



Kuraklıkla Mücadele Politikası

Ertuğrul ESIMERAY - Fatih SAKA - Ayhan KOCAMAN

Songül KASKUN ERGANİ - Saim YILDIRIMER

Mehmet Selami GÜLER - Shams Ayad İBRAHİM

KARABÜK
ÜNİVERSİTESİ

KAPGEM Serisi - 12



KURAKLIKLILA MÜCADELE POLİTİKASI

Yazarlar

Doç. Dr. Ertuğrul ESMERAY ♦ Dr. Öğr. Üyesi Fatih SAKA ♦ Doç. Dr. Ayhan
KOCAMAN ♦ Doç. Dr. Songül KASKUN ERGANİ ♦ Dr. Öğr. Üyesi Saim
YILDIRIMER ♦ Mehmet Selami GÜLER ♦ Shams Ayad İBRAHİM

Editör

Prof. Dr. Fatih KIRIŞIK

Grafik Tasarımı

Deniz TANIR

İrtibat

Karabük Üniversitesi

<https://www.karabuk.edu.tr/tr>—<https://www.karabuk.edu.tr/en>

Karabük Üniversitesi Merkez Kampüs

4440478

Bu eserin; yayın, satış ve kopyalama hakları Karabük
Üniversitesi'ne aittir.

Karabük Üniversitesi Yayınları

YAZARLAR

Doç. Dr. Ertuğrul ESMERAY	ORCID: 0000-0003-0460-447X
Dr. Öğr. Üyesi Fatih SAKA	ORCID: 0000-0003-0956-8658
Doç. Dr. Ayhan KOCAMAN	ORCID: 0000-0002-1597-7936
Doç. Dr. Songül KASKUN ERGANİ	ORCID: 0000-0002-2760-2218
Dr. Öğr. Üyesi Saim YILDIRIMER	ORCID: 0000-0003-3240-0968
Mehmet Selami GÜLER	ORCID: 0000-0002-4158-4052
Shams Ayad İBRAHİM	

EDİTÖR

Prof. Dr. Fatih KIRIŞIK	ORCID: 0000-0002-9663-7502
-------------------------	----------------------------

Kütüphane Kartı

Kuraklıkla Mücadele Politikası

ESMERAY, Ertuğrul – SAKA, Fatih – KOCAMAN, Ayhan – KASKUN
ERGANİ, Songül – YILDIRIMER, Saim – GÜLER, Mehmet Selami –
İBRAHİM, Shams Ayad

119 sayfa, Kaynakça var, Dizin yok.

Her hakkı saklıdır.

Yayıncının izni olmadan hiçbir yolla çoğaltılamaz.

Kaynak gösterilmek şartıyla iktibas edilebilir.

Eserde yayınlanan yazıların her türlü sorumluluğu yazarlara aittir.

KARABÜK ÜNİVERSİTESİ YAYINLARI – 170

E-ISBN: 978-625-90278-8-3

TEMMUZ 2026

İÇİNDEKİLER

ÖN SÖZ	xii
BÖLÜM 1.....	14
SU KAYIP VE KAÇAKLARI İLE MÜCADELE	14
1. GİRİŞ.....	14
2. SU KAYIP-KAÇAKLARI VE DÜNYA.....	14
3. SU KAYIP-KAÇAKLARI VE TÜRKİYE.....	14
4. SU KAYIP-KAÇAKLARININ NEDENLERİ	14
4.1. Fiziksel Nedenler	14
4.2. Yönetimsel ve Operasyonel Nedenler	15
4.3. Diğer Nedenler.....	16
5. GENEL DEĞERLENDİRME.....	16
6. TÜRKİYE İÇİN GELİŞTİRİLMİŞ POLİTİKA ÖNERİLERİ	16
6.1. Fiziksel Altyapı İyileştirmeleri.....	16
6.2. Teknolojik İzleme ve Veri Tabanlı Yönetim.....	18
6.3. Kurumsal ve Operasyonel Önlemler.....	18
6.4. Bireysel Önlemler	19
6.5. Su Tasarruflu Tuvalet ve Rezervuar Sistemleri	20
6.6. Su Tasarrufu Programları ve Etiketleme.....	20
BÖLÜM 2.....	21
KURAKLIKLILA MÜCADELEDE SU KULLANIM HARİTALARI VE	
ÖNEMİ	21
1. GİRİŞ	21
2. SU KULLANIM HARİTALARININ BİLİMSEL TEMELİ.....	21

2.1. Uzaktan Algılama ve CBS Tabanlı Modeller.....	21
2.2. Akıllı Sayaçlar ve IoT Tabanlı Sistemler.....	21
2.3. Abone Tüketim Profil Analizi.....	21
3. SU KULLANIM HARİTALARININ SU TASARRUFU İLE İLİŞKİSİ ...	22
3.1. Doğru Hedefleme	22
3.2. Kaçak-Kayıp Yönetimi.....	22
3.3. Tarımsal Verimlilik.....	22
4. DÜNYA ÜLKELERİNDEN UYGULAMA ÖRNEKLERİ	22
5. TÜRKİYE’DE SU KULLANIM HARİTALARININ DURUMU.....	22
5.1. Tarımsal Su Kullanımı	22
5.2. Kentsel Su Yönetimi.....	23
5.3. Sanayi.....	23
6. POLİTİKA VE ÇÖZÜM ÖNERİLERİ	23
6.1. Ulusal Su Kullanım Harita Portalı	23
6.2. Su Verimliliği Rotası (SVR).....	23
6.3. Tarımda Hassas Sulama Haritaları	24
6.4. Kaçak-Kayıp Bölgesel Müdahale Planı	24
7. DEĞERLENDİRME	24
BÖLÜM 3.....	26
ARITILMIŞ SUYUN YENİDEN KULLANIMI: GRİ SU.....	26
1. GİRİŞ	26
2. GRİ SU.....	26
3. GRİ SU ARITIM YÖNTEMLERİ.....	27
4. GRİ SUYUN KULLANIM ALANLARI.....	27
5. POLİTİKA VE ÇÖZÜM ÖNERİLERİMİZ.....	28

5.1. Gri Su Standardizasyonu ve "Beyaz Sertifika" Sisteminin Geliştirilmesi.	28
5.2. Dijital İzleme ve Bakım Kolaylığı Sağlayan Sistem Tasarımı Sağlanmalı	29
5.3. Mevcut ve Yeni Yapı Stokları İçin " Gri Su Toplama/Dağıtım Merkezleri" Modeli Oluşturulmalı	29
5.4. Teknoloji Seçim Rehberi ve Yerli Üretim Desteği Sağlanmalı.....	29
5.5. Entegre Su Yönetimi: Gri Su ve Yağmur Suyu Sistemlerinin Birlikte Değerlendirilmesi:.....	29
6. DEĞERLENDİRME	30
BÖLÜM 4.....	31
YAĞMUR SUYU HASATI (YSH).....	31
1. GİRİŞ	31
2. (YSH) DÜNYADAKİ DURUM.....	32
3. TÜRKİYE'DE YAĞMUR SUYU HASADI.....	37
3.1. Metodoloji	37
4. SONUÇ VE POLİTİKA ÖNERİLERİ	39
4.1. Su Kıtlığının Giderilmesi.....	39
4.2. Sürdürülebilir Su Yönetimini Teşvik Etmek.....	40
4.2.1. Politika Önerileri	40
4.3. İklim Değişikliğine Uyumun Geliştirilmesi.....	40
4.3.1. Politika Önerileri:	41
4.4. Verimli Su Kullanımını Teşvik Etmek	41
4.4.1. Politika Önerileri	41
4.5. Ekonomik Sürdürülebilirliği Desteklemek.....	41
4.5.1. Politika Önerileri	42
4.6. Halk Sağlığı ve Güvenliğini İyileştirme.....	42

4.6.1. Politika Önerileri	42
4.7. Topluluk Dayanıklılığını ve Katılımını Artırmak.....	42
4.7.1. Politika Önerileri	42
BÖLÜM 5.....	44
YERALTI SUYU KULLANIMI KONTROLÜ	44
1. GİRİŞ	44
2. YERALTI SUYUNUN TÜKETİMİ.....	44
3.YERALTI SUYUNUN SÜRDÜRÜLEBİLİR KULLANIMINDA TEHDİTLER.....	45
3.1.Tarımsal Tehditler Tuzlanma	45
3.2. Kentsel ve Endüstriyel Tehditler	45
4. YERALTISUYUNUN AŞIRI VE BİLİNÇSİZ KULLANIMININ KURAKLIĞA ETKİSİ	45
4.1. Hidrolojik Döngünün Bozulması	46
4.2. Akifer Beslenme Oranını ve Seviyenin Düşmesi.....	46
4.3. Sulak Alanların Kuruması Tarımsal İklim Değişikliği ve Kuraklık.....	46
4.4. Su Tablasının Düşmesi, Obruk oluşumu ve Arazi Çökmesi.....	47
4.5. Deniz Suyu Girişimi (Kıyı Akiferlerinde Tuzlanma).....	47
4.6. Ekosistem Kaybı ve Biyoçeşitliliğin Azalması.....	47
5. YERALTI SUYUNUN SÜRDÜRÜLEBİLİRLİLİĞİ VE POLİTİKA ÖNERİLERİ.....	48
5.1.Havza Bazlı Yeraltısuyu Yönetimi.....	48
5.2 Çekim Kotaları ve Ruhsatlandırma	48
5.3. Otomatik İzleme Sistemleri, Uzaktan Algılama ve Sayaç Zorunluluğu ...	48
5.4. Tarımsal Sulamada Verimlilik ve Ürün Deseni Planlaması	49
5.5. Geri Kazanılmış Suyun Kullanımı ve Entegre Su Yönetimi.....	49

5.6. Hukuki ve Kurumsal Reformlar	49
5.7. Yeraltı Barajları ve Yapay Beslenim Uygulamaları.....	49
6. DEĞERLENDİRME	50
BÖLÜM 6.....	52
KURAKLIKLILA MÜCADELEDE (XERISCAPE) KURAKÇIL PEYZAJ	
UYGULAMALARI.....	52
2. DÜNYA GENELİNDE DURUM.....	52
3. TÜRKİYE’DE DURUM	53
4. KURAKÇIL PEYZAJ UYGULAMALARININ FAYDALARI	53
5. POLİTİKA VE ÇÖZÜM ÖNERİLERİ	54
5.1. TASARIM VE UYGULAMA.....	54
5.2. POLİTİKA, TEŞVİK VE DÜZENLEMELER.....	54
5.3. EĞİTİM VE TOPLUM KATILIMI.....	54
6. ÇÖZÜMLER İÇİN YOL HARİTASI.....	55
7. DEĞERLENDİRME	56
BÖLÜM 7.....	57
SANAYİDE ZLD (SIFIR SIVI DEŞARJI) UYGULAMALARI	57
1.GİRİŞ	57
2. DÜNYADAKİ DURUM, ÖRNEK UYGULAMALAR.....	57
3. TEMEL ZLD TEKNOLOJİLERİ.....	57
4. EKONOMİK VE TEKNİK DEĞERLENDİRME.....	58
5. TÜRKİYE’DE MEVZUAT VE GENEL YAKLAŞIM.....	59
6. TÜRKİYE İÇİN GELİŞTİRİLMİŞ POLİTİKA ÖNERİLERİ	59
BÖLÜM 8.....	60
YÜZEYSEL SULARDA BUHARLAŞMANIN ÖNLENMESİ.....	60

1. GİRİŞ	60
2. YÜZEYSEL SULARDA BUHARLAŞMA MİKTARININ BELİRLENMESİ.....	61
3. YÜZEYSEL SULARDA BUHARLAŞMA AZALTMA ÇALIŞMALARI..	62
4. POLİTİKA VE ÇÖZÜM ÖNERİLERİ	64
BÖLÜM 9.....	66
KURAKLIKLA MÜCADELEDE KURAKLIK İNDEKSLERİ KULLANIMI	66
1. GİRİŞ	66
2. KURAKLIK İNDEKSLERİNİN ÖNEMİ.....	66
3. TÜRKİYEDE KURAKLIK İNDEKSLERİ KULLANIMI.....	66
4. POLİTİKA VE ÇÖZÜM ÖNERİLERİ	67
4.1. Erken Uyarı Sistemlerinin Geliştirilmesi.....	67
4.2. Kuraklık Risk Haritalama ve Planlama.....	67
4.3. Tarımsal Su Yönetimi ve Politikalar.....	68
4.4. İklim Değişikliği ve Uzun Vadeli Stratejiler.....	68
5. DEĞERLENDİRME	68
BÖLÜM 10.....	69
KOMPOST KULLANIMI VE SU TUTMA KAPASİTESİ.....	69
1. GİRİŞ	69
2. KOMPOSTUN TOPRAK SU TUTMA KAPASİTESİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİ	69
3. TOPRAK YAPISI VE İNFİLTASYON SÜREÇLERİ	69
4. BİTKİ FİZYOLOJİSİ VE KURAKLIK TOLERANSI.....	70
5. MİKROBİYAL AKTİVİTE VE BİYOLOJİK DİRENÇ	71
6. KARBON SEKESTRASYONU VE UZUN VADELİ ETKİLER.....	71

7. GENEL DEĞERLENDİRME VE SONUÇ.....	72
8. TÜRKİYE İÇİN POLİTİKA ÖNERİLERİ.....	72
BÖLÜM 11.....	74
BULUT TOHUMLAMA VE KURAKLIK İLİŞKİSİ.....	74
1. GİRİŞ	74
2. BULUT TOHUMLAMANIN MİKROFİZİKSEL MEKANİZMASI.....	74
3. KURAKLIK KOŞULLARINDA ETKİNLİK VE SINIRLAMALAR	76
4. HİDROLOJİK ETKİLER VE SU KAYNAKLARINA KATKI	76
5. İKLİM SİSTEMLERİ İLE İLİŞKİSİ.....	76
6. EKONOMİK VE OPERASYONEL DEĞERLENDİRME	76
7. KURAKLIK YÖNETİMİNDEKİ YERİ.....	77
8. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME.....	77
9. POLİTİKA ÖNERİLERİ.....	77
BÖLÜM 12.....	79
ERKEN UYARI SİSTEMLERİ VE KURAKLIK İLİŞKİSİ.....	79
1. GİRİŞ	79
2. UYDU TABANLI TEKNOLOJİ.....	79
3. TOPRAK NEMİ HARİTALARI VE TARIMSAL KURAKLIK.....	80
4. METEOROLOJİK KURAKLIK İNDEKSLERİ.....	80
5. MOBİL BİLDİRİM SİSTEMLERİ VE DİJİTAL DÖNÜŞÜM	81
6. ERKEN UYARI SİSTEMLERİNİN ENTEGRASYONU	81
7. KURAKLIK YÖNETİMİNDE BÜTÜNCÜL YAKLAŞIM.....	82
8. DEĞERLENDİRME VE SONUÇLAR.....	83
9. POLİTİKA ÖNERİLERİ.....	83

BÖLÜM 13.....	87
HAVZA BAZLI SU YÖNETİMİ İLE HİDROLOJİK KURAKLIKLARLA MÜCADELE.....	87
1. GİRİŞ	87
2. HİDROLOJİK KURAKLIĞIN BİLEŞENLERİ.....	87
3. HİDROLOJİK KURAKLIĞIN ÖLÇÜMÜ VE HAVZA SU BÜTÇESİNİN TAKİBİ.....	89
4. DOĞA TABANLI ÇÖZÜMLER VE HAVZA YÖNETİMİ	91
5. KENTSEL ALANLARDA “SÜNGER ŞEHİR” YAKLAŞIMI.....	92
6. SEL, TAŞKIN VE KURAKLIĞI BİRLİKTE YÖNETMEK.....	94
7. KURUMSAL ROLLER VE ENTEGRE PLANLAMA.....	95
8. DEĞERLENDİRME	98
9. POLİTİKA VE ÇÖZÜM ÖNERİLERİ	99
KAYNAKÇA	101

ÖN SÖZ

“Suyu yönetmek, geleceği yönetmektir”

Su, yalnızca yaşamın temel kaynağı değil; aynı zamanda ekonomik kalkınmanın, toplumsal refahın, gıda güvenliğinin, enerji üretiminin ve ekolojik sürdürülebilirliğin de vazgeçilmez unsurudur. Günümüzde iklim değişikliğinin etkilerinin giderek belirginleşmesi, yağış rejimlerindeki düzensizlikler, artan nüfus, kentleşme ve kontrolsüz tüketim alışkanlıkları, kuraklığı yalnızca çevresel bir sorun olmaktan çıkararak ulusal güvenlik, ekonomi ve kamu yönetimi açısından stratejik bir mesele hâline getirmiştir.

Türkiye, Akdeniz Havzası'nda yer alan ve iklim değişikliğinin etkilerini en yoğun hissedecek ülkeler arasında gösterilmektedir. Son yıllarda yaşanan kuraklıklar, azalan yer altı su seviyeleri, baraj doluluk oranlarındaki düşüşler ve tarımsal üretimde ortaya çıkan riskler, su kaynaklarının sürdürülebilir yönetiminin artık ertelenemez bir zorunluluk olduğunu açıkça ortaya koymaktadır. Bu nedenle kuraklıkla mücadele su tasarrufu yapmakla sınırlı olmayan, teknoloji, hukuk, ekonomi, şehircilik, tarım, sanayi ve çevre politikalarını birlikte ele alan bütüncül bir yaklaşımı gerekli kılmaktadır.

Bu eser, tam da bu anlayıştan hareketle hazırlanmıştır. Kitapta su kayıp ve kaçaklarının azaltılması, su kullanım haritaları, gri su uygulamaları, yağmur suyu hasadı, yer altı suyu yönetimi, kurakçıl peyzaj uygulamaları, sanayide sıfır sıvı deşarj sistemleri, yüzeysel sularda buharlaşmanın azaltılması, kuraklık indeksleri, kompost kullanımı, bulut tohumlama, erken uyarı sistemleri ve havza bazlı su yönetimi gibi farklı başlıklar bilimsel literatür ışığında değerlendirilmekte; her bölümde uygulanabilir politika önerileri

xii

sunulmaktadır. Böylece eser, yalnızca mevcut durumu analiz eden bir çalışma olmanın ötesine geçerek karar vericilere yol gösteren kapsamlı bir politika rehberi niteliği kazanmaktadır.

Kamu Politikaları Araştırma ve Geliştirme Merkezi (KAPGEM) olarak temel hedefimiz; ülkemizin karşı karşıya bulunduğu temel sorunlara bilimsel temelli, uygulanabilir ve yenilikçi politika önerileri geliştirmektir. Bilimsel bilginin yalnızca akademik çevrelerde kalmaması, kamu yönetimine, yerel yönetimlere, özel sektöre ve topluma yön verecek politika önerilerine dönüşmesi gerektiğine inanıyoruz. Bu eser de söz konusu anlayışın önemli ürünlerinden biridir.

Kuraklıkla mücadelede başarı, merkezi yönetimin, yerel yönetimlerin, üniversitelerin, özel sektörün, sivil toplum kuruluşlarının ve bireylerin ortak sorumluluk üstlenmesiyle mümkündür. Su kaynaklarının korunması, verimli kullanılması ve gelecek nesillere aktarılması, hepimizin ortak görevidir. Bugün alınacak doğru kararlar, yarının su güvenliğini belirleyecektir.

Bu kıymetli çalışmanın hazırlanmasında emeği geçen tüm yazarlara teşekkür ediyor; eserin kamu kurumlarına, yerel yönetimlere, politika yapıcılara, araştırmacılara ve konuya ilgi duyan tüm okuyuculara önemli katkılar sağlayacağına yürekten inanıyorum.

Kuraklıkla mücadelede bilimsel bilgiye dayalı politikaların yaygınlaşmasına vesile olması temennisiyle...

Prof. Dr. Fatih KIRIŞIK

Editör/KAPGEM Koordinatörü

BÖLÜM 1

SU KAYIP VE KAÇAKLARI İLE MÜCADELE

1. GİRİŞ

Su, yaşam, tarım, sanayi ve ekosistemler için vazgeçilmez bir kaynaktır. Ancak hem dünya genelinde hem de Türkiye’de suyun önemli bir kısmı, dağıtım altyapısının yetersizliği, eski borular, bakım eksiklikleri ve kaçak kullanım nedeniyle kaybolmaktadır. (Pearson, 2019). Bu rapor ile, ülkemizdeki su kayıp-kaçakları ve temelde kuraklıkla mücadele ile ilgili sorunlarını değerlendirme ve çözümler sunmak amaçlanmaktadır.

2. SU KAYIP-KAÇAKLARI VE DÜNYA

Dünya genelinde yıllık yaklaşık 324 milyar m³ tatlı su kaybolmaktadır, bu miktar yaklaşık 280 milyon insanın yıllık su ihtiyacına eşdeğerdir (UN Water, 2024). Şehir şebekelerinde kayıp oranları %25–%50 arasında değişmektedir. Bu kayıplar uluslararası terminolojide Gelir Getirmeyen Su (GGS) olarak tanımlanır (Farley & Trow, 2003).

3. SU KAYIP-KAÇAKLARI VE TÜRKİYE

Su Yönetimi Genel Müdürlüğü (SYGM) verilerine göre Türkiye genelinde içme kullanma suyu şebekelerinde su kayıp kaçak oranı yaklaşık %32 (SYGM, 2023) olarak belirtilmiştir. Bu rakam, Avrupa’nın birçok ülkesine kıyasla (örneğin Almanya, Hollanda, Danimarka vb.) hâlâ oldukça yüksek bir seviyededir. Özet olarak, Türkiye hâlâ (Su kayıp ve kaçakları) sorunu yaşayan orta üst gelirli bir ülke profiline yakındır. (OECD, 2016) Bununla ilgili olarak ülkemizde 30 büyükşehir belediyesine 2028’a kadar kayıp kaçak oranını yüzde 25’e düşürülmesi amaçlanmaktadır (SYGM, 2023).

4. SU KAYIP-KAÇAKLARININ NEDENLERİ

4.1. Fiziksel Nedenler

1. Altyapı ve Boru Hatları

- Boruların ekonomik ömrü dolduğunda çatlaklar, kırılmalar ve ek yerlerinden sızıntıların meydana gelmesi (Thornton, Sturm & Kunkel, 2011)
- Asbest, beton ve eski PVC borular daha hızlı korozyona uğrayacak ve bozunacakları için fiziksel kayıplar neden olabilirler.
- Türkiye’de genelinde bazı şehirlerde 1960–1980’lerde döşenmiş çelik ve beton borular hâlâ kullanılıyor; bunlar yılda %2–5 civarında su kaybına yol açabilmektedir. (DSİ,

2022).

2. Bağlantı Noktaları ve Ek Parçalar

- Vanalar, dirsekler, T-ekleri, sayaç bağlantıları ve ek noktaları, bu bağlantı ekipmanlarının şebeke üzerindeki fazla sayıda kullanımı sızıntı oluşma riskini artırabilir
- Vanalar ve contaların yıpranması, özellikle yüksek basınçlı bölgelerde küçük ama sürekli su kaybına neden olabilir

3. Basınç Dalgalanmaları

- Yüksek basınç, borularda zorlamalara, çatlaklara ve bağlantı noktalarından sızıntılara yol açabilir; bunun aksine düşük basınç ise sızıntı tespitini zorlaştırabilir.
- Genel olarak basınç yönetimi yapılmayan şebekelerde fiziksel kayıplar %10–15 üzerine çıkabilir.

4. Toprak ve Çevresel Faktörler

- Deprem, heyelan veya sağanak yağış sonrası zemin hareketleri boru deformasyonlarına neden olabilir; deprem kuşağındaki ülkelerde eski borulara sahip şebekeler, kritik derecede su kaybı riski taşır (EEA, 2021).

4.2. Yönetimsel ve Operasyonel Nedenler

1. Kaçak Su Kullanımı

- Kayıt altına alınmamış ve illegal kullanımlar gelir getirmmez.
- Bu genellikle gelirli seviyesi düşük bölgelerde veya altyapının zayıf olduğu yerlerde yaygın olacak görülür.

2. Hatalı veya Eksik Sayaçlar

- Eski veya hatalı çalışan sayaçlar gerçek su tüketimini düşük gösterebilir
- Sayaç doğruluk sınıfı düştükçe, %5–10 oranında ek kayıplara neden olabilir.

3. Kayıt ve Faturalandırma Hataları

- Güncel olmayan abone bilgileri, yanlış sayaç okumaları ve faturalandırma hataları Gelir Getirmeyen Su miktarını arttırabilir.

4. Zayıf İzleme ve Denetim

- Online izleme, SCADA desteği, sızıntı tespit operasyonel işlemlerin eksikliği, kayıpların erken tespitini engelleyebilir.

- İzleme yapılmayan, takip sistemi sınırlı olan alt yapı sistemlerinin, kayıp-kaçak oranlarına etkisi yıllık %15–20'ye kadar çıkabilir.

4.3. Diğer Nedenler

1. Yetersiz Su Politikaları ve Tarife Yapısı

- Su fiyatlarının normal ederine göre düşük tutulması veya tüketim ile doğrudan ilişkili olmaması (yüksek kullanıma yüksek fatura gibi) su tasarrufunu azaltır.
- Suyun kıymetinin bilinmemesi (Kolay ulaşıyor-kayıplar önemli değil- ucuz) yaklaşımı su kayıp kaçaklarını önlemede ve su tasarrufunda en önemli aşılması gereken problemlerdendir.

2. Altyapı Yatırımının Yetersizliği

- Boru yenileme ve bakım yatırımlarının yetersizliği, eski şebekelerin uzun kullanımı, bu tür inşaa işlerinde halka verilecek rahatsızlıkların (uzun vadeleri getirileri önemsenmeden) oy kaygılarıyla ötelenmesi.

3. Kapasite ve Personel Eksikliği

- Kaçak tespiti, bakım ve operasyon ekiplerinin yetersizliği, yerel yönetimlerde bu işleri yürüten bir birimin olmaması kayıp-kaçak oranlarına olumsuz yönde etki etmektedir. (SYGM, 2020)

5. GENEL DEĞERLENDİRME

Su kayıp ve kaçakları, kuraklık, su kıtlığı riskini artırmakta ve ekonomik maliyetleri yükseltmektedir. Türkiye’de arıtılan ve iletilen temiz suyun önemli bir kısmı, son kullanıcıya ulaşmadan kaybolmaktadır; bu da hem çevresel hem ekonomik hem de kurumsal bir problem olarak değerlendirilmelidir (SYGM, 2014).

6. TÜRKİYE İÇİN GELİŞTİRİLMİŞ POLİTİKA ÖNERİLERİ

6.1. Fiziksel Altyapı İyileştirmeleri

a. Boru Yenileme ve Altyapı Modernizasyonu

- **Uygulama:** Eski çelik ve beton boruların PVC veya PE gibi dayanıklı malzemelerle değiştirilmesi. Kazı masraflarını önleme amaçlı mevcut hasarlı boru hatlarından küçük çaplarda borular geçirilmesi (debi kontrolleri yapılarak)

b. Basınç Yönetimi

- **Uygulama:** Bölgesel basınç düşürme vanaları ile boru hattında gereksiz yüksek basınç engellenmesi

c. Sızıntı Tespiti ve Onarım Programları

- **Uygulama:** Akustik cihazlar ve akıllı sensörlerle boru hatlarındaki sızıntıların düzenli takip edilmesi ile erken tespiti sağlanması

d. Boru içi enjeksiyon ve kaplama yöntemleri

- Su kayıp-kaçaklarının azaltılması, altyapı yenileme maliyetlerinin düşürülmesi ve kuraklık koşullarında arz güvenliğinin güçlendirilmesi açısından önemli teknik araçlardır. Bu yöntemler aşağıda tablo halinde verilmiştir.

Tablo 1.1. Su Kayıp ve Kaçaklarının Azaltılmasına Yönelik Boru İçi Uygulamalar

Yöntem	Teknik Tanım	Uygulan a-bilir Boru Türleri	Hedeflenen Hasar Türü	Başlıca Avantajlar	Uygulama Kısıtları
Epoksi/ Poliüretan Enjeksiyonu	Düşük viskoziteli reçinelerin boru içine enjekte edilerek çatlak ve boşlukların doldurulması	Beton, çelik, dökme demir	Mikro çatlaklar, sızıntılar	Kazısız uygulama, kısa sürede devreye alma, düşük çevresel etki	Yapısal bozulmalar da sınırlı etki
Kimyasal Jel Enjeksiyonu	Su ile temas ettiğinde genleşen kimyasalların aktif sızıntı noktalarına uygulanması	PVC, çelik, beton	Noktasal kaçaklar	Su kesintisi gerekirmeden uygulanabilme	Uzun vadeli yapısal güçlendirme sağlamaz
CIPP (Yerinde Kürlenen Boru Kaplama)	Reçine emdirilmiş esnek kaplamanın boru içine yerleştirilip kürlenmesi	Beton, çelik, dökme demir	Yaygın çatlaklar, deformasyon	Uzun ömürlü, yapısal dayanımı artırır	İlk yatırım maliyeti görece yüksek
Spray-On (Püskürtme) İç Kaplama	Robotik sistemlerle boru iç yüzeyine epoksi veya çimento esaslı kaplama uygulanması	İçme suyu boruları	Korozyon, ince çatlaklar	Hijyenik, içme suyu standartlarına uygun	Derin ve geniş hasarlarda sınırlı
Robotik Noktasal Onarım Sistemleri	Kameralı robotlarla hasarın tespit edilmesi ve hedefli enjeksiyon yapılması	Tüm boru türleri	Lokal çatlaklar ve sızıntılar	Yüksek hassasiyet, minimum hizmet kesintisi	Yüksek teknoloji ve uzmanlık gereksinimi

6.2. Teknolojik İzleme ve Veri Tabanlı Yönetim

a. Akıllı Sayaçlar

- Uygulama: Akıllı sayaç uygulaması yaygınlaştırılması ile sayaçlar gerçek zamanlı veri göndererek kaçak ve usulsüz kullanımın tespitinin kolaylaştırılması

b. SCADA ve IoT Tabanlı (Kablosuz ortam ile) İzleme Sistemleri

- Uygulama: SCADA sistemleri ile boru hatlarının basıncı, debisi ve sızıntısı anlık izlenmeli. Bu sayede kaçak ve fiziksel kayıplar hızlı şekilde tespit edilerek müdahale edilebilir.

Kentsel su güvenliği ve kayıp kaçaklarla ilgili mücadele aşamaları

Şekil 1.1 de verilmiştir.



Şekil 1.1. Kentsel su güvenliği: Kayıp ve Kaçakla Mücadele

6.3. Kurumsal ve Operasyonel Önlemler

a. Su Fiyatlandırması ve Tüketim İlişkisi

- Uygulama: Su tarifeleri, tüketim miktarları ile ilişkilendirilerek kademeli olarak uygulanmalıdır. Suyu gereksiz ve yüksek miktarlarda kullanan hedef kesimin kullanımları bu şekilde azaltılabilir. Sonuçta su tasarrufu artması, kaçak ve usulsüz kullanımın azalması beklenir.

b. Farkındalık Eğitimleri

- Uygulama: Temiz-içilebilir suyu elde etmenin ucuz olmadığı, şu an kolay ulaşılabilen suya birkaç yıl içinde ulaşımın çok zorlaşabileceğini, barajlarımızın durumları, su kesintilerinin artabileceği ve bu kadar problemin sadece bilinçli su kullanarak bile büyük bir bölümünün çözülebileceği, halk bilgilendirme kampanyaları ve teknik personel eğitim programları ile yoğun olarak işlenerek su kaynaklarının değerinin anlaşılması ve etkin kullanım sağlanmalıdır.

c. Düzenli İzleme ve Denetim

- Uygulama: Düzenli veri toplama, raporlama ve kaçak tespit ekiplerinin periyodik ve düzenli çalışması, gelir getirmeyen su miktarlarını düşürmede yardımcı olacaktır.

6.4. Bireysel Önlemler

Su kayıpları ile mücadelede bireysel alınabilecek önlemler Şekil 1.2. üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 1.2. Su kayıplarını önlemede bireysel önlemler

- Perlatörler: Musluk ucuna takılan küçük aparatlar, suyun içine hava karıştırarak akışı yumuşatır ve hacmini azaltmadan su tasarrufu sağlar. Su akışını birim sürede %30–50 aralığında azalabilir. Tüm dünyada standartlaşan bir uygulamadır.
- Düşük Akışlı Musluklar: Geleneksel musluklara göre daha düşük debide su veren musluklardır. Standart musluklar 8-12 lt/dk su verirken, bu musluklar kullanıcı konforunu bozmadan 4-6 l/dk su verirler. %50'ye varan tasarruf

sağlanabilir.

- Kademeli Musluk Kullanımı: Dünyanın hemen her tarafında musluklar kişinin ihtiyacına göre su vermemekte, sabit ve yüksek debilerde su vermektedir. Standart musluklarda su debisini ayarlama imkanı yoktur. Bu şekilde kullanım büyük su israfına neden olmaktadır. Bunu engellemek için numaralı musluk tiplerinin kullanımını öneriyoruz. 1,2,3,4,5 ölçekli farklı çaplarda çıkışlara sahip bu tip musluklar kullanım amacına ve ihtiyaca göre su verecektir. Buradaki ölçü “1 en az su miktarı-5 en fazla su miktarı” şeklinde olacaktır. Şu anda bütün musluklar 5 ölçüsünde su verdiği ve debi ayarlama imkanı olmadığı için su tasarrufu için yetersiz kalmaktadır.
- Düşük Akışlı Duş Başlıkları: Su tüketimini azaltmak için farklı nozül yapılarıyla tasarlanmış genel su tüketimini %30–50 oranında azaltabilir.
- Sensörlü Musluklar ve Otomatik Vanalar: Hareket sensörleri ile su akışını sadece kullanım sırasında açılmasını sağlar, böylece boşa akan suyu önler, resmi kurum ve kuruluşlarda, ticarethanelerde ve okullarda yüksek oranda tasarruf sağlar

6.5. Su Tasarruflu Tuvalet ve Rezervuar Sistemleri

- Düşük Debili Rezervuarlar: Standart olan 9–12 litre sifon yerine, 4–6 litre/sifon kullanılabilir.
- Çift Sifonlu Tuvaletler: Standart kullanıma göre, ihtiyaca göre daha az su kullanmaya olacak sağlayan sistemler.

6.6. Su Tasarrufu Programları ve Etiketleme

Kişilerin satın aldıkları ürünlerde su tasarrufu ile ilgili sertifikalandırmalar yapılarak, kullanıcının su tasarrufu yapılan, suyu bilinçli kullanılarak üretilen ürün ve firmaları tercih etmesi sağlanabilir. Bu bilinç sağlandığında firmalarında bu yönde kendilerini geliştirmeleri teşvik edilir. Bilinçli su tüketimi tercih nedeni olabilir. “Bu çanta üretilirken, X Litre su kullanılmıştır. Elinizdeki yiyeceğin imalatında Y Litre su kullanılmıştır.” şeklinde düzenlemeler yapılabilir.

BÖLÜM 2

KURAKLIKLARLA MÜCADELEDE SU KULLANIM HARİTALARI VE ÖNEMİ

1. GİRİŞ

Su kaynaklarının sürdürülebilir yönetimi, küresel ölçekte giderek önemli bir hale gelmektedir. Ancak hem nüfus ve kentleşmenin hızlanması hem de iklim değişikliğinin etkileri su tüketimini artırmakta, buna karşın doğal su kaynaklarının yenilenme kapasitesi aynı hızda gelişmemektedir. (King-Okumu, 2019; IPCC, 2022). Bu nedenle hem mevcut su kaynaklarını izlemek hem de tüketim alışkanlıkları verilerini elde etmek ve yönetmek amacıyla su kullanım haritaları oluşturulmaktadır. Bu haritalar; coğrafi bilgi sistemleri (CBS), akıllı sensör verileri, uzaktan algılama ve abone bazlı tüketim analizlerinin bir arada kullanılmasıyla hazırlanan yüksek çözünürlüklü ürünlerdir. Bu bölümde su kullanım haritalarının çıkarılmasının, kuraklıkla mücadeledeki rolü ele alınmıştır.

2. SU KULLANIM HARİTALARININ BİLİMSSEL TEMELİ

Su kullanım haritaları, bir bölgedeki sektörel su tüketiminin mekânsal dağılımını ortaya koyan analitik modellerdir. Bilimsel altyapıları aşağıdaki veri bileşenlerine dayanır:

2.1. Uzaktan Algılama ve CBS Tabanlı Modeller

- Sentinel-2, Landsat 9 gibi uydular ile bitki su stresi, yüzey suyu alanı ve buharlaşma verileri izlenebilmektedir. (ESA, 2020; USGS, 2021).
- Ekim alanları, tarımsal tüketim ve toprak nemi doğruluk payı %70–90’a ulaşan algoritmalarla hesaplanabilmektedir.
- Kentsel alanlarda su tüketimi, bina yoğunluğu ve altyapı verileri ile ilişkilendirilerek hesaplanabilmektedir.

2.2. Akıllı Sayaçlar ve IoT Tabanlı Sistemler

- Gerçek zamanlı su tüketimi ölçülür.
- Sızıntı ve ani tüketim artışları yapay zekâ ile tespit edilir.
- Avrupa’da akıllı sayaç dağılımı %50’nin üzerindedir; Türkiye’de büyükşehirlerde yaygınlık yaklaşık %20–30 aralığındadır. (EurEau, 2022).

2.3. Abone Tüketim Profil Analizi

- Hane halkı, sanayi, tarım ve kamu tüketimlerinin ayrı katmanlar hâlinde modellenmesi, riskli bölgelerin belirlenmesinde etkilidir.

3. SU KULLANIM HARİTALARININ SU TASARRUFU İLE İLİŞKİSİ

Bilimsel çalışmalar, su kullanım haritalarının tasarruf politikalarının etkinliğini artırdığını göstermektedir:

3.1. Doğru Hedefleme

- ABD’de EPA WaterSense programı, haritalandırma destekli müdahalelerle %15’e kadar hane halkı tasarrufu sağlamıştır. (EPA, 2025).
- Su tüketimi mekânsal olarak bilindiğinde tasarruf önlemleri en çok tüketen semtlere yönlendirilebilmektedir.

3.2. Kaçak-Kayıp Yönetimi

- Su kullanım haritaları altyapı arızalarının yoğunlaştığı bölgeleri göstererek müdahale verimliliğini artırmaktadır.

3.3. Tarımsal Verimlilik

- Uydu tabanlı evapotranspirasyon haritaları; aşırı sulama yapılan alanların %25’e kadar daha fazla su tükettiğini göstermektedir.
- Hassa sulama haritaları oluşturularak gerekli bölgelerde damla sulamaya geçiş oranı artırılarak su kayıpları engellenebilir.

4. DÜNYA ÜLKELERİNDEN UYGULAMA ÖRNEKLERİ

- Singapur’da ülke çapında dijital su haritaları oluşturulmuş ve tüketim 10 yılda %8 azaltılmıştır (PUB Singapore, 2020).
- Endonezya (Utami ve ark., 2022) ve İspanya’da (CNIG, 2025) ise kentsel su şebeke kayıplarının değerlendirilmesinde su kullanım haritalarının kullanımı dikkate alınmaya başlamıştır.

5. TÜRKİYE’DE SU KULLANIM HARİTALARININ DURUMU

5.1. Tarımsal Su Kullanımı

- Türkiye’de toplam su tüketiminin %72’si tarım sektöründedir. (DSİ,2023)
- Uydu tabanlı toprak nemi ve evapotranspirasyon haritalarının oluşturulması amaçlı birçok akademik çalışma bulunmaktadır. Bunlardan elde edilen verilerin verimli bir şekilde kullanılması gerekmektedir.
- Sulama sistemlerinde hala %50’nin üzerinde su kaybı görülmektedir. (TOB,2023) Elde edilecek kapsamlı haritalar vasıtasıyla yoğun su kullanılan bölgeler, nedenleri saptanabilecek ve bununla ilgili çözüm önerileri sunulabilecektir.

5.2. Kentsel Su Yönetimi

- Büyükşehirlerde şebeke kayıp-kaçak oranı ortalama %30-35 seviyesindedir.
- Su kullanım haritaları, özellikle İstanbul, Ankara ve Antalya’da pilot bölgelerde kullanılmaktadır. Bunun ülke çapına yaygınlaştırılması gerekmektedir.

5.3. Sanayi

- OSB’lerde su tüketimi sektörel haritalarla izlenmeye başlanmıştır. Ancak bunun yaygın hale ve tüm OSB’leri kapsayacak hale getirilmesi gerekmektedir.

6. POLİTİKA VE ÇÖZÜM ÖNERİLERİ

6.1. Ulusal Su Kullanım Harita Portalı

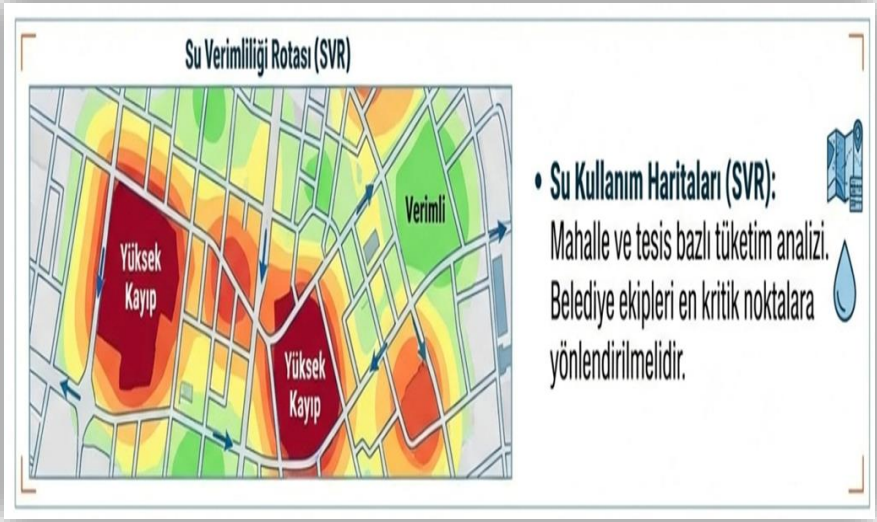
Tüm şehirlerde standart veri formatında su tüketim haritaları oluşturulmalı, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı tarafından merkezi platformda yayınlanmalıdır. Örnek su haritası Şekil 2.1.’de verilmiştir.

6.2. Su Verimliliği Rotası (SVR)

Su Verimliliği Rotası, kentsel ve kırsal su yönetiminde tüketim yoğunluğu, altyapı eskimesi, gelir düzeyi, sektörel kullanım ve kaçak-kayıp risklerinin mekânsal olarak analiz edilerek su tasarrufu ve müdahale önceliklerinin belirlenmesini sağlayan karar destek modeli olarak özetlenebilir.

Temel Hedefler:

- Su tüketiminin mekânsal olarak anlamak; mahalle, tesis, tarımsal alan veya OSB ölçeğinde “yüksek kullanım bölgeleri”nin belirlenmesi
- Gerekli Müdahaleleri optimize etmek; kayıp-kaçak ekipleri, sulama denetim ekipleri veya saha teknik ekipleri için en kritik noktalar algoritmik olarak sıralanması
- Tasarruf potansiyelini arttırmak; SVR takip edilerek, müdahale yapıldığında en fazla su tasarrufunun sağlanacağı bölgeler tespit edilmesi
- Belediye yatırımlarını öncelik sırasının belirlenmesi; şebeke yenileme, sayaç modernizasyonu ve tarımsal sulama dönüşümü gibi yatırımlara bilimsel öncelik sırasının verilere göre belirlenmesi



Şekil 2.1. Su kullanım haritası ve SVR örneği

Özetle, SVR, su yönetim sistemini reaktif yapıdan çıkarıp öngörücü ve veri odaklı bir modele dönüştürerek tasarruf politikalarının etkililiğini artıran, şebeke kayıplarını hızla azaltan, sulama yönetimini doğrulukla yönlendiren ve kaynak ile bütçenin en verimli şekilde kullanılmasını sağlayan kuraklıkla mücadelede etkili olabilecek bir yaklaşımdır.

6.3. Tarımda Hassas Sulama Haritaları

- Uydu verileri ile su stresine göre sulama takvimi oluşturulması
- Çiftçilere mobil uygulama ile bildirimler yapılması
- Yüksek miktarlarda tasarruf potansiyeli vardır. (TOB,2023)

6.4. Kaçak-Kayıp Bölgesel Müdahale Planı

Tüm belediyelerde şebeke yaşı, tüketim anomalisi haritalarının oluşturulması ve sisteme entegre edilmesi gerekmektedir.

7. DEĞERLENDİRME

Su kullanım haritaları hem Türkiye hem de dünya açısından su yönetiminin en kritik analiz yöntemlerinden biridir. Bu haritalar sayesinde:

- Tasarruf politikaları daha etkili hâle gelmekte
- Kayıp-kaçak oranları düşmekte
- Tarımda su verimliliği artmakta

- Kentsel planlama daha doğru yapılmakta
- Kuraklıkla daha bilimsel mücadele edilebilmektedir.

Dünyanın çoğu yerinde, mevcut su kaynaklarını ve kullanımını tam olarak değerlendirebilmek için yeterli gözlem verisinin bulunmaması büyük bir sorundur. Olumlu yönden bakılırsa, yağış, gerçek buharlaşma ve depolama değişimleri gibi su döngüsünün çeşitli bileşenleri hakkında bilgi sağlayan uzaktan algılama tabanlı ürünlerin sayısı giderek artmakta ve daha fazla kullanıma girmektedir. (FAO,2025)

BÖLÜM 3

ARITILMIŞ SUYUN YENİDEN KULLANIMI:

GRI SU

1.GİRİŞ

Dünya genelinde su kaynakları giderek azalmakta ve su kıtlığı ciddi bir tehdit haline gelmektedir. Hızlı nüfus artışı, sanayileşme, iklim değişikliği ve kontrolsüz su tüketimi, mevcut su kaynakları üzerinde önemli bir baskı oluşturmaktadır. Bu bağlamda, atık suların arıtılarak yeniden kullanılması, sürdürülebilir su yönetiminin temel bileşenlerinden biri haline gelmiştir. Evsel atık sular, özellikle de “gri su” olarak adlandırılan ve tuvalet atıkları içermeyen kısmı, önemli bir yeniden kullanım potansiyeline sahiptir.

Gri su, banyo, duş, lavabo, çamaşır ve bulaşık makinelerinden kaynaklanan atık suları kapsar ve evsel atık suyun hacimsel olarak yaklaşık %75'ini oluşturur. Siyah suya (tuvalet atık suyu) kıyasla organik ve patojen yükü daha düşüktür, bu da onu daha az karmaşık arıtma prosesleriyle geri kazanıma uygun hale getirir. Gri suyun arıtılarak yeniden kullanılması, içme suyu şebekesinden çekilen su miktarını azaltarak hem su kaynaklarının korunmasına hem de atık su deşarj yükünün hafifletilmesine katkı sağlar (Karahan, 2011)

Bu bölüm, gri su özelinde, arıtılmış suların yeniden kullanım potansiyelini, kullanım alanlarını, kalite standartlarını ve kuraklığı önlemede suyun bilinçli kullanımında etkin olabilecek politika ve çözüm önerilerini içermektedir.

2. GRİ SU

Gri suyun bileşimi ve kirlilik yükü, kaynağına, tüketici alışkanlıklarına, kullanılan deterjan ve kişisel bakım ürünlerine bağlı olarak büyük ölçüde değişkenlik gösterir. Genel olarak iki kategoride değerlendirilir: az kirli gri su (banyo, duş, lavabo) ve çok kirli gri su (mutfak, çamaşır/bulaşık makinesi)

Tablo 3.1. Gri Su Kaynağına Göre Kirletici Maddeler (Allen vd., 2010)

Gri Su Kaynağı	Kirletici Maddeler
Duş – Küvet	Saç, sabun, organik madde, şampuan kalıntıları, askıda katı madde, bakteri
Lavabo	Yağ ve gres, bakteri, organik madde, sabun, askıda katı madde
Çamaşır Makinesi	Organik madde, yağ ve gres, nitrat, sodyum, pH, askıda katı madde, fosfor, çamaşır suyu
Bulaşık Makinesi	pH, artan tuzluluk, deterjan, yağ ve gres, bakteri, askıda katı madde, organik madde

3.GRİ SU ARITIM YÖNTEMLERİ

Suyun yeniden kullanımını artırmak ve tatlı su kaynakları üzerindeki baskıyı azaltmak amacıyla yaygın olarak tercih edilen sürdürülebilir uygulamalardır. En yaygın arıtım teknolojileri arasında mekanik filtreleme, biyolojik arıtım, membran filtrasyonu (ultrafiltrasyon, nanofiltrasyon, ters ozmoz) ve doğal arıtım sistemleri yer almaktadır. Mekanik ve biyolojik süreçler, gri sudaki organik ve inorganik maddelerin etkin biçimde uzaklaştırılmasını sağlarken, membran teknolojileri yüksek kaliteli arıtılmış su elde edilmesine imkân tanımaktadır (Eriksson vd., 2002). Bu nedenle membran sistemleri, özellikle konut tipi geri kazanım uygulamalarında giderek daha fazla tercih edilmektedir.

Gri suyun arıtılarak yeniden kullanımı, kentsel alanlarda su güvenliğine katkı sağlamakta ve su tüketimini önemli ölçüde azaltmaktadır. Özellikle tuvalet rezervuarları, bahçe sulaması ve belirli endüstriyel proseslerde arıtılmış gri su kullanımının yaygınlaşması, sürdürülebilir kent su yönetimi açısından kritik öneme sahiptir. Yapay sulak alanlar gibi doğa bazlı çözümler ise düşük enerji tüketimi, düşük işletme maliyetleri ve ekosistem hizmetleri nedeniyle dikkat çekmektedir (Liz vd., 2010). Bu teknolojilerin entegrasyonu, kuraklık riski yüksek bölgelerde stratejik bir su yönetimi aracı olarak değerlendirilmektedir.

4. GRİ SUYUN KULLANIM ALANLARI

Arıtılmış gri suyun temel kullanım alanları şunlardır:

Tuvalet Rezervuarlarının Doldurulması: En yaygın ve kabul görmüş uygulamadır. Suyla doğrudan insan teması olmadığı için kalite gereklilikleri nispeten daha düşüktür.

- **Çamaşır Yıkama:** Arıtılmış suyun tekrar çamaşır makinesinde kullanılması.
- **Bahçe ve Peyzaj Sulama:** Park, bahçe, golf sahaları ve tarımsal

sulamada kullanım.

- Araç Yıkama ve Genel Temizlik
- Yangın Söndürme Sistemlerinin Beslenmesi
- Yer Altı Suyu Beslemesi (Dolaylı İçme Suyu Kullanımı): Yüksek seviyede arıtılmış gri suyun, yeraltı suyu akiferlerine enjekte edilmesi veya yüzeyden sızdırılması.

5. POLİTİKA VE ÇÖZÜM ÖNERİLERİMİZ

5.1. Gri Su Standardizasyonu ve "Beyaz Sertifika" Sisteminin Geliştirilmesi

Türkiye'de acilen, bina ve yerleşke ölçeğindeki gri su sistemleri için ayrıntılı teknik şartnameler, tasarım kılavuzları ve kalite standartları hazırlanmalıdır. Bu şartnamelerde, sistemin büyüklüğünün su ihtiyacı ve gri su miktarına göre her bir proje için özel olarak hesaplanması, şebeke ile kullanım suyu hatlarının kesinlikle ayrı tutulması ve boru hatlarının renk kodlaması gibi temel dizayn prensipleri net bir şekilde belirtilmelidir. Daha ileri bir adım olarak, su tasarrufu sağlayan binalara verilebilecek bir "Beyaz Sertifika" veya "Su Verimliliği Sertifikası" sistemi geliştirilmelidir. Bu sertifika, binanın gri su kullanım oranı, toplam su ayak izi azaltımı gibi kriterlere göre derecelendirilerek, yapı ruhsatı ve iskân aşamalarında teşvik edici bir araç olarak kullanılabilir. Beyaz sertifika kavramının şematik gösterimi Şekil 3.1.'de verilmiştir.

Gri Suyun Geri Kazanımı: "Beyaz Sertifika" Dönemi



Şekil 3.1. Gri suyun geri kazanımı: Beyaz Sertifika Dönemi

5.2. Dijital İzleme ve Bakım Kolaylığı Sağlayan Sistem Tasarımı Sağlanmalı

Gri su sistemlerinin sürdürülebilirliği, düzenli bakım ve izlemeye bağlıdır. Pompalar, filtreler ve diğer mekanik ekipmanların bakım ve temizlik için kolayca ulaşılabilir olacak şekilde tasarlanması zorunlu hale getirilmelidir. Ayrıca, bu sistemlerin gerçek zamanlı izlenmesi için basit ve uygun maliyetli dijital izleme çözümleri (debi, basınç, bulanıklık sensörleri gibi) teşvik edilmelidir. Bu sayede filtre değişimi, pompa arızası gibi durumlar önceden tespit edilerek sistem verimliliği ve güvenilirliği artırılabilir.

5.3. Mevcut ve Yeni Yapı Stokları İçin " Gri Su Toplama/Dağıtım Merkezleri" Modeli Oluşturulmalı

Mevcut müstakil konutlar ve eski siteler ve yeni inşaa edilecek binalarda, mahalle veya site ölçeğinde " Gri Su Toplama/Dağıtım Merkezleri " kurulması teşvik edilmelidir. Bu yapı ile, az kirli gri suyu (duş, lavabo, küvet) ortak bir arıtma ünitesinde işleyerek bahçe sulama, araç yıkama ve genel temizlik gibi amaçlarla kullanabilir. Yerel yönetimlerin teknik desteği ve düşük faizli kredi imkanlarıyla finanse edilebilecek bu model, bakım maliyetini paylaşarak ve sosyal dayanışmayı güçlendirerek kolektif fayda sağlayacaktır.

5.4. Teknoloji Seçim Rehberi ve Yerli Üretim Desteği Sağlanmalı

Gri su arıtımında kullanılan teknolojilerin (yapay sulak alan, MBR, RBC gibi) ayrı ayrı avantaj ve dezavantajları olduğu görülmüştür. Uygulayıcılar için arazi büyüklüğü, iklim koşulları, arzu edilen çıkış suyu kalitesi ve bakım kapasitesi gibi kriterlere göre teknoloji seçimine yardımcı olacak bir "Karar Destik Rehberi" geliştirilmelidir. Özellikle yapay sulak alan gibi düşük enerjili ve çevre dostu pasif sistemlerin kullanımı özendirilirken, MBR gibi teknolojilerde kullanılan membranların yerli üretimi ve temizliğinde çevreye zararlı kimyasalların alternatifleri için AR-GE teşvikleri sağlanmalıdır.

5.5. Entegre Su Yönetimi: Gri Su ve Yağmur Suyu Sistemlerinin Birlikte Değerlendirilmesi:

Gri su geri kazanımı ile yağmur suyu hasadı sistemlerinin entegre bir şekilde ele alınması, şehir şebekesindeki yükü çok daha etkili bir şekilde azaltacaktır. Özellikle siteler ve büyük yerleşkelerde, bu iki sistemin birlikte tasarlandığı ve havuz doldurma gibi amaçlar için optimize edildiği projeler, yatırım maliyetleri de göz önüne alınarak teşvik edilmelidir. Bu entegre yaklaşım, içme suyunun gereksiz kullanımını engelleyerek çevreye önemli bir pozitif katkı sağlayacaktır.

6. DEĞERLENDİRME

Evsel atık sular bir kirletici olarak değil, uygun şekilde arıtıldığında değerli bir kaynak olarak görülmelidir. Binalarda kullanılan evsel atık suyun yerinde ayrıştırılıp gri suyun arıtılması, yalnızca su kirliliğinin önlenmesine değil, aynı zamanda enerji verimliliğine de katkı sağlamaktadır. Su, 21. yüzyılın en stratejik kaynaklarından biridir. Atıksuların, özellikle daha kolay yönetilebilir gri suyun arıtılarak yeniden kullanımı, sürdürülebilir kalkınma ve kaynak verimliliği için vazgeçilmezdir. Mevcut teknolojiler bu uygulamayı teknik açıdan mümkün ve güvenilir kılmaktadır. Önündeki temel engeller; eksik düzenleyici çerçeve, algılanan yüksek ilk yatırım maliyeti, bakım endişeleri ve toplumsal farkındalık eksikliğidir.

Çözüm önerileri bölümünde sunulan (Beyaz Sertifika, bakımı kolay tasarım ilkeleri, Gri Su Kooperatifleri, teknoloji seçim rehberi ve gri su-yağmur suyu entegrasyonu), söz konusu engellerin aşılmasına yönelik pratik ve uygulanabilir bir yol haritası sunmaktadır. Bu sistemlerin yatırım maliyetlerinin yüksek olmaması ve şehir şebekelerindeki yükü azaltma potansiyeli dikkate alındığında, yaygınlaşmaları için merkezi ve yerel yönetimlerin, özel sektörün, akademinin ve toplumun iş birliği içinde çalışması elzemdir. Gelecekte su kaygısı yaşamamak için binalarda su korunumu konusunda daha fazla teşvik, bilinçlendirme ve akıllı politika geliştirme gerekmektedir. Gri suyu arıtmak ve yeniden kullanmak, sadece bir mühendislik çözümü değil, aynı zamanda çevresel sorumluluk ve geleceğe yapılan akıllı bir yatırımdır.

BÖLÜM 4

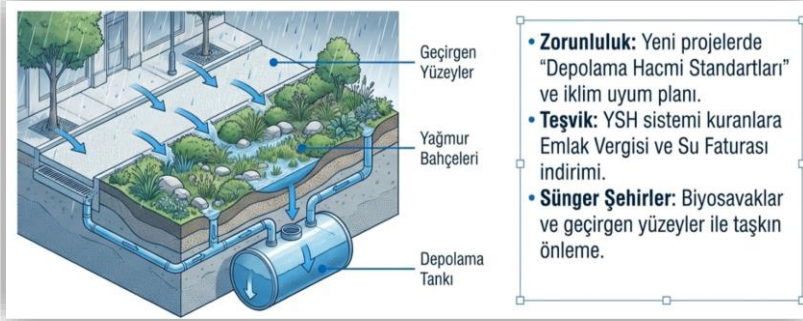
YAĞMUR SUYU HASATI (YSH)

1.GİRİŞ

Küresel ölçekte artan nüfus, hızlı kentleşme, iklim değişikliği ve su kaynaklarının düzensiz mekânsal-zamansal dağılımı, güvenilir ve sürdürülebilir su teminini giderek daha karmaşık bir problem hâline getirmektedir. Özellikle büyük metropollerde su talebinin artması, yağış rejimlerindeki değişim, kurak ve yarı kurak iklimlerin genişlemesi ve mevcut yüzey–yeraltı su kaynaklarının kalite ve miktar bakımından baskı altında olması, alternatif su kaynaklarının değerlendirilmesini zorunlu kılmaktadır. Bu bağlamda yağmur suyu hasadı (YSH), hem merkezi olmayan (decentralized) bir su yönetimi aracı hem de taşkın kontrolü, kentsel ısı adası etkisinin azaltılması ve iklim uyum stratejileriyle entegre edilebilen çok yönlü bir yaklaşım olarak öne çıkmaktadır. Bunlara ilave olarak, kentsel alanların su yönetimi konusunda karşılaştığı zorluklar çok boyutludur. Hızlı kentleşme çoğu zaman yollar ve binalar gibi geçirimsiz yüzeylerin artmasına yol açarak yüzey akışını artırmakta ve yeraltı suyu beslenimini azaltmaktadır.

Bu durum, yoğun yağış olaylarında kentsel taşkınlara neden olurken, kurak dönemlerde su kıtlığının artmasına katkıda bulunabilmektedir. Bu nedenle şehirlerin, yağmur suyunu yakalayan, depolayan ve etkili bir şekilde kullanan kapsamlı stratejiler benimsemesi, genel su yönetim sistemlerini iyileştirmek açısından büyük önem taşımaktadır (Santos ve ark., 2023).

YSH, çatı veya arazi yüzeylerine düşen yağmur suyunun toplanması, depolanması ve daha sonra içilebilir veya içilemez su talebini karşılamak üzere kullanılması süreci olarak tanımlanmakta; tarihsel olarak kırsal ve tarımsal sistemlerde geleneksel bir uygulama iken, günümüzde kentsel su yönetiminde de önemli bir yer edinmektedir. Farklı kıtalarda yapılan çok sayıda çalışma, YSH uygulamalarının su tasarrufu potansiyelini, ekonomik fizibilitesini, su kalitesi özelliklerini ve sosyal kabul düzeyini kapsamlı biçimde ortaya koymuştur (Rahman et al., 2012; Ghisi et al., 2009; Herrmann & Schmida, 1999; Domènech & Saurí, 2011; Villareal & Dixon, 2005). Yağmur suyu hasasının şematik gösterimi Şekil 4.1.’de verilmiştir.



Şekil 4.1. Yağmur suyu hasadı: Suyu yerinde yakalamak

2. (YSH) DÜNYADAKİ DURUM

Büyük şehirlerde bina ölçeğinde yağmur suyu hasadı uygulamalarına ilişkin dikkat çekici örneklerden biri, Avustralya'daki Büyük Sidney bölgesidir. Rahman, Keane ve Imteaz (2012), Büyük Sidney'de konut ölçeğinde YSH sistemlerini su tasarrufu, sistem güvenilirliği ve ekonomik açıdan değerlendirmiş ve çatı yağmur suyu hasadının şehir şebekesine bağımlılığı azaltmada anlamlı bir katkı sağlayabileceğini göstermiştir. Benzer şekilde, Brezilya'da benzin istasyonlarında yağmur suyu hasadı uygulamalarını inceleyen Ghisi, Tavares ve Rocha (2009), araç yıkama gibi içilebilir olmayan kullanım alanlarında yağmur suyunun değerlendirilmesiyle önemli bir içme suyu tasarrufu elde edilebildiğini ve yatırım geri dönüş sürelerinin kabul edilebilir düzeyde olduğunu bildirmiştir. Almanya'da yürütülen çalışmalar da yağmur suyu kullanımının verimlilik, depolama hacmi boyutlandırması, hidrolik performans ve çevresel etkiler açısından ayrıntılı analizini sağlamış ve uygun tasarım ile YSH sistemlerinin hem hidrolik hem çevresel açıdan sürdürülebilir olduğunu ortaya koymuştur (Herrmann & Schmida, 2000).

Konut ve bina ölçekli YSH sistemleri, farklı iklim ve sosyoekonomik koşullarda da yaygın biçimde incelenmiştir. Örneğin, Barselona Metropoliten Bölgesi'nde tek ve çok katlı binalarda yağmur suyu hasadının sosyal deneyim, içme suyu tasarrufu ve ekonomik maliyetler açısından değerlendirilmesi, kullanıcı algısının ve sosyo-ekonomik bağlamın sistem performansı kadar önemli olduğunu göstermiştir (Domènech & Saurí, 2011). İsveç'in Norrköping kentinde yürütülen bir çalışmada, evsel su temini için yağmur suyu toplama sisteminin işleyişi, su tasarrufu potansiyeli ve sistem tasarım parametreleri analiz edilmiş, soğuk iklim koşullarında dahi YSH'nin şebeke suyu talebini azaltma potansiyeli vurgulanmıştır (Villareal & Dixon, 2005). ABD'de Güneydoğu tarafında kullanılan yağmur suyu toplama sistemlerinin performansını değerlendiren

Jones ve Hunt (2010), YSH'nin hem su tasarrufu hem de taşkın yönetimi açısından önemli avantajlar sunduğunu ve performansın, yağış rejimi ve depolama hacmi gibi yerel parametrelere duyarlı olduğunu ortaya koymuştur. Zambiya'nın kentsel bölgelerinde yağmur suyu hasadı potansiyelini inceleyen Handia et al. (2003) ise, özellikle altyapısı yetersiz kent alanlarında YSH'nin kentsel su kıtlığını hafifletebilecek önemli bir alternatif kaynak olabileceğini göstermiştir. Namibya'nın kuzeyindeki kırsal alanlarda yürütülen bir başka çalışmada, yağmur suyu hasadı kırsal haneler için pratik olarak tek alternatif su kaynağı konumuna gelebilecek bir seçenek olarak değerlendirilmiştir (Sturm et al., 2009).

Yarı kurak ve kurak iklimlerde, yağmur suyu hasadı yalnızca kentsel su yönetimi açısından değil, tarımsal üretimin sürekliliği ve gıda güvenliği açısından da kritik bir rol oynamaktadır. Çin'in yarı kurak bölgelerinde yürütülen çalışmalarda, yerel toprak malzemeleriyle oluşturulan sıkıştırılmış mikro havzaların yağmur suyu hasadı için etkin bir yöntem olduğu ve toprak nemini artırarak bitkisel üretimi desteklediği ortaya konmuştur (Li & Gong, 2002). Yine Çin'den bildirilen bir örnekte, yağmur suyu hasadı ve basit sulama yöntemlerinin ekonomik analizi yapılmış; yağmur suyuna dayalı sulama sistemlerinin tarımsal üretim ve çiftçi gelirine katkı sunduğu belirtilmiştir (Yuan et al., 2003). Hindistan'daki dağlık bir havzada su hasadının ekonomik analizini yapan Goel ve Kumar (2005), topoğrafik olarak karmaşık bölgelerde de uygun yöntem ve lokasyon seçimleriyle su hasadının ekonomik açıdan cazip bir seçenek olduğunu göstermiştir. Doğu Hindistan'da yağmurla beslenen tarım sistemlerinde ürün–balık entegrasyonu için çiftlik içi rezervuarların boyutlandırılmasını inceleyen Pandey, Panda ve Panigrahi (2006), yağmur suyu rezervuarlarının tarımsal üretim ve entegre sistem verimliliğini artırabildiğini rapor etmiştir. İran'da mikro havza sistemleri kullanılarak dört üzüm çeşidinin üretimi için yapılan ekonomik analiz ise, mikro havza temelli yağmur suyu hasadı sistemlerinin kurak ve yarı kurak iklim koşullarında bağcılık için önemli verim artışları sağlayabileceğini göstermektedir (Fooladman & Sepaskhah, 2004).

İçme suyu kalitesinin yeraltı sularının kimyasal kirlenmesi nedeniyle ciddi şekilde tehlikeye girdiği bölgelerde, yağmur suyu hasadı hayati bir alternatif kaynak olarak ortaya çıkar. Bangladeş'te arsenikle kirlenmiş yeraltı sularına karşı güvenli içme suyu kaynağı arayışında, çatı yağmur suyu hasadı önemli bir seçenek olarak değerlendirilmiş; uygun tasarım ve basit arıtım süreçleriyle yağmur suyunun içilebilir nitelikte olabileceği gösterilmiştir (Islam et al., 2010). Ashiq Ur Rahman ve Shafiqur Rahman (2013) tarafından yürütülen çalışmada ise, Bangladeş'te yağmur suyu hasadının potansiyelleri, zorlukları ve paydaş tepkileri kapsamlı biçimde ele alınmış; teknik, ekonomik ve kurumsal engeller yanında halkın

yağmur suyuna yönelik algısı ortaya konmuştur.

Benzer şekilde Pakistan'da yürütülen çalışmalar hem endüstriyel hem kentsel ölçeklerde YSH potansiyelini ortaya koymaktadır. Ahmed ve Farooq (2018), Pakistan'ın Sheikhpura bölgesindeki bir endüstriyel alanda, SWMM (Storm Water Management Model) kullanarak yağmur suyu hasadı potansiyelini değerlendirmiş; model sonuçları, endüstriyel alanlarda yağmur suyu yönetimi ve hasadı ile taşkın riskinin azaltılabileceğini ve su tasarrufu sağlanabileceğini göstermiştir. Yine, Mozambik'in Beira kentinde yürütülen çalışmalar, kentsel taşkın kontrol tedbirlerine duyulan acil ihtiyacı vurgulayarak, yağmur suyu hasadının hem taşkın hem de tatlı su kıtlığıyla mücadele eden şehirler için önemini ortaya koymaktadır (Santos ve ark., 2023). Lahore'da çatı yağmur suyu hasadı potansiyelini inceleyen Siddiqui vd. (2018), kentsel yerleşim alanlarında çatı yüzeylerinin önemli bir yağmur suyu kaynağı olduğunu ve konut ölçeğinde dahi anlamlı su tasarrufu potansiyeli sunduğunu ortaya koymuştur. Hassan (2016) ise Pakistan için yağmur suyu hasadını geleceğin alternatif su temini seçeneği olarak ele almış; ulusal ölçekte strateji, mevzuat ve teşvik mekanizmalarının geliştirilmesi gerekliliğine dikkat çekmiştir.

Güney ve Güneydoğu Asya'da, yağmur suyu hasadı kentsel su yönetimi ve afet sonrası yeniden yapılanma bağlamında da ele alınmıştır. Banda Aceh'te sürdürülebilir bir su temini seçeneği olarak yağmur suyu hasadını inceleyen Song, Han ve Kim (2009), özellikle afet riski yüksek bölgelerde merkezi altyapı sistemleri zarar gördüğünde, desantralize yağmur suyu hasadı sistemlerinin topluluklar için kritik bir dayanıklılık unsuru olabileceğini vurgulamıştır. Tayland'da Bangsai Belediyesi için yürütülen bir çalışmada yağmur suyu hasadı ve kullanımına ilişkin genel bir değerlendirme yapılmış; belediye ölçeğinde kurumlararası koordinasyon ve planlama yaklaşımlarının önemi ortaya konmuştur (Areerachakul, 2013). Bangkok'ta bir bina örneğinde yağmur suyu hasadı potansiyelini değerlendiren Monjaiang et al. (2018), bina ölçeğinde YSH sistemlerinin su tasarrufu ve taşkın yönetimine katkısının yanında, ekonomik fizibilite ve tasarım parametrelerini de tartışmıştır. Hawaii için yağmur suyu toplama sistemlerine ilişkin kılavuzlar ise, sistem tasarımı, depolama, taşma, filtrasyon ve sağlık koruma önlemleri açısından uygulamaya dönük kapsamlı bir çerçeve sunmakta ve tasarımcılar ile uygulayıcılara pratik rehberlik sağlamaktadır (Macomber, 2010).

Afrika ve diğer gelişmekte olan bölgelerdeki çalışmalar da yağmur suyu hasadının kırsal ve kentsel su güvenliği açısından önemine işaret etmektedir. Kenya'da yağmur suyu hasadı teknikleri, sürdürülebilirlik faktörleri ve paydaşlara ilişkin genel bir envanter çalışması, farklı teknolojilerin (çatı sistemleri, yüzey havuzları, mikro havzalar vb.) teknik,

ekonomik ve sosyal boyutlarını karşılaştırmalı olarak incelemiştir (Odhiambo vd. 2021; Recha vd., 2017; Recha vd., 2014).

Güney Afrika kırsal alanlarında evsel yağmur suyu hasadı, özellikle güvenilir şebeke suyu erişiminin kısıtlı olduğu yerlerde haneler için önemli bir tamamlayıcı kaynak olarak değerlendirilmiş; kurumsal destek ve finansal teşviklerin gerekliliği vurgulanmıştır (Kahinda et al., 2007). Namibya’da yapılan çalışma da benzer biçimde, kırsal alanlarda yağmur suyu hasadının güvenilir ve sürdürülebilir bir alternatif su kaynağı olabileceğini göstermiştir (Sturm et al., 2009).

Yunanistan’ın Kefalonya Adası’nda çatı yağmur suyu hasadı ile üretilen suyun kalite değerlendirmesini yapan Sazakli, Alexopoulos ve Leotsinidis (2007), yağmur suyunun kimyasal ve mikrobiyolojik kalitesinin genellikle kabul edilebilir düzeyde olduğunu, ancak depolama koşulları ve sistem tasarımının su kalitesi üzerinde belirleyici olduğunu ortaya koymuştur.

Orta Doğu ve Akdeniz kuşağında yürütülen çalışmalar, su kıtlığının yoğun olduğu bölgelerde evsel ve kentsel yağmur suyu hasadının önemini vurgulamaktadır. Ürdün’de konutlarda çatı yağmur suyu toplama sistemlerini inceleyen Abdulla ve Al-Shareef (2009), kurak iklim koşullarında dahi yağmur suyunun hanelerin yıllık su ihtiyacının anlamlı bir kısmına katkı sağlayabildiğini ve YSH’nin su temini stratejileri içinde değerlendirilebileceğini göstermiştir. İran ve çevresinde yürütülen çalışmalar ise hem tarımsal mikro havza sistemlerinin verimliliğini (Fooladman & Sepaskhah, 2004) hem de konut yağmur suyu hasadı sistemlerinin farklı iklim koşullarındaki performansını ve içilebilir olmayan su taleplerini karşılama potansiyelini değerlendirmiştir (Mehrabadi, M. H. R., Saghafian, B., & Fashi, F. H. 2013).

Gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerde, YSH sistemlerinin su tasarrufu ve taşkın kontrolü potansiyelinin yanı sıra, sistem boyutlandırması ve performans modellemesine yönelik çalışmalar da bulunmaktadır. Fewkes (1999), yağmur suyu toplama sistemlerinin performansının modellenmesine yönelik genelleştirilmiş bir yaklaşım önermiş; farklı depolama hacimleri, çatış alanları ve kullanım senaryoları altında sistem davranışını incelemiştir. Wu, Molina ve Hussain (2018) ise, analitik hiyerarşi süreci ile yağmur suyu hasadı için en uygun alanların belirlenmesine yönelik bir karar destek yaklaşımı geliştirmiş; mekânsal planlama ile YSH potansiyeli arasındaki ilişkiye dikkat çekmiştir. İrlanda’da evsel uygulamalar için yağmur suyu hasadı ve gri su arıtma sistemlerinin birlikte ele alındığı çalışmada, bu iki alternatif su kaynağının kombine kullanımının, şebeke suyu talebini azaltma ve su döngüsünü yerinde yönetme açısından önemli avantajlar sunduğu gösterilmiştir (Li et al., 2010). İspanya’da, Barselona Metropol Bölgesi’nde yürütülen çalışma,

sadece teknik ve ekonomik boyutları değil, aynı zamanda kullanıcı deneyimi ve sosyal kabulü de değerlendirmiş; YSH'nin yaygınlaşmasında sosyo-kültürel faktörlerin kritik olduğunu ortaya koymuştur (Domènech & Saurí, 2011).

Su kıtlığı ile başa çıkmada dünya çapında örnek gösterilen Singapur'da, yağmur suyu hasadı; yüzey suyu depolaması, deniz suyu arıtımı ve geri kazanılmış su (NEWater) ile birlikte entegre bir su yönetimi modelinin parçası olarak uygulanmaktadır (Singapore Water Story; Coping with Water Scarcity in Singapore). Singapur örneği, merkezi ve merkezi olmayan su kaynaklarının birlikte planlandığı, politika, teknoloji ve kamusal farkındalığın bütünselik olduğu bir yaklaşımın, su güvenliğinin sağlanmasında ne kadar etkili olabileceğini göstermektedir.

Malezya'da yağmur suyu hasadına ilişkin kapsamlı bir derleme çalışması yapan Lani, Yusop ve Syafiuddin (2018) ise, ülke genelinde YSH uygulamalarının beklentileri, fırsatları ve zorluklarını analiz etmiş; mevzuat, standartlar ve farkındalık düzeyinin geliştirilmesi gerektiğine işaret etmiştir.

Yukarıda raporlanan literatür bilgileri bir arada değerlendirildiğinde, yağmur suyu hasadının; (i) hane halkı ve kentsel ölçekte içilebilir ve içilemez su taleplerinin bir kısmını karşılayarak şebeke suyu talebini azalttığı, (ii) tarımsal üretimi ve kırsal su güvenliğini güçlendirdiği, (iii) taşkın riskini azaltan bir yağış-yüzey akış yönetim aracı olduğu, (iv) çoğu durumda ekonomik açıdan fizibil olduğu ve uygun tasarım, yönetim ve mevzuatla birlikte sosyal olarak da kabul görebildiği anlaşılmaktadır (Rahman et al., 2012; Ghisi et al., 2009; Islam vd., 2010; Ahmed & Farooq, 2018; Siddiqui & Siddiqui, 2018; Handia vd., 2003; Domènech & Saurí, 2011; Lani vd., 2018).

Bununla birlikte, birçok çalışmada belirginleşen ortak nokta; yağmur suyu hasadı sistemlerinin performansının büyük ölçüde iklim, yerel hidrolojik koşullar, arazi kullanımı, kullanıcı davranışı ve kurumsal çerçeveye bağlı olduğudur. YSH sistemlerinin uygulanması, kentsel alanlarda uyarlanabilir dayanıklılığı da güçlendirmekte, şehirlerin iklim değişikliği olgusuna dinamik şekilde yanıt vermesine olanak sağlamaktadır.

Leone ve ark.'na göre, yağmur ve fırtına esnasında yüzeylere düşen suyun yönetimi uygulamalarının YSH ile entegre edilmesi, kent morfolojilerinin ve iklim uyumuna yönelik altyapı planlamasının önemli ölçüde geliştirilmesine katkı sunabilir (Leone ve ark., 2022). Bu yaklaşım, şehirlerin kırılganlıklarını azaltırken su kullanımını optimize etmelerine ve doğal kaynakları korumalarına olanak tanır (Shi vd., 2024).

Dolayısıyla farklı kent ve bölgeler için, yerel yağış özelliklerini, mevcut altyapıyı, su talep desenlerini ve sosyo-ekonomik koşulları dikkate alan ayrıntılı potansiyel analizlerine ihtiyaç duyulmaktadır.

3. TÜRKİYE'DE YAĞMUR SUYU HASADI

3.1. Metodoloji

Türkiye'nin farklı bölgelerinde yağmur suyu hasadı potansiyelini belirlemek için standart hesaplama modeli olan $ARHP = ARD \times CA \times RC$ formülünü kullanır. Bu hesaplama teorik maksimum hasat edilebilir su miktarını verir.

Tablo 3.1. Bölgelere göre yağış verileri

Bölge / İl	Yıllık Yağış (mm)	Kaynak
Marmara / İstanbul	661 mm	MGM iklim istatistikleri
Ege / İzmir	711 mm	MGM iklim istatistikleri
Akdeniz / Antalya	1040 mm	MGM iklim istatistikleri
İç Anadolu / Ankara	414 mm	MGM iklim istatistikleri
Karadeniz / Trabzon	902 mm	MGM iklim istatistikleri
Doğu Anadolu / Erzurum	431 mm	MGM iklim istatistikleri
Güneydoğu Anadolu / Diyarbakır	491 mm	MGM iklim istatistikleri

Hesaplama Formülleri

Yıllık Yağmur Suyu Hasadı (ARHP):

$$ARHP = (ARD \times CA \times RC) / 1000$$

ARD = Yıllık yağış (mm)

CA = Çatı alanı (m²)

RC = Yüzey akış katsayısı (çatı için 0,8)

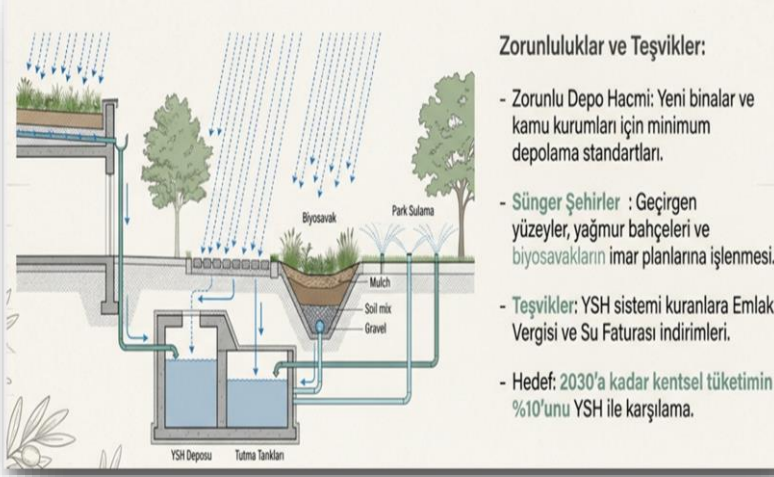
Tablo 3.2. Müstakil Ev İçin Teorik Yağmur Suyu Hasadı (120 m² Çatı)

Bölge	Hasat (m ³ /yıl)	Hane Tüketimi (292 m ³ /yıl)	Karşılama Oranı (%)
İstanbul	63.4	292 m ³ /yıl	21.7
İzmir	68.2	292 m ³ /yıl	23.4
Antalya	99.8	292 m ³ /yıl	34.2
Ankara	39.7	292 m ³ /yıl	13.6
Trabzon	86.6	292 m ³ /yıl	29.7
Erzurum	41.4	292 m ³ /yıl	14.2
Diyarbakır	47.1	292 m ³ /yıl	16.1

Tablo 3.3. Apartman İçin Teorik Yağmur Suyu Hasadı (500 m² Çatı)

Bölge	Hasat (m ³ /yıl)	Toplam Tüketim (2920 m ³ /yıl)	Karşılama Oranı (%)
İstanbul	264.3	2920 m ³ /yıl	9.1
İzmir	284.2	2920 m ³ /yıl	9.7
Antalya	415.9	2920 m ³ /yıl	14.2
Ankara	165.4	2920 m ³ /yıl	5.7
Trabzon	360.8	2920 m ³ /yıl	12.4
Erzurum	172.4	2920 m ³ /yıl	5.9
Diyarbakır	196.4	2920 m ³ /yıl	6.7

Türkiye'nin farklı iklim bölgeleri için yapılan hesaplamalar, müstakil konutlarda yağmur suyu hasadıyla yıllık su ihtiyacının yaklaşık %15–34'ünün, apartman tipi yapılarda ise %6–14'ünün teorik olarak karşılanabileceğini; Fewkes (2000) modeline göre bu miktarların pratik kullanımda %40–70 oranında etkin su tasarrufuna dönüştüğünü göstermekte olup, yağmur suyu hasadının ulusal ölçekte hem sürdürülebilir su yönetimine hem de şebeke suyu talebinin azaltılmasına ciddi katkı potansiyeli taşıdığını ortaya koymaktadır. Bu nedenle yağmur suyu hasadı bizler için gökten düşen fırsattır ve çok verimli bir şekilde değerlendirilmelidir. (Şekil 4.2.)



Şekil 4.2. Yağmur suyu hasası: Gökten Düşen Fırsat

4. SONUÇ VE POLİTİKA ÖNERİLERİ

Yağmur suyu hasadını teşvik eden politikaların uygulanması, küresel su kıtlığıyla mücadele etmek, su kaynakları yönetimini geliştirmek ve iklim değişikliğiyle mücadele çalışmalarına katkıda bulunmak açısından hayati önem taşımaktadır. Kuraklıkların artan sıklığı ve mevcut su kaynakları üzerindeki baskılar göz önüne alındığında, bu tür politikalar YSH tekniklerinin benimsenmesini büyük ölçüde kolaylaştırarak toplumsal dayanıklılık ve çevresel sürdürülebilirlikte iyileşmelere yol açabilir. Bu nedenle, ilgili araştırma bulgularıyla desteklenen, bu tür politikaların geliştirilmesinin neden kritik öneme sahip olduğuna dair birkaç temel neden aşağıda yer almaktadır.

4.1. Su Kıtlığının Giderilmesi

Yağmur suyu hasadı, alternatif ve sürdürülebilir su kaynakları sağlayarak su kıtlığını hafifletmek için etkili bir çözüm sunar. Yannopoulos ve diğerlerinin de belirttiği gibi, yağmur suyu hasadı tekniklerinin yeniden canlandırılması, su kıtlığını azaltabilir ve birçok bölgenin şu anda karşı karşıya olduğu veya gelecekte karşı karşıya kalacağı tahmin edilen su kıtlıklarını hafifletebilir. Yannopoulos ve diğerlerinin (2019) belirttiği gibi, yağmur suyu hasadı sistemlerinin benimsenmesini ve entegrasyonunu teşvik eden politikalar oluşturarak, hükümetler yerel su dayanıklılığını önemli ölçüde artırabilir.

4.1.1. Politika Önerileri

- Ulusal Su Yönetimi Stratejisi içine yağmur suyu hasadı zorunlu bir bileşen olarak eklenmelidir.
- Su kıtlığı yaşayan İç Anadolu ve Güneydoğu Anadolu'da YSH zorunlu altyapı yatırımı kapsamına alınmalıdır.
- Belediyeler su planlarında “YSH kapasite hedefleri” belirlemelidir (örn. “2025–2030 arası kentsel tüketimin %10’u YSH ile karşılanacaktır.”).

4.2. Sürdürülebilir Su Yönetimini Teşvik Etmek

YSH, su kaynaklarının kullanımını optimize etmek ve geleneksel su kaynakları üzerindeki baskıyı azaltmak için bir araç görevi görür. Zheng ve arkadaşları, yarı kurak bölgelerde YSH uygulaması için en uygun alanları vurgulayarak, tarım ve doğal kaynakların korunması için kritik öneme sahip sürdürülebilir arazi ve su kullanımındaki rolünü göstermektedir (Zheng vd, 2018). YSH'ı destekleyen politikalar, coğrafi ihtiyaçlara dayalı stratejik kalkınmayı bilgilendirmek için bilimsel bulguları birleştirebilir.

4.2.1. Politika Önerileri

Yerel yönetimler Su Hassas Kentsel Tasarım (WSUD) ilkelerini planlama sistemine dâhil etmelidir.

- İmar planlarına zorunlu YSH altyapıları eklenmelidir:
- Geçirgen yüzeyler
- Yağmur bahçeleri
- İnfiltrasyon çukurları
- Biyosavaklar

Tarımsal sulamada yeraltı suyuna bağımlılığı azaltmak için çiftlik içi yağmur suyu rezervuar sistemleri desteklenmelidir.

4.3. İklim Değişikliğine Uyumun Geliştirilmesi

İklim değişikliği yağış modellerinin değişkenliğini artırdıkça, YSH bu değişikliklere uyum sağlamak için proaktif bir yaklaşım sunmaktadır. YSH sistemlerinin yağışlı dönemlerdeki fazla yağışı yakalama yeteneği, toplulukların giderek daha sık görülen uzun kuraklık dönemleriyle başa çıkmalarına yardımcı olabilir (Umukiza vd., 2023). Milinga vd.'nin çalışması, YSH'na yönelik kurumsal desteğin, önemli su kıtlığı yaşayan bölgelerde uygulanmasını olumlu yönde etkilediği fikrini desteklemektedir (Milinga vd., 2023) . YSH'nı teşvik eden politikalar, toplum katılımını ve gerekli teknolojiye erişimi teşvik edebilir.

4.3.1. Politika Önerileri:

- Tüm yeni kentsel projelerde iklim uyum eylem planı kapsamında yağmur suyu depolama sistemi zorunlu tutulmalıdır.
- Yerel yönetimlerde “YSH Koordinasyon Birimi” kurulmalı; bu birim teknik danışmanlık, denetim ve kayıt sistemi yürütmelidir.
- Meteorolojik kuraklık dönemlerinde merkezi yönetim tarafından YSH teşvik paketi açıklanmalıdır.

4.4. Verimli Su Kullanımını Teşvik Etmek

Yağmur Suyu Rezervuar Sistemleri, sulama, evsel içme suyu dışı kullanımlar ve yeraltı suyu beslemesi gibi çeşitli uygulamalar için yağmur suyunun verimli bir şekilde kullanılmasını sağlar. Uddin ve ark. tarafından vurgulandığı gibi, Yağmur Suyu Rezervuar Sistemleri, geleneksel su temin sistemleri üzerindeki yükü önemli ölçüde azaltabilir ve kentsel sel risklerini en aza indirerek daha sürdürülebilir kentsel ortamlar yaratabilir (Uddin vd., 2024). Etkili politikalar, su kalitesini ve kullanıcı memnuniyetini en üst düzeye çıkarmak için bu sistemlerin uygulanması ve bakımı için en iyi uygulamaları özetleyebilir.

4.4.1. Politika Önerileri

Şehirlerdeki su kullanımının yoğun olduğu alanlarda (okullar, kamu kurumları, hastaneler, sanayi) zorunlu yağmur suyu toplama ve yeniden kullanım sistemleri uygulanmalıdır.

- Apartman ve sitelerde yağmur suyu:
- Tuvalet rezervuarları
- Bahçe sulama
- Ortak alan temizliği için zorunlu hale getirilmelidir (dual-pipe sistemi ile).
- Büyükşehirlerde “Yağmur Suyu Depolama Hacmi Standartları” belirlenmelidir.

4.5. Ekonomik Sürdürülebilirliği Desteklemek

YSH kurulumu için sübvansiyonlar veya vergi indirimleri gibi finansal teşvikler sağlayan politikalar, daha geniş katılımı teşvik edebilir ve uygulama için ilk maliyetleri azaltabilir. Fulazzaky ve ark. tarafından yapılan araştırma, YSH sistemlerinin ekonomik faydalarının, kurulum ve bakım maliyetlerinden önemli ölçüde daha ağır bastığını ve bu sayede su kıtlığı yaşayan bölgelerde cazip bir seçenek haline geldiğini göstermektedir (Fulazzaky vd., 2022). Hükümetler, YSH projeleri için finansmana erişimi kolaylaştırarak, su kaynağı zorluklarını ele alırken yerel ekonomileri canlandırabilir.

4.5.1. Politika Önerileri

- YSH sistemi kuran konutlara KDV indirimi, su faturasında %10–20 indirim ve emlak vergisi indirimi sağlanmalıdır.
- Düşük gelirli haneler için hibe + düşük faizli kredi paketleri uygulanmalıdır.
- Tarım işletmeleri için RWH yatırımları kırsal kalkınma destekleri kapsamına alınmalıdır.

4.6. Halk Sağlığı ve Güvenliğini İyileştirme

Yağmur suyu hasadı, su kıtlığıyla ilişkili sağlık risklerini önemli ölçüde azaltma potansiyeline sahiptir. Örneğin, çeşitli ülkelerde uygulanan çatı yağmur suyu toplama sistemleri, Mbua vd., (2024) tarafından da kanıtlandığı gibi, hanelerin temiz suya erişimini sağlayabilir. Yağmur suyu hasadının sağlık yararlarını vurgulayan politikalar, çeşitli toplum ortamlarında halk sağlığını ve çevre güvenliğini iyileştirmek için önemli bir strateji olarak benimsenmesini teşvik edebilir.

4.6.1. Politika Önerileri

- Şebeke suyu altyapısının zayıf olduğu kırsal alanlarda çatı yağmur suyu sistemleri + arıtma modülleri ile güvenli içme suyu desteği sağlanmalıdır.
- Sağlık Bakanlığı tarafından “Yağmur Suyu Güvenliği Rehberi” yayımlanmalıdır.

4.7. Topluluk Dayanıklılığını ve Katılımını Artırmak

YSH'ni teşvik eden politikalar, su yönetimi uygulamalarına toplum katılımını teşvik ederek su tasarrufu ilkeleri konusunda daha fazla farkındalık ve anlayış sağlayabilir. Tessema ve ark. tarafından yapılan araştırma, YSH' nın küçük çiftçilerin ürünlerini çeşitlendirmelerine ve gıda güvenliğini artırmalarına nasıl yardımcı olabileceğini ve sürdürülebilir uygulamalara yerel katılımı nasıl teşvik edebileceğini göstermektedir (Tessema vd., 2021). Destekleyici politikalar, YSH sistemlerini yönetme ve sürdürme konusunda toplum kapasitesi oluşturan girişimleri yapılandırabilir.

4.7.1. Politika Önerileri

- Belediyeler tarafından YSH eğitimleri, gösterim alanları ve mahalle pilot projeleri oluşturulmalıdır.
- Çiftçi eğitim programlarında mikro havza uygulamaları zorunlu modül hâline getirilmelidir.
- Okullarda su döngüsü ve YSH konularını içeren müfredat geliştirilmelidir.

Sonuç olarak, Ulusal ve yerel düzeyde güçlü yağmur suyu hasadı politikalarının uygulanması, Türkiye'nin artan kuraklık riskine karşı dayanıklılığını güçlendirecek, su kaynakları üzerindeki baskıyı azaltacak, tarımsal üretim ve halk sağlığını destekleyecek, ekonomik sürdürülebilirliği geliştirecek ve iklim değişikliğine uyum kapasitesini önemli ölçüde artıracaktır.

Bu nedenle, Türkiye için en kritik politikalar:

- **Yeni binalarda minimum YSH depo hacmi zorunluluğu**
- **Kentsel alanlarda YSH + LID Düşük etkili gelişim (Low Impact Development) entegre altyapı yaklaşımı**
(LID; şehirleri yağmur suyunu sorun olarak değil, kaynak olarak gören bir tasarım felsefesi)
- **Ekonomik teşvik paketleri ile vatandaş katılımının artırılması**
- **Tarımsal mikro-havza sistemleri ile kırsal su yönetiminin güçlendirilmesi**
- **Kurumsal kapasite + toplum farkındalığının artırılması**

BÖLÜM 5

YERALTI SUYU KULLANIMI KONTROLÜ

1. GİRİŞ

Yeraltı suyu, dünyanın en önemli tatlı su kaynaklarından biri olup yaklaşık 2,5 milyar insanın günlük yaşamında hayati bir rol oynamaktadır. Yeraltı suyunun, küresel tatlı su rezervleri içerisinde buzullardan sonra en büyük ikinci kaynak olduğu belirtilmektedir. Yeraltı suyu yalnızca içme suyu temininde değil; tarım, sanayi ve enerji üretimi gibi sektörlerde de kullanılan, ekosistemlerin sürekliliği için kritik değere sahip bir kaynaktır. Göller, nehirler ve baraj gölleri gibi yüzeysel tatlı su kaynaklarının giderek azalması veya kirlenmesi, yeraltı sularına olan talebi artırmaktadır. Tarım, içme-kullanma, sanayi ve enerji sektörlerinde yeraltı suyunun payı oldukça yüksektir. Özellikle kurak ve yarı kurak kırsal bölgelerde aşırı kullanımının kontrolü güçtür. Artan su, gıda ve enerji talebi ile iklim değişikliğinin hidrolojik döngü üzerindeki etkileri, yeraltı suyu kaynaklarına baskıyı artırmaktadır. İklimsel stresler, Arazi kullanımı akifer sistemlerine olan etkileri, su-enerji-gıda etkileşiminde önemlidir. Dünya genelinde 301 milyon hektarlık sulu tarım alanının yaklaşık %38'inde yeraltı suyu kullanılması ve yıllık 545 km³ suyun akiferlerden çekilmesi, tarımsal kullanımın yeraltı suyu üzerindeki baskısının yüksek olduğunu ortaya koymaktadır; (Siebert vd., 2010). Akiferlerden aşırı miktarda su çekilmesi, akiferin hızla boşalması, sediment sıkışması ve depolama kapasitesinin düşmesine neden olur. Bu sorunların çözümünde Yönetilen Akifer Beslemesi (Managed Aquifer Recharge – MAR) önemli bir yöntemdir. MAR, yüzey suları, yağmur suyu hasadı, arıtılmış atık sular veya alternatif su kaynaklarının kontrollü bir şekilde akiferlere yönlendirilmesiyle yeraltı suyunu besler. Yüzey suları günler veya haftalar içinde yenilenebilirken, yeraltı suyu rezervlerinin yenilenmesi yüzyıllar almasından dolayı yeraltı suyu rezervlerine özen gösterilmelidir.

2. YERALTI SUYUNUN TÜKETİMİ

Kentsel, tarım ve sanayi alanlarında yeraltı suyu kullanımının aşırı derecede artması sonucunda, yeraltı suyu çekim miktarları da hızla yükselmiştir. Küresel ölçekte yeraltı suyu beslenimi ve tüketimi değerlendirmeleri, (Wada vd., 2010) tarafından geliştirilen küresel hidrojeolojik model PCR-GLOBWB kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Aynı zamanda, Uluslararası Yeraltı Suyu Araştırma Merkezi (IGRAC) tarafından küresel yeraltı suyu boşalmasına ilişkin tahminler yapılmış ve farklı bölgelerde yeraltı suyu tüketim eğilimleri ortaya konmuştur. Bu değerlendirmeler, küresel yeraltı suyu tüketiminin 1960'larda yaklaşık 126 km³/yıl seviyesindeyken, 2000'li yıllara gelindiğinde 283 km³/yıl düzeyine yükseldiğini göstermiştir (Wada vd., 2010). Bu durum hem artan nüfus

veekonomik faaliyetlerin hem de iklim ve arazi kullanımındaki değişimlerin yeraltı suyu sistemleri üzerindeki baskısının giderek arttığını doğrulamaktadır.

3.YERALTI SUYUNUN SÜRDÜRÜLEBİLİR KULLANIMINDA TEHDİTLER

3.1.Tarımsal Tehditler Tuzlanma

Dünyada yeraltı suyu miktarının yaklaşık 160 milyar m³ olduğu tahmin edilmektedir. Sulu tarım, yeraltı suyu tüketimin en büyük nedenidir. Akiferlerin plansız ve aşırı tüketimi, yakın gelecekte küresel ölçekte yönetilemez düzeyde gıda güvenliği sorunlarına yol açacaktır. Dünya genelinde yaygın olan sulu tarımı için akiferlerin aşırı kullanılması ve aşırı çekim sonucunda akiferlerin hidrolik dengesi bozulur.

Tuzlu su, tatlı su akiferine doğru ilerleyerek birincil tuzlanmayı meydana getirmektedir; bu süreç özellikle kıyı bölgelerinde oldukça hızlı gelişir. aşırı pompajın tuzlu su girişimini hızlandırarak akiferdeki tuzluluk oranını belirgin biçimde artır. İkincil tuzlanma ise yoğun tarımsal sulama ile toprak ve akifer tabakalarındaki tuzların mobilize olması ve sulama suyundaki tuzların buharlaşarak yüzeyde birikmesi sonucu ortaya çıkmaktadır. Bu süreçlerin etkisiyle tatlı su bölgesinde açılmış kuyular zamanla tuzlu zon içinde kalabilir; kuyu sularındaki bu tuzluluk artışı ürünlerde tuz stresine, verim kayıplarına ve arazi çoraklaşmasına neden olur.

3.2. Kentsel ve Endüstriyel Tehditler

Kentleşmenin büyük miktarlarda artan temiz su ihtiyacının sonuçları ve kent merkezleri etrafında aşırı yeraltı suyu çekimi, özellikle nüfusu hızla artan büyük şehirlerde yeraltı suyu seviyelerinde ciddi düşüşlere yol açmaktadır. Araştırmalar, bu düşümlerin birçok metropolde 30–50 metreyi bulabildiğini ortaya koymaktadır.

Kentsel su temini için gelişigüzel yeraltı suyu çekimi, toplam hacim olarak sulama kullanımından daha düşük olsa bile, akiferlerde meydana getirdiği lokalize basınç kayıpları önemli arazi çökmesi sorunlarına neden olmaktadır. Aşırı çekim, kıyı şehirlerinde tatlı su akiferlerinin hidrolik dengesini bozarak tuzlu su girişimini hızlandırarak ve kentsel su güvenliğini tehdit eder.

4. YERALTISUYUNUN AŞIRI VE BİLİNÇSİZ KULLANIMININ KURAKLIĞA ETKİSİ

Yeraltı suyunun aşırı ve bilinçsiz kullanımı, kuraklık süreçlerini hızlandırmakta; yoğun yeraltı suyu çekimi akiferlerde uzun dönemli düşüşlere ve özellikle yarı kurak bölgelerde hidrolik dengeyi bozarak bölgesel kuraklığın şiddetlenmesine yol açmaktadır. Su seviyesi düşüşü, toprak çökmesi, tuzlu su girişimi ve suya bağımlı ekosistemlerin kuruması

gibi kuraklığı derinleştiren ikincil etkileri de tetiklemektedir (Chen vd., 2018). Yeraltı suyunun bilinçsiz ve plansız kullanımı, yalnızca su bütçesinin bozulmasına ve çevresel sorunlara da yol açmaktadır. Aşırı yeraltı suyu çekimi, akiferlerin doğal beslenme düzenini, tüketim–beslenme dengesini bozmakta ve hidrolojik döngünün sürdürülebilirliğini tehdit etmektedir.

4.1. Hidrolojik Döngünün Bozulması

Hidrolojik döngü; yağış, buharlaşma, yüzey akışı, infiltrasyon ve yeraltı suyu beslenimi gibi fiziksel süreçlerin bir bütünüdür. Aşırı yeraltı suyu çekimi, bu süreçlerin doğal işleyişini çeşitli şekillerde bozarak hidrolojik sistemin bütünlüğünü zayıflatmaktadır. Yeraltı suyu açısından hidrolojik döngünün bozulması; akifer beslenmesinin azalması, aşırı pompaj sonucu depolamanın tüketilmesi, akarsularla olan hidrolik bağlantının zayıflaması ve akifer yapısının jeomekanik olarak bozulması ile ortaya çıkmaktadır. Bu bozulma, kuraklık döngüsünü hem şiddetlendirir hem de zaman içerisinde daha kalıcı hale getirir; böylece hidrolojik denge ve ekosistem işleyişi geri dönülmesi güç bir şekilde etkilenir.

4.2. Akifer Beslenme Oranını ve Seviyenin Düşmesi

Aşırı pompaj, akiferdeki su basıncını azaltarak yağışın toprağa sızma hızını doğrudan etkiler. Bu koşullarda toprak nemi azalır, infiltrasyon kapasitesi zayıflar ve doğal yeraltı suyu beslenimi giderek düşer. Birçok akarsu, özellikle yaz aylarında yeraltı suyu tarafından beslenen baz akım sayesinde varlığını sürdürür. Su tablasında meydana gelen düşüş, akarsuların akış sürelerini kısaltmakta ve bazı kesimlerin tamamen kurummasına neden olmaktadır.

Tarımsal sulamada aşırı pompaj, kontrolsüz kuyu sayısındaki artış ve yağış–beslenme ilişkilerinin iklim değişikliği nedeniyle zayıflaması, akifer su seviyesinin düşmesinin nedenlerindendir. Su tablasının düşmesi ise; kuyuların kuruması, pompaj maliyetlerinin artması, akiferin doğal debisinin azalması ve baraj–göl gibi yüzey suyu kütlelerinin yeraltı suyundan olan beslenmesinin kesilmesi gibi önemli sonuçlara yol açar. Yeraltı suyu seviyelerindeki bu düşüşler hem hidrolojik bağlantıları zayıflatmakta hem de ekosistemleri olumsuz yönde etkilemektedir.

4.3. Sulak Alanların Kuruması Tarımsal İklim Değişikliği ve Kuraklık

Toprak nemi, kök bölgesi boyunca yükselen kapiler su hareketi ile desteklenmektedir. Su tablası düştükçe bu kapiler sütun zayıflamakta ve tarımsal kuraklık şiddetlenmektedir (Döll vd. , 2014). Yeraltı suyuna bağımlı sulak alanlar (GDEs—Groundwater Dependent Ecosystems), su seviyesi değişikliklerine en hassas ekosistemler arasında yer almaktadır. Aşırı yeraltı suyu çekimi; sazlıklar, göl kenarı habitatları ve alüvyon ormanlarında ciddi ekolojik bozulmalara yol açmaktadır

4.4. Su Tablasının Düşmesi, Obruk oluşumu ve Arazi Çökmesi

Obruklar, yeraltındaki karbonatlı kayaçların (kireçtaşı, dolomit, jips vb.) çözünmesiyle oluşan boşlukların zamanla genişlemesi ve tavan kısmının ani bir çökmesi sonucunda meydana gelmektedir. Kurak dönemlerde aşırı su çekimi, çekim–beslenim dengesini bozarak karstik jeolojik yapıya sahip bölgelerde obruk oluşum riskini artırmaktadır. Yeraltı suyunun aşırı pompajla aşağı çekilmesi, karstik boşluklar içindeki suyun kaldırma basıncının ortadan kalkmasına yol açar. Akifer içerisindeki boşlukların sıkışmasıyla arazi çökmesi meydana gelir ve bu süreç boşluk tavanının çökmesine zemin hazırlayarak obruk oluşumunu tetikler (Galloway ve Burbey, 2011). Türkiye’de özellikle Konya Kapalı Havzası, en çok obruk oluşan bölge olarak öne çıkmaktadır. Bu durum; yoğun yeraltı suyu çekimi, tarımsal sulama baskısı ve su tablasının yıllık 3–5 metre düzeyinde düşmesi ile doğrudan ilişkilidir (DSİ, 2023). Konya’da meydana gelen birçok obruğun oluşumunda, su seviyesinin son yıllarda dramatik biçimde azalmasının belirleyici olduğu ortaya konmuştur (Bozyiğit ve Tapur, 2009).

4.5. Deniz Suyu Girişimi (Kıyı Akiferlerinde Tuzlanma)

Aşırı yeraltı suyu pompajı, kıyı bölgelerinde tatlı su–tuzlu su dengesini bozarak deniz suyunun tatlı akifere ilerlemesine yol açmaktadır. Özellikle yoğun su talebi altındaki kıyı yerleşimlerinde artmakta ve akiferlerde geri dönüşü zor tuzlanmalar oluşmaktadır. Tatlı su seviye düşüşüyle, tuzlu su hidrolik eğime bağlı olarak kıydan iç kesimlere doğru ilerler; bunun sonucunda içme suyu kuyuları kullanılmaz hâle gelir, su kalitesi ciddi ölçüde bozulur ve akiferin sürdürülebilir işletimi neredeyse imkânsız hâle gelir. Son yıllarda yapılan sistematik jeohidrolojik değerlendirmeler, kıyı akiferlerinde tuzlu su girişiminin hem aşırı pompaj hem de iklim değişikliği kaynaklı deniz seviyesi yükselmesi nedeniyle hızlandığını göstermektedir. Modelleme çalışmaları ise, tatlı su tabakasının incelmesi ve hidrolik dengenin bozulması durumunda tuzlu su kamasının akifer içinde daha ileri noktalara taşınabileceğini ortaya koymaktadır. Bu nedenle kıyı akiferlerinin korunması için; yeraltı suyu çekiminin kontrol altına alınması, suni besleme uygulamaları, kıyıya paralel geri basma kuyularının kullanılması büyük önem arz etmektedir.

4.6. Ekosistem Kaybı ve Biyoçeşitliliğin Azalması

Yeraltı suyu seviyesindeki düşüşler, özellikle sulak alanlar, akarsu–taban akımı sistemi ve kıyı ekosistemleri üzerinde doğrudan baskı oluşturmaktadır. Taban akımının zayıflaması, akarsuların düşük akım dönemlerinde beslenememesine yol açmakta; bu durum sucul habitatların daralmasına ve ekosistem sürekliliğinin bozulmasına neden olmaktadır. Yeraltı suyu seviyesindeki düşüşlerin habitat parçalanmasını artırdığı; amfibiler, balıklar ve suya bağımlı kuş türlerinde tür çeşitliliğinin hızla

azaldığı gösterilmiştir (Taylor vd., 2013). Ayrıca uzun süreli yeraltı suyu çekiminin, sulak alan ekosistemlerinde çöküşe ve biyolojik çeşitlilikte geri dönüşü güç kayıplara neden olduğu vurgulanmaktadır. Bu bulgular, yeraltı suyu-ekosistem etkileşiminin doğal denge açısından kritik öneme sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

5. YERALTI SUYUNUN SÜRDÜRÜLEBİLİRLİLİĞİ VE POLİTİKA ÖNERİLERİ

Yeraltı suyu rezervinin sürdürülebilirliğini belirleyen iki temel unsur, suyun miktarı (varlığı) ve kalitesidir. Suyun varlığı ve kullanılabilirliğini etkileyen su seviyesi değişimleri, beslenme-boşalım oranları, havzalar arası su transferleri ve bölgesel hidrolojik koşullar; nehir havzasının hidrolojik dengesinin ve yeraltı suyu miktarının zaman içinde değişmesine neden olmaktadır. Bu nedenle su dengesi, yeraltı suyu sürdürülebilirliğinin değerlendirilmesinde en temel araçlardan biri olarak kabul edilmektedir. Su bütçesinin analizi, akiferin kendini yenileme kapasitesinin belirlenmesi, çekim-beslenme dengesinin izlenmesi ve sürdürülebilir işletme stratejilerinin geliştirilmesi açısından kritik önem taşımaktadır.

5.1.Havza Bazlı Yeraltısu Yönetimi

Son yıllarda yapılan çalışmalar, sürdürülebilir yeraltı suyu yönetiminin ancak havza ölçeğinde ve hidrojeolojik sınırlar dikkate alınarak planlanması gerektiğini göstermektedir. Bu yaklaşım kapsamında, akifer sınırlarının bilimsel olarak belirlenmesi, yeraltı suyu bütçesinin (beslenme-çekim dengesi) ortaya konulması ve yeraltı suyu koruma alanlarının tanımlanması sürdürülebilir yönetimin temel unsurları arasında yer almaktadır. Havza ölçekli planlama, akiferlerin doğal yenilenme kapasiteleri ile kullanım taleplerinin uyumlaştırılmasını ve uzun dönemli su güvenliğinin sağlanmasını mümkün kılmaktadır.

5.2 Çekim Kotaları ve Ruhsatlandırma

Havza bazlı su yönetimi, tüm kuyuların CBS tabanlı olarak kayıt altına alınmasını gerektirir. Kaçak kuyuların kapatılması ve çekim kotasının belirlenmesi sürdürülebilir yeraltı suyu yönetiminin temel adımlarıdır. DSİ (2023). Birçok ülke, özellikle yoğun tarımsal çekim görülen bölgelerde, kota uygulaması ile önemli başarılar elde etmiştir. Zorunlu lisans sistemi, çekim limitlerinin belirlenmesi, tarımda zorunlu verimlilik artışı etkin yönetim araçları arasında yer almaktadır.

5.3. Otomatik İzleme Sistemleri, Uzaktan Algılama ve Sayaç Zorunluluğu

Kuyularda sayaç zorunluluğu yeraltı suyu yönetiminde en temel denetim mekanizmasıdır. Su kullanımı ölçülmeden hiçbir ülkede sürdürülebilir bir yeraltı suyu yönetimi sağlanamamaktadır. Uzaktan

algılama ve otomatik izleme teknolojilerinin birlikte kullanılmasıyla çekim-beslenme dengesinin gerçek zamanlı yönetilebildiğini; su seviyesindeki kritik düşüşlerin anında tespit edilebildiğini ve deniz suyu girişiminin erken uyarı sistemleri ile önlenemediğini göstermektedir. Sayaç zorunluluğunun sağladığı temel kazanımlar arasında, çiftçi-sanayi-belediye abonelerinin beyan ettiği çekim miktarlarının gerçek değerlerle karşılaştırılabilmesi, kullanım davranışlarının analiz edilebilmesi ve aşırı çekimin hızlı şekilde tespit edilip sınırlandırılabilmesi bulunmaktadır. Bu durum su bütçesinin doğru çıkarılmasını ve sürdürülebilir çekim kapasitesinin izlenmesini mümkün kılar. MODFLOW gibi havza bazlı yeraltı suyu modelleri için ölçülmüş güvenilir debi verilerinin elde edilmesi de sayaç uygulamalarının en kritik teknik faydalarından biridir. OECD çalışmaları, sayaç zorunluluğunun kaçak su kullanımını %30-60 oranında azalttığını ortaya koymaktadır (OECD, 2010). Ayrıca doğru ölçüm, su fiyatlandırmasının adil yapılmasını sağlar; ekonomik araçların su tasarrufunu teşvik etmesini mümkün kılar.

5.4. Tarımsal Sulamada Verimlilik ve Ürün Deseni Planlaması

Tarımsal sulama, birçok ülkede yeraltı suyu kullanımının %65-90'ını oluşturmaktadır. Damla sulama, düşük basınçlı sulama teknolojileri, tuzluluk dayanımı yüksek veya daha az su isteyen alternatif ürün desenleri ile çiftçilere yönelik eğitim ve teşvik modellerinin birlikte uygulanması, yeraltı suyu çekim ihtiyacını %20-40 azaltabilmektedir.

5.5. Geri Kazanılmış Suyun Kullanımı ve Entegre Su Yönetimi

Birçok ülke, arıtılmış atık suyu yeraltı suyu besleme (MAR) veya sulama amaçlı kullanarak çekim baskısını azaltmaktadır.

5.6. Hukuki ve Kurumsal Reformlar

Sürdürülebilir yeraltı suyu yönetimi için suyun kamu malı olarak kabul edilmesi, lisans-izin sisteminin güçlendirilmesi, havza bazlı yönetim ilkesinin benimsenmesi, ekonomik araçların mevzuata entegre edilmesi, denetim-yaptırım kapasitesinin artırılması, veri yönetim altyapısının geliştirilmesi ve çok paydaşlı havza kurulları aracılığıyla karar alma süreçlerinin desteklenmesi gerekmektedir.

5.7. Yeraltı Barajları ve Yapay Beslenme Uygulamaları

Yeraltı barajları, suyun yüzeyde buharlaşarak kaybolmasını önleyip akifer içinde depolanmasını sağlayarak yeraltı suyu rezervlerini güçlendirir. Yağışlı dönemlerde akifer beslenimini artırarak su tablasını yükseltir ve aşırı çekimin olumsuz etkilerini azaltır (FAO, 2010). Kıyı bölgelerinde tatlı su basıncını artırarak deniz suyu girişimini yavaşlatır. Yeraltı suyu yapay besleme (MAR) uygulamaları; yüzey sularının havza, baraj, hendek, kanal, oluk ve kuyu gibi mühendislik yapılarıyla toplanması ve kontrollü infiltrasyon yoluyla akifere iletilmesi temeline dayanır. Yönetilir Akifer

Beslemesi (MAR- Managed Aquifer Recharge), su tablasını dengeleme, tuzlanma riskini azaltma, taşkın kontrolüne katkı sağlama, su kalitesini iyileştirme ve kurak dönemlerde tampon su kaynağı oluşturma gibi çok sayıda fayda sunmaktadır. Aşırı çekim nedeniyle düşen su seviyeleri, MAR uygulamaları ile yeniden dengelenebilir. Kıyı akiferlerinde tatlı su enjeksiyonu veya sızıntı havuzları ile tuzlu su girişimi kontrol altına alınabilmektedir. ASR (Aquifer Storage and Recovery- Yeraltı Suyu Depolama ve Geri Kazanımı) sistemleri ise arıtılmış suyun yeraltına enjekte edilip ihtiyaç anında geri çekilmesi prensibine dayanır. Bu yöntem "yeraltında doğal bir depolama tankı" işlevi görmektedir.

6. DEĞERLENDİRME

Yeraltı suyu, artan nüfus, yoğun tarımsal üretim, iklim değişikliği ve denetimsiz kullanım nedeniyle hızla tükenmekte ve ekosistemleri zayıflatmaktadır. İklim değişikliğine bağlı yağış rejimi bozulmaları, akifer beslenimini azaltarak antropojenik kuraklık süreçlerini şiddetlendirmektedir. Aşırı çekim, su seviyesinin düşmesine bağlı olarak tuzlu su girişimi, arazi çökmesi ve sulak alan kaybı gibi geri dönüşü zor süreçleri tetiklemektedir. Kıyı akiferlerinde aşırı pompajın tuzlu su girişimi hızlandığı çok sayıda çalışmada doğrulanmıştır. Sürdürülebilir yeraltı suyu yönetimi için tarımda su verimliliğinin artırılması, sulama yöntemlerinin modernize edilmesi ve ürün deseninin yeniden planlanması zorunluluktur. Bu yönetim anlayışı kapsamında MAR uygulamaları, yağmur suyu hasadı ve yeraltı barajları gibi yöntemlerle akiferlerin yapay olarak beslenmesi gerekmektedir. Mevzuat ve kurumsal yapının güçlendirilmesi, sürdürülebilir yönetimin bir diğer temel unsurudur. Ruhsatsız kuyuların kapatılması, sayaç zorunluluğu, uzaktan izleme sistemlerinin kurulması ve havza bazlı yönetim ilkelerinin benimsenmesi su bütçesinin kontrol altına alınmasını sağlayacak kritik adımlardır (OECD, 2015).



Şekil 5.1. Görünmez Su Rezervleri: Yeraltı suyu yönetimi

Dijital su yönetimi araçları—CBS tabanlı envanterler, gerçek zamanlı ölçüm ağıları ve hidrojeolojik modelleme sistemleri—yönetim süreçlerini daha etkin ve şeffaf hâle getirmektedir. Uydu yerçekimi verilerinin, yeraltı suyu azalımının bölgesel ve küresel ölçekte izlenmesinde kritik rol oynadığı gösterilmiştir. Ayrıca toplumsal farkındalık ve paydaş katılımı, özellikle tarım ve sanayi kullanıcılarının sürdürülebilir davranışlar geliştirmesi açısından temel bir bileşendir. Su kaynaklarının etkin yönetimi, güçlü denetim, dijital izleme sistemleri ve kurumlar arası eşgüdüm gerektirir.

Sonuç olarak yeraltı suyu, ekosistemlerin sürekliliği, tarımsal üretim, ekonomik kalkınma ve toplum refahı için vazgeçilmez niteliktedir. Bu nedenle görünmez bir su rezervi olarak ifade edilen yeraltı suyunun (Şekil 5.1) korunması; güçlü mevzuat, etkin izleme, modern sulama teknikleri, yapay besleme uygulamaları, dijital su yönetimi ve geniş katılımlı yönetimle desteklenmelidir. En temel önerilerden biri ise, kapsamlı izleme ağlarının kurulması ve tüm akiferlerde düzenli ölçüm yapılmasıdır. Nitekim ölçüme dayalı yönetim olmaksızın sürdürülebilir yeraltı suyu politikalarının başarıya ulaşamayacağı açıkça ifade edilmektedir.

BÖLÜM 6

KURAKLIKLILA MÜCADELEDE (XERISCAPE)

KURAKÇIL PEYZAJ UYGULAMALARI

1.GİRİŞ

Kurakçıl peyzaj (xeriscape), yerel iklim koşullarına uygun bitki seçimleri, toprak geliştirme, çok katmanlı bitkilendirme, malçlama (toprağın üstüne organik veya sentetik malzemeler serilerek bitki köklerinin etrafında bir tabaka oluşturmak), etkin sulama stratejileri ve su verimliliğini önceliklendiren tasarım ilkelerini birleştirerek peyzajda sulama ihtiyacını ciddi oranda azaltmayı amaçlar. Bu yaklaşım hem kentsel hem de kırsal alanlarda su talebinin düşürülmesi, ekosistem dayanıklılığının artırılması ve bakım maliyetlerinin azaltılmasına katkı sağlar (İsmaeil ve Sobaih 2022). Öyle ki çim alanların tamamında bölgeye ait türlerle kurakçıl peyzaj uygulamaları uygulandığı takdirde %80'e varan oranda su tasarrufu mümkün olabilmektedir (SYGM, 2024). Kurakçıl peyzaj uygulamalarının temel adımları Şekil 6.1.'de verilmiştir.



Şekil 6.1. Kurakçıl Peyzaj (Xerispace): Yeşilin Yeni Tanımı

2. DÜNYA GENELİNDE DURUM

İklim değişikliği ve artan sıcaklıklar nedeniyle kuraklık olaylarının sıklığı, süresi ve şiddeti küresel ölçekte artmaktadır; son yıllarda çok yıllık ve geniş alanlı kuraklıklar meydana gelebilmektedir. Bu eğilim, su kaynakları üzerindeki baskıyı artırmakta; şehir planlaması ve peyzaj uygulamalarında su tasarrufunu zorunlu kılmaktadır. Uluslararası

kuruluşlar, doğa temelli çözümler ve yerel adaptasyon önlemlerinin (ör. xeriscape, yağmur suyu yönetimi, yeniden kullanım) önceliklendirilmesi gerektiğini vurgulamaktadır (OECD, 2025; FAO, 2018).

3. TÜRKİYE'DE DURUM

Türkiye son yıllarda yaygın ve dönemsel kuraklıklar yaşamaktadır; bazı bölgelerde su depoları ve rezervuarlar kritik seviyelere inmiş, acil su kısıtlamaları uygulanmıştır. Türkiye’de su kullanımı, tarımın payı yüksek olmakla birlikte kentsel su talebi de artmaktadır; ulusal istatistikler su kullanımı ve atık su verilerini raporlamaktadır. Bu nedenle Türkiye için su tasarrufu sağlayan peyzaj uygulamalarının (ör. kurakçıl peyzaj) yaygınlaştırılması stratejik öneme sahiptir.

4. KURAKÇIL PEYZAJ UYGULAMALARININ FAYDALARI

- Su Tasarrufu: Xeriscape uygulamaları geleneksel çim/çim alanlara kıyasla su tüketimini %30–%80 arası azaltabilir; akademik çalışmalar ve vaka analizleri bu aralığı desteklemektedir. Şekil 6.2.’de bu duruma ait görsel verilmiştir.
- Enerji ve Maliyet Azaltımı: Daha az sulama pompalanması ve bakım gereksinimi sayesinde işletme maliyetleri ve enerji tüketimi düşer (Çetin vd., 2018).
- Ekosistem ve Biyoçeşitlilik: Yerel, kuraklığa dayanıklı bitki seçimleri ekosistemin yerel koşullara adaptasyonunu destekler ve monokültür çim alanların negatif etkilerini azaltır (FAO, 2018).
- Kentsel Isı Adası Etkisini Azaltma: Sağlıklı ve stratejik bitkilendirme, yüzey sıcaklıklarını dengeleyerek ısı adası etkisini hafifletebilir; kurakçıl yaklaşımlar bu etkiyi su kullanımı azaltarak dengeler (çalışmalarda kentsel yeşilin kaliteli korunmasının vurgu yapılması).



Şekil 6.2. Kurakçıl peyzaj uygulamaları

5. POLİTİKA VE ÇÖZÜM ÖNERİLERİ

5.1. TASARIM VE UYGULAMA

- Bölgesel/yerel bitki rehberleri oluşturulması: Her iklim bölgesi için yerli, kuraklığa dayanıklı bitki türleri veri tabanları hazırlanmalı; kamu ve peyzaj sektörüne açık olmalı. (Önerilen kuruluş: Tarım ve Orman Bakanlığı + yerel belediyeler).
- Toprak iyileştirme ve malç kullanımı: Toprak organik maddesinin artırılması ve geniş malç kaplamaları su tutma kapasitesini yükseltir; sulama sıklığını azaltır.

5.2. POLİTİKA, TEŞVİK VE DÜZENLEMELER

- Teşvik programları: Xeriscape geçişini desteklemek, teşvik etmek için yerel yönetimlere çim sökümü desteği, ücretsiz/indirimli yerel bitki dağıtımı veya su faturası indirimleri sağlanabilir.
- Regülasyon ve standartlar: Yeni imar uygulamalarında peyzaj su verimliliği kriterleri zorunlu hale getirilmeli; kamusal peyzajlarda su-etkin tasarım şartı getirilmelidir.

5.3. EĞİTİM VE TOPLUM KATILIMI

- Halk eğitimi ve gösterim bahçeleri: Vatandaşlar için uygulamalı eğitimler ve örnek xeriscape bahçeleri kurulmalı; başarı

hikâyeleri görünür yapılmalıdır. (Kamu bilgilendirmesi davranış değişikliğinde etkilidir).

6. ÇÖZÜMLER İÇİN YOL HARİTASI

- Belediye düzeyinde pilot projeler (okul/üniversite kampüsleri, parklar).
- Yerel bitki rehberi ve uygulama kılavuzu hazırlanması.
- Teşvik ve mali destek programlarının oluşturulması
- Diğer kuraklıkla mücadele yöntemleri ile entegrasyonun sağlanarak gerekli teknik standartların oluşturulması.
- Ülkemiz şartlarında yetiştirilebilecek kurakçıl peyzaj bitkileri Şekil 6.1.'de verilmiştir.



Şekil 6.1. Kurakçıl peyzaj amaçlı kullanılabilecek bitki türleri (SYGM, 2024)

7. DEĞERLENDİRME

Kurakçıl peyzaj; su kıtlığı, artan kuraklık riski ve şehirleşmenin yarattığı baskılara karşı etkili, maliyet-etkin ve doğa-temelli bir çözüm kümesi sunar. Türkiye'nin bölgesel çeşitliliği ve son yıllarda artan kuraklık vakaları göz önüne alındığında, xeriscape uygulamalarının yaygınlaştırılması hem kısa vadede su tasarrufu sağlayacak hem de uzun vadede ekosistem dayanıklılığını güçlendirecektir. Uygulama, teknik rehberlik, teşvik mekanizmaları ve halk eğitimi ile beraber yürütüldüğünde etkisi katlanacaktır.

BÖLÜM 7

SANAYİDE ZLD (SIFIR SIVI DEŞARJİ)

UYGULAMALARI

1.GİRİŞ

ZLD (Sıfır Sıvı Deşarj) sanayi atıksularının arıtılarak tüm suyun geri kazanıldığı ve kalan atığın yalnızca katı yan ürün olduğu bir stratejidir. Özellikle su kıtlığının yaşandığı bölgelerde, su geri kazanımı ve çevresel koruma açısından kritik bir yöntemdir. ZLD teknolojileri günümüzde olgunlaşmış durumda olsa da yatırım ve işletme maliyetleri bakımından yüksek olabilir; bu nedenle uygulama kararı verirken sektör, atık su bileşimi, su ihtiyacı, ekonomik fizibilite ve mevzuat gibi unsurların birlikte değerlendirilmesi gerekir (GEA, 2025; GESU, 2025).

2. DÜNYADAKİ DURUM, ÖRNEK UYGULAMALAR

- ZLD'ye ilgi küresel ölçekte artmaktadır. Tekstil, deri, kimya, petrokimya, enerji (özellikle termik santraller — baca gazı arıtımı), mineraller vb. yüksek tuzluluk veya kirletici yükü olan sektörlerde ZLD çözümleri yaygınlaşmaktadır (Lenntech, 2025)
- Son yıllarda yapılan araştırmalar, Revers Ozmoz (RO)/membran + evaporasyon/kristalizasyon hibrit sistemlerin teknik ve ekonomik açıdan daha rekabetçi olduğunu göstermektedir (Panagopoulos ve Giannika, 2024).
- Özellikle enerji sektöründe, baca gazı desülfürizasyon atıksularında ZLD uygulamaları üzerine artan bir araştırma ilgisi vardır; bu sayede su geri kazanımı artırılmakta, atık su deşarjı sıfıra indirilebilmektedir (Liao ve ark., 2025).

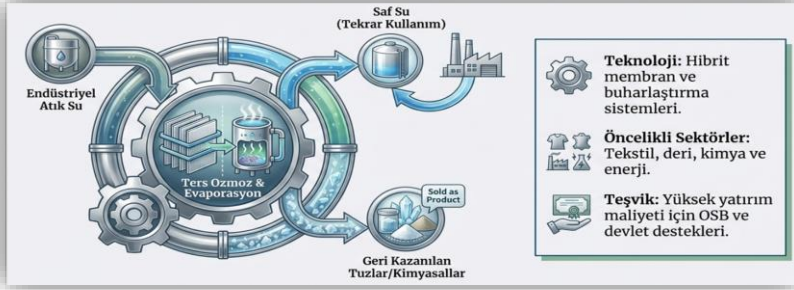
3. TEMEL ZLD TEKNOLOJİLERİ

ZLD sistemleri genellikle üç ana aşamadan oluşur: ön arıtma/ön-konsantrasyon, konsantrasyon, buharlaştırma ve kristalizasyon.

- **Ön-konsantrasyon:** Membran teknolojileri (ters osmoz, nanofiltrasyon, ileri ozmoz, elektrodializ vb.) kullanılarak atıksu tuz içeriği artırılır; bu, termal işlemlerde gereken enerji ve evaporatör boyutunu küçültür. (Lenntech, GESU, 2025)
- **Konsantrasyon & Kristalizasyon / Buharlaştırma:** Konsantre akış, evaporatör veya kristalleştirici kullanılarak su buharlaştırılır; su geri kazanılırken katı tuz veya tuzlu konsantre elde edilir.
- **Değerli yan ürün kazanımı:** Çözünmüş tuzlar / mineraller, geri kazanılabilir tuz, kimyasal veya mineral olarak toplanabilir; bu da

hem atık hacmini hem bertaraf maliyetini düşürür, bazen ek gelir sağlar. (Lenntech,2025)

Bu teknolojik yaklaşım, suyun yeniden kullanımı, atık hacminin azaltılması ve sektörel su/kirlilik yönetimi açısından “döngüsel ekonomi” (circular economy) açısından büyük avantaj sunar (Abdelfattah ve El-Shamy, 2025).



Şekil 7.1. Temel ZLD Teknolojileri

4. EKONOMİK VE TEKNİK DEĞERLENDİRME

- Örnek bir çalışmada, hibrit ZLD sistemlerinin yüksek yüzdelerde su geri kazanımı ve uygun enerji tüketimi ile teknik ve ekonomik olarak uygulanabilir olduğunu göstermiştir. Bu sistem, geleneksel buharlaşma havuzlarına göre daha fazla verimli bulunmuştur (Panagopoulos ve Giannika, 2024).
- Ancak MLD (Minimal Sıvı Deşarj) sistemlerinin enerji ve maliyet değerleri genellikle ZLD'den daha düşüktür; dolayısıyla endüstri ve kuruluşun su geri kazanım hedefi, atık su tuzluluk seviyesi ve ekonomik toleransı ZLD mi, yoksa daha düşük maliyetli MLD mi olacağı kararını etkilemektedir (O'Connell ve ark., 2024).
- Yine de ZLD sistemleri uzun vade de su alım maliyetlerini, atık su bertaraf maliyetlerini ve olası idari/cezai riskleri azaltarak toplam maliyeti düşürebilir; ayrıca su kıtlığı olan bölgelerde su güvenliğini sağlayabilir (Anjoami ve ark., 2025).

5. TÜRKİYE’DE MEVZUAT VE GENEL YAKLAŞIM

Türkiye’de ulusal düzeyde “her tesis için ZLD zorunluluğu” öngören bir yönetmelik olmamakla birlikte, atıksu deşarjı ve su kaynaklarının korunması yönünde çeşitli düzenlemeler mevcuttur. Özellikle OSB yönetimleri, belediyeler veya su idareleri (örneğin su idareleri) gerekli gördüklerinde ZLD veya ileri arıtma şartı getirebilirler. Ayrıca su kıtlığı olan ya da su kaynaklarının hassas olduğu bölgelerde, su geri kazanımı ve deşarj limiti hedefleri ZLD lehine çalışabilir. Ayrıca, Türkiye’de ZLD sistemlerini tanıtan ve kurulum sağlayan firmalar/bilgilendirici platformlar mevcuttur; bu da hem teknik farkındalık hem de uygulama kapasitesi açısından avantajdır (GESU, 2025).

Ancak herhangi bir ZLD projesi planlanırken, şu hususlar göz önünde bulundurulmalıdır:

- Atıksu karakterizasyonu (tuz, ağır metaller, organik yük, pH vs.)
- Su geri kazanım hedefi ve su ihtiyacı, katı atık yönetimi tuz/kimyasal geri kazanımı
- Finansal fizibilite (Yüksek sermaye harcamaları (CAPEX), Operasyonel Maliyetler (OPEX), enerji maliyeti vs.)
- Yerel mevzuat ve izin gereklilikleri

6. TÜRKİYE İÇİN GELİŞTİRİLMİŞ POLİTİKA ÖNERİLERİ

- Sektörel önceliklendirme: Tuzlu ve ağır yük içeren atıksu üreten sektörlerde (örn. tekstil, deri, kimya, enerji/petrokimya) ZLD uygulanabilirliğinin değerlendirilmesi.
- Pilot veya hibrit uygulamalar: Revers Ozmoz (RO) + evaporasyon/kristalizasyon hibrit sistemleri ile küçük–orta ölçekli tesislerde pilot uygulamalar yapılması; bu sayede hem teknik hem ekonomik fizibilite test edilebilir.
- Teşvik veya finansman mekanizmaları: Yüksek sermaye harcamaları gerektiren ZLD yatırımlarında devlet/OSB teşvikleri, uzun vadeli kredi veya hibeler ile finansman desteği sağlanabilir.
- Mevzuat ve rehber geliştirme: Ulusal veya bölgesel düzeyde “ZLD rehberi” hazırlanabilir; atıksu izinleri, deşarj limitleri ve kontrol mekanizmaları ZLD’ye yönlendirilebilir.
- Yan ürün değerlendirme – döngüsel ekonomi: ZLD sonucu oluşan katı tuz/kimyasal atığın değerlendirilmesi (tuz üretimi, kimyasal geri kazanımı vb.) ile atık maliyeti düşürülüp ek gelir sağlanabilir.

BÖLÜM 8

YÜZEYSEL SULARDA BUHARLAŞMANIN ÖNLENMESİ

1. GİRİŞ

Dünya, yüzeyinin %71'i suyla kaplı bir gezegendir ve bunun %97'si deniz suyudur. Deniz suyu insan tüketimi için nadiren mevcut olduğundan, dünya nüfusu küresel su dağılımında yalnızca %3'lük mevcut olan tatlı suya bağımlıdır. Mevcut tatlı suyun yalnızca %0.06'sına kolayca erişilebilir; geri kalanı donmuş kutup buzulları ve yeraltı sularından oluşmaktadır (Musie & Gonfa, 2023). İnsanların kullandığı tatlı su, yeryüzünde nispeten kısa sürelerle depolanır. Bu nedenle, sulama ve evsel su temini gibi su yönetimi faaliyetleri ve sel kontrol sistemleri, baraj ve rezervuar inşaatı yoluyla doğal tatlı su akışlarının değiştirilmesiyle iyileştirilir (Assouline & Narkis, 2021). Baraj rezervuarları, yerel su depolama sistemlerinin temel bileşenleridir ve yalnızca çeşitli ölçeklerde su yönetimi ve bütçelemesini etkilemekle kalmaz, aynı zamanda küresel nehir ağını ve ekosistem işleyişini de etkiler. Buharlaştırmanın göz ardı edilmesi, depolama verimliliğini etkileyebilir, su kıtlığı sorunlarını daha da kötüleştirebilir ve hatta paydaş su kaynakları üzerindeki olumsuz değişimlere sebep olabilir. Özellikle su stresi yaşanan bölgelerde bulunan baraj rezervuarları, bu değişikliklerden ciddi şekilde etkilenebilir (Nevermann et al., 2024).

Dünya, hızlı nüfus artışı, kentleşme, hızlı sanayileşme, küresel iklim değişikliği ve daha sıkı sağlık temelli su kalitesi standartları nedeniyle mevcut tatlı su kaynaklarının azalması nedeniyle artan temiz su taleplerini karşılamada muazzam zorluklarla karşı karşıyadır (Musie & Gonfa, 2023). Ayrıca, rezervuarlar iklim değişikliği ve insan faaliyetlerinin birleşik etkileri nedeniyle giderek artan bir baskı altındadır ve bu da su taleplerini karşılama kabiliyetlerini daha da tehlikeye atmaktadır (Nevermann et al., 2024). Tatlı su kaynakları küresel olarak azalıyor (Assouline & Narkis, 2021). 2050 yılında şiddetli su kıtlığı altında yaşayacak insan sayısının 2.7-3.2 milyar olacağı tahmin ediliyor. Dünya nüfusu için mevcut potansiyel suyun 1970 yılında 12.900 m³'ten 2000 yılında 7.000 m³'ün altına düştüğü ve 2025 yılına kadar kişi başına yılda 5.100 m³'e düşeceği tahmin edilmiştir. Dünyada çekilen tatlı su kaynağı miktarı artmaktadır. 2010 yılında dünyada toplam çekilen su miktarı 4000 km³ olarak gösterilmiş olup, bunun %68.75'i tarıma, %18.75'i sanayiye, %12.5'i ise belediyelere aittir. Sektörel su çekimi değerlendirmeleri üzerine yapılan tüm raporlarda, tarım sektörünün en fazla su kaynağı tükettiği görülmüştür. Tahıllar, et ve süt gibi tarımsal ürünler, ürün veya hizmet başına en büyük tatlı su hacmi kullanıcıları olup, sırasıyla %27, %22 ve %7'lik paya sahiptir (Musie &

Gonfa, 2023).

Bazı tahminler, depolanan suyun %50'ye kadarının küçük rezervuarlardan buharlaştığını, bunun da küresel nehir akışlarının yaklaşık %5'ine denk geldiğini ve evsel su tüketimini aştığını göstermektedir (Assouline & Narkis, 2021). Dünya genelinde rezervuarlardan kaynaklanan buharlaşma kayıplarının, endüstriyel ve evsel su kullanımlarının toplam tüketiminden daha fazla olduğu tahmin edilmektedir. Amerika-CONUS'taki 721 rezervuar için, 1985'ten 2014'e kadar uzun vadeli ortalama buharlaşmanın yılda 33.73 (31.00-36.24) milyon m³ olduğu bulunmuştur. Bu miktar, 2010 yılında Amerika Birleşik Devletleri'nde kamusal su temini için kullanılan yüzey suyunun %93'üne (%85-100) eşdeğerdir (Zhao & Gao, 2019). Yine ABD'nin Teksas eyaletindeki 200 rezervuardan yıllık buharlaşma kaybı, aktif depolama kapasitelerinin %20'sine eşittir (Zhang vd., 2017). ABD'nin kurak batı kesiminde yer alan Tahoe Gölü'nden uzun vadeli buharlaşma, toplam rezervuar çıkışının %40-60'ını oluşturmaktadır (Friedrich vd., 2018). Bu nedenlerle, verimli su kaynakları yönetimini daha iyi desteklemek için, doğru rezervuar buharlaşma bilgilerinin mevcut rezervuar işletme kurallarına dahil edilmesi şarttır (Zhao & Gao, 2019).

2. YÜZEYSEL SULARDA BUHARLAŞMA MİKTARININ BELİRLENMESİ

Buharlaşma, meteorolojik, coğrafik ile topoğrafik ve suyun kalitesi ile bulunduğu ortam özelliklerinden etkilenmektedir. Güneş radyasyonu, hava buhar basıncı, sıcaklık, basınç ve rüzgâr buharlaşmayı etkileyen önemli meteorolojik faktörler arasındadır. Buharlaşmanın gerçekleşeceği bölgenin, coğrafik konumu ve güneşe karşı konumu coğrafik ve topoğrafik özelliklerdendir. Su kütlelerinin büyüklüğü, tuzluluk durumu, bulanıklığı ve hareketliliği ise suyun kalitesi ve bulunduğu ortamın buharlaşmayı etkileyen özellikleri olarak sayılabilir (MGM, 2026).

Potansiyel evapotranspirasyon (ET_p), bol su kaynağı bulunan bir yüzeyden hem buharlaşma (evaporasyon) hem de terleme (transpirasyon) yoluyla uzaklaştırılabilecek en yüksek su miktarını ifade eder. Bu kavram, özellikle su rezervuarları gibi geniş alanların su talebinin analizinde daha uygun ve işlevsel bir ölçüt olarak kullanılmaktadır. Evapotranspirasyon modelleri, kütle transferine dayalı, sıcaklık temelli, radyasyon temelli ve hem aerodinamik hem de enerji dengesi unsurlarını kapsayan kombinasyon temelli modeller olmak üzere dört temel tanımlama düzeyine ayrılabilir. Kütle transferine dayalı ET_p modelleri yalnızca aerodinamik esaslara dayanmaktadır. Sıcaklık temelli modeller, Hargreaves ve Samani modeli gibi yalnızca sıcaklığı girdi olarak kullanmaktadır. Priestley-Taylor denklemi gibi radyasyon temelli modeller enerji dengesini dikkate almaktadır. Hem aerodinamik hem de enerji dengesi kombinasyon

modellerinde birleştirilebilir; Penman–Monteith modeli ET_p için örnek gösterilebilir. Mevcut ET_p modelleri analitik (tamamen fiziksel yasalara dayalı), mekanistik (fiziksel yasaları nedensellik ilişkilerine dayalı tahminlerde kullanan, örneğın orijinal Penman–Monteith modeli) veya ampirik (istatistiksel; deneysel gözlemlerden geliştirilen korelasyonlara dayalı, örneğın Hargreaves modeli) olabilmektedir. Ampirik modeller basitlikleri nedeniyle tercih edilse de fiziksel anlamdan ve bölgesel doğruluktan yoksundur. Buharlaşma ve evapotranspirasyon hesaplamalarında kullanılacak verilerin doğruluğú ve çeşitliliğı kritik öneme sahiptir; sıcaklık, radyasyon, rüzgâr hızı, nem ve güneşlenme süresi gibi girdiler ne kadar güvenilir ve kapsamlı olursa, mekanistik modellerin ampirik modellere göre üstünlüğú o kadar belirgin hale gelir. Yeterli ve doğru girdi verisi mevcut olduğunda, mekanistik yaklaşımların kullanımı ampirik modellere göre daha uygun olabilmektedir (Ghiat et al., 2021).

Günümüzde buharlaşmanın belirlenmesi amacıyla, doğrudan veya dolaylı yöntemlerle, yaprak alanı ölçümleri, yaprak sıcaklığı ölçümleri, Eddy kovaryans sistemleri, tartılı lizimetreler, gaz değışim sistemleri, uzaktan algılama yöntemleri kullanılabilir (Ghiat et al., 2021). Ülkemizde buharlaşma rasatları Meteoroloji Genel Müdürlüğú tarafından, açık su yüzeyinde yapılmakta ve tüm meteoroloji istasyonlarında Class A Pan tipi yuvarlak buharlaşma havuzları kullanılmaktadır (MGM, 2026).

3. YÜZEYSEL SULARDA BUHARLAşMA AZALTMA ÇALIşMALARI

Rezervuarlardan su kayıplarını azaltmak çok önemlidir. Buharlaşma oranları, atmosferik koşullar ve batimetri gibi çeşitli faktörlere bağıdır. Rezervuarlardan buharlaşma kayıplarını azaltma girişimleri arasında derinliğı artırmak, rüzgar kırıcılar kurmak veya su yüzeyini örtmek yer almaktadır. Farklı performans ve maliyetlere sahip, kimyasal tek katmanlar, yüzer elemanlar ve gölge yapıları gibi çeşitli çözümler araştırılmıştır (Assouline & Narkis, 2021).

Su rezervuarlarındaki buharlaşmayı azaltmaya yönelik çalışmalar 1960'larda, su yüzeyi için geçirimsiz bir bariyer oluşturan tek tabakalı moleküler filmler kullanılarak başlamıştır. O tarihten bu yana, buharlaşma kayıplarını daha iyi kontrol etmeye yönelik pek çok yöntem geliştirilmiştir. Bu teknikler arasında, yüzer örtüler veya askıda örtüler gibi fiziksel yöntemler öne çıkmaktadır. Ayrıca, basınçlı hava ile termal karıştırma yöntemi, derin rezervuarlarda buharlaşmayı azaltmada önemli bir potansiyele sahiptir. Bunun yanı sıra, biyolojik örtüler (örneğın su bitkileri, rüzgâr kıranlar ve hurma yaprakları) da su rezervuarlarındaki buharlaşma miktarını önemli ölçüde azaltabilmektedir (Waheeb Youssef & Khodzinskaya, 2019).

Baraj rezervuarları ve göllerin su yüzeylerinden buharlaşmayı

azaltmak amacıyla su yüzey alanı azaltılabilir, su yüzeyinin mekanik örtülerle kaplanması ve su yüzeylerinde kimyasalların kullanılması gibi yöntemler kullanılabilmektedir (Aida Kani Ahmat et al., 2023). Popüler yöntemlerden biri, su yüzeylerini örtmek ve buharlaşma kayıplarını bastırmak için kendiliğinden birleşen opak yüzen elemanlar kullanılabilmektedir (Şekil 8.1) (Assouline & Narkis, 2021).



Şekil 8.1. (Solda) Su depolarından buharlaşmayı azaltan yüzer opak elemanlar: Yüzen toplar ve altıgen karolar; (sağda) yüzer diskler (Assouline & Narkis, 2021)

Opak yüzer elemanlar buharlaşmayı azaltırken, kapalı rezervuardaki yüzer elemanlar arasındaki boşluklara güneş radyasyonunu, ışık iletimini ve gaz değişimini girmesini sınırlandırır (Aminzadeh et al., 2018; Maestre-Valero et al., 2011). Sıcaklık, ışık ve oksijen, rezervuarlardaki yaşamı ve su kalitesini etkileyen önemli faktörlerdir (Assouline & Narkis, 2021). Bazı olumlu etkiler, ışık eksikliğine (toksik alglerin büyümesinin önlenmesi) veya güneş radyasyonunun önlenmesi sonucu rezervuardaki daha soğuk suya (daha soğuk suda çözünmüş oksijenin artması) atfedilebilir. Ancak, ışık geçirgenliğinin ve oksijen tedarikinin azaltılmasının, aerobik organizmaların yaşamını ve kapalı rezervuarların kimyasal reaksiyonlarını etkileyeceği (Frodge vd., 1990; Stefan vd., 1995), kontrolsüz alg patlamalarına yol açacağı (Yao vd., 2010) ve dolayısıyla su kalitesini düşüreceği (ölü algler alg toksinleri salgılar) genel kabul görmüştür. Bu nedenle, buharlaşmayı azaltırken ışık geçirgenliğine ve hava ile yüzey suyu arasında teması izin veren yüzer elemanlar büyük önem taşıyabilir (Assouline & Narkis, 2021). Benzer amaçla yüzen güneş enerji sistemleri ile baraj rezervuarları yenilenebilir enerji

üretmek amacıyla da kullanılabilir. İlk yüzer güneş enerjisi santrali 2007 yılında Japonya'da kurulmuş ve bu teknolojiye olan pazar ilgisi 2016'dan beri artmıştır. Dünyada neredeyse tüm büyük ülkelerde artık mütevazı düzeyde yüzer güneş enerjisi kurulu kapasitesi bulunmaktadır (World Bank Blogs, 2024).

Su yüzeyinin yalnızca küçük bir yüzdesini kaplayan ancak rüzgar hızını önemli ölçüde azaltan ve sınır alt tabakasının özelliklerini etkileyen, çok yüksek gözenekliliğe sahip kafes benzeri yapılar kullanarak buharlaşmayı bastırma kavramı, nispeten geniş bir rüzgar hızı aralığı için laboratuvar koşullarında hazırlanmış ve araştırmacılar tarafından değerlendirilmiştir. İncelenen yapıların buharlaşma oranlarını %40-60 oranında azalttığı bulunmuştur. Kafes benzeri yapılar su yüzeyini kapladığında ölçülen buharlaşma oranları ile su yüzeyinin %91'ini kaplayan yüzen siyah toplardan elde edilen buharlaşma oranları arasındaki oran, 0'dan yüksek uygulanan rüzgar hızları için, 0,75'ten büyük bulunmuştur. Bu yapıların etkisinin, su yüzeyinin %50-85'ini kaplayan opak yüzen elemanların etkisine eşdeğer olduğu tahmin edilmiştir. Bu durum, önerilen konseptin, ışık ve oksijenin su kütlesine aktarılmasını sağlarken buharlaşma azaltmadaki yüksek verimliliği vurgulanmaktadır (Assouline & Narkis, 2021).

4. POLİTİKA VE ÇÖZÜM ÖNERİLERİ

İklim değişikliği, sıcaklık, rüzgar ve yağışlardaki değişiklikler yoluyla karadan ve su rezervuarlarından buharlaşma miktarını etkilemektedir. Yüzeysel sulardan buharlaşmanın daha kontrollü olması, su kaynakları yönetimi, iklim değişikliğinin etkilerinin azaltılması, sürdürülebilir kalkınma, enerji üretimi (hidroelektrik üretimi), ekolojik sonuçların anlaşılması, politika oluşturma, planlama ve uluslararası işbirliği için çok önemlidir.

Bu sebeple aşağıdaki kriterler göz önünde bulundurulmalı:

- Buharlaşmayı artırabilecek etkilerden uzak olan alanların tercihine daha fazla özen gösterilmeli, özellikle baraj gibi su depolama yapılarında rezervuar yüzey alanının mümkün olduğunca düşük ve rezervuar derinliğinin fazla olmasına özen gösterilmelidir.
- Projelerin bitiminde rüzgar azaltıcı ve çevre bölgedeki bitki ve ağaçlandırma çalışmaları gibi koruyucu tedbirler daha titizlikle yürütülmelidir.
- Sulama kanallarının mümkün olduğu kadar güneş ışığına maruz kalmadan tünel veya kapalı borularla iletimi gibi yöntemlerle projelendirilmesi de buharlaşma miktarını azaltacaktır.
- Özellikle buharlaşma miktarı fazla olan bölgelerde yeraltı barajları

gibi alternatif depolama yöntemleri tercih edilmelidir.

- Daha önce inşa edilmiş rezervuarlarda yüksek buharlaşma olanlarda, rezervuar su yüzeyinde ısınan üst kısmın, daha alt tabakadaki soğuk su ile yer değişimine imkan sağlayan yöntemler gibi modern metodlar araştırılarak buharlaşma azaltılabilir.
- Farklı iklim senaryoları altında baraj rezervuarlarının su bütçesi hesaplamalarına buharlaşma kayıplarını tahmin etme ve dahil etme konusunda nicel yeteneklerin güçlendirilmesi, etkili uyum ve azaltma stratejilerinin geliştirilmesini sağlayarak insanları ve işletmeleri korur. Bu amaçla uydu görüntülerinden buharlaşma tespiti çalışmalarının da önemi büyüktür.
- Fotovoltaik paneller gibi özellikle su yüzeyine ışık ve oksijen geçişine izin veren yüzer elemanlar, hem balıklar için uygun büyüme koşulları sağlayacak hem de değerli sulama suyu kayıplarını azaltacağı düşünülmektedir. Opak yüzer elemanlarla buharlaşma azaltma metodlarının farklı türdeki malzemelerle ele alınması ve etkileşimde bulunacağı sulardaki kalite değişimleri ile kara (balıklarla beslenen) ve su canlılarına etkileri değerlendirilmelidir.

BÖLÜM 9

KURAKLIKLA MÜCADELEDE KURAKLIK İNDEKSLERİ KULLANIMI

1. GİRİŞ

Kuraklık, yağışların normalden uzun süre düşük seyrettiği, buharlaşmanın arttığı ve su kaynaklarının sürdürülebilir kullanımının zorlaştığı bir doğal iklim olayıdır. Kuraklık indeksleri; yağış, sıcaklık, buharlaşma-terleme, akım ve toprak nemi gibi değişkenleri sayısal göstergelere dönüştürerek kuraklığın şiddetini, süresini ve yayılımını değerlendirmeye yarayan bilimsel araçlardır. Bu indeksler, kuraklıkla mücadelede erken uyarı, planlama ve karar destek sistemleri için temel veri sağlar.

2. KURAKLIK İNDEKSLERİNİN ÖNEMİ

- **Erken Uyarı ve İzleme:** Meteorolojik indeksler (ör. SPI, SPEI) sayesinde uzun vadeli yağış anormallikleri tespit edilebilir ve meteorolojik kuraklık erken dönemde izlenebilir. (Öz vd. 2024)
- **Çeşitli Kuraklık Türlerinin Belirlenmesi:** Farklı indeksler (meteorolojik, hidrolojik, tarımsal vb.) kuraklığın farklı yönlerini ortaya koyar; böylece sadece yağış eksikliği değil, su kaynaklarının durumu, tarımsal etkiler ve akarsu debileri de değerlendirilebilir. (Özmen, Batan, 2025)
- **Karar Verme Süreçlerine Bilimsel Dayanak:** Kuraklık indeksleri bilgiye dayalı karar verme sürecinde; su dağıtımı, sulama planlaması, tarımsal desteklerin zamanlaması ve acil durum önlemleri gibi politika alanlarını destekler.

3. TÜRKİYEDE KURAKLIK İNDEKSLERİ KULLANIMI

Türkiye, coğrafi konumu nedeniyle kurak ve yarı-kurak iklim kuşağında yer almakta ve özellikle yaz aylarında yağış miktarı düşük seyretmektedir. Bu durum kuraklık riskini artırmaktadır. Meteorolojik ve hidrolojik kuraklık indeksleri Türkiye’de farklı bölgelerin analizinde yaygın olarak kullanılmaktadır:

- SPI, SPEI ve RDI gibi indeksler Türkiye genelinde çeşitli meteorolojik istasyonlardan elde edilen uzun dönem verileriyle incelenmiş ve yağış azalmalarının kuraklık olaylarına yol açtığı belirlenmiştir. (Öz vd., 2024)
- Bölgesel vaka çalışmaları, Ülkemizin değişik illerinde farklı indekslerin kullanılarak kuraklığın zamansal ve mekânsal dağılımını ortaya koymuştur (Özmen, Batan, 2025).

- Çeşitli indeksler (SPI, CZI, MCZI, ZSI) Alanya gibi bölgelerde uygulanarak kuraklık değerlendirmeleri yapılmıştır. (Ghasemlounia, Utlu, 2024).

Bu ve benzer çalışmalarda elde edilen veriler ışığında Türkiye’de kuraklığın sadece yağış azalması değil aynı zamanda sıcaklık, buharlaşma ve su akışı değişimleriyle de ilişkili olduğu ortaya çıkmıştır.

4. POLİTİKA VE ÇÖZÜM ÖNERİLERİ

Kuraklık indekslerinden elde edilen veriler, kuraklıkla mücadele stratejilerinin bilimsel temelli olmasını sağlar. Aşağıdaki çözüm önerileri bu indekslerin etkin kullanımını amaçlar.

4.1. Erken Uyarı Sistemlerinin Geliştirilmesi

Meteorolojik ve tarımsal indeksler kullanılarak ulusal erken uyarı sistemleri kurulmalıdır. Bu sistemler, belirlenen eşik değerler aşıldığında yetkilileri ve tarım sektörünü önceden bilgilendirerek hazırlıklı olmalarını sağlayabilir. Meteoroloji Genel Müdürlüğü (MGM) ve SU Yönetimi Genel Müdürlüğü (SYGM) verilerinin entegre edilerek kuraklık erken uyarı haritalarının düzenli yayınlanması sağlanabilir. Kuraklık indekslerinin proaktif kullanımı Şekil 9.1.’de verilmiştir.



Şekil 9.1. Kuraklık indekslerinin proaktif kullanımının önemi

4.2. Kuraklık Risk Haritalama ve Planlama

Farklı indekslerle elde edilen veriler coğrafi bilgi sistemleri (CBS) ile haritalanarak bölgeler arası kuraklık risk farkları ortaya konmalıdır. Bu haritalar, özellikle sulama planlaması ve su tahsis politikalarında kullanılabilir.

4.3. Tarımsal Su Yönetimi ve Politikalar

Kuraklık indeksleri tarım sektörü için kritik planlama araçlarıdır. Su ihtiyacı yüksek ürünlerin yerine su tasarrufu sağlayan ürünlere yönelmek için indeks verileri kullanılabilir. Ayrıca sulama tekniklerinin etkinliği indeks verilerine göre optimize edilebilir.

4.4. İklim Değişikliği ve Uzun Vadeli Stratejiler

İndeksler, iklim modelleriyle birleştirilerek gelecekteki kuraklık eğilimleri tahmin edilmelidir. Böylece hem kısa vadeli müdahaleler hem de uzun vadeli uyum politikaları geliştirilebilir.

5. DEĞERLENDİRME

Kuraklık indeksleri, kuraklığın belirlenmesi, izlenmesi ve yönetilmesi için güçlü araçlardır. Türkiye’de hem meteorolojik hem de hidrolojik indeksler aktif olarak kullanılarak kuraklık analizleri yapılmakta ve farklı bölgelerde kuraklık riskini tanımlamaktadır. Bu indeksler, erken uyarı sistemlerinin kurulması, su yönetimi planlaması ve iklim değişikliğine uyum stratejilerinin geliştirilmesi gibi alanlarda bilimsel bir temel sunarak kuraklıkla mücadelede kritik rol oynar.

BÖLÜM 10

KOMPOST KULLANIMI VE SU TUTMA KAPASİTESİ

1. GİRİŞ

Kompostlama, organik atıkların kontrollü mikrobiyal ayrışma süreçleri sonucunda humus benzeri stabil bir ürüne dönüştürüldüğü biyolojik bir süreçtir. Günümüzde kompostlama yalnızca bir atık yönetim yöntemi olarak değil, aynı zamanda sürdürülebilir toprak yönetiminin temel bileşenlerinden biri olarak değerlendirilmektedir. Özellikle iklim değişikliğinin etkisiyle artan kuraklık riski, toprak-su ilişkilerini iyileştiren uygulamaların önemini daha da artırmıştır.

Kuraklık, tarımsal üretimi doğrudan etkileyen ve ekosistem dengesini bozan en önemli çevresel sorunlardan biridir. Bu nedenle suyun toprakta tutulmasını sağlayan doğal çözümler, modern tarım ve çevre yönetimi açısından kritik hale gelmiştir. Kompost uygulamaları bu noktada, hem toprağın fiziksel özelliklerini iyileştirmesi hem de biyolojik aktiviteyi artırması nedeniyle çok yönlü bir çözüm sunmaktadır.

2. KOMPOSTUN TOPRAK SU TUTMA KAPASİTESİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİ

Kompostun en önemli etkilerinden biri, toprağın su tutma kapasitesini artırmasıdır. Organik maddece zengin kompost, yüksek yüzey alanı ve hidrofilik yapısı sayesinde suyu adsorbe edebilmekte ve toprak içerisinde depolayabilmektedir. Yapılan çalışmalar, kompost uygulamalarının toprak su depolama kapasitesini %30–70 oranında artırabildiğini göstermektedir (Brown & Cotton, 2011).

Bu artış, özellikle kumlu ve düşük organik madde içeren topraklarda daha belirgin olmaktadır. Çünkü bu tür topraklar doğal olarak su tutma kapasitesi düşük sistemlerdir. Kompost ilavesiyle birlikte, bu topraklarda mikro ve makro gözenek yapısı iyileşmekte ve suyun tutulma süresi uzamaktadır.

Ayrıca kompost, suyun yalnızca tutulmasını değil, aynı zamanda bitkiler tarafından erişilebilir olmasını da sağlamaktadır. Bu durum, özellikle kurak dönemlerde bitkilerin su stresine girmesini geciktiren önemli bir faktördür (Zhao, F. J., 2015).

3. TOPRAK YAPISI VE İNFİLTASYON SÜREÇLERİ

Kompost uygulamaları, toprak agregat stabilitesini artırarak toprak yapısının iyileşmesine katkıda bulunur. Stabil agregatlar, toprağın daha gevşek ve gözenekli bir yapı kazanmasını sağlar. Bu durum, suyun toprağa

girişini kolaylaştırarak infiltrasyon hızını artırır.

Toprak yüzeyinde oluşan kabuklanma, suyun toprağa girişini engelleyen önemli bir sorundur. Kompost uygulamaları bu kabuklanmayı azaltarak yağış sularının daha etkin şekilde toprağa nüfuz etmesini sağlar. Böylece yüzey akışı azalır ve su kaybı minimuma indirilir (Amezket, 1999).

Bu mekanizma özellikle eğimli arazilerde büyük önem taşımaktadır. Çünkü yüzey akışı ile kaybolan su, hem verim kaybına hem de erozyona neden olmaktadır. Kompost uygulamaları bu iki sorunu aynı anda azaltabilen nadir yöntemlerden biridir.

4. BİTKİ FİZYOLOJİSİ VE KURAKLIK TOLERANSI

Kompostun etkileri yalnızca toprakla sınırlı değildir; bitki düzeyinde de önemli değişimlere neden olur. Organik madde, bitki kök gelişimini teşvik ederek köklerin daha geniş bir toprak hacmine yayılmasını sağlar. Bu durum, bitkilerin daha derin toprak katmanlarındaki suya ulaşmasını mümkün kılar.

Ayrıca kompost içerisinde bulunan humik maddeler ve mikrobiyal metabolitler, bitkilerin osmotik stres toleransını artırmaktadır. Bu sayede bitkiler, su eksikliği koşullarında hücrel su dengesini daha iyi koruyabilmektedir (Farooq et al., 2009).

Kompost uygulanmış topraklarda yetişen bitkilerin:

- Daha geç solma gösterdiği
- Fotosentetik aktivitelerini daha uzun süre koruduğu
- Kuraklık sonrası daha hızlı toparlandığı

literatürde açıkça ortaya konmuştur. Bu durum, kompostun tarımsal kuraklık yönetiminde kritik bir araç olduğunu göstermektedir.

Şekil 10.1. Kompost uygulamasının bitki kök gelişimi, toprak mikrobiyal aktivitesi ve su tutma süreçleri üzerindeki entegre etkisinin kavramsal gösterimi.

Kompost, toprak organik madde içeriğini artırarak kök gelişimini teşvik etmekte, mikrobiyal biyofilm oluşumunu desteklemekte ve böylece toprağın suyu tutma kapasitesini yükseltmektedir. Bu süreçlerin birlikte etkisi, bitkilerin kuraklık stresine karşı dayanıklılığını artırmakta ve su kullanım etkinliğini iyileştirmektedir (Farooq et al., 2009; de Vries et al., 2018).

Şekil 10.1’de, kompost uygulamasının toprak-bitki-mikroorganizma etkileşimi üzerindeki çok yönlü etkisi kavramsal olarak sunulmaktadır. Kompost, yüksek organik madde içeriği sayesinde toprağın fiziksel yapısını iyileştirerek kök gelişimi için daha uygun bir ortam

oluşturur. Gelişmiş kök sistemi, bitkilerin daha geniş bir toprak hacminden su alabilmesini sağlayarak kuraklık koşullarında hayatta kalma şansını artırır.

Bunun yanı sıra kompost, toprakta mikrobiyal aktiviteyi artırarak biyolojik süreçleri güçlendirir. Mikroorganizmalar tarafından üretilen ekstraselüler polisakkaritler ve biyopolimerler, toprak partiküllerini bir arada tutarak agregat stabilitesini artırır ve suyun toprakta tutulmasına katkı sağlar. Aynı zamanda mikrobiyal biyofilm oluşumu, suyun buharlaşmasını azaltarak toprak neminin korunmasına yardımcı olur.

Bu fiziksel ve biyolojik süreçlerin birleşik etkisi, bitkilerin osmotik stres toleransını artırmakta ve kuraklık koşullarında fizyolojik aktivitelerini daha uzun süre sürdürebilmelerine olanak tanımaktadır. Dolayısıyla kompost uygulamaları, yalnızca toprak özelliklerini iyileştirmekle kalmayıp, aynı zamanda bitki-toprak sisteminin genel dayanıklılığını artıran entegre bir mekanizma sunmaktadır.

5. MİKROBİYAL AKTİVİTE VE BİYOLOJİK DİRENÇ

Toprak mikrobiyal çeşitliliği, sağlıklı bir ekosistemin en önemli göstergelerinden biridir. Kompost uygulamaları, toprakta mikroorganizma sayısını ve çeşitliliğini artırarak biyolojik aktiviteyi güçlendirir.

Mikroorganizmalar tarafından üretilen polisakkaritler, toprağın su tutma kapasitesine doğrudan katkıda bulunur. Aynı zamanda bu bileşikler, toprak agregatlarının stabilitesini artırarak yapısal dayanıklılığı güçlendirir.

Biyofilm oluşumu ise suyun toprak içerisinde tutulmasını destekleyen bir diğer önemli mekanizmadır. Bu süreçler sayesinde toprak, kuraklık koşullarında daha dirençli hale gelir (de Vries et al., 2018).

Ayrıca mikrobiyal çeşitliliğin artması, toprağın iklim değişikliğine karşı adaptasyon kapasitesini artırır. Bu durum, uzun vadeli ekosistem sürdürülebilirliği açısından büyük önem taşımaktadır.

6. KARBON SEKESTRASYONU VE UZUN VADELİ ETKİLER

Kompost uygulamalarının bir diğer önemli etkisi, toprak organik karbonunun artırılmasıdır. Organik karbon, toprak yapısının stabilitesini artırırken aynı zamanda su tutma kapasitesini de iyileştirir.

Karbon sekestrasyonu, atmosferdeki CO₂ seviyelerinin azaltılmasına katkıda bulunarak iklim değişikliği ile mücadelede önemli bir rol oynar. Bu bağlamda kompost uygulamaları, yalnızca yerel ölçekte değil, küresel ölçekte de çevresel faydalar sağlamaktadır (Lal, 2004).

Uzun vadede değerlendirildiğinde, kompost uygulamaları:

- Toprak verimliliğini artırır
- Su kullanım etkinliğini yükseltir

- Ekosistem dayanıklılığını güçlendirir

Bu özellikleri ile kompost, sürdürülebilir tarımın vazgeçilmez bir bileşeni olarak kabul edilmektedir.

7. GENEL DEĞERLENDİRME VE SONUÇ

Kompostlama, kuraklığı doğrudan ortadan kaldıran bir yöntem olmamakla birlikte, kuraklık etkilerini azaltan en etkili toprak yönetimi stratejilerinden biridir. Fiziksel, kimyasal ve biyolojik süreçlerin birlikte etkisiyle toprağın su tutma kapasitesini artırmakta ve bitkilerin kuraklık stresine karşı dayanıklılığını güçlendirmektedir.

Bu bağlamda kompost uygulamaları, özellikle kurak ve yarı kurak bölgelerde sürdürülebilir su yönetimi açısından kritik bir rol oynamaktadır. Ancak maksimum faydanın sağlanabilmesi için uygulama miktarı, toprak tipi ve iklim koşullarının birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir.

Sonuç olarak kompostlama, kuraklıkla mücadelede doğa temelli, sürdürülebilir ve etkili bir yaklaşım olarak öne çıkmakta; hem tarımsal üretimin devamlılığını hem de ekosistem sağlığını destekleyen çok yönlü bir çözüm sunmaktadır.

8. TÜRKİYE İÇİN POLİTİKA ÖNERİLERİ

İklim değişikliğinin etkilerinin giderek belirginleştiği günümüzde, Türkiye’de özellikle yarı kurak ve kurak bölgelerde su kaynaklarının sürdürülebilir yönetimi öncelikli bir konu haline gelmiştir. Bu bağlamda, toprak su tutma kapasitesini artıran doğa temelli çözümler arasında yer alan kompost uygulamaları, yalnızca tarımsal verimlilik açısından değil, aynı zamanda çevresel sürdürülebilirlik açısından da stratejik bir önem taşımaktadır. Ancak bu potansiyelin etkin bir şekilde değerlendirilebilmesi, bütüncül ve uygulanabilir politika yaklaşımlarının geliştirilmesine bağlıdır.

Türkiye’de tarım topraklarının önemli bir kısmının düşük organik madde içeriğine sahip olduğu bilinmektedir. Bu durum, suyun toprakta tutulmasını zorlaştırmakta ve kuraklık etkilerini daha da şiddetlendirmektedir. Dolayısıyla kompost uygulamalarının yaygınlaştırılması, yalnızca alternatif bir uygulama değil, aynı zamanda yapısal bir ihtiyaç olarak değerlendirilmelidir. Bu doğrultuda, Tarım ve Orman Bakanlığı tarafından organik madde artırımını teşvik eden destek mekanizmalarının geliştirilmesi önem arz etmektedir. Kompost kullanımının doğrudan destek kapsamına alınması, çiftçilerin bu uygulamaya yönelmesini kolaylaştıracaktır.

Bunun yanı sıra, belediyeler tarafından yürütülen katı atık yönetim sistemlerinin kompost üretimini destekleyecek şekilde yeniden yapılandırılması gerekmektedir. Özellikle büyükşehirlerde organik atıkların kaynağında ayrı toplanması ve uygun tesislerde kompostlaştırılması, hem atık miktarını azaltacak hem de tarımsal üretim için değerli bir girdi

sağlayacaktır. Elde edilen kompostun tarımsal alanlarda değerlendirilmesi, döngüsel ekonomi yaklaşımının somut bir örneğini oluşturacaktır.

Kompost uygulamalarının kuraklık yönetimi politikalarına entegre edilmesi de önemli bir diğer husustur. Türkiye’de yürütülen kuraklık eylem planlarında, toprak organik madde içeriğinin artırılmasına yönelik somut hedeflerin belirlenmesi, bu alandaki uygulamaların etkinliğini artıracaktır. Özellikle su stresi yüksek bölgelerde kompost kullanımının yaygınlaştırılması, su kullanım etkinliğinin artırılmasına doğrudan katkı sağlayacaktır.

Eğitim ve yayım faaliyetleri de bu sürecin önemli bir bileşenidir. Çiftçilerin kompost üretimi ve uygulama teknikleri konusunda bilgilendirilmesi, uygulamaların sahada benimsenmesini hızlandıracaktır. Tarım il ve ilçe müdürlükleri ile üniversiteler arasında kurulacak iş birlikleri sayesinde, bölgesel koşullara uygun uygulama modelleri geliştirilebilir ve demonstrasyon alanları aracılığıyla bu uygulamalar yaygınlaştırılabilir.

Diğer yandan, kompost kalitesine ilişkin standartların belirlenmesi ve etkin bir denetim mekanizmasının oluşturulması gerekmektedir. Tarımsal üretimde kullanılacak kompostun belirli kalite kriterlerini sağlaması, hem toprak sağlığı hem de ürün güvenliği açısından büyük önem taşımaktadır. Bu kapsamda ulusal düzeyde standartların geliştirilmesi ve uygulanmasının sağlanması, kompost kullanımına olan güveni artıracaktır.

Son olarak, kompost uygulamalarının iklim değişikliği ile mücadele politikaları kapsamında değerlendirilmesi gerekmektedir. Toprak organik karbonunun artırılması yoluyla karbon sekestrasyonuna katkı sağlayan bu uygulamalar, Türkiye’nin iklim hedefleri ile uyumlu bir araç niteliğindedir. Bu nedenle kompost uygulamalarının karbon yönetimi stratejilerine entegre edilmesi ve uygun teşvik mekanizmaları ile desteklenmesi, uzun vadeli çevresel faydalar sağlayacaktır.

Sonuç olarak, kompost kullanımı Türkiye için yalnızca bir atık yönetimi alternatifi değil; su yönetimi, toprak verimliliği ve iklim değişikliğine uyum açısından çok boyutlu bir çözüm sunmaktadır. Bu nedenle, politika yapıcılar tarafından çok paydaşlı ve entegre yaklaşımların benimsenmesi, kompost uygulamalarının yaygınlaştırılması açısından kritik bir gereklilik olarak karşımıza çıkmaktadır.

BÖLÜM 11

BULUT TOHUMLAMA VE KURAKLIK İLİŞKİSİ

1. GİRİŞ

Bulut tohumlama (cloud seeding), atmosferde mevcut bulunan bulutların mikrofiziksel özelliklerini değiştirerek yağış oluşumunu artırmayı amaçlayan bir atmosferik modifikasyon tekniğidir. Bu yöntem, özellikle su kaynaklarının sınırlı olduğu bölgelerde ve kuraklık dönemlerinde alternatif bir su yönetimi aracı olarak gündeme gelmektedir. Ancak bulut tohumlamanın etkinliği ve kuraklıkla mücadeledeki gerçek rolü, çoğu zaman kamuoyunda algılandığından daha karmaşık ve sınırlıdır.

Kuraklık, yalnızca yağış eksikliği ile değil; atmosferik nem, sıcaklık, rüzgâr rejimleri ve büyük ölçekli iklim sistemlerinin etkileşimi sonucu ortaya çıkan çok boyutlu bir süreçtir. Bu nedenle bulut tohumlama uygulamalarının değerlendirilmesi, atmosfer dinamikleri, bulut mikrofiziği ve hidrolojik süreçlerin birlikte ele alınmasını gerektirir (Rogers, R. R., & Yau, M. K. 1989).

2. BULUT TOHUMLAMANIN MİKROFİZİKSEL MEKANİZMASI

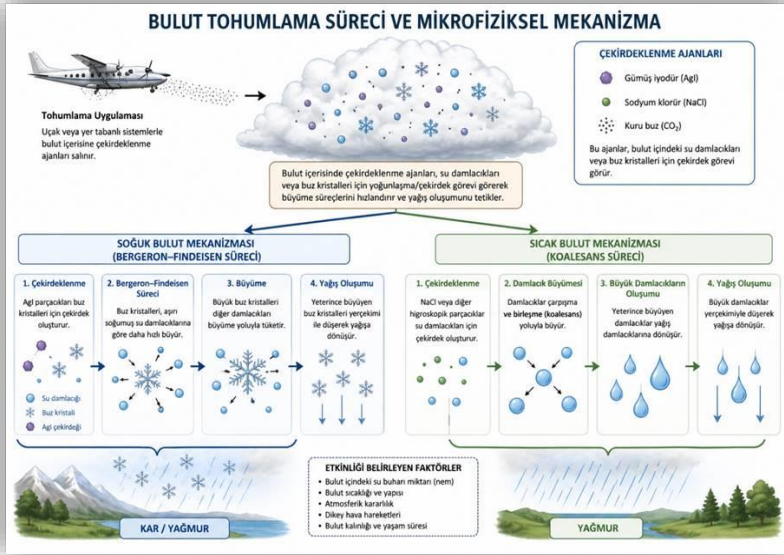
Bulut tohumlama, bulut içerisine çekirdeklenme ajanlarının verilmesi esasına dayanır. Bu ajanlar genellikle gümüş iyodür (AgI), sodyum klorür (NaCl) veya kuru buz (katı CO_2) gibi maddelerden oluşur. Bu parçacıklar, bulut içerisindeki su damlacıkları veya buz kristalleri için çekirdek görevi görerek yağış oluşum sürecini hızlandırır.

Şekil 11.1'de bulut tohumlama sürecinin temel mikrofiziksel mekanizmaları kavramsal olarak sunulmaktadır (Bruintjes, 1999). Bu süreçte, bulut içerisine verilen çekirdeklenme ajanları, su buharının yoğunlaşmasını kolaylaştırarak damlacık veya buz kristali oluşumunu başlatmaktadır. Özellikle soğuk bulut sistemlerinde, Bergeron-Findeisen mekanizması kapsamında buz kristalleri aşırı soğumuş su damlacıklarına kıyasla daha hızlı büyümekte ve çevresindeki su buharını tüketerek büyüklük kazanmaktadır. Bu büyüme süreci sonucunda kristaller yeterli boyuta ulaştığında yerçekimi etkisiyle düşerek yağış oluşturur.

Sıcak bulutlarda ise süreç farklı bir mekanizma ile ilerlemektedir. Higroskopik çekirdekler etrafında oluşan su damlacıkları çarpışma ve birleşme (koalesans) yoluyla büyür. Bu damlacıklar yeterli büyüklüğe ulaştığında yağmur damlasına dönüşerek yeryüzüne ulaşır (Rogers, R. R., & Yau, M. K. 1989).

Bununla birlikte, Şekil 11.1. den de görüldüğü üzere bu süreçlerin

etkinliği büyük ölçüde bulut içerisindeki nem miktarı, sıcaklık profili ve atmosferik kararlılık gibi faktörlere bağlıdır. Dolayısıyla bulut tohumlama, yalnızca uygun meteorolojik koşullar altında etkili olabilen ve doğal süreçleri hızlandıran bir mekanizma olarak değerlendirilmektedir.



Şekil 11.1. Bulut tohumlama sürecinin mikrofiziksel mekanizmasının şematik gösterimi.

Bulut içersine verilen çekirdeklenme ajanları (gümüş iyodür [AgI], sodyum klorür [NaCl] veya karbondioksit [CO₂]), su damlacıkları ve buz kristalleri için yoğunlaşma çekirdeği oluşturarak büyüme süreçlerini hızlandırır ve yağış oluşumunu tetikler. Soğuk bulutlarda Bergeron-Findeisen mekanizması ile buz kristalleri daha hızlı büyüyerek yağışa dönüşürken, sıcak bulutlarda damlacık birleşmesi (koalesans) süreci baskındır (Bruinjes, 1999).

Soğuk bulut sistemlerinde, Bergeron-Findeisen mekanizması devreye girer. Bu mekanizma kapsamında buz kristalleri, aşırı soğumuş su damlacıklarından daha hızlı büyür ve sonunda yer çekimi etkisiyle düşerek yağış oluşturur. Sıcak bulutlarda ise damlacıkların birleşmesi (koalesans) süreci hızlandırılarak yağış tetiklenir (Rogers, R. R., & Yau, M. K. 1989).

Ancak bu süreçlerin gerçekleşebilmesi için bulut içerisinde yeterli miktarda su buharı ve uygun termodinamik koşulların bulunması gerekmektedir. Aksi takdirde verilen çekirdekler, yağış oluşumuna katkı sağlayamaz.

3. KURAKLIK KOŞULLARINDA ETKİNLİK VE SINIRLAMALAR

Kuraklık koşulları, atmosferdeki nem miktarını azaltarak bulut oluşumunu sınırlar. Bu durum, bulut tohumlama uygulamalarının etkinliğini doğrudan etkileyen en önemli faktördür. Yapılan çalışmalar, uygun atmosferik koşullar altında bulut tohumlamanın yağış miktarında ortalama %5-15 oranında artış sağlayabildiğini göstermektedir. Ancak bu artış, oldukça değişken olup bulut tipi, sıcaklık, nem ve atmosferik kararlılık gibi parametrelere bağlıdır. (Laaksonen, A. and Malila, J. 2021)

Özellikle şiddetli kuraklık dönemlerinde atmosferde yeterli bulut bulunmadığından, bulut tohumlama uygulamaları çoğu zaman düşük verimle sonuçlanmaktadır. Bu nedenle bulut tohumlama, en çok ihtiyaç duyulan koşullarda sınırlı etki gösteren bir yöntem olarak değerlendirilmektedir (Silverman, 2003).

4. HİDROLOJİK ETKİLER VE SU KAYNAKLARINA KATKI

Bulut tohumlama uygulamalarının hidrolojik etkileri genellikle kısa vadeli olarak değerlendirilmektedir. Bu uygulamalar, özellikle baraj havzalarında yapıldığında su seviyelerinde geçici artışlara neden olabilmektedir.

Ancak hidrolojik modelleme çalışmaları, bu artışların uzun vadeli kuraklık eğilimlerini değiştirmedikçe göstermektedir (Kang, N. Y., ve Elsner (2015), kuraklığın büyük ölçüde iklim sistemleri tarafından kontrol edildiğini ve yerel müdahalelerin bu sistemler üzerindeki etkisinin sınırlı olduğunu ortaya koymuştur (Kang, N. Y., & Elsner, J. B. 2015)

5. İKLİM SİSTEMLERİ İLE İLİŞKİSİ

Kuraklık, büyük ölçüde makro ölçekli iklim sistemleri tarafından kontrol edilmektedir. El Niño-La Niña döngüleri, jet akımı değişimleri ve bölgesel atmosferik sirkülasyonlar, yağış rejimlerini belirleyen temel faktörlerdir.

Bu bağlamda bulut tohumlama, bu büyük ölçekli süreçleri değiştirebilecek bir kapasiteye sahip değildir. Dolayısıyla kuraklığın temel nedenlerini ortadan kaldırmak yerine, yalnızca mevcut koşullar altında sınırlı bir iyileştirme sağlayabilmektedir.

6. EKONOMİK VE OPERASYONEL DEĞERLENDİRME

Bulut tohumlama uygulamalarının maliyet-etkinliği de önemli bir tartışma konusudur. Uygulama maliyetleri, kullanılan ekipman, uçuş operasyonları ve kimyasal maddeler nedeniyle oldukça yüksek olabilmektedir.

Bu nedenle elde edilen su miktarının ekonomik değeri ile uygulama maliyetlerinin karşılaştırılması gerekmektedir. Bazı durumlarda

bulut tohumlama, maliyet açısından sürdürülebilir bir çözüm olmayabilir.

Ayrıca operasyonel açıdan, uygulamaların doğru zaman ve yerde yapılması büyük önem taşımaktadır. Uygun meteorolojik koşulların yakalanamaması durumunda, yapılan müdahaleler etkisiz kalabilmektedir.

7. KURAKLIK YÖNETİMİNDEKİ YERİ

Bulut tohumlama, kuraklıkla mücadelede tek başına yeterli bir çözüm değildir. Ancak uygun koşullar altında uygulandığında, mevcut yağış potansiyelini artırarak su kaynaklarının desteklenmesine katkı sağlayabilir. Bu nedenle bulut tohumlama, genellikle entegre kuraklık yönetimi stratejilerinin bir parçası olarak değerlendirilmelidir. Su tasarrufu, sürdürülebilir tarım uygulamaları ve erken uyarı sistemleri ile birlikte kullanıldığında daha etkili sonuçlar elde edilebilir.

8. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Bulut tohumlama, kuraklık yönetiminde sınırlı ancak belirli koşullar altında fayda sağlayabilen bir atmosferik müdahale yöntemidir. Etkinliği büyük ölçüde mevcut meteorolojik koşullara bağlı olup, yağış artırma kapasitesi doğal süreçlerle sınırlıdır.

Bu nedenle bulut tohumlama, kuraklığın temel nedenlerini ortadan kaldıran bir çözüm değil; mevcut yağış potansiyelini optimize eden tamamlayıcı bir araç olarak değerlendirilmelidir.

Kuraklıkla mücadelede kalıcı çözümler, ancak entegre su yönetimi, iklim uyum politikaları ve sürdürülebilir kaynak kullanımı ile mümkün olacaktır.

9. POLİTİKA ÖNERİLERİ

Türkiye’de iklim değişikliğinin etkisiyle birlikte yağış rejimlerinde gözlenen düzensizlikler ve kuraklık sıklığındaki artış, alternatif su yönetimi araçlarının değerlendirilmesini gerekli kılmaktadır. Bu bağlamda bulut tohumlama uygulamaları, özellikle belirli meteorolojik koşullar altında yağışın artırılmasına katkı sağlayabilen tamamlayıcı bir yöntem olarak ele alınmalıdır. Ancak bu uygulamaların etkinliği sınırlı olduğundan, politika düzeyinde dikkatli, bilim temelli ve bütüncül bir yaklaşım benimsenmesi gerekmektedir.

Öncelikle, bulut tohumlama uygulamalarının Türkiye’de rastlantısal veya dönemsel müdahaleler yerine, meteorolojik veri temelli planlı programlar kapsamında yürütülmesi önem arz etmektedir. Meteoroloji Genel Müdürlüğü (MGM) tarafından sağlanan yüksek çözünürlüklü atmosferik veriler kullanılarak, uygun bulut sistemlerinin oluştuğu zaman ve bölgelerin belirlenmesi, uygulamaların etkinliğini artıracaktır. Bu doğrultuda, operasyonların yalnızca uygun nem, sıcaklık ve bulut yapısının bulunduğu durumlarda gerçekleştirilmesi gerekmektedir.

Bulut tohumlama faaliyetlerinin özellikle baraj havzaları ve su toplama alanları üzerinde yoğunlaştırılması, hidrolojik açıdan daha anlamlı sonuçlar elde edilmesini sağlayabilir. Türkiye’de su kaynaklarının önemli bir kısmının barajlara bağlı olması dikkate alındığında, bu tür hedef odaklı uygulamalar, kısa vadede su arzına sınırlı da olsa katkı sağlayabilir.

Bununla birlikte, bulut tohumlama uygulamalarının kuraklıkla mücadelede tek başına bir çözüm olarak sunulmaması gerekmektedir. Bu yöntem, ancak entegre su yönetimi stratejilerinin bir parçası olarak değerlendirildiğinde anlamlıdır. Su tasarrufu politikaları, modern sulama teknikleri, yeraltı suyu yönetimi ve doğa temelli çözümler ile birlikte ele alınması, uygulamaların toplam etkinliğini artıracaktır.

Ekonomik açıdan değerlendirildiğinde, bulut tohumlama operasyonlarının maliyet-etkinliğinin düzenli olarak analiz edilmesi gerekmektedir. Uygulama maliyetleri ile elde edilen su miktarı arasındaki ilişkinin ortaya konulması, kaynakların verimli kullanımı açısından kritik öneme sahiptir. Bu kapsamda, Türkiye’de gerçekleştirilen uygulamalara yönelik uzun dönemli izleme ve değerlendirme çalışmalarının artırılması gerekmektedir.

Ayrıca, bu alanda yürütülen faaliyetlerin bilimsel temellere dayanması için üniversiteler ile kamu kurumları arasında iş birliğinin güçlendirilmesi önemlidir. Atmosfer bilimleri, çevre mühendisliği ve hidroloji alanlarında yapılacak disiplinler arası çalışmalar, bulut tohumlama uygulamalarının etkinliğinin daha doğru değerlendirilmesine katkı sağlayacaktır.

Çevresel açıdan ise, kullanılan malzemelerin (özellikle gümüş iyodür) uzun vadeli etkilerinin izlenmesi gerekmektedir. Her ne kadar mevcut çalışmalar bu etkilerin düşük olduğunu gösterse de, Türkiye’ye özgü ekosistem koşullarında çevresel izleme programlarının oluşturulması ihtiyatlı bir yaklaşım olacaktır.

Son olarak, kamuoyunda bulut tohumlama uygulamalarına yönelik oluşabilecek yanlış algıların önüne geçilmesi amacıyla şeffaf bilgilendirme yapılması önem taşımaktadır. Bu yöntemin kuraklığı tamamen ortadan kaldıran bir çözüm olmadığı, yalnızca uygun koşullarda sınırlı katkı sağlayan bir araç olduğu açık bir şekilde ifade edilmelidir.

Sonuç olarak, bulut tohumlama Türkiye için belirli koşullar altında fayda sağlayabilecek bir uygulama olmakla birlikte, kuraklık yönetiminde ancak destekleyici bir araç olarak değerlendirilmelidir. Etkin ve sürdürülebilir sonuçlar elde edilebilmesi için bu uygulamaların bilimsel, ekonomik ve çevresel boyutlarıyla birlikte ele alınması ve entegre su yönetimi politikaları kapsamında uygulanması gerekmektedir.

BÖLÜM 12

ERKEN UYARI SİSTEMLERİ VE KURAKLIK İLİŞKİSİ

1. GİRİŞ

Kuraklık, diğer doğal afetlerden farklı olarak ani gelişmeyen, zaman içerisinde kademeli olarak ortaya çıkan ve etkileri giderek artan bir süreçtir. Bu özelliği nedeniyle kuraklık, çoğu zaman geç fark edilmekte ve müdahale süreci gecikmektedir. Ancak bu durum, erken uyarı sistemlerinin geliştirilmesi ile önemli ölçüde değişmiştir.

Erken uyarı sistemleri, kuraklığın başlangıç aşamasında tespit edilmesini sağlayarak etkilerinin azaltılmasına yönelik proaktif müdahaleleri mümkün kılar. Bu sistemler sayesinde, kuraklık henüz tam olarak hissedilmeden önce gerekli önlemler alınabilmekte ve su kaynaklarının daha etkin yönetilmesi sağlanmaktadır.

Modern erken uyarı sistemleri; uzaktan algılama teknolojileri, meteorolojik gözlemler, toprak nemi verileri ve modelleme tekniklerinin entegrasyonu ile çalışmaktadır. Bu sistemler yalnızca veri üretmekle kalmayıp, aynı zamanda karar vericilere anlamlı ve uygulanabilir bilgi sunmaktadır.

2. UYDU TABANLI TEKNOLOJİ

Uydu teknolojileri, kuraklık izleme ve erken uyarı sistemlerinin en önemli bileşenlerinden biridir. Geniş coğrafi alanları kapsayan gözlem kapasitesi sayesinde, uydu sistemleri atmosferik ve yüzey süreçlerini eş zamanlı olarak izleyebilmektedir.

Yağış miktarı, yüzey sıcaklığı, bitki örtüsü durumu, toprak nemi ve atmosferik su buharı gibi parametreler, uydu verileri aracılığıyla sürekli olarak takip edilebilmektedir. Bu veriler, kuraklığın erken aşamalarının tespit edilmesinde kritik rol oynamaktadır.

Özellikle SMAP (Soil Moisture Active Passive), MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) ve Sentinel uydu programları, kuraklık izleme çalışmalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu sistemler sayesinde, meteorolojik kuraklığın başlangıç aşamaları haftalar hatta bazı durumlarda aylar öncesinden tespit edilebilmektedir (AghaKouchak et al., 2015; Entekhabi et al., 2010).

Uydu verilerinin en önemli avantajlarından biri, geniş alanlarda homojen veri sağlayabilmesidir. Bu sayede bölgesel ve küresel ölçekte kuraklık analizleri yapılabilmekte ve farklı bölgeler arasında karşılaştırmalar mümkün hale gelmektedir.

3. TOPRAK NEMİ HARİTALARI VE TARIMSAL KURAKLIK

Toprak nemi, kuraklığın en erken ve en hassas göstergelerinden biri olarak kabul edilmektedir. Meteorolojik kuraklık genellikle yağış eksikliği ile başlarken, tarımsal kuraklık doğrudan toprak nemi ile ilişkilidir. Bu nedenle toprak neminin izlenmesi, kuraklık yönetimi açısından kritik bir öneme sahiptir.

Uydu tabanlı toprak nemi verileri ile yer tabanlı sensör ölçümlerinin birleştirilmesi, yüksek doğrulukta toprak nemi haritalarının oluşturulmasını mümkün kılmaktadır. Bu haritalar sayesinde, toprak su içeriğinde meydana gelen anomaliler erken aşamada tespit edilebilmektedir.

Araştırmalar, toprak nemindeki düşüşün çoğu zaman yağış eksikliğinden önce başladığını göstermektedir. Bu durum, toprak nemi verilerinin erken uyarı sistemlerinde kullanılmasının önemini ortaya koymaktadır (Dorigo et al., 2017).

Toprak nemi haritaları, özellikle tarımsal planlama açısından önemli bir karar destek aracıdır. Çiftçiler, bu veriler sayesinde sulama zamanlamasını optimize edebilmekte ve su kaynaklarını daha verimli kullanabilmektedir.

4. METEOROLOJİK KURAKLIK İNDEKSLERİ

Kuraklık indeksleri, kuraklığın şiddetini, süresini ve mekânsal dağılımını belirlemek amacıyla kullanılan matematiksel araçlardır. Bu indeksler, uzun dönem iklim verileri ile güncel meteorolojik verileri karşılaştırarak kuraklık durumunu sayısal olarak ifade eder.

En yaygın kullanılan kuraklık indeksleri arasında:

- SPI (Standardized Precipitation Index)
- SPEI (Standardized Precipitation Evapotranspiration Index)
- PDSI (Palmer Drought Severity Index)

yer almaktadır.

SPI, yalnızca yağış verilerine dayanırken, SPEI evapotranspirasyon etkisini de dikkate alarak daha kapsamlı bir değerlendirme sunmaktadır. PDSI ise toprak su dengesi temelli bir yaklaşımla kuraklığı analiz etmektedir.

Bu indeksler, yalnızca bilimsel analizlerde değil, aynı zamanda politika geliştirme süreçlerinde de önemli rol oynamaktadır. Kuraklık yönetimi stratejileri, büyük ölçüde bu indekslerden elde edilen verilere dayanmaktadır.

5. MOBİL BİLDİRİM SİSTEMLERİ VE DİJİTAL DÖNÜŞÜM

Teknolojik gelişmeler, kuraklık yönetiminde saha uygulamalarını önemli ölçüde geliştirmiştir. Özellikle mobil bildirim sistemleri, erken uyarı sistemlerinin son kullanıcıya ulaşmasını sağlayan kritik bir bileşen haline gelmiştir.

Mobil uygulamalar ve SMS tabanlı sistemler aracılığıyla çiftçilere ve su kullanıcılarına gerçek zamanlı kuraklık uyarıları iletilebilmektedir. Bu sistemler sayesinde kullanıcılar:

- Sulama planlarını güncelleyebilir
- Ekim zamanlamasını optimize edebilir
- Riskleri önceden değerlendirebilir

Bu durum, kuraklık etkilerinin azaltılmasında önemli bir avantaj sağlamaktadır.

Van der Burgt, F., ve arkadaşları (2018), mobil tabanlı erken uyarı sistemlerinin özellikle gelişmekte olan ülkelerde tarımsal verimliliği artırdığını ve su kullanım etkinliğini iyileştirdiğini göstermiştir (van der Burgt, F., 2018).

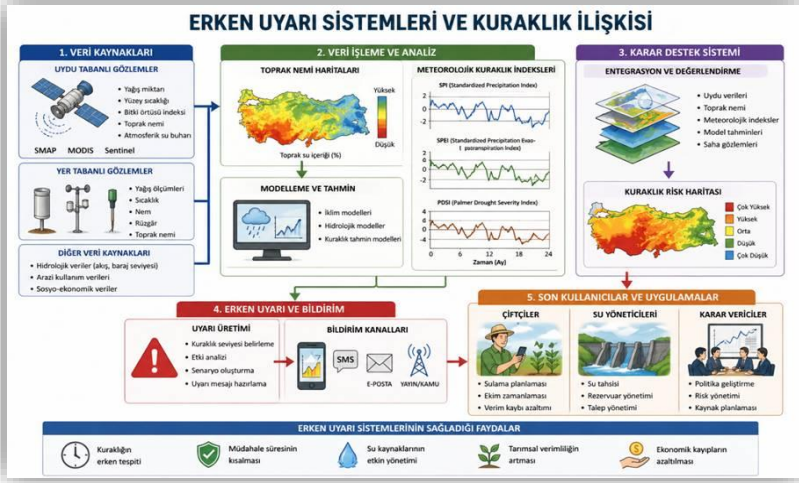
6. ERKEN UYARI SİSTEMLERİNİN ENTEGRASYONU

Erken uyarı sistemlerinin etkinliği, farklı veri kaynaklarının entegrasyonuna bağlıdır. Uydu verileri, toprak nemi ölçümleri, meteorolojik indeksler ve saha gözlemleri birlikte kullanıldığında daha güvenilir sonuçlar elde edilmektedir.

Bu entegrasyon sayesinde:

- Kuraklık daha erken tespit edilir
- Tahmin doğruluğu artar
- Müdahale süresi kısılır

Ancak bu sistemlerin başarısı, yalnızca teknik altyapıya değil, aynı zamanda veri paylaşımı ve kurumsal koordinasyona da bağlıdır.



Şekil 12.1. Erken Uyarı Sistemleri ve Kuraklık İzleme Süreçlerinin Entegre Yapısı

Şekil 12.1’de erken uyarı sistemlerinin kuraklık yönetimindeki çok katmanlı yapısı gösterilmektedir. Bu sistemler, farklı veri kaynaklarından elde edilen bilgilerin entegrasyonu ile çalışarak kuraklık riskinin erken aşamada belirlenmesini sağlar. Uydu verileri ve yer tabanlı ölçümlerden elde edilen bilgiler, modelleme ve analiz süreçlerinden geçirilerek anlamlı çıktılara dönüştürülür. Bu çıktılar, erken uyarı mekanizmaları aracılığıyla son kullanıcılara ulaştırılarak kuraklık etkilerinin azaltılmasına yönelik hızlı müdahalelerin gerçekleştirilmesine olanak tanır (Hao, Z., AghaKouchak, 2014).

7. KURAKLIK YÖNETİMİNDE BÜTÜNCÜL YAKLAŞIM

Kuraklık, yalnızca meteorolojik bir olay değil; aynı zamanda çevresel, ekonomik ve sosyal boyutları olan karmaşık bir süreçtir. Bu nedenle kuraklıkla mücadelede tek bir yöntem yeterli değildir.

Bu bağlamda:

- Kompost uygulamaları (toprak temelli çözüm)
- Bulut tohumlama (atmosferik müdahale)
- Erken uyarı sistemleri (teknolojik çözüm)

birlikte değerlendirildiğinde, daha etkili bir kuraklık yönetimi yaklaşımı ortaya çıkmaktadır.

Bu üç bileşen, farklı ölçeklerde etki göstererek birbirini tamamlamaktadır.

8. DEĞERLENDİRME VE SONUÇLAR

Erken uyarı sistemleri, kuraklık yönetiminde devrim niteliğinde bir dönüşüm sağlamıştır. Bu sistemler sayesinde kuraklık yalnızca izlenen bir süreç olmaktan çıkmış, yönetilebilir bir risk haline gelmiştir.

Uydu tabanlı gözlemler, toprak nemi haritaları, kuraklık indeksleri ve mobil bildirim sistemlerinin birlikte kullanılması, kuraklığın erken tespit edilmesini ve etkilerinin minimize edilmesini mümkün kılmaktadır.

Sonuç olarak, kuraklıkla mücadelede başarılı olmak için teknolojik sistemler ile doğal ve atmosferik çözümlerin birlikte kullanılması gerekmektedir. Bu bütüncül yaklaşım, sürdürülebilir su yönetimi ve iklim uyum stratejilerinin temelini oluşturmaktadır.

9. POLİTİKA ÖNERİLERİ

Türkiye’de kuraklık riskinin artması, erken uyarı sistemlerinin yalnızca teknik bir izleme aracı olarak değil, aynı zamanda su yönetimi ve tarımsal planlama süreçlerinin temel bileşeni olarak değerlendirilmesini gerekli kılmaktadır. Bu nedenle erken uyarı sistemlerinin ulusal ölçekte güçlendirilmesi, kuraklıkla mücadelede proaktif ve önleyici bir yaklaşımın geliştirilmesi açısından büyük önem taşımaktadır.

Öncelikle, Türkiye’de meteorolojik gözlem ağlarının, uydu verileri ve yer tabanlı sensör sistemleri ile daha güçlü biçimde entegre edilmesi gerekmektedir. Meteoroloji Genel Müdürlüğü, DSİ, Tarım ve Orman Bakanlığı ve yerel yönetimler arasında veri paylaşımını kolaylaştıracak ortak bir dijital platform oluşturulması, kuraklık riskinin daha hızlı ve doğru biçimde belirlenmesine katkı sağlayacaktır.

Tarımsal kuraklığın erken tespit edilebilmesi için toprak nemi izleme sistemlerinin yaygınlaştırılması önemlidir. Özellikle İç Anadolu, Güneydoğu Anadolu ve Ege gibi su stresi yüksek bölgelerde, toprak nemi haritalarının düzenli olarak güncellenmesi ve çiftçilerle paylaşılması gerekmektedir. Bu veriler, sulama zamanlamasının planlanması, ürün deseninin belirlenmesi ve su tüketiminin azaltılması açısından önemli bir karar destek aracı olarak kullanılabilir.

Kuraklık indekslerinin ulusal politika süreçlerinde daha etkin kullanılması da gereklidir. SPI, SPEI ve PDSI gibi indekslerden elde edilen sonuçlar, yalnızca bilimsel değerlendirmelerde değil, aynı zamanda tarımsal desteklerin planlanması, su tahsis kararları ve kuraklık eylem planlarının güncellenmesinde de dikkate alınmalıdır. Böylece müdahaleler kriz ortaya çıktıktan sonra değil, risk belirginleşmeden önce başlatılabilir.

Bunun yanında, erken uyarı bilgilerinin son kullanıcıya hızlı ve anlaşılır biçimde ulaştırılması gerekmektedir. Çiftçilere yönelik mobil uygulamalar, SMS bildirimleri ve bölgesel uyarı sistemleri

yaygınlaştırılmalıdır. Bu sistemler aracılığıyla çiftçilere sulama, ekim zamanı, ürün seçimi ve su tasarrufu konusunda pratik öneriler sunulabilir. Böylece erken uyarı sistemleri yalnızca veri üreten değil, sahada karar almayı kolaylaştıran aktif araçlara dönüşebilir.

Kurumsal koordinasyon, erken uyarı sistemlerinin başarısı açısından kritik bir unsurdur. Türkiye’de kuraklık yönetimi ile ilgili kurumlar arasında görev paylaşımının netleştirilmesi, veri akışının sürekliliğinin sağlanması ve yerel yönetimlerin sürece daha aktif katılması gerekmektedir. Özellikle havza bazlı yönetim anlayışı benimsenerek, her bölgenin iklim, toprak ve su kaynakları özelliklerine uygun erken uyarı modelleri geliştirilmelidir.

Ayrıca, erken uyarı sistemlerinden elde edilen verilerin afet yönetimi ve iklim uyum politikaları ile ilişkilendirilmesi önem taşımaktadır. Kuraklık, yalnızca tarımsal üretimi değil; içme suyu temini, enerji üretimi, ekosistem sağlığı ve gıda güvenliğini de etkileyen çok boyutlu bir risk olduğundan, erken uyarı çıktıları ulusal afet risk azaltma stratejilerine entegre edilmelidir. Sistemlerin sürdürülebilirliği için yerli yazılım, yapay zekâ destekli tahmin modelleri ve bölgesel karar destek sistemlerine yönelik Ar-Ge çalışmaları desteklenmelidir. Üniversiteler, kamu kurumları ve teknoloji firmaları arasında kurulacak iş birlikleri, Türkiye’ye özgü kuraklık erken uyarı modellerinin geliştirilmesine katkı sağlayacaktır.

Sonuç olarak, erken uyarı sistemleri Türkiye’de kuraklıkla mücadelede stratejik bir araç olarak ele alınmalıdır. Bu sistemlerin etkin kullanımı, su kaynaklarının korunmasına, tarımsal kayıpların azaltılmasına ve iklim değişikliğine uyum kapasitesinin artırılmasına önemli katkılar sağlayacaktır.

Kuraklık, günümüzde iklim değişikliği, artan su talebi ve doğal kaynakların sürdürülemez kullanımı ile birlikte giderek daha karmaşık ve etkili bir çevresel sorun hâline gelmiştir. Bu durum, kuraklığın yalnızca meteorolojik bir olay olarak değil, aynı zamanda hidrolojik, tarımsal ve sosyoekonomik boyutları olan çok katmanlı bir süreç olarak ele alınmasını gerektirmektedir. Bu bağlamda, kuraklıkla mücadelede tek boyutlu çözümler yerine, farklı ölçeklerde etkili olan yaklaşımların bütüncül biçimde değerlendirilmesi büyük önem taşımaktadır.

Bu çalışmada ele alınan kompost uygulamaları, bulut tohumlama teknikleri ve erken uyarı sistemleri, kuraklık yönetiminin üç farklı fakat birbirini tamamlayan bileşenini temsil etmektedir. Bu yaklaşımlar, sırasıyla toprak, atmosfer ve veri-temelli yönetim düzeylerinde etkili olmakta ve birlikte kullanıldıklarında daha sürdürülebilir bir kuraklık yönetimi çerçevesi oluşturmaktadır.

Kompost uygulamaları, kuraklıkla mücadelede doğa temelli

çözümler arasında öne çıkmaktadır. Organik maddece zengin kompost, toprağın su tutma kapasitesini artırarak bitkilerin kuraklık stresine karşı dayanıklılığını güçlendirmektedir. Bununla birlikte, toprak agregat stabilitesinin artması, infiltrasyon süreçlerinin iyileşmesi ve mikrobiyal aktivitenin güçlenmesi gibi etkiler, kompostun çok boyutlu bir fayda sağladığını göstermektedir. Literatürde yer alan çalışmalar, kompost uygulamalarının özellikle kurak ve yarı kurak bölgelerde su kullanım etkinliğini artırdığını ve tarımsal verimliliğin korunmasına katkı sağladığını ortaya koymaktadır (Brown & Cotton, 2011; Lal, 2004). Ancak bu etkinin, toprak tipi, uygulama miktarı ve iklim koşullarına bağlı olarak değişkenlik gösterebildiği de unutulmamalıdır.

Buna karşılık bulut tohumlama, atmosferik düzeyde müdahale imkânı sunan bir yöntem olarak değerlendirilmektedir. Uygun meteorolojik koşullar altında yağış miktarında belirli artışlar sağlanabilse de, bu yöntemin etkinliği büyük ölçüde atmosferde mevcut nem ve bulut varlığına bağlıdır. Özellikle şiddetli kuraklık koşullarında atmosferik nemin yetersiz olması, bulut tohumlamanın verimliliğini ciddi şekilde sınırlamaktadır. Bu nedenle bulut tohumlama, kuraklığı ortadan kaldıran bir çözümden ziyade, mevcut yağış potansiyelini optimize eden tamamlayıcı bir araç olarak görülmelidir. Ayrıca hidrolojik modellemeler, bu yöntemin uzun vadeli kuraklık eğilimleri üzerinde belirleyici bir etkisinin bulunmadığını ortaya koymaktadır (Silverman, 2003).

Erken uyarı sistemleri ise kuraklık yönetiminde en kritik dönüşümü sağlayan bileşenlerden biridir. Uydu tabanlı gözlemler, toprak nemi verileri, kuraklık indeksleri ve mobil bildirim sistemlerinin entegrasyonu sayesinde kuraklık riskleri önceden tespit edilebilmekte ve gerekli önlemler zamanında alınabilmektedir. Bu sistemler, kuraklığı yalnızca izlenen bir olay olmaktan çıkararak yönetilebilir bir risk haline getirmektedir (AghaKouchak et al., 2015; Dorigo et al., 2017). Özellikle gelişmekte olan ülkelerde mobil tabanlı erken uyarı sistemlerinin yaygınlaşması, kuraklık etkilerinin azaltılmasında önemli katkılar sağlamaktadır (van der Burgt, F., et al., 2018).

Bu üç yaklaşım birlikte değerlendirildiğinde, kuraklık yönetiminin çok katmanlı bir yapı gerektirdiği açıkça görülmektedir. Kompost uygulamaları toprakta suyun tutulmasını artırarak yerel ölçekte dayanıklılığı güçlendirirken, bulut tohumlama atmosferik düzeyde sınırlı ancak stratejik bir destek sunmaktadır. Erken uyarı sistemleri ise bu süreçlerin zamanında ve etkin şekilde yönetilmesini sağlayan bilgi altyapısını oluşturmaktadır.

Sonuç olarak, kuraklıkla mücadelede sürdürülebilir ve etkili bir strateji geliştirebilmek için bu üç yaklaşımın entegre biçimde uygulanması gerekmektedir. Doğa temelli çözümler, teknolojik sistemler ve atmosferik

müdahalelerin birlikte kullanıldığı bütüncül bir yaklaşım, kuraklık risklerinin azaltılmasında en yüksek potansiyeli sunmaktadır.

Gelecekte yapılacak çalışmaların, bu yaklaşımlar arasındaki etkileşimleri daha ayrıntılı şekilde incelemesi ve bölgesel koşullara özgü entegre modeller geliştirmesi önem taşımaktadır. Bu tür çalışmalar, hem bilimsel bilgi birikimini artıracak hem de uygulamaya yönelik daha etkili kuraklık yönetim stratejilerinin geliştirilmesine katkı sağlayacaktır.

BÖLÜM 13

HAVZA BAZLI SU YÖNETİMİ İLE

HİDROLOJİK KURAKLIKLILA MÜCADELE

1. GİRİŞ

Meteorolojik ve hidrolojik kuraklık arasındaki temel ayrım, sürecin etki süresi ve su kaynakları üzerindeki yansımalarıyla belirginleşmektedir. Yağış miktarındaki dönemsel düşüşlerle tanımlanan meteorolojik kuraklığın aksine; hidrolojik kuraklık, yüzey ve yeraltı suyu rezervlerindeki belirgin ve kalıcı azalmalarla karakterize edilmektedir. Rezervuarların ve akiferlerin yeniden dolum süreci zaman aldığından, hidrolojik kuraklığın etkileri yağışlar normale dönse dahi uzun süre devam etmektedir.

Su yönetimi perspektifinden bakıldığında, yağış miktarındaki azalış kadar, havzaya düşen suyun tutulmaması da kritik bir risk faktörü teşkil etmektedir. Yağış sularının infiltrasyona uğramadan veya depolanmadan yüzeysel akışla hızla havzayı terk etmesi, su potansiyelinin etkin kullanılamamasına neden olmaktadır. Özellikle kentleşme ile artan geçirimsiz yüzeyler ve bitki örtüsündeki tahribat, suyun toprakla buluşmasını engelleyerek yeraltı suyu beslenimini zayıflatmaktadır.

İklim değişikliği kaynaklı düzensiz yağış rejimleri ve artan antropojenik baskılar, Türkiye genelinde hidrolojik kuraklık riskini şiddetlendirmektedir. Nüfus artışı ve tarımsal sulama talebiyle birleşen su stresi, baraj doluluk oranlarında ve yeraltı suyu seviyelerinde ciddi düşüşlere yol açmaktadır.

Bu bağlamda "suyu havzada tutmak" yaklaşımı, sürdürülebilir su politikalarının merkezine yerleşmektedir. Suyun düştüğü yerde muhafaza edilmesini, akış hızının yavaşlatılmasını ve yeraltı rezervlerine kazandırılmasını hedefleyen stratejiler, kuraklık direncini artırmada belirleyici faktör olmaktadır.

2. HİDROLOJİK KURAKLIĞIN BİLEŞENLERİ

Hidrolojik kuraklık, havza ölçeğinde suyun depolanma ve yenilenme kapasitesinin zayıflamasıyla belirginleşen bir süreçtir ve yağış eksikliğine ek olarak su döngüsünün birden fazla bileşenindeki bozulmalarla birlikte ortaya çıkar (Kale, 2021; Öztürk et al., 2020). Yağışların zamansal dağılımındaki düzensizlik, yeraltı suyu besleniminin azalması, kar örtüsünün zayıflaması, kentleşmenin artırdığı geçirimsizlik ve arazi kullanımındaki dönüşümler, havzanın suyu tutma ve yavaşça salma mekanizmalarını sınırlamaktadır. Bu nedenle hidrolojik kuraklığın değerlendirilmesinde sadece meteorolojik koşullar değil, suyun havza

içindeki hareketi ve depolanmasını belirleyen fiziksel ve insan kaynaklı etkenlerin birlikte ele alınması gerekmektedir.

Yağış rejimindeki iklim değişiminin de etkisi ile oluşan eğilim, yağışın daha kısa sürede ve daha yüksek şiddetle gerçekleşmesi ile yağışsız periyotların uzamasıdır. Kısa süreli şiddetli yağışlar, toprağın infiltrasyon kapasitesini aştığında yüzey akışı artmakta; su hızlıca akarsu ağına katılıp havzayı terk ederken depolama mekanizmalarına az miktarda katkı sağlamaktadır (Hüseyin, 2014; Koçyiğit & Akay, 2018). Dolayısı ile taşkın ve ani sel olaylarını artırırken yeraltı suyu beslenimini ve yüzey depolamayı zayıflatarak kurak dönemlerde kullanılabilir suyu azaltmaktadır. Taşkın riski artarken, takip eden dönemlerde hidrolojik kuraklık şiddetlenebilmektedir.

Yeraltı suları, kurak dönemlerde akarsu taban akışını sürdüren ve su temini açısından en önemli doğal rezervdir (Güney, 2020). Uzun süreli kuraklık dönemlerinde beslenim azalırken, tarımsal ve kentsel çekimler devam ettiğinde akifer seviyeleri yenilenme hızının altına düşmekte ve bu durum hem yeraltı suyu stoklarını hem de yeraltı suyu ile ilişkili yüzey sularını olumsuz etkilemektedir. Akarsu debilerinde azalma eğilimleri, sulak alanlarda alan kaybı ve yeraltı su seviyesindeki gerilemeler, hidrolojik kuraklığın iklim sinyali ile insan kaynaklı çekim baskısının birleşmesiyle derinleştiğini göstermektedir (Mengü et al., 2011; Partigöç & Soğancı, 2019).

Kar örtüsü, özellikle yüksek havzalarda suyu mevsime yayarak doğal depolama ve yeraltı depolamasında toprağın infiltrasyon kapasitesini aşmadan yavaş besleme işlevi görmektedir (Colombo et al., 2023; Le et al., 2023). Artan sıcaklıklar nedeniyle kar birikimi azalmakta, kar erimesi daha erken dönemde gerçekleşmekte ve kış yağışlarında yağmur oranı artmaktadır. Yağış şeklinin yağmura dönüşmesi ilkbahar başında kısa süreli yüksek akımlar üretirken yaz döneminde beklenen beslemeyi azaltmakta; kurak sezonun su açığını büyütmektedir (Hale et al., 2023; Han et al., 2024). Dolayısıyla kar rejimindeki değişim, hidrolojik kuraklığın mevsimsel karakterini değiştiren önemli bir etkidir.

Kentleşme, geçirimsiz yüzeylerin artmasıyla infiltrasyonu azaltarak yağmur suyunu hızla yüzey akışına dönüştürmektedir. Bu süreç drenaj sistemlerine yük bindirmekte, taşkın ve su baskınlarını sıklaştırmakta ve aynı zamanda yeraltı suyu beslenimini zayıflatarak kurak dönemlerde kullanılabilir suyu azaltmaktadır (Semiz & Kap Yücel, 2016; Sharp, 2010; Sun et al., 2021). Kentsel ısı adası etkisiyle artan sıcaklıklar ve mikroklimatik dalgalanmalar, su döngüsündeki kırılma hızı artırabilmektedir. Bu nedenle kentsel alanlarda yağmur suyunun kaynağında tutulması ve yönetilmesi, havza ölçeğinde kuraklık riskini azaltan tamamlayıcı bir yaklaşım olarak değerlendirilmelidir.

Arazi kullanımındaki dönüşümler, havzaların su tutma kapasitesini belirleyen doğal yapıları zayıflatmaktadır (Helmreich, 2021). Ormanların parçalanması ve tahribi, infiltrasyon ve toprak su depolama süreçlerini sınırlandırarak, tarımsal genişleme ve yoğun sulama yeraltı suyu çekimini artırarak akiferleri baskılamakta ve sulak alan kayıpları ise havzanın doğal depolama kapasitesini azaltmaktadır (Pamukoğlu & Babalık, 2024; Shiferaw et al., 2025; Yadav, 2023). Madencilik, sanayi ve yerleşim baskıları da hem su talebi hem de su döngüsünün bütünlüğü üzerinde olumsuz etkiler üretmektedir. Bu bağlamda hidrolojik kuraklık, meteorolojik koşulların yanı sıra arazi kullanım kararlarıyla doğrudan ilişkili bir risk alanı olarak ele alınmalıdır.

3. HİDROLOJİK KURAKLIĞIN ÖLÇÜMÜ VE HAVZA SU BÜTÇESİNİN TAKİBİ

Hidrolojik kuraklığın izlenmesi, yalnızca yağış eksikliğini kaydetmekle sınırlı değildir; nehir akımlarındaki sapmaların, havzanın toplam su dengesinin ve su depolarındaki değişimlerin birlikte okunmasını gerektirir (Özfidaner et al., 2018). Bu amaçla geliştirilen akım tabanlı kuraklık indeksleri, uzun dönem akım kayıtlarını kullanarak kuraklığın ne zaman başladığını, ne kadar sürdüğünü ve şiddetini sayısal bir ölçüye dönüştürür. Türkiye’de yaygın olarak kullanılan Streamflow Drought Index (Akım Kuraklık İndeksi), belirli bir zaman dilimindeki birikimli akış hacmini uzun dönem ortalaması ve standart sapmaya göre standartlaştırmaktadır (Eroğlu & Apaydın, 2020; Özfidaner et al., 2018; Turhan et al., 2022). Negatif değerler akımın normal seviyenin altına indiğini, pozitif değerler ise ortalamanın üzerinde seyrettiğini göstermektedir. SDI, 1, 3, 6 ve 12 aylık farklı zaman pencerelerinde hesaplanmaktadır. Bu sayede kuraklığın çeşitli ölçekleri belirginleşmektedir: kısa pencereler ani akım düşüşlerini ve mevsimsel kesintileri yakalamakta, uzun pencereler ise birikimli su açığını ve kuraklığın sürekliliğini daha net ortaya koymaktadır. Türkiye’de Akarçay ve Murat Nehri gibi havzalarda yapılan uygulamalar, özellikle 1980’lerden sonra akım serilerinde düşüş eğilimlerinin belirginleştiğini ve kurak dönemlerin daha uzun ve daha sık görülmeye başladığını göstermektedir (Gümüş et al., 2018; Kale, 2021).

Kuraklığın “havza ölçüsünde” anlaşılabilmesi için akım indeksleri tek başına yeterli olmamaktadır; havzaya giren ve çıkan suyun dengesi, yani su bütçesi düzenli olarak takip edilmektedir. Havza su bütçesi yaklaşımı, yağış ve kar erimesiyle sisteme giren suyun; buharlaşma-terleme, yüzey akışıyla taşınan su ve yeraltı suyu çıkışları ya da çekimleriyle sistemden çıkan suyla birlikte değerlendirilmesine dayanmaktadır (Healy et al., 2007). Girdiler uzun süre boyunca çıktıları karşılayamadığında su depolarında azalma başlamakta; barajlar, göller, toprak nemi ve akiferler kademeli olarak

zayıflamaktadır. Bu yüzden hidrolojik kuraklık, çoğu zaman meteorolojik kuraklıktan gecikmeli görünmekte ve yağışların kısa süreli toparlanması su kaynaklarının toparlanmasına her zaman yetmemektedir. Nitekim bazı havza çalışmalarında meteorolojik kuraklık sinyalinin aylar sonra, hatta yaklaşık bir yıl sonra akımlarda ve depolarda belirgin düşüşlerin başladığı rapor edilmektedir (Dikici, 2018; Özfidaner et al., 2018). Akarçay Kapalı Havzası örneğinde olduğu gibi, yağış azlığına eşlik eden yoğun su kullanımı ve yönetim sorunları su bütçesini kalıcı açık veren bir yapıya sürüklemekte; göl alanlarında büyük küçülmeler, yeraltı su seviyelerinde gerileme ve akarsu debilerinde düşüş birlikte gözlenmektedir (Kale, 2021). Bu nedenle izleme, yağışı tek başına bir gösterge olarak almak yerine su bütçesinin bütününe hedeflemektedir.

İzleme altyapısında son yıllarda uzaktan algılama verileri ve yer gözlemleri birlikte kullanılmaya başlanmıştır. Uydu tabanlı göstergeler, özellikle geniş alanlarda kuraklığın araziye yansıyan etkilerini yakalamada etkilidir. NDVI gibi vejetasyon indisleri, bitki örtüsünün yeşillik düzeyi üzerinden su stresini dolaylı biçimde gösterir ve kurak dönemlerdeki zayıflama eğilimini mekânsal olarak görünür hale getirmektedir (Almouctar et al., 2024). Toprak nemi ürünleri, tarım alanlarında su açığını izlemeye katkı sağlamaktadır; kar örtüsü haritaları ise yüksek havzalarda suyun mevsimsel depolanma durumunu ve erimenin zamanlamasını takip etmeye yardımcı olmaktadır. Göl ve baraj alanlarındaki değişimler, yüzey suyu kayıplarını dönemsel olarak ortaya koymaktadır. Türkiye’de Kızılırmak Havzası gibi geniş havzalarda, uydu verileriyle türetilen göstergelerin kuraklık indeksleriyle birlikte değerlendirilmesi, kuraklığın hem hidrolojik hem ekolojik izlerini okumayı kolaylaştırmaktadır (Kartal & Emiroğlu, 2024).

Uydu verilerinin sahadaki ölçümlerle desteklenmesi, izleme sisteminin güvenilirliğini artırmaktadır. Akım gözlem istasyonları ve yeraltı suyu izleme kuyuları, havzadaki suyun gerçek davranışını doğrudan kaydetmektedir; uzun süreli eğilimleri görmek, olağan dışı düşüşleri erken fark etmek ve su yönetim kararlarını veri temelli kurmak için bu ağların yeterli yoğunlukta olması gerekmektedir. Türkiye’de hazırlanan kuraklık yönetim planlarında yeni istasyon ve kuyu kurulumu hedefleri bu ihtiyacın bir yansıması olmaktadır. Akım, yeraltı suyu seviyesi, yağış, sıcaklık, toprak nemi ve kar örtüsü gibi veriler tek bir çerçevede birleştirildiğinde, havzanın su dengesindeki bozulma daha erken yakalanabilmektedir; kuraklık hem mekânsal hem zamansal olarak daha doğru izlenebilmekte ve su arz-talep yönetimi daha tutarlı hâle getirilebilmektedir.

4. DOĞA TABANLI ÇÖZÜMLER VE HAVZA YÖNETİMİ

Hidrolojik kuraklıkla mücadelede en etkili yaklaşımlardan biri, yağışla gelen suyun havza içinde mümkün olduğunca tutulması ve suyun yüzeysel akışla hızla sistemden uzaklaşmasının önlenmesidir. Bu yaklaşım, yalnızca mühendislik yapılarıyla suyu kontrol etmeyi değil; toprağın, bitki örtüsünün ve doğal arazi formlarının suyu tutma ve yavaşlatma kapasitesinden yararlanmayı esas almaktadır. Doğa tabanlı çözümler, suyun akış hızını düşürerek infiltrasyonu artırmakta, yeraltı suyu beslenmesini desteklemekte ve havzanın kurak dönemlere karşı direncini güçlendirmektedir (Osmanoglu & Papageorgiou, 2021).

Havza genelinde infiltrasyonun artırılması, suyun yüzeyden toprağa geçişini kolaylaştıran uygulamalarla yapılmaktadır. Toprak yapısının korunması ve iyileştirilmesi bu sürecin temelini oluşturmaktadır. Organik maddece zengin topraklar daha gözenekli bir yapı kazanarak suyu daha kolay almakta ve depolamaktadır. Buna karşılık, aşırı makine kullanımı veya yanlış arazi yönetimi sonucu oluşan toprak sıkışması, suyun toprağa girişini sınırlamakta ve yüzey akışını artırmaktadır (Susilo et al., 2009). Bu nedenle toprak sıkışmasının önlenmesi ve toprağın fiziksel yapısının iyileştirilmesi, suyun havzada tutulması açısından belirleyici bir rol oynamaktadır. Eğimli alanlarda uygulanan kontur hendekleri, teraslama ve şerit halinde bitkilendirme gibi biyoteknik düzenlemeler de yağış sularının hızını düşürerek toprağa sızması için zaman kazandırmaktadır.

Üst havza kesimlerinde yaygın olarak kullanılan mikro ölçekteki uygulamalar, akışın kaynağında dengelenmesini sağlamaktadır (Öztürk et al., 2014; Sakin & Fındık, 2014). Küçük su tutma yapıları, sığ çökertmeler ve mini setler, yağış sularını kısa süreli olarak tutarak enerjisini düşürmekte ve suyun yerel ölçekte toprağa süzülmesine imkân vermektedir. Bu yaklaşım, suyu tek bir büyük yapıda depolamak yerine havza geneline dağıtılmış çok sayıda küçük müdahale ile yönetmeyi hedeflemektedir. Böylece suyun aşağı havza kesimlerine ulaşan hacmi ve hızı azaltmakta, yeraltı suyu beslenmesi artmakta ve ani taşkın riski sınırlanmaktadır.

Orman ekosistemleri, suyu havzada tutma kapasitesi açısından en güçlü doğal unsurlardan biri olarak görülmektedir. Sağlıklı bir orman örtüsü, yağışı tepe tacı ve ölü örtü tabakasıyla karşılayarak yağmur damlalarının toprağa doğrudan ve yüksek enerjiyle çarpmasını engellemektedir. Orman toprakları, yüksek organik madde içeriği ve yaygın kök ağı sayesinde suyu hem hızlı hem de derinlemesine almaktadır (Zema et al., 2021). Bu özellik, şiddetli yağışlarda yüzey akışını yavaşlatmakta, yeraltı suyu beslenmesini desteklemekte ve akarsu rejiminin daha dengeli olmasını sağlamaktadır. Ormanların bu işlevi, aynı zamanda taşkınların sönümlenmesine ve kurak dönemlerde taban akışının korunmasına yardımcı olmaktadır (Mekonnen, 2017; Pamukoğlu & Babalık, 2024).

Buna karşın büyük orman yangınları sonrasında bu doğal düzen geçici olarak ortadan kalkmaktadır. Bitki örtüsünün ve toprak yapısının zarar görmesi, yağış sularının hızla akışa geçmesine ve erozyonun artmasına neden olmaktadır. Bu nedenle yangın sonrası dönemde hızlı ve doğa tabanlı rehabilitasyon uygulamaları büyük önem taşımaktadır. Teraslama, yanmış alanların malçla örtülmesi, yüzey akışını yavaşlatan küçük bariyerlerin kurulması ve erken dönem bitkilendirme çalışmaları, arazinin su tutma kapasitesini yeniden kazanmaya yönelik etkili araçlar olarak kullanılmaktadır (Long & Davis, 2016; Robichaud et al., 2000; Vo & Kinoshita, 2020). Türkiye’de farklı bölgelerde uygulanan bu tür rehabilitasyon çalışmaları, yangın sonrası taşkın ve toprak kaybı riskini azaltmakta, yağış sularının yeniden havza içinde tutulmasına katkı sağlamaktadır.

Yeraltı suyu beslenmesini güçlendirmeye yönelik yapılar, suyu havzada tutma stratejisinin tamamlayıcı bir parçası olarak değerlendirilmektedir. Yüzeysel akışı yakalayan ve suyun yavaşça toprağa süzülmesini sağlayan sızdırma alanları, yağmur suyunun doğrudan akiferlere ulaşmasına imkân tanımaktadır (Gichuhi & Gitahi, 2020). Bunun yanı sıra, yüzey sularının kontrollü biçimde yeraltına verilmesini amaçlayan yapay besleme uygulamaları, özellikle alüvyon akiferlerin desteklenmesinde etkili olmaktadır. Türkiye’de son yıllarda inşa edilen yeraltı barajları ve besleme tesisleri, taşkın dönemlerinde gelen suyu yeraltında depolayarak hem kurak dönemler için bir rezerv oluşturmakta hem de yüzeysel akışın olumsuz etkilerini azaltmaktadır (Mengü et al., 2011; Mohammadzadeh-Habili & Khalili, 2020).

Genel olarak değerlendirildiğinde, suyu havzada tutmayı hedefleyen doğa tabanlı çözümler, mühendislik yapılarıyla sınırlı olmayan, havzanın doğal işleyişini esas alan bir yönetim anlayışını temsil etmektedir.

5. KENTSEL ALANLARDA “SÜNGER ŞEHİR” YAKLAŞIMI

Kentsel alanlarda “sünger şehir” yaklaşımı, yağmur suyunu bir atık gibi hızla uzaklaştırmak yerine, kent dokusu içinde tutmayı ve suyun doğal döngüye yeniden katılmasını hedefleyen bir planlama anlayışını oluşturmaktadır (Tunçay et al., 2021). Klasik drenaj mantığında su, borular ve kanallarla kısa sürede şehir dışına taşınmaktadır; bu yöntem bazı anlık sorunları çözmekte, kentleri tamamen gri altyapıya bağımlı kılmakta ve yağış rejiminin düzensizleştiği koşullarda kırılğan bir yapı üretmektedir. Sünger şehir fikri, suyun kentten koparılmasını değil kentle birlikte yönetilmesini savunmaktadır. Yağmur suyu toprağa sızdırılmakta, bitki-toprak sistemi içinde filtrelenmekte, bir kısmı yerinde depolanmakta ve şehir içinde yavaşlatılarak dolaşıma sokulmaktadır. Böylece yağışın ani etkileri yumuşamakta, su kalitesi desteklenmekte, yeraltı suyu beslenmesi güçlenmekte ve kent içinde yeşil-mavi alanlar üzerinden daha yaşanabilir

bir çevre oluşmaktadır (Coşkun Hepcan, 2022; Parlak & Atik, 2020).

Bu yaklaşımın sahaya yansımaları, yağmur suyunu düşüğü yerde yakalayan ve suyu yavaşlatan uygulamalarla sağlanmaktadır. Geçirimli kaplamalar, sert zeminlerin suyu tamamen iten karakterini değiştirerek yağışın zemine süzülmesine imkân vermekte; otopark, kaldırım ve meydan gibi geniş yüzeylerde kullanıldığında yüzey akışı azalmakta ve su baskınları hafiflemektedir. Yağmur bahçeleri ve bitkili hendekler, sığ çökertmeler ve bitkisel katmanlar üzerinden suyu toplayıp toprağa kontrollü biçimde iletme; burada suyun bir kısmı süzülürken su içindeki kirleticiler de doğal yollardan tutulmaktadır. Yeşil çatılar, yağışın bir bölümünü bünyesinde tutarak akışı zamana yaymakta, sıcak dönemlerde buharlaşma yoluyla çevreyi serinletmekte ve kentsel ısı adasının şiddetini düşürmeye yardımcı olmaktadır. Yağmur suyu depolama tankları ve sarnıçlar, çatı ve sert yüzeylerden gelen suyu biriktirerek yağışlı dönemlerde drenaj sistemine binen yükü azaltmakta; depolanan su, kurak dönemde yeşil alanların sulanması gibi amaçlarla kullanılabilir. Kent içi sulak alanlar ve küçük su kütleleri ise suyun depolanmasını, yavaş salınmasını ve biyolojik süreçlerle temizlenmesini sağlayarak hem taşkın yönetimine hem de su kalitesine katkı vermekte; bu tür çözümler aynı zamanda gölge, nem dengesi ve buharlaşma üzerinden kentsel iklimi yumuşatmakta, biyolojik çeşitliliğe yaşam alanı açmakta ve kamusal mekân kalitesini yükseltmektedir (Civan & Görmüş, 2023; Coşkun Hepcan, 2022; Tokmak & Güneş Gölbe, 2021; Ünal & Akyüz, 2018).

Sünger şehir yaklaşımının etkisi, tek tek uygulamaların toplamından daha geniş bir çerçevede ortaya çıkmaktadır; kent, havzanın su bütçesinde pasif bir “tahliye alanı” olmaktan çıkarak suyu tutan ve işleyen bir düğüm hâline gelmektedir. Güncel kentsel pratikte yağmur suyu, geçirimsiz yüzeylerden hızla toplanıp ana drenaj hatlarına verildiği için kısa sürede akarsulara ve denize ulaşmaktadır; bu, aşağı havzaya taşkın yükü bindirirken havza içindeki depolama ve beslenme süreçlerini zayıflatmaktadır. Havza ölçeğinde dirençli bir yönetim için kentsel alanların bu rolünün tersine çevrilmesi gerekmektedir. Yağmur suyu kent içinde yakalanıp yeşil altyapı elemanları üzerinden geciktirildiğinde, akış pikleri düşmekte ve su, yeraltına sızarak akiferleri besleyebilmektedir. Kentte tutulan su, uzun yağışsız dönemlerde taban akışını destekleyen yeraltı suyu rezervine katkı vermekte; böylece yalnız taşkın riski azalmakta, kurak dönemlerin su açığı da hafiflemektedir. Bu nedenle sünger şehir yaklaşımı, belediye ölçeğinde bir tasarım tercihi olarak değil, havza yönetimiyle uyumlu bir su güvenliği stratejisi olarak değerlendirilmektedir. Kent parkları, yeşil koridorlar, dere yatakları ve meydanlar yalnız rekreasyon alanı olarak değil, suyun tutulduğu, sızdırıldığı ve kısmen temizlendiği aktif hidrolojik birimler olarak ele alındığında, şehirler iklim değişikliğinin

getirdiği aşırı yağış ile uzun kurak dönem ikilemine daha hazırlıklı hâle gelmektedir (Avşar, 2025; Kocabaş, 2024; Tunçay et al., 2021).

6. SEL, TAŞKIN VE KURAKLIĞI BİRLİKTE YÖNETMEK

Sel, taşkın ve kuraklık çoğu zaman birbirinin karşıtı gibi algılansa da, hidrolojik döngü içinde aynı sistemin farklı yüzleri olarak ortaya çıkmaktadır. Özellikle arazi bozulmasının yaygın olduğu, geçirimsiz yüzey oranının arttığı veya bitki örtüsünün zayıfladığı havzalarda bu ilişki daha belirgin hâle gelmektedir. Şiddetli yağışlar sırasında suyun önemli bir bölümü toprağa sızmadan yüzey akışına geçmekte ve kısa sürede havzayı terk etmektedir. Bu da, bir yandan ani taşkınlara yol açarken, diğer yandan yeraltı suyu beslenmesini sınırladığı için sonraki dönemlerde su kıtlığının daha hızlı hissedilmesine neden olmaktadır (Abdelkareem & Mansour, 2023; Koçyiğit & Akay, 2018). Böyle havzalarda, kısa sürede yüksek miktarda yağış alınmasına rağmen, yağış sonrası dönemde akiferlerin ve yüzey depolarının yeterince dolmaması nedeniyle uzun süreli su açığı yaşanabilmektedir.

İklim değişikliğiyle birlikte hidrolojik döngünün hızlanması, bu etkileşimi daha görünür hâle getirmektedir. Yağışların daha kısa sürede ve daha yüksek şiddetle gerçekleşmesi, taşkın riskini artırmakta; yağışlar arasındaki kurak dönemlerin uzaması, havzalarda su depolama kapasitesinin önemini daha da artırmaktadır. Bu bağlamda, su yönetiminde sel ve kuraklığın ayrı ayrı ele alınması yerine, ortak bir çerçevede değerlendirilmesi gerekmektedir. Havzaların hem aşırı suyu güvenli biçimde karşılayabilmesi hem de suyu daha sonra kullanabilmesi, bu iki riskin birlikte ele alındığı entegre bir yaklaşımla mümkün olmaktadır.

Bu bütüncül yaklaşımın en etkili uygulama alanlarından biri, havzanın yukarı kesimleridir. Yukarı havzalar, yağışın ilk temas ettiği ve yüzey akışının şekillendiği alanlar olduğu için, burada yapılacak müdahaleler aşağı havzalardaki taşkın ve su kıtlığı riskini doğrudan etkilemektedir (Suttles et al., 2021). Uluslararası deneyimler, üst havzalarda suyun hızını düşüren ve geçici olarak depolayan uygulamaların, taşkınların şiddetini azalttığını ve aynı zamanda yeraltı suyu beslenmesine katkı sağladığını göstermektedir (Nugroho et al., 2023; Suttles et al., 2021). Yamaçlarda uygulanan terasla ve kontur düzenlemeleri, yağış sularının hızını keserek hem erozyonu sınırlamakta hem de suyun toprakla temas süresini uzatmaktadır. Orman örtüsünün korunması ve güçlendirilmesi, derin kök sistemi ve organik maddece zengin toprak yapısı sayesinde suyun emilimini artırmakta ve akış tepkisini dengelemektedir. Bu tür alanlarda yağış, kısa sürede akışa geçmek yerine havza içinde daha uzun süre tutulmaktadır.

Yukarı havzalarda sulak alanların ve taşkın yataklarının işlevini yeniden kazandırmaya yönelik uygulamalar da benzer şekilde etkili

olmaktadır. Taşkın suları bu alanlarda geçici olarak depolandığında, akışın aşağı havzaya ulaşma süresi uzamakta ve taşkın pikleri düşmektedir. Aynı zamanda tutulan suyun bir bölümü zemine sızarak yeraltı suyu rezervlerini desteklemektedir (Başar, 2015; Öztürk et al., 2014).

Sonuç olarak, yukarı havzadan aşağı havzaya uzanan bir perspektifle suyu yönetmek, sel ve kuraklık arasındaki bağlantıyı dikkate alan bir yaklaşımı zorunlu kılmaktadır. Suyun üst havzada tutulması, aşağı havzaya daha kontrollü ve dengeli biçimde ulaşmasını sağlarken, yeraltı suyu beslenmesi yoluyla havzanın kurak dönemlere karşı dayanıklılığını artırmaktadır.

7. KURUMSAL ROLLER VE ENTEGRE PLANLAMA

Kuraklık yönetiminde kalıcı sonuç almak, kurumların tek tek yürüttüğü çalışmalardan çok, aynı havzada yürütülen işlerin ortak bir hedefe bağlanmasına bağlı olmaktadır. Su, idari sınır tanımadığı için planlama ölçeği olarak havza öne çıkmaktadır; yukarı havzada alınan bir kararın aşağı havzada taşkın, su kalitesi ya da su arzı üzerinde doğrudan etkisi olmaktadır (İ. Öztürk et al., 2020; S. Öztürk et al., 2014). Bu nedenle entegre su yönetimi, suyun miktar ve kalite boyutlarını birlikte ele almakta, ekosistem gereksinimlerini ve sektörlerin taleplerini aynı tabloda değerlendirmektedir. Avrupa Birliği'nin Su Çerçeve Direktifi, bu bakışı havza planlamasının omurgası hâline getirmekte, su kütleleri için "iyi su durumu" hedefini kurumsal planlamanın merkezine yerleştirmektedir. Türkiye'de de havza bazlı planlama, Havza Yönetim Planları Yönetmeliği ile hukuki bir çerçeveye kavuşmakta; yerüstü ve yeraltı sularının korunması, iyileştirilmesi ve tahsisinin havza planları üzerinden yürütülmesi benimsenmektedir (Yıldırım & Demirci, 2024). İklim değişikliğiyle birlikte kuraklık riskinin artması, bu planların yalnız su kalitesi ve tahsis başlıklarıyla sınırlı kalmamasını, kurak dönem yönetimini de içermesini zorunlu kılmaktadır. Bu doğrultuda Tarım ve Orman Bakanlığı bünyesinde yürütülen Kuraklık Yönetim Planları çalışmaları, her nehir havzası için kuraklık öncesi, kuraklık dönemi ve sonrasına dönük tedbirleri tanımlamaya yönelmektedir; amaç, havza yönetim planlarıyla birlikte işleyen bir yapı kurarak su kıtlığı riskini erken aşamada yönetilebilir hâle getirmektir.

Kurumsal yapı, Türkiye'de çok aktörlü bir düzen içinde işlemektedir ve her kurumun rolü su döngüsünün farklı bir parçasına temas etmektedir. Tarım ve Orman Bakanlığı genel çerçeveyi kuran, politika ve planlama boyutunu taşıyan ana kurum konumundadır; Su Yönetimi Genel Müdürlüğü, havza planları, kuraklık planları ve tahsis çalışmalarında koordinasyon ve izleme görevini üstlenmektedir (Mumlu, 2024). Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü ise daha çok altyapı geliştirme ve işletme tarafında yer almakta; barajlar, sulama şebekeleri, taşkın kontrol yapıları ve

yeraltı suyu tahsisleri üzerinden suyun dağıtımı ve yönetimi üzerinde belirleyici bir etkiye sahiptir. Kurak dönemlerde rezervuar işletmesi, su tahsislerinde önceliklendirme ve kısıtlamalar gibi uygulamalar DSİ'nin sahadaki ana araçları arasında yer almaktadır. Meteoroloji Genel Müdürlüğü, yağış ve iklim verilerini üreterek kuraklık göstergelerinin hesaplanmasına veri tabanı sağlamakta; erken uyarı aşamalarının tanımlanmasında kullanılan meteorolojik analizler, planlardaki eşik ve tetikleyici yapıların kurulmasına zemin hazırlamaktadır. Orman Genel Müdürlüğü ise üst havza süreçlerine etki eden ormancılık ve havza ıslahı çalışmalarıyla suyun tutulmasına ve rejimin dengelenmesine katkı vermekte; ağaçlandırma, erozyon kontrolü ve arazi iyileştirme uygulamaları, suyun toprağa sızmasını artırarak uzun vadede su güvenliğini desteklemektedir. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, su kalitesinin korunması ve kirlilik kaynaklarının kontrolünde temel yetkiye sahiptir; debilerin düştüğü dönemlerde su kalitesi baskısı arttığı için kirlilik kontrolü daha da önem kazanmaktadır. İçişleri Bakanlığı ve valilikler ise özellikle il düzeyindeki koordinasyon, denetim ve kriz yönetimi süreçlerinde devreye girmekte; kuraklık döneminde alınan kısıtlayıcı kararların uygulanması ve yerel düzeyde kamu düzeninin sağlanması bu çerçevede değerlendirilmektedir (Mumlu, 2024). Kurumsal sorumlulukların sahada birbiriyle çakışmaması, veri paylaşımı ve karar alma süreçlerinin açık biçimde tanımlanması, kuraklık gibi yavaş gelişen ancak etkisi büyük bir risk alanında yönetimin etkinliğini belirlemektedir.

Sahaya inildiğinde, suyun yönetimi çoğu zaman yerel yönetimlerin kapasitesi ve uygulama gücüyle somutlaşmaktadır. Belediyeler, içme suyu temini, şebeke yönetimi, kayıp-kaçak azaltımı, yağmur suyu yönetimi ve kentsel yeşil alanların su verimliliği gibi başlıklarda doğrudan sorumluluk taşımakta; kurak dönemlerde tasarruf tedbirlerinin hayata geçirilmesi, alternatif kaynakların devreye alınması, arıtılmış atıksuyun yeniden kullanımının yaygınlaştırılması ve yağmur suyu hasadı gibi uygulamalar, belediyelerin etkileyebileceği alanlar arasında yer almaktadır (Sakın & Fındık, 2014; Tuna & Armut, 2021). Kentlerde suyun verimli kullanılmaması çoğu zaman teknik sorunlarla da ilişkilidir; eskiyen şebekeler, basınç yönetimi eksikliği ve izleme sistemlerinin yetersizliği kayıp-kaçak oranlarını yükseltmektedir. Bu nedenle su verimliliği yalnız bireysel tüketici davranışına indirgenmeden, şebeke performansı ve kentsel altyapı yönetimi üzerinden ele alınmaktadır. Yerel planlama kararlarının da su döngüsüne etkisi büyüktür; yeni imar alanlarının belirlenmesi, taşkın alanları ve yeraltı suyu beslenme bölgeleri dikkate alınmadan yapıldığında, taşkın riski artmakta ve suyun havzada tutulma kapasitesi zayıflamaktadır. Yerel kararların havza ölçeğindeki hedeflerle uyumlu hâle gelmesi, uygulamada en sık zorlanılan alanlardan biri olmaktadır.

Bu uyumu güçlendiren önemli araçlardan biri havza kurullarıdır. Havza kurulları, aynı havzada sorumluluğu bulunan kamu kurumlarını, yerel yönetimleri, su ve kanalizasyon idarelerini ve gerektiğinde üniversiteler ile sivil toplum temsilcilerini bir araya getiren koordinasyon zeminleri olarak tasarlanmaktadır. Havza planlarında tanımlanan tedbirlerin hangi kurum tarafından, hangi takvimle ve hangi kaynakla uygulanacağı; su tahsislerinde öncelik sıralaması; kuraklık aşamalarında devreye alınacak kısıtlamalar gibi kararlar, bu tür platformlarda daha uygulanabilir hâle gelmektedir (Demirel & Torlak, 2016; Sakın & Fındık, 2014). Kurulların etkili çalışabilmesi, toplantıların yalnız bilgilendirme düzeyinde kalmamasına, izleme göstergelerinin belirlenmesine ve kurumlar arasında düzenli veri akışının kurulmasına bağlı olmaktadır. Kuraklık şiddetlendiğinde içme suyu güvenliği, tarımsal tahsisler, ekolojik ihtiyaçlar ve su kalitesi baskısı aynı anda gündeme gelmekte; bu tür dönemlerde tek kurumun kararlarıyla ilerlemek yerine, ortak bir çerçevede uzlaşmış ve önceden planlanmış adımların uygulanması sahadaki yönetim kapasitesini artırmaktadır.

Üniversiteler ve araştırma kurumları ise kuraklık yönetiminin bilimsel temelini güçlendiren ve karar süreçlerine veri üreten aktörler olarak yer almaktadır. Kuraklık, bir günde ortaya çıkmadığı için, eğilim analizi, modelleme, senaryo üretimi ve izleme sistemleri bu alanda belirleyici hâle gelmektedir. Akım, yeraltı suyu ve iklim verilerinin birlikte analiz edilmesi; eğilim testleriyle değişimin yönünün ortaya konması; hidrolojik modellerle farklı iklim senaryoları altında su potansiyelinin değerlendirilmesi, planların dayandığı bilimsel altyapıyı oluşturmaktadır. Kuraklık yönetim planlarının hazırlanmasında iklim projeksiyonları, risk haritaları ve kırılganlık analizleri sıklıkla akademik birikimle şekillenmektedir. Bunun yanında doğa tabanlı çözümlerin tasarımı, etki değerlendirmesi ve izlenmesi de bilimsel katkı gerektirmekte; bir uygulamanın taşkın piklerini ne ölçüde düşürdüğü, yeraltı suyu beslenmesine ne kadar katkı verdiği, su kalitesinde hangi değişimi ürettiği gibi soruların yanıtı sahaya dayalı araştırmalarla netleşmektedir. Kamu kurumlarıyla akademi arasında kurulan sürdürülebilir iş birlikleri, yalnız rapor üretimine değil, eğitim, kapasite geliştirme ve karar destek sistemlerinin geliştirilmesine de katkı vermekte; böylece kuraklık yönetimi günü kurtaran tedbirlerden çıkarak kurumsal bir öğrenme sürecine dönüşmektedir.

Genel çerçeveye bakıldığında, kuraklık gibi çok boyutlu bir risk alanında başarı, rollerin kâğıt üzerinde tanımlanmasından çok, kurumların aynı veriyle konuşabilmesine, planların sahaya indirgenebilmesine ve uygulamanın düzenli biçimde izlenebilmesine bağlı olmaktadır. Havza ölçeğinde entegre planlama, merkezi kurumların politika ve altyapı gücünü,

yerel yönetimlerin uygulama kapasitesiyle birleştirdiğinde; üniversitelerin sağladığı bilimsel destekle birlikte daha öngörülü ve daha dayanıklı bir su yönetimi mümkün hâle gelmektedir.

8. DEĞERLENDİRME

Hidrolojik kuraklık, yağış miktarındaki düşüşle açıklanabilecek basit bir olgu olmaktan öte, havza ölçeğinde suyun tutulma, depolanma ve dolaşım süreçleriyle yakından ilişkili karmaşık bir çevresel riski ifade eder. Kalıcı ve etkili yaklaşımlar geliştirebilmek için odak noktasının yağışı artırma beklentilerinden, düşen yağışın havza içinde mümkün olan en uzun süreyle muhafaza edilmesine kaydırılması gerekmektedir. Yeraltı suyu rezervlerinin korunması, kar örtüsünün mevsimsel katkısının devamlılığı, orman ve sulak alanların hidrolojik işlevlerinin güçlendirilmesi ile kentsel alanlarda yeşil-mavi altyapının yaygınlaştırılması, bu bütüncül yaklaşımın temel unsurlarını oluşturmaktadır. Suyun doğal depolama ve yavaş dolaşım mekanizmalarına dayanan bu anlayış, teknik mühendislik çözümlerinin ötesine geçerek arazi kullanımı, mekânsal planlama ve yönetim süreçlerini de kapsayacak şekilde ele alınmalıdır.

Hidrolojik kuraklıkla başa çıkabilmek, bilimsel bilgi üretimi ile kurumsal uygulama kapasitesinin uyum içinde çalışmasına bağlıdır. Üniversiteler, kamu kurumları ve yerel yönetimler arasında süreklilik gösteren ve kurumsallaşmış bir iş birliği tesis edilmediği sürece, geliştirilen stratejilerin uzun vadede beklenen etkiyi üretmesi güçleşmektedir. Akademik çalışmalarla elde edilen veriler ve analizler, planlama ve uygulama süreçlerine entegre edildiğinde, su kıtlığına karşı daha dayanıklı ve sürdürülebilir bir yönetim modeli oluşturulabilir. Bu nedenle hidrolojik kuraklıkla mücadeleye yönelik politika ve eylemlerin zaman ölçeğine göre kademelendirilmesi, uygulamada etkinliği artıran önemli bir araçtır.

Kısa vadede, hidrolojik açıdan hassas ve kırılgan havzalarda ayrıntılı su bütçesi analizleri gerçekleştirilerek kuraklık riskinin boyutu ortaya konulmalıdır. Akım, yeraltı suyu ve kar örtüsüne ilişkin izleme ağlarında bulunan eksiklikler belirlenmeli ve ölçüm kapasitesi güçlendirilmelidir. Aynı zaman diliminde, seçilecek pilot alanlarda sünger şehir yaklaşımına dayalı uygulamalara başlanarak yağmur suyu hasadı, geçirgen yüzeyler ve yeşil altyapı çözümlerinin yerel koşullardaki performansı değerlendirilmelidir.

Orta vadede, havza ölçeğinde doğa tabanlı çözümlerin daha yaygın biçimde hayata geçirilmesi önem kazanmaktadır. Ormanlaştırma faaliyetleri, sulak alanların yeniden işlevlendirilmesi ve infiltrasyonu artıran yapısal düzenlemeler bu kapsamda ele alınmalıdır. Tarım ve arazi kullanımına yönelik planlamaların havzanın su bütçesiyle uyumlu hâle getirilmesi, su tüketimi yüksek faaliyetlerin etkin biçimde denetlenmesiyle birlikte düşünülmelidir. Kurumlar arasında veri paylaşımını ve ortak karar

alma süreçlerini destekleyecek bütünleşik platformların kurulması da bu aşamada kuraklık yönetiminin kurumsal kapasitesini güçlendirecektir.

Uzun vadede ise “suyu havzada tutma” ilkesini merkeze alan entegre su yönetimi anlayışının tüm stratejik havzalarda standart bir uygulama çerçevesine dönüşmesi hedeflenmelidir. Kuraklık ve sel risklerinin birlikte ele alındığı, iklim değişikliğine uyumlu, esnek ve çok aktörlü bir su yönetimi modelinin hayata geçirilmesi, gelecekte artması beklenen hidrolojik belirsizlikler karşısında havzaların direnç düzeyini yükseltecektir. Bu doğrultuda geliştirilecek bütüncül yaklaşımlar, hem su kaynaklarının sürdürülebilirliğini güvence altına alacak hem de toplumsal ve ekolojik sistemlerin uzun vadeli uyum kapasitesini destekleyecektir.

9. POLİTİKA VE ÇÖZÜM ÖNERİLERİ

- Su yönetimine ilişkin tüm plan, yatırım ve arazi kullanım kararlarında idari sınırlar yerine havza sınırları esas alınmalı; yukarı havzada alınan kararların aşağı havzalardaki su arzı, taşkın ve kuraklık riskleri üzerindeki etkileri zorunlu etki değerlendirme süreçlerine dâhil edilmelidir.
- Akım, yeraltı suyu, kar örtüsü ve iklim verilerini birlikte değerlendiren entegre izleme ve erken uyarı sistemleri yaygınlaştırılmalı; yeraltı suyu rezervlerinin güvenilir biçimde izlenebilmesi için havza bazlı su bütçeleri düzenli aralıklarla güncellenmelidir.
- Yeraltı sularının izinsiz ve bilinçsiz kullanımın önlenmesi amacıyla kaçak kuyu açım ve kullanımından yalnızca kullanıcılar değil, kuyu açan kişi ve firmalar da hukuki olarak sorumlu tutulmalıdır.
- Üst havzalarda orman ekosistemlerinin korunması ve güçlendirilmesi, erozyon kontrolü ile sulak alanlar ve taşkın yataklarının yeniden işlevlendirilmesi yoluyla yüzey sularının geçici depolanması ve yeraltı suyu beslenmesi desteklenmelidir.
- İmar ve planlama süreçlerinde yağmur suyu hasadı, geçirgen yüzeyler, yeşil-mavi altyapı ve sünger şehir uygulamaları zorunlu hâle getirilmeli; kentsel gelişmenin hidrolojik denge üzerindeki etkileri plan onay süreçlerinde temel bir değerlendirme ölçütü olarak ele alınmalıdır.
- Kentsel içme suyu sistemlerinde kayıp-kaçak oranlarının düşürülmesi stratejik bir öncelik olarak ele alınmalı; altyapı yenileme çalışmaları performans temelli izleme ve destek mekanizmalarıyla yürütülmelidir.
- Tarım ve arazi kullanım kararları, havzanın mevcut ve öngörülen su potansiyeli dikkate alınarak planlanmalı; su tüketimi yüksek ürünlerin kuraklık riski taşıyan havzalarda kademeli olarak sınırlandırılması ve su verimliliğini artıran üretim biçimlerinin teşvik edilmesi

sağlanmalıdır.

- Havza yönetim planları ile kuraklık yönetim planlarının birbirini tamamlayan ve birlikte işletilen belgeler hâline getirilmesi sağlanmalı; bilimsel araştırmalarla üretilen hidrolojik analizler, senaryolar ve model çıktıları doğrudan planlama ve uygulama süreçlerine entegre edilmelidir.
- Kısa vadede risk tespiti ve izleme, orta vadede doğa temelli çözümlerin yaygınlaştırılması, uzun vadede ise entegre su yönetiminin standart hâle gelmesi hedeflenmeli; kuraklık ve taşkın risklerini birlikte ele alan, iklim değişikliğine uyumlu ve esnek bir yönetim anlayışı tüm stratejik havzalarda yerleşik hâle getirilmelidir.
- Su okuryazarlığını artırmaya yönelik eğitim ve farkındalık programları, yerel yönetimler, üreticiler ve toplumun tüm kesimlerini kapsayacak biçimde yaygınlaştırılarak suyu havzada tutma yaklaşımı toplumsal bir ortak hedef hâline getirilmelidir.

KAYNAKÇA

MGM (2025), 1970-2025 Yıllarının Beş Eşit Periyotta Değerlendirmesi, Meteoroloji Genel Müdürlüğü, Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, <https://www.mgm.gov.tr/FILES/resmi-istatistikler/parametreAnalizi/2025/2-T%C3%9CRK%C4%B0YE%20YA%C4%9EI%C5%9E%202025.pdf>

DSİ (2022), 2022 yılı faaliyet raporu, T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı, <https://cdniys.tarimorman.gov.tr/api/File/GetFile/425/Sayfa/759/1107/DosyaGaleri/dsi2022faaliyetraporu.pdf>

EEA (2021), Water resources across Europe — confronting water stress: an updated assessment, EEA Report No. 12/2021.

Farley, M., Trow, S. 2003, Losses in water distribution networks : a practitioner's guide to assessment, monitoring and control, ISBN: 1 900222 11 6, IWA Publishing Books, England.

Pearson, D. (2019), Standard Definitions for Water Losses, ISBN:9781789060881, IWA Publishing, <https://doi.org/10.2166/9781789060881>

OECD (2016), Water Governance in Cities, OECD Studies on Water, OECD Publishing, Paris, <http://dx.doi.org/10.1787/9789264251090-en>

SYGM (2014), İçme Suyu Temin ve Dağıtım Sistemlerindeki Su Kayıplarının Kontrolü Yönetmeliği, Resmî Gazete, 28994, <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2014/05/20140508-1.htm>

SYGM (2020), İçme Suyu Temin ve Dağıtım Sistemlerindeki Su Kayıplarının Kontrolü Yönetmeliği Teknik Usuller Tebliği, Resmî Gazete, 31253.

SYGM (2023), Kentsel Su Kullanım Verimliliği. Değişen iklime uyum çerçevesinde su verimliliği strateji belgesi ve eylem planı, Tarım ve Orman Bakanlığı, <https://iklim.tobb.org.tr/files/su-verimliliği-eylem-planı.pdf>

SUEN (2021), İçmesuyu Dağıtım Sistemlerinde Su Kayıp ve Kaçaklarının Kontrolü ve Yönetimi Raporu, Türkiye Su Enstitüsü, ISBN: 978-605-7599-65-0, <https://www.suen.gov.tr/uploads/icmesuyu-dagitim-sistemlerinde-su-kayip-ve-kacaklarinin-kontrolu-ve-yonetimi.pdf>

Thornton, J., Sturm, R., & Kunkel, G. (2011), Water Loss Control 2nd Edition, McGraw-Hill.

UN Water. (2024), The United Nations World Water Development Report, UNESCO.

CNIG (2025), İspanya Su Kullanım Haritaları, Agency National Geographic Information Center, http://atlasnacional.ign.es/images/4/42/Espana_Usos-del-agua_2015_mapa_15683_spa.jpg

DSİ (2023), DSİ faaliyet raporu, Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü. https://cdniys.tarimorman.gov.tr/api/File/GetFile/425/Sayfa/759/1107/DosyaGaleri/dsi_2023_yili_faaliyet_raporu.pdf

EPA (2025), Statistics and Facts, U.S. Environmental Protection Agency. <https://www.epa.gov/watersense/statistics-and-facts>

ESA (2020), Earth Observation for Sustainable Development: Water Resource Management, European Space Agency. https://eo4society.esa.int/wp-content/uploads/2020/06/EO4SD-Catalogue_v2.1.pdf

FAO. (2025), WaPOR, remote sensing for water productivity, Food and Agriculture Organization. <https://www.fao.org/in-action/remote-sensing-for-water-productivity/water-accounting/2/en>

IPCC (2022), Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability, Cambridge University Press.

King-Okumu, C. (2019), Drought impact and vulnerability assessment a rapid review of practices and policy recommendations, (UNCCD) United Nations Convention to Combat Desertification.

PUB Singapore NWA. (2020), Digitalising Water: Sharing Singapore's Experience, IWA Publishing Board.

TOB (2023), Değişen İklim Uyum Çerçevesinde Su Verimliliği Strateji Belgesi ve Eylem Planı (2023-2033). Tarım ve Orman Bakanlığı. https://www.tarimorman.gov.tr/SYGM/Belgeler/strateji%20eylem%20plan%C4%B1%2005.2023/su%20verimliliği%20eylem%20plan%C4%B1_print_11.04.2023.pdf

USGS. (2021). Landsat 9 mission overview. U.S. Geological Survey. <https://www.usgs.gov/tools/2021-annual-overview>

Utami, R. R., Geerling, G. W., Salami, I. R. S., Notodarmojo, S., & Ragas, A. M. J. (2024). Mapping domestic water use to quantify water-demand and water-related contaminant exposure in a peri-urban community, Indonesia. International Journal of Environmental Health Research, 34(1), 625–638. <https://doi.org/10.1080/09603123.2022.2163986>

Allen, L., Smith, J. C., Palaniappan, M. (2010), Overview Of Greywater Reuse: The Potential Of Greywater Systems To Aid Sustainable Water Management, Pacific Institute, California, ISBN: 1-893790-27-4

Eriksson, E., Auffarth, K. P. S., Henze, M., & Ledin, A. (2002). Characteristics of grey wastewater. *Urban Water*, 4(1), 85–104.

Karahan, A. (2011). Gri Suyun Değerlendirilmesi. IX. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi, https://www.mmo.org.tr/sites/default/files/c5d6e408c7a20c7_ek.pdf

Li, Z., Boyle, F., Reynolds, A. (2010). Rainwater harvesting and greywater treatment systems for domestic application in Ireland. *Desalination*, 260(1-3), 1–8.

Santos, M., Ferreira, A., & Lanzinha, J. (2023). The possibilities of capturing rainwater and reducing the impact of floods: a proposal for the city of beira, mozambique. *Sustainability*, 15(3), 2276. <https://doi.org/10.3390/su15032276>

Shi, C., Li, Y., Li, H., Qiu, H., & Xu, T. (2024). Towards sustainable urban water management: an ecological compensation framework for sponge cities. *Environmental Research Letters*, 19(12), 123002. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ad8edf>

Leone, A., Grassini, L., & Balena, P. (2022). Urban planning and sustainable storm water management: gaps and potential for integration for climate adaptation strategies. *Sustainability*, 14(24), 16870. <https://doi.org/10.3390/su142416870>

Fewkes, A. (2000). Modelling the performance of rainwater collection systems: towards a generalised approach. *Urban water*, 1(4), 323-333.

Rahman, A., Keane, J., & Imteaz, M. A. (2012). Rainwater harvesting in Greater Sydney: Water savings, reliability and economic benefits. *Resources, Conservation and Recycling*, 61, 16-21.

Ghisi, E., da Fonseca Tavares, D., & Rocha, V. L. (2009). Rainwater harvesting in petrol stations in Brasília: Potential for potable water savings and investment feasibility analysis. *Resources, Conservation and Recycling*, 54(2), 79-85.

Li, X. Y., & Gong, J. D. (2002). Compacted microcatchments with local earth materials for rainwater harvesting in the semiarid region of China. *Journal of Hydrology*, 257(1-4), 134-144.

Yuan, T., Fengmin, L., & Puhai, L. (2003). Economic analysis of rainwater harvesting and irrigation methods, with an example from China. *Agricultural water management*, 60(3), 217-226.

Sazakli, E., Alexopoulos, A., & Leotsinidis, M. (2007). Rainwater harvesting, quality assessment and utilization in Kefalonia Island, Greece. *Water research*, 41(9), 2039-2047.

Goel, A. K., & Kumar, R. (2005). Economic analysis of water harvesting in a mountainous watershed in India. *Agricultural Water Management*, 71(3), 257-266.

Pandey, P. K., Panda, S. N., & Panigrahi, B. (2006). Sizing on-farm reservoirs for crop-fish integration in rainfed farming systems in Eastern India. *Biosystems Engineering*, 93(4), 475-489.

Islam, M. M., Chou, F. F., Kabir, M. R., & Liaw, C. H. (2010). Rainwater: a potential alternative source for scarce safe drinking and arsenic contaminated water in Bangladesh. *Water resources management*, 24(14), 3987-4008.

Rahman, M. A. U., & Rahman, A. S. M. S. (Eds.). (2013). Rainwater harvesting in Bangladesh: Potentials, challenges and stakeholders' responses. WaterAid Bangladesh.

Mehrabadi, M. H. R., Saghafian, B., & Fashi, F. H. (2013). Assessment of residential rainwater harvesting efficiency for meeting non-potable water demands in three climate conditions. *Resources, Conservation and Recycling*, 73, 86-93.

Fooladmand, H. R., & Sepaskhah, A. R. (2004). Economic analysis for the production of four grape cultivars using microcatchment water harvesting systems in Iran. *Journal of Arid Environments*, 58(4), 525-533.

Ahmed, A., & Farooq, A. (2018). Study of rainwater harvesting potential in an industrial area using stormwater management model (SWMM V 5.0)-a case study of Quaid-E-Azam Apparel Park, Sheikhpura, Punjab, Pakistan. *International Journal of Environmental Engineering*, 9(2), 185-198.

Siddiqui, R., & Siddiqui, S. (2018). Assessing the Rooftop Rainwater Harvesting Potential in Urban Residential Areas of Pakistan: A Case Study of Model Town, Lahore, Pakistan: Assessing the Rooftop Rainwater Harvesting Potential in Urban Residential Areas of Pakistan: A Case Study of Model Town, Lahore, Pakistan. *International Journal of Economic and Environmental Geology*, 9(2), 11-19.

Hassan, I. (2016). Rainwater Harvesting-an alternative water supply in the Future for Pakistan. *J. Biodivers. Environ. Sci*, 8, 213-222.

Song, J., Han, M., Kim, T. I., & Song, J. E. (2009). Rainwater harvesting as a sustainable water supply option in Banda Aceh. *Desalination*, 248(1-3), 233-240.

Macomber, P. S. H. (2010). Guidelines on rainwater catchment systems for Hawai'i (Rev. ed.; CTAHR Resource Management Publication No. RM-12). College of Tropical Agriculture and Human Resources, University of Hawai'i at Mānoa.

Odhiambo, K., Ong'or, B., & Kanda, E. (2021). Optimization of rainwater harvesting system design for smallholder irrigation farmers in Kenya: a review. *Journal of Water Supply Research and Technology—Aqua*, 70(4), 483-492. <https://doi.org/10.2166/aqua.2021.087>

Recha, C., Makokha, G., Shisanya, C., & Mukopi, M. (2017). Climate variability: attributes and indicators of adaptive capacity in semi-arid Tharaka sub-county, Kenya. *Oalib*, 04(05), 1-14. <https://doi.org/10.4236/oalib.1103505>

Recha, C., Mukopi, M., & Otieno, J. (2014). Socio-economic determinants of adoption of rainwater harvesting and conservation techniques in semi-arid Tharaka sub-county, Kenya. *Land Degradation and Development*, 26(7), 765-773. <https://doi.org/10.1002/ldr.2326>

Areerachakul, N. (2013, January). Overviews of rainwater harvesting and utilization in Thailand: Bangsaiy Municipality. In *Proceedings of World Academy of Science, Engineering and Technology* (No. 79, p. 1848). World Academy of Science, Engineering and Technology (WASET).

Monjaiang, P., Limphitakphong, N., Kanchanapiya, P., Tantisattayakul, T., & Chavalparit, O. (2018). Assessing potential of rainwater harvesting: case study building in Bangkok. *Int. J. Environ. Sci. Dev*, 9(8), 222-225.

Herrmann, T., & Schmida, U. (2000). Rainwater utilisation in Germany: efficiency, dimensioning, hydraulic and environmental aspects. *Urban water*, 1(4), 307-316.

Wu, R. S., Molina, G. L. L., & Hussain, F. (2018). Optimal sites identification for rainwater harvesting in northeastern Guatemala by analytical hierarchy process. *Water Resources Management*, 32(12), 4139-4153.

Li, Z., Boyle, F., & Reynolds, A. (2010). Rainwater harvesting and greywater treatment systems for domestic application in Ireland. *Desalination*, 260(1-3), 1-8.

Abdulla, F. A., & Al-Shareef, A. W. (2009). Roof rainwater harvesting systems for household water supply in Jordan. *Desalination*, 243(1-3), 195-207.

Sturm, M., Zimmermann, M., Schütz, K., Urban, W., & Hartung, H. (2009). Rainwater harvesting as an alternative water resource in rural sites in central northern Namibia. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts a/b/c*, 34(13-16), 776-785.

Singapore Water Story. Available online: <https://www.pub.gov.sg> (accessed on 14 November 2018).).Coping with Water Scarcity in

Singapore: Institutions, Strategies, and Implementation. Available online: <http://www.siteresources.worldbank.org> (accessed July 2006).

Lani, N.H.M.; Yusop, Z.; Syafiuddin, A. A review of rainwater harvesting in Malaysia: Potentials and challenges. *Water*, 2018, 10, 506.

Kahinda, J. M. M., Taigbenu, A. E., & Boroto, J. R. (2007). estic rainwater harvesting to improve water supply in rural South Africa. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts a/b/c*, 32(15-18), 1050-1057.

Domènech, L., & Saurí, D. (2011). A comparative appraisal of the use of rainwater harvesting in single and multi-family buildings of the Metropolitan Area of Barcelona (Spain): social experience, drinking water savings and economic costs. *Journal of Cleaner production*, 19(6-7), 598-608.

Villarreal, E. L., & Dixon, A. (2005). Analysis of a rainwater collection system for domestic water supply in Ringdansen, Norrköping, Sweden. *Building and Environment*, 40(9), 1174-1184.

Fewkes, A. (2000). Modelling the performance of rainwater collection systems: towards a generalised approach. *Urban water*, 1(4), 323-333.

Jones, M. P., & Hunt, W. F. (2010). Performance of rainwater harvesting systems in the southeastern United States. *Resources, Conservation and Recycling*, 54(10), 623-629.

Handia, L., Tembo, J. M., & Mwiindwa, C. (2003). Potential of rainwater harvesting in urban Zambia. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 28(20-27), 893-896.

Yannopoulos, S., Giannopoulou, I., & Kaiafa-Saropoulou, M. (2019). Investigation of the current situation and prospects for the development of rainwater harvesting as a tool to confront water scarcity worldwide. *Water*, 11(10), 2168. <https://doi.org/10.3390/w11102168>

Zheng, H., Gao, J., Xie, G., Yu, J., & Zhang, B. (2018). Identifying important ecological areas for potential rainwater harvesting in the semi-arid area of chifeng, china. *Plos One*, 13(8), e0201132. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0201132>

Umukiza, E., Ntole, R., Chikavumbwa, S., Bwambale, E., Sibale, D., Jeremaih, Z., ... & Petroselli, A. (2023). Rainwater harvesting in arid and semi-arid lands of africa: challenges and opportunities. *Acta Scientiarum Polonorum Formatio Circumiectus*, 22(2), 41-52. <https://doi.org/10.15576/asp.fc/2023.22.2.03>

Milinga, K., Chachage, B., & Matonya, J. (2023). Influence of institutional forces on the intention to harvest rainwater in tanzania: moderating effect of logic. *EJBM*. <https://doi.org/10.7176/ejbm/15-19->

Uddin, M., Rokonuzzaman, M., Nur-E-Alam, M., Soudagar, M., Mohamed, H., & Amin, N. (2024). Rainwater quality disparities across malaysian peninsula sites. *Journal of Graphic Era University*, 223-242. <https://doi.org/10.13052/jgeu0975-1416.1223>

Fulazzaky, M., Syafiuddin, A., Roestamy, M., Yusop, Z., Jonbi, J., & Prasetyo, D. (2022). Reliability and economic analysis of a rainwater-harvesting system for a commercial building with a large rooftop area. *Acs Es&t Water*, 2(4), 604-615. <https://doi.org/10.1021/acsestwater.1c00455>

Mbua, R., Efande, S., & Sunjo, T. (2024). Health burden of the consumption of rooftop rainwater harvesting systems in buea sub-division, cameroon. *Journal of Geography Environment and Earth Science International*, 28(5), 31-42. <https://doi.org/10.9734/jgeesi/2024/v28i5768>

Tessema, N., Kassa, A., Yadeta, D., & Hishe, B. (2021). Achievements, challenges and opportunities of rainwater harvesting in the ethiopia context: a review. *Water Science & Technology Water Supply*, 22(2), 1611-1623. <https://doi.org/10.2166/ws.2021.330>

Yannopoulos, S., Giannopoulou, I., & Kaiafa-Saropoulou, M. (2019). Investigation of the current situation and prospects for the development of rainwater harvesting as a tool to confront water scarcity worldwide. *Water*, 11(10), 2168.

Zheng, H., Gao, J., Xie, G., Yu, J., & Zhang, B. (2018). Identifying important ecological areas for potential rainwater harvesting in the semi-arid area of chifeng, china. *Plos One*, 13(8), e0201132. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0201132>

Umukiza, E., Ntole, R., Chikavumbwa, S., Bwambale, E., Sibale, D., Jeremaih, Z., ... & Petroselli, A. (2023). Rainwater harvesting in arid and semi-arid lands of africa: challenges and opportunities. *Acta Scientiarum Polonorum Formatio Circumiectus*, 22(2), 41-52. <https://doi.org/10.15576/asp.fc/2023.22.2.03>

Milinga, K., Chachage, B., & Matonya, J. (2023). Influence of institutional forces on the intention to harvest rainwater in tanzania: moderating effect of logic. *EJBM*. <https://doi.org/10.7176/ejbm/15-19-05>

Uddin, M., Rokonuzzaman, M., Nur-E-Alam, M., Soudagar, M., Mohamed, H., & Amin, N. (2024). Rainwater quality disparities across malaysian peninsula sites. *Journal of Graphic Era University*, 223-242. <https://doi.org/10.13052/jgeu0975-1416.1223>

Fulazzaky, M., Syafiuddin, A., Roestamy, M., Yusop, Z., Jonbi, J., & Prasetyo, D. (2022). Reliability and economic analysis of a rainwater-harvesting system for a commercial building with a large rooftop area. *AcS Es&t Water*, 2(4), 604-615. <https://doi.org/10.1021/acsestwater.1c00455>

Mbua, R., Efande, S., & Sunjo, T. (2024). Health burden of the consumption of rooftop rainwater harvesting systems in buea sub-division, cameroon. *Journal of Geography Environment and Earth Science International*, 28(5), 31-42. <https://doi.org/10.9734/jgeesi/2024/v28i5768>

Tessema, N., Kassa, A., Yadeta, D., & Hishe, B. (2021). Achievements, challenges and opportunities of rainwater harvesting in the ethiopia context: a review. *Water Science & Technology Water Supply*, 22(2), 1611-1623. <https://doi.org/10.2166/ws.2021.330>

Chen, J., Wu, H., Qian, H., & Li, X. (2018), Challenges and prospects of sustainable groundwater management in an agricultural plain along the Silk Road Economic Belt, north-west China, *International Journal of Water Resources Development*, 34(3), 354-368, <https://doi.org/10.1080/07900627.2016.1238348>

Döll, P., Schmied, H. M., Schuh, C., Portmann, F. T., & Eicker, A. (2014), Global-scale assessment of groundwater depletion and abstractions. *Water Resources Research*, 50(7), 5698-5720, <https://doi.org/10.1002/2014WR015595>

DSİ (2023), Yeraltı suyu gözlem raporu, Ankara: Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü Faaliyet Raporları, https://cdniys.tarimorman.gov.tr/api/File/GetFile/425/Sayfa/759/1107/DosyaGaleri/dsi_2023_yili_faaliyet_raporu.pdf

FAO. (2010), Manual on small earth dams. Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Galloway, D. L., & Burbey, T. J. (2011), Review: Regional land subsidence accompanying groundwater extraction, *Hydrogeology Journal*, 19, 1459-1486, <https://doi.org/10.1007/s10040-011-0775-5>

IGRAC. (2025), Global groundwater information system, <https://ggis.un-igrac.org/>

OECD (2010), Pricing water resources and water and sanitation services. Paris: OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/9789264083608-en>

OECD (2015), OECD principles on water governance. Paris: OECD Publishing. <https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/topics/policy-sub->

[issues/water-governance/oecd-principles-on-water-governance-en.pdf](https://www.oecd.org/water/governance/oecd-principles-on-water-governance-en.pdf)

Bozyiğit, R., & Tapur, T. (2009). Konya Ovası ve Çevresinde Yeraltı Sularının Obruk Oluşumlarına Etkisi, Selçuk Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi, 21, 137-155. <https://izlik.org/JA87AAS3WT>

Siebert, S., et al. (2010), Groundwater use for irrigation – A global inventory, HESS, 14(10), 1863–1880, <https://doi.org/10.5194/hess-14-1863-2010>

Taylor, R. G., et al. (2013). Ground water and climate change. Nature Climate Change, 3(4), 322–329. <https://doi.org/10.1038/nclimate1744>

Wada, Y., van Beek, L. P. H., van Kempen, C. M., Reckman, J. W. T. M., Vasak, S., & Bierkens, M. F. P. (2010). Global depletion of groundwater resources. Geophysical Research Letters, 37(20). <https://doi.org/10.1029/2010GL044571>

Çetin, N., Mansuroğlu S., Önaç A.K., (2018), Xeriscaping Feasibility as an Urban Adaptation Method for Drought, Pol. J. Environ. Stud, Vol. 27, No. 3 (2018), 1009-1018, <https://doi.org/10.15244/pjoes/76678>

FAO. (2018). Nature-based solutions for agricultural and urban water management (relevant FAO guidance pages). Food and Agriculture Organization (FAO). <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/818a9e85-12e7-415a-b005-05d37a33377d/content>

Ismaeil, E. M. H., Sobaih, A. E., (2022), Assessing Xeriscaping as a Retrofit Sustainable Water Consumption Approach for a Desert University Campus, Water, 14(11), 1681, <https://doi.org/10.3390/w14111681>

OECD (2025), Global Drought Outlook: Trends, Impacts and Policies to Adapt to a Drier World, OECD Publishing, Paris, <https://doi.org/10.1787/d492583a-en>

SYGM (2024), Kurakçıl Peyzaj Uygulamaları, Su Yönetimi Genel Müdürlüğü. <https://www.suverimliligi.gov.tr/wp-content/uploads/2024/03/KURAKCIL-PEYZAJ-UYGULAMA-REHBERI.pdf>

Abdelfattah I., A.M. El-Shamy, (2023). Review on the escalating imperative of zero liquid discharge (ZLD) technology for sustainable water management and environmental resilience. Journal of Environmental Management, ISSN: 0301-4797, Vol: 351, Page: 119614

Anjomani, N., Shamshiri, S., Babapoor, A., Rahimi-Ahar, Z., Mastani Joybari, M., & Khiadani, M. (2025). Desalination systems for minimal and zero liquid discharge purposes: A review. Chemical

Engineering and Processing – Process Intensification, 216, 110442.
<https://doi.org/10.1016/j.cep.2025.110442>

GESU (2025). ZLD – Sıfır Sıvı Deşarj Sistemi. GESU Çevre Teknolojileri, Erişim Adresi: <https://www.gesu.com.tr/teknolojiler/zld>

GEA. (2025). Zero Liquid Discharge (ZLD) – Industrial effluent treatment solutions. GEA. Erişim Adresi : <https://www.gea.com/tr/chemical/industrial-effluent/zero-liquid-discharge/>

Lenntech. (2025). Zero Liquid Discharge (ZLD). Lenntech Brine Treatment. Erişim Adresi: <https://www.lenntech.com.tr/processes/Brine-Treatment/zero-liquid-discharge-zld.htm>

Liao, B.; Zeng, X.; Ling, Z.; Zhao, S.; Li, B.; Han, X. (2025). Recent Advances in Zero Discharge Treatment Technologies for Desulfurization Wastewater in Coal-Fired Power Plants: A Mini-Review. Processes, 13, 982. <https://doi.org/10.3390/pr13040982>

O’Connell, M.G., Rajendran, N., Elimelech, M. (2024). Analysis of energy, water, land and cost implications of zero and minimal liquid discharge desalination technologies. Nat Water 2, 1116–1127 . <https://doi.org/10.1038/s44221-024-00327-1>

Panagopoulos, A., Giannika, V. (2024). Techno-economic analysis (TEA) of zero liquid discharge (ZLD) systems for treatment and utilization of brine via resource recovery. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2024.109773>

Aida Kani Ahmat, M., Saka, F., & Sayed Abdul Matin, H. (2023). Baraj Rezervuarlarında Gölge Topu ve Yüzer Güneş Panelinin Kullanılabilirliği. IEACES2023.

Aminzadeh, M., Lehmann, P., & Or, D. (2018). Evaporation suppression and energy balance of water reservoirs covered with self-assembling floating elements. Hydrology and Earth System Sciences, 22(7), 4015–4032. <https://doi.org/10.5194/hess-22-4015-2018>

Assouline, S., & Narkis, K. (2021). Reducing Evaporation From Water Reservoirs Using Floating Lattice Structures. Water Resources Research, 57(6), e2021WR029670. <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2021WR029670>

Friedrich, K., Grossman, R. L., Huntington, J., Blanken, P. D., Lenters, J., Holman, K. D., Gochis, D., Livneh, B., Prairie, J., Skeie, E., Healey, N. C., Dahm, K., Pearson, C., Finnessey, T., Hook, S. J., & Kowalski, T. (2018). Reservoir Evaporation in the Western United States:

Current Science, Challenges, and Future Needs. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 99(1), 167–187.
<https://doi.org/10.1175/BAMS-D-15-00224.1>

Frodge, J. D., Thomas, G. L., & Pauley, G. B. (1990). Effects of canopy formation by floating and submergent aquatic macrophytes on the water quality of two shallow Pacific Northwest lakes. *Aquatic Botany*, 38(2), 231–248. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0304-3770\(90\)90008-9](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0304-3770(90)90008-9)

Ghiat, I., Mackey, H. R., & Al-Ansari, T. (2021). A review of evapotranspiration measurement models, techniques and methods for open and closed agricultural field applications. In *Water (Switzerland)* (Vol. 13, Number 18). MDPI. <https://doi.org/10.3390/w13182523>

Maestre-Valero, J. F., Martínez-Alvarez, V., Gallego-Elvira, B., & Pittaway, P. (2011). Effects of a suspended shade cloth cover on water quality of an agricultural reservoir for irrigation. *Agricultural Water Management*, 100(1), 70–75. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.agwat.2011.08.020>

MGM, (2026). Buharlaşma. www.mgm.gov.tr

Musie, W., & Gonfa, G. (2023). Fresh water resource, scarcity, water salinity challenges and possible remedies: A review. *Heliyon*, 9(8), e18685. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e18685>

Nevermann, H., Aminzadeh, M., Madani, K., & Shokri, N. (2024). Quantifying water evaporation from large reservoirs: Implications for water management in water-stressed regions. *Environmental Research*, 262, 119860. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.119860>

Stefan, H. G., Fang, X., Wright, D., Eaton, J. G., & McCormick, J. H. (1995). Simulation of dissolved oxygen profiles in a transparent, dimictic lake. *Limnology and Oceanography*, 40(1), 105–118. <https://doi.org/https://doi.org/10.4319/lo.1995.40.1.0105>

Yao, X., Zhang, H., Lemckert, C., Brook, A., & Schouten, P. (2010). Evaporation reduction by suspended and floating covers. Overview, modelling and efficiency. *Urban Water Security Research Alliance*.

Waheeb Youssef, Y., & Khodzinskaya, A. (2019). A Review of Evaporation Reduction Methods from Water Surfaces. *E3S Web of Conferences*, 97. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20199705044>

World Bank Blogs (2024). India: unlocking the potential of floating solar power, <https://blogs.worldbank.org/en/energy/india-unlocking-potential-floating-solar-power>

Zhang, H., Gorelick, S. M., Zimba, P. V, & Zhang, X. (2017). A remote sensing method for estimating regional reservoir area and evaporative loss. *Journal of Hydrology*, 555, 213–227. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.10.007>

Zhao, G., & Gao, H. (2019). Estimating reservoir evaporation losses for the United States: Fusing remote sensing and modeling approaches. *Remote Sensing of Environment*, 226, 109–124. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.03.015>

Öz, F.Y., Özelkan, E., Tatlı, H., (2024), Comparative analysis of SPI, SPEI, and RDI indices for assessing spatio-temporal variation of drought in Türkiye, *Earth Sci Inform* 17, 4473–4505, <https://doi.org/10.1007/s12145-024-01401-8>

Özmen, F., Batan, M. (2025), Türkiye’de bulunan Batman ve Diyarbakır illerinin çeşitli kuraklık indeksleriyle kuraklık analizlerinin yapılması, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 31(6), 1036-1048, <https://doi.org/10.5505/pajes.2025.50945>

Ghasemlounia, R., Utlu, M. (2024). Meteorolojik kuraklık indeksleri kullanarak kuraklık değerlendirmesi: Alanya (Türkiye) vaka çalışması, *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, 10(1), 215–233, <https://doi.org/10.21324/dacd.1359193>

Brown, S., & Cotton, M. (2011). Changes in soil properties and carbon content following compost application: Results of on-farm sampling. *Compost Science & Utilization*, 19(2), 87–96. <https://doi.org/10.1080/1065657X.2011.10736983>

Zhao, F. J., Ma, Y., Zhu, Y. G., Tang, Z., & McGrath, S. P. (2015). Soil contamination in China: current status and mitigation strategies. *Environmental science & technology*, 49(2), 750-759.

Amezket, E. (1999). Soil aggregate stability: A review. *Journal of Sustainable Agriculture*, 14(2–3), 83–151. https://doi.org/10.1300/J064v14n02_08

Farooq, M., Wahid, A., Kobayashi, N. S. M. A., Fujita, D. B. S. M. A., & Basra, S. M. (2009). Plant drought stress: effects, mechanisms and management. In *Sustainable agriculture* (pp. 153-188). Dordrecht: Springer Netherlands.

De Vries, F. T., Griffiths, R. I., Bailey, M., Craig, H., Girlanda, M., Gweon, H. S., Hallin, S., Kaisermann, A., Keith, A. M., Kretschmar, M., Lemanceau, P., Lumini, E., Mason, K. E., Oliver, A., Ostle, N., Prosser, J. I., Thion, C., Thomson, B., & Bardgett, R. D. (2018). Soil bacterial networks are less stable under drought than fungal networks. *Nature Communications*, 9, 3033. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-05516-7>

Lal, R. (2004). Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*, 304(5677), 1623–1627. <https://doi.org/10.1126/science.1097396>

Rogers, R. R., & Yau, M. K. (1989). *A short course in cloud physics* (3rd ed.). Butterworth-Heinemann.

Kang, N. Y., & Elsner, J. B. (2015). Trade-off between intensity and frequency of global tropical cyclones. *Nature Climate Change*, 5(7), 661–664.

Laaksonen, A., & Malila, J. (2021). *Nucleation of water: from fundamental science to atmospheric and additional applications*. Elsevier.

Bruintjes, R. T. (1999). A review of cloud seeding experiments to enhance precipitation and some new prospects. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 80(5), 805–820. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1999\)080%3C0805:AROCSE%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1999)080%3C0805:AROCSE%3E2.0.CO;2)

Silverman, B. A. (2003). A critical assessment of hygroscopic cloud seeding. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 84(9), 1219–1230. <https://doi.org/10.1175/BAMS-84-9-1219>

AghaKouchak, A., Farahmand, A., Melton, F. S., Teixeira, J., Anderson, M. C., Wardlaw, B. D., & Hain, C. R. (2015). Remote sensing of drought: Progress, challenges, and opportunities. *Remote Sensing of Environment*, 174, 234–245. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.01.002>

Entekhabi, D., Njoku, E. G., O'Neill, P. E., Kellogg, K. H., Crow, W. T., Edelstein, W. N., Entin, J. K., Goodman, S. D., Jackson, T. J., Johnson, J., Kimball, J., Piepmeier, J. R., Koster, R. D., Martin, N., McDonald, K. C., Moghaddam, M., Moran, S., Reichle, R., Shi, J. C., ... Van Zyl, J. (2010). The Soil Moisture Active Passive (SMAP) mission. *Proceedings of the IEEE*, 98(5), 704–716. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2010.2043918>

Dorigo, W., Wagner, W., Albergel, C., Albrecht, F., Balsamo, G., Brocca, L., Chung, D., Ertl, M., Forkel, M., Gruber, A., Haas, E., Hamer, P. D., Hirschi, M., Ikonen, J., Kidd, R., Miralles, D., Lecomte, P., Liu, Y. Y., Parinussa, R. M., ... de Jeu, R. (2017). ESA CCI soil moisture for improved Earth system understanding: State-of-the-art and future directions. *Remote Sensing of Environment*, 203, 185–215. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.07.001>

Van der Burgt, F., van Pelt, S., & Lobbrecht, A. (2018). Mobile weather services for small-scale farmers. *Weather Impact*, 20.

Brown, S., & Cotton, M. (2011). Changes in soil properties and carbon content following compost application: Results of on-farm sampling. *Compost Science & Utilization*, 19(2), 87–96.

<https://doi.org/10.1080/1065657X.2011.10736983>

Lal, R. (2004). Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*, 304(5677), 1623–1627. <https://doi.org/10.1126/science.1097396>

National Research Council, Division on Earth, Life Studies, Board on Atmospheric Sciences, Committee on the Status of, & Future Directions in US Weather Modification Research. (2004). *Critical issues in weather modification research*. National Academies Press.

Hao, Z., AghaKouchak, A., Nakhjiri, N., & Farahmand, A. (2014). Global integrated drought monitoring and prediction system. *Scientific data*, 1(1), 140001.

Silverman, B. A. (2003). A critical assessment of hygroscopic cloud seeding. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 84(9), 1219–1230. <https://doi.org/10.1175/BAMS-84-9-1219>

Abdelkareem, M., & Mansour, A. M. (2023). Risk assessment and management of vulnerable areas to flash flood hazards in arid regions using remote sensing and GIS-based knowledge-driven techniques. *Natural Hazards*, 117(3), 2269. <https://doi.org/10.1007/s11069-023-05942-x>

Almouctar, M. A. S., Wu, Y., Zhao, F., & Qin, C. (2024). Drought analysis using normalized difference vegetation index and land surface temperature over Niamey region, the southwestern of the Niger between 2013 and 2019. *Journal of Hydrology Regional Studies*, 52, 101689. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2024.101689>

Avşar, Y. (2025). Sünger Kentlere Geçiş: Türkiye’de Kentsel Su Sorununun ve Yönetiminin Çözümüne Yönelik Zorluklar ve Fırsatlar. *İnsan ve Toplum Bilimleri Araştırmaları Dergisi*, 14(1), 459. <https://doi.org/10.15869/itobiad.1616174>

Başar, B. (2015). Samsun ili Terme ilçesi 1 boyutlu ve 2 boyutlu taşkın modellemesi ve yukarı havza yapısal çözüm önerileri. [Concordia University]. In *Spectrum Research Repository* (Concordia University). <https://hdl.handle.net/11511/24519>

Civan, D., & Görmüş, S. (2023). Green Infrastructure Practices for Improving Urban Sustainability. *İnönü Üniversitesi Sanat ve Tasarım Dergisi*, 27, 72. <https://doi.org/10.16950/iujad.1316489>

Colombo, N., Guyennon, N., Valt, M., Salerno, F., Godone, D., Cianfarra, P., Freppaz, M., Maugeri, M., Manara, V., Acquafredda, F., Petrangeli, A. B., & Romano, E. (2023). Unprecedented snow-drought conditions in the Italian Alps during the early 2020s. *Environmental Research Letters*, 18(7), 74014. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/acdb88>

Coşkun Hepcan, Ç. (2022). Doğa Temelli Çözümler Ve Kentsel Dirençlilik.

Demirel, M., & Torlak, S. E. (2016). Su Kirliliğini Önlemede Bütünleşik Havza Yönetiminin Etkisi: Büyük Menderes Havzası Örneği.

Dikici, M. (2018). Asi Havzası'nda (Türkiye) Kuraklık Analizi. Doğal Afetler ve Çevre Dergisi, 5(1), 22. <https://doi.org/10.21324/dacd.426784>

Eroğlu, T. A., & Apaydın, H. (2020). Estimation of Drought by Streamflow Drought Index (SDI) and Artificial Neural Networks (ANNs) in Ankara-Nallihan Region. Turkish Journal of Agriculture - Food Science and Technology, 8(2), 348. <https://doi.org/10.24925/turjaf.v8i2.348-357.3045>

Gichuhi, G., & Gitahi, S. (2020). Sustainable Urban Drainage Practices and Their Effects on Aquifer Recharge. In Springer eBooks (p. 1). Springer Nature. https://doi.org/10.1007/978-3-030-42091-8_67-1

Gümüş, V., Yıldız, M. S., & Şimşek, O. (2018). Hidrolojik Kuraklık Değerlendirmesi: Murat Nehri-Palu Örneği. 3(3), 297. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/humder/issue/42425/511951>

Güney, B. S. (2020). Havza Yönetimi Yaklaşımı Çerçevesinde Yeraltı Barajları. DergiPark (Istanbul University). <https://dergipark.org.tr/tr/pub/su/issue/53341/694564>

Hale, K., Jennings, K. S., Musselman, K. N., Livneh, B., & Molotch, N. P. (2023). Recent decreases in snow water storage in western North America. Communications Earth & Environment, 4(1), 170. <https://doi.org/10.1038/s43247-023-00751-3>

Han, J., Liu, Z., Woods, R., McVicar, T. R., Yang, D., Wang, T., Hou, Y., Guo, Y., Li, C., & Yang, Y. (2024). Streamflow seasonality in a snow-dwindling world. Nature, 629(8014), 1075. <https://doi.org/10.1038/s41586-024-07299-y>

Healy, R. W., Winter, T. C., LaBaugh, J. W., & Franke, O. L. (2007). Water Budgets: Foundations for Effective Water-Resources and Environmental Management. U.S. Geological Survey Circular/U.S. Geological Survey Circular. <https://doi.org/10.3133/cir1308>

Helmreich, B. (2021). Rainwater Management in Urban Areas. Water, 13(8), 1096. <https://doi.org/10.3390/w13081096>

Hüseyin, T. (2014). İklim değişikliği ve Bartın Çayı Havza yönetimi muhtemel sorunları. Coğrafi Bilimler Dergisi, 12(1), 1. https://doi.org/10.1501/cogbil_0000000150

Kale, M. M. (2021). Akarçay Kapalı Havzası için Hidrolojik Kuraklık Analizi. Coğrafya Dergisi / Journal of Geography, 42. <https://doi.org/10.26650/jgeog2021-892360>

Kartal, V., & Emiroğlu, M. E. (2024). Hydrological Drought and Trend Analysis in Kızılırmak, Yeşilirmak and Sakarya Basins. Pure and Applied Geophysics, 181(6), 1919. <https://doi.org/10.1007/s00024-024-03499-9>

Kocabaş, H. M. (2024). Türkiye’de İklim Değişikliğine Uyum Bağlamında Suya Duyarlı Kentsel Planlama ve Tasarım Yaklaşımlarının Önemi. Kent Akademisi, 17(5), 1611. <https://doi.org/10.35674/kent.1516739>

Koçyiğit, M. B., & Akay, H. (2018). Estimation of potential flash flood risk in a basin using morphometric parameters: A case study of Akçay Basin.

Le, E., Janssen, J., Hammond, J. C., & Ameli, A. (2023). The persistence of snow on the ground affects the shape of streamflow hydrographs over space and time: a continental-scale analysis. Frontiers in Environmental Science, 11. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1207508>

Long, J. W., & Davis, J. (2016). Erosion and Restoration of Two Headwater Wetlands Following a Severe Wildfire. Ecological Restoration, 34(4), 317. <https://doi.org/10.3368/er.34.4.317>

Mekonnen, S. (2017). Review on the Role of Forest Landscapes in Watershed Hydrologic Processes. VNU Journal of Science: Natural Sciences and Technology (Vietnam National University), 7(11), 97. <http://iiste.org/Journals/index.php/JEES/article/view/39698>

Mengü, G. P., Anaç, S., & Özçakal, E. (2011). Kuraklık Yönetim Stratejileri. Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi, 48(2), 175. <https://app.trdizin.gov.tr/makale/TVRFM05ETTNOdz09/kuraklik-yonetim-stratejileri>

Mohammadzadeh-Habili, J., & Khalili, D. (2020). Assessment of Artificial Recharge Dams and Improvement of Their Groundwater-Recharge Capacity. Journal of Hydrologic Engineering, 25(5). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)he.1943-5584.0001909](https://doi.org/10.1061/(asce)he.1943-5584.0001909)

Mumlu, D. T. (2024). Kamu Yönetimi Teşkilatı Bağlamında Türkiye’de Su Yönetimi: Tespitler Ve Öneriler. International Journal of Management and Administration. <https://doi.org/10.29064/ijma.1540752>

Nugroho, H. Y. S. H., Sallata, M. K., Allo, M. K., Wahyuningrum, N., Supangat, A. B., Setiawan, O., Njurumana, G. N., Isnani, W., Auliyani, D., Ansari, F., Hanindityasari, L., & Najib, N. N. (2023). Incorporating

Traditional Knowledge into Science-Based Sociotechnical Measures in Upper Watershed Management: Theoretical Framework, Existing Practices and the Way Forward. *Sustainability*, 15(4), 3502. <https://doi.org/10.3390/su15043502>

Osmanoglu, D., & Papageorgiou, S. (2021). Entegre Nehir Taşkın Yönetiminde Doğa Temelli Çözümlere Doğru Bolaman Nehir Havzası - Türkiye.

Özfidaner, M., Şapolyo, D., & Topaloğlu, F. (2018). Seyhan Havzası Akım Verilerinin Hidrolojik Kuraklık Analizi. *Soil Studies*, 57. <https://doi.org/10.21657/topraksu.410140>

Öztürk, İ., Özgün, H., Özabalı Sabuncugil, A., Çiçekalan, B., Deneri, E. Z., Cüceloğlu, G., Sarıkaya, M. S., Aydın, A., & Sarıkaya, H. Z. (2020). Su, İklim Değişimi ve Ortak Geleceğimiz.

Öztürk, S., Tönük, G. U., & Gülgün, B. (2014). Türkiye’de Havza Yönetimi ve Yönetim Planı Yaklaşımları. *Ziraat Mühendisliği*, 361, 59. <https://dergipark.org.tr/en/pub/zm/issue/52105/680874>

PAMUKOĞLU, M. Y., & BABALIK, A. A. (2024). Sürdürülebilir Havza Yönetimi: Çok Disiplinli Yaklaşımlar ve Geleceğe Yönelik Çözüm Önerileri.

Parlak, E. A., & Atik, M. (2020). Dünyadan Ve Ülkemizden Mavi – Yeşil Altyapı Uygulamaları. *Peyzaj*, 2(2), 86. <https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/1213444>

Partigöç, N. S., & Soğancı, S. (2019). Küresel İklim Değişikliğinin Kaçınılmaz Sonucu: Kuraklık. *Resilience*, 3(2), 287. <https://doi.org/10.32569/resilience.619219>

Robichaud, P. R., Beyers, J. L., & Neary, D. G. (2000). Evaluating the effectiveness of postfire rehabilitation treatments. <https://doi.org/10.2737/rmrs-gtr-63>

Sakın, I., & Fındık, S. B. (2014). Taşkın Riski Yönetiminde Yetki - Sorumluluk Dağılımı ve Kurumlar Arası İşbirliği Türkiye İçin Öneriler.

Semiz, M., & Kap Yücel, S. D. (2016). Yeşil Altyapı Sistemleri ve Kent Sürdürülebilirliği İlişkisi.

Sharp, J. M. (2010). The impacts of urbanization on groundwater systems and recharge. *Digital Commons - University of South Florida (University of South Florida)*. <https://doi.org/10.4409/am-004-10-0008>

Shiferaw, N., Habte, L., & Waleed, M. (2025). Land use dynamics and their impact on hydrology and water quality of a river catchment: a comprehensive analysis and future scenario. *Environmental Science and Pollution Research*, 32(7), 4124. <https://doi.org/10.1007/s11356-025->

Sun, X., Zhang, H., Hua, D., & Wei, B. (2021). The Influence of Urbanization on Storm Runoff. IOP Conference Series Earth and Environmental Science, 769(2), 22031. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/769/2/022031>

Susilo, K., Matasović, N., & Johnson, R. S. (2009). Considerations, Opportunities, and Strategies for Infiltration Stormwater BMPs. World Environmental and Water Resources Congress 2011. [https://doi.org/10.1061/41036\(342\)97](https://doi.org/10.1061/41036(342)97)

Suttles, K. M., Eagle, A. J., & McLellan, E. L. (2021). Upstream Solutions to Downstream Problems: Investing in Rural Natural Infrastructure for Water Quality Improvement and Flood Risk Mitigation. Water, 13(24), 3579. <https://doi.org/10.3390/w13243579>

Tokmak, M., & Güneş Gölbe, A. (2021). Yeşil Altyapı Yaklaşımıyla Kentsel Akarsuların Rehabilitasyonu: Poligon Deresi Örneği.

Tuna, M., & Armut, S. (2021). Orta Ölçekli Bir Şehirde Kentsel Su Yönetimi: Amasya İli Merzifon İlçesi Örneği. Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 8(2), 990. <https://doi.org/10.35193/bseufbd.987582>

Tunçay, H. E., Sarıkaya, M. S., Gölbaşı, G. Y., Tunçay, H. E., & Torun, E. (2021). Suya Duyarlı Şehirler.

Turhan, E., Çulha, B. D., & Değerli, S. (2022). Akım Kuraklık İndeksi Yönteminin Farklı Zaman Ölçekleri İçin Hidrolojik Olarak Değerlendirilmesi: Arsuz Ovası Örnek Çalışması. Doğal Afetler ve Çevre Dergisi, 8(1), 25. <https://doi.org/10.21324/dacd.903655>

Ünal, U. O., & Akyüz, D. E. (2018). Yeşil Altyapı Uygulamaları Kapsamında Yağmur Hendeklerinin Önemi ve Sürdürülebilir Kent Anlayışı ile Değerlendirilmesi. 3(2), 55. <https://dergipark.org.tr/en/pub/idec/issue/39582/447570>

Vo, V. D., & Kinoshita, A. M. (2020). Remote sensing of vegetation conditions after post-fire mulch treatments. Journal of Environmental Management, 260, 109993. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109993>

Yadav, S. K. (2023). Land Cover Change and Its Impact on Groundwater Resources: Findings and Recommendations. In IntechOpen eBooks. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.110311>

Yıldırım, S., & Demirci, U. (2024). Havza yönetimi yaklaşımlarında uluslararası alanda yaşanan gelişmelerin Türkiye'deki politika ve strateji belgelerine yansımaları. Anadolu Orman Araştırmaları Dergisi, 10(1), 78. <https://doi.org/10.53516/ajfr.1465516>

Zema, D. A., Stan, J. T. V., Plaza-Álvarez, P. A., Xu, X., Carrà, B. G., & Lucas-Borja, M. E. (2021). Effects of stand composition and soil properties on water repellency and hydraulic conductivity in Mediterranean forests. *Ecohydrology*, 14(3).
<https://doi.org/10.1002/eco.2276>