemli iklim kaynaklı risklerle karşı karşıyadır.

Sonuç olarak GDD projeksiyonları, iklim değişikliğinin bölge tarımı üzerindeki etkisinin çift yönlü ve karmaşık olduğunu göstermektedir. Büyüme mevsiminin uzaması gibi görünürde olumlu olan değişimler dahi, su kaynakları üzerindeki baskının artması ve ekstrem olaylara maruziyetin değişmesi gibi ciddi zorlukları beraberinde getirmektedir. Bu nedenle, etkin bir uyum

stratejisi, yalnızca yeni ekim tarihleri belirlemekten ziyade, suyun verimli kullanımına yönelik teknolojilerin benimsenmesi, sıcaklık ve kuraklığa toleranslı çeşitlerin geliştirilmesi ve kuraklık risk yönetim planlarının güçlendirilmesi gibi bütünleşik önlemleri içermelidir. Ayrıca, yağışa dayalı üretimin giderek kırılganlaştığı alanlarda, verim istikrarını sağlamak için tamamlayıcı sulama sistemlerine yönelik yatırımların planlanması geleceğin tarımı için hayati önem taşımaktadır.

Kaynakça

Arino, O., Gross, D., Ranera, F., Leroy, M., Bicheron, P., Brockman, C., ... & Weber, J. L. (2007). GlobCover: ESA service for global land cover from MERIS. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Barcelona, Spain, 2007, pp. 2412-2415, doi: 10.1109/IGARSS.2007.4423328.

Atalay, İ. (1983). Türkiye'nin Ekolojik Bölgeleri. Ege Üniversitesi Yayınları.

Bağçacı, S. Ç., Yucel, I., Duzenci, E., & Yılmaz, M. T. (2021). *Intercomparison of the expected change in the temperature and the precipitation retrieved from CMIP6 and CMIP5 climate projections: A Mediterranean hot spot case, Turkey*. Atmospheric Research, 256, 105576. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2021.105576>

Bozkurt, D., Turunçoğlu, U., Şen, O. L., & Dalfes, H. N. (2012). *Downscaled simulations of the ECHAM5, CCSM3 and HadCM3 global models for the eastern Mediterranean–Black Sea region: Evaluation of the reference period*. Climate Dynamics, 39, 207–225. <https://doi.org/10.1007/s00382-011-1187-x>

Böhm, U., Kücken, M., Ahrens, W., Block, A., Hauffe, D., Keuler, K., Rockel, B., Will, A. (2006). “CLM—The climate version of LM: Brief description and long-term applications”, COSMO Newsletter, 6. 225-235

Brutsaert, W., & Parlange, M. B. (1998). *Hydrologic cycle explains the evaporation paradox*. Nature, 396(6706), 30. <https://doi.org/10.1038/23845>

Climdex. (t.y.). İndeksler – İklim ekstrem değerleri indisi tanımları. Erişim tarihi: 11 Kasım 2025, <https://www.climdex.org/learn/indices/>

Demircan, M., Gürkan, H., Eskioğlu, O., Arabacı, H., Coşkun, M. (2017) Climate change projections for Turkey: three models and two scenarios. Turkish Journal of Water Science and Management, 1(1), 22–43. <https://doi.org/10.31807/tjwsm.297183>

Doms, G., Baldauf, M. (2018). “Consortium for Small-Scale Modelling A Description of the Nonhydrostatic Regional COSMO-Model Part I Dynamics and Numerics”, Deutscher Wetterdienst

Dufresne, J.-L., Foujols, M.-A., Denvil, S., Caubel, A., Marti, O., Aumont, O., Balkanski, Y., Bekki, S., Bellenger, H., Benshila, R., Bony, S., Bopp, L., Braconnot, P., Brockmann, P., Cadule, P., Cheruy, F., Codron, F., Cozic, A., Cugnet, D., ... Vuichard, N. (2013). *Climate change projections using the IPSL-CM5 Earth System Model: From CMIP3 to CMIP5*. *Climate Dynamics*, 40(9–10), 2123–2165. <https://doi.org/10.1007/s00382-012-1636-1>

Ehtasham, L., Sherani, S. H., & Nawaz, F. (2024). Acceleration of the hydrological cycle and its impact on water availability over land: An adverse effect of climate change. *Meteorology Hydrology and Water Management*, 12(1), 1–21. <https://doi.org/10.26491/mhwm/188920>

European Environment Agency. t.y. Maximum Consecutive Five-Day Precipitation. Climate-ADAPT. Erişim tarihi: 11 Kasım 2025, <https://climate-adapt.eea.europa.eu/en/metadata/indicators/maximum-consecutive-five-day-precipitation>

FAO, Food and Agriculture Organization (FAO) Digital Soil Map of the World (DSMW). (2025). Available online: <https://www.fao.org/land-water/land/land-governance/land-resources-planning-toolbox/category/details/en/c/1026564/>

Felix, M. L., Kim, Y.-k., Choi, M., Kim, J.-C., Do, X. K., Nguyen, T. H., & Jung, K. (2021). Detailed Trend Analysis of Extreme Climate Indices in the Upper Geum River Basin. *Water*, 13(22), 3171. <https://doi.org/10.3390/w13223171>

Gal-Chen T, Somerville, RC. (1975). “On the use of a coordinate transformation for the solution of the Navier-Stokes equations”, *Journal of Computational Physics*, 17(2), 209–228

Hagemann, S., Chen, C., Clark, D. B., Folwell, S., Gosling, S. N., Haddeland, I., Hanasaki, N., Heinke, J., Ludwig, F., Voss, F., & Wiltshire, A. J. (2013). *Climate change impact on available water*

resources obtained using multiple global climate and hydrology models. *Earth System Dynamics*, 4(1), 129–144. <https://doi.org/10.5194/esd-4-129-2013>

Hailu, D., Woldetsadik, M., & Ayal, D. Y. (2025). Changes in extreme rainfall indices in Wereilu district, northeastern Ethiopian highlands, using innovative trend analysis. *Discover Applied Sciences*, 7, 223. <https://doi.org/10.1007/s42452-025-06657-3>

Hargreaves, G. H. (1994). Defining and using reference evapotranspiration. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 120(6), 1132–1139.

Hatfield, J. L., & Prueger, J. H. (2015). Temperature extremes: Effect on plant growth and development. *Weather and Climate Extremes*, 10, 4–10. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2015.08.001>

Hausfather, Z., & Peters, G. P. (2020). RCP8.5 is a problematic scenario for near-term emissions. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(45), 27791–27792. <https://doi.org/10.1073/pnas.2017124117>

Hayes MJ, Svoboda MD, Wilhite DA, Vanyarkho OV. (1999). Monitoring the 1996 drought using the standardized precipitation index. *Bulletin of the American Meteorological Society* 80: 429–438.

Heise, E. Ritter, B. Schrodin, R. (2006). Operational Implementation of the Multilayer Soil Model; Deutscher Wetterdienst: Offenbach, Germany. Available online:<https://www.cosmo-model.org/content/model/cosmo/techReports/docs/techReport42.pdf>

IPCC (2014). Intergovernmental Panel on Climate Change. *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC.

IPCC (2018). Intergovernmental Panel on Climate Change. *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts*

of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. IPCC. <https://www.ipcc.ch/sr15/>

IPCC. (2021). Intergovernmental Panel on Climate Change. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>

IPCC. (2022). Intergovernmental Panel on Climate Change. *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009325844>

McKee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. (1993, January). The relationship of drought frequency and duration to time scales. *In Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology* (Vol. 17, No. 22, pp. 179-183).

Met Éireann. (2022a). Wettest Day (Rx1gün). Met Éireann Climate Change Indices Series. Erişim tarihi: 11 Kasım 2025, <https://www.met.ie/cms/assets/uploads/2022/09/Rx1gün.pdf>

Met Éireann. (2022b). Wettest Day (Rx5gün). Met Éireann Climate Change Indices Series. Erişim tarihi: 11 Kasım 2025, <https://www.met.ie/cms/assets/uploads/2022/09/Rx5gün.pdf>

O'Neill, B. C., Tebaldi, C., van Vuuren, D. P., Eyring, V., Friedlingstein, P., Hurtt, G., Knutti, R., Kriegler, E., Lamarque, J. F., Lowe, J., Meehl, G., Moss, R., Riahi, K., & Sanderson, B. (2016). *The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6.* Geoscientific Model Development, 9, 3461–3482. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-3461-2016>

Önol, B., & Unal, Y. S. (2003). Climate simulation of Turkey and its neighborhood by regional climate model: Sensitivity to the surface conditions. *In EGS–AGU–EUG Joint Assembly, Abstracts*

from the meeting held in Nice, France, 6–11 April 2003 (Abstract No. 589)

Önol, B., & Semazzi, F. H. M. (2009). Regionalization of climate change simulations over the Eastern Mediterranean. *Journal of Climate*, 22(8), 1944–1961. <https://doi.org/10.1175/2008JCLI1807.1>

Önol, B. (2012). Effects of coastal topography on climate: High-resolution simulation with a regional climate model. *Climate Research*, 52, 159–174. <https://doi.org/10.3354/cr01077>

Oppenheimer, M., Campos, M., Warren, R., Birkmann, J., Luber, G., O'Neill, B., & Takahashi, K. (2014). *Emergent risks and key vulnerabilities*. In C. B. Field, V. R. Barros, D. J. Dokken, K. J. Mach, M. D. Mastrandrea, T. E. Bilir, M. Chatterjee, K. L. Ebi, Y. O. Estrada, R. C. Genova, B. Girma, E. S. Kissel, A. N. Levy, S. MacCracken, P. R. Mastrandrea, & L. L. White (Eds.), *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects* (pp. 1039–1099). Cambridge University Press.

Pratap, S., & Markonis, Y. (2022). The response of the hydrological cycle to temperature changes in recent and distant climatic history. *Progress in Earth and Planetary Science*, 9(30). <https://doi.org/10.1186/s40645-022-00489-0>

Peterson, T. C., Folland, C., Gruza, G., Hogg, W., Mokssit, A., & Plummer, N. (2001, March). Report on the Activities of the Working Group on Climate Change Detection and Related Rapporteurs 1998-2001 (WMO CCI/CLIVAR WGCCD). World Meteorological Organization. <https://etccdi.pacificclimate.org/docs/wgccd.2001.pdf>

Rigby, J. R., & Porporato, A. (2008). Spring frost risk in a changing climate. *Geophysical Research Letters*, 35(12), L12703. <https://doi.org/10.1029/2008GL033955>

Ritter, B., Geleyn, J.F. (1992). A comprehensive radiation scheme for numerical weather prediction models with potential applications in climate simulations. *Monthly Weather Review*, 120, 303–325.

Rockel, B., Will, A., Hense, A. (2008). The Regional Climate Model COSMO-CLM (CCLM). *Meteorologische Zeitschrift*, 17(4), 347–348. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2008/0309>

Schlemmer, L., Schär, C., Lüthi, D., Strebel, L.A. (2018). “Groundwater and runoff formulation for weather and climate models”, *J. Adv. Model. Earth Syst*, 10, 1809–1832

Seifert, A., Beheng, K.D. (2006). “A two-moment cloud microphysics parameterization for mixed-phase clouds. Part 1: Model description”, *Meteorology and Atmospheric Physics*, 92(1–2), 45–66.

Sheng, K., Li, R., Zhang, F., Chen, T., Liu, P., Hu, Y., Li, B., & Song, Z. (2025). Response of grain yield to extreme precipitation in major grain-producing areas of China against the background of climate change—A case study of Henan Province. *Water*, 17(15), 2342. <https://doi.org/10.3390/w17152342>

Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.). (2007). Climate Change 2007: The Physical Science Basis Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Cambridge *University Press*, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp.

Sonuç, C.Y., Ünal, Y., İncecik, S. (2023). Convection-Permitting Climate Simulations with COSMO-CLM over Northwestern Türkiye under the RCP8.5 Scenario. *Int. J. Climatol*. 43, 3841–3858. <https://doi.org/10.1002/joc.8061>

Sonuç, C. Y., Yavuz, V., & Ünal, Y. (2025a). Sub-Daily Performance of a Convection-Permitting Model in Simulating Decade-Long Precipitation over Northwestern Türkiye. *Climate*, 13(2), 24. <https://doi.org/10.3390/cli13020024>

Sonuç, C. Y., Tiryaki, G. O., Ünal, Y. (2025b). Heat Stress Projections at Convection-Permitting Resolution in Northwestern Türkiye: Provincial-Level Assessment of Population Exposure, *International Journal of Biometeorology*, (accepted)

Sonuç, C. Y., Yaylacı, N., Keske, B., Kapan, N., Başayığit, L., Ünal, Y. S. (2025c). Fine-Resolution Multivariate Drought Analysis for Southwestern Türkiye under SSP3-7.0 Scenario. *Agriculture* (submitted)

Tiedtke, M. (1989). A Comprehensive Mass Flux Scheme for Cumulus Parameterization in Large-Scale Models. *Monthly Weather Review*, 117(8), 1779–1800. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1989\)117<1779:ACMFSF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1989)117<1779:ACMFSF>2.0.CO;2)

Ünal, Y. (2006). Extreme Maximum and Minimum Temperature Tendencies over Turkey within Last Three Decades. International Conference on Climate Change and the Middle East: Past, Present and Future, İstanbul, Türkiye

Ünal, Y., Moral, A. C., Sonuç, C. Y., Şahin, O., & Salkım, E. (2025). High-Resolution Projections of Bioclimatic Variables in Türkiye: Emerging Patterns and Temporal Shifts. *Climate*, 13(9), 197. <https://doi.org/10.3390/cli13090197>

Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., & López-Moreno, J. I. (2010). A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of climate*, 23(7), 1696-1718.

Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., Reig, F., Royo-Aranda, A., Arretxea, M., Gil-Guallar, M., Latorre, B., El Kenawy, A., Franquesa, M., Adell-Michavila, M., Crespillo, A., Pérez-Pajuelo, D., Domínguez-Castro, F., Barriopedro, D., Gutiérrez, J. M., Azorín-Molina, C., Gimeno, L. & Nieto, R. (2025). Developing science-informed maps and climate service for extreme precipitation in Spain. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. <https://doi.org/10.1007/s11069-025-07731-0>

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. <https://doi.org/10.1073/pnas.1701762114>

Zhou, J., Wang, Y., Su, B., Wang, A., Tao, H., Zhai, J., ... & Jiang, T. (2020). Choice of potential evapotranspiration formulas influences drought assessment: A case study in China. *Atmospheric research*, 242, 104979.

BÖLÜM 0

İKLİM DEĞİŞİKLİĞİNİN HAVZADAKİ SU POTANSİYELİ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN MODELLENMESİ

ALİ ERTÜRK¹
CENK GÜREVİN²
CEMRE YÜRÜK SONUÇ³

Giriş

İklim değışikliğinin su kaynakları üzerindeki birincil etkisi, akışa geçen su miktarı üzerinde olması beklemektedir. Bu etki doğrudan bir etkidir; başka bir deyişle, iklim değışikliği nedeniyle yağış ve sıcaklığın değışmesi, havzaların değışik bileşenlerinden akışa geçen su miktarını dolayısıyla da su potansiyelini doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle, havza ölçeğinde iklim değışikliğinin su kaynaklarına etkisinin analizindeki ilk adım havzanın su potansiyelinin değışiminin öngörülmesidir. Bu bölümde konu ile ilgili geliştirilen bir araç sunulmaktadır.

¹ Prof Dr., İstanbul Üniversitesi, Su Bilimleri Fakültesi, İçsu Kaynakları ve Yönetimi Anabilim Dalı, Orcid: 0000-0002-3532-2961

² Dr. Öğretim Üyesi, İstanbul Üniversitesi, Su Bilimleri Fakültesi, İçsu Kaynakları ve Yönetimi Anabilim Dalı, Orcid: 0000-0002-5354-949X

³ Doktor, İstanbul Teknik Üniversitesi, İklim Bilimi ve Meteoroloji Mühendisliği Bölümü, Orcid: 0000-0002-8585-1319

Su Potansiyeli

Öncelikle su potansiyeli kavramı üzerinde durulmalıdır. Değişik yayınlarda; ülkenin su potansiyeli (Selek ve Aksu; 2019), havzaların su potansiyeli (Koç ve diğ, 2022), bir ilin su potansiyeli (Akalın ve diğ., 2025) gibi tanımlarla karşılaşılmaktadır. Bu tanımlarda, değişik büyüklükteki alanlarda ve miktarlardaki su söz konusu olmakla birlikte hepsinin ortak noktası ilgili alandan birim zamanda akışa geçen su hacmidir. Bu durumda, su potansiyeli hidroloji bilimi açısından bir akış, su kaynakları yönetimi açısından debi anlamındadır. Burada önemli olan, su potansiyelinin bir rezerv ya da stok olmadığının anlaşılmasıdır.

Örneğin bir baraj gölünde depolanmış olan su, su potansiyeli değildir. İlgili örnekte, baraj gölüne birim zamanda (genellikle bir yılda), birim zamanı tanımlayan zaman aralığı içinde ortalama olarak giren su potansiyeline karşı gelmektedir. İlgili baraj gölüne kışın 10 milyon m³, ilkbaharda 15 milyon m³, yazın 2 milyon m³, sonbaharda ise 5 milyon m³ su girişi oluyorsa bu baraj gölünün su potansiyeli 32 milyon m³/yıl olarak tanımlanmıştır. Baraj gölü içinde depolanan suyun işlevi su potansiyelini arttırmak değil, birim zaman aralığı içinde belli bir ortalama debi sağlayabilmektir. Baraj gölü örneğinde önceden (giriş akışının bol olduğu kış ve ilkbaharda) depolanmış su hacmi sayesinde, su girişinin düşük olduğu mevsimlerde (bu örnekte yazın) giren debiden daha yüksek miktarlarda su çıkışı elde etmek mümkündür.

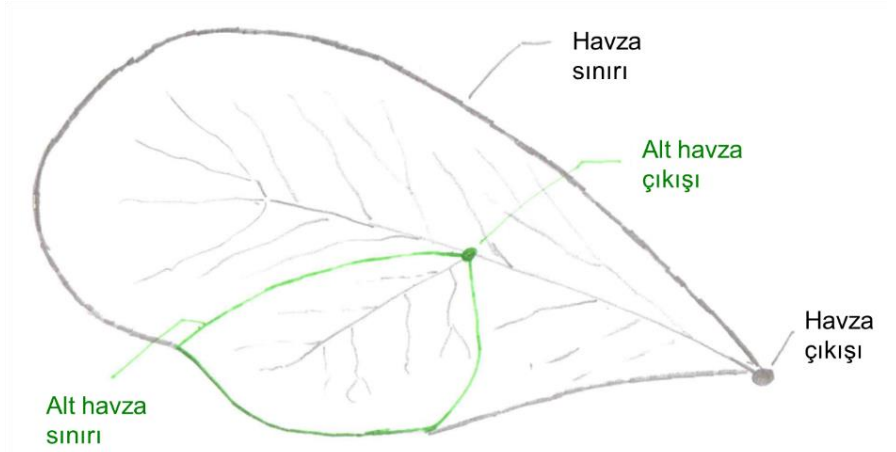
Aynı durum, herhangi bir hidrolojik rezerv için (örneğin doğal göller, akiferler hatta apartmanlardaki su depoları) geçerlidir. Her rezerv, kapasitesi ölçüsünde geçici bir süre için kendi su potansiyelini aşabilmektedir ya da aşacak şekilde işletilebilmektedir. Ancak bir önceki cümlede de vurgulandığı gibi ilgili süre geçicidir ve bir sonraki birim zaman aralığı içinde rezervin toparlanmasına izin verilmesi gerekmektedir. Rezerv içeriğinin bir su potansiyeli olmadığı unutulmamalıdır.

Su potansiyeli ile ilgili bir sınıflandırma “brüt su potansiyeli” ve “teknik ve ekonomik olarak kullanılabilir su potansiyeli” tanımlarına dayanmaktadır. Havza ölçeğinde ya da drenaj alanı ölçeğinde, bu tanımlardan birincisi doğal akışlara karşı gelmektedir. İkincisi ise; hem teknolojik nedenlerle (örneğin maksimum pompa basma yüksekliği), hem ekonomik nedenlerle (örneğin suyun faydalanılabilir miktar ve nitelikte ancak çok uzakta olması) hem de yasal, idari veya politik nedenlerle (su tahsisi, çevresel akış bırakma zorunluluğu, su hakları, vb.) havzadan birim zamanda elde edilebilen su miktarını temsil etmektedir. Bu çalışmada söz konusu olan su potansiyeli brüt su potansiyelindeki değişimlerdir.

Havza Ölçeğinde Ayrıklaştırmanın Genel Şeması

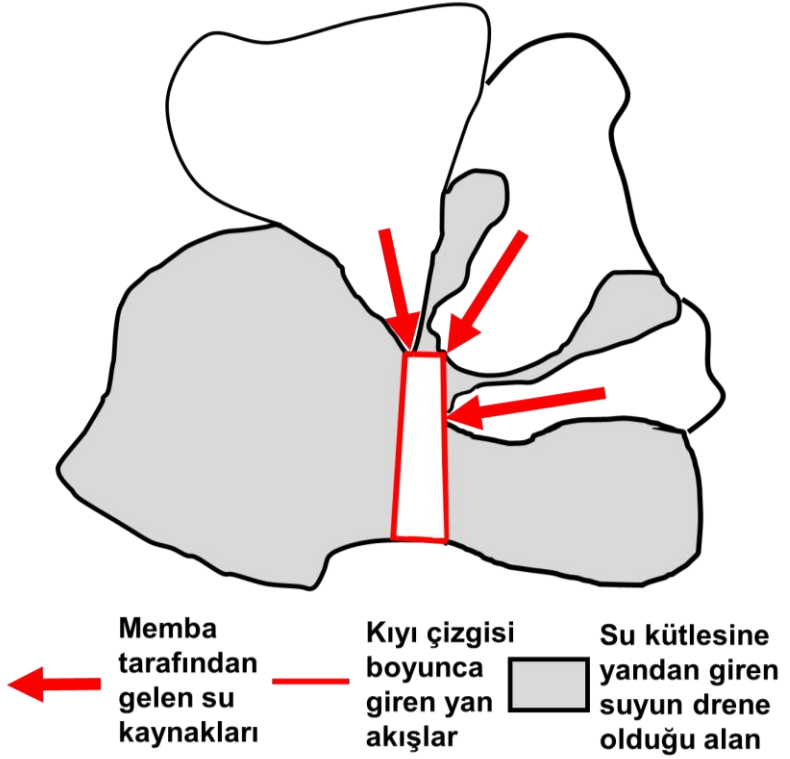
Havza yönetiminde; havza içinde bütünsellik esas olmakla birlikte gerek havzanın fiziksel yapısı gerekse havza içindeki yerel su yönetimi gereksinimleri nedeniyle havza değişik “alansal alt birimlere” (coğrafi, kavramsal, hesap odaklı) bölünmektedir. Havzalar yağışı akışa çeviren sistemlerdir. Herhangi bir havza en temelde üzerine düşen suyu tanımlandığı çıkış noktasına drene eden alandır. Örneğin Sakarya Nehri’nin Karadeniz’e döküldüğü nokta Sakarya Nehri Havzası (bilinen adıyla Sakarya Havzası) olarak tanımlanabilir. Sakarya Havzası içinde, Sakarya Nehri ana koluna ulaşan olan bir akarsuyun Sakarya Nehrine ulaştığı nokta temel alınarak yapılan bir drenaj alanı ise, (örneğin Porsuk Çayı ya da Ankara Çayı), Sakarya Nehri açısından bakıldığında bir alt havza olarak tanımlanabilir. Bu durum, Şekil 1’de şematik olarak gösterilmiştir.

Şekil 1 Havza ve alt havza.



Bu çalışmada; söz konusu havzalar (Beyşehir Gölü Havzası, Eğirdir Gölü Havzası ve Küçük Menderes Havzası) öncelikle Şekil 1’de gösterilen alt havzalara benzeyen akış öteleme birimlerine ayrılmıştır. Bu birimlerin tanımında “alt havza” terminolojisinin kullanılmasının iki nedeni vardır. Birinci neden, alt havzaların coğrafi, akış öteleme birimlerinin bu çalışmanın amacına uygun kavramsal bir alt birim olmasıdır ve akışın hareket yönüne odaklanma amaçlanmıştır. Çalışmada havza içindeki su kütlelerine (ki bunlar kendi yakın civarları için birer sulama suyu kaynağıdır) odaklı bir alt birimlendirme yapılması uygun görülmüştür. Ayrıca herhangi bir su kaynağına doğrudan drene olan ve membadan etki eden alanların gerektiğinde ayrı ayrı dikkate alınabilmesi de amaçlanmıştır (Şekil 2). İkinci neden ise aslında kısmen birinci neden ile ilişkilidir. Türkiye’deki ana nehir havzaları ve bunların alt havzaları idari anlamda tanımlanmış olduğu için, bu çalışma çıktılarının raporlanması durumunda herhangi bir karışıklığa neden olunmaması ilkesi esas alınmıştır.

Şekil 2 Akış öteleme birimleri.



Akış öteleme birimleri suyu havza içinde yönlendirmekle birlikte, yağışın akışa dönüştürülmesi anlamında homojen değildir. Örneğin bir bölgenin toprağı çok su tutabilirken diğer bölgenin toprağı suyu az tutabilir. Bu nedenle, akış öteleme birimleri hidrolojik işlem birimlerine ayrılmıştır. “Hidrolojik işlem birimleri” terimi tanımından da anlaşılabilirceği gibi coğrafi ya da kavramsal bir alt birim olmaktan çok, hesap odaklı bir alt birim türüdür ve çalışma kapsamında yağış su potansiyelinin hesaplanmasına uygun olarak akışa dönüştüren ve kendi içinde konuma göre homojen olan bir alanı temsil etmektedir. Takip eden kısımlarda açıklanacak nedenlerle hidrolojik işlem birimleri; önceki bölümde kullanılan

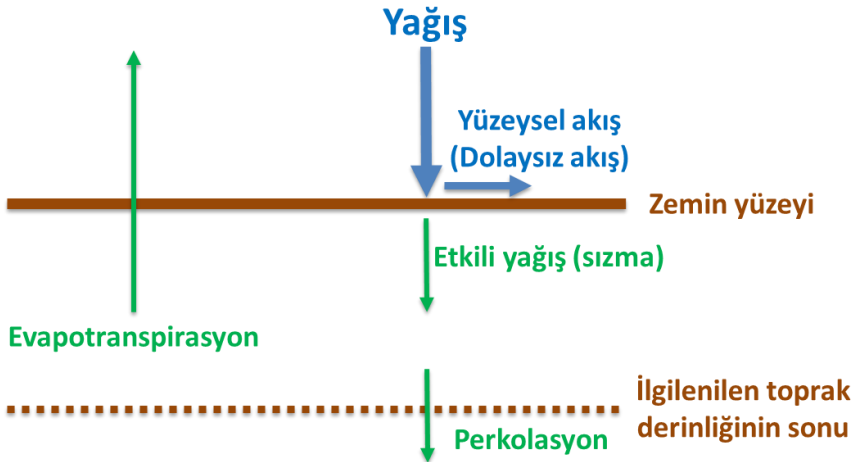
Hidrolojik İşlem Birimi İçindeki Su Döngüsü

Hidrolojik hesap platformları, su döngüsünü basitten karmaşığa değişik ayrıntılarda ele almaktadır. Bir havza sisteminde yağışın akışa dönüştürülmesi iki temel yöntem ile yapılmaktadır.

Bu yöntemlerden birincisi, veriye dayalı olup regresyon analizi temellidir. Regresyon analizine dayalı yöntemlerin geliştirilmesi, “yapay sinir ağları”, onların da daha çok veriye, daha gelişmiş tekniklere ve hesap gücüne dayandırılmaları “makine öğrenmesi” ya da “derin öğrenme” sınıfındaki yağış-akış analizi sistemlerinin tasarlanıp uygulanmalarını sağlamıştır. Bu sistemler genellikle “kara kutu modelleri” olarak da adlandırılmaktadır.

İkinci yöntem ise sistem dinamiğine dayanmaktadır ve bir havzadaki su depoları (stoklar) ve bu stoklar arasındaki akışları sağlayan hidrolojik prosesleri içermektedir. Bu modeller ise “fiziksel mekanizma tabanlı hidrolojik modeller” olarak sınıflandırılmaktadır. Bu çalışmada, ikinci yöntem esas alınmıştır. Proje ihtiyaçlarına göre yapılandırılan modelin temel şeması, Şekil 4’te verilmektedir.

Şekil 4 Hidrolojik modelin temel şeması.



Şekil 4'te verilen model, aylık zaman aralıkları ile çalışmaktadır. Modelde, zemin nemi olmak üzere yalnızca bir stok mevcuttur. Bu stoka girdi sağlayan hidrolojik süreçler sızma (burada etkili yağış, başka bir deyişle zemine sızabilen yağış olarak adlandırılmıştır ve yabancı literatürde infiltrasyona karşı gelmektedir), stoktan çıkışa neden olan hidrolojik süreçler ise evapotranspirasyon (buharlaşıma ve terleme, ya da zeminden buharlaşma) ve perkolasyon (derine sızma) olarak tanımlanmıştır. İlgili model, “su bütçesi” ya da “su bilançosu” hesabı olarak değişik kaynaklarda verilmektedir. Temel algoritması Şekil 5'te verilen ve aslında Thonthwaite ve Mather (1957) tarafından geliştirilmiş olan bu yöntem, Türkiye’de birçok çalışmada (Doğdu, 2011; Demir ve diğ, 2015; Usta, 2016) kullanılmış ve bazı ders kitapları (Bayazit, 2003) kurum içi el kitapları (DSİ, 1969) ya da hizmet içi eğitim sunuşlarında örnek gösterilmiştir.

Modelin iki temel girdisi, hesap yapılacak her ay için yağış ve potansiyel evapotranspirasyondur (PET). PET, mevcut olması durumunda ortam koşullarında birim zamanda (ay) zeminden buharlaşabilen su derinliği olarak tanımlanmıştır. Bunun dışında bir stok olarak hesaba başlanan ay başındaki zemin nemi ve bir parametre olarak tarla kapasitesi (toprakta ağırlık kuvvetleri ile kapiler kuvvet dengesi ile ilişkili olarak tutulabilen su miktarının derinlik eşdeğeri olup “mm su” biriminde verilmektedir) de gerekli girdilerdendir. Ancak hem hidroloji biliminin temelleri hem de bu çalışmanın gereksinimleri göz önünde bulundurulduklarında Şekil 5'te verilen hesap algoritması uygulanırken dikkat edilmesi gereken hususlar vardır.

Yöntemin uygulama örneklerinin çoğunda, yağışın önce zemine girip zemin nemine katıldığı, arkasından evapotranspirasyon olayı gerçekleştikten sonra fazlasının akışa geçtiği varsayılmıştır. Gerçekte ise; yağış sırasında suyun bir kısmı zemin nemine hiç

katılmadan ve zemin içine sızmadan doğrudan yüzeysel akışa geçmekte ve yerüstü su birimlerine ulaşmaktadır.

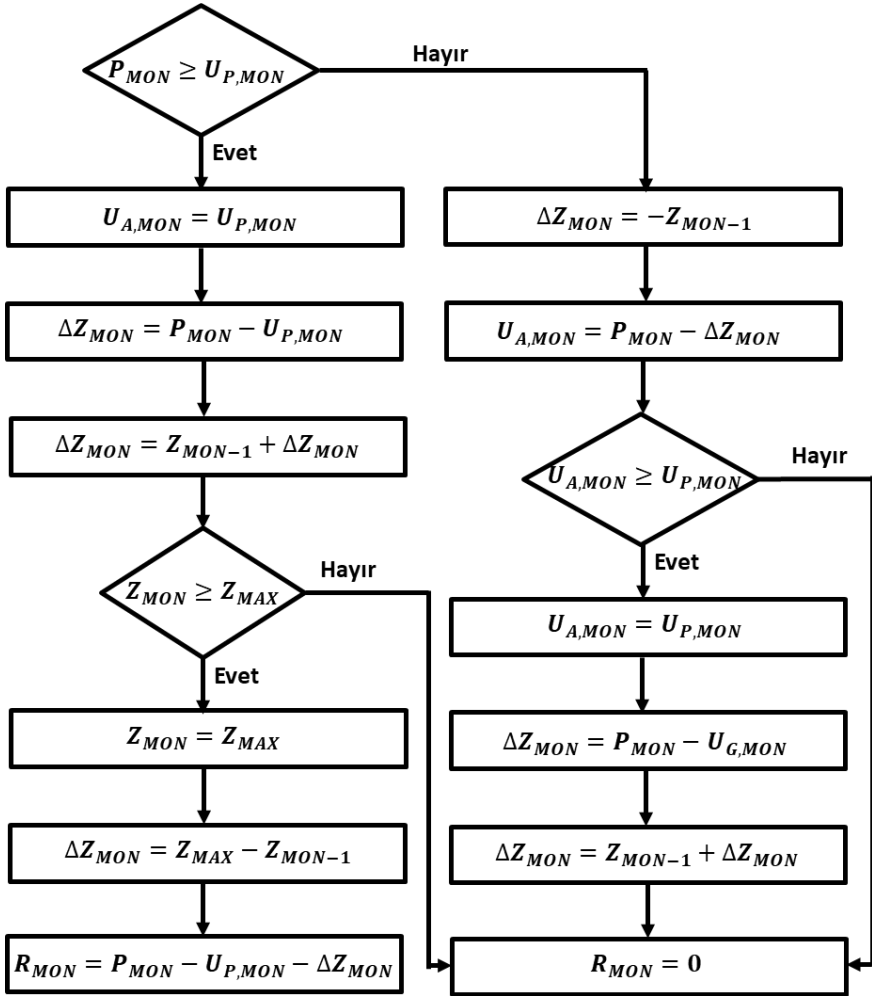
Yöntemin uygulama örneklerinin çoğunda, “su rezervi” adı altında 100 mm kullanılmaktadır. Aslında önceki paragraflarda belirtilmiş olan zeminin “tarla kapasitesi” kast edilmektedir ve bu nedenle 100 mm değeri doğrudan kullanılmamıştır.

Orijinal yöntemde; akış adı altında aslında zemin nemi rezervinden dışarı kaçan su hesaplanmaktadır. Gerçekte bu suyun bir kısmı yüzey altı akış ile yerüstü su birimlerine bir kısmı da perkolasyon ile düşey yönde zemin nemi bölgesinden dışarıya hidrojeolojik işlem birimlerine hareket etmektedir. Bu nedenle, Şekil 5’te “perkolasyon” olarak gösterilen akış aslında düşey yöndeki perkolasyon ve yatay yöndeki yüzey altı akış olmakla birlikte hem yüzey altı akışın nispeten küçük değerler alması hem su potansiyeli açısından zaten ikisinin toplamının önemli olması nedeniyle bu durum ayrıntılı olarak dikkate alınmamış, zemine giren suyun dışarı akışı “perkolasyon” terimi ile kapsanmıştır.

Yağışın bir kısmı, zemine hiç girmeden yüzeysel akışa dönüşmektedir. Yüzeysel akış, herhangi yerüstü su kaynağına ulaşabileceği ya da bir su alma yapısı ile toplanabileceği varsayılarak doğal akış tabanlı brüt su potansiyeline dâhil edilmiştir. Bu durumda hesaplanması gerekmektedir.

Kurulan altyapıda yüzeysel akışı hesaplamak yerine, önce etkili yağışın hesaplanmakta ve yağıştan çıkarılarak yüzeysel akış belirlenmektedir. Etkili yağışın hesaplanmasında Şekil 7’de verilen algoritma kullanılmıştır. İlgili algoritma aylık akışlar için uygundur. İlgili yöntemde aylık zaman ölçeği dikkate alındığında düşük yağışlar sızma, yüksek yağışlar ise yüzeysel akışa geçme eğilimindedir. DSİ ilgili yöntemi Soil Conservation Service (1970) ve Brouwer ve diğ., (1986) gibi kayaklardan Türkiye’deki koşulları da göz önünde bulundurarak onaylamıştır.

Şekil 5 Modelin temel algoritması.



MON : Ay indeksi

P : Etkili yağış

U_P : Potansiyel evapotranspirasyon,

U_A : Gerçekleşen evapotranspirasyon

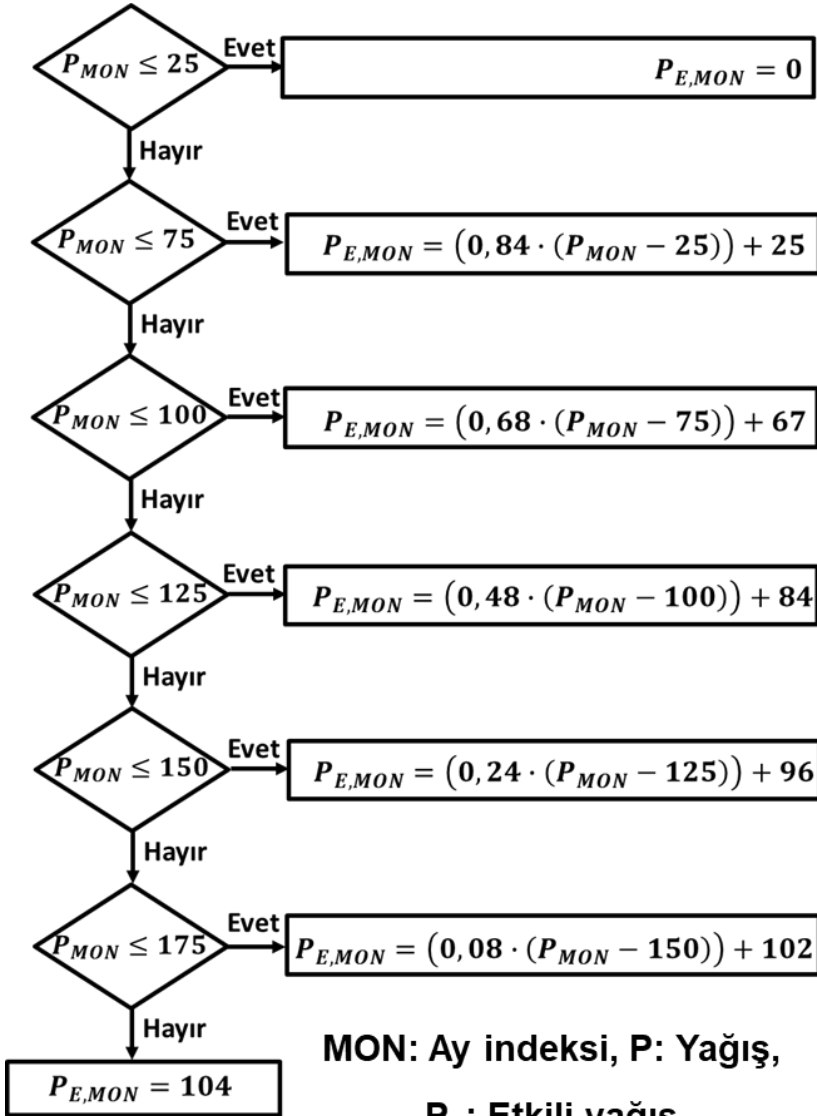
Z : Zemin nemi

ΔZ : Zemin nemindeki değişim

Z_{max} : Tarla kapasitesi

R : Topraktan dışarı akış

Şekil 6 Zemin nemi açısından etkili yağışın hesaplanması.



Not: Şekildeki sayılar mm/ay birimindedir.

Zemine sızan su, zemin nemi stoğuna katılmaktadır. Zemin nemi toprak özelliklerine (tarla kapasitesi) göre tutulmaktadır. Fazla su perkolasyon ve yüzey altı akış ise zemin nemi stoğundan çıkarak dolaylı olarak toplam akışa (su potansiyeline) katılmaktadır. Bu çalışmada yüzey altı akış ihmal edilmiştir. Zemin nemi, izlediği hidrolojik yola göre önemli ölçüde gecikerek görünür ve duruma göre bir sonraki dönemin (örneğin bir sonraki hidrolojik yıl) akışına katılabilir. Ancak burada unutulmaması gereken suyun ne kadar gecikerek akışını tamamlarsa tamamlasın olduğu yılı temsil eden su potansiyeline dâhil olduğudur.

Şekil 6’da verilen yöntemin bir gereği olarak zemin nemi stoğu üzerinden su bütçesi kurabilmek için, aylık potansiyel evapotranspirasyon (PET) hesaplanmaktadır. Aylık PET hesabı için Lowry ve Johnson (1942); Thonrthwaite (1948); Blaaney ve Cridle (1950); Hargreaves, (1975) gibi değişik ampirik yöntemler geliştirilmiştir.

Bu çalışmada, Thonrthwaite (1948) tarafından geliştirilen yöntemin kullanılması uygun görülmüştür. Bu yöntemin seçilmesinin nedenleri; girdisinin yalnızca aylık sıcaklık olması, kalibrasyon gerektirmemesi, Türkiye koşullarında başarıyla uygulanmış olması (Birsoy ve Ölgün, 1992; Doğdu, 2011; Usta, 2016), DSİ su bütçesi uygulamalarında kullanılması (Doğdu, 2011) ve Türkiye’deki özellikle de Akdeniz Bölgesi’ndeki iklim koşulları dikkate alındığında çoğu durumda gerçekleşen evapotranspirasyonun potansiyel evapotranspirasyon düzeyine ulaşamaması nedeniyle potansiyel erozyon hesabı hassasiyetinin nispeten önemsiz olması ve bu nedenle daha karmaşık formüllerin kullanılması için gerekli veri temini çabasının anlamlı olmaması sayılabilir.

Thonrthwaite (1948) yöntemine PET hesaplanması Denklem 1, 2 ve 3’te verilmektedir.

$$PET = 16 \cdot \left(\frac{10 \cdot T_i}{I} \right)^a \cdot F(\lambda)$$

(Denklem 1)

$$a = (6,75 \cdot 10^{-7} \cdot I^3) - (7,71 \cdot 10^{-5} \cdot I^2) + (1,79 \cdot 10^{-2} \cdot I) + 0,49239$$

(Denklem 2)

$$I = \sum_{i=1}^{12} \left(\left(\frac{T_i}{5} \right)^{1,514} \right)$$

(Denklem 3)

Bu denklemlerde; T_i aylık ortalama hava sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$), $F(\lambda)$ ise enleme ve aya bağılı düzeltme katsayısı anlamındadır. Düzeltme katsayısı de Marsily (1986) tarafından tablolaştırılmıştır. Doğdu (2011) ilgili sayı tablosunu regresyon yöntemleri kullanarak enlem ve ayı girdi olarak alıp düzeltme faktörü olarak veren fonksiyonlar geliştirmiştir (Tablo 1).

Tablo 1 Düzeltme katsayıları için regresyon denklemleri.

Ay	Denklem
Ocak	$F(\lambda) = -(7 \cdot 10^{-5} \cdot \text{Enlem}^2) - (2,3 \cdot 10^{-3} \cdot \text{Enlem}) + 1,0312$
Şubat	$F(\lambda) = -(4 \cdot 10^{-5} \cdot \text{Enlem}^2) - (1,0 \cdot 10^{-3} \cdot \text{Enlem}) + 0,9349$
Mart	$F(\lambda) = 1,04$ eğer $\text{Enlem} = 0$ $F(\lambda) = 1,03$ eğer $0 < \text{Enlem} < 43$ $F(\lambda) = 1,02$ eğer $\text{Enlem} \geq 43$
Nisan	$F(\lambda) = (3 \cdot 10^{-5} \cdot \text{Enlem}^2) + (1,3 \cdot 10^{-3} \cdot \text{Enlem}) + 1,0119$
Mayıs	$F(\lambda) = (6 \cdot 10^{-5} \cdot \text{Enlem}^2) + (2,5 \cdot 10^{-3} \cdot \text{Enlem}) + 1,0475$
Haziran	$F(\lambda) = (7 \cdot 10^{-5} \cdot \text{Enlem}^2) + (3,2 \cdot 10^{-3} \cdot \text{Enlem}) + 1,0147$
Temmuz	$F(\lambda) = (6 \cdot 10^{-5} \cdot \text{Enlem}^2) + (3,3 \cdot 10^{-3} \cdot \text{Enlem}) + 1,0444$
Ağustos	$F(\lambda) = (4 \cdot 10^{-5} \cdot \text{Enlem}^2) + (2,0 \cdot 10^{-3} \cdot \text{Enlem}) + 1,0427$
Eylül	$F(\lambda) = 1,01$ eğer $0 \leq \text{Enlem} < 10$ $F(\lambda) = 1,02$ eğer $10 \leq \text{Enlem} < 29$ $F(\lambda) = 1,03$ eğer $29 \leq \text{Enlem} < 38$ $F(\lambda) = 1,04$ eğer $38 \leq \text{Enlem} < 48$ $F(\lambda) = 1,05$ eğer $48 \leq \text{Enlem} < 50$ $F(\lambda) = 1,06$ eğer $\text{Enlem} \geq 50$
Ekim	$F(\lambda) = -(2 \cdot 10^{-5} \cdot \text{Enlem}^2) - (1,3 \cdot 10^{-3} \cdot \text{Enlem}) + 1,0363$
Kasım	$F(\lambda) = -(6 \cdot 10^{-5} \cdot \text{Enlem}^2) - (2,2 \cdot 10^{-3} \cdot \text{Enlem}) + 1,0040$
Aralık	$F(\lambda) = -(8 \cdot 10^{-5} \cdot \text{Enlem}^2) - (2,4 \cdot 10^{-3} \cdot \text{Enlem}) + 1,0307$

Tablo 1’deki denklemler kullanılırken enlemin alışlagelmiş olarak derece-dakika-saniye düzeni yerine ondalıklı olarak verilmesi gerekmektedir.

Model için gerekli diğer önemli girdi ise tarla kapasitesidir. Tarla kapasitesinin belirlenmesi için iki temel yöntem, arazi ölçümleri ve pedotransfer fonksiyonlarının kullanımıdır. İlk kez Bouma (1989) tarafından kullanılan Pedotransfer fonksiyonları terimi; derinlik, bünye, organik madde içeriği gibi bazı temel toprak parametrelerini girdi olarak kullanarak tarla kapasitesi, solma noktası, özgül ağırlık, hidrolik iletkenlik gibi her çalışmada kolaylıkla elde edilemeyen toprak hidrolojik parametrelerinin tahmin edilmesini sağlayan ampirik denklemlerdir. Tooth ve diğ., (2015), Weber ve diğ (2021) ve Szabo ve diğ (2021) gibi yayınlarda yeni pedotransfer fonksiyonları geliştirilmiştir. Pedotransfer fonksiyonlarının türetilmeleri ve kullanımları ile ilgili ayrıntılı bir inceleme Van Looy ve diğ. (2017) tarafından sunulmuştur. Csikós ve diğ. (2023) Weber ve diğ. (2024) ve Kassai ve diğ. (2025) gibi yeni yayınlarda ise zeminlerin temel özelliklerinin haritalanması ve ilgili veritabanlarının geliştirilmesinin önemi*ni* vurgulamaktadır. Bu konuda ilginç bir çalışma ise Abbaspour ve diğ. (2019) tarafından yapılmıştır. Çalışmada pedotransfer fonksiyonları ve 6 km x 6 km büyüklüğünde Food and Agricultural Organization (FAO) toprak haritaları kullanılarak global ölçekte ve konumsal bir toprak özellikleri veritabanı oluşturulmuştur. Bu çalışmada, tarla kapasitesi girdileri Abbaspour ve diğ (2019)’dan alınmıştır.

Modelin Uygulanması

Modelin uygulanabilmesi için başarılması gereken ilk görev, hidrolojik işlem birimlerinin belirlenmesidir. Önceden belirtilmiş olduğu gibi, hidrolojik işlem birimleri iklim modelinin hesap elemanlarına (10 km x 10 km çözünürlüğünde “kareler”) ve toprak

özelliklerine (FAO toprak tarafından geliştirilen 6 km x 6 km çözünürlüklü toprak haritaları) bağlıdır.

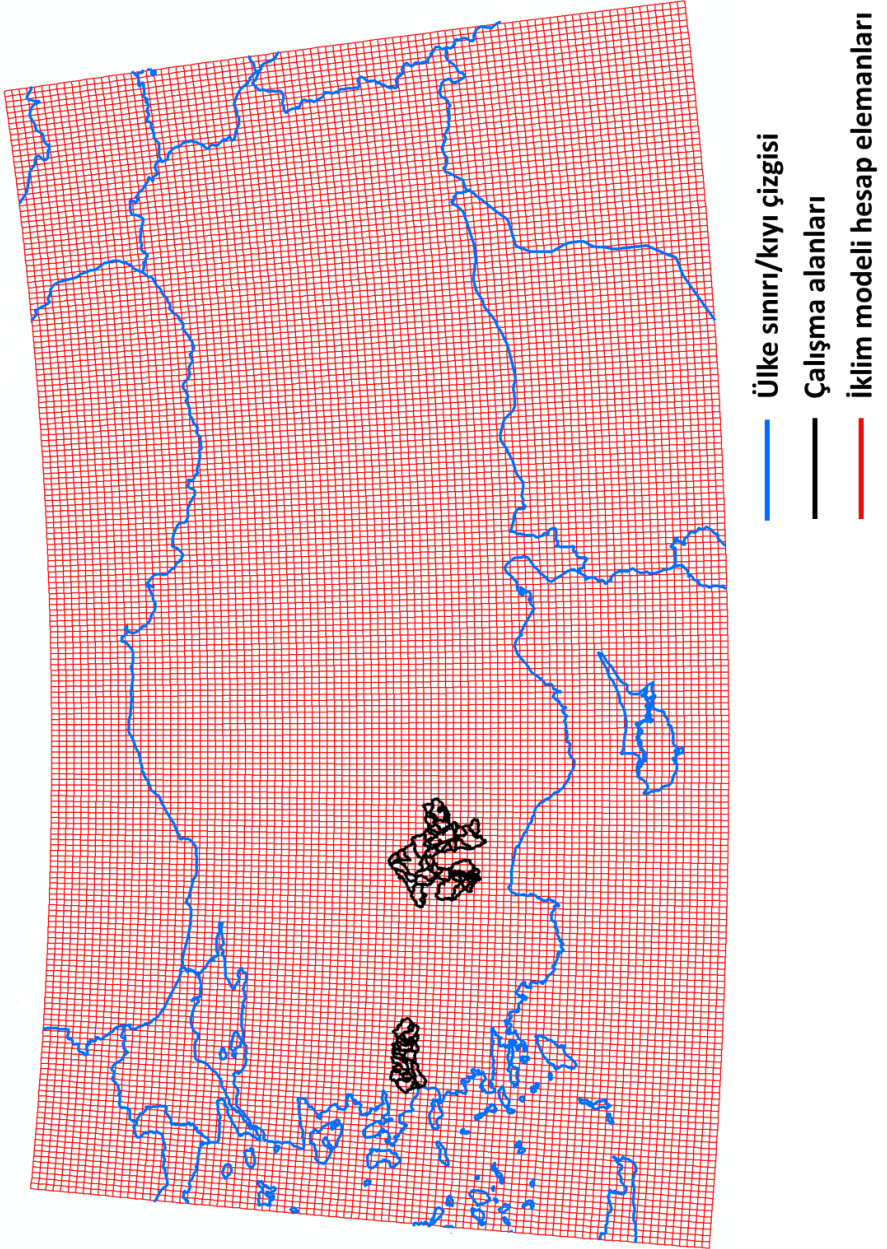
Bu çalışmada elde edilmiş olan iklim modeli çıktıları, Türkiye'yi tamamen ve yakın sınır komşularını kısmen kapsamakta olup, Network Common Data Form (NetCDF) biçiminde elde edilmiştir (Şekil 7). Elde edilen iklim modeli sonuçları 10 km x 10 km çözünürlüktedir ve aylık hava sıcaklığı ve yağışları içermektedir. NetCDF dosyaları verileri değişik alanlarda tutmaktadır. Bu çalışmadaki alanlar, Şekil 8, 9, 10 ve 11'de verilmektedir. İklim modeli çıktıları ile ilgili yapılacak ilk işlem, NetCDF dosyalarından aylık meteorolojik zaman serilerinin üretilmesidir. Bu amaçla yazılmış olan MATrix LABoratory (MATLAB) programı Şekil 12'deki kod kutusunda verilmektedir.

İşlemin ikinci adımı, NetCDF biçimindeki iklim modeli çıktıları ve daha önceden belirlenen akış öteleme birimleri, ArcGIS Coğrafi Bilgi Sistemi yazılımı kullanılarak çakıştırılmıştır (Şekil 13). Burada, örnek olarak çalışma alanlarından Küçük Menderes havzası gösterilmektedir.

Bir sonraki adımda ise, ikinci adımda üretilen sayısal haritalar (Şekil 13) FAO toprak haritası ile ArcGIS ortamında çakıştırılarak hidrolojik işlem birimleri elde edilmiştir (Şekil 14). Buna göre elde edilen hidrolojik işlem birimleri, iklimlerini temsil eden meteorolojik zaman serileri ve toprak özelliklerini temsil eden FAO toprak haritası kodu açısından tekildirler.

Bu çalışma için oluşturulan hidrolojik işlem birimleri Şekil 15'de verilmektedir. Çalışmadaki havzalarda akış öteleme birimleri üç havza için de 20 civarındadır. Hidrolojik işlem birimleri de 200-300 civarındadır. Bu sayılar genel ölçü niteliğinde olmayıp, her proje için farklı olabilmektedir.

Şekil 7 İklim modeli sonuçları.



Şekil 8 İklim modeli referans dönem aylık hava sıcaklığı çıktıları.

```
dimensions:
  time = UNLIMITED ; // (240 currently)
  bnds = 2 ;
  longitude = 201 ;
  latitude = 91 ;
variables:
  double time(time) ;
    time:standard_name = "time" ;
    time:long_name = "time" ;
    time:bounds = "time_bnds" ;
    time:units = "seconds since 1991-08-01T00:00:00+00:00" ;
    time:calendar = "proleptic_gregorian" ;
    time:axis = "T" ;
  double time_bnds(time, bnds) ;
  float longitude(longitude) ;
    longitude:standard_name = "longitude" ;
    longitude:long_name = "longitude" ;
    longitude:units = "degrees_east" ;
    longitude:axis = "X" ;
  float latitude(latitude) ;
    latitude:standard_name = "latitude" ;
    latitude:long_name = "latitude" ;
    latitude:units = "degrees_north" ;
    latitude:axis = "Y" ;
  float height_2m ;
    height_2m:standard_name = "height" ;
    height_2m:long_name = "height above the surface" ;
    height_2m:units = "m" ;
    height_2m:positive = "up" ;
    height_2m:axis = "Z" ;
  double scen(time, latitude, longitude) ;
    scen:standard_name = "air_temperature" ;
    scen:long_name = "2m temperature" ;
    scen:units = "degC" ;
    scen:coordinates = "height_2m" ;
    scen:FillValue = NaN ;
    scen:missing_value = NaN ;
    scen:cell_methods = "time: point" ;
    scen:history = "[2024-07-05 22:24:03] : Bias-adjusted with QuantileDeltaMapping(group=Grouper(name='time'),
st(sim, interp=\linear\)) - xclim version: 0.51.0" ;
    scen:bias_adjustment = "QuantileDeltaMapping(group=Grouper(name='time\'), kind='+\').adjust(sim, interp=\l
```

Şekil 9 İklim modeli referans dönem aylık yağış çıktıları.

```
dimensions:
  time = UNLIMITED ; // (241 currently)
  bnds = 2 ;
  longitude = 201 ;
  latitude = 91 ;
variables:
  double time(time) ;
    time:standard_name = "time" ;
    time:long_name = "time" ;
    time:bounds = "time_bnds" ;
    time:units = "seconds since 1991-08-01T00:00:00+00:00" ;
    time:calendar = "proleptic_gregorian" ;
    time:axis = "T" ;
  double time_bnds(time, bnds) ;
  float longitude(longitude) ;
    longitude:standard_name = "longitude" ;
    longitude:long_name = "longitude" ;
    longitude:units = "degrees_east" ;
    longitude:axis = "X" ;
  float latitude(latitude) ;
    latitude:standard_name = "latitude" ;
    latitude:long_name = "latitude" ;
    latitude:units = "degrees_north" ;
    latitude:axis = "Y" ;
  float scen(time, latitude, longitude) ;
    scen:standard_name = "lwe_thickness_of_precipitation_amount" ;
    scen:units = "mm" ;
    scen:FillValue = NaNf ;
    scen:missing_value = NaNf ;
    scen:cell_methods = "time: sum" ;
    scen:history = "[2024-07-15 22:14:00] : Bias-adjusted with QuantileDeltaMapping(group=Grouper(name='time\'), kind='*\').adjust(sim, interp=\linear\)) - xclim version: 0.51.0" ;
    scen:bias_adjustment = "QuantileDeltaMapping(group=Grouper(name='time\'), kind='*\').adjust(sim, interp=\l
```

Şekil 10 İklim modeli gelecek için öngörülen aylık hava sıcaklığı çıktıları.

```
dimensions:
  time = UNLIMITED ; // (997 currently)
  bnds = 2 ;
  longitude = 201 ;
  latitude = 91 ;
variables:
  double time(time) ;
    time:standard_name = "time" ;
    time:long_name = "time" ;
    time:bounds = "time_bnds" ;
    time:units = "seconds since 2011-08-01T00:00:00+00:00" ;
    time:calendar = "proleptic_gregorian" ;
    time:axis = "T" ;
  double time_bnds(time, bnds) ;
  float longitude(longitude) ;
    longitude:standard_name = "longitude" ;
    longitude:long_name = "longitude" ;
    longitude:units = "degrees_east" ;
    longitude:axis = "X" ;
  float latitude(latitude) ;
    latitude:standard_name = "latitude" ;
    latitude:long_name = "latitude" ;
    latitude:units = "degrees_north" ;
    latitude:axis = "Y" ;
  float height_2m ;
    height_2m:standard_name = "height" ;
    height_2m:long_name = "height above the surface" ;
    height_2m:units = "m" ;
    height_2m:positive = "up" ;
    height_2m:axis = "Z" ;
  double scen(time, latitude, longitude) ;
    scen:standard_name = "air_temperature" ;
    scen:long_name = "2m temperature" ;
    scen:units = "K" ;
    scen:coordinates = "height_2m" ;
    scen:FillValue = NaN ;
    scen:missing_value = NaN ;
    scen:cell_methods = "time: point" ;
    scen:history = "[2025-08-27 23:00:10] : Bias-adjusted with QuantileDeltaMapping(group=Grouper(name='time\\'), kind='*\\').adjust(sim, interp='linear\\') - xclim version: 0.51.0" ;
    scen:bias_adjustment = "QuantileDeltaMapping(group=Grouper(name='time\\'), kind='*\\').adjust(sim, interp='linear\\')" ;
```

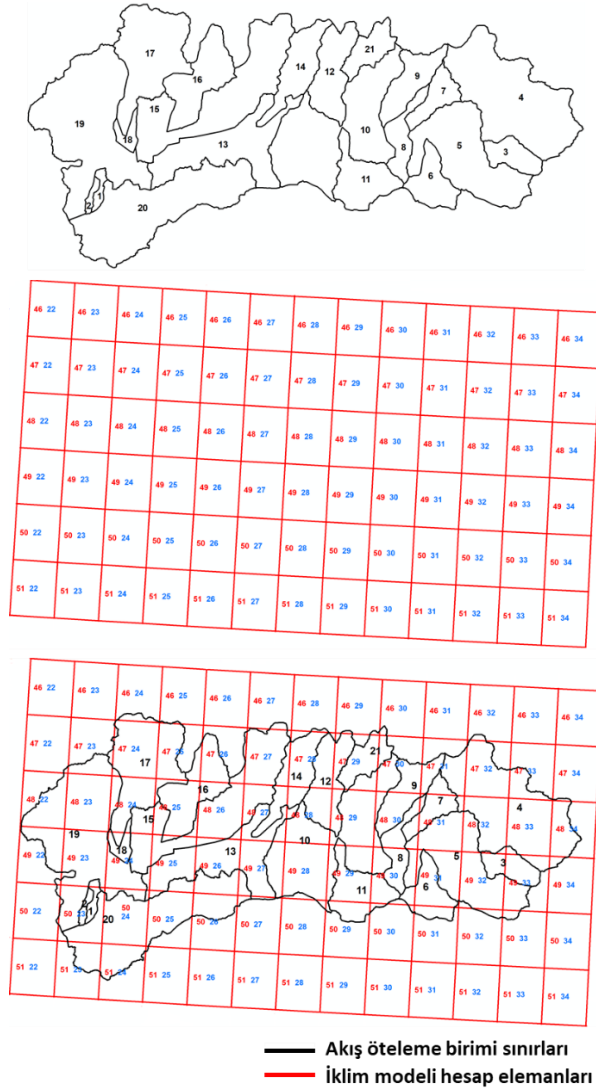
Şekil 11 İklim modeli gelecek için öngörülen aylık yağış çıktıları.

```
dimensions:
  time = UNLIMITED ; // (997 currently)
  bnds = 2 ;
  longitude = 201 ;
  latitude = 91 ;
variables:
  double time(time) ;
    time:standard_name = "time" ;
    time:long_name = "time" ;
    time:bounds = "time_bnds" ;
    time:units = "seconds since 2011-08-01T00:00:00+00:00" ;
    time:calendar = "proleptic_gregorian" ;
    time:axis = "T" ;
  double time_bnds(time, bnds) ;
  float longitude(longitude) ;
    longitude:standard_name = "longitude" ;
    longitude:long_name = "longitude" ;
    longitude:units = "degrees_east" ;
    longitude:axis = "X" ;
  float latitude(latitude) ;
    latitude:standard_name = "latitude" ;
    latitude:long_name = "latitude" ;
    latitude:units = "degrees_north" ;
    latitude:axis = "Y" ;
  float scen(time, latitude, longitude) ;
    scen:standard_name = "lwe_thickness_of_precipitation_amount" ;
    scen:units = "mm" ;
    scen:FillValue = NaNf ;
    scen:missing_value = NaNf ;
    scen:cell_methods = "time: sum" ;
    scen:history = "[2025-08-27 22:16:34] : Bias-adjusted with QuantileDeltaMapping(group=Grouper(name='time\\'), kind='*\\').adjust(sim, interp='linear\\') - xclim version: 0.51.0" ;
    scen:bias_adjustment = "QuantileDeltaMapping(group=Grouper(name='time\\'), kind='*\\').adjust(sim, interp='linear\\')" ;
```

Şekil 12 İklim modeli çıktılarının bulunduğu NetCDF dosyalarından aylık hava sıcaklığı ve yağış zaman serilerini çıkaran MATLAB programının kaynak kodu.

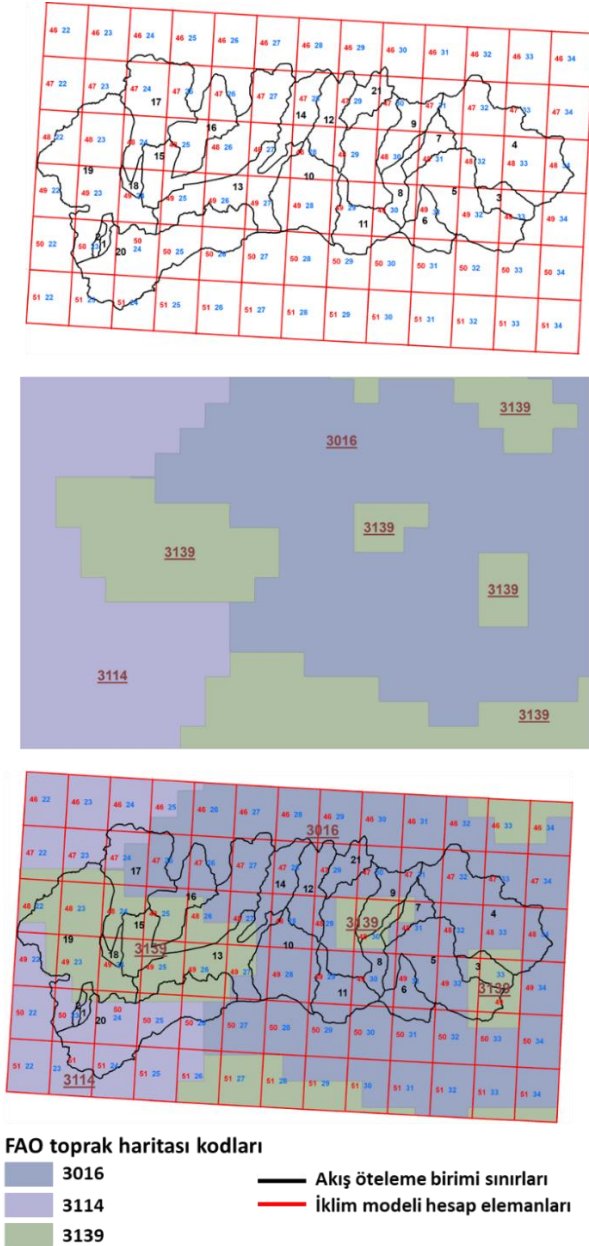
```
clear all;
HistoricalPrecipitation = ncread('mpi_tp_hourly_corrected_monmean.nc','scen');
HistoricalPrecipitationTimes = ncread('mpi_tp_hourly_corrected_monmean.nc','time_bnds');
HistoricalPrecipitation = HistoricalPrecipitation(:,:,1:240);
HistoricalPrecipitationTimes = HistoricalPrecipitationTimes(:,:,1:240);
ReferencelDateNum = datenum([1991,8,1]);
HistoricalPrecipitationDates = ...
    datevec(ReferencelDateNum + (HistoricalPrecipitationTimes ./ 86400));
HistoricalPrecipitationBegin = ...
    datevec(ReferencelDateNum + (HistoricalPrecipitationTimes(1,:) ./ 86400));
HistoricalPrecipitationEnd = ...
    datevec(ReferencelDateNum + (HistoricalPrecipitationTimes(2,:) ./ 86400));
NumDays = ...
    HistoricalPrecipitationEnd(:,3) - HistoricalPrecipitationBegin(:,3) + 1;
for i = 1:size(HistoricalPrecipitation, 3)
    HistoricalPrecipitation(:, :, i) = HistoricalPrecipitation(:, :, i) .* NumDays(i);
end
HistoricalPrecipitationYearsAndMonths = HistoricalPrecipitationBegin(:, 1:2);
HistoricalTemperature = ncread('mpi_tas_daily_corrected_celcius_monmean.nc', 'scen');
HistoricalTemperatureTimes = ...
    ncread('mpi_tas_daily_corrected_celcius_monmean.nc', 'time_bnds');
ReferencelDateNum = datenum([1991,8,1]);
HistoricalTemperatureDates = ...
    datevec(ReferencelDateNum + (HistoricalPrecipitationTimes ./ 86400));
HistoricalTemperatureYearsAndMonths = HistoricalTemperatureDates(:, 1:2);
FuturePrecipitation = ncread('mpi_ssp3_tp_corrected_monmean.nc','scen');
FuturePrecipitationTimes = ncread('mpi_ssp3_tp_corrected_monmean.nc','time_bnds');
FuturePrecipitation = FuturePrecipitation(:,:,1:996);
FuturePrecipitationTimes = FuturePrecipitationTimes(:,:,1:996);
ReferencelDateNum = datenum([2011,8,1]);
FuturePrecipitationDates = ...
    datevec(ReferencelDateNum + (FuturePrecipitationTimes ./ 86400));
FuturePrecipitationBegin = ...
    datevec(ReferencelDateNum + (FuturePrecipitationTimes(1,:) ./ 86400));
FuturePrecipitationEnd = ...
    datevec(ReferencelDateNum + (FuturePrecipitationTimes(2,:) ./ 86400));
NumDays = ...
    FuturePrecipitationEnd(:,3) - FuturePrecipitationBegin(:,3) + 1;
for i = 1:size(FuturePrecipitation, 3)
    FuturePrecipitation(:, :, i) = FuturePrecipitation(:, :, i) .* NumDays(i);
end
FuturePrecipitationYearsAndMonths = FuturePrecipitationBegin(:, 1:2);
FutureTemperature = ...
    ncread('mpi_ssp3_tas_corrected_monmean_celcius.nc', 'scen');
FutureTemperatureTimes = ...
    ncread('mpi_ssp3_tas_corrected_monmean_celcius.nc', 'time_bnds');
FutureTemperature = FutureTemperature(:,:,1:996);
FutureTemperatureTimes = FutureTemperatureTimes(:,:,1:996);
ReferencelDateNum = datenum([2011,8,1]);
FutureTemperatureDates = datevec(ReferencelDateNum+(FuturePrecipitationTimes ./86400));
FutureTemperatureYearsAndMonths = FutureTemperatureDates(:, 1:2);
save NetCDF_Extract.mat
```

Şekil 13 Akış öteleme birimleri ile iklim modeli hesap elemanlarının karşılaştırılması.

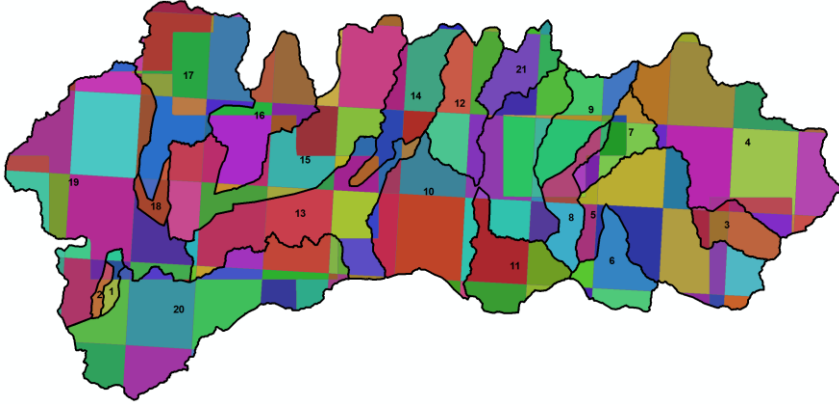


Not: Siyah sayılar akış öteleme birimlerini, kırmızı sayılar iklim modeli hesap elemalarının kuzey-güney indekslerini, mavi olanları ise doğu-batı yönündeki indekslerini temsil etmektedir.

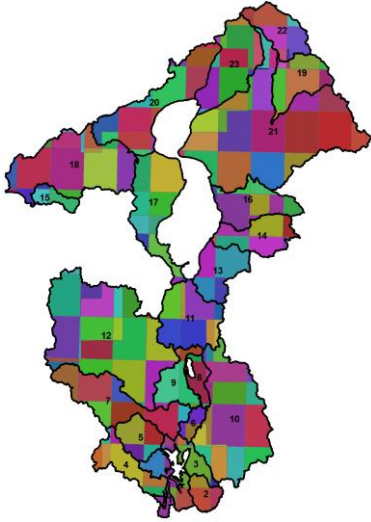
Şekil 14 Küçük Menderes Havzası örneğinde oluşturulmuş hidrolojik işlem birimleri.



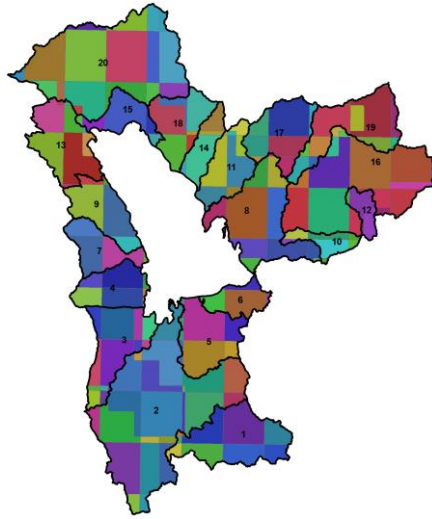
Şekil 15 Çalışılan havzalardaki hidrolojik işlem birimleri (a) Küçük Menderes Havzası (b) Eğirdir Gölü Havzası (c) Beyşehir Gölü Havzası.



(a)



(b)



(c)

Not: Havzalar ölçeksiz olup renkler görsellik için rasgele olarak tanımlanmıştır.

FAO toprak harita kodları ile ilgili, öznitelik tablosunda ise tarla kapasiteleri doğrudan verilmemiş olmakla birlikte, iki toprak katmanında (0-30 cm derinlik ve 30-100 cm derinlik), birim derinlik için bitkiye faydalı su tutma kapasitesi (tarla kapasitesinden solma noktasının çıkarılmasıyla elde edilir) verilmiştir. Bu durumda tarla kapasitesinin elde edilmesi için solma noktası belirlenmelidir. FAO toprak haritasında verilen toprak bünye özellikleri kullanılarak 0-30 cm ve 30-100 cm derinlikler için solma noktaları öngörülmüştür. Burada dikkat edilmesi gereken, ilgili haritalardaki bitkiye faydalı su tutma kapasitesinin ve solma noktasının mm su/m toprak derinliği biriminde verilmiş olmasıdır. Bu nedenle, 0-30 cm toprak derinliği için verilen/öngörülen bitkiye faydalı su tutma kapasitesi ve solma noktası 0,3 ile çarpılmalıdır. 30-100 cm toprak derinliği için ise, haritadaki tüm toprak kodlarının 100 cm derinliğe ulaşmadığı dikkate alınmalıdır. Bu durumda ilgili çarpan, maksimum bitki kök derinliğinden (m biriminde) 0,3 m çıkarıldığında elde edilen katsayıdır. Bu işlem ayrıntıları dikkate alınarak elde edilmiş olan tarla kapasiteleri üç çalışma bölgesini kapsayan tüm toprak kodları dikkate alınarak Tablo 2’de verilmektedir.

Tablo 2 Tarla kapasiteleri.

FAO toprak kodu	Tarla kapasitesi (mm)
3016	169
3026	165
3114	82
3139	307
3208	191
3310	265
6659	179

Ulaşılan bu aşamada artık su bütçesi hesapları için gerekli girdilerin tümü üretilmiştir. İlgili veriler, Şekil 16’da gösterilen işlem tablosu düzeninde ve Micsofot Excel (xlsx) biçiminde hazırlanmalıdır.

Şekil 16 Küçük Menderes Havzası örneği için hazırlanmış hidrolojik işlem birimi verileri.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	HRU	RRU	RRU_Ad	RRU_Alan_m2	IndexI	IndexJ	IndexAlan_m2	Toprak_ID	HRU_Alan_m2
2	1	1	KMG_006	13399961.77	49	23	2802476.095	3139	2802476.072
3	2	1	KMG_006	13399961.77	50	23	10597485.68	3139	3174169.269
4	3	1	KMG_006	13399961.77	50	23	10597485.68	3114	7423316.308
5	4	2	KMG_007	9321233.499	50	23	9321233.499	3139	2635339.946
6	5	2	KMG_007	9321233.499	50	23	9321233.499	3114	6685893.654
7	6	3	KMG_008	56373608	48	32	2298177.255	3139	1642118.299
8	7	3	KMG_008	56373608	48	32	2298177.255	3016	656059.0097
9	8	3	KMG_008	56373608	48	33	2680585.947	3139	2680585.976
10	9	3	KMG_008	56373608	49	32	19125806.48	3139	10392657.57
11	10	3	KMG_008	56373608	49	32	19125806.48	3016	8733148.783
12	11	3	KMG_008	56373608	49	33	32269038.32	3139	32269038.35
13	12	4	KMN_001	375821655.4	46	32	3025430.1	3016	3025430.216
14	13	4	KMN_001	375821655.4	47	31	32672342.9	3016	32672343.27
15	14	4	KMN_001	375821655.4	47	32	77747847.32	3016	77747846.46
16	15	4	KMN_001	375821655.4	47	33	28097984.33	3016	28097984.1
17	16	4	KMN_001	375821655.4	47	34	1423195.676	3016	1423195.718
18	17	4	KMN_001	375821655.4	48	31	4260227.327	3016	4260227.395

Not: Dikkat, hidrolojik işlem birimlerinin tümü gösterilmemektedir.

Tablodaki sütunlar sırasıyla hidrolojik işlem birimi no, hidrolojik işlem biriminin içinde bulunduğu akış öteleme birimi no, hidrolojik işlem biriminin adı, ilgili akış öteleme biriminin alanı (m^2), ilgili iklim modeli hesap elemanının indeksleri, ilgili iklim modeli hesap elemanının hidrolojik işlem birimi içindeki alanı (m^2), hidrolojik işlem biriminin FAO toprak haritası kodu ve hidrolojik işlem biriminin alanıdır (m^2).

Bundan sonraki aşama, hidrolojik işlem birimlerinden her birisi için aylık sıcaklık ve yağış zaman serilerinin üretilmesidir. Bu zaman serileri, iklim modeli tarafından her hesap elemanı için üretilmekle birlikte, hem bir hesap birimine birden çok hidrolojik

işlem birimi denk gelebileceği hem de bir hidrolojik işlem birimine birden çok hesap elemanı denk gelebileceği için, gerekli ağırlıklı ortalamaları alan bir MATLAB programı geliştirilmiştir (Şekil 17 ve Şekil 18).

Şekil 17 Hidrolojik işlem birimleri için aylık sıcaklık ve yağış zaman serilerini oluşturan MATLAB programının kaynak kodu.

```
clear all;
load NetCDF_Extract.mat;
HRUXLSXFileNames = {'KM_HRU.xlsx'};
NumModelDataSets = size(HRUXLSXFileNames, 1);
NumClimateDataSets = 2;
Precipitations = cell(NumModelDataSets, NumClimateDataSets);
Temperatures = cell(NumModelDataSets, NumClimateDataSets);
YearsAndMonths = cell(NumClimateDataSets, 1);
HRUSoils = cell(NumModelDataSets, 1);
HRUTables = cell(NumModelDataSets, 1);
YearsAndMonths{1} = HistoricalPrecipitationYearsAndMonths;
YearsAndMonths{2} = FuturePrecipitationYearsAndMonths;

for i = 1:NumModelDataSets
    [HRUNum, HRUTxt, HRURaw] = xlsread(HRUXLSXFileNames{i});
    HRUSoils{i} = unique(HRUNum(:,8));
    HRUTables{i} = HRUNum;

    [ClimateTimeseries] = ...
        GenerateHRUClimateTimeSeries ...
        (HistoricalPrecipitation, HRUNum);

    Precipitations{i, 1} = ClimateTimeseries;

    [ClimateTimeseries] = ...
        GenerateHRUClimateTimeSeries (HistoricalTemperature,
    HRUNum);

    Temperatures {i, 1} = ClimateTimeseries;

    [ClimateTimeseries] = ...
        GenerateHRUClimateTimeSeries (FuturePrecipitation, HRUNum);

    Precipitations{i, 2} = ClimateTimeseries;

    [ClimateTimeseries] = ...
        GenerateHRUClimateTimeSeries (FutureTemperature, HRUNum);

    Temperatures {i, 2} = ClimateTimeseries;
end
save ClimateVars.mat
```

Şekil 18 Hidrolojik işlem birimleri için aylık sıcaklık ve yağış zaman serilerini oluşturan MATLAB programı tarafından çağırılan fonksiyonun kaynak kodu.

```
function [ClimateTimeseries] = ...
    GenerateHRUClimateTimeSeries(Climate3DMatrix, HRUTable)

    NumMonths          = size (Climate3DMatrix, 3);
    WatersheUnitsList = unique(HRUTable(:,1));
    NumWatershedUnits = numel (WatersheUnitsList);
    ClimateTimeseries = zeros (NumMonths, NumWatershedUnits);

    for i = 1:NumWatershedUnits
        VerticalIndex    = HRUTable(i, 5) + 1;
        HorizontalIndex  = HRUTable(i, 6) + 1;

        ClimateTimeserie = ...
            Climate3DMatrix(HorizontalIndex, VerticalIndex, :);

        ClimateTimeseries(:,i) = ClimateTimeserie;
    end
end
```

Bundan sonraki aşama, hidrolojik işlem birimlerinde gerçekleşen su döngüsü ile ilgili tüm hesapların yapılması ve hidrolojik hesap birimi sonuçlarının kullanılarak akış öteleme birimleri için su potansiyellerinin elde edilmesidir. Bu amaçla geliştirilmiş olan MATLAB programı Ek-1’de verilmiştir.

Bu çalışma kapsamında, hesaplanan su potansiyellerinin işlenerek, tarihsel sıcaklık ve yağış zaman serilerine göre hesaplananlar ile iklim değişimi senaryosuna göre elde edilen sıcaklık ve yağış zaman serilerine göre hesaplananlar arasındaki farkların yakın geçmişten uzak geçmişe doğru ortaya koyulmaları gerekmektedir. Çalışmada, iklim değişimini temsil eden 2020-2100 yılları arası 8 on yıla (2020’ler, 2030’lar, 2040’lar, 2050’ler, 2060’lar, 2070’ler, 2080’ler ve 2090’lar) bölünmüş olup her on yılın ortalama değerleri raporlanmıştır. Su potansiyeli için raporlama işlemini yapan MATLAB programı, Ek 2’de verilmiştir. Su bütçesi bileşenleri hesaplayan diğer MATLAB programlarından potansiyel evapotranspirasyon ile ilgili raporlama yapan program Ek-3’te, gerçekleşen evapotranspirasyon ile ilgili raporlama yapan program

Ek-4'te, yüzeysel akış ile ilgili raporlama yapan program Ek-5'te, yüzey altı akış ve perkolasyonun toplamını raporlayan program ise Ek-6'da verilmektedir. Ek-2, 3, 4, 5 ve 6'da verilen programların çalıştırılabilmesi için kaynak kodu Ek-7'deki fonksiyon da gereklidir.

Sonuçlar

Gelecek onyıllar için; çalışma alanlarındaki havzaların akış öteleme birimlerine göre hesaplanarak raporlanmış yıllık su potansiyeli değişimi öngörülleri Tablo 3, Tablo 4 ve Tablo 5'te verilmektedir.

Tablo 3 Küçük Menderes Havzası su potansiyeli yüzde değişimi.

Akım Öteleme Birimi	2020'ler	2030'lar	2040'lar	2050'ler	2060'lar	2070'ler	2080'ler	2090'lar
1	-4,56	-9,97	-29,43	-14,12	-26,05	-18,76	-42,06	-59,44
2	-3,56	-9,13	-30,28	-14,78	-24,92	-18,28	-38,79	-57,47
3	-14,81	-18,21	-42,75	-22,21	-43,31	-52,21	-59,98	-69,27
4	-12,28	-12,74	-37,09	-30,16	-36,41	-46,05	-46,97	-74,79
5	-13,63	-17,05	-40,99	-29,03	-37,62	-42,61	-51,96	-69,93
6	-11,63	-13,40	-38,42	-29,83	-31,96	-40,12	-50,92	-73,70
7	-16,42	-21,50	-43,09	-29,79	-41,27	-41,00	-54,82	-67,98
8	-12,66	-20,71	-42,55	-27,80	-37,40	-39,97	-57,06	-72,09
9	-15,57	-20,77	-39,42	-25,33	-39,99	-36,13	-56,54	-67,51
10	-13,25	-17,91	-39,95	-28,54	-33,54	-34,39	-51,88	-74,27
11	-10,35	-15,33	-40,08	-32,35	-31,95	-38,65	-49,44	-75,30
12	-13,01	-14,60	-35,85	-26,14	-30,17	-31,19	-48,27	-70,94
13	-14,78	-21,85	-37,42	-22,70	-29,28	-26,34	-56,67	-72,64
14	-12,44	-15,08	-34,68	-26,33	-28,28	-30,57	-48,39	-72,31
15	-11,07	-17,30	-31,42	-18,89	-28,76	-23,17	-48,86	-72,27
16	-10,33	-15,56	-29,16	-16,91	-27,70	-19,66	-45,63	-69,82
17	-6,46	-12,97	-33,03	-21,57	-24,44	-25,57	-38,62	-65,64
18	-14,20	-21,04	-27,30	-14,42	-31,75	-23,22	-48,53	-70,69
19	-14,14	-17,94	-31,83	-20,77	-30,91	-26,01	-50,17	-69,71
20	-5,76	-13,07	-32,40	-18,57	-26,12	-20,66	-40,13	-60,76
21	-11,72	-12,75	-31,92	-23,09	-30,66	-28,05	-47,43	-66,80
22	-4,56	-9,97	-29,43	-14,12	-26,05	-18,76	-42,06	-59,44

Tablo 4 Eğirdir Gölü Havzası su potansiyeli yüzde değişimi.

Akım Öteleme Birimi	2020'ler	2030'lar	2040'lar	2050'ler	2060'lar	2070'ler	2080'ler	2090'lar
1	-15,60	-1,69	-33,16	-34,85	-39,31	-34,89	-39,41	-61,55
2	-19,08	-3,75	-33,04	-34,29	-35,89	-34,80	-37,93	-64,49
3	-18,44	-1,65	-31,95	-33,03	-35,11	-33,52	-36,69	-63,21
4	-14,77	-2,20	-27,73	-27,98	-34,12	-33,69	-34,57	-59,01
5	-15,60	-1,16	-27,33	-27,05	-34,02	-31,28	-34,26	-59,14
6	-18,58	-0,92	-31,44	-29,51	-29,17	-33,28	-39,40	-62,48
7	-15,09	-1,24	-24,78	-23,12	-31,51	-34,34	-33,99	-60,65
8	-18,24	-4,36	-33,01	-27,78	-29,07	-36,74	-39,09	-61,70
9	-19,48	-5,98	-32,16	-28,24	-33,99	-35,03	-40,04	-62,56
10	-18,52	-4,45	-31,83	-30,35	-28,83	-38,22	-35,69	-62,62
11	-19,17	-7,36	-31,08	-30,82	-33,44	-44,29	-40,13	-68,35
12	-16,92	-0,67	-25,89	-22,84	-31,68	-41,47	-36,31	-67,38
13	-16,11	-4,60	-29,18	-35,40	-34,85	-54,16	-41,74	-80,73
14	-9,84	-1,60	-19,21	-27,21	-25,76	-42,03	-32,07	-68,51
15	-2,76	2,52	-26,63	-22,54	-29,54	-47,41	-34,47	-79,18
16	-9,26	1,54	-18,87	-28,21	-25,84	-47,08	-34,58	-78,42
17	-8,16	0,84	-25,23	-22,14	-25,98	-47,83	-34,07	-74,36
18	-5,74	-3,79	-27,39	-24,17	-30,82	-50,26	-33,62	-79,49
19	5,37	12,06	-17,98	-16,80	-20,37	-37,49	-27,24	-78,66
20	-2,11	-2,06	-19,52	-15,90	-21,47	-39,17	-27,60	-71,83
21	1,55	10,13	-16,49	-19,63	-19,40	-40,19	-31,07	-80,41
22	5,21	10,73	-19,34	-16,74	-18,44	-36,74	-25,69	-78,02
23	5,22	1,32	-17,11	-15,75	-20,62	-33,45	-24,91	-73,03

Tablo 5 Beyşehir Gölü Havzası su potansiyeli yüzde değişimi.

Akım Öteleme Birimi	2020'ler	2030'lar	2040'lar	2050'ler	2060'lar	2070'ler	2080'ler	2090'lar
1	-15,40	-5,74	-35,82	-36,23	-36,58	-54,32	-44,54	-79,64
2	-17,71	-8,66	-35,44	-33,72	-33,30	-47,29	-41,44	-69,46
3	-17,71	-7,32	-33,91	-32,28	-32,51	-46,30	-38,63	-66,64
4	-13,61	-1,46	-27,14	-27,94	-27,53	-40,53	-33,09	-63,66
5	-15,95	2,98	-34,74	-37,45	-30,12	-58,59	-48,15	-81,70
6	-17,65	-6,20	-36,07	-40,17	-31,92	-59,50	-52,58	-83,66
7	-11,68	1,73	-24,10	-26,41	-26,74	-38,63	-30,47	-62,89
8	-9,81	-2,46	-30,21	-36,39	-17,40	-44,55	-43,47	-82,05
9	-9,44	3,55	-22,35	-26,16	-26,26	-38,42	-30,37	-64,13
10	-0,78	7,79	-23,86	-30,69	-17,84	-42,69	-42,41	-84,09
11	-10,33	6,23	-26,04	-27,38	-19,07	-44,68	-36,94	-79,22
12	3,17	16,47	-14,52	-26,97	-13,41	-45,61	-35,41	-83,79
13	-9,51	-0,52	-18,66	-26,79	-25,73	-39,94	-31,24	-66,58
14	-7,87	11,18	-22,22	-24,11	-17,48	-40,98	-35,57	-75,84
15	-8,85	18,57	-17,69	-23,82	-20,81	-40,83	-35,59	-75,26
16	5,15	16,88	-11,57	-24,40	-11,14	-39,06	-37,30	-83,61
17	0,98	12,39	-14,25	-24,15	-13,83	-34,51	-34,87	-83,17
18	-7,24	21,48	-17,60	-21,52	-16,90	-38,76	-34,77	-74,82
19	9,82	21,20	0,73	-20,05	-4,35	-29,32	-31,71	-82,93
20	-4,04	19,84	-13,18	-24,11	-15,69	-36,13	-33,86	-75,69

Tablolarda verilen sonuçlardan da görülebileceği gibi, çalışılan havzaların üçünde de su potansiyeli önemli ölçüde azalmaktadır. Tabloların üçünde de dikkat su potansiyelinde son onyılda (2090'lar) ani düşüştür. Bu durumun açıklaması aşağıdaki paragraflarda verilmiştir. Açıklamalardaki sayısal değerler Küçük Menderes Havzası örneğinden alınmış olmakla beraber diğer havzalarda da durum benzerdir.

Yağışların azalırken potansiyel evapotranspirasyon sürekli artmaktadır. Küçük Menderes Havzası için potansiyel evapotranspirasyon artış yüzdeleri, Tablo 6'da verilmektedir.

Tablo 6 Küçük Menderes Havzası potansiyel evapotranspirasyon yüzde artışları.

Akım Öteleme Birimi	2020'ler	2030'lar	2040'lar	2050'ler	2060'lar	2070'ler	2080'ler	2090'lar
1	4,08	4,09	6,95	10,28	10,81	14,06	17,08	25,06
2	3,40	3,50	6,06	9,73	10,33	13,39	17,39	25,37
3	3,96	4,12	6,95	10,25	10,86	13,86	16,97	24,82
4	3,96	4,15	6,97	10,24	10,96	13,82	17,09	24,82
5	3,76	3,81	6,62	9,94	10,64	13,50	16,88	24,63
6	4,09	4,19	6,82	10,34	10,79	13,98	17,37	24,95
7	4,16	4,30	6,84	10,44	10,87	14,09	17,62	25,14
8	3,95	3,91	6,66	9,98	10,62	13,43	16,73	24,40
9	3,97	4,08	6,67	10,40	10,87	14,07	17,88	25,74
10	3,98	3,93	6,58	9,93	10,48	13,35	16,75	24,36
11	4,16	4,15	6,86	10,60	10,91	14,06	17,73	25,44
12	3,76	3,76	6,41	10,09	10,57	13,72	17,61	25,51
13	4,12	3,93	6,70	10,54	10,83	13,93	17,65	25,45
14	4,48	4,34	6,98	10,45	10,80	13,62	16,96	24,51
15	3,81	3,75	6,44	10,09	10,52	13,66	17,54	25,45
16	3,85	3,71	6,48	10,42	10,82	14,08	18,24	26,60
17	4,07	3,92	6,64	10,53	10,81	13,92	17,74	25,68
18	3,95	3,88	6,53	10,27	10,59	13,63	17,45	25,34
19	3,62	3,55	6,26	10,07	10,50	13,66	17,73	25,90
20	3,93	3,76	6,40	10,37	10,53	13,62	17,46	25,56
21	3,99	3,82	6,62	10,42	10,70	13,77	17,73	25,77
22	3,62	3,59	6,24	10,01	10,47	13,63	17,63	25,96

Şekil 5’te verilen algoritmada, yeterli yağışın mevcut olması durumunda öncelikle potansiyel evapotranspirasyon kadar su zeminden ayrılacaktır. Yeterli yağış olmaması durumunda ise ancak mevcut yağış, çoğu durumda da yağışın tümü buharlaşacak ve kalan su eğer mevcutsa zemin neminden karşılanacaktır. Zemin nemindeki azalma (ya da tamamen kuruma) bir sonraki ay için suyun toprakta kalarak akışa (su potansiyeline) katılmasını engellemektedir.

Şekil 6’da verilen algoritmaya göre ise, yağışların azalması, yüzeysel akışın azalmasına neden olacaktır. Yüzeysel akış dolaysız olması nedeniyle nispeten az buharlaşarak su potansiyeline katılacaktır. Ancak yüzeysel akışın azalması su potansiyelinin bu bileşenin de azalması demektir. Bu durum Tablo 7’de açıkça görülmektedir. Gelişmiş bir altyapı ile bir şekilde yakalanarak depolanabilecek yüzeysel akış önemli ölçüde azalmaktadır.

Tablo 7 Küçük Menderes Havzası yüzeysel akışların yüzde değişimleri.

Akım Öteleme Birimi	2020’ler	2030’lar	2040’lar	2050’ler	2060’lar	2070’ler	2080’ler	2090’lar
1	-25.50	-7.37	-41.75	-48.65	-35.68	-56.69	-63.33	-83.70
2	-35.49	23.40	-39.91	-36.77	-26.48	-43.34	-51.83	-71.78
3	-32.15	-10.10	-44.84	-45.58	-41.08	-59.32	-55.97	-77.76
4	-39.02	-1.71	-46.52	-44.44	-36.10	-61.45	-59.10	-79.07
5	-41.52	15.92	-41.35	-40.79	-28.62	-54.45	-53.56	-76.42
6	-36.27	14.22	-46.08	-39.62	-15.01	-56.74	-62.30	-79.76
7	-31.22	-1.23	-43.01	-29.49	-2.57	-38.74	-56.91	-74.34
8	-40.11	30.28	-38.84	-39.26	-32.98	-46.19	-48.69	-73.55
9	-18.39	7.36	-25.62	-24.47	-4.50	0.92	-41.01	-63.98
10	-34.30	46.80	-35.48	-39.86	-28.43	-35.58	-46.22	-70.59
11	-8.47	14.95	-18.80	-19.84	1.04	12.86	-37.93	-63.62
12	-18.47	24.06	-23.47	-19.47	-5.22	-20.08	-36.33	-62.60
13	-3.07	19.01	-13.20	-13.83	0.34	-15.14	-31.70	-62.10
14	-26.48	23.91	-28.36	-35.85	-21.96	-34.56	-41.44	-69.11
15	-15.90	32.74	-19.62	-17.32	0.30	-18.75	-32.74	-59.44
16	-24.59	75.20	-23.58	-24.25	-12.13	-30.36	-38.27	-65.23
17	-9.35	16.57	-16.88	-18.53	-4.81	-12.47	-36.78	-65.25
18	-5.91	30.30	-14.14	-13.14	2.95	-10.73	-30.88	-62.95
19	-16.07	79.64	-17.37	-15.89	-0.19	-21.43	-30.20	-59.49
20	0.99	24.74	-6.38	-11.87	5.34	-9.72	-28.25	-60.76
21	-15.36	64.09	-17.69	-21.60	-3.94	-23.97	-34.55	-62.47
22	-33.77	34.82	-34.82	-35.59	-25.10	-44.42	-45.59	-68.78

Şekil 5'teki algoritmaya geri dönülürse, toprakta kalan su için, eğer zemin nemi tarla kapasitesinin altında ise yüzey altı akış veya perkolasyon söz konusu olmayacakken (bu nedenle de akışa, başka bir deyişle su potansiyeline katılmamaktadır), evapotranspirasyon ilerlemeye devam edecektir. Bu durum artan potansiyel evapotranspirasyonla birlikte, mevcut zemin neminin daha da yüksek oranlarda kaybına yol açacaktır. Küçük Menderes Havzası için dolaylı akışa dolayısıyla da su potansiyeline katılan su miktarındaki yüzde değişim, Tablo 8'da verilmektedir.

Tablo 8 Küçük Menderes Havzası yüzeyaltı akış ve perkolasyon toplamalarının (dolaylı akış) yüzde değişimleri.

Akım Öteleme Birimi	2020'ler	2030'lar	2040'lar	2050'ler	2060'lar	2070'ler	2080'ler	2090'lar
1	2.04	-2.92	-25.58	-14.79	-38.14	-50.21	-12.12	-72.62
2	-1.83	-13.87	-18.89	-27.64	-29.85	-53.23	-30.67	-75.13
3	19.25	-4.97	-11.36	-3.34	-13.39	-16.49	-4.23	-48.22
4	11.27	-14.94	-16.77	-15.75	-27.63	-25.71	-10.80	-49.74
5	8.71	-15.36	-15.78	-17.66	-26.66	-29.39	-16.72	-53.45
6	6.69	-9.54	-22.11	-35.04	-46.95	-60.66	-32.38	-83.86
7	-5.99	-10.46	-30.11	-49.34	-57.15	-77.36	-48.86	-91.66
8	4.96	-15.00	-15.46	-18.88	-23.08	-34.20	-19.80	-56.65
9	-2.91	-10.37	-33.90	-45.97	-27.78	-81.16	-45.45	-96.59
10	1.99	-16.33	-16.32	-19.86	-25.26	-39.73	-23.09	-61.17
11	4.37	3.00	-27.25	-37.95	-30.45	-79.82	-45.41	-97.78
12	-4.43	-6.68	-27.90	-33.11	-29.09	-62.48	-37.39	-91.25
13	7.54	14.68	-15.44	-36.19	-23.06	-66.99	-38.02	-99.02
14	-3.51	-9.15	-15.23	-23.59	-27.07	-41.84	-27.64	-65.68
15	-2.71	-2.66	-23.89	-28.46	-28.89	-55.24	-37.39	-86.36
16	1.41	-18.37	-13.84	-23.53	-26.47	-47.66	-33.84	-81.81
17	15.80	17.10	-7.67	-28.71	-15.79	-58.59	-37.69	-97.10
18	5.56	0.50	-14.32	-31.46	-24.97	-50.30	-37.52	-96.59
19	-1.77	-14.56	-17.74	-25.01	-27.26	-49.49	-37.60	-84.31
20	15.51	18.92	5.31	-25.33	-10.60	-41.94	-33.95	-97.21
21	2.62	-6.20	-10.52	-25.59	-22.60	-43.29	-33.46	-83.46
22	0.16	-11.07	-12.34	-17.89	-23.03	-35.82	-23.70	-65.73

Su bütçesinin Tablo 6, 7 ve 8'deki bileşenleri, ilgili havzanın kuraklaşmasına, hatta “kurumasına” işaret etmektedir. Bu durumun onyıllar üzerinden ilerlemesinde ise gerçekleşen evapotranspirasyon sürekli olarak artmamakta, buharlaşacak su miktarı da azaldığı için azalmakta görülmektedir (Tablo 9).

Tablo 9 Küçük Menderes Havzası gerçekleşen evapotranspirasyon yüzde değişimleri.

Akım Öteleme Birimi	2020'ler	2030'lar	2040'lar	2050'ler	2060'lar	2070'ler	2080'ler	2090'lar
1	-0.85	-3.11	-2.91	-7.46	2.30	-4.64	-6.17	-12.54
2	-0.84	-0.39	-5.74	-7.65	2.25	-8.47	-9.52	-22.85
3	-0.29	-5.59	-4.92	-8.34	0.43	-6.44	-8.67	-13.34
4	-3.56	-7.18	-6.74	-10.18	-0.01	-8.02	-10.27	-14.77
5	-4.03	-6.53	-7.64	-10.21	1.18	-10.11	-11.72	-14.65
6	-2.10	-4.78	-4.63	-9.27	1.93	-9.96	-9.07	-21.11
7	-2.27	-1.61	-5.04	-10.15	0.85	-13.24	-12.13	-26.06
8	-4.11	-3.72	-7.38	-9.23	2.45	-9.66	-11.27	-14.28
9	-3.95	1.12	-7.24	-8.91	-2.82	-11.37	-14.74	-27.94
10	-3.00	-1.62	-7.25	-8.27	5.54	-8.67	-9.42	-14.94
11	-3.95	-0.37	-5.65	-8.49	-1.46	-10.36	-15.56	-26.75
12	-2.21	2.59	-5.77	-7.39	0.20	-5.84	-11.49	-25.70
13	-2.69	-2.27	-5.84	-7.78	-1.55	-10.66	-15.06	-26.92
14	-3.06	-0.66	-8.78	-8.43	4.12	-6.12	-9.87	-15.49
15	-1.54	3.06	-5.14	-7.01	1.74	-4.13	-10.03	-23.76
16	-1.98	-2.78	-5.62	-7.83	1.84	-6.54	-8.66	-21.42
17	-3.02	-0.94	-5.65	-7.98	-0.70	-8.85	-13.66	-25.89
18	-2.03	1.12	-6.00	-7.45	1.23	-6.14	-11.84	-26.05
19	-1.53	-0.41	-4.97	-7.91	1.78	-5.60	-9.22	-23.06
20	-2.03	-0.31	-5.77	-7.75	0.71	-7.56	-11.60	-24.56
21	-0.66	-0.57	-5.31	-6.92	3.07	-5.36	-7.79	-19.96
22	-2.17	-1.87	-7.11	-8.08	5.60	-6.30	-9.33	-17.04

Tablo 9'dan da görüldüğü gibi, özellikle 2080'ler ve 2090'lar diğer on yıllara göre, gerçekleşen evapotranspirasyonun önemli ölçüde azaldığı yıllardır. Ancak bu durumun nedeni, buharlaşmaya neden olan koşulların yumuşaması değil, buharlaşacak su kalmamış olmasıdır, çünkü Tablo 6'ya bakıldığında aslında potansiyel evapotranspirasyonun artışı suyun buharlaşmasına neden olan koşulların kesinlikle yumuşamadığını göstermektedir.

Bu çalışmada elde edilen su potansiyelleri, doğal akışlara karşı gelmektedirler. Bu nedenle DSİ ya da benzer kurumlar tarafından üretilen doğal akışlar ile kullanımları uygundur.

Ek-1 Su Döngüsü Hesaplarını Yapan MATLAB programı

```
clear all;

load ClimateHru.mat;

HRUFieldCapacities = cell(2,1);
WaterPotentials_mm = cell(NumModelDataSets, NumClimateDataSets);
WaterPotentials_m3 = cell(NumModelDataSets, NumClimateDataSets);
PETFs_mm           = cell(NumModelDataSets, NumClimateDataSets);
PETFs_m3           = cell(NumModelDataSets, NumClimateDataSets);
AETs_mm            = cell(NumModelDataSets, NumClimateDataSets);
AETs_m3            = cell(NumModelDataSets, NumClimateDataSets);
SRUNs_mm           = cell(NumModelDataSets, NumClimateDataSets);
SRUNs_m3           = cell(NumModelDataSets, NumClimateDataSets);
SSRUNs_mm          = cell(NumModelDataSets, NumClimateDataSets);
SSRUNs_m3          = cell(NumModelDataSets, NumClimateDataSets);

WaterPotentials_m3 = cell(NumModelDataSets, NumClimateDataSets);

NumMonths = zeros(NumClimateDataSets, 1);
NumMonths(1) = size(HistoricalPrecipitation, 3);
NumMonths(2) = size(FuturePrecipitation, 3);

for i = 1:NumModelDataSets
    NumHRUs = size(HRUTables{i},1);
    HRUFieldCapacities{i} = zeros(NumHRUs, 1);

    for j = 1:NumHRUs
        switch HRUTables{i}(j,8)

            case 3016
                HRUFieldCapacities{i}(j) = 169;

            case 3026
                HRUFieldCapacities{i}(j) = 165;

            case 3114
                HRUFieldCapacities{i}(j) = 82;

            case 3139
                HRUFieldCapacities{i}(j) = 307;

            case 3208
                HRUFieldCapacities{i}(j) = 191;

            case 3310
                HRUFieldCapacities{i}(j) = 265;

            case 6659
                HRUFieldCapacities{i}(j) = 179;

        end
    end
end

for j = 1:NumClimateDataSets
    NUM_YEARS = NumMonths(j) / 12;
    HRU_THORN_T_A = zeros(NumHRUs, NumMonths(j));
    HRU_THORN_T_Y = zeros(NumHRUs, NumMonths(j));

    HRU_PREC = (Precipitations{i,j})';
    HRU_TEMP = (Temperatures {i,j})';
    HRU_EFF_PREC = zeros(NumHRUs, NumMonths(j));

    % -----
    % Calculate effective precipitation
    % -----
    HRU_EFF_PREC(HRU_PREC <= 25.0) = HRU_PREC(HRU_PREC <= 25.0);

    HRU_EFF_PREC((HRU_PREC > 25.0) & (HRU_PREC <= 75.0)) = ...
        25.0 + ((HRU_PREC((HRU_PREC > 25.0) & (HRU_PREC <= 75.0)) - 25.0) * 0.84);

    HRU_EFF_PREC((HRU_PREC > 75.0) & (HRU_PREC <= 100.0)) = ...
        67.0 + ((HRU_PREC((HRU_PREC > 75.0) & (HRU_PREC <= 100.0)) - 75.0) * 0.68);

    HRU_EFF_PREC((HRU_PREC > 100.0) & (HRU_PREC <= 125.0)) = ...
        84.0 + ((HRU_PREC((HRU_PREC > 100.0) & (HRU_PREC <= 125.0)) - 100.0) * 0.48);
end
```

```

HRU_EFF_PREC((HRU_PREC > 125.0) & (HRU_PREC <= 150.0)) = ...
    96.0 + ((HRU_PREC((HRU_PREC > 125.0) & (HRU_PREC <= 150.0)) - 125.0) * 0.24);

HRU_EFF_PREC((HRU_PREC > 150.0) & (HRU_PREC <= 175.0)) = ...
    102.0 + ((HRU_PREC((HRU_PREC > 150.0) & (HRU_PREC <= 175.0)) - 150.0) * 0.08);

HRU_EFF_PREC(HRU_PREC > 175.0) = 104.0;
% -----
% -----

% -----
% Calculate surface runoff
% -----
HRU_SURF_RUNOFF = HRU_PREC - HRU_EFF_PREC;
% -----
% -----

% -----
% Calculate Thorthwaite monthly temperature index
% -----
HRU_THORN_T_A(HRU_TEMP <= 0.0) = 0.0;
HRU_THORN_T_A(HRU_TEMP > 0.0) = (HRU_TEMP(HRU_TEMP > 0.0) / 5.0).^1.514;
% -----
% -----

% -----
% Calculate Thorthwaite yearly temperature index
% -----
for YEAR_INDEX = 1:NUM_YEARS
    HRU_THORN_T_Y(:, ((YEAR_INDEX - 1)*12) + 1)) = ...
        sum(HRU_THORN_T_A(:, ((YEAR_INDEX - 1)*12) + 1):(YEAR_INDEX*12)) ,2);

    for MONTH_INDEX = 2:12
        HRU_THORN_T_Y(:, (((YEAR_INDEX - 1)*12) + MONTH_INDEX)) = ...
            HRU_THORN_T_Y(:, ((YEAR_INDEX - 1)*12) + 1));
    end
end
% -----
% -----

% -----
% Thorthwaite "a" coeff.
% -----
HRU_THORN_A = ...
    (6.75D-7 .* HRU_THORN_T_Y .* HRU_THORN_T_Y .* HRU_THORN_T_Y) - ...
    (7.71D-5 .* HRU_THORN_T_Y .* HRU_THORN_T_Y) + ...
    (1.79D-2 .* HRU_THORN_T_Y) + 0.49239;
% -----

NUM_HRUS = NumHRUs;
NUM_MONTHS = NumMonths(j);

HRU_F_LAMBDA = zeros(NUM_HRUS, NUM_MONTHS);
AUX_HRU_MONTHS = zeros(NUM_HRUS, NUM_MONTHS);
AUX_HRU_LAT = 38 .* ones(NUM_HRUS, NUM_MONTHS);
DATE_MONTHS = YearsAndMonths{j}(:,2);
HRU_SW_EXCESS = zeros(NUM_HRUS, NUM_MONTHS);
HRU_SW_DEFICIT = zeros(NUM_HRUS, NUM_MONTHS);

for MONTH_INDEX = 1:NUM_MONTHS
    AUX_HRU_MONTHS(:, MONTH_INDEX) = DATE_MONTHS(MONTH_INDEX);
end

% -----
% January
% -----
HRU_F_LAMBDA(AUX_HRU_MONTHS == 1) = ...
    -(0.00007 .* AUX_HRU_LAT(AUX_HRU_MONTHS == 1) .* ...
        AUX_HRU_LAT(AUX_HRU_MONTHS == 1)) - ...
    (0.0023 .* AUX_HRU_LAT(AUX_HRU_MONTHS == 1)) + 1.0312;
% -----

```

```

%-----
% February
%-----
HRU_F_LAMBDA(AUX_HRU_MONTHS == 2) = ...
    -(0.00004 .* AUX_HRU_LAT(AUX_HRU_MONTHS == 2) .* ...
        AUX_HRU_LAT(AUX_HRU_MONTHS == 2)) - ...
        (0.0010 .* AUX_HRU_LAT(AUX_HRU_MONTHS == 2)) + 0.9349;
%-----

%-----
% March
%-----
HRU_F_LAMBDA(AUX_HRU_MONTHS == 3) & (AUX_HRU_LAT == 0.0) = 1.04;

HRU_F_LAMBDA(AUX_HRU_MONTHS == 3) & ...
    (AUX_HRU_LAT > 0.0) & (AUX_HRU_LAT < 43.0) = 1.03;

HRU_F_LAMBDA(AUX_HRU_MONTHS == 3) & (AUX_HRU_LAT >= 43.0) = 1.02;
%-----

%-----
% April
%-----
HRU_F_LAMBDA(AUX_HRU_MONTHS == 4) = ...
    (0.00003 .* AUX_HRU_LAT(AUX_HRU_MONTHS==4) .* ...
        AUX_HRU_LAT(AUX_HRU_MONTHS == 4)) + ...
    (0.0013 .* AUX_HRU_LAT(AUX_HRU_MONTHS == 4)) + 1.0119;
%-----

%-----
% May
%-----
HRU_F_LAMBDA(AUX_HRU_MONTHS == 5) = ...
    (0.00006 .* AUX_HRU_LAT(AUX_HRU_MONTHS == 5) .* ...
        AUX_HRU_LAT(AUX_HRU_MONTHS == 5)) + ...
    (0.0025 .* AUX_HRU_LAT(AUX_HRU_MONTHS == 5)) + 1.0475;
%-----

%-----
% June
%-----
HRU_F_LAMBDA(AUX_HRU_MONTHS == 6) = ...
    (0.00007 .* AUX_HRU_LAT(AUX_HRU_MONTHS == 6) .* ...
        AUX_HRU_LAT(AUX_HRU_MONTHS == 6)) + ...
    (0.0032 .* AUX_HRU_LAT(AUX_HRU_MONTHS == 6)) + 1.0147;
%-----

%-----
% July
%-----
HRU_F_LAMBDA(AUX_HRU_MONTHS == 7) = ...
    (0.00006 .* AUX_HRU_LAT(AUX_HRU_MONTHS == 7) .* ...
        AUX_HRU_LAT(AUX_HRU_MONTHS == 7)) + ...
    (0.0033 .* AUX_HRU_LAT(AUX_HRU_MONTHS == 7)) + 1.0444;
%-----

%-----
% August
%-----
HRU_F_LAMBDA(AUX_HRU_MONTHS == 8) = ...
    (0.00004 .* AUX_HRU_LAT(AUX_HRU_MONTHS == 8) .* ...
        AUX_HRU_LAT(AUX_HRU_MONTHS == 8)) + ...
    (0.0020 .* AUX_HRU_LAT(AUX_HRU_MONTHS == 8)) + 1.0427;
%-----

%-----
% September
%-----
HRU_F_LAMBDA((AUX_HRU_MONTHS == 9) & (AUX_HRU_LAT >= 0.0) & ...

```

```

(AUX_HRU_LAT < 10.0)) = 1.01;

HRU_F_LAMBDA((AUX_HRU_MONTHS == 9) & (AUX_HRU_LAT >= 10.0) & ...
(AUX_HRU_LAT < 29.0)) = 1.02;

HRU_F_LAMBDA((AUX_HRU_MONTHS == 9) & (AUX_HRU_LAT >= 29.0) & ...
(AUX_HRU_LAT < 38.0)) = 1.03;

HRU_F_LAMBDA((AUX_HRU_MONTHS == 9) & (AUX_HRU_LAT >= 38.0) & ...
(AUX_HRU_LAT < 48.0)) = 1.04;

HRU_F_LAMBDA((AUX_HRU_MONTHS == 9) & (AUX_HRU_LAT >= 48.0) & ...
(AUX_HRU_LAT < 50.0)) = 1.05;

HRU_F_LAMBDA((AUX_HRU_MONTHS == 9) & (AUX_HRU_LAT >= 50.0)) = 1.06;
%-----

% -----
% October
% -----
HRU_F_LAMBDA(AUX_HRU_MONTHS == 10) = ...
-(0.00002 .* AUX_HRU_LAT(AUX_HRU_MONTHS == 10)) .* ...
AUX_HRU_LAT(AUX_HRU_MONTHS == 10)) - ...
(0.0013 .* AUX_HRU_LAT(AUX_HRU_MONTHS == 10)) + 1.0363;
%-----

% -----
% November
% -----
HRU_F_LAMBDA(AUX_HRU_MONTHS == 11) = ...
-(0.00006 .* AUX_HRU_LAT(AUX_HRU_MONTHS == 11)) .* ...
AUX_HRU_LAT(AUX_HRU_MONTHS == 11)) - ...
(0.0022 .* AUX_HRU_LAT(AUX_HRU_MONTHS == 11)) + 1.0040;
%-----

% -----
% December
% -----
HRU_F_LAMBDA(AUX_HRU_MONTHS == 12) = ...
-(0.00008 .* AUX_HRU_LAT(AUX_HRU_MONTHS == 12)) .* ...
AUX_HRU_LAT(AUX_HRU_MONTHS == 12)) - ...
(0.0024 .* AUX_HRU_LAT(AUX_HRU_MONTHS == 12)) + 1.0307;
%-----

% -----
% Calculate PET
% -----
HRU_THORN_PET = zeros(NUM_HRUS, NUM_MONTHS);

HRU_THORN_PET(HRU_TEMP >= 0.0) = ...
16.0 .* HRU_F_LAMBDA(HRU_TEMP >= 0.0)) .* ...
((10.0 .* (HRU_TEMP(HRU_TEMP >= 0.0) ./ HRU_THORN_T_Y(HRU_TEMP >= 0.0))) .^ ...
HRU_THORN_A(HRU_TEMP >= 0.0));
%-----

HRU_DELTA_SW = zeros(NUM_HRUS, NUM_MONTHS);
HRU_SW = zeros(NUM_HRUS, NUM_MONTHS);
HRU_ACTUAL_ET = zeros(NUM_HRUS, NUM_MONTHS);
HRU_PERC_PLUS_SUB_SURF = zeros(NUM_HRUS, NUM_MONTHS);

HRU_SW_EXCESS (HRU_EFF_PREC >= HRU_THORN_PET) = ...
HRU_EFF_PREC(HRU_EFF_PREC >= HRU_THORN_PET) - ...
HRU_THORN_PET(HRU_EFF_PREC >= HRU_THORN_PET);

HRU_SW_DEFICIT(HRU_EFF_PREC < HRU_THORN_PET) = ...
HRU_THORN_PET(HRU_EFF_PREC < HRU_THORN_PET) - ...
HRU_EFF_PREC(HRU_EFF_PREC < HRU_THORN_PET);

HRU_SW_PREV_MONTH = zeros(NUM_HRUS, 1);
HRU_SW_EXCESS_MONTH = zeros(NUM_HRUS, 1);
HRU_SW_DEFICIT_MONTH = zeros(NUM_HRUS, 1);
HRU_DELTA_SW_MONTH = zeros(NUM_HRUS, 1);
HRU_ACTUAL_ET_MONTH = zeros(NUM_HRUS, 1);

```

```

HRU_THORN_PET_MONTH      = zeros(NUM_HRUS, 1);
HRU_EFF_PREC_MONTH       = zeros(NUM_HRUS, 1);
HRU_PERC_PLUS_SUB_SURF_MONTH = zeros(NUM_HRUS, 1);

HRU_FC = HRUFieldCapacities{i};
HRU_SW_INIT = 0.8 .* HRU_FC;

for MONTH_INDEX = 1:NUM_MONTHS
    if (MONTH_INDEX > 1)
        HRU_SW_PREV_MONTH = HRU_SW(:, (MONTH_INDEX - 1));
    else
        HRU_SW_PREV_MONTH = HRU_SW_INIT;
    end

    HRU_SW_EXCESS_MONTH = HRU_SW_EXCESS(:, MONTH_INDEX);
    HRU_SW_DEFICIT_MONTH = HRU_SW_DEFICIT(:, MONTH_INDEX);
    HRU_THORN_PET_MONTH = HRU_THORN_PET(:, MONTH_INDEX);
    HRU_EFF_PREC_MONTH = HRU_EFF_PREC(:, MONTH_INDEX);

    %-----
    % Water Excess
    %-----
    HRU_ACTUAL_ET_MONTH(HRU_SW_EXCESS_MONTH > 0.0) = ...
        HRU_THORN_PET_MONTH(HRU_SW_EXCESS_MONTH > 0.0);

    HRU_DELTA_SW_MONTH...
        ((HRU_SW_EXCESS_MONTH > 0.0) & ...
        ((HRU_SW_PREV_MONTH + HRU_SW_EXCESS_MONTH) > HRU_FC)) = ...
    HRU_FC
        ((HRU_SW_EXCESS_MONTH > 0.0) & ...
        ((HRU_SW_PREV_MONTH + HRU_SW_EXCESS_MONTH) > HRU_FC)) - ...
    HRU_SW_PREV_MONTH((HRU_SW_EXCESS_MONTH > 0.0) & ...
        ((HRU_SW_PREV_MONTH + HRU_SW_EXCESS_MONTH) > HRU_FC));

    HRU_PERC_PLUS_SUB_SURF_MONTH...
        ((HRU_SW_EXCESS_MONTH > 0.0) & ...
        ((HRU_SW_PREV_MONTH + HRU_SW_EXCESS_MONTH) > HRU_FC)) = ...
    HRU_SW_PREV_MONTH
        ((HRU_SW_EXCESS_MONTH > 0.0) & ...
        ((HRU_SW_PREV_MONTH + HRU_SW_EXCESS_MONTH) > HRU_FC)) + ...
    HRU_SW_EXCESS_MONTH((HRU_SW_EXCESS_MONTH > 0.0) & ...
        ((HRU_SW_PREV_MONTH + HRU_SW_EXCESS_MONTH) > HRU_FC)) - ...
    HRU_FC
        ((HRU_SW_EXCESS_MONTH > 0.0) & ...
        ((HRU_SW_PREV_MONTH + HRU_SW_EXCESS_MONTH) > HRU_FC));

    HRU_DELTA_SW_MONTH...
        ((HRU_SW_EXCESS_MONTH > 0.0) & ...
        ((HRU_SW_PREV_MONTH + HRU_SW_EXCESS_MONTH) <= HRU_FC)) = ...
    HRU_SW_EXCESS_MONTH...
        ((HRU_SW_EXCESS_MONTH > 0.0) & ...
        ((HRU_SW_PREV_MONTH + HRU_SW_EXCESS_MONTH) <= HRU_FC));

    HRU_PERC_PLUS_SUB_SURF_MONTH...
        ((HRU_SW_EXCESS_MONTH > 0.0) & ...
        ((HRU_SW_PREV_MONTH + HRU_SW_EXCESS_MONTH) <= HRU_FC)) = 0.0;

    %-----

    %-----
    % Water deficit
    %-----
    HRU_PERC_PLUS_SUB_SURF_MONTH(HRU_SW_DEFICIT_MONTH > 0.0) = 0.0;

    HRU_ACTUAL_ET_MONTH...
        ((HRU_SW_DEFICIT_MONTH > 0.0) & ...
        (HRU_SW_PREV_MONTH >= HRU_SW_DEFICIT_MONTH)) = ...
    HRU_THORN_PET_MONTH...
        ((HRU_SW_DEFICIT_MONTH > 0.0) & (HRU_SW_PREV_MONTH >= HRU_SW_DEFICIT_MONTH));

    HRU_DELTA_SW_MONTH...
        ((HRU_SW_DEFICIT_MONTH > 0.0) & ...
        (HRU_SW_PREV_MONTH >= HRU_SW_DEFICIT_MONTH)) = ...
    -HRU_SW_DEFICIT_MONTH...
        ((HRU_SW_DEFICIT_MONTH > 0.0) & (HRU_SW_PREV_MONTH >= HRU_SW_DEFICIT_MONTH));

    HRU_ACTUAL_ET_MONTH...

```

```

        ((HRU_SW_DEFICIT_MONTH > 0.0) & ...
        (HRU_SW_PREV_MONTH < HRU_SW_DEFICIT_MONTH)) = ...
    HRU_EFF_PREC_MONTH...
        ((HRU_SW_DEFICIT_MONTH > 0.0) & ...
        (HRU_SW_PREV_MONTH < HRU_SW_DEFICIT_MONTH)) + ...
    HRU_SW_PREV_MONTH...
        ((HRU_SW_DEFICIT_MONTH > 0.0) & ...
        (HRU_SW_PREV_MONTH < HRU_SW_DEFICIT_MONTH));

    HRU_DELTA_SW_MONTH...
        ((HRU_SW_DEFICIT_MONTH > 0.0) & ...
        (HRU_SW_PREV_MONTH < HRU_SW_DEFICIT_MONTH)) = ...
    -HRU_SW_PREV_MONTH...
        ((HRU_SW_DEFICIT_MONTH > 0.0) & (HRU_SW_PREV_MONTH < HRU_SW_DEFICIT_MONTH));
    %-----

    HRU_DELTA_SW(:, MONTH_INDEX) = HRU_DELTA_SW_MONTH;

    if (MONTH_INDEX > 1)
        HRU_SW(:, MONTH_INDEX) = HRU_SW(:, (MONTH_INDEX - 1)) + HRU_DELTA_SW_MONTH;
    else
        HRU_SW(:, MONTH_INDEX) = HRU_SW_INIT + HRU_DELTA_SW_MONTH;
    end

    HRU_ACTUAL_ET(:, MONTH_INDEX) = HRU_ACTUAL_ET_MONTH;
    HRU_PERC_PLUS_SUB_SURF(:, MONTH_INDEX) = HRU_PERC_PLUS_SUB_SURF_MONTH;
end

WaterPotentials_mm{i,j} = HRU_SURF_RUNOFF + HRU_PERC_PLUS_SUB_SURF;

WaterPotentials_m3{i,j} = ...
    0.001 .* WaterPotentials_mm{i,j} .* repmat(HRUTables{i}(:,9), [1,NUM_MONTHS]);

    PETs_mm            {i,j} = HRU_THORN_PET;

    PETs_m3            {i,j} = ...
        0.001 .* PETs_mm{i,j} .* repmat(HRUTables{i}(:,9), [1,NUM_MONTHS]);

    AETs_mm            {i,j} = HRU_ACTUAL_ET;

    AETs_m3            {i,j} = ...
        0.001 .* AETs_mm{i,j} .* repmat(HRUTables{i}(:,9), [1,NUM_MONTHS]);

    SRUNs_mm           {i,j} = HRU_SURF_RUNOFF;

    SRUNs_m3           {i,j} = ...
        0.001 .* SRUNs_mm{i,j} .* repmat(HRUTables{i}(:,9), [1,NUM_MONTHS]);

    SSRUNs_mm          {i,j} = HRU_PERC_PLUS_SUB_SURF;

    SSRUNs_m3          {i,j} = ...
        0.001 .* SSRUNs_mm{i,j} .* repmat(HRUTables{i}(:,9), [1,NUM_MONTHS]);
    %-----
end
end

save WaterPotentials.mat;

```

Ek-2 Su Potansiyeli Sonuçlarını Raporlayan MATLAB programı

```
FutureDecadesMonthIndexes = ...
    [ 1, 60]
    [ 61,180]
    [181,300]
    [301,420]
    [421,540]
    [541,636]
    [637,756]
    [757,876]
    [877,996]];

NumDecades = size(FutureDecadesMonthIndexes, 1);

[Averaged_Monthly_WaterPotentials_HRUs_Historical_m3, ...
Averaged_Yearly_WaterPotentials_HRUs_Historical_m3, ...
Averaged_Monthly_WaterPotentials_Subwatersheds_Historical_m3, ...
Averaged_Yearly_WaterPotentials_Subwatersheds_Historical_m3, ...
Averaged_Monthly_WaterPotentials_HRUs_Decades_m3, ...
Averaged_Yearly_WaterPotentials_HRUs_Decades_m3, ...
Averaged_Monthly_WaterPotentials_Subwatersheds_Decades_m3, ...
Averaged_Yearly_WaterPotentials_Subwatersheds_Decades_m3] = ...
    ProcessWPComponents...
        (WaterPotentials_m3{1,1}, WaterPotentials_m3{1,2}, ...
        FutureDecadesMonthIndexes, HRUTables{1});

PercentDifference_Averaged_Monthly_WPs_HRUs_Decades_m3 = ...
    cell(NumDecades, 1);

PercentDifference_Averaged_Monthly_WPs_Subwatersheds_Decades_m3 = ...
    cell(NumDecades, 1);

PercentDifference_Averaged_Yearly_WPs_HRUs_Decades_m3 = ...
    zeros(size(Averaged_Yearly_WaterPotentials_HRUs_Historical_m3, 1), NumDecades);

PercentDifference_Averaged_Yearly_WPs_Subwatersheds_Decades_m3 = ...
    zeros(size(Averaged_Yearly_WaterPotentials_Subwatersheds_Historical_m3, 1), ...
    NumDecades);

for i = 1:NumDecades

    PercentDifference_Averaged_Monthly_WPs_HRUs_Decades_m3(i) = ...
        ((Averaged_Monthly_WaterPotentials_HRUs_Decades_m3(i) - ...
        Averaged_Monthly_WaterPotentials_HRUs_Historical_m3) ./ ...
        Averaged_Monthly_WaterPotentials_HRUs_Historical_m3) .* 100;

    PercentDifference_Averaged_Monthly_WPs_Subwatersheds_Decades_m3(i) = ...
        ((Averaged_Monthly_WaterPotentials_Subwatersheds_Decades_m3(i) - ...
        Averaged_Monthly_WaterPotentials_Subwatersheds_Historical_m3) ./ ...
        Averaged_Monthly_WaterPotentials_Subwatersheds_Historical_m3) .* 100;

    PercentDifference_Averaged_Yearly_WPs_HRUs_Decades_m3(:, i) = ...
        ((Averaged_Yearly_WaterPotentials_HRUs_Decades_m3(:,i) - ...
        Averaged_Yearly_WaterPotentials_HRUs_Historical_m3) ./ ...
        Averaged_Yearly_WaterPotentials_HRUs_Historical_m3) .* 100;

    PercentDifference_Averaged_Yearly_WPs_Subwatersheds_Decades_m3(:, i) = ...
        ((Averaged_Yearly_WaterPotentials_Subwatersheds_Decades_m3(:,i) - ...
        Averaged_Yearly_WaterPotentials_Subwatersheds_Historical_m3) ./ ...
        Averaged_Yearly_WaterPotentials_Subwatersheds_Historical_m3) .* 100;

end

xlswrite('KM_YuzdeFark_SuPotansiyeli.xlsx', ...
    PercentDifference_Averaged_Yearly_WPs_Subwatersheds_Decades_m3);

xlswrite('KM_Tarihsel_SuPotansiyeli.xlsx', ...
    Averaged_Yearly_WaterPotentials_Subwatersheds_Historical_m3);

xlswrite('KM_OnYillik_SuPotansiyeli.xlsx', ...
    Averaged_Yearly_WaterPotentials_Subwatersheds_Decades_m3);
```

Ek-3 Potansiyel Evapotranspirasyon Hesabı Sonuçlarını Raporlayan MATLAB programı

```
FutureDecadesMonthIndexes = ...
    [ 1, 60]
    [ 61,180]
    [181,300]
    [301,420]
    [421,540]
    [541,636]
    [637,756]
    [757,876]
    [877,996]];

NumDecades = size(FutureDecadesMonthIndexes, 1);

[Averaged_Monthly_PETs_HRUs_Historical_m3 , ...
Averaged_Yearly_PETs_HRUs_Historical_m3 , ...
Averaged_Monthly_PETs_Subwatersheds_Historical_m3, ...
Averaged_Yearly_PETs_Subwatersheds_Historical_m3 , ...
Averaged_Monthly_PETs_HRUs_Decades_m3 , ...
Averaged_Yearly_PETs_HRUs_Decades_m3 , ...
Averaged_Monthly_PETs_Subwatersheds_Decades_m3 , ...
Averaged_Yearly_PETs_Subwatersheds_Decades_m3] = ...
    ProcessWPComponents...
        (PETs_m3{1,1} , PETs_m3{1,2}, ...
        FutureDecadesMonthIndexes, HRUTables{1});

PDiff_Averaged_Monthly_PETs_HRUs_Decades_m3 = ...
    cell(NumDecades, 1);

PDiff_Averaged_Monthly_PETs_Subwatersheds_Decades_m3 = ...
    cell(NumDecades, 1);

PDiff_Averaged_Yearly_PETs_HRUs_Decades_m3 = ...
    zeros(size(Averaged_Yearly_PETs_HRUs_Historical_m3, 1), NumDecades);

PDiff_Averaged_Yearly_PETs_Subwatersheds_Decades_m3 = ...
    zeros(size(Averaged_Yearly_PETs_Subwatersheds_Historical_m3, 1), NumDecades);

for i = 1:NumDecades

    PDiff_Averaged_Monthly_PETs_HRUs_Decades_m3 {i} = ...
        ((Averaged_Monthly_PETs_HRUs_Decades_m3 {i} - ...
        Averaged_Monthly_PETs_HRUs_Historical_m3) ./ ...
        Averaged_Monthly_PETs_HRUs_Historical_m3) .* 100;

    PDiff_Averaged_Monthly_PETs_Subwatersheds_Decades_m3{i} = ...
        ((Averaged_Monthly_PETs_Subwatersheds_Decades_m3{i} - ...
        Averaged_Monthly_PETs_Subwatersheds_Historical_m3) ./ ...
        Averaged_Monthly_PETs_Subwatersheds_Historical_m3) .* 100;

    PDiff_Averaged_Yearly_PETs_HRUs_Decades_m3 (:, i) = ...
        ((Averaged_Yearly_PETs_HRUs_Decades_m3 (:,i) - ...
        Averaged_Yearly_PETs_HRUs_Historical_m3) ./ ...
        Averaged_Yearly_PETs_HRUs_Historical_m3) .* 100;

    PDiff_Averaged_Yearly_PETs_Subwatersheds_Decades_m3(:, i) = ...
        ((Averaged_Yearly_PETs_Subwatersheds_Decades_m3(:,i) - ...
        Averaged_Yearly_PETs_Subwatersheds_Historical_m3) ./ ...
        Averaged_Yearly_PETs_Subwatersheds_Historical_m3) .* 100;

end

xlswrite('KM_YuzdeFark_PET.xlsx', ...
    PDiff_Averaged_Yearly_PETs_Subwatersheds_Decades_m3);

xlswrite('KM_Tarihsel_PET.xlsx', ...
    Averaged_Yearly_PETs_Subwatersheds_Historical_m3);

xlswrite('KM_OnYillik_PET.xlsx', ...
    Averaged_Yearly_PETs_Subwatersheds_Decades_m3);
```

Ek-4 Gerçekleşen Evapotranspirasyon Hesabı Sonuçlarını Raporlayan MATLAB programı

```

FutureDecadesMonthIndexes = ...
    [ 1, 60]
    [ 61,180]
    [181,300]
    [301,420]
    [421,540]
    [541,636]
    [637,756]
    [757,876]
    [877,996]];

NumDecades = size(FutureDecadesMonthIndexes, 1);

[Averaged_Monthly_AETs_HRUs_Historical_m3 , ...
Averaged_Yearly_AETs_HRUs_Historical_m3 , ...
Averaged_Monthly_AETs_Subwatersheds_Historical_m3, ...
Averaged_Yearly_AETs_Subwatersheds_Historical_m3 , ...
Averaged_Monthly_AETs_HRUs_Decades_m3 , ...
Averaged_Yearly_AETs_HRUs_Decades_m3 , ...
Averaged_Monthly_AETs_Subwatersheds_Decades_m3 , ...
Averaged_Yearly_AETs_Subwatersheds_Decades_m3] = ...
    ProcessWPComponents...
        (AETs_m3{1,1} , AETs_m3{1,2}, ...
        FutureDecadesMonthIndexes, HRUTables{1});

PDiff_Averaged_Monthly_AETs_HRUs_Decades_m3 = ...
    cell(NumDecades, 1);

PDiff_Averaged_Monthly_AETs_Subwatersheds_Decades_m3 = ...
    cell(NumDecades, 1);

PDiff_Averaged_Yearly_AETs_HRUs_Decades_m3 = ...
    zeros(size(Averaged_Yearly_AETs_HRUs_Historical_m3, 1), NumDecades);

PDiff_Averaged_Yearly_AETs_Subwatersheds_Decades_m3 = ...
    zeros(size(Averaged_Yearly_AETs_Subwatersheds_Historical_m3, 1), NumDecades);

for i = 1:NumDecades

    PDiff_Averaged_Monthly_AETs_HRUs_Decades_m3 {i} = ...
        ((Averaged_Monthly_AETs_HRUs_Decades_m3 {i} - ...
        Averaged_Monthly_AETs_HRUs_Historical_m3) ./ ...
        Averaged_Monthly_AETs_HRUs_Historical_m3) .* 100;

    PDiff_Averaged_Monthly_AETs_Subwatersheds_Decades_m3{i} = ...
        ((Averaged_Monthly_AETs_Subwatersheds_Decades_m3{i} - ...
        Averaged_Monthly_AETs_Subwatersheds_Historical_m3) ./ ...
        Averaged_Monthly_AETs_Subwatersheds_Historical_m3) .* 100;

    PDiff_Averaged_Yearly_AETs_HRUs_Decades_m3 (:, i) = ...
        ((Averaged_Yearly_AETs_HRUs_Decades_m3 (:,i) - ...
        Averaged_Yearly_AETs_HRUs_Historical_m3) ./ ...
        Averaged_Yearly_AETs_HRUs_Historical_m3) .* 100;

    PDiff_Averaged_Yearly_AETs_Subwatersheds_Decades_m3(:, i) = ...
        ((Averaged_Yearly_AETs_Subwatersheds_Decades_m3(:,i) - ...
        Averaged_Yearly_AETs_Subwatersheds_Historical_m3) ./ ...
        Averaged_Yearly_AETs_Subwatersheds_Historical_m3) .* 100;

end

xlswrite('KM_YuzdeFark_AET.xlsx', ...
    PDiff_Averaged_Yearly_AETs_Subwatersheds_Decades_m3);

```

Ek-5 Yüzeysel Akış Hesabı Sonuçlarını Raporlayan MATLAB programı

```

FutureDecadesMonthIndexes = ...
    [ 1, 60]
    [ 61,180]
    [181,300]
    [301,420]
    [421,540]
    [541,636]
    [637,756]
    [757,876]
    [877,996]];

NumDecades = size(FutureDecadesMonthIndexes, 1);

[Averaged_Monthly_SRUNs_HRUs_Historical_m3      , ...
Averaged_Yearly_SRUNs_HRUs_Historical_m3        , ...
Averaged_Monthly_SRUNs_Subwatersheds_Historical_m3, ...
Averaged_Yearly_SRUNs_Subwatersheds_Historical_m3, ...
Averaged_Monthly_SRUNs_HRUs_Decades_m3          , ...
Averaged_Yearly_SRUNs_HRUs_Decades_m3            , ...
Averaged_Monthly_SRUNs_Subwatersheds_Decades_m3  , ...
Averaged_Yearly_SRUNs_Subwatersheds_Decades_m3] = ...
    ProcessWPComponents...
        (SRUNs_m3{1,1} , SRUNs_m3{1,2}), ...
        FutureDecadesMonthIndexes, HRUTables(1));

PDiff_Averaged_Monthly_SRUNs_HRUs_Decades_m3      = ...
    cell(NumDecades, 1);

PDiff_Averaged_Monthly_SRUNs_Subwatersheds_Decades_m3 = ...
    cell(NumDecades, 1);

PDiff_Averaged_Yearly_SRUNs_HRUs_Decades_m3        = ...
    zeros(size(Averaged_Yearly_SRUNs_HRUs_Historical_m3, 1), NumDecades);

PDiff_Averaged_Yearly_SRUNs_Subwatersheds_Decades_m3 = ...
    zeros(size(Averaged_Yearly_SRUNs_Subwatersheds_Historical_m3, 1), NumDecades);

for i = 1:NumDecades

    PDiff_Averaged_Monthly_SRUNs_HRUs_Decades_m3      {i} = ...
        ((Averaged_Monthly_SRUNs_HRUs_Decades_m3      {i} - ...
        Averaged_Monthly_SRUNs_HRUs_Historical_m3) ./ ...
        Averaged_Monthly_SRUNs_HRUs_Historical_m3) .* 100;

    PDiff_Averaged_Monthly_SRUNs_Subwatersheds_Decades_m3{i} = ...
        ((Averaged_Monthly_SRUNs_Subwatersheds_Decades_m3{i} - ...
        Averaged_Monthly_SRUNs_Subwatersheds_Historical_m3) ./ ...
        Averaged_Monthly_SRUNs_Subwatersheds_Historical_m3) .* 100;

    PDiff_Averaged_Yearly_SRUNs_HRUs_Decades_m3      (:, i) = ...
        ((Averaged_Yearly_SRUNs_HRUs_Decades_m3      (:,i) - ...
        Averaged_Yearly_SRUNs_HRUs_Historical_m3) ./ ...
        Averaged_Yearly_SRUNs_HRUs_Historical_m3) .* 100;

    PDiff_Averaged_Yearly_SRUNs_Subwatersheds_Decades_m3(:, i) = ...
        ((Averaged_Yearly_SRUNs_Subwatersheds_Decades_m3(:,i) - ...
        Averaged_Yearly_SRUNs_Subwatersheds_Historical_m3) ./ ...
        Averaged_Yearly_SRUNs_Subwatersheds_Historical_m3) .* 100;

end

xlswrite('KM_YuzdePark_SRUN.xlsx', ...
    PDiff_Averaged_Yearly_SRUNs_Subwatersheds_Decades_m3);

```

Ek-6 Yüzeyaltı Akış ve Perkolasyon Toplamı Hesabı Sonuçlarını Raporlayan MATLAB programı

```
FutureDecadesMonthIndexes = ...
    [ 1, 60]
    [ 61,180]
    [181,300]
    [301,420]
    [421,540]
    [541,636]
    [637,756]
    [757,876]
    [877,996]];

NumDecades = size(FutureDecadesMonthIndexes, 1);

[Averaged_Monthly_SSRUNs_HRUs_Historical_m3 , ...
Averaged_Yearly_SSRUNs_HRUs_Historical_m3 , ...
Averaged_Monthly_SSRUNs_Subwatersheds_Historical_m3, ...
Averaged_Yearly_SSRUNs_Subwatersheds_Historical_m3 , ...
Averaged_Monthly_SSRUNs_HRUs_Decades_m3 , ...
Averaged_Yearly_SSRUNs_HRUs_Decades_m3 , ...
Averaged_Monthly_SSRUNs_Subwatersheds_Decades_m3 , ...
Averaged_Yearly_SSRUNs_Subwatersheds_Decades_m3] = ...
    ProcessWPComponents...
        (SSRUNs_m3{1,1} , SSRUNs_m3{1,2}, ...
        FutureDecadesMonthIndexes, HRUTables{1});

PDiff_Averaged_Monthly_SSRUNs_HRUs_Decades_m3 = ...
    cell(NumDecades, 1);

PDiff_Averaged_Monthly_SSRUNs_Subwatersheds_Decades_m3 = ...
    cell(NumDecades, 1);

PDiff_Averaged_Yearly_SSRUNs_HRUs_Decades_m3 = ...
    zeros(size(Averaged_Yearly_SSRUNs_HRUs_Historical_m3, 1), NumDecades);

PDiff_Averaged_Yearly_SSRUNs_Subwatersheds_Decades_m3 = ...
    zeros(size(Averaged_Yearly_SSRUNs_Subwatersheds_Historical_m3, 1), NumDecades);

for i = 1:NumDecades

    PDiff_Averaged_Monthly_SSRUNs_HRUs_Decades_m3 {i} = ...
        ((Averaged_Monthly_SSRUNs_HRUs_Decades_m3 {i} - ...
        Averaged_Monthly_SSRUNs_HRUs_Historical_m3) ./ ...
        Averaged_Monthly_SSRUNs_HRUs_Historical_m3) .* 100;

    PDiff_Averaged_Monthly_SSRUNs_Subwatersheds_Decades_m3{i} = ...
        ((Averaged_Monthly_SSRUNs_Subwatersheds_Decades_m3{i} - ...
        Averaged_Monthly_SSRUNs_Subwatersheds_Historical_m3) ./ ...
        Averaged_Monthly_SSRUNs_Subwatersheds_Historical_m3) .* 100;

    PDiff_Averaged_Yearly_SSRUNs_HRUs_Decades_m3 (:, i) = ...
        ((Averaged_Yearly_SSRUNs_HRUs_Decades_m3 (:,i) - ...
        Averaged_Yearly_SSRUNs_HRUs_Historical_m3) ./ ...
        Averaged_Yearly_SSRUNs_HRUs_Historical_m3) .* 100;

    PDiff_Averaged_Yearly_SSRUNs_Subwatersheds_Decades_m3(:, i) = ...
        ((Averaged_Yearly_SSRUNs_Subwatersheds_Decades_m3(:,i) - ...
        Averaged_Yearly_SSRUNs_Subwatersheds_Historical_m3) ./ ...
        Averaged_Yearly_SSRUNs_Subwatersheds_Historical_m3) .* 100;

end

xlswrite('KM_YuzdePark_SSRUN.xlsx', ...
    PDiff_Averaged_Yearly_SSRUNs_Subwatersheds_Decades_m3);
```

Ek-7 “ProcessWPComponents” MATLAB Fonksiyonu

```

function [Averaged_Monthly_COMPs_HRUs_Historical_m3 , ...
    Averaged_Yearly_COMPs_HRUs_Historical_m3 , ...
    Averaged_Monthly_COMPs_Subwatersheds_Historical_m3 , ...
    Averaged_Yearly_COMPs_Subwatersheds_Historical_m3 , ...
    Averaged_Monthly_COMPs_HRUs_Decades_m3 , ...
    Averaged_Yearly_COMPs_HRUs_Decades_m3 , ...
    Averaged_Monthly_COMPs_Subwatersheds_Decades_m3 , ...
    Averaged_Yearly_COMPs_Subwatersheds_Decades_m3] = ...
    ProcessWPComponents...
        (HistoricalCOMPs, FutureCOMPs, FutureDecadesMonthIndexes , HRUTable)

NumHRUs = size(HistoricalCOMPs, 1);

if (size(FutureCOMPs, 1) ~= NumHRUs)
    error('The number of HRUs in historical and future water potential components are
not compatible. ');
end

SubwatershedsList = unique(HRUTable(:,2));
NumSubwatersheds = numel(SubwatershedsList);

NumHistoricalMonths = size(HistoricalCOMPs, 2);
NumFutureMonths = size(FutureCOMPs , 2);

Averaged_Monthly_COMPs_HRUs_Historical_m3 = zeros(NumHRUs, 12);
Averaged_Monthly_COMPs_Subwatersheds_Historical_m3 = zeros(NumSubwatersheds, 12);

for i = 1:12
    MonthCOMPs = HistoricalCOMPs(:, (i:12:NumHistoricalMonths));

    Averaged_Monthly_COMPs_HRUs_Historical_m3(:,i) = ...
        sum(MonthCOMPs, 2) .* (12 / NumHistoricalMonths);
end

Averaged_Yearly_COMPs_HRUs_Historical_m3 = ...
    sum(Averaged_Monthly_COMPs_HRUs_Historical_m3, 2);

for i = 1:NumSubwatersheds
    HRUsInSubwatersheds = HRUTable((HRUTable(:,2) == i), 1);
    NumHRUsInSubwatershed = numel(HRUsInSubwatersheds);

    for j = 1:12
        for k = 1:NumHRUsInSubwatershed

            Averaged_Monthly_COMPs_Subwatersheds_Historical_m3(i,j) = ...
                Averaged_Monthly_COMPs_Subwatersheds_Historical_m3(i,j) + ...
                Averaged_Monthly_COMPs_HRUs_Historical_m3(HRUsInSubwatersheds(k), j);

        end
    end
end

Averaged_Yearly_COMPs_Subwatersheds_Historical_m3 = ...
    sum(Averaged_Monthly_COMPs_Subwatersheds_Historical_m3, 2);

NumDecades = size(FutureDecadesMonthIndexes, 1);

Averaged_Monthly_COMPs_HRUs_Decades_m3 = cell(NumDecades, 1);
Averaged_Monthly_COMPs_Subwatersheds_Decades_m3 = cell(NumDecades, 1);
Averaged_Yearly_COMPs_HRUs_Decades_m3 = zeros(NumHRUs , NumDecades);
Averaged_Yearly_COMPs_Subwatersheds_Decades_m3 = zeros(NumSubwatersheds, NumDecades);

for i = 1:NumDecades
    Averaged_Monthly_COMPs_HRUs_Decades_m3 {i} = zeros(NumHRUs , 12);
    Averaged_Monthly_COMPs_Subwatersheds_Decades_m3{i} = zeros(NumSubwatersheds, 12);

    DecadeBeginMonthIndex = FutureDecadesMonthIndexes(i, 1);
    DecadeEndMonthIndex = FutureDecadesMonthIndexes(i, 2);
    NumDecadeMonths = (DecadeEndMonthIndex - DecadeBeginMonthIndex + 1);

    DecadeCOMPs = ...
        FutureCOMPs(:, DecadeBeginMonthIndex:DecadeEndMonthIndex);

    for j = 1:12

```

```

MonthCOMPs = DecadeCOMPs(:, (j:12:NumDecadeMonths));

Averaged_Monthly_COMPs_HRUs_Decades_m3{i}(:,j) = ...
    sum(MonthCOMPs, 2) .* (12 / NumDecadeMonths);
end

Averaged_Yearly_COMPs_HRUs_Decades_m3(:,i) = ...
    sum(Averaged_Monthly_COMPs_HRUs_Decades_m3{i}, 2);

for j = 1:NumSubwatersheds
    HRUsInSubwatersheds = HRUTable((HRUTable(:,2) == j), 1);
    NumHRUsInSubwatershed = numel(HRUsInSubwatersheds);

    for k = 1:12
        for m = 1:NumHRUsInSubwatershed

            Averaged_Monthly_COMPs_Subwatersheds_Decades_m3{i}(j,k) = ...
                Averaged_Monthly_COMPs_Subwatersheds_Decades_m3{i}(j,k) + ...
                Averaged_Monthly_COMPs_HRUs_Decades_m3{i}(HRUsInSubwatersheds(m),
k);
            end
        end
    end

    Averaged_Yearly_COMPs_Subwatersheds_Decades_m3(:, i) = ...
        sum(Averaged_Monthly_COMPs_Subwatersheds_Decades_m3{i}, 2);
end
end

```

Kaynaklar

Abbaspour, K. C., Vaghefi, S. A., Yang, H., & Srinivasan, R. (2019). Global soil, landuse, evapotranspiration, historical and future weather databases for SWAT Applications. *Scientific data*, 6 (1), 263.

Akalın, N., Mertoğlu, B., & Ertürk, A. (2025). Assessing the future water potential of Istanbul and the need for inter-basin water transfer and the trade-offs for water allocation. *Water Supply*, 25 (4), 696-715.

Arnold, J. G., Srinivasan, R., Muttiah, R. S., & Williams, J. R. (1998). Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development 1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 34 (1), 73-89.

Bayazit M. 2003. “Hidroloji”, Birsen Yayınevi. ISBN: 975-511-364-9

Bieger, K., Arnold, J. G., Rathjens, H., White, M. J., Bosch, D. D., Allen, P. M., ... & Srinivasan, R. (2017). Introduction to SWAT+, a completely restructured version of the soil and water assessment tool. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 53 (1), 115-130.

Birsoy, Ölgün, Y. B. M. K. (1992). Thornthwaite yöntemi ile su bilançosunun ve iklim tipinin belirlenmesinde bilgisayar kullanımı. *Ege Coğrafya Dergisi*, 6 (1).

Blaney, H. F., & Criddle, W. D. (1950). Determining water requirements in irrigated areas from climatological and irrigation data (Vol. 96). *Washington, DC: US Soil Conservation Service*. Tech. Paper 96, 48 p.

Bouma, J. (1989). Using Soil Survey Data for Quantitative Land Evaluation. *Advances in Soil Science*. Vol. 9. pp. 177–213. doi:10.1007/978-1-4612-3532-3_4. ISBN 978-1-4612-8144-3.

Brouwer, C., & Heibloem, M. (1986). Irrigation water management: irrigation water needs. *Training manual*, 3, 1-5.

Csikós, N., Szabó, B., Hermann, T., Laborczi, A., Matus, J., Pásztor, L., ... & Tóth, G. (2023). Cropland productivity evaluation: A 100 m resolution country assessment combining earth observation and direct measurements. *Remote Sensing*, 15 (5), 1236.

Demir Y., Demir, A.D., Meral, R., Yüksel, A., (2015). Bingöl Ovası İklim Tipinin Thornthwaite ve Erinç İndisine Göre Belirlenmesi, *Türk Tarım ve Doğa Bilimleri Dergisi* 2 (4): 332–337

de Marsily, G., (1986). Quantitative Hydrogeology: Groundwater Hydrology for Engineers, *Academic Press*.

Doğdu, M.Ş. (2011). Hidrolojik Çalışmalarda Kullanılan Su Bütçesi Bileşenlerinin Hesabı İçin Bilgisayar Programı, *DSİ Teknik Bülteni*, Sayı 112

DSİ, (1969). “Yeraltı Suları Hakkında Pratik Uygulamalar”, (Çeviri, orijinal eser: CASTANY, G., 1963, *Traité Pratique des Eaux Souterranines*, Dunod, 657 p Paris)

Hargreaves, G.H. 1975. Moisture availability and crop production. *Trans. ASAE* 18: 980-984

Hydrologic Engineering Center, 2025. HEC-HMS Users Manual

Kassai, P., Kocsis, M., Szatmari, G., Mako, A., Meszaros, J., Laborczi, A., ... & Szabo, B. (2025). Large-scale mapping of soil particle size distribution using legacy data and machine learning-based pedotransfer functions. *Geoderma*, 454, 117178.

Koç, D. L., Kapur, B., Ünlü, M., & Kanber, R. (2022). The situation of water resources and agricultural irrigation in Turkey. *Çukurova Tarım ve Gıda Bilimleri Dergisi*, 37 (2), 112-122.

Lindström, G., Pers, C., Rosberg, J., Strömqvist, J., & Arheimer, B. (2010). Development and testing of the HYPE (Hydrological Predictions for the Environment) water quality model for different spatial scales. *Hydrology research*, 41 (3-4), 295-319.

Lowry Jr, R. L., & Johnson, A. F. (1942). Consumptive use of water for agriculture. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 107 (1), 1243-1266.

Selek, B., & Aksu, H. (2019). Water resources potential of Turkey. In Water resources of Turkey (pp. 241-256). Cham: Springer International Publishing.

Soil Conservation Service, 1970. Irrigation Water Reuirements, *Technical Release* No 21, Nisan 1967, Revizyon: Ekim, 1970.

Szabó, B., Weynants, M. and Weber, T. K. D. (2021) Updated European hydraulic pedotransfer functions with communicated uncertainties in the predicted variables (euptfv2). *Geoscientific Model Development*, 14, 151–175 doi: 10.5194/gmd-14-151-2021.

Thornthwaite, C.. An approach toward a rational classification of climate. *Geographical review*, 38 (1), 55-94.

Thornwaite, C.W., and J.R. Mather, 1957. Instructions and Tables for Computing Potential Evapotranspiration and the Water Balance, Drexel Institute of Technology, *Laboratory of Climatology, Publications in Climatology* 10 (3)

Tóth, B., Weynants, M., Nemes, A., Makó, A., Bilas, G., & Tóth, G. (2015). New generation of hydraulic pedotransfer functions for Europe. *European journal of soil science*, 66 (1), 226-238.

Van Looy, K., Bouma, J., Herbst, M., Koestel, J., Minasny, B., Mishra, U., ... & Vereecken, H. (2017). Pedotransfer functions in Earth system science: Challenges and perspectives. *Reviews of Geophysics*, 55 (4), 1199-1256.

Weber, T. K. D., Weynants, M., Szabó, B. (2020) R package of updated European hydraulic pedotransfer functions (eupft2). doi: 10.5281/zenodo.4281045.

Weber, T. K. D., Weihermüller, L., Nemes, A., Bechtold, M., Degré, A., Diamantopoulos, E., ... & Bonetti, S. (2024). Hydro-pedotransfer functions: a roadmap for future development. *Hydrology and Earth System Sciences*, 28 (14), 3391-3433.

Yates, D., Sieber, J., Purkey, D., & Huber-Lee, A. (2005). WEAP21—A demand-, priority-, and preference-driven water planning model: part 1: model characteristics. *Water international*, 30 (4), 487-500.

BÖLÜM 0

UYDU GÖRÜNTÜLERİ VE CBS TABANLI TARIMSAL VERİ ANALİZİ

MUSTAFA TOLGA ESETLİLİ¹
BİHTER ÇOLAK ESETLİLİ²
EDANUR FIRAT³
YUSUF KURUCU⁴

Giriş

İklim değışikliğinin son otuz yıl içinde kazandığı ivme, tarımsal üretim sistemlerinde gözlenen değışimleri hem daha karmaşık hâle getirmiş hem de klasik izleme yaklaşımlarının sınırlarını aşan yeni bir gözlem kapasitesine olan ihtiyacı belirginleştirmiştir. Sıcaklık artışları, yağış desenlerinin düzensizleşmesi, buharlaşma kayıplarının yükselmesi, ekstrem hava olaylarının sıklığının artması ve hidrolojik dengenin bozulması, tarım alanlarında mekânsal olarak heterojen ve hızla değışen stres

¹ Prof. Dr., Ege Üniversitesi, Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Bölümü, Orcid: 0000-0002-8095-4247

² Doç. Dr., Ege Üniversitesi, Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Bölümü, Orcid: 0000-0001-5707-2011

³ Ar. Gör., Ege Üniversitesi, Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Bölümü, Orcid: 0000-0001-9775-1318

⁴ Prof. Dr., Ege Üniversitesi, Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Bölümü, Orcid: 0000-0002-8267-4847

koşullarına neden olmaktadır. Küresel ortalama sıcaklıklardaki artış, yağış desenlerindeki bozulma, kuraklık-periyotlarının sıklaşması ve ekstrem meteorolojik olayların şiddetindeki artış; bitki fizyolojisi, toprak özellikleri, su döngüsü ve tarımsal verimlilik üzerinde çok katmanlı etkiler yaratmaktadır (Türkeş, 2020; Poyrazoğlu ve diğ., 2024). Bu değişim yalnızca bitki fizyolojisini değil, su yönetimi pratiklerini, arazi kullanım kararlarını, üretim planlamasını ve ekolojik dayanıklılığı da doğrudan etkilemektedir. Dolayısıyla, tarımsal üretim sistemlerinin izlenmesi artık yalnızca tarla düzeyinde yapılan gözlemlerle, geleneksel ölçüm teknikleriyle veya sınırlı örnekleme yöntemleriyle sürdürülebilecek bir pratik olmaktan çıkmıştır. Bunun yerine, geniş alanları eşzamanlı izleyebilen, zamansal değişimleri yakalayabilen, mekânsal heterojenliği nesnel biçimde ortaya koyabilen ve tarımsal stresleri fiziksel temelli spektral tepkiler üzerinden değerlendirebilen teknolojilere ihtiyaç duyulmaktadır.

Uydu görüntüleri tam da bu noktada tarım ve iklim ilişkisini anlamak için vazgeçilmez bir araç olarak ortaya çıkmaktadır. Günümüzde Landsat, Sentinel, MODIS, RapidEye, PlanetScope gibi farklı mekânsal, zamansal ve spektral özelliklerde çalışan sensörler, bitki örtüsünün fenolojik gelişimini, klorofil yoğunluğunu, su stresini, toprak yüzey özelliklerini ve tarım alanlarının kullanım şeklindeki dönüşümü izlemek için güçlü bir gözlem kapasitesi sunmaktadır. Bu uydu sistemleri sayesinde tarım alanları yalnızca bir anlık görüntü ile değil, aynı zamanda yıllar boyunca oluşan eğilimler, kırılma noktaları, şiddetli kuraklık dönemleri, hastalık veya besin yetersizliğine bağlı stres belirtileri ve arazi kullanımındaki dönüşümlerle birlikte dinamik bir süreç olarak izlenebilmektedir. Zamansal çözünürlüğü yüksek sensörler, özellikle yarı kurak bölgelerde kuraklık şiddetinin dönemsel değişimlerini yakalamada kritik rol oynamaktadır. Bu tür zaman serisi analizleri,

hem kısa dönemli anomalilerin hem de uzun vadeli yapısal eğilimlerin anlaşılmasını sağlamakta önemli bir rol oynamaktadır.

Bu gelişmelerin eşlik ettiği bir diğer temel unsur, Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) altyapısının tarımsal veri yönetiminde giderek daha merkezi bir rol üstlenmesidir. CBS, uydu görüntülerinden elde edilen spektral göstergeleri; toprak verileri, hidrolojik bilgiler, iklim değişkenleri, arazi kullanım planları ve üretim istatistikleri gibi farklı veri katmanlarıyla bir araya getirerek mekânsal karar destek mekanizmalarının oluşturulmasını mümkün kılar. Böylece tarım sistemlerinin yalnızca görsel bir temsili değil, bilimsel olarak bütünleştirilmiş ve analiz gücü yüksek bir değerlendirme çerçevesi elde edilir. Bu yaklaşım özellikle Küçük Menderes Havzası gibi hidrolojik dengesizliğin belirginleştiği ve yeraltı suyu çekimlerinin sürdürülebilir sınırları zorladığı bölgelerde karar vericilere stratejik bir perspektif sunmaktadır (Yagbasan, 2016).

Bu bağlamda, uydu görüntüleri ve CBS tabanlı tarımsal veri analizi, iklim değişikliğinin tarım üzerindeki etkilerini değerlendirmek için artık tamamlayıcı bir yöntem değil, zorunlu bir izleme paradigması hâline gelmiştir. Bu paradigmada amaç yalnızca izleme yapmak değil, izleme çıktılarının politika tasarımına, uyum stratejilerine ve risk azaltım planlarına doğrudan entegre edilmesinin yüksek doğruluk oranı ile sağlanmasıdır.

Uydu Görüntülerinin Tarımsal Üretim ve Su Yönetiminde Kullanımı

Uzaktan algılama teknolojilerinin tarımsal alanlarda kullanımının artması, bitki fizyolojisi ile elektromanyetik spektrum arasındaki ilişkinin daha iyi anlaşılmasıyla doğrudan bağlantılıdır. Bitkiler, yaprak pigmentleri, su içeriği, hücresel yapı ve biyokütle yoğunluğu gibi özelliklere bağlı olarak farklı dalga boylarında karakteristik yansımalar üretirler. Örneğin kırmızı dalga boyu

klorofil tarafından güçlü biçimde absorbe edilirken, yakın kızılötesi (NIR) bölge bitki hücre yapısı tarafından güçlü şekilde yansıtılır. Bu temel prensip, NDVI ve EVI gibi yaygın kullanılan bitki indekslerinin de bilimsel altyapısını oluşturur. Ancak spektral bant çeşitliliğinin artması ile birlikte artık yalnızca bu klasik indeksler değil, kırmızı kenar (red-edge), kısa dalga kızılötesi (SWIR) ve termal bantlar gibi daha özel bantlar da tarımsal streslerin tespitinde kullanılmaktadır.

Son yıllarda Rededge(Kırmızı kenar) bandının uzaktan algılama çalışmalarında öne çıkması tesadüf değildir. Bu bant, klorofil absorpsiyonu ile hücresel yansıma arasındaki geçiş bölgesinde yer aldığı için bitkinin fizyolojik durumundaki küçük değişikliklere dahi duyarlıdır. Esetlili ve arkadaşlarının pamuk tarım alanlarında yürüttüğü çalışma, Red-edge bandının verimle ilişkisini ortaya koyan önemli bir örnek olup, NDVI'nın doyumluğa ulaştığı dönemlerde bile Red-edge tabanlı indekslerin yeşil biyokütle varyasyonlarını güçlü biçimde ayırt edebildiğini göstermiştir. Bu bulgu, spektral duyarlılığın tarımsal üretim süreçlerinin izlenmesinde ne kadar kritik olduğunu açıkça ortaya koymaktadır (Esetlili ve diğ., 2015). Aynı zamanda su stresi, besin eksikliği ve erken fenolojik anormalliklerin izlenmesi için red-edge tabanlı yaklaşımların gerekliliği günümüz literatüründe sıklıkla vurgulanmaktadır.

Uydu görüntülerinin yalnızca bitki fizyolojisini değil, aynı zamanda su yönetimini ilgilendiren pek çok süreci de eşzamanlı olarak izleyebilmesi, tarımsal üretim açısından stratejik bir avantaj sağlar. Arazi su yüzeylerinin genişliği, su depolama yapılarındaki değişim, sulama altyapısının mekânsal yayılımı ve yüzey nemi göstergeleri gibi parametreler, hem yıllık üretim dinamiklerinin hem de iklim değişikliği kaynaklı baskıların değerlendirilmesinde kritik rol oynar. Şenol ve arkadaşlarının Mersin çalışmasında gösterildiği gibi, sulama göletlerinin artışı bölgesel bitki örtüsü sağlığını koruyan

ve kurak dönem etkilerini hafifleten önemli bir etmen olarak ortaya çıkmıştır (Şenol ve diğ., 2024). Bu tür analizler, uydu verilerinin tarımsal üretim ve su yönetimi arasındaki bağlantıları ortaya çıkarmada ne kadar güçlü bir araç olduğunu göstermektedir.

Kuraklık izleme ise uydu tabanlı çalışmaların en hızlı gelişen alt alanlarından biridir. Birleşik Kuraklık İndeksi (CDI) gibi çok değişkenli modeller, bitkisel indeksleri yağış, sıcaklık, toprak nemi ve buharlaşma verileriyle bütünleştirerek tarımsal kuraklığın hem fizyolojik hem meteorolojik boyutlarını ortaya koyabilir. Bu tür indeksler bir modelleme aracı değildir; fakat modellemeye temel oluşturan ve simülasyon çıktılarının doğrulanmasında kullanılan öncül göstergelerdir. Dolayısıyla, tarımsal modellemeyle uğraşacak diğer bölüm yazarları için de gerekli girdileri sağlar. CDI türü yaklaşımlar özellikle uzun dönem NDVI anomalileri ile birleştirildiğinde, havzalarda stres “sıcak noktalarının” belirlenmesi için güçlü bir araçtır.

Gümüş ve arkadaşlarının (2023) çalışması, bitki indeksleri, yağış verileri (CHIRPS), sıcaklık verileri (ERA5) ve toprak nemi ölçümlerinin CDI altında birleştirilmesiyle tarımsal kuraklığın mekânsal-zamansal izlenmesini mümkün kılmıştır. CDI türü indeksler, modelleme aracı olmasalar da, modelleme çalışmalarının doğrulama ve başlangıç koşullarının belirlenmesinde kritik bir öneme sahiptir (Gümüş ve diğ., 2023). Bu tür yaklaşımlar özellikle su stresi altında üretim yapan Küçük Menderes Havzası gibi havzalarda, yağış rejimindeki düzensizlikler ve yeraltı suyu çekimindeki artış nedeniyle daha da önem kazanmaktadır. Yagbasan (2016) tarafından ortaya konan yağış azalması eğilimleri, uydu zaman serilerinin bu bölge için vazgeçilmez olmasına yol açmaktadır.

Bu tür çok değişkenli uzaktan algılama yaklaşımları, özellikle Küçük Menderes Havzası gibi su stresi olan bölgelerde, kuraklık yoğunluğunun coğrafi desenini belirlemede güçlü bir

araçtır. Havzada yağış rejimindeki düzensizliğin artması, yaz sıcaklıklarının yükselmesi ve bitkisel evapotranspirasyonun hızlanması, uydu verilerinin zaman serisi analizlerine dayalı kuraklık değerlendirmelerinin önemini daha da artırmaktadır.

Uzaktan algılama verilerinin tarımsal verim tahmin modelleriyle bağlantısı da sınırlı ancak önemlidir. Spektral göstergeler verim simülasyon modellerinde doğrudan kullanılabilir parametreler sunmasa da, bu modellerin başlangıç koşullarının doğrulanması, stres dönemlerinin tespiti ve mekânsal varyasyonun belirlenmesi açısından kritik bir rol oynar. Böylece modelleme sürecinin güvenilirliği artar ve mekânsal doğruluk güçlenir. Bu bağlamda, CBS ve uzaktan algılama verilerinin modelleme altyapılarının girdi setlerine entegrasyonu, ulusal tarım politikalarının geleceği açısından stratejik öneme sahiptir.

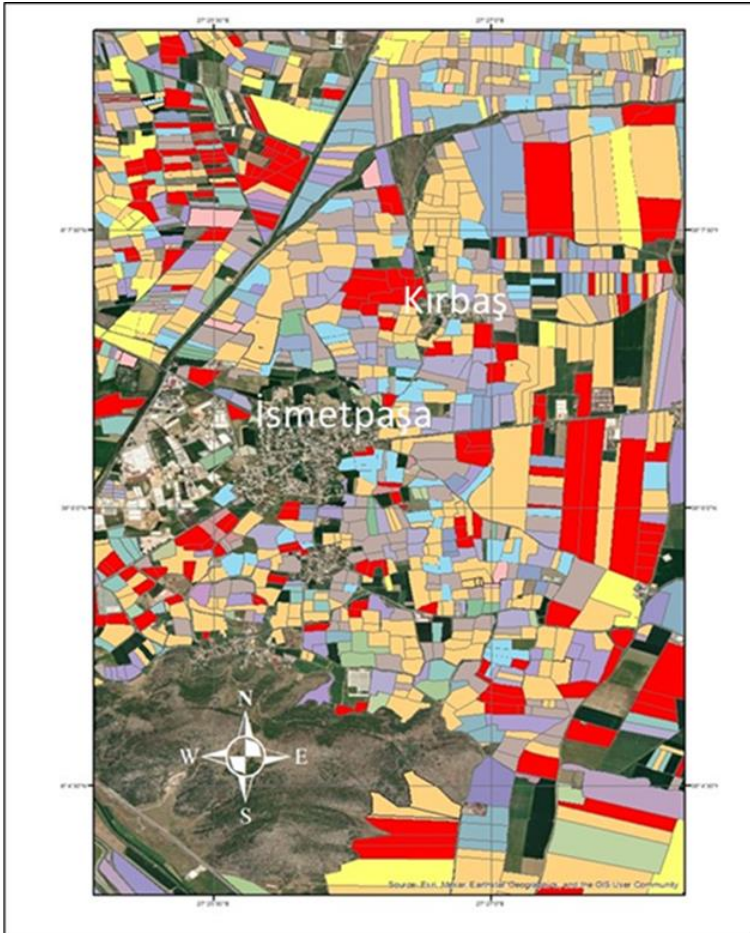
CBS Tabanlı Mekânsal Analiz Yaklaşımları ve Havza Ölçeğinde Uygulanabilirlik: Küçük Menderes Örneği

CBS tabanlı analizler, tarımsal ekosistemlerin çok boyutlu yapısını anlamak için uydu görüntülerinden elde edilen verilerin coğrafi referansla birleştirilmesine dayanan güçlü bir yöntemler bütünüdür. CBS'nin gücü, yalnızca mekânsal verileri depolamakla sınırlı değildir; aynı zamanda veriler arasındaki ilişkileri modelleyebilme kapasitesinden gelir. Bu nedenle tarımsal üretim, arazi kullanımı, su yönetimi ve iklimsel değişkenler gibi farklı alanlardaki veriler tek bir analitik çatı altında bütünleştirilebilir. Bu bütünleşik yapı, özellikle tarımsal streslerin nedenlerini sonuçlarından ayırmayı mümkün kıldığı için bilimsel açıdan değerlidir.

Küçük Menderes Havzası, hem hidrolojik hem de tarımsal açıdan yüksek mekânsal çeşitlilik gösteren bir bölge olduğu için CBS tabanlı analizlere son derece uygundur. Havzanın farklı agro-ekolojik alt bölgeleri; sulama gereksinimleri, ürün seçimleri, toprak

özellikleri ve iklimsel stresler bakımından belirgin heterojenliklere sahiptir. Dolayısıyla, tek tip bir izleme yaklaşımı havza genelindeki riskleri ve potansiyeli temsil edemez. Uydu verileri ve CBS'nin entegre kullanımı, bu çeşitliliğin nicel olarak ortaya konulmasına olanak tanır. Ayrıca "Havza Bazlı Yönetim" ilkesi doğrultusunda, mekânsal analizler tarımsal uyum stratejilerinin planlanmasında temel bir gereklilik hâline gelmiştir (Şekil 1).

Şekil 1. Yüksek çözünürlüklü uydu verileri ile CBS entegrasyonu kullanılarak tarımsal ürün deseninin parsel düzeyinde mekânsal olarak modellenmesi ve haritalanması.



Havza ölçeğinde CBS tabanlı analizin temel katkılarından biri, tarımsal stres göstergelerinin zamansal eğilimlerini ortaya koymaktır. Örneğin NDVI zaman serileri, bitki örtüsünün belirli dönemlerde gösterdiği anomalileri, ekstrem kuraklık yıllarındaki düşüşleri veya sulama uygulamalarının etkisini uzun dönemli bir perspektifle yorumlamaya imkân tanır. Benzer şekilde, arazi kullanım/örtüsü değişimi (LULC değişimi) analizi de tarım alanlarının genişlemesi, daralması, nadas oranları, kentleşme baskısı ve sulanan alanların mekânsal deseni açısından kritik bilgiler sunar. Özellikle Küçük Menderes Havzası'nda kentsel genişlemenin verimli tarım alanlarını baskıladığı ve yeraltı suyu kullanımıyla bağlantılı olarak ürün deseninde önemli kaymalar yaşandığı bilinmektedir.

CBS'nin sunduğu ikinci önemli katkı, tarımsal üretim ve su yönetimi açısından risk altındaki bölgelerin mekânsal olarak tanımlanmasıdır. Bu kapsamda, bitki indekslerinin eşik değerlerle değerlendirilmesi, toprak nem göstergeleriyle birlikte yorumlanması ve meteorolojik verilerle birleştirilmesi, havzanın kırılgan alanlarını belirlemek için güçlü bir araçtır. Bu yaklaşım, projelerde su kaynakları ve tarım üzerindeki etkileri modelleyecek ekiplerin çalışmalarına temel oluşturmaktadır. Ayrıca, günümüzde sıklıkla altı çizilen "Su Tahsis Planlaması" için mekânsal temelli risk haritalarının oluşturulması da CBS analizlerinin doğrudan uygulama alanlarından biridir.

Üçüncü önemli katkı ise karar destek altyapılarına yöneliktir. CBS tabanlı analizler, havza genelinde su tahsisine ilişkin önceliklerin belirlenmesi, tarımsal kuraklık erken uyarı sistemlerinin oluşturulması, ürün deseninin optimize edilmesine yönelik planlamalar ve iklim uyum stratejilerinin mekânsal temellendirilmesi için kullanılabilir. Bu bağlamda, uzaktan algılama ve CBS'nin birleşimi, yalnızca izleme kapasitesini değil, aynı zamanda proaktif yönetim kapasitesini de artırır. Havza bazlı

yönetim ilkelerinin en etkin uygulanma biçimi, CBS tabanlı karar destek sistemlerinin kurumsal altyapılara entegre edilmesiyle mümkündür.

Sonuç

Uydu görüntüleri ve CBS tabanlı tarımsal veri analizi, iklim değişikliği çağında tarımsal üretim sistemlerini anlamak, izlemek ve geleceğe hazırlamak için geliştirilen en güçlü bilimsel araçlardan biridir. Bitki örtüsü indeksleri, spektral bant duyarlılıkları, kuraklık göstergeleri ve arazi kullanım analizleri; tarımsal streslerin hızlı ve doğrulukla tespit edilmesine olanak tanırken, CBS altyapısı bu verileri anlamlı bir mekânsal karar destek sistemine dönüştürür. Bu bütünleşik yaklaşım özellikle su stresi altındaki havzalarda, gıda güvenliği, sürdürülebilir su ve doğal kaynak yönetimi, tarımsal su verimliliği ve iklim uyum politikaları açısından stratejik bir rol oynar. Türkiye'nin gelecekteki tarımsal dayanıklılığı büyük ölçüde bu tür veri temelli yaklaşımların karar alma süreçlerine entegre edilmesine bağlıdır.

Uydu görüntüleri ve CBS'nin sunduğu bu geniş analitik kapasite, tarım sektörünün iklim değişikliğine uyumunda vazgeçilmez bir bileşen olup, gelecek yıllarda daha da ileri teknolojilerle zenginleşerek tarımsal dirençlilik politikalarının merkezinde yer alacaktır. Artan uzamsal çözünürlük, daha sık veri alma kapasitesi, hiperspektral algılayıcıların yaygınlaşması ve yapay zekâ tabanlı mekânsal analizlerin gelişmesiyle birlikte, uydu tabanlı tarımsal izleme sistemleri yalnızca bir araştırma alanı olmaktan çıkacak; ulusal tarım yönetiminin ayrılmaz bir parçası hâline gelecektir.

Kaynakça

Esetlili, M. T., Özen, F., Kandemir, B. N., & Kurucu, Y. (2015). Uzaktan algılama tekniği ile pamuk tarla verimi tahmin doğruluğunun artırılmasında kırmızı kenar (rededge) band kullanımının katkısı. *Journal of Agriculture Faculty of Ege University*, 52(2), 161–168. <https://doi.org/10.20289/euzfd.81991>

Gümüş, K. A., Balçık, F. B., Esetlili, T., & Kahya, C. (2023). Monitoring drought dynamics using remote sensing-based combined drought index in Ergene Basin, Türkiye. *Open Geosciences*, 15(1), Article 20220594. <https://doi.org/10.1515/geo-2022-0594>

Poyrazoğlu, E. S., Güçer, Y., & Artık, N. (2024). Impact of climate change on agricultural production and food security. *Akademik Gıda (Yeşil Dönüşüm Özel Sayısı)*. <https://doi.org/10.24323/akademik-gida.1554438>

Şenol, H. İ., Şimşek, O., & Yiğit, A. Y. (2024). Tarımda sulama göletlerinin iklim üzerine etkilerinin uydu görüntüleri ve meteorolojik verilerle karşılaştırmalı olarak incelenmesi. *Türkiye Uzaktan Algılama Dergisi*. <https://doi.org/10.51489/tuzal.1551019>

Türkeş, M. (2020). The impacts of climate change on food production. *Turkish Journal of Geosciences*, 17(2), 113–140.

Yagbasan, O. (2016). Impacts of climate change on groundwater recharge in Küçük Menderes River Basin in Western Turkey. *Geodinamica Acta*, 28(3), 209–222. <https://doi.org/10.1080/09853111.2015.1121802>

BÖLÜM 0

TARIMSAL ÜRETİMDE İKLİM DEĞİŞİKLİĞİNE UYUM STRATEJİLERİ

TUĞBA DOĞAN GÜZEL¹
ECE GİZEM ÇAKMAK²
DENİZ SARI³
HALDUN KARAN⁴

Giriş

İklim değışikliğı, tarım sektöründe pek çok olumsuz etkiye yol açmaktadır. Daha sıcak ve az yağışlı iklim koşulları, ekstrem meteorolojik olaylarda artış, su kaynaklarının azalması ve kuraklık şiddetinin artması gibi sorunlar, su ve toprak kalitesinin bozulmasına neden olurken, ekosistem ve biyolojik çeşitlilik de olumsuz etkilenmektedir. Ekolojik alanların kayması, tarımsal üretim ve kalite kayıpları, zararlılar ve hastalıklarda artış, gübreleme ve ilaçlama sorunları, sürdürülebilir gıda güvenliği açısından büyük

¹ Başuzman Araştırmacı, TÜBİTAK MAM, İklim ve Yaşam Bilimleri Başkan Yardımcılığı, Orcid: 0000-0002-8636-4408

² Başuzman Araştırmacı, TÜBİTAK MAM, İklim ve Yaşam Bilimleri Başkan Yardımcılığı, Orcid: 0000-0001-7721-8866

³ Kıdemli Başuzman Araştırmacı, TÜBİTAK MAM, İklim ve Yaşam Bilimleri Başkan Yardımcılığı, Orcid: 0000-0002-8095-9718

⁴ Kıdemli Başuzman Araştırmacı, TÜBİTAK MAM, İklim ve Yaşam Bilimleri Başkan Yardımcılığı, Orcid: 0000-0003-2388-1261

riskler doğurmaktadır. Tarımsal işletmeler açısından ise ekim-dikim, hasat-harman, toprak işleme, gübreleme ve ilaçlama gibi birçok alanda sorunlar yaşanmaktadır. Ayrıca su ve sulama suyunun temininde problemler, bitkisel çeşitlilikte azalma ve artan CO₂ konsantrasyonlarının bitki gelişimi üzerindeki etkileri de dikkate alınması gereken diğer önemli hususlardır (TRGM, 2023).

Artan riskler, tarım ve hayvancılık sistemlerinin iklim değişikliğine karşı dayanıklılığını güçlendirmeye yönelik kapsamlı politika ve uygulamaların gerekliliğini açıkça ortaya koymaktadır. Bu kapsamda, Türkiye'de tarım sektörünün iklim değişikliğine uyumu için geliştirilen çeşitli plan ve stratejiler bulunmakta olup, bu plan ve stratejiler iklim değişikliğinin olumsuz etkilerini azaltmaya ve tarımsal üretimin sürdürülebilirliğini sağlamaya yönelik adımları içermektedir.

Ulusal ve Bölgesel Plan ve Stratejiler

İklim değişikliğinin tarım sektörü üzerindeki etkileri, Türkiye gibi iklim koşullarına duyarlı ülkelerde önemli bir risk faktörü haline gelmiştir. Artan sıcaklıklar, azalan yağışlar, su kaynaklarının kıtlaşması ve ekstrem hava olaylarındaki artışlar, tarımsal üretimde verim ve kalite kayıplarına neden olabilmektedir. Bu doğrultuda, Türkiye'de tarım sektörünün iklim değişikliğine uyum sağlaması için çeşitli plan ve stratejiler geliştirilmiştir. Türkiye'de şimdiye kadar iklim değişikliğine uyum için geliştirilen ve tarım sektörünü de ele alan çeşitli plan ve strateji belgelerinden bazıları şu şekildedir: Türkiye İklim Değişikliği Eylem Planı (2011-2023), Türkiye'nin İklim Değişikliği Uyum Stratejisi ve Eylem Planı (2011-2023), 12. Kalkınma Planı, Ulusal Kuraklık Yönetimi Strateji Belgesi ve Eylem Planı (2017-2023), Tarım ve Orman Bakanlığı Stratejik Planları, Ulusal Kırsal Kalkınma Stratejisi (2021-2023), Çölleşme İle Mücadele Ulusal Strateji Belgesi (2013-2023).

Su yönetiminden toprak korumaya, kuraklığa dayanıklı türlerin yetiştirilmesinden sürdürülebilir tarım uygulamalarına kadar geniş bir yelpazede önlemler sunan çeşitli plan, politika ve stratejilerin oluşturulması veya güncellenmesi faaliyetleri son yıllarda hız kazanmış olup, mevcut durumda yürürlükte olan bu düzenlemeler hem tarımsal üretimin devamlılığını güvence altına almakta hem de kırsal kalkınmayı desteklemekte önemli bir rol oynamaktadır.

Bu politika belgelerinden en temeli; tarım sektörünün ve kırsal alanın, kalkınma plan ve stratejileri doğrultusunda geliştirilmesi ve desteklenmesi için gerekli politikaların tespit edilmesi ve düzenlemelerin yapılmasını amaçlayan Tarım Kanunu 2006 yılında yürürlüğe girmiştir. Bu Kanun, tarım politikalarının amaç, kapsam ve konularının belirlenmesi; tarımsal destekleme politikalarının amaç ve ilkeleriyle temel destekleme programlarının tanımlanması; bu programların yürütülmesine ilişkin piyasa düzenlemeleri, finansman ve idarî yapılanmanın tespit edilmesi; tarım sektöründe uygulanacak öncelikli araştırma ve geliştirme programlarıyla ilgili kanunî ve idarî düzenlemelerin yapılması ve tüm bunlarla ilgili uygulama usûl ve esaslarını kapsamaktadır. Tarım politikalarının amaçları; tarımsal üretimin iç ve dış talebe uygun bir şekilde geliştirilmesi, doğal ve biyolojik kaynakların korunması ve geliştirilmesi, verimliliğin artırılması, gıda güvencesi ve güvenliğinin güçlendirilmesi, üretici örgütlerinin geliştirilmesi, tarımsal piyasaların güçlendirilmesi, kırsal kalkınmanın sağlanması suretiyle tarım sektöründeki refah düzeyini yükseltmek olarak tanımlanmış olup, sürdürülebilirlik, insan sağlığı ve çevreye duyarlılık tarım politikalarının ilkelerinden biri olarak ele alınmıştır. Tarımsal üretimde verimlilik, ürün çeşitliliği, kalite ve rekabet gücünün yükseltilmesi, kırsal hayatın sosyo-ekonomik açıdan geliştirilmesi, toprak ve su kaynaklarının geliştirilmesi ve rasyonel

kullanımı hususları ise tarım politikalarının öncelikleri arasında yer almaktadır. (RG, 2006).

Temel politika belgelerinden bir diğeri olan **12. Kalkınma Planı (2024-2028)** Türkiye'nin 2023 hedefleri doğrultusunda iklim değışikliğı ile mücadele ve uyum konularında önemli stratejiler ve hedefler belirlemektedir. Bu plan, iklim değışikliğinin ekonomik ve sosyal etkilerini göz önünde bulundurarak, sürdürülebilir kalkınmayı sağlamak için kapsamlı bir çerçeve sunmaktadır. Enerji ve gıdada arz güvenliğı ve kendine yeterlilik temel hedefler arasında yer almakta, tarım ve gıda öncelikli gelişme alanlarından biri olarak ele alınmaktadır. Bu kapsamda, üretimin ekonomik, sosyal ve çevresel boyutlarını bütüncül olarak ele alan, teknoloji kullanım düzeyi ve verimliliğı yüksek, örgütlü, rekabetçi, arz-talep dengesi çerçevesinde planlı üretim yapılan, doğal kaynakları etkin ve sürdürülebilir kullanan, toplumun yeterli ve dengeli beslenmesini sağlayan bir tarım sektörünün oluşturulması temel amaç olarak belirlenmiştir. 12. Kalkınma Planı'nda tarım ve gıda ile ilgili olarak çok sayıda politika ve tedbir belirlenmiş olup, dijitalleşme, yapay zekâ ve veriye dayalı iş modelleriyle akıllı tarım uygulamalarının yaygınlaştırılması; tarım arazilerinin korunması, sürdürülebilir kullanımı ve etkin yönetiminin sağlanması; arazi toplulaştırma çalışmalarının sulama yatırımlarıyla entegre şekilde sürdürülmesi; tarım arazilerinde organik madde içeriğinin artırılmasıyla toprak erozyonu ve kirliliğinin önlenmesine yönelik uygulamaların desteklenmesi amaçlanmaktadır. Bitkisel üretimde planlı üretime geçilmesi, nitelikli genetik materyal kullanılarak verimin yükseltilmesi ve özellikle büyükşehirlerde örtü altı yetiştiriciliğinin geliştirilmesiyle üretimin artırılması; bitkisel ürünlerde arz-talep dengesinin kurulması, arazilerin kabiliyet sınıflarına uygun kullanımı ve stratejik ürünlerde kendine yeterliliğın sağlanması için üretim planlaması yapılması hedeflenmektedir.

Hayvansal üretimde verim ve kalitenin yükseltilmesi, yem maliyetlerini azaltmaya yönelik mera ıslah çalışmalarına hız verilmesi ve ürün-pazar çeşitliliğinin artırılması; çevrenin korunması ve iklim değişikliği ile mücadele kapsamında sera gazı emisyonlarını azaltacak çevre dostu uygulamaların desteklenerek yaygınlaştırılması; iyi tarım uygulamaları ve organik tarımın teşvik edilmesiyle ürün güvenilirliğinin artırılması amaçlanmaktadır. Gıda güvenliği ve güvenilirliğinin sağlanmasına yönelik girdi kullanımı, bitki ve hayvan sağlığı, örgütlenme, pazarlama ve sulama gibi alanlarda eğitim ve yayım faaliyetlerinin bilgi ve iletişim teknolojileri aracılığıyla artırılması da hedeflenmektedir.

Ayrıca, tarımsal sulamada alternatif su kaynaklarının kullanılması için yağmur suyu hasadı, arıtılmış atık suların sulamaya uygun hâle getirilmesi ve deniz suyunun tuzdan arındırılması yönünde Ar-Ge çalışmalarının yürütülmesi; sulama yönetiminde bilgi ve iletişim teknolojilerinin kullanımının yaygınlaştırılması; uzaktan algılama ve CBS tabanlı tekniklerin sulama programlarında kullanılmasına yönelik Ar-Ge faaliyetlerinin sürdürülmesi ve sulama suyunun verimli kullanılması amacıyla mevcut tesislerde otomasyon ve karar destek sistemlerinin faaliyete geçirilmesi hedeflenmektedir (SBB, 2023).

2024-2030 yıllarını kapsayan ve 2024 yılında yayınlanan **İklim Değişikliğine Uyum Stratejisi ve Eylem Planı (IDUSEP)**, Türkiye'nin iklim değişikliğinin mevcut ve gelecekteki etkilerine karşı daha dayanıklı bir yapı oluşturmalarını amaçlamaktadır. Bu planın temel hedefi, iklim değişikliğinin kentler, su kaynakları yönetimi, tarım ve gıda güvencesi, biyoçeşitlilik ve ekosistem hizmetleri, halk sağlığı, enerji, turizm ve kültürel miras, sanayi, ulaşım ve iletişim, sosyal kalkınma ve afet risk azaltma gibi kritik sektörler üzerindeki olumsuz etkilerini en aza indirirken, sürdürülebilir kalkınmayı destekleyen uyum politikaları geliştirmektir. Aynı zamanda, yerel ve ulusal düzeyde iklim

değişikliği farkındalığını artırmak, kırılgan toplulukların dayanıklılığını güçlendirmek ve iklim değişikliğine uyum için finansal kaynakların etkin kullanımını sağlamak da planın öncelikleri arasında yer almaktadır.

Türkiye’de su en fazla tarım sektöründe kullanılmaktadır (yaklaşık %77). Tarımda kullanılan suyun yaklaşık %76’sı yerüstü suyu %24’ü yeraltı suyundan sağlanmaktadır. Bu durum yerüstü ve yeraltı suları üzerinde baskı oluşturmaktadır. DSİ tarafından işletmeye açılan sulama alanlarına bakıldığında yaklaşık %60’ında yüzey sulama yöntemleri kullanılmakta olup burada su kaybı %35-%60 arasındadır. Bununla birlikte sulama randımanı %51 seviyesinde seyretmektedir. İklim değişikliğinin tarım alanlarını, mahsul verimini ve hayvancılığı etkileyeceği ayrıca kuraklık ve diğer aşırı iklim olaylarındaki artış ile rekoltede azalmaya neden olarak gıda güvencesini etkileyeceği öngörülmektedir. Bu nedenle iklim değişikliğinin su kaynakları üzerindeki olumsuz etkisi sonucu yaşanacak kuraklık ve su kıtlığına ilişkin etkilenebilirlik ve risk analizi çalışmaları kapsamında, aynı zamanda barındırdığı su tasarrufu potansiyeli açısından uyum çalışmaları kapsamında tarım sektörü öncelik arz etmektedir.

IDUSEP’te, tarım sektörünü doğrudan ilgilendiren su kaynakları yönetimi ile ilgili belirlenmiş olan stratejik hedefler şu şekildedir:

“Su Kaynakları yönetimi alanında politik ve yasal çerçevenin geliştirilmesi, veri ve bilgi üretimi ile paylaşımının artırılması” stratejik hedefi altında belirlenen uyum önlemleri;

- Havza ölçekli yönetim planlarının hazırlanması, mevcut yönetim planları kapsamındaki önlem, tedbir ve eylemlerin uygulanması ve takibi
- Etkin su ve atık su yönetiminin sağlanması için izleme ve bilgi sistemlerinin geliştirilmesi, yerüstü ve yeraltı suyu

kaynaklarının miktar ve kalitesi ile sektörel su tüketimlerine ilişkin envanter oluşturulması.

- Su yönetimine yönelik mevzuatın geliştirilmesi
- İklim değişikliğinin su kaynakları, göller, sulak alanlar ve kıyılara etkilerinin tespit edilmesi.
- Değişen İklimle Uyum Çerçevesinde Su Verimliliği Strateji Belgesi ve Eylem Planının (2023-2033) uygulanmasının takibi.

“Su kaynaklarının korunması, iyileştirilmesi ve verimli kullanılmasının sağlanması” stratejik hedefi altında belirlenen uyum önlemleri;

- İçme ve kullanma suyu temin edilen veya edilmesi planlanan yerüstü ve yeraltı su kaynaklarına ilişkin havza koruma çalışmalarının sürdürülmesi
- Su kaynaklarının kalitesini korumak maksadıyla deşarj standartları ve parametrelerin güncellenerek tüm havzalarda uygulanması, arıtılmış atıksu miktarının artırılması, arıtılmış atık suların yeniden kullanım oranının 2030 yılına kadar %15 seviyesine çıkarılması
- İklim değişikliğinin etkileri açısından sucul ekosistemlerin su kalitesi ve su seviyelerinin izlenmesi, öncelikle sektörel kullanım amaçlı su çekimi yapılan göller olmak üzere tüm doğal göllerin su bütçelerinin çıkarılması, sucul ekosistemlere ilişkin korunan alanlar ve sulak alanların yönetim planlarının hazırlanması/revize edilmesi ve uygulanması, tahrip olmuş sulak alanların tespit edilerek iyileştirilmesi ve onarılması, doğal imkânları kullanarak yapay göl, gölet ve yapay sulak alanların oluşturulması
- Yağmur suyu yönetimi için yasal çerçevenin hazırlanması, yağmur suyu altyapısı ve kirlilik kaynaklarına ilişkin envanterin hazırlanması ve güncellenmesi

- Belediyelerde su kayıpları oranının ilgili mevzuat ve su verimliliği strateji belgesi hedeflerine göre düşürülmesi, kentlerde yağmur suyu hasadı ve gri suyun kullanımı gibi alternatif su kaynakları kullanımının yaygınlaştırılması, güvenli içme suyu şebekesine erişimin artırılması
- Su verimliliği strateji belgesi hedefleri doğrultusunda tarımsal sulamada verimliliği artırıcı uygulamaların yaygınlaştırılması

şeklinde. Planda ele alınan en önemli ve stratejik sektörlerden bir diğeri tarım ve gıda güvencesidir. Türkiye'nin sahip olduğu iklim ve doğal kaynak çeşitliliği, çok sayıda tarım ürünü yetiştirilmesine olanak sağlamaktadır. Bununla beraber bu çeşitlilik tarım sektöründe iklim değişikliğinin etkisi ve iklim değişikliğine uyum açısından birçok farklı risk, seçenek ve senaryoyu da beraberinde getirmektedir. 2022 yılı TÜİK verilerine göre, Türkiye'de tarım arazisi yıllar itibarıyla azalmaktadır (İşlenen tarım alanı 1990'da 28 milyon hektar iken 2021'de 23 milyon hektara düşmüştür). Türkiye'nin en geniş ekim alanına sahip olan tahıllarda ise 1990-2021 döneminde 13,7 milyon hektar olan ekilen alan 11,1 milyon hektara düşmüştür. Öte yandan Türkiye'de hayvancılık da önemli bir tarımsal faaliyettir. Sığır, koyun, keçi ve kümes hayvanlarından oluşan hayvancılık alt sektörü, geleneksel ve endüstriyel şekilde yapılmaktadır. IDUSEP'te, tarım ve gıda güvencesi sektörü için belirlenmiş olan stratejik hedefler şu şekildedir:

“Tarım sektörünün iklim değişikliğine uyumu için politika ve yasal çerçevenin geliştirilmesi, kurumsal kapasitenin, iş birliğinin ve farkındalığın güçlendirilmesi sağlanması” stratejik hedefi altında belirlenen uyum önlemleri;

- İklim değişikliğine dirençli ve teknolojiyi etkin kullanan, havzanın ürün desenini ve su bütçesini dikkate alan sürdürülebilir ve rekabetçi bir tarım sektörü oluşturulması için

tarım politikalarının ve mevzuatın gözden geçirilmesi ve güncellenmesi.

- Tarım havzaları veya işletme bazında tarımsal üretimin planlanması ve bu planlamalardaki hedeflere ulaşılabilmesi için tarımsal desteklerin revize edilmesi.
- İklim değişikliğinin etkilerine uyum sağlanması amacıyla tarım sektöründe faaliyet gösteren paydaşlara yönelik eğitim, bilinçlendirme ve kapasite geliştirme faaliyetlerinin yaygınlaştırılması

“Tarımsal üretimde ekosistemlerin ve doğal kaynakların korunması, geliştirilmesi ve sürdürülebilir kullanımının sağlanması” stratejik hedefi altında belirlenen uyum önlemleri;

- Bitkisel üretimde ve hayvancılıkta, il ve/veya ilçe düzeyinde toprak ve su kaynaklarının etkin kullanımını ve biyolojik çeşitliliğin korunmasını sağlayabilecek uygun ürün deseni ve hayvancılık sistemi belirlenmesine yönelik çalışmalar yapılması ve çiftçiyi yönlendirmek amacıyla rehberler hazırlanması.
- Tarım arazilerinin, meraların niteliklerinin ve kırsal peyzajın korunmasının sağlanması, mera
- kapasitelerinin ve veriminin izlenmesi, meralarda su dengesine yardımcı olacak, verimi artıracak seçeneklerin belirlenmesi ve uygulanması.
- Ulusal düzeyde tarımsal faaliyetlere yönelik doğa temelli çözümler kılavuzu oluşturulması, ekosistem odaklı gıda üretim modeli geliştirilmesi, tarımsal çevrede tarımsal ormancılık faaliyetlerinin uygulanması ve yaygınlaştırılması.
- İklim değişikliğine uyumlu sürdürülebilir su ürünleri yetiştiriciliğinin teşvik edilmesi, sucul biyolojik çeşitliliğin korunması, geliştirilmesi ve sürdürülebilir kullanımı, balıkçılıkta istilacı türlerle mücadele planı oluşturulması.

- Arıcılıkla uğraşan hane ve işletme desteklerinin iyileştirilmesi; diğer sektörlerle olan (özellikle meyve üretimi, turizm ve bal ormanı) bağlantısının (risk ilişkisi) dikkate alınması

“İklim değişikliğinin tarıma etkisi ve uyumu konusunda Ar-Ge çalışmalarının artırılması, tarımda veri tabanı, bilgi teknolojileri ve inovasyon uygulamalarının geliştirilmesi ve tarımsal faaliyetlerin buna uygun olarak yürütülmesi sağlanması” stratejik hedefi altında belirlenen uyum önlemleri;

- Tarım sektöründe iklim değişikliğinin etkileri ve uyum konusunda Ar-Ge çalışmalarının desteklenmesi ve geliştirilmesi.
- Tarım sektöründe etkilenebilirliğin belirlenmesinde önemli rol oynayan sosyoekonomik faktörlerin belirlenmesi ve izlenmesi (il, ilçe, köy düzeyinde).
- Tarımda veri tabanı, bilgi teknolojileri ve inovasyon uygulamalarının ve inovatif faaliyetlerin geliştirilmesi ve tarımsal faaliyetlerin buna uygun olarak yürütülmesi.
- Kritik altyapılara (sulama, soğuk zincir, modern depolama, ulaşım altyapısı, vs.) ilişkin kayıp ve zararın azaltılması ve sigortacılık sisteminin iklim değişikliğinin etkileri de göz önüne alınarak geliştirilmesi

şeklinde (IDB, 2024). Tarım ve Orman Bakanlığı’nın 2024-2028 yıllarını kapsayan **Stratejik Planı’nda** Sürdürülebilir Çevre ve İklim Değişikliği programının iklim değişikliği ile mücadele ve uyum alt programı kapsamında tarım sektörünün iklim değişikliklerine uyum kapasitesinin artırılması hedeflenmektedir. Yine toprak ve su kaynaklarının etkin ve sürdürülebilir kullanımının sağlanması, iklim değişikliği, çölleşme ve erozyonla etkin mücadele edilmesi amacıyla oluşturulan toprak ve su kaynaklarının kullanımı ve yönetimi programı altında, su kaynaklarının korunması, iyileştirilmesi, geliştirilmesi ve etkin kullanımı için hedefler

bulunmaktadır. Stratejik Plan çerçevesinde belirlenen amaç ve hedefler ile stratejilerden bazıları aşağıda sıralanmıştır:

Yeterli, erişilebilir ve sürdürülebilir tarımsal ürün arzının sağlanması amacıyla belirlenen stratejiler;

- Çevre, insan ve hayvan sağlığına zarar vermeyen ve gıda ve yem güvenilirliğini hedefleyen; organik tarım ve iyi tarım uygulamalarının desteklenmesi,
- Bölgelere göre iklim şartlarına uyumlu yeni tür ve çeşitler belirlenecek, çeşitler ve yetiştirme teknikleri üreticilere benimsetilmesi,
- Hayvansal üretimde iklim değişikliğinin etkileri dikkate alınarak yeni üretim alanlarının planlanması.

İklim değişikliğine uyum kapasitesinin ve dirençliliğinin artırılması amacıyla belirlenen hedef ve stratejiler ise;

- Çölleşme, erozyon, su ve toprak koruma hususunda eğitim ve farkındalık çalışmalarıyla iklim değişikliğine karşı direncin artırılmasına yönelik Ar-Ge faaliyetlerinin yapılması, tarım topraklarında ve meralarda erozyonu önleyici tedbirlerin geliştirilmesi,
- İklim değişikliğiyle uyum kapsamında ulusal ve uluslararası taraflarla iş birliği yapılması, gelişmelerin takip edilmesi,
- İklim değişikliği ve erozyonla mücadelede Ar-Ge ve kurumsal kapasitenin artırılması,
- Su verimliliği seferberliği kapsamında kentsel, endüstriyel ve tarımsal su kullanımlarında verimliliği artırmak için farkındalık ve kapasite artırma çalışmalarının yapılması,
- Etkin ve verimli sulama yöntemlerinin uygulanması amacıyla eğitimler verilmesi,
- Sera gazı emisyon azaltım kapasitesinin artırılması ve yenilenebilir enerji kullanımını yaygınlaştırması,

- Tarımsal kuraklıkla mücadele kapasitesinin arttırılması,

şeklinde öne çıkmaktadır (TOB, 2024). Yine Tarım ve Orman Bakanlığı'nın **Değişen İklimle Uyum Çerçevesinde Su Verimliliği Strateji Belgesi ve Eylem Planı (2023-2033)**'nda ülkemizde tüm sektörlerde su verimliliğinin yaygınlaştırılması maksadıyla ileriye dönük hedefler ve stratejiler belirlenmiştir. Tarımsal su kullanım verimliliği de belgede ele alınan ana eksenlerden bir tanesidir. Bu amaçla, tarımsal su kullanım verimliliğini artıran uygulamaların yaygınlaştırılmasıyla sulama randımanının 2030 yılına kadar %60, 2050 yılına kadar %65 seviyesine yükseltilmesi hedeflenmekte olup, belirlenen stratejiler şu şekildedir (TOB, 2023):

- Tarımsal sulama örgütlerinin etkinliğini artıracak yasal, idari ve teknik çalışmaların tamamlanması.
- Sulama yönetimi konusunda katılımcılığın artırılması için su kullanıcı örgütlerin (sulama kooperatifleri, sulama birlikleri, vb.) kurumsal kapasitelerinin güçlendirilmesi.
- Sulamada verimliliğin artırılmasına ve su kaynaklarının etkin kullanılmasına katkı sağlayacak kontrollü ve sürdürülebilir tarımsal uygulamaların (iyi tarım, ekolojik tarım, dikey tarım, malçlama, fertigasyon, vb.) yaygınlaştırılması.
- Sulama sistemlerinde düzenli ölçüm ve izleme yapılması, otomasyonun ve yüksek teknoloji kullanımının yaygınlaştırılması.
- Ürün deseninin ve ürün desteklemelerinin sektörel tahsis planlarına uygun şekilde belirlenmesi.
- Parsel bazında sulama ölçümlerinin yapılması ve bitki su ihtiyaçlarının gerçek zamanlı olarak belirlenmesi.
- Sulama maksatlı su kullanımında hacim esaslı fiyatlandırma uygulanması.

- Tarımsal sulamada yağmur suyu hasadının yaygınlaştırılması ve sulamadan dönen suların ve arıtılmış atıksuların tarımsal sulamada yeniden kullanımının teşvik edilmesi.
- Kamu ağırlıklı tarımsal yayım ve demonstrasyon çalışmaları ile suyun etkin kullanımı konusunda çiftçi eğitimlerinin yaygınlaştırılması.
- Modern sulama sistemlerinde gerekli enerji ihtiyacının karşılanmasında güneş, rüzgâr, jeotermal vb. yenilenebilir enerji kaynaklarının yaygınlaştırılması.

Tarım ve Orman Bakanlığı'nın yayınladığı diğer bir strateji belgesi olan **Anadolu Bozkır Ekosistemleri İçin İklim Değişikliğine Ekosistem Tabanlı Uyum Stratejisi** ile biyolojik çeşitlilik açısından zengin ve iklim değişikliğine karşı hassas bölgeler arasında yer alan Türkiye'nin Anadolu bozkır ekosistemlerinin korunması ve iklim değişikliği etkilerine karşı dayanıklılığının artırılması amacıyla, 2022-2036 dönemini kapsayan Ekosistem Tabanlı Uyum (EBA) Stratejisini oluşturulmuştur. Bu strateji, bozkır ekosistemlerinin sürdürülebilir yönetimini sağlamayı ve doğal kaynakların korunmasını hedefleyen bir çerçeve sunmaktadır. İklim değişikliğinden etkilenen ve etkilenecek ekosistemlerde direnç oluşturmak, güçlü bir tarım ekonomisiyle kırsal nüfusu iklime dirençli kılmak, iklim değişikliği uyum stratejilerini desteklemek amacıyla ekosistem tabanlı uyum çalışmalarını politika, planlama ve karar mekanizmaları ile bütünleştirmek ve yönetim kapasitesine sahip paydaşlar ile yönetim modeli geliştirmek EBA stratejisinin dört temel amacı olarak tanımlanmıştır. Strateji, Türkiye'nin geniş bozkır ekosistemleri olan Konya Ovası, İç Anadolu Bölgesi, Doğu Anadolu bozkırları gibi bölgeleri kapsamaktadır (TOB, Anadolu Bozkır Ekosistemleri İçin İklim Değişikliğine Ekosistem Tabanlı Uyum Stratejisi 2022-2036, 2018).

Tarımla ilgili konularda iklim değişikliğine uyum eylemlerinin planlandığı diğer politika belgeleri arasında Yeşil Mutabakat Eylem Planı (2021) ve İklim Şurası Kararları (2022) yer almaktadır. AB'nin Yeşil Mutabakatı'na uyum sağlamak için Türkiye tarafından oluşturulan **Yeşil Mutabakat Eylem Planı**, sürdürülebilir kalkınma, yeşil ekonomi, karbon nötr hedefleri ve çevresel sürdürülebilirlik konularını kapsamakta olup, iklim değişikliğine uyum ve sera gazı emisyonlarının azaltılması konusunda önlemler içermektedir. Eylem Planı'nın Sürdürülebilir Tarım başlığı altında;

- AB'nin pestisit ve anti-mikrobiyallerin azaltılmasına ilişkin hedefleri ile uyumlu bir şekilde ülkemizde pestisit ve anti-mikrobiyallerin kullanımının azaltılmasına yönelik çalışmaların yürütülmesi,
- Pestisitlerin azaltılmasına yönelik çalışmalar çerçevesinde, biyolojik ve biyoteknik mücadele yöntemlerinin kullanımının yaygınlaştırılması,
- AB'nin kimyasal gübre kullanımının azaltılmasına yönelik hedef ve politika değişiklikleri gözetilerek çalışmalar yürütülmesi,
- Organik tarım üretiminin geliştirilmesine yönelik çalışmalar yapılması,
- Arazi toplulaştırma tescil faaliyetlerinin yürütülmesi,
- Yenilenebilir enerji kullanan seralar ve üretim tesislerinin desteklenmesi,
- Tarımsal üretimde atık ve artıkların tekrar değerlendirilmesi konusunda Ar-Ge çalışmaları yürütülmesi,
- Gıda atık ve artıklarının geri dönüşümünün sağlanmasına yönelik farkındalık yaratma ve tüketicinin bilinçlendirilmesi çalışmaları gerçekleştirilmesi,

- Avrupa Komisyonu tarafından açıklanan Tarladan Sofraya ve Biyoçeşitlilik Stratejileri hakkında bilgilendirme faaliyetleri düzenlenmesi

eylemleri belirlenmiştir. Eylem Planı'nda ayrıca iklim değişikliği ile mücadeleye yönelik de çeşitli hedef ve eylemler belirlenmiştir (TB, 2021). Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı tarafından iklim değişikliğiyle mücadelede kritik adımlardan biri olan Türkiye'nin ilk **İklim Şurası**, 21-25 Şubat 2022 tarihlerinde düzenlenmiş olup, Şura'da İklim Uyumlu Şehirler, İklim Dostu Tarım, Kuraklık Eylem Planı, Çevreci ve Temiz Ulaşım Ağı, Yeşil Enerji, Yeşil Ekonomi ve İklim Eğitimi, alanlarında Türkiye'nin yeni yol haritası belirlenmiştir. Bu kapsamda, tarım sektörünün iklim değişikliğine uyumuna ve sera gazı azaltımına yönelik öne çıkan kararlar şu şekildedir:

- Tarım sektöründe iklim değişikliği ile mücadele ve sera gazı azaltımı için kısa, orta ve uzun vadeli ulusal strateji ve eylemler belirlenerek çiftçi odaklı uygulanmalı ve izlenmelidir.
- “İklim Dostu Tarımsal Destekleme Modeli” oluşturularak uygulanmalıdır.
- Bütünleşik bir yaklaşımla ekosistem odaklı gıda üretim modeli oluşturularak tarım-gıda değer zinciri sürdürülebilir ve döngüsel hale getirilmelidir.
- Tarımda verimlilik artışı ve emisyonların etkin yönetimi amacıyla arazi bankacılığı sistemi kurulmalı, ulusal arazi kullanım planları yapılmalı ve arazi toplulaştırma çalışmaları tamamlanmalıdır.
- Farklı iklim etkilerine karşı (kuraklık, sıcak/soğuk hava dalgası, şiddetli yağış, don vb.) karşı tarım desenleri ve yöntemleri (çöl koşullarında tarım, denizde tarım gibi) geliştirilmeli, iklim kaynaklı stres koşullarına dayanıklı yeni

ve yerli bitki çeşitlerinin ve hayvan ırklarının daha kısa zamanda geliştirilebilmesi için klasik, biyoteknolojik ve moleküler genetik destekli (CRISPR gen teknolojisi gibi) ıslah çalışmaları gerçekleştirilmeli ve entegrasyonu sağlanmalıdır.

- Tarımsal üretimde kimyasal gübre kullanımını azaltabilmek için yeni nesil etkili gübre üretim teknolojileri ve nesnelerin interneti (IoT), yapay zekâ ve sensor teknolojileri temelli gübreleme sistemleri geliştirilmelidir (ÇŞİDB, 2022).

Öte yandan, Türkiye’de tarım sektörü, iklim değişikliğinin etkilerine karşı uyum sağlama konusunda çeşitli yasal mevzuatlar ve düzenlemelerle desteklenmektedir. Bu mevzuatlar, tarımın sürdürülebilirliğini sağlamak, su ve toprak kaynaklarını korumak, tarımsal üretimi iklim dostu hale getirmek ve iklim değişikliğinin olumsuz etkilerini hafifletmeye yönelik adımları kapsamaktadır. Bu kapsamda ele alınabilecek bazı yasal düzenlemeler aşağıda özetlenmektedir (MBS, 2024):

Tarım Kanunu (2006): Türkiye’nin tarım politikalarının çerçevesini belirleyen temel yasadır. Bu kanun, tarımsal üretimi sürdürülebilir kılmak, tarımsal kaynakların etkin kullanımını sağlamak ve tarımda çevresel sürdürülebilirliği teşvik etmek için çeşitli hükümler içermektedir. Ayrıca, doğal kaynakların korunması, su yönetimi ve biyoçeşitliliğin devamlılığı gibi konulara da vurgu yapmaktadır.

Çevre Kanunu (1983): Amacı bütün canlıların ortak varlığı olan çevrenin, sürdürülebilir çevre ve sürdürülebilir kalkınma ilkeleri doğrultusunda korunmasını sağlamaktır. İklim değişikliğiyle mücadele ve uyum politikaları açısından önemli bir hukuki dayanak sağlamakta, tarımsal faaliyetlerin çevreye olumsuz etkilerinin azaltılması ve sürdürülebilir tarım uygulamalarının teşvik edilmesi için temel hükümler sunmaktadır.

Toprak Koruma ve Arazi Kullanımı Kanunu (2005): Toprak kaynaklarının korunması, tarım arazilerinin sürdürülebilir kullanımı ve toprak verimliliğinin artırılmasını düzenlemektedir. İklim değişikliğiyle uyum açısından, tarım arazilerinin korunması ve toprak bozulmasının önlenmesi açısından önem taşımaktadır. Toprak Koruma Kurulları, bu kanun çerçevesinde tarımsal üretimi ve çevresel sürdürülebilirliği sağlamak için çalışmalar yürütmektedir.

Sulama Birlikleri Kanunu (2011): Tarımda suyun sürdürülebilir kullanımı, iklim değişikliğine uyum için kritik bir unsur olup, Sulama Birlikleri Kanunu, tarımsal sulamanın etkin yönetimini ve su kaynaklarının korunmasını hedeflemektedir. Bu yasa, suyun etkin ve verimli kullanımını teşvik ederek, su kıtlığına karşı dayanıklılığı arttırmakta ve tarımsal sulamanın iklim değişikliği etkilerine uyum sağlamasını desteklemektedir.

Tarım Arazilerinin Korunması, Kullanılması ve Planlanmasına Dair Yönetmelik (2017): Yönetmelik, Toprak Koruma ve Arazi Kullanımı Kanununda öngörülen toprak ve arazi varlığının belirlenmesi, tarım arazilerinin sınıflandırılması, geliştirilmesi, zorunlu hallerde amaç dışı kullanımına izin verilmesi, toprağın ve tarımsal üretim gücü yüksek büyük ovaların belirlenerek korunması, toprak koruma plan ve projelerinin hazırlanması ve uygulanması, erozyona duyarlı alanların belirlenmesi, toprak koruma kurulunun teşekkülü, görevleri, çalışmaları ile çevre öncelikli sürdürülebilir kalkınma ilkesine uygun olarak arazilerin planlı kullanımını sağlayacak usul ve esasları belirlemeyi amaçlamaktadır.

İklim Değişikliğine Uyum Önlemleri

Tarımsal üretimde iklim değişikliğine uyum önlemleri, su yönetiminden dijital teknolojilere, altyapı dayanıklılığından sosyoekonomik mekanizmalara kadar geniş bir uygulama

yelpazesini kapsamaktadır. Türkiye'nin farklı bölgelerinde çeşitli iklim risklerine karşı üretim sistemlerinin esnekliğini artırmaya yönelik uygulama örnekleri değerlendirildiğinde aşağıda sıralanan başlıkların öne çıktığı görülmektedir.

1. Su Yönetimi ve Sulama Uygulamaları

Modern sulama yöntemleri ve tarla içi su yönetimi teknikleri, Türkiye gibi kuraklık riski taşıyan bölgelerde iklim değişikliğine uyum kapasitesini arttırmak için kritik öneme sahiptir. Ülkemiz özelinde 2021 itibariyle tarımsal arazilerde sulama, %61 oranında salma, %22 oranında yağmurlama ve %17 oranında damla sulama teknikleri ile gerçekleştirilmektedir (SUEN, 2022). Damla sulama ve basınçlı sulama sistemleri, suyun bitki kök bölgesine doğrudan ve verimli ulaştırılmasını sağlayarak su tüketimini azaltmakta ve verim kayıplarını önlemektedir. Benzer biçimde su kullanımını optimize etmeye yönelik toprak nem sensörleri ve iklim verisi entegrasyonunu sağlayan, sulama kontrolünün otomatik yapılmasına imkan veren akıllı sulama sistemleri sektörde su verimliliğini artırma potansiyelin sahiptir. Bu teknolojilerin uygulanmasının önünde bulunan kurumsal, teknolojik ve sosyo-ekonomik engellerin, çiftçiler ile sulama birliklerinin farklı sulama tekniklerine yönelik bilimsel temelli kapasite geliştirmeleriyle aşılabileceği değerlendirilmektedir (Levidow, L. ve diğ., 2014; Dharma, V. ve diğ., 2025). Ayrıca, kuraklık baskısının arttığı bölgelerde yağmur suyunun toplanması ve depolanmasına yönelik altyapı çözümleri, su kaynaklarını destekleyen kritik bir uyum uygulaması olarak giderek daha fazla önem kazanmaktadır.

2. İklim Dayanıklı Üretim Sistemleri

İklim dayanıklı üretim sistemleri, ürün çeşitliliğinin artırılması, kuraklığa ve ekstrem hava olaylarına daha dirençli türlerin seçilmesi, toprak sağlığının iyileştirilmesi ve sürdürülebilir tarım uygulamalarının benimsenmesi gibi önlemleri içerir. Bu

kapsamda ürün rotasyonu, karma ekim sistemleri, örtü bitkileri ve organik madde bakımının iyileştirilmesi gibi pratikler, kuraklık ve sıcaklık stresine karşı üretim sistemlerinin adaptasyonunu artırmaktadır. Ayrıca dünya genelinde yapılan çalışmalar, iklime dayanıklı tarım uygulamalarının üretim verimliliğini ve sistem dayanıklılığını yükseltirken aynı zamanda çevresel sürdürülebilirlik sunduğunu ortaya koymaktadır. Örneğin ürün çeşitlendirme, hem ekolojik dengeyi korur hem de çiftçiyi tek bir ürünün iklim riskine bağımlılığından uzaklaştırır (Grigorieva ve diğ., 2023)

3. Hayvancılıkta Uyum

Hayvancılık; iklim değişikliği ile beraber artan sıcaklıklar, değişen yağış düzenleri ve hayvan sağlığı ile verimliliğini tehdit eden hastalıkların yayılması yoluyla önemli derecede etkilenmektedir. Küresel gıda sisteminin önemli bir bileşeni olan hayvancılık üretimi, özellikle gelişmekte olan ülkelerde hayati bir öneme sahiptir; bu nedenle etkili uyum stratejilerinin geliştirilmesi zorunludur.

Isıya, kuraklığa ve hastalıklara dayanıklı hayvan ırklarının yetiştirilmesi, kaynakları daha verimli kullanan ve hastalıklara dirençli genotiplerin seçilmesi, iklim değişikliğinin hayvan sağlığı ve verimliliği üzerindeki olumsuz etkilerini azaltmada önemli bir rol oynamaktadır. Bunun yanı sıra, besleme, barınak ve sağlık yönetimi uygulamalarının çevresel stres koşullarına uyarlanması; uygun yem depolama, serin saatlerde besleme, gölgelendirme ve soğutma sistemlerinin kullanımı ile hastalık izleme ve önleyici veterinerlik hizmetlerinin güçlendirilmesi gerekmektedir. Hassas hayvancılık teknolojileri sayesinde ısı stresi ve hastalıklar erken aşamada tespit edilebilmekte, su ve yem kaynakları daha etkin yönetilebilmektedir. Ayrıca, su tasarrufu uygulamaları, alternatif yem kaynaklarının kullanımı ve kuraklığa dayanıklı yem bitkilerinin geliştirilmesi kaynak kısıtlarına karşı dayanıklılığı artırmaktadır. Tüm bu uyum stratejilerinin etkin biçimde uygulanabilmesi için iklime dayanıklı

yetiştiriciliği destekleyen politikalar, finansal teşvikler ve çiftçilere yönelik eğitim ve yayım hizmetleri hayati önem taşıtmaktadır.

Gelecekte, iklim bilimi, veterinerlik, tarım ekonomisi ve politika yapımını bir araya getiren disiplinler arası araştırmaların artırılması, iklim değişikliğinin çok katmanlı yapısına yönelik kapsamlı çözümlerin geliştirilmesini teşvik edecektir. Sonuç olarak bu süreç, hayvancılık sistemlerinde yalnızca teknolojik ve yönetsel yenilikleri değil, aynı zamanda özellikle kırılgan bölgelerdeki çiftçilerin iklim değişikliğiyle başa çıkabilmelerini güçlendirecek politika ve eğitim yaklaşımlarını da dönüştürmeyi hedeflemelidir (Balakrishnan, 2024).

4. Teknoloji ve Dijital Çözümler

Akıllı tarım teknolojileri açısından uzaktan algılama ve drone tabanlı sistemler ile su stresi, hastalık takibi ve verim kaybının izlenmesi oluşturulan erken uyarı sistemleri ile iklim değişikliğinin tarımsal üretim üzerindeki etkilerinin yönetilmesinde önemli bir dönüşüm yaratılmaktadır.

Türkiye’de Tarım 4.0 teknolojilerinin uygulanabilirliğini inceleyen bir çalışmada, akıllı tarım çözümlerinin yaygınlaşmasını destekleyen güçlü yönler olarak teknoloji sağlayıcılarının mevcut kapasitesi ve artan çiftçi farkındalığı gösterilmiş, bilgi teknolojileri okuryazarlığı eksikliği, yüksek üretici yaş ortalaması ve altyapı yetersizlikleri gibi konular ise zayıf yönleri olarak ortaya konulmuştur. Akıllı tarım teknolojilerinin etkin şekilde benimsenebilmesi için modern uygulamalara yönelik önyargıların kooperatifleşme ve ortak ekipman kullanımıyla aşılması, ayrıca bu teknolojileri kullanabilecek nitelikli ve eğitimli insan kaynağının geliştirilmesi gerekliliği vurgulanmıştır (Ercan, ř., Öztep, R., Güler, D., Saner, G., 2019).

5. Altyapı ve Tedarik Zinciri Dayanıklılığı

İklim değışikliğı, tarımsal üretim zincirlerini olumsuz etkileyerek ürün verimini, gıda güvenliğini ve küresel ticareti tehdit etmektedir. Artan sıcaklıklar ve aşırı hava olayları tarımsal faaliyetleri aksatırken, bu durum tarımdan geçinen milyonlarca insan için risk oluşturmaktadır. Bu nedenle tarımsal tedarik zincirlerinde iklim değışikliğine uyum, sürdürülebilirlik ve dayanıklılık açısından büyük önem taşımaktadır. Uyum süreci; teknolojik yenilikler, politika desteğı ve sürdürülebilir tarım uygulamalarını kapsamakta, kuraklığa dayanıklı ürünler, hassas tarım teknikleri ve güçlü soğuk zincir altyapısı gibi uygulamalar sistemin iklim değışikliğine karşı direncini artırmaktadır (Sahar ve diğ., 2025).

6. Sosyoekonomik ve Kurumsal Uyum

İklim değışikliğine uyum sürecinde tarım sektörünün karşılaştığı riskler yalnızca biyofiziksel değil, aynı zamanda sosyoekonomik ve kurumsal nitelik taşımaktadır. Bu bağlamda uyum kapasitesi, üreticilerin teknik bilgiye erişimi, gelir düzeyi, örgütlenme yapıları, kamu politikalarının tutarlılığı ve kurumsal koordinasyon düzeyi ile doğrudan ilişkilidir. Literatürde, çiftçilerin iklim değışikliğine uyum davranışlarının; eğitim seviyesi, finansmana erişim, arazi büyüklüğü ve sosyal sermaye gibi faktörlerden güçlü biçimde etkilendiğı ortaya konulmaktadır (Adger ve diğ.; 2005; Bryan ve diğ., 2009).

Kurumsal uyum açısından, tarımsal destekleme politikalarının iklim risklerini dikkate alacak şekilde yeniden yapılandırılması ve uyum odaklı uygulamaların teşvik edilmesi önem arz etmektedir. Özellikle tarım sigortaları, erken uyarı sistemleri ve iklime duyarlı destekleme araçları, üreticilerin kırılganlığını azaltan temel politika araçları arasında yer almaktadır. Bunun yanı sıra, kooperatifler ve üretici birlikleri gibi örgütlü

yapılar, bilgi paylaşımı ve ortak kaynak kullanımını kolaylaştırarak uyum kapasitesini artırmaktadır.

Türkiye özelinde iklim değişikliğine uyumun tarım politikalarına entegrasyonu, ulusal strateji belgelerinde hedef olarak belirlenmiştir. Öte yandan, uygulama düzeyinde kurumsal kapasitenin güçlendirilmesi ve yerel düzeyde katılımcı yönetim mekanizmalarının geliştirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır.

Çalışma Alanında Tarım Sektörü İçin Belirlenen Uyum Önlemleri

Önceki bölümlerde sunulan büyüme dereceli gün projeksiyonları, su bütçesi analizleri ve CBS tabanlı mekânsal değerlendirmeler, iklim değişikliğinin çalışma alanı üzerindeki etkilerinin tek boyutlu olmadığını; zamansal, mekânsal ve sektörel etkileşimler yoluyla şekillendiğini ortaya koymuştur. Özellikle havza ölçeğinde yapılan su potansiyeli hesaplamaları, artan potansiyel evapotranspirasyon, azalan yağışlar ve buna bağlı olarak yüzeysel ve yüzey altı akışlardaki belirgin düşüşlerin, gelecekte tarımsal üretim açısından ciddi kısıtlar yaratacağını göstermektedir. Küçük Menderes, Eğirdir-Karacaören ve Beyşehir Gölü havzalarına ilişkin sonuçlar, suya dayalı üretim sistemlerinin iklim değişikliği karşısında giderek daha kırılgan hâle geldiğine işaret etmektedir.

Benzer biçimde, CBS ve uzaktan algılama tabanlı analizler, havzalar içerisinde risklerin homojen dağılmadığını; ürün desenleri, sulama uygulamaları, yeraltı suyu kullanımı ve arazi kullanım değişimleriyle ilişkili olarak mekânsal farklılıklar gösterdiğini ortaya koymuştur. NDVI zaman serileri ve arazi kullanım/örtüsü değişimi analizleri, özellikle sulamaya bağımlı alanlarda üretim baskısının arttığını ve mevcut kaynak kullanım biçimlerinin sürdürülebilirliğinin sorgulanması gerektiğini göstermektedir. Bu teknik bulgular, uyum önlemlerinin genel ve tek tip yaklaşımlar

yerine, havza ve alt havza ölçeğinde, yerel koşulları dikkate alan bir çerçevede ele alınması gerektiğini açık biçimde ortaya koymaktadır.

Bu çerçevede, çalışmada elde edilen teknik çıktılar temel alınarak, ilgili paydaşlarla gerçekleştirilen istişareler sonucunda çalışma alanına özgü iklim değişikliğine uyum önlemleri taslak olarak belirlenmiştir. Söz konusu uyum önlemleri, Küçük Menderes, Eğirdir-Karacaören ve Beyşehir Gölleri havzalarında tarımsal üretimin sürdürülebilirliğini desteklemeyi, su kaynakları üzerindeki baskıyı azaltmayı ve iklim kaynaklı risklere karşı üretim sistemlerinin dayanıklılığını artırmayı hedeflemektedir. Belirlenen önlemler, aşağıda ana uyum önlemi ve alt eylemleri içerecek şekilde sınıflandırılarak sunulmaktadır.

1. Entegre su yönetimi ve su verimliliği

- Damla ve kapalı sulama sistemlerinin toprak yapısı ve bitki gereksinimlerine uygun şekilde yaygınlaştırılması
- Sulama sistemlerinin gübreleme üniteleri ile entegre edilerek su ve besin maddesi verimliliğinin artırılması
- Sulama sezonlarının iklim verileri ve bitki gelişim dönemleri dikkate alınarak planlanması
- Havzaların yeraltı ve yüzey su kaynaklarının izlenmesine yönelik veri toplama ve izleme altyapısının güçlendirilmesi
- Yeraltı ve yüzey su kaynaklarının dengeli kullanımını sağlayacak politika ve uygulamaların geliştirilmesi
- Derin kuyu açılmasının sınırlandırılması, ruhsatlı ve kontrollü su kullanımının yaygınlaştırılması
- Kaçak ve vahşi sulama uygulamalarıyla mücadelenin artırılması

- Gri su ve yağmur suyunun tarım ve hayvancılıkta kullanımının teşvik edilmesi
- Kuraklık dönemlerine yönelik alternatif su kaynaklarının kullanımı ve kriz yönetim planlarının uygulanması

2. Su kalitesinin korunması ve kirliliğin azaltılması

- Tarımsal kaynaklı kirliliğin su kaynakları üzerindeki etkisini azaltmaya yönelik sürdürülebilir tarım uygulamalarının yaygınlaştırılması
- Atıksu altyapısının geliştirilmesi, mevcut arıtma tesislerinin modernizasyonu
- Su kalitesi izleme ve kontrol mekanizmalarının güçlendirilmesi
- Biyogaz tesislerinin sıvı atık yönetim süreçlerinin etkin şekilde denetlenmesi
- Hayvancılık atıklarının kontrollü depolanması ve yönetilmesi
- Su kaynakları etrafında koruma zonlarının oluşturulması
- Pestisit kalıntısı tespit edilen yeraltı sularının kullanımının izlenmesi
- Zirai ilaçların kontrollü hazırlanması ve bölgesel ilaçlama planlamasının yapılması

3. Kuraklık risk yönetimi ve erken uyarı sistemleri

- Kuraklık ve su kıtlığına karşı erken uyarı sistemlerinin kurulması ve yaygınlaştırılması
- Alt havza ölçeğinde izleme istasyonlarının artırılması ve mevcut sistemlere kuraklık risk bildirimlerinin entegre edilmesi

- Kuraklık dönemlerinde yağmur suyu ve arıtılmış su gibi alternatif kaynakların kullanımı
- Havza odaklı kuraklık eylem planlarının hazırlanması
- Kuraklık yönetimi konusunda yerel yönetimler, üreticiler ve sivil toplum kuruluşları arasındaki işbirliğinin artırılması
- Tarımsal kuraklık riskine yönelik bilimsel çalışmaların yaygınlaştırılması

4. Ürün deseni ve bitkisel üretimde uyum

- Bölgesel iklim ve toprak koşullarına uygun, kuraklığa ve sıcağa dayanıklı çeşitlerin geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması
- Kuru tarıma uygun tıbbi ve aromatik bitkilerin desteklenmesi, pilot uygulamaların artırılması
- Yeni ürün denemelerine yönelik mali ve teknik destek mekanizmalarının oluşturulması
- Sebze üretiminin kontrollü (sera) ortamlara yönlendirilmesi
- Piyasa taleplerine uyumlu, sürdürülebilir ürün çeşitliliğinin teşvik edilmesi
- Ekim ve hasat tarihlerinin iklim koşullarına göre yeniden planlanması
- Havza su bütçesine göre bitkisel üretim deseninin planlanması

5. Toprak sağlığının korunması ve iyileştirilmesi

- Toprak organik maddesini artırmaya yönelik uygulamaların (kompost, yeşil gübre vb.) yaygınlaştırılması
- Hayvan gübresinin olgunlaştırılarak kullanılması ve toprak altına enjeksiyon yöntemlerinin benimsenmesi

- Erozyonla mücadele kapsamında teraslama ve örtü bitkileri uygulamalarının artırılması
- Azaltılmış toprak işleme ve toprak nemini koruyucu uygulamaların yaygınlaştırılması
- Kimyasal gübre ve pestisit kullanımını azaltmaya yönelik entegre mücadele yöntemlerinin benimsenmesi
- Çoraklaşmaya karşı toprak ıslah çalışmalarının yürütülmesi
- Toprak analizlerine dayalı doğru gübreleme planlarının yapılması

6. Tarımda dijital ve bilimsel teknolojilerin kullanımı

- Meteorolojik ve toprak nemi verilerinin sensör ve uydu teknolojileri ile izlenmesi
- Ürün hastalık ve zararlılarına yönelik erken uyarı sistemlerinin yaygınlaştırılması
- Dona karşı erken uyarı ve mücadele sistemlerinin geliştirilmesi
- Yenilikçi tarımsal uygulamaların saha denemeleri ile üreticilere tanıtılması
- Dijital teknolojilerin kullanımını destekleyici eğitim ve danışmanlık hizmetlerinin artırılması

7. Hayvancılıkta uyum, yem yönetimi ve hayvan refahı

- Kuraklığa dayanıklı yem bitkisi çeşitlerinin geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması
- Mera ıslahı ve sürdürülebilir kaba yem üretiminin artırılması
- Hayvan barınaklarının sıcak hava dalgalarına karşı iyileştirilmesi

- İklim koşullarına uygun hayvan ırklarının seçimi ve geliştirilmesi
- Hayvan sağlığına yönelik düzenli veteriner hizmetlerinin güçlendirilmesi
- Hayvancılıkta atık yönetimi ve çevresel etkilerin azaltılması

8. Sosyoekonomik, kurumsal ve finansal dayanıklılığın güçlendirilmesi

- Gençlerin tarımda kalmasını destekleyici teşvik ve sosyal programların geliştirilmesi
- Kooperatif ve üretici birliklerinin güçlendirilmesi
- Tarımsal sigorta ve risk yönetimi mekanizmalarının yaygınlaştırılması
- Çiftçilerin finansal yönetim ve muhasebe kapasitelerinin artırılması
- Devlet destek ve proje başvuru süreçlerinin sadeleştirilmesi
- Yerel yönetimler, kalkınma ajansları ve üretici örgütleri arasındaki koordinasyonun artırılması

9. Eğitim, bilinçlendirme ve yayım faaliyetleri

- Çiftçilere yönelik iklim değişikliği ve uyum eğitimlerinin yaygınlaştırılması
- Gençlere ve çocuklara yönelik tarım, su ve ekoloji temalı eğitim programlarının geliştirilmesi
- Uygulamalı tarımsal eğitim faaliyetlerinin artırılması
- Yerel ve sosyal medya araçları kullanılarak farkındalık çalışmalarının güçlendirilmesi

Elde edilen bulgular, uyumun yalnızca tekil teknik çözümlerle değil; su, toprak, üretim sistemleri ve kurumsal yapıları birlikte ele alan bütüncül yaklaşımlarla mümkün olabileceğini göstermektedir. Bu doğrultuda, tarım sektöründe iklim değişikliğine uyum politikalarının bilimsel veriye dayalı, mekânsal farklılıkları gözeten ve uzun vadeli planlamayı esas alan bir çerçevede ele alınması önem taşımaktadır.

Kaynaklar

Adger, W. N., Arnell, N. W., & Tompkins, E. L. (2005). Successful adaptation to climate change across scales. *Global environmental change*, 15(2), 77-86.

Balakrishnan P. (2024). Climate Change And Its Impact On Livestock Production Systems: Adaptation Strategies And Future Direction. *Revista Electronica De Veterinaria*, 25(1), 3649-3658. <https://doi.org/10.69980/redvet.v25i1.1679>

Bryan, E., Deressa, T. T., Gbetibouo, G. A., & Ringler, C. (2009). Adaptation to climate change in Ethiopia and South Africa: options and constraints. *Environmental science & policy*, 12(4), 413-426.

ÇŞİDB. (2022). İklim Şurası Komisyon Tavsiye Kararları. *T.C. Çevre, Şehircilik ve iklim Dğişikliği Bakanlığı*.

Ercan, Ş., Öztep, R., Güler, D., Saner, G. (2019). Tarım 4.0 ve Türkiye'de Uygulanabilirliğin Değerlendirilmesi. *Tarım Ekonomisi Dergisi*.

Grigorieva, E.; Livenets, A.; Stelmakh, E. Adaptation of Agriculture to Climate Change: A Scoping Review. *Climate* 2023, 11, 202. <https://doi.org/10.3390/cli11100202>

IDB. (2024). İklim Değişikliğine Uyum Stratejisi ve Eylem Planı (2024-2030). Ankara: *T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, iklim Değişikliği Başkanlığı*.

Sahar R., Munawaroh M. & Iqbal J. Climate change adaptation in agriculture food supply chains: a bibliometric and content analysis. *Discov Sustain* (2025). <https://doi.org/10.1007/s43621-025-02105-9>

SBB. (2023). On İkinci Kalkınma Planı (2024-2028). Ankara: *T.C. Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı*.

SUEN. (2022). Improving agricultural water use efficiency and and productivity in the Middle East: Pressures, status, impacts and responses. İstanbul, Türkiye: *Turkish Water Institute*.

TB. (2021). Yeşil Mutabakat Eylem planı 2021. Ankara: T.C. Ticaret Bakanlığı.

TOB. (2018). Anadolu Bozkır Ekosistemleri İçin İklim Değişikliğine Ekosistem Tabanlı Uyum Stratejisi 2022-2036. Ankara: *T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı*.

TOB. (2023). Değişen İklim Uyum Çerçevesinde Su Verimliliği Strateji Belgesi ve Eylem Planı (2023-2033). Ankara: *T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı*.

TOB. (2024). 2024-2028 Stratejik Plan. Ankara: *T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı*.

TRGM. (2023). İklim Değişikliği ve Tarım. Ankara: T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı, *Tarım Reformu Genel Müdürlüğü*.



İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ VE TARIMSAL ÜRETİM

