

Gıda Güvenliği ve Tarımsal Sular: Mikrobiyolojik ve Kimyasal Risklerin Değerlendirilmesi

Miray Rezzan DEMİR¹, Rabia ARSLAN ÖZTÜRK¹, Sümeyra IŞIK², Halil İbrahim UZUN³, Sefa IŞIK⁴, Zeynal TOPALCENGİZ³

¹Gıda Güvenliği Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Muş Alparslan Üniversitesi, Muş, Türkiye

²Gıda Mühendisliği Bölümü, Ziraat Fakültesi, Atatürk Üniversitesi, Erzurum, Türkiye

³Gıda Mühendisliği Bölümü, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Muş Alparslan Üniversitesi, Muş, Türkiye

⁴Gıda İşleme Bölümü, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Muş Alparslan Üniversitesi, Muş, Türkiye

✉: hibrahimuzun@gmail.com  [0009-0005-1776-727X](https://orcid.org/0009-0005-1776-727X)  [0000-0002-8301-0006](https://orcid.org/0000-0002-8301-0006)  [0000-0002-7203-1207](https://orcid.org/0000-0002-7203-1207)

 [0000-0001-6158-743X](https://orcid.org/0000-0001-6158-743X)  [0000-0002-1480-7230](https://orcid.org/0000-0002-1480-7230)  [0000-0002-2113-7319](https://orcid.org/0000-0002-2113-7319)

Geliş (Received): 11.08.2025

Düzeltilme (Revision): 18.09.2025

Kabul (Accepted): 29.09.2025

ÖZ

Tarım alanlarında su kaynakları sulama faaliyetlerine ek olarak yaprak gübre uygulaması, yıkama, soğutma ve don koruması gibi amaçlarla çiftçiler tarafından kullanılmaktadır. Tarımsal su kaynakları tarım arazilerinin veya sera gibi üretim alanlarının yakınındaki su rezervlerinin varlığına göre çeşitlilik gösterebilmektedir. Yüzey sularının gıda kaynaklı hastalıklara sebep olan mikroorganizmalarla kirlenme riskleri yeraltı sularına veya şebeke suyuna göre daha fazladır. Patojenlerin, tarımsal sular ile çiğ olarak tüketilen ürünlerin yenilebilen kısımlarına kontaminasyonu, birçok gıda kaynaklı zehirlenmeye sebep olmaktadır. Bu durum kimyasal kirleticiler için de geçerlidir. Tarımsal suların mikrobiyolojik ve kimyasal olarak kontamine olması doğrudan gıda güvenliğini ve doğal olarak halk sağlığını riske atmaktadır. Bu derleme, tarımsal suların gıda güvenliğindeki rolünü, mikrobiyolojik ve kimyasal kirleticileri, kontaminasyon risklerini kapsamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Sulama suyu, Yüzey su kaynakları, Mikrobiyolojik su kalitesi, Kimyasal su kalitesi, Gıda kaynaklı patojenler, Pestisitler, Güvenli yeşillik üretimi

Food Safety and Agricultural Waters: Assessment of Microbiological and Chemical Risks

ABSTRACT

In agricultural fields, water resources are used by farmers not only for irrigation activities but also for purposes such as foliar fertilizer application, washing, cooling, and frost protection. Agricultural water resources may vary depending on the presence of water reservoirs near farmlands or production areas such as greenhouses. Compared to groundwater or municipal water, surface waters carry a higher risk of contamination with microorganisms that cause foodborne diseases. The contamination of edible parts of fresh produce consumed raw by pathogens through agricultural waters has been associated with numerous foodborne illnesses. This risk also applies to chemical contaminants. Microbiological and chemical contamination of agricultural waters directly threatens food safety and, consequently, public health. This review addresses the role of agricultural waters in food safety, microbiological and chemical contaminants, and contamination risks.

Keywords: Irrigation water, Surface water sources, Microbiological water quality, Chemical water quality, Foodborne pathogens, Pesticides, Safe produce growth

GİRİŞ

Tarımsal su, sulama, donma koruması, gübre ve pestisit uygulaması, mahsul soğutma, donanım temizliği ve topraktan tuzun uzaklaştırılması dahil olmak üzere tüm tarımsal amaçlar için kullanılan suyu ifade etmektedir [1]. Tarımsal su kaynakları bulunduğu yere göre farklılık gösterebilmektedir. Üreticiler su kaynağı olarak

erişime uygun yer altı kuyuları, nehirler, göller ve yapay/doğal göletler gibi kaynaklardan birini veya birkaçını beraber kullanmaktadırlar. Ayrıca, tarımsal sulama amacıyla kullanılan sular; yağmur suları, arıtılmış ya da arıtılmamış evsel ve endüstriyel atıksular gibi çeşitli kaynaklardan temin edilmektedir [2]. Tarımsal aktiviteler için kullanılan birçok su kaynağı, doğrudan veya dolaylı yollarla kirleticilerle

yüklenmekte; bu da çevresel, üretimsel ve insan sağlığı risklerini beraberinde getirmektedir. Kimyasal ve biyolojik kirleticiler tarımsal sularda en sık karşılaşılan kontaminant gruplarıdır. Pestisit kalıntıları, nitrat ve fosfat birikimi, ağır metaller, deterjan ve farmasötik atıkları kimyasal kontaminantlar arasında yer alırken, gıda kaynaklı hastalıklara ve zehirlenme vakalarına neden olan patojen mikroorganizmalar ile parazitik etkenler biyolojik kontaminantlar arasında yer almaktadır.

Biyolojik kontaminantlar, tarımsal sularda bulunan patojen mikroorganizmaların varlığı ve mahsullerin yenilebilir kısmına kontaminasyonuyla ilişkilidir. Patojen mikroorganizmalar bitkilere su kaynaklarından temas yoluyla geçerek halk sağlığı açısından risk teşkil etmekte; ayrıca sucul ekosistemlerde mikrobiyal dengeyi bozabilmektedir [3, 4]. Özellikle taze olarak tüketilen gıda kaynaklı patojenlerle kontamine olmuş yeşillikler ile sebze ve meyvelerin neden olduğu zehirlenmeler artarak devam etmektedir [5, 6]. Tarımsal suların gıda kaynaklı zehirlenmelere doğrudan neden olduğu onaylanmış salgınlar bulunmaktadır [7]. Bu nedenle tarımsal sular, patojenlerin mahsule kontamine olmasında ana kaynaklardan biri olarak kabul edilmektedir [8]. Tarımsal sularda patojen mikroorganizmaların varlığı ve konsantrasyonu; su kaynağının konumu ve türünden, sulama ve hasat arasındaki süreden, sulama suyunun dağıtım yönteminden ve suyun etrafındaki tarımsal faaliyetlerden, vahşi hayvanlardan, hava olaylarından, akıştan, yağıştan ve dipteki su ile temasta bulunan doğal mikrobiyal rezervuarlardan etkilenecek değişmektedir [7, 9, 10]. Özellikle marul, maydanoz, roka gibi yıkama dışında herhangi bir işlem görmeden tüketilen yeşilliklerin, kontamine sularla temas etmesi durumunda, insan sağlığına zararlı mikroorganizmaların tüketiciye ulaşma riski oldukça yüksektir [11]. Bu mikroorganizmalar taze mahsullerin üretilmesinden tüketimine kadar herhangi bir noktada varlığını sürdürerek çoğalabilmektedir [12]. Yaygın olarak *Escherichia coli* O157:H7, *Salmonella* türleri, *Listeria monocytogenes*, *Shigella* türleri, Norovirüs ve *Cryptosporidium parvum* gibi insan patojenleri gıda kaynaklı salgınlara neden olmaktadır [13]. Tarımsal sularla patojenler hasat öncesi, sırası ve sonrası üretim aşamaları sırasında mahsullere geçerek halk sağlığı açısından ciddi tehdit oluşturabilmektedir.

Tarımsal sulardaki kimyasal kontaminantlar, hem çevre hem de halk sağlığı açısından ciddi tehditler oluşturmaktadır [14, 3]. Kimyasal kirleticiler, tarımsal sulara izlenebilir, belirli çıkış noktasına sahip noktasal kaynaklardan ve daha dağınık ve geniş alanlara yayılan kirlilik biçimlerini ifade eden yayılı kaynaklardan dahil olmaktadır. Bu durum çevresel yönetim ve gıda güvenliği açısından ciddi belirsizlikler doğurmaktadır. Özellikle yayılı kaynaklı kirlilikler, sulama periyotlarıyla birlikte doğrudan yeraltı ve yüzey sularına taşınmakta; bu da toksik elementlerin gıda zincirine dahil olmasına zemin hazırlamaktadır [15, 16]. Gıda güvenliği perspektifinden değerlendirildiğinde, pestisit

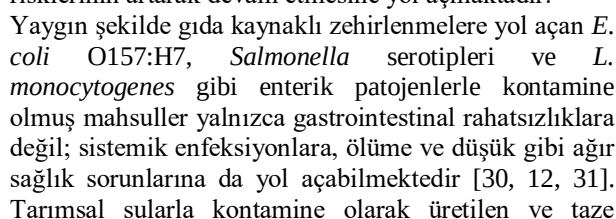
kalıntıları ve ağır metallerin sebep olduğu kimyasal kontaminasyon, özellikle uzun süreli maruziyetlerde kümülatif toksisite, nörolojik bozukluklar, kanserojen etki ve endokrin sistem hasarı gibi ciddi sonuçlara yol açmaktadır [14,3]. Ağır metaller tarımsal su ile taşındıklarında bitkiler tarafından biyoakümüle edilerek mahsul kalitesi ve güvenliği açısından risk oluşturmaktadır [17]. Aynı şekilde, pestisitlerin lipofilik yapısı, onları bitki dokularında birikmeye yatkın hale getirmektedir [11]. Farmasötik kalıntılar ve antibiyotikler ise hem antimikrobiyal direnç gelişimini tetiklemekte hem de tarımsal sularda mikrobiyal çeşitliliği bozarak ekosistem düzeyinde sürdürülebilirliği tehdit etmektedir. PFAS ve Bisfenol A gibi endokrin bozucular ise sucul ortamlarda bozunmaya dirençli yapılarıyla uzun süre varlıklarını korumakta ve gıda zincirine dahil olduklarında hormonal sistemler üzerinde bozulmalara neden olabilmektedir [14]. Dolayısıyla tarımsal suların kimyasal kalitesi, yalnızca gıda güvenliği bağlamında değil, aynı zamanda çevresel toksikoloji ve ekosistem sağlığı açısından da çok boyutlu bir değerlendirmeyi zorunlu kılmaktadır.

Dünya genelinde yaklaşık bir milyar insan temiz suya erişimde güçlük çekerken, üç milyara yakın insan ise su stresi altındaki bölgelerde yaşamaktadır [18]. Tarımsal faaliyetler, küresel tatlı su tüketiminin yaklaşık %70'ini oluşturarak su stresini daha da artırmaktadır [19]. Özellikle kurak ve yarı kurak bölgelerde, suyun yeniden kullanımı bir zorunluluk haline gelmiş; bu durum ise mikrobiyal ve kimyasal kirleticilerin tarım çevrimlerine entegrasyon riskini ve doğrudan gıda güvenliği endişelerini artırmaktadır. Tarımsal sular, doğal çevresel etkileşimler nedeniyle kontamine olabileceği gibi evsel, endüstriyel ve özellikle tarımsal kaynaklı faaliyetler sonucu da kimyasal ve mikrobiyolojik kirleticilerle kontamine olabilmektedir [20, 21]. Bu derleme çalışmasının amacı, tarımsal sularda yaygın olarak karşılaşılan mikrobiyolojik ve kimyasal kirleticileri, bunların çevresel davranışlarını, kaynaklarını ve taşınım yollarını literatür temelli olarak incelemek; aynı zamanda sürdürülebilir su yönetimi açısından oluşturdıkları riskleri gıda güvenliği perspektifiyle değerlendirmektir.

1. MİKROBİYOLOJİK RİSKLER

Tarımsal üretimde su, bitkilerin büyümesi için gerekli olmakla birlikte patojen mikroorganizmaların dolaylı veya direkt olarak gıdaya taşınmasında kritik bir etkidir. Mikrobiyolojik kirleticiler; bakteriler, virüsler, protozoalar, helmint yumurtaları ve mikrobiyal toksinleri kapsayan oldukça geniş bir gruptur. Bu kirleticiler, evsel ve ticari faaliyet sonucu üretilen yeterince arıtılmamış atıksular, hayvan ve insan aktiviteleri, taze veya yeterince bekletilmemiş hayvansal gübre kullanımı, kanalizasyon sızıntıları, tarımsal organik atıklar ve yağışlarla taşınan yüzey akışı yoluyla tarımsal su kaynaklarına karışabilmektedir [22, 23, 8]. Hasat öncesi ve sırasında kontamine olmuş tarımsal

Bakteriyel kontaminasyonun tespiti ve kontrolü; çevresel izleme, gıda işleme süreçleri ve klinik araştırmalar gibi birçok alanda kullanılmakta ve halk



sağlığı açısından belirleyici rol oynamaktadır [2]. Farklı coğrafyalarda yapılan çalışmalar, tarımsal sularda benzer risklerin varlığını ortaya koymaktadır. Kanada'nın Ontario eyaletinde, South Nation Nehri Havzası'ndan alınan tarımsal su örneklerinde *L. monocytogenes* (%23), *E. coli* O157:H7 (%1), *Salmonella* türleri (%10) ve *Campylobacter* türleri (%29) tespit edilmiştir [38]. Kanada'nın Alberta eyaletinde, Oldman Nehri Havzası'nda yürütülen iki yıllık çalışmada tarımsal sulardaki *E. coli* O157:H7 oranı %1,3–2 olarak belirlenmiştir [39]. Johnson ve arkadaşlarının (2003) 1400'den fazla su örneğiyle yaptığı çalışmada ise tarımsal sularda *E. coli* O157:H7 %0,9, *Salmonella* türleri %6,25 oranında saptanmıştır [40]. ABD'nin Orta Atlantik bölgesindeki sulama göletlerinden alınan su örneklerinde *Salmonella* tespit edildiği belirtilmiştir [41]. Diğer bir çalışmada, ABD'de meyve ve sebze tarlalarına yakın olan yüzey sularından alınan 174 adet su numunelerinin 48, 16 ve 4'ünde sırasıyla *L. monocytogenes*, *Salmonella* türleri ve STEC tespit edilmiştir [42]. ABD'de Orta Florida ve Kaliforniya'daki çiftliklerde sulama için kullanılan ve kullanılmayan su kaynaklarından alınan su ve çöktürlerden *Salmonella* ve *E. coli* O157:H7 izole edilmiştir [43–45]. Avrupa'da, İspanya'nın güneydoğusunda sulama amaçlı kullanılan su kaynaklarında yapılan bir çalışmada *Salmonella* türleri (%43), *E. coli* O157:H7 (%12) ve STEC (%11) varlığı rapor edilmiştir [46]. ABD'nin New York eyaletindeki bir çalışmada ise ispanak tarlalarının sulandığı yüzey sularından alınan örneklerin %52'sinde *Listeria monocytogenes* tespit edilmiştir [47]. Türkiye'de tarımyoğun bölgelerde yapılan saha çalışmaları da sulama sularının fekal koliformlar, *Escherichia coli* ve *Salmonella* türleri gibi potansiyel patojenlerle kontamine olduğunu göstermektedir [48, 49]. Farklı analiz hacimleri ve yöntemsel değişkenliklere rağmen, bu çalışmalar tarımsal sularda patojen kontaminasyonunun yaygın ve süreklilik arz eden bir durum olduğunu ortaya koymaktadır.

1.1.2. Virüsler

Tarımsal sulamada kullanılan yüzey ve yeraltı suları, viral patojenlerin yayılımı açısından önemli birer kontaminasyon kaynağıdır. İnsan kaynaklı atıkların sulama sistemlerine karışması, özellikle enterik virüslerin—*Norovirüs*, *Hepatit A virüsü* ve *Rotavirüs* gibi—taze meyve ve sebzelere bulaşmasına neden olmaktadır [50]. Virüslerin çevresel koşullara bakterilerden daha dayanıklı olması, arıtılmamış ya da geri kazanılmış sularda kontaminasyon riskini daha da artırmaktadır [51]. Bu virüsler çok düşük dozlarda dahi enfeksiyon riski taşıdığından, sulama suyu kaynaklı bulaşmalar gıda güvenliği ve halk sağlığı açısından ciddi tehditler oluşturmaktadır [52].

ABD'de yapılan bir araştırmada 35 eyaletteki 448 bölgeden yeraltı suyu örnekleri toplanmıştır. Örneklerin %4,8, %31,5, %20,7 ve %15,1'inde sırasıyla enfektif virüsler, viral nükleik asit, bakteriyofajlar ve bakteriler tespit edilmiştir [53]. Yeraltı suları genellikle yüzey

sularına kıyasla daha az riskli kabul edilse de, son yıllarda yapılan çalışmalar bu durumun her zaman geçerli olmadığını göstermektedir. Özellikle yüzeye yakın akiferlerde, yetersiz atık su arıtımı ve jeolojik yapı gibi etkenlerin virüs geçişine olanak sağlayabildiği gösterilmiştir [54]. Güney Kore'de yürütülen bir çalışmada, yeraltı suyu örneğinin %17'sinde *Enterovirüs*, *Adenovirüs* ve *Rotavirüs* tespit edilmiştir [54]. Avrupa'da ise Finlandiya, Çekya, Polonya ve Sırbistan'daki meyve üretim alanlarında alınan sulama suyu örneklerinde *Norovirüs* pozitifliğine rastlanmış, ancak *Hepatit A* virüsüne rastlanmamıştır [55]. İtalya'nın güneyinde yapılan başka bir çalışmada da 26 yeraltı suyu örneğinin %15,38'inde *Norovirüs* saptanmıştır [56]. Bu bulgular, yeraltı sularının yalnızca bakteriyel değil, viral kontaminasyon açısından da dikkate alınması gerektiğini ortaya koymaktadır. *Norovirüs* gibi düşük dozda enfekte edici ve çevresel olarak dirençli virüslerin varlığı, bu suların sulama amacıyla kullanımında mikrobiyolojik açıdan düzenli olarak takip edilmesini zorunlu kılmaktadır.

1.1.3. Protozoa ve parazitler

Tarımsal sularda bulunan parazit mikroorganizmalar, özellikle yüzey sularının dışkı kaynaklı kirliliğe maruz kalması sonucu gıda güvenliği açısından ciddi tehditler oluşturmaktadırlar. *Giardia* türleri, *Cryptosporidium* türleri ve *Toxoplasma gondii* gibi protozoan parazitler, çevresel koşullara dirençli olup, özellikle çiğ tüketilen sebzeler aracılığıyla insanlara bulaşabilmektedir. Bu parazitlerin sulardaki varlığı; iklim, sanitasyon düzeyi ve atık su yönetimi gibi faktörlere bağlı olarak değişkenlik göstermektedir [57]. Norveç'te yapılan bir çalışmada, sulama sularının %20'sinde *Cryptosporidium* oosistlerine, %17'sinde ise *Giardia* kistlerine rastlanmıştır [58]. Bu parazitler düşük dozla enfeksiyona neden olmakla birlikte birçok standart arıtma yöntemine karşı da direnç gösterebilmektedirler. Bu nedenle, özellikle gelişmekte olan ülkelerde sulama sularının mikrobiyolojik açıdan takibi daha da kritik hale gelmektedir.

Farklı bölgelerde yapılan araştırmalar, bu parazitlerin küresel ölçekte yaygın olduğunu göstermektedir. Örneğin Meksika'da yapılan bir çalışmada, sulama kanalı, nehir ve tarımsal atık su kanalından alınan 58 yüzey suyu örneğinin %48'inde *Cryptosporidium* oosistleri, %50'sinde ise *Giardia* kistleri bulunmuştur [59]. Kosta Rika, Meksika, Panama ve ABD'yi kapsayan bir çalışmada ise 25 örneğin %60'ında *Giardia* (geometrik ortalama: 369 kist/100 L), %36'sında *Cryptosporidium* (227 oosist/100 L) tespit edilmiştir [60]. Aynı çalışmada, ABD örnekleri için *Cryptosporidium* pozitifliği %1'in altında raporlanmıştır. Bu bulgular, parazitler kontaminasyonunun yalnızca düşük sanitasyonlu bölgelere özgü olmadığını, gelişmiş ülkelerde dahi görülebildiğini göstermektedir. Bu nedenle, sulama suyunun mikrobiyolojik kalitesinin izlenmesinde protozoan parazitlerin de dahil edilmesi, gıda güvenliği stratejilerinin ayrılmaz bir parçası olmalıdır.

1.2. Tarımsal Sularda Patojenlerin Konsantrasyonuna Etki Eden Çevresel Etmenler

1.2.1. Mekânsal ve zamansal değişiklik

Mikrobiyal su kalitesi bölgeye özgün, mekansal-zamansal ölçeklere göre değişkenlik gösterebilmektedir. Örneğin, *Salmonella* türleri, *C. parvum* ve *E. coli* gibi patojenlerin belli dönemlerde tarımsal sularda yoğunlaştığı, bu durumun ürün kontaminasyonuna zemin hazırladığı bilinmektedir [38]. Gözlenen iklimsel farklılıklar ve değişimler ile değişen hava olayları günümüzde olduğu gibi gelecekte de mikrobiyal su kalitesini etkileyebilmektedir [61, 62, 46, 63]. Örneğin yüzey akışı, yoğun yağışlar sonrası kontaminantların yayılmasını artırırken, yüksek sıcaklıklar bakteriyel çoğalmayı artırmaktadır. Bu nedenle patojen yükü yalnızca zamana değil, mekânsal dağılıma da bağlıdır [44, 64]. Tarımsal sularda mikrobiyal yoğunluk akış rejimi, toprak tipi, hava olayları, güneş ışıması, günün zamanı, tarımsal faaliyetler, hayvan hareketliliği, dışkı kaynaklı kirlilik gibi çok sayıda parametreyle doğrudan ilişkilidir [65, 44, 66, 67]. Bu nedenle, patojenlerin tarımsal su sistemlerindeki dağılımını anlamak için çok sayıda faktörün dikkate alınması gerekmektedir.

Bakteri konsantrasyonları akış uzunluğu boyunca, dikey su sütunu boyunca veya akış genişliği boyunca hızlı bir değişime uğramaktadır. Dip tortulları ve kıyı toprakları, patojenler için çevresel rezervuar görevi görebilmektedir. Bu alanlarda biriken mikroorganizmalar, yağış veya su hareketleriyle yeniden su kolonuna taşınarak sulama suyunun mikrobiyal yükünü artırabilmektedirler [68, 7]. “Hot spots – Sıcak noktalar” alanlarının oluşumu, örneklem sonuçlarında dalgalanmalara ve risk analizlerinde sapmalara neden olmaktadır [69]. Örneğin, kirlenme kaynağı yakınında, yüzey akışının meydana geldiği bir gölette daha yüksek patojen oluşumu gözlenmektedir [70]. Bu nedenle bir sulama suyu kanalından alınan tek bir numune gerçek mikrobiyal su kalitesini göstermeyebilir [62]. Kanada’da yapılan bir çalışmada, fekal koliform konsantrasyonlarının orta rakımlarda yüksek, yüksek rakımlarda ise daha düşük olduğu gözlemlenmiştir [71]. Toprak özellikleri, patojenlerin taşınımını belirleyen önemli bir diğer etkidir. Killi ve çatlak topraklar mikroorganizmaların hareketini kolaylaştırırken, taşlı ve yoğun yapılı topraklar filtrasyon etkisiyle bu geçişi sınırlandırabilmektedir [72]. Gözenek yapısı, su tutma kapasitesi ve pH gibi fiziksel faktörler, patojenlerin süzülmesi ve inaktivasyon süresini doğrudan etkilemektedir.

Yağışlar akarsu, rezervuar ve göletlere toprak üzerinden akarak çöktülerden bakteri salınmasına ve boru iç yüzeylerindeki biyofilm tabakasının çözünerek suya karışmasına neden olmakta dolayısıyla patojen ve indikatör organizma konsantrasyonlarını artırmaktadır [73, 7, 45]. Ancak bu artışın tüm patojenler için geçerli olmadığı ve bazı çalışmalarda istatistiksel olarak

anamlı farklılıklar elde edilmediği görülmektedir [67]. ABD’nin Ohio eyaletinde yapılan bir çalışmada, 20 mm yağmurdan sonra alınan örneklerin daha yüksek *E. coli* ve toplam koliform içerdiği tespit edilmiştir [74]. Benzer şekilde güney Georgia ve kuzey ve merkez Florida’da sulama göletlerindeki gösterge mikroorganizma ve *Salmonella* seviyeleri [75, 45] ve Georgia Suwannee Havzasında sulama havuzlarındaki *E. coli* O157:H7 seviyesi yağış miktarının artmasıyla ilişkilendirilmiştir [76]. Havza yüzey sularından toplanan örneklerde *Salmonella* konsantrasyonlarının ve serotiplerinin zamansal olarak değiştiği, mevsimsel yağış ve su sıcaklığından güçlü bir şekilde etkilendiği bildirilmiştir [77]. Bazı parazit (*Giardia lamblia* kistleri ve *Cryptosporidium* ookistleri) konsantrasyonlarının da yağış miktarı ile ilişkili olduğu ve bu türlerin yağış sonrası su kaynaklarında artış gösterdiği bildirilmiştir [78, 63]. Tüm bunlara rağmen büyük yağmur miktarlarının bir sistemdeki su hacmini artırarak patojen konsantrasyonunun azalmasına yol açabileceği de ifade edilmektedir [70].

Su kaynaklarının sağlık açısından güvenliğini değerlendiren çalışmalarda örneklem zamanlaması önem taşımaktadır. Çünkü su örneklerinde patojen prevalansındaki zamansal değişimler örneklemenin yapıldığı günün saatiyle ilişkilendirilmiştir [67, 79]. Özellikle güneş ışığına maruz kalma durumunda, indikatör mikroorganizmaların inaktivasyon oranının daha yüksek olduğu ifade edilmektedir [80, 81]. Sabah saatlerinde düşük UV ışıması nedeniyle patojen seviyeleri daha yüksek ölçülebilen; öğle saatlerinde artan ultraviyole etkisi bakteriyel inaktivasyonu artırarak mikrobiyal yükü azaltabilmektedir [82]. Güneybatı ABD’de yapılan bir çalışmada, aynı yerden sabah ve öğleden sonra alınan su örnekleri arasında istatistiksel olarak farklılık bulunmuş ve sabah saatlerinde alınan örneklerde daha yüksek *E. coli* seviyeleri gözlemlenmiştir. Örneklemenin ise sabah saatlerinde yapılması önerilmiştir [62]. Muirhead ve Meenken (2018), temel akışlardaki *E. coli* konsantrasyonlarının değişkenliğini (dakika, saat ve gün) zaman ölçeklerinde araştırmış ve bunu ölçüm yöntemlerinin laboratuvar tekrarından elde edilen değişkenlikle karşılaştırmıştır [62, 83]. Kanada’da yapılan bir araştırmada ise üç akarsudan 24 saat boyunca 15 dakikada bir numune alınarak *E. coli* konsantrasyonu incelenmiş ve gün boyunca popülasyon miktarlarında değişkenlik olduğu belirtilmiştir [84]. Dolayısıyla, tek bir su numunesi sulama periyodu boyunca suyun mikrobiyal kalitesini yalnızca sınırlı ölçüde yansıtmakta; daha güvenilir değerlendirmeler için zamana bağlı tekrar eden örneklemeler gerekmektedir.

Sıcak hava koşulları, patojenlerin gelişimini artırma eğilimindedir ve bu durum özellikle yaz aylarında belirgin hale gelmektedir [39, 85, 86]. İlkbahar ve yaz aylarında artan sıcaklık, bakteriyel çoğalmayı hızlandırırken; yoğun yağışlar toprak erozyonunu ve kanalizasyon taşkınlarını artırarak kontaminasyon riskini yükseltmektedir [38]. *Campylobacter* ve

Cryptosporidium gibi zoonotik patojenlere bahar-yaz dönemlerinde daha sık rastlanmaktadır. Ancak bazı araştırmalar, bu değişkenlerin etkisinin istatistiksel olarak anlamlı olmadığını, mikrobiyal yükteki farklılıkların çevresel koşullardan daha çok etkilendiğini öne sürmektedir [86, 61]. Sharma et al. (2020) tarafından yapılan çalışmada orta Atlantik ABD’de altı farklı sulama suyunda yaz aylarındaki *L. monocytogenes* seviyesinin kış ve ilkbahara göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir [86, 61, 64]. ABD’nin güney Georgia eyaletinde yapılan bir çalışmada ise sulama suyu örneklerindeki *Salmonella* türleri ve genel *E. coli* varlığının yüksek sıcaklıklarla ilişkili olduğu ifade edilmiştir [61]. Norovirüs (NoV) ve Hepatit A virüsü (HAV) gibi virüslerin de yüzey sularındaki varlığı sıcaklıkla ilişkilendirilmiştir [87]. Gübreleme ve yüzey akışı gibi uygulamaların sıklıkla yapıldığı saatlerde patojen taşınımı artış gösterebilmektedir. Büyük ölçekli hayvancılık ve endüstriyel hayvan üretim tesislerinden kaynaklanan hayvan atıkları, tarımsal kaynaklı su kirliliğinin önemli nedenlerinden biri olarak kabul edilmektedir. Hayvancılığın yoğun olduğu bölgelerde sulama suları daha yüksek patojen riski taşımaktadır. Özellikle Brezilya, Meksika ve Çin gibi ülkelerde tarımsal üretimin hızla yayılmasıyla birlikte, yetersiz atık yönetim sistemleri ve sızıntıya açık büyük lagünlerin kullanımı, yüzey ve yeraltı su kaynaklarının kirlenme riskini artırmaktadır [88]. Hayvan atıkları, yağışlarla birlikte yüzey akışı yoluyla su kaynaklarına kolayca ulaşabilmektedir. Sulama suyunun kaynağı da bu riski etkilemekte; yüzey sularının ve arıtılmamış atıksuların, yeraltı sularına kıyasla daha fazla kontaminasyon potansiyeline sahip olduğu görülmektedir [70].

1.2.2. Bölgesel ve Yerel Farklılıklar

Gelişmekte olan ülkelerde, arıtılmamış evsel ve endüstriyel atıksuların doğrudan sulamada kullanılması, mikrobiyolojik riskleri artırmaktadır. Güney Asya’da sebze sulamasında fekal koliform oranlarının %70’in üzerinde olduğu bildirilmiştir [89]. Buna karşılık, Avrupa ve Kuzey Amerika gibi yüksek gelirli ülkelere ileri arıtma sistemleri ve sıkı denetimler sayesinde bu riskler daha düşüktür [70]. İklim değişikliği de mikrobiyolojik kontaminasyon üzerinde doğrudan etkili olmaktadır. Yükselen sıcaklıklar patojen çoğalmasını hızlandırırken; ani yağışlar, sel ve taşkınlar kanalizasyon taşmaları ve hayvan atıklarının su kaynaklarına karışmasına neden olarak bulaşma riskini artırmaktadır [38]. Riskin yüksek olduğu bölgelerde temiz suya erişim imkânı olmadığı için tarımsal uygulamalarda atık su kullanılabilir [90]. Pakistan’da üretilen sebzelerin dörtte birinin atık su ile sulandığı kaydedilmektedir [91]. Sahra Altı Afrika’nın çoğu bölgesinde ise kirli su kaynakları ile sulanarak yapılan tarımda sebzelerin %60-100’ü tarlada bozulmaktadır [92]. Gelişmiş ülkelerdeki bölgesel farklılıkların da patojen konsantrasyonuna etki ettiği gözlenmiştir [7]. Gıda kaynaklı patojenlerin tarımsal sularda görülme sıklığı, yalnızca çevresel koşullardan

değil; su yönetimi politikaları, hijyen uygulamaları, sanitasyon altyapısı ve tarımsal üretim tekniklerinden de etkilenmektedir [13]. Bu nedenle, farklı coğrafi bölgelerde patojen yoğunluğu önemli ölçüde değişmektedir. Bu nedenle bölgesel mikrobiyal risk profilleri oluşturulmalı; toprak yapısı, iklim, arazi kullanımı ve mevcut su kaynaklarının özellikleri birlikte değerlendirilmelidir. Böylece tarımsal sulama güvenliği bölgeye özgü olarak ele alınabilir.

1.3. Gıda Kaynaklı Patojenlerin Tarımsal Sularda Sağkalımını Etkileyen Faktörler

Patojenlerin çevre koşullarında ve ürünler üzerinde ne kadar süre hayatta kalabileceği insan sağlığı üzerinde önemli bir etkidir. Tarımsal su kaynaklarında patojenler uzun süre hayatta kalabilmekte sonuç olarak ürünler kontamine olabilmektedir [93, 94]. Patojen ve indikatör mikroorganizmaların sağkalım kabiliyeti patojenin türüne ve formlarına (endospor, vejetatif vb.) göre de değişiklik göstermektedir [95]. Farklı patojenler ve / veya indikatör organizmalar yüzey sularında büyük ölçüde farklı inaktivasyon düzeylerine sahip olmaktadır. *E. coli* O157:H7’nin jenerik *E. coli*’den iki kat daha hızlı inaktive olduğu [96], *E. coli*’nin ise *Campylobacter jejuni*’den veya *Streptococcus faecalis*’ten daha uzun süre hayatta kaldığı bildirilmiştir [97–99]. Arıtılmamış nehir suyunda, *E. coli* ve *Enterococci* inaktivasyonunun, oosistlerin inaktivasyonundan yaklaşık 10 kat daha hızlı olduğu ifade edilmiştir [100]. Genel olarak, bakterilerin, virüslerin ve parazitlerin sulama suyu kaynaklarında hayatta kalması abiyotik (sıcaklık, güneş ışığı, besin, pH, çevresel rezervuarlar) ve biyotik (yerli biota) faktörlerden etkilenmektedir.

1.3.1. Sıcaklık

Sıcaklık, bakterilerin, virüslerin ve parazitlerin hayatta kalmasını etkileyen başlıca faktörlerden biridir. Genel olarak, mikroorganizmaların hayatta kalması sıcaklık düştükçe artmakta ancak bu mikroorganizma türüne veya diğer çevresel faktörlere göre farklılık arz etmektedir [21]. Bakteri ve virüslerin, nispeten daha soğuk olduğu için yer altı suyunda yüzey sularına göre daha uzun süre hayatta kaldığı ifade edilmektedir [13]. Jenerik *E. coli*, *E. coli* O157:H7, *Salmonella* türleri ve *Enterococcus* gibi mikroorganizmaların 23–30°C gibi sıcaklıklarda hayatta kalma oranları azalabilmektedir [94, 93]. Özellikle yaz aylarındaki sıcaklık artışlarıyla beraber mikrobiyal yükün de artacağına dair bazı araştırmalar bulunmaktadır. Özellikle koliformlar ve *E. coli* gibi bakterilerin 25–30°C gibi sıcaklıklarla çoğalma eğiliminin yeniden oluşabileceği bildirilmiştir [101, 102]. Bir çalışmada Nil nehrinden alınan örneklerde *E. coli* O157:H7 ve *S. Typhimurium*’un 4 °C ve -20 °C’de 120 gün boyunca hayatta kalabildiği belirlenmiştir [103]. Diğer taraftan konakçı dışında çoğalmayan virüsler ve protozoan gibi patojenlerin sıcaklıkla beraber daha hızlı inaktive olduğu belirtilmektedir [104]. Bu bilgiler ışığında sıcaklığın yalnız mikroorganizmaları değil bulaşmayı ve yayılma potansiyellerini de etkilediği görülmektedir.

1.3.2. Gün ışığı ve UV

Güneş ışığı özellikle de ultraviyole (UV), fekal indikatör ve patojen mikroorganizmaların tarımsal sularda inaktivasyonunda etkili bir faktördür. Ancak bu etkinin ne düzey bir azalma gösterdiği hakkında net bir bilgi bulunmamaktadır. Çünkü güneş ışığı, sıcaklık, ışık geçirgenliği ve suyun fiziksel özellikleri gibi çevresel faktörlerle birlikte etkileşime girerek bakteri inaktivasyonu üzerinde etkili olabilmektedir [105]. Güneş ışığının, çözünmüş oksijen ve pH gibi faktörlerle etkileşime girerek mikrobiyal inaktivasyona katkıda bulunduğu ifade edilmektedir [81]. Yapılan bir çalışmada *E. coli* ve *S. Typhimurium* popülasyonlarının, Cochín nehri ağız sularında doğrudan güneş ışığı altında, sırasıyla 3,5 ve 4,5 log azaldığı bildirilmiştir [80]. Benzer olarak bir sulama göletinde *E. coli*'nin doğrudan güneş ışığı altındaki inaktivasyon hızının karanlıktaki inaktivasyon hızından daha yüksek olduğu belirtilmiştir [81]. Yine başka bir çalışmada bulutlu olan hava koşullarında *E. coli* seviyelerinde yükselmeler olduğu ve bunun güneş ışığı faktörüyle ilişkili olduğu belirtilmiştir [106]. Bu bulgularla benzer olarak konakçıya ihtiyaç duyan virüsler ve protozoan parazitleri de UV radyasyonla karşı karşıya kaldıkları zaman daha kısa sürede etkisiz hale geldikleri yapılan çalışmalarla ortaya konmuştur [107]. Bu bağlamda, güneş ışığının doğal bir dezenfeksiyon aracı olarak değerlendirilmesi, özellikle tarımsal sularda mikrobiyolojik risk analizlerinde dikkate alınması gereken çevresel bir faktördür.

1.3.3. Besin maddeleri

Tarımsal sularda patojenlerin hayatta kalması çevresel koşullarla birlikte organik veya inorganik besin maddelerinin bulunmasına da bağlıdır. Patojenlerin hayatta kalmaları, üremeleri, metabolik aktivite gösterebilmeleri için özellikle karbon, fosfor ve azot gibi elementler büyük öneme sahip olmasına rağmen besin maddelerinin her zaman mikrobiyal gelişim açısından olumlu olduğu kanıtlanmamıştır [38]. Shelton et al. (2014) tarafından yapılan bir çalışmada karbon, azot ve fosfor içeren gübrenin suya eklenmesiyle koliform konsantrasyonu başlangıçta artmış ancak daha sonra inaktivasyon oranı normal seviyelere dönmüştür [68]. Yapılan bazı çalışmalar karbonun kısıtlı olduğu durumlarda *E. coli* O157:H7'nin zamanla canlılığını yitirebildiğini göstermiştir [108]. Bu bilgilerle beraber besin çeşitliliğine metabolik uyum sağlayabilme kapasitesi, *E. coli* O157:H7'nin besin açısından fakir çevresel koşullarda dahi canlılığını korumasına imkân vermektedir [109]. Yapılan yeraltı suyu çalışmalarında da benzer sonuçlar gözlenmiştir. Karbon ve protein bazlı besin kaynakların olmaması durumunda hem *E. coli* hem de virüslerin olumsuz çevresel koşullarına rağmen daha uzun süre canlı kalabildikleri tespit edilmiştir. Bu durum besin eksikliği durumunda mikrobiyal yükün tamamen ortadan kalkmadığını, bazı durumlarda mikroorganizmalar için bir stabilizasyon

ortamı olduğu ve bunun da onların daha uzun süre hayatta kalmalarına olanak sağlayabileceğini düşündürmektedir [110]. Besin maddeleri, mikrobiyal yaşamın sürdürülmesinde önemli bir rol oynasa da, bu faktörlerin zaman içinde su ekosistemi üzerindeki etkilerinin öngörülmesi, sürdürülebilir su kalitesi yönetimi açısından büyük önem taşımaktadır.

1.3.4. pH

Tarımsal sularda pH seviyesi, mikroorganizmaların yaşam süresi ve çoğalma kapasiteleri üzerinde önemli bir rol oynamaktadır. Yüzey sularında pH <6 veya pH>8 olması durumunda fekal indikatör mikroorganizmaların inaktivasyon oranının önemli ölçüde azaldığı belirtilmiştir [111, 112, 101]. Bu nedenle, su kaynaklarında mikrobiyal risk değerlendirmesi yapılırken pH düzeylerinin nötr sınırlar içerisinde seyretmesi, mikroorganizmaların çevrede daha uzun süre canlı kalabilmesi açısından kritik bir faktör olarak değerlendirilmektedir.

1.3.5. Mikrobiyal Yük Kaynakları: Tortullar ve Kıyı Toprakları

Tarımsal sulama amacıyla kullanılan su kaynaklarında, dip tortulları ve kıyı toprakları gibi çevresel mikrobiyal birikim alanları, mikrobiyal toplulukların yapısı hakkında önemli göstergeler sunmaktadır. Tatlı su tortulları hem indikatör mikroorganizmalar hem de patojenler için kalıcı rezervuarlar olup, *E. coli* O157:H7 gibi su kaynaklı patojenlerin bu ortamlardan izole edildiği bildirilmiştir [68, 113]. Ayrıca, akarsu yataklarındaki tortullarda *E. coli*'nin uzun süre yaşayabildiği ve olumsuz hava koşullarının etkisiyle bu mikroorganizmaların yeniden yüzey suyuna karışarak mikrobiyal yoğunluğu artırabildiği gösterilmiştir [70, 114].

Mikroorganizmaların bazı bölgelerde yoğun şekilde birikmesi, dolayısıyla "Hot spots – Sıcak noktalar" oluşturmaları, su örneklerinden elde edilen verilerde dalgalanmalara neden olmakta ve bu durum mikrobiyal hareketliliği doğru şekilde modellemeyi güçleştirmektedir [115]. Benzer şekilde kıyı toprakları da mikrobiyal yükü etkileyerek mikrobiyal bir kaynak olarak görev yapabilmektedir. Yapılan araştırmalar, *E. coli* popülasyonlarının kıyıda fazla bulunduğunu ve kıyıdan uzaklaştıkça azaldığını göstermektedir. Ancak toprak nemi ve çevresel koşullar uygun olduğunda yine bu bakterilerin hayatta kalabildiği hatta çoğalabildiği belirtilmiştir [106, 116]. Erozyon ve yüzey akışı bu bakterilerin nehir sistemlerine taşınmasına neden olmaktadır. Bu nedenle, toprak ve tortu kaynaklı mikrobiyal yük, özellikle açık kanallar ve hendeklerle taşınan sulama sularının kalitesini doğrudan etkilemektedir.

1.3.6. Biyotik faktörler

Tarımsal su kaynaklarında yerli biyotaların (amip, alg vb.) mikroorganizmaların canlılığını sürdürmesine katkıda bulunduğu belirtilmektedir. Bazı su kaynaklı patojenlerin amip veya nematodlar içinde canlılığını

koruduğu ifade edilmiştir [21]. Örneğin, tatlı su ekosistemlerinde doğal olarak bulunan algler, amipler ve diğer sucul biyota, patojenik bakteriler ve indikatör organizmalar için yaşam ortamı sağlamaktadır. Benzer şekilde göl sularındaki yeşil alglerin Shiga toksini üreten *Escherichia coli* (STEC), *Salmonella*, *Shigella* ve *Campylobacter* gibi patojenler için uyumlu bir ortam sağlayabildikleri tespit edilmiştir [106, 117]. Nitekim amip ve yosunların su bazlı bir patojen olan *Campylobacter*'ın sağ kalımını artırdığı ve replikasyonu kolaylaştırdığı bildirilmiştir [118]. Farklı alg türlerinin *E. coli*'nin canlılığı üzerine farklı etkilerinin bulunduğu belirtilmiştir. Öyle ki algler ve sucul bitki örtüleri karbon substratlarının sağlanması, güneş ışınlarından koruma gibi çeşitli etkilerle *E. coli* 'nin hayatta kalmasını artırırken, toksinlerin salgılanmasına neden olarak suyun kalitesini elverişsiz hale de getirebilmektedir [119]. Thomas ve diğerlerinin (2010) yaptığı çalışmada, serbest yaşayan amiplerin *L. monocytogenes* ve *Vibrio cholerae* gibi bakterilerin çoğalmasına elverişli mikroortamlar sunduğu, ayrıca bazı virüslerin de bu ortamlarda korunabildiği bildirilmiştir [120].

1.4. İndikatör Mikroorganizmalar ve Patojen Bakteriler ile İlişkisi

Mikrobiyal su kalitesinin değerlendirilmesinde indikatör ve indeks mikroorganizmalar farklı amaçlara hizmet etmektedirler. İndeks mikroorganizmalar, ekolojik benzerlikleri nedeniyle belirli patojenlerin varlığına dair bilgi verirken; indikatör organizmalar daha çok dışkı kökenli bulaşmanın dolaylı izlenmesinde kullanılmaktadır. Bu nedenle, izleme stratejisinde seçilecek mikroorganizma türü, hedeflenen riske göre belirlenmelidir. Doğrudan patojen tespiti genellikle yüksek maliyetli, zaman alıcı ve teknik olarak karmaşık olduğundan, değerlendirme süreçlerinde çoğunlukla indikatör mikroorganizmalar tercih edilmektedir.

Tarımsal su kalitesi genellikle indikatör organizmaların varlığı veya popülasyonu ile izlenmektedir. Sudaki indikatör mikroorganizmaların varlığı, suyun insanlardan veya başka bir sıcak kanlı hayvandan gelen fekal maldeme ile kontamine olduğunu açıklamaktadır. Çevresel sularda en çok aranan fekal indikatör mikroorganizmalar; toplam koliformlar, fekal koliformlar, jenerik *E. coli* ve enterokoklardır [21]. Sularda genel anlamda fekal kirliliğinin göstergesi olarak jenerik *E. coli* grubu bakterilerin varlığına bakılmaktadır. Bazı durumlarda çevresel ve fiziksel faktörlere karşı enterik virüs ve protozoalar, jenerik *E. coli*'den daha fazla direnç göstermektedir. Bu sebeple tarımsal sularda jenerik *E. coli* tespit edilmemesi fekal kirliliğin olmadığı anlamına gelmemektedir.

Fekal indikatör organizmaların izlenmesi, mahsullerin güvenliğini sağlamak için kullanılmaktadır. Ancak tarımsal su kaynaklarındaki potansiyel patojen varlığını değerlendirmek için doğrulukları hala tartışılmaktadır. Fekal indikatör bakteriler, bakteriyel ve protozoan patojenlerle (viral patojenlere kıyasla) istatistiksel olarak anlamlı ilişkiler kurma eğilimindedir [121].

Jenerik *E. coli* ve *Salmonella* türleri varlığını inceleyen bazı çalışmalarda, bu iki grup arasında korelasyonun tarımsal sularda zayıf veya tutarsız olduğu görülmüştür [61]. Nitekim araştırmalarda patojenler ve indikatör mikroorganizmalar arasındaki korelasyonlar incelenmiş ve farklı sonuçlar elde edilmiştir. Güney Afrika'daki kanal ve nehirlerde toplam ve fekal koliformlar ile *Salmonella* varlığı arasında yüksek korelasyonlar bildirilmiştir [122]. California'da ise *Salmonella* ve *E. coli* O157: H7 varlığı, sulama suyu, akarsu ve havuzlardaki jenerik *E. coli* konsantrasyonu ile iki buçuk yıl örnekleme süresi boyunca belirgin bir şekilde korelasyon göstermemiştir [43]. Walters et al. (2011) ise California'da 14 su kaynağında bulunan dışkı indikatörü bakteri konsantrasyonlarının (enterokoklar ve jenerik *E. coli*) *Salmonella* ile anlamlı derecede korelasyon gösterdiğini ancak *E. coli* O157: H7 ve *stx* gen varlığı ile ilişkili olmadığını bildirmişlerdir [123]. Diğer bir çalışmada, tatlısu mikrobiyozmoslarındaki STEC seviyelerinin jenerik *E. coli* ve diğer fekal indikatör bakterilerle ilişkili olmadığı ileri sürülmüştür [124]. Mikrobiyolojik kalite standartlarını sağlayan Florida'daki bazı sularda *shiga* toksin üreten *E. coli* ve *Salmonella* genlerinin tespit edilmesi, tekil göstergelerin yetersizliğine işaret etmektedir [45].

1.5. Tarımsal Sularda Mikrobiyal Su Kalite Standartları

Tarımsal uygulamalarda kullanılan suyun mikrobiyolojik kalitesi, yalnızca gıda güvenliği ve halk sağlığı risklerini değil; aynı zamanda ekonomik sürdürülebilirlik, hidrojeolojik koşullar ve bölgesel altyapı farklılıkları gibi etkenler de göz önünde bulundurularak değerlendirilmelidir [125, 126]. Ülkeler ve su kaynaklarına göre belirlenen kalite standartları farklılık gösterebilmektedir. Bu sınıflandırma, sulama suyu kaynağına, kullanılacağı ürün tipine ve bölgesel risk faktörlerine göre suyun hangi düzeyde arıtılması gerektiğine dair karar süreçlerine rehberlik etmektedir [126]. Örneğin, yüzey suları daha esnek eşiklerle değerlendirilirken, arıtılmış atık sularda daha sıkı kriterler uygulanmaktadır [7]. Türkiye'de sulama suyu kalitesine yönelik doğrudan bağlayıcı bir mikrobiyolojik standart bulunmamaktadır. Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği, 17 Aralık 2022 tarihli değişiklikle su ortamlarının fiziksel, kimyasal ve biyolojik kalite sınıflandırmalarına ilişkin hükümleri yürürlükten kaldırmış, bunun yerine sektörel deşarj standartlarına odaklanmıştır [127]. Mikrobiyolojik parametreler açısından ise 25 Eylül 2019 tarih ve 30899 sayılı Resmî Gazete'de yayımlanan Yüzme Suyu Kalitesinin Yönetimine Dair Yönetmelik esas alınmaktadır. Bu düzenleme, iç sular ile kıyı ve geçiş sularında kalite sınıflarını intestinal enterokok ve *Escherichia coli* düzeylerine göre belirlemektedir. Değerlendirme, 100 ml örnekte koloni oluşturan birim (CFU) sayısına dayalı olarak "mükemmel", "iyi kalite" ve "yeterli" sınıfları şeklinde yapılmaktadır. İç sularda intestinal enterokok için eşik değerler sırasıyla 200, 400 ve 330 CFU/100 ml; *E. coli* için 500, 1000 ve 900 CFU/100 ml olarak

tanımlanmıştır. Kıyı ve geçiş sularında ise intestinal enterokok için 100, 200 ve 185 CFU/100 ml; *E. coli* için 250, 500 ve 500 CFU/100 ml değerleri esas alınmaktadır [127].

Uluslararası literatürde de, jenerik *E. coli* popülasyonunun koloni oluşturan ünite veya en muhtemel sayı yöntemi ile 100 ml örnekte belirlenmesi daha özgül bir gösterge olarak önerilmektedir [125, 128, 8]. SKKY’de bulunmasa da, Türk gıda kodeksi mikrobiyolojik kriterler yönetmeliğinde gıdalara yönelik olarak *E. coli* için bir sınıflandırma yer almaktadır ve uygulamada bu parametrenin kullanımı yaygınlaşmaktadır. Dünya Sağlık Örgütü, daha esnek ve risk temelli bir yaklaşım benimseyerek, çiğ tüketilecek ürünlerde 1.000 CFU/100 mL fekal koliform ve 1 adet helminth yumurtası eşliğini önermektedir [125]. WHO’nun kullandığı kantitatif mikrobiyal risk değerlendirmesi (QMRA), sıfır tolerans yerine, yılda 10^{-4} enfeksiyon olasılığına göre bulaşma sınırlarını belirlemektedir [129, 130]. Bu tür tablolar, özellikle tarımsal sulama projelerinde, sulamanın yapılacağı alanın risk durumuna göre güvenli sınırların belirlenmesi açısından rehber niteliği taşımaktadır.

Sulama yöntemi ve ürünün tüketim şekli, uygulanacak mikrobiyolojik standartları da belirlemektedir. Çiğ tüketilecek yapraklı ürünler için yüzey teması söz konusuysa daha sıkı kriterler uygulanırken, pişirilerek tüketilen veya sanayi tipi işleme girecek ürünlerde daha esnek sınırlar belirlenebilmektedir [131]. ABD’de Gıda Güvenliği Modernizasyon Yasası (Food Safety Modernization Act) altında Mahsul Güvenliği Kuralı (Produce Safety Rule) kapsamında daha risk temelli mikrobiyolojik su kalitesi değerlendirme prensibi benimsenmiştir [8]. Bu kapsamda hasat öncesi tarımsal su kalitesinin değerlendirilmesinde tarımsal suların kaynağı, sulama sisteminin tipi (açık veya kapalı sistem), kontaminasyona açıklık durumu, sulama çeşidi, son sulama ve hasat arasındaki zaman farkı, ürün karakteristikleri, çevresel etkenler ve hava olayları gibi faktörlerin değerlendirilmesi ile bir su kaynağının kullanımı hakkında bir karar alınması prensibi benimsenmiştir. Tüm bu faktörler göz önünde bulundurulduğunda, mikrobiyolojik su kalite standartlarının yalnızca patojen varlığına değil, aynı zamanda ürün tipi, sulama yöntemi, yerel epidemioloji ve ekonomik koşullara uygun biçimde yapılandırılması gerekmektedir.

1.6. Tarımsal Su Kaynaklarına Yönelik Önleyici Stratejiler

Tarımsal sular mahsulün hasat öncesi gelişiminden paketlenmesine kadar farklı amaçlarla yoğun bir şekilde kullanıldıklarından dolayı mikrobiyal su kalitesinin güvence altına alınması gıda güvenliğinin korunmasında kritik öneme sahiptir [72]. Bu nedenle bir önceki kısımda bahsedildiği gibi yasal düzenlemelerle ürün güvenliğini artırmak için tarımsal su kaynakları için çeşitli standartlar, kontrol ve yönetim stratejileri veya düzeltici önlemler önerilmektedir [21]. Bu kriterler, tarımsal su kaynağının ürünün hasat edilebilir kısmına

doğrudan temas edip etmeyeceğine göre farklılık gösterebilmektedir. Tarımsal su kaynağının mikrobiyolojik kalitesinin standartlara uygun olması halinde yönetmelikler kapsamında hasat öncesi ve sırasında kuyu suyu, yüzey suları veya şebeke suları gibi farklı kaynaklar erişim imkanlarına göre kullanılabilir. Standartları karşılamayan su kaynakları için hasat öncesi uygulama aralığı (direkt su uygulaması ile hasat arasındaki süre) veya su kaynağının arıtılması gibi düzeltici faaliyetler uygulanmaktadır.

Bununla birlikte tarımsal suyun mikrobiyal kalitesini belirlemek için tek bir gösterge kullanmanın uygunluğu halen tartışılmaktadır [72, 132]. Bu nedenle jenerik *E. coli* seviyeleri ile gıda kaynaklı diğer patojenler arasındaki ilişkinin ortaya konulması önem taşımaktadır. Nitekim yapılan bazı çalışmalarda sulama sularındaki *E. coli* seviyesinin yasal standartlara uygun olduğu ancak aynı su kaynaklarında *Salmonella*’nın da tespit edildiği bildirilmiştir [75, 61, 45]. Bu durum *Salmonella* ve diğer patojenlerin yasal kriterlerini karşılayan su kaynaklarında hala risk oluşturabileceğini göstermektedir. Son yıllarda makine öğrenimi gibi bilgisayar destekli çözümlerle tarımsal sulardaki *Salmonella* gibi patojenlerin ve indikatör mikroorganizmaların varlığı ile popülasyonlarının tahmin edilmesi yaygınlaşmaktadır [133–136, 9, 137, 138]. Makine öğrenimi algoritmalarının cesaret verici ve umut vaat eden sonuçlarına rağmen, tahmin modellerinin başarısı, belirli bir bölgeden elde edilen veri setinin kullanımı, örnekleme alanındaki istikrarsız çevre koşulları, su kaynağı içinde ve çevresinde hayvan aktivitesinin ölçülmemesi ve karasal değişkenler gibi faktörlerle sınırlıdır.

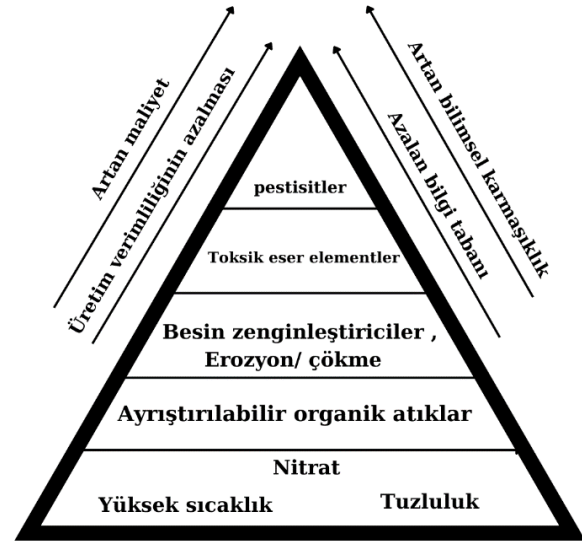
Ürnlere patojen bulaşma riskini azaltmak için, tarımsal su kaynaklarına yönelik önleyici stratejiler ve azaltıcı tedbirler kullanılabilir [27]. Bu stratejiler ve önlemler, su kaynağının kirlenmesini önlemeyi ve ürünlere patojen transferini en aza indirmek için kirlenmiş suyu arıtmayı amaçlamaktadır. Ürünlerin kontaminasyonunu en aza indirmek için öncelikle su kaynaklarına patojen transferi olasılığı göz önünde bulundurulmalıdır. Tarladaki ürün kontaminasyonunu en aza indirmek için en etkili yaklaşım, tarımsal su kaynaklarının potansiyel kontaminasyon kaynaklarından korunmasıdır. Su kaynağına, ürün türüne ve sulama türüne bağlı olarak çeşitli önleyici stratejiler uygulanmalıdır. Tarımsal su kaynakları, tortu havuzu, hayvan aktivitesinin azaltılması için çit kurma, yüzey akış koruması, çim su yolları, filtre şeritleri, su dağıtım sitemlerinde biofilm oluşumunun kontrolü gibi önleyici yöntemlerle potansiyel kontaminasyon kaynaklarından korunmalıdır [21].

Suyun arıtılması tarımsal sularda patojen ile ürün kontaminasyonu riskini azaltmak için kullanılan stratejilerden biridir. Suyun filtrasyonu, atık stabilizasyon havuzları, oksidasyon indirgeme, elektroliz, klorlama, ozonlama, ultrason, UV ve güneş enerjisiyle dezenfeksiyon sularda patojen popülasyonunu azaltmak için kullanılan potansiyel

tekniklerden bazılarıdır [21]. Modern arıtma yöntemlerinin sulardaki patojenleri yok ederek tespit sınırlarının altına düşmesinde etkili olduğu bildirilmiştir. Bununla birlikte, araştırma sonuçları, enterik bakterilerin, protozoaların ve virüslerin maksimum azaltılmasını sağlamak için UV ve/veya klorlama kullanılarak üç aşamalı bir arıtmanın gerekli olduğunu göstermektedir [139]. Tarımsal suların arıtılmasında tekli veya kombine sistemlerin kullanımı son yıllarda özellikle gelişmiş ülkelerde artmaktadır.

2. KİMYASAL RİSKLER

Tarımsal üretimde su, mikroorganizmalarda olduğu gibi içerdiği kimyasalların toprağa ve gıdalara taşınmasında oldukça önemli bir unsurdur. Sulama amaçlı kullanılan yeraltı suları, yüzey suları, yağmur suyu ve çoğu zaman yeterince arıtılmamış evsel ya da endüstriyel atıksular tür ya da konsantrasyon açısından ekosistem için risk teşkil eden kirleticilerle yüklenebilmektedir. Bu kirleticiler, toprak verimliliğinden sucul ekosistem dengesine kadar geniş bir alanda olumsuz çevresel etkilere yol açmaktadır. Özellikle yaygın olarak bilinen ağır metaller, nitratlar, fosfatlar, pestisit kalıntıları ve tuzluluk bileşenleri, tarım alanlarında kullanılan yüzey, yeraltı ve geri kazanılmış sular aracılığıyla ekosisteme taşınmakta; bu durum hem tarımsal verimliliği hem de gıda güvenliğini doğrudan etkilemektedir [140, 3]. Bu tür kirleticiler, çoğu zaman gübreleme uygulamaları, pestisit kullanımı veya endüstriyel deşarjlar sonucu tarımsal su sistemine karışmakta; sucul ortamda biyoyararlanabilir formlara dönüşerek toprak-bitki sistemine entegre olabilmektedir. Arsenik, kadmiyum, kurşun ve cıva gibi toksik elementlerin toprakta birikimi, mahsullerin yenilebilir kısımlarında akümülyasyona neden olarak insan sağlığı üzerinde kümülatif toksite, kanser ve endokrin sistem hasarları gibi etkiler oluşturabilmektedir [141]. Benzer şekilde, pestisit kalıntılarının sulama suyu aracılığıyla taşınması, hem bitki bünyesine alınma hem de toprak mikrobiyotasında bozulmaya neden olma açısından çift yönlü risk taşımaktadır. Ancak bu geleneksel kirleticilerin yanı sıra, özellikle son yıllarda gündeme gelen ve “yeni nesil kirleticiler (emerging contaminants)” olarak adlandırılan bileşik grupları da tarımsal suların kimyasal kalitesini tehdit etmektedir. Konvansiyonel su arıtma sistemleri tarafından uzaklaştırılmaları güç olan bu kirleticiler, kalıcı yapıları ve biyolojik etkileriyle çevre bilimlerinde öncelikli araştırma alanı haline gelmiştir. Bu grup içerisinde farmasötik atıklar, per- ve polifloroalkil bileşikler (PFAS), endokrin bozucular (EDC’ler), mikroplastikler ve çeşitli kişisel bakım ürünleri yer almaktadır. Bu kimyasallar çoğunlukla evsel, medikal ve endüstriyel faaliyetler sonucunda su döngüsüne katılmaktadır. Liu (2024) tarafından sunulan bulgulara göre, antibiyotikler, ağrı kesiciler, Bisfenol A ve ftalatlar gibi bu yeni nesil bileşikler tarımsal sularda yaygın olarak tespit edilmekte; toksikolojik etkileri ve biyolojik kalıcılıkları nedeniyle klasik kirleticilere kıyasla daha karmaşık bir çevresel risk profili çizmektedir [14].



Şekil 2. Tarımsal kaynaklı su kirliliğinde kirletici türlerinin üretim maliyetleri ve ekolojik karmaşıklık açısından sınıflandırılması [140, 142].

Kirleticilerin çevresel etkilerinin düzeyi yalnızca içeriklerine değil; aynı zamanda ortaya çıktıkları çevresel bağlama, maruziyet süresine ve alıcı ortamın taşıma kapasitesine bağlı olarak değişmektedir. Bu kapsamda, Şekil 1'de sunulan piramit diyagramı, tarımsal sularda kirletici türlerinin üretim maliyetleri ve ekolojik karmaşıklık düzeyleri arasındaki ilişkiyi göstermektedir [140, 142]. Piramidin alt katmanlarında tuzluluk, sıcaklık gibi fiziksel parametreler, üst katmanlarında ise toksik eser elementler ve pestisitler yer almaktadır. Yukarı doğru çıkıldıkça hem kontrol güçlüğü hem de bilimsel karmaşıklık artmaktadır. Bu çerçevede, tarımsal sularda karşılaşılan kimyasal kirleticilerin çevresel davranışlarının, yayılım mekanizmalarının ve kontrol stratejilerinin çok boyutlu bir şekilde ele alınması gerekmektedir.

2.1. Tarımsal Sulama Sularındaki Kimyasal Kirletici Türleri

2.1.1. Ağır Metaller

Ağır metallerin, volkanik faaliyetler, kayaçların ayrışması gibi doğal süreçler ve madencilik, sanayi deşarjları, tarımsal girdiler gibi insan kaynaklı faaliyetler yoluyla çevreye yayıldıkları ve sucul sistemlerde kalıcı kirleticiler olarak biriktikleri bilinmektedir [143]. Bu metallerin önemli bir kısmının çözünmüş halde su sütununda taşındığı, büyük bir bölümünün tortul tabakalara çökerek biriktiği ve çevresel koşullar değiştiğinde yeniden çözünerek toksik hale gelebildiği vurgulanmaktadır [144]. Ağır metallerin gıda güvenliği açısından en kritik özellikleri; toksik olmaları, biyolojik olarak parçalanmamaları ve toprak ile su ortamında uzun süre kalıcı olmalarıdır [145]. Atmosferik birikim, endüstriyel atıklar ve arıtılmadan

birakılan sular, tarımsal sistemlerde ağır metal birikiminin başlıca nedenleri arasında sıralanmaktadır [146].

Ağır metallerin tarımsal sistemlerdeki varlığı, hem gıda güvenliği hem de çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli riskler taşımaktadır. Sulama yoluyla toprak sistemine giren bu elementlerin, bitkilerin kökleri aracılığıyla absorbe edilerek bitki dokularında birikebildiği aynı zamanda atmosferik çökeltme yoluyla yaprak yüzeylerine taşınarak kontaminasyona neden olduğu belirtilmektedir [147]. Kurşun (Pb), kadmiyum (Cd), arsenik (As) ve cıva (Hg) gibi toksik elementler biyolojik işlevler açısından gerekli olmamaları ve düşük dozlarda dahi yüksek toksik etki göstermeleri nedeniyle, ulusal ve uluslararası çevre koruma rehberlerinde öncelikli kirleticiler olarak sınıflandırılmaktadır [148, 149]. Söz konusu metallerin maruziyeti; bağışıklık sisteminin zayıflaması, nörolojik bozukluklar, kanserojen etkiler, hormonal düzensizlikler ve doğumsal anomaliler gibi çok boyutlu sağlık sorunlarına yol açabilmektedir [150, 151]. Uzun ve Debik çalışmalarında arsenik içeren sulara yetiştirilen ürünlerin uzun süreli tüketiminin, cilt hastalıkları, solunum problemleri ve bazı kanser türlerinin görülme sıklığını artırabileceği belirtilmiştir [152]. Kadmiyumun ise özellikle böbrek fonksiyonlarını zayıflattığı, nörotoksititeye neden olduğu ve postmenopozal kadınlarda meme kanseri riskini artırdığı birçok epidemiyolojik çalışmada rapor edilmiştir [153, 154]. Kurşunun çocuklarda bilişsel gerilik ve nörogelişimsel bozukluklarla doğrudan ilişkili olduğu da Navas-Acien vd. (2007) tarafından yapılan analizlerde ortaya konulmuştur [155]. Bununla birlikte, manganez (Mn), bakır (Cu) ve krom (Cr) gibi elementlerin de yüksek konsantrasyonlarda organizmalarda karaciğer hasarı, hematolojik bozukluklar ve bağışıklık sistemi disfonksiyonları oluşturabileceği, toksikoloji temelli deneysel çalışmalarda kanıtlanmıştır [156, 157]. Bu metaller yalnızca ürün kalitesi üzerinde değil aynı zamanda toprak mikrobiyal yapısında, biyolojik azot döngüsünde ve enzimatik aktiviteler üzerinde de negatif etkiler oluşturmaktadır [158]. Toprak-bitki sisteminde metallerin transferi, özellikle “transfer faktörü (TF)” ile ölçülmekte olup, bu değer tarımsal ürünlerin kirleticiler içerik açısından değerlendirilmesinde kritik bir gösterge olarak kabul edilmektedir.

Ağır metallerin yalnızca kara ekosisteminde değil; sucul ortamlarda da etkili olduğu bilinmektedir. Özellikle biyobirikim ve biyomagnifikasyon süreçleri aracılığıyla bu kirleticiler, alt trofik düzeylerdeki organizmalarda birikerek gıda zinciri boyunca taşınmakta ve nihayetinde insan tüketimine ulaşabilmektedir. Midyelerde, bentik balıklarda ve sucul bitkilerde yapılan analizlerde, ağır metallerin yüksek düzeyde akümülyasyona uğradığı ve bu birikimin trofik seviyeler arasında taşındığı tespit edilmiştir [159, 160]. Dolayısıyla, tarımsal sulara kullanılan su kaynaklarının metal içeriği açısından düzenli ve kapsamlı bir şekilde izlenmesi, hem insan sağlığının korunması hem de

ekosistem düzeyinde sürdürülebilirliğin sağlanması bakımından hayati önem arz etmektedir.

Gelişmekte olan ülkelerde, çevresel düzenleme ve denetim mekanizmalarının zayıflığı, ağır metal kirliliğinin yayılımını hızlandıran başlıca etkenlerden biridir. Bangladeş, Hindistan ve Nijerya gibi ülkelerde endüstriyel faaliyetlerin kontrolsüz yayılmasının, düzensiz atık yönetiminin, yeterli izleme altyapısının olmamasının ve suyun yeniden kullanımında standart eksikliklerinin; ağır metal maruziyetine bağlı halk sağlığı sorunlarını artırdığı kaydedilmektedir [161, 151, 162].

Sonuç olarak, ağır metallerin tarımsal sistemlerdeki varlığı yalnızca gıda güvenliği açısından bir risk oluşturmakla kalmayıp, aynı zamanda ekotoksikolojik bozulmalar, toprak sağlığının zayıflaması ve biyoçeşitlilik kaybı gibi çok boyutlu çevresel tehditlere de yol açmaktadır. Bu nedenle, ağır metal kontaminasyonuna karşı etkin izleme sistemlerinin geliştirilmesi, sulama sularının arıtılması, metallerin bitki-toprak sisteminde dolaşıma geçme ve organizmalar tarafından alınma hızını azaltacak toprak yönetimi stratejilerinin benimsenmesi ve kapsamlı çevresel politika reformlarının hayata geçirilmesi gerekmektedir.

2.1.2. Pestisitler

Pestisitler, zararlı organizmalar, yabancı otlar ve tarımsal üretimi olumsuz etkileyen diğer etmenlerle mücadelede yaygın olarak kullanılan kimyasal bileşiklerdir. Tarımsal üretimde pestisit kullanımının tamamen ortadan kaldırılması durumunda, verim ve kalite kayıplarının %40’a kadar ulaşabileceği tahmin edilmektedir [163]. Bu durum pestisitlerin modern tarım sistemleri açısından vazgeçilmezliğini ortaya koymaktadır. Ancak bu kimyasalların aşırı ve bilinçsiz kullanımı, çevresel sürdürülebilirlik, ekosistem sağlığı ve halk sağlığı açısından çok boyutlu riskler yaratmaktadır.

Pestisit kalıntıları, doğrudan uygulama yoluyla toprakta birikmekte veya yağış ve sulama sonrası yüzey akışı ile yerüstü ve yeraltı su kaynaklarına taşınarak geniş çaplı bir kirlilik oluşturmaktadır [164]. Yapılan çalışmalarda, özellikle neonikotinoid grubu pestisitlerin düşük konsantrasyonlarda bile yüksek toksik etki gösterebildiği ve bu toksisitenin hedef dışı organizmalarda bile ciddi zararlar oluşturabileceği bildirilmiştir [165]. Pestisitlerin çevresel davranışı; uygulama şekli, kimyasal özellikleri, toprağın yapısı ve iklim koşullarına bağlı olarak değişmektedir. Bu da kirleticilerin hem ortamda kalıcılığını hem de biyolojik etkilerini artırmaktadır.

Bu bileşikler yalnızca hedef zararlılara değil; ekosistem hizmetlerinde merkezi role sahip olan polinatör böcekler, özellikle arılar üzerinde de yıkıcı etkilere sahiptir. Goulson (2013) tarafından yapılan kapsamlı incelemeler, pestisit maruziyetinin polinatör popülasyonlarında düşüşe ve bitkisel üretim sistemlerinde ciddi bozulmalara neden olduğunu ortaya koymuştur [166]. Ayrıca, Stehle & Schulz (2015) ile

Morrissey ve diğerleri (2015) tarafından yapılan ekotoksikolojik çalışmalarda, pestisit taşınımının sulak alanlara ulaşmasıyla birlikte göl, nehir ve tarımsal drenaj havzalarında biyolojik çeşitliliğin azaldığı, plankton, makroomurgasız ve balık türlerinde popülasyon gerilemelerinin yaşandığı belirtilmiştir [167, 168].

Pestisitlerin sucul canlılar üzerindeki etkileri hem akut hem de kronik toksisite düzeyinde ortaya çıkmaktadır. Morrissey vd. (2015) tarafından yürütülen toksikolojik analizlerde, kısa süreli yüksek doz maruziyetinin balık ölümleri gibi akut etkiler oluşturduğu, düşük düzeyli fakat sürekli maruziyetin ise davranışsal bozukluklar, gelişimsel anomaliler ve reproduktif başarısızlık gibi kronik etkilere yol açtığı saptanmıştır [161]. Diğer yandan, pestisitlerin toprak ortamında birikimi, mikrobiyal aktiviteyi baskılamakta ve özellikle azot döngüsü, fosfor mineralizasyonu ve enzimatik faaliyetlerde bozulmalara neden olarak toprak sağlığını olumsuz yönde etkilemektedir [17].

İnsan sağlığı açısından değerlendirildiğinde, pestisit maruziyeti solunum, sindirim veya dermal yolla gerçekleşebilmekte; bu da çok çeşitli sağlık sorunlarına yol açabilmektedir. Mostafalou ve Abdollahi (2013) ile Roberts vd. (2012) tarafından yapılan epidemiyolojik çalışmalarda, pestisitlerle ilişkili parkinson hastalığı, lösemi, otizm gibi nörolojik ve genetik hastalıklara dikkat çekilmiştir [169, 170]. Ayrıca, Thompson & Darwish (2019) tarafından bildirilen bulgular, özellikle gebelik döneminde pestisit maruziyetinin, çocukluk çağında obezite, insülin direnci ve hipertansiyon gibi metabolik bozukluklara neden olabileceğini ortaya koymuştur [171].

1950'li yıllardan beri tarımsal verimliliği artırma amacıyla yaygın biçimde kullanılan pestisitler, etkin yönetim ve izleme sistemlerinin eksikliği dolayısı ile hem çevresel hem de halk sağlığı açısından geri dönüşmesi güç sorunlar doğurmuştur [172, 173]. Pestisitlerin toksik etkileri yaşa, cinsiyete, fizyolojik duruma göre değişiklik gösterebilmekte; bu da özellikle çocuklar, yaşlılar ve gebeler gibi hassas gruplar için daha yüksek sağlık riskleri anlamına gelmektedir. Gıda ürünlerinde pestisit kalıntılarının varlığı, tüketici sağlığı açısından ayrıca kritik bir sorun teşkil etmektedir. Luzzi & James (2001) tarafından yapılan çalışmalar, pestisit kalıntılarının ürünün yüzey alanı, bitki türünün emilim kapasitesi ve uygulama zamanlamasına bağlı olarak farklılık gösterdiğini ortaya koymuştur [174]. Codex Alimentarius'a bağlı CCPR (Pestisit Kalıntıları Kodeks Komitesi), pestisitler için Maksimum Kalıntı Limitleri (MRL) belirlemiş olsa da, gelişmekte olan ülkelerde bu sınırlara uyumun düşük olduğu ve halk sağlığını tehdit edecek düzeyde kalıntılara rastlandığı çeşitli saha çalışmalarında belgelenmiştir [175]. Özellikle gelişmekte olan ülkelerde, sulama sularının yeterli düzeyde arıtılmadan kullanılması, gıda güvenliği ve çevre sağlığı açısından ciddi sorunlar doğurmaktadır [176]. Bu risklerin yönetimi için yalnızca mevzuat yeterli olmayıp; maruziyet değerlendirmesi, doz-yanıt

analizleri, risk karakterizasyonu ve bütüncül pestisit yönetim sistemlerinin uygulanması gereklidir [177].

2.1.3. Kimyasal gübreler

Artan dünya nüfusu ve buna bağlı olarak gıda talebinin yükselmesi tarımsal üretimin yoğunlaşmasına yol açmaktadır. Bu durum ise verimliliğin artırılması amacıyla gübre kullanımının, özellikle kimyasal gübrelerin, yoğun biçimde uygulanmasına neden olmaktadır [178]. Bitki gelişimi için gerekli olan azot, fosfor, potasyum gibi temel besin maddelerinin zamanla topraktan eksilmesi, toprak verimliliğini düşürmekte, bu nedenle gübreleme uygulamaları tarımsal sürdürülebilirlik açısından kaçınılmaz hale gelmektedir. Ancak gübrelerin yanlış, aşırı ya da kontrolsüz kullanımı, toprak yapısında kimyasal bozulmalara, tuzluluk artışına, ağır metal birikimine ve mikrobiyal dengenin bozulmasına yol açmaktadır [179]. Yapılan çalışmalarda, gübreleme sonrası yüzey akışıyla taşınan azot ve fosfor bileşiklerinin, göl ve nehir gibi su kütlelerinde ötrofikasyon riskini önemli ölçüde artırdığı ve bu durumun sucul sistemlerde oksijen seviyelerinde azalma, alg patlamaları ve biyolojik çeşitlilik kaybına yol açtığı gösterilmiştir [180]. Ayrıca, özellikle azotlu gübreler içerisindeki amonyum ve nitrat formundaki azot bileşikleriyle kükürt bileşenleri, atmosferde N₂O, NO_x ve SO₂ gibi gazlara dönüşerek hava kirliliğine ve iklim değişikliğine sebep olmaktadır [181].

Gübrelerdeki azot ve fosfor bileşiklerinin bitkiler tarafından alınamayan kısmı, sulama ve yağışlarla yerüstü ve yeraltı su sistemlerine taşınmakta bu da su kalitesinde ciddi bozulmalara yol açmaktadır [182]. Yapılan araştırmalarda fosforun, özellikle göl ve sulak alanlarda ötrofikasyonu tetiklediği, bunun da oksijen azalmasına, sucul habitatların çökmesine ve balık ölümleri gibi sonuçlara neden olduğu bildirilmiştir [183]. Nitrat formundaki azot ise yeraltı suyuna kolaylıkla sızmakta ve özellikle içme suyu kaynaklarında kirlilik oluşturmaktadır [184]. Burkart ve Stoner (2002) tarafından yapılan çalışmalar, özellikle tarım arazilerinin yakınındaki yeraltı sularında yüksek nitrat düzeylerinin içme suyu standartlarını aştığını ortaya koymuştur [185].

WHO (2017), içme suyundaki maksimum nitrat konsantrasyonunu 50 mg/L olarak belirlemiş; bu sınırın aşılması durumunda, özellikle bebeklerde mavi bebek sendromu (methemoglobinemi) gibi ciddi sağlık sorunlarının ortaya çıkabileceğini vurgulamıştır [186]. Bu çerçevede, çevresel açıdan güvenli gübreleme stratejilerinin benimsenmesi büyük önem taşımaktadır. Toprak yapısı, iklim koşulları ve bitki ihtiyaçlarına uygun kontrollü salım teknolojileri, toprak analizine dayalı gübreleme planlaması ve entegratif su-gübre yönetimi sistemleri, gübre kaynaklı su kirliliğinin önlenmesinde etkili araçlardır. Bahemuka & Mubofu (1999), bu tür stratejilerin yalnızca nitrat ve fosfor kirliliğini değil, genel su kalitesini iyileştirmede de başarılı olduğunu vurgulamaktadır [177]. Bu nedenle, gübre kullanımının sürdürülebilirlik ilkeleriyle uyumlu hale getirilmesi, hem tarımsal üretimin devamlılığı hem

de çevresel güvenliğin sağlanması açısından temel bir zorunluluktur.

2.1.4. Nanopartikül Kirliliği

Tıp, enerji, çevre ve tarım gibi birçok alanda nanoteknolojik ürünlerin kullanımının artması, nanopartiküller (NP) ile ilişkili toksik metallerin çevreye kontrolsüz şekilde yayılmasını da beraberinde getirmiştir. Bu durum, özellikle tarımsal alanlara ulaşan NP'lerin sucul ekosistemlerde neden olabileceği toksik etkiler konusunda nanotoksikite odaklı önlemlerin geliştirilmesini gerekli kılmaktadır [149].

2.1.5. Tuzluluk

Sulama suyunun kalitesinin, toksisite, su infiltrasyonu ve tuzluluk gibi pek çok sorunu beraberinde getirdiği kaydedilmektedir [187]. Bu nedenle, çözünmüş tuz dengesi tarımsal sularla dikkate alınması gereken başlıca kimyasal sorunlardan biridir. Sulama suyu kalitesini değerlendirmede toplam çözünmüş madde (TDS) veya elektriksel iletkenlik (EC), sodyum adsorpsiyon oranı (SAR), sodyum (Na^+), klor (Cl^-) ve bor (B) gibi iyonların konsantrasyonu ile artık sodyum karbonat (RSC) düzeyleri olmak üzere temelde dört temel kriter öne çıkmaktadır [188]. Anyon-kasyon dengesinin %5'in altında olması suyun kimyasal içeriğinin uygun olduğunu gösterirken, bu değer aşılmaması asidite sorunlarına işaret edebilmektedir [189]. Sulama suyunun Na^+ içeriği ve iletkenliği, tarımsal sulama açısından kritik parametrelerdir [190]. Sodyumun bikarbonat (HCO_3^-) veya klorür/sülfat ($\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$) ile yüksek düzeyde bulunması, toprakların sırasıyla alkali veya tuzlu hale gelmesine yol açmaktadır [191]. Yüksek tuz içeriği, ozmotik basıncı artırarak bitkilerin su alımını engellemekte ayrıca Na^+ , kil minerallerindeki Ca^{2+} ve Mg^{2+} ile yer değiştirerek toprağın fiziksel yapısını bozabilmektedir [192].

2.2. Tarımsal Sularda Kimyasal Kirleticilerin Kaynakları Çevresel Yayılımı ve Tarımsal Ürünlerde Birikimi

Tarımsal sularda tespit edilen kimyasal kirleticiler hem doğal jeolojik süreçler hem de antroposentrik faaliyetler sonucu oluşmakta ve su-toprak-bitki sistemi üzerinden çevresel ve toksikolojik riskler yaratmaktadır. Jeolojik olarak metalce zengin formasyonların bulunduğu bölgelerde, bu elementler zamanla yüzey ve yeraltı sularına geçerek doğal kirlenmeye neden olabilmektedir. Bununla birlikte, endüstriyel atıkların yetersiz arıtılması, gübreler ve pestisitler gibi tarımsal kimyasalların kontrolsüz kullanımı, madencilik faaliyetleri, hayvansal üretimden kaynaklanan atıklar ve kentsel kanalizasyon sularının arıtılmadan su ortamlarına deşarjı, günümüzde yaygın gözlenen kimyasal kirlenmenin başlıca nedenlerini oluşturmaktadır [193-195].

Bu kirleticiler zamanla toprak, nehir, göl ve yeraltı suyu gibi çevresel bileşenlerde birikmekte ve sucul organizmalar, bitkiler, hayvanlar ve nihayetinde insanlar aracılığıyla biyobirikim, biyomagnifikasyon ve

biyokonsantrasyon mekanizmaları üzerinden besin zincirine entegre olmaktadır. Sarker vd. (2022), bu süreçlerin özellikle gelişmekte olan ülkelerde kontrolsüz biçimde işlediğini ve su kaynaklarının ciddi düzeyde kirlenmiş olduğunu bildirmiştir [162]. Gall vd. (2015) tarafından yapılan bir çalışmada, çiğ süt örneklerinde tespit edilen ağır metallerin, sulama yoluyla kontamine olmuş yem bitkilerinin hayvanlar tarafından tüketilmesi neticesinde oluştuğunu göstermektedir [196]. Bu bulgular Boudebouz vd. (2021) ve Filippini vd. (2020) gibi araştırmacılar tarafından da doğrulanmış, hayvansal ürünlerin nihai tüketiciye kadar bu kirleticileri taşıyabildiği ortaya konmuştur [197, 198]. Gelişmekte olan ülkelerde yapılan birçok bölgesel çalışmada, özellikle yüzey ve yeraltı sularının ağır metaller açısından yoğun biçimde kontamine olduğunu ortaya koymaktadır. Bangladeş, Çin, Hindistan ve Pakistan'da gerçekleştirilen araştırmalarda, tarımsal sulamada kullanılan birçok su kaynağının, arsenik (As), kurşun (Pb), kadmiyum (Cd) ve krom (Cr) gibi toksik metaller açısından Dünya Sağlık Örgütü (WHO) sınırlarının üzerinde değerlere sahip olduğu rapor edilmiştir. İslam vd. (2018) tarafından Bangladeş'in farklı agroekolojik bölgelerinde yapılan analizlerde, sebze ve meyvelerdeki Cd konsantrasyonlarının FAO/WHO'nun belirlediği maksimum tolerans limitlerinin üzerinde olduğu görülmektedir [199]. Benzer şekilde, Sharmin vd. (2020), Pakistan'da yetiştirilen buğday, domates, ıspanak ve havuç gibi ürünlerde yüksek düzeyde Pb ve Cr tespit edildiğini bildirmişlerdir [200].

Çin'de ise özellikle atıksuların tarımsal sulamada kullanımı, tarihsel olarak yaygın bir uygulamadır. Xin vd. (2011) ve Chun-guo vd. (2009) 1950'li yıllarda başlayan küçük ve orta ölçekli şehirlerde, kanalizasyon sularının doğrudan tarım arazilerine verilmesi uygulamasının 1990'larda zirveye ulaştığını ve bunun, sulanan topraklarda ağır metal birikimine yol açtığını belirtmektedirler [201, 202]. "Kanser köyleri" olarak adlandırılan nehir havzalarında sindirim ve solunum sistemi kanserlerinin ülke ortalamasının çok üzerinde olduğu rapor edilmektedir [203, 204]. Bu bölgelerde yetiştirilen tahıl ve sebzelerin aynı zamanda Çin'in temel tarımsal üretim merkezlerini oluşturması, gıda güvenliği açısından endişe verici bir tabloyu ortaya koymaktadır.

Yeraltı sularının sulama amacıyla yaygın olarak kullanılması da ayrı bir çevresel risk oluşturmaktadır. Özellikle arsenik içeriği yüksek jeolojik bölgelerde, bu elementin sulama yoluyla toprağa ve mahsullere taşındığı gösterilmiştir. McArthur vd. (2016) ve Mihajlov vd. (2020) tarafından Bangladeş'te yürütülen çalışmalar, arsenik kontaminasyonunun yalnızca içme suyunu değil, tarımsal üretimi de etkilediğini ve insan sağlığı açısından uzun vadeli tehdit oluşturduğunu ortaya koymuştur [205, 206].

Endüstriyel faaliyetlerin etkisi ise oldukça çarpıcı olup, Dakka'daki yaklaşık 200 tabakhane, günde 21.000 m³'e yakın arıtılmamış atık suyu doğrudan çevreye deşarj ettiği bildirilmiştir. Bu durum civardaki tarım arazilerinin sulama suyu ve topraklarında Zn, Cr ve Pb

gibi metallerin birikmesine neden olmaktadır [207, 208]. Ratul vd. (2018) ve Haque vd. (2020) tarafından yapılan çalışmalarda, Bangladeş'in kentsel nehirlerinden sulanan bölgelerde yetiştirilen ürünlerde yoğun metal birikimi tespit edilmiştir [209, 210]. Bu bağlamda, tarımsal üretimde kullanılan sulama sularının kimyasal kalitesi ile ilgili ülke ölçekli karşılaştırmalı çalışmalar da mevcuttur. Rai ve arkadaşları (2019) tarafından yapılan derlemede, Hindistan, Çin, Pakistan, Bangladeş ve Avustralya gibi ülkelerde farklı nitelikteki sulama sularıyla yetiştirilen tarım ürünlerinde ağır metal birikimi değerlendirilmiştir [211]. Hindistan'da kısmen arıtılmış atıksularla sulanan yapraklı ve kök sebzelerde Pb (7.63 mg/kg), Cr (0.28 mg/kg) ve Cu (0.31 mg/kg) gibi metallerin WHO sınırlarını aştığı bildirilmiştir [158]. Benzer şekilde, Çin'de arıtılmamış şehir atıksuyuyla sulanan patates ve lahana gibi ürünlerde Zn (5.45–8.65 mg/kg), Cd (0.014–0.015 mg/kg) ve Cr (0.019–0.42 mg/kg) düzeylerine ulaşmıştır [212]. Pakistan'da yeraltı sularıyla sulanan tahıllarda Pb değerlerinin 0.91–1.36 mg/kg aralığında olduğu kaydedilmiştir [213]. Bangladeş, Hindistan, Tayland, İtalya ve Kanada gibi ülkelerde yapılan çalışmalarda ise pirinç ve sebzelerde Pb (66.1–156.5 µg/g), As (1.6–42 µg/g) ve Cd (0.1–5.3 µg/g) gibi toksik elementler tespit edilmiştir [214]. Avustralya'da şehir yağmur suyuyla sulanan fasulye ve lahana örneklerinde Cr (0.008–0.025 mg/kg), Zn (0.16 mg/kg) ve Ni (0.145 mg/kg) gibi metallerin mevcudiyeti rapor edilmiştir [215]. Ayrıca Mısır'da patateslerde Cd (0.03 mg/kg), Cr (0.03 mg/kg) ve Zn (2.9 mg/kg) düzeyleri gözlenmiştir [216]. Tüm bu veriler, tarımsal sulamada kullanılan su kaynaklarının gıda güvenliği üzerinde doğrudan etkili olduğunu ve bu nedenle sulama suyu kalitesinin düzenli olarak izlenmesi gerektiğini göstermektedir.

Buna benzer biçimde, Avrupa'da da tarihsel kirlenme örnekleri mevcuttur. Fransa'da Paris çevresindeki Luvisol topraklarında 1899–2002 yılları arasında arıtılmamış atıksularla yapılan sulamanın, toprakta kalıcı ağır metal birikimine yol açtığı kaydedilmiştir [217]. Bu birikimin metallerin topraktaki hareketliliği ve biyoyararlanımı üzerinde uzun vadeli etkileri olduğu bilinmektedir [218]. Sonuç olarak, tarımsal sulara kimyasal kirleticiler çoğu zaman insan faaliyetlerinden kaynaklanmakta, bu durum yalnızca su kalitesini değil, toprak sağlığını, bitki gelişimini ve nihai olarak insan sağlığını tehdit eden çok boyutlu bir çevresel sorun haline gelmektedir. Kirleticilerin kaynaklarını anlamak ve izlemek, sürdürülebilir su yönetimi ve çevresel risk kontrolü açısından temel bir gerekliliktir.

Tarımsal sulamada kullanılan suların içerdiği ağır metaller, bitki-toprak sistemi içerisinde doğrudan difüze olarak hem toprak sağlığını hem de nihai üründe kirleticilik yoluyla gıda güvenliğini tehdit etmektedir. Metal iyonlarının sulama suyundan toprağa ve oradan bitkilere geçiş süreçleri, suyun kimyasal bileşimi, substrat yapısı, askıda katı madde konsantrasyonu gibi çevresel parametrelerle şekillenmektedir. Bu süreçlerde çözünme, çökeltme, kompleksleşme ve adsorpsiyon gibi fiziko-kimyasal mekanizmalar belirleyici olmaktadır

[219–221]. Bu süreçler yalnızca metalin topraktaki yatay ve dikey dağılımını değil, aynı zamanda biyoyararlanabilirliğini doğrudan etkileyerek bitki bünyesine geçişini kontrol etmektedir. Bitkilerde ağır metal birikimi, metalin kimyasal formu, toprak pH'sı, organik madde içeriği, toprak yapısı ve bitki türüne bağlı olarak önemli farklılıklar göstermektedir. Yapılan çalışmalarda, özellikle marul, su ıspanağı ve börülce gibi bazı sebzelerin, Cd, Pb, Cr ve Hg gibi toksik metaller için yüksek alım kapasitesi sergilediği gösterilmiştir [222–224]. Bu birikim, tüketici düzeyinde metal maruziyetinin başlıca kaynağını oluşturarak halk sağlığı açısından ciddi tehditler yaratmaktadır [225, 226].

Sulama suları aracılığıyla taşınan ağır metaller, özellikle arıtılmamış atıksular, endüstriyel kaynaklı deşarjlar ve yoğun gübre uygulamaları yoluyla toprak sistemine geçmekte ve bu metaller tarımsal ürünlerin yenilebilir kısımlarında birikerek sistemik bir kontaminasyon zinciri oluşturmaktadır. Termik santraller, galvanik kaplama tesisleri, tekstil ve deri sanayilerinden kaynaklanan atıksular, Cd, Cr, Cu, Ni ve Zn gibi metallerle yüksek seviyede yüklüdür. Bu elementler bitkilerde büyüme geriliği, kloroz, yaprak nekrozu ve verim düşüşü gibi toksik etkiler oluşturabilmektedir. Bu etkiler, özellikle domates, yeşil biber ve yapraklı sebzelerde daha yoğun olarak gözlemlenmiştir [211]. Ağır metallerin bitkiler tarafından alımında toprak özellikleri kritik rol oynamaktadır. Özellikle asidik toprak koşulları, Cd gibi metallerin biyoyararlanabilirliğini artırırken organik kompleksler, metallerin bağlanarak çözünürlüğünü azaltabilmektedir. Cd'nin yaygın endüstriyel kullanımı ve mobil yapısı, başta Çin, Hindistan ve Bangladeş olmak üzere birçok Asya ülkesinde sistemik bir tarımsal kirlilik profili oluşmasına yol açmaktadır [211].

Çin'de yapılan çalışmalar, bu durumu çarpıcı biçimde ortaya koymaktadır. Ülke genelinde tarım topraklarının yaklaşık %10'unun ağır metallerle kirlendiği, bu kirliliğin %7,75'inin kadmiyum (Cd) kaynaklı olduğu belirlenmiştir [227]. Shenyang bölgesindeki bir çinko eritme tesisinin yakınında yapılan analizlerde, toprak Cd düzeylerinin yasal sınır olan 0,6 mg/kg'ın 37 katına ulaştığı rapor edilmiştir. Benzer şekilde, Hunan bölgesinde yapılan saha çalışmalarında, toprak örneklerinin %90'ında Cd düzeyleri sınır değerlerin üzerinde bulunmuştur. Bu kirlilik doğrudan pirinç gibi temel besin ürünlerine geçmekte ve gıda zinciri üzerinden insanlara ulaşmaktadır [228]. Hindistan ve Bangladeş gibi ülkelerde de benzer durumlar söz konusudur. Arıtılmadan kullanılan endüstriyel atıksular, toprak ve ürün düzeyinde kirlenmeye yol açmaktadır. Shaheen vd. (2016), Bangladeş'te yetiştirilen marul ve ıspanak örneklerinde sırasıyla min-max olarak 5,46–7,65 mg/kg Pb, 27,63–48,36 mg/kg Cu ve 41,05–57,39 mg/kg Zn birikimi tespit etmiş, bu değerlerin WHO/FAO tarafından belirlenen gıda güvenliği limitlerinin çok üzerinde olduğunu raporlamıştır [226]. Bu tür maruziyetin, özellikle bağışıklık sistemi zayıf bireylerde ve çocuklarda toksik etkiler yarattığı, USEPA

(2016) raporlarında da vurgulanmaktadır. Bu kontaminasyonun sistematik olarak değerlendirilmesinde, gıda güvenliği bağlamında kullanılan Sağlık Risk İndeksi (HRI) hesaplamaları büyük önem taşımaktadır. HRI değerinin 1'in üzerinde olması, akut veya kronik sağlık riski bulunduğuna işaret etmektedir. Shaheen vd. (2016) tarafından yapılan çalışmalarda, incelenen Cr hariç tüm metallerin HRI değerlerinin 1'in üzerinde olduğu bildirilmiştir. Benzer durumlar Avrupa'da da tarihsel olarak gözlemlenmiştir. Sulama suyu kalitesi ile toprakta biriken ağır metal düzeyleri arasında güçlü korelasyonlar tespit edilmiştir. Shaheen vd. (2016) tarafından yapılan ölçümlerde, arıtılmış su ile sulanan topraklarda Cd seviyesi 1,49 µg/g iken; arıtılmamış atıksu ile sulanan alanlarda bu değerin 3,12 µg/g'a çıktığı rapor edilmiştir [226]. Benzer şekilde Cu (8,39 → 21,13 µg/g) ve Pb (8,15 → 21,39 µg/g) konsantrasyonlarında da yaklaşık iki katlık artış gözlenmiştir.

Ağır metal yükü yalnızca toprakla sınırlı kalmamakta sızma ve yıkanma süreçleriyle yer altı suyu ve yüzey sularına da taşınmaktadır. Bu durum sulama suyu kalitesini de yeniden etkileyerek kontaminasyon döngüsünü pekiştirmektedir. Muhammad ve arkadaşlarının (2021) çalışmasında, suda 0,8 mg/L Cu ve 0,89 mg/L Zn konsantrasyonu ölçülmüş ve bunların FAO sınır değerlerine oldukça yakın olduğu belirtilmiştir [229]. Toprakta ise Cu (12,17 mg/kg) ve Zn (55,75 mg/kg) gibi metallerin konsantrasyonu, önerilen sınır değerleri aşmıştır.

Ağır metal alımı, bitki türüne göre değişiklik göstermekle birlikte, yüksek alım kapasitesine sahip türler gıda güvenliği açısından özel dikkat gerektirmektedir. Shaheen ve ark. (2016) tarafından yapılan analizlerde; ıspanakta Co (78,86 mg/kg), marulda Fe (82,08 mg/kg) ve soğanda Cu (63,90 mg/kg) en yüksek düzeyde birikmiştir [226]. Bu değerlerin birçoğu WHO/FAO güvenli limitlerinin oldukça üzerindedir [11]. Kronik maruziyetin sonucu olarak; böbrek yetmezliği, hepatotoksite, nörolojik bozukluklar ve bağışıklık sisteminde baskılanma gibi sağlık sorunları ortaya çıkabilmektedir.

Sonuç olarak, arıtılmamış atıksu temelli sulama sistemleri kısa vadede tarımsal üretimde verim artışı sağlasa da, uzun vadede toprak-sağlık-gıda zincirinde geri dönüşü zor zararlar meydana getirmektedir. Bu bağlamda hem sulama suyunun hem de toprak ve ürünlerin düzenli aralıklarla analiz edilmesi, sürdürülebilir tarım ve halk sağlığı açısından kritik önem taşımaktadır.

SONUÇ

Bu çalışma, tarımsal üretimde kullanılan sularda kimyasal ve biyolojik kirleticilerin dağılımı, davranışı ve potansiyel riskleri üzerine çok boyutlu bir değerlendirme sunarak, sürdürülebilir su yönetiminin gıda güvenliği ve çevresel sağlık açısından kritik önemini ortaya koymuştur. Bulgular, sulama sularında saptanan ağır metallerin ve pestisit kalıntılarının bitkisel ürünlere geçiş potansiyelinin, yalnızca kirleticinin türü

ve konsantrasyonu ile değil; aynı zamanda toprağın fizikokimyasal özellikleri, bitki türü, sulama tekniği ve çevresel koşullarla da yakından ilişkili olduğunu göstermektedir. Bu kapsamda, kadmiyum, kurşun ve arsenik gibi toksik elementlerin biyoyararlanabilir formlarda toprakta uzun süre kalabildiği, dolayısıyla kümülatif risk yarattığı vurgulanmıştır.

Çalışmanın biyolojik kirleticilere ilişkin bölümünde ise *E. coli* O157:H7, *Salmonella* türleri, *L. monocytogenes*, *Giardia* ve Norovirüs gibi patojenlerin sulama sularında yaygın olarak tespit edildiği ve bunların özellikle çiğ tüketilen ürünler aracılığıyla halk sağlığı açısından önemli enfeksiyon kaynakları oluşturduğu ortaya konmuştur. Mikrobiyal riskin mevsimsel, coğrafi ve hidrodinamik faktörlerden etkilendiği; ayrıca geleneksel fekal indikatörlerin gerçek patojen varlığını öngörmeye sınırlı doğruluk sunduğu belirlenmiştir. Bu durum, patojen risk değerlendirmelerinde moleküler tanı yöntemlerine ve çoklu parametre izleme stratejilerine duyulan ihtiyacı daha görünür kılmaktadır.

Araştırmanın özgün yönlerinden biri de, sulama suyu kaynaklı kirleticilerin yalnızca birincil bulaşma aracı olmadığı, aynı zamanda toprak mikrobiyotasını, bitki metabolizmasını ve dolaylı yoldan agroekosistem stabilitesini etkileyen önemli bir çevresel stres faktörü olduğu yönündeki vurgudur. Tarımsal sularda biyofilm oluşumu, algal toksinler ve toksik metabolitlerin varlığı gibi konuların da bütünleşmiş biçimde ele alınması, bu çalışma kapsamında sağlanan holistik bakış açısını güçlendirmektedir.

Bu kapsamlı değerlendirme, suyun yalnızca miktar açısından değil, aynı zamanda niteliksel açıdan da tarımsal kalkınma politikalarında merkezi bir konumda değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Bulgular, özellikle gelişmekte olan ülkelerde su yönetim sistemlerinin iyileştirilmesi, ileri düzey arıtım teknolojilerinin sulamaya entegrasyonu ve yerel risk profillerine dayalı mikrobiyal su kalite izleme programlarının geliştirilmesi gerektiğini önermektedir. Sonuç olarak, tarımsal sularda kirletici dinamiklerinin anlaşılması, yalnızca akademik bilgi üretimi açısından değil, aynı zamanda gıda güvenliği, halk sağlığı ve çevresel sürdürülebilirliğin kesişim noktasında yer alan politika ve uygulamaların yeniden yapılandırılması açısından da kritik bir adımdır. Bu bağlamda önerilen sistematik ve bütüncül yaklaşım, sadece mevcut risklerin yönetilmesiyle sınırlı kalmayıp, aynı zamanda tarımsal üretimin daha dirençli ve güvenli hale getirilmesinde stratejik bir araç sunmaktadır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın bir kısmı Muş Alparslan Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından BAP-21-MMF-4902-03 nolu proje ile desteklenmiştir.

KAYNAKÇA

- [1] Food and Drug Administration (USFDA). Guide to minimize microbial food safety hazards for fresh fruits and vegetables, 1998.

- <https://www.fda.gov/media/117408/download>. Accessed 10 May 2021.
- [2] Zhang, X. Water quality, agriculture and food safety in China: Current situation, trends, interdependencies, and management, *Journal of Integrative Agriculture*, 14 2365-2379, 2015
- [3] Drechsel, P., S. M. Zadeh, F. Pedrero-Salcedo, F. Alcon, A. Allende, P. Amerasinghe, P. Amoah, A. Ben-Gal, S. E. Benes, ve B. Bruning. Water quality in agriculture: Risks and risk mitigation, 2023
- [4] Kolpin, D. W., E. T. Furlong, M. T. Meyer, E. M. Thurman, S. D. Zaugg, L. B. Barber, ve H. T. Buxton. Pharmaceuticals, Hormones, and Other Organic Wastewater Contaminants in U.S. Streams, 1999–2000: A National Reconnaissance, *Environmental Science & Technology*, 36 1202-1211, 2002
- [5] Baker, M. R., S. Buyrukoğlu, G. Buyrukoğlu, J. Moreira, ve Z. Topalcengiz. Efficacy of machine learning models for the prediction of death occurrence and counts associated with foodborne illnesses and hospitalizations in the United States, *Microbial Risk Analysis*, 100351, 2025
- [6] Scallan, E., R. M. Hoekstra, F. J. Angulo, R. V. Tauxe, M.-A. Widdowson, S. L. Roy, J. L. Jones, ve P. M. Griffin. Foodborne illness acquired in the United States—major pathogens, *Emerging infectious diseases*, 17 7, 2011
- [7] Pachepsky, Y., D. R. Shelton, J. E. McLain, J. Patel, ve R. E. Mandrell. Irrigation waters as a source of pathogenic microorganisms in produce: a review, *Advances in agronomy*, 113 75-141, 2011
- [8] Food and Drug Administration (USFDA). Federal Register Notice: Standards for the Growing, Harvesting, Packing, and Holding of Produce for Human Consumption, 2015
- [9] Polat, H., Z. Topalcengiz, ve M. D. Danyluk. Prediction of Salmonella presence and absence in agricultural surface waters by artificial intelligence approaches, *Journal of Food Safety*, 40 e12733, 2020
- [10] Weller, D. L., T. M. Love, ve M. Wiedmann. Comparison of resampling algorithms to address class imbalance when developing machine learning models to predict foodborne pathogen presence in agricultural water, *Frontiers in Environmental Science*, 9 701288, 2021
- [11] FAO/WHO. Safety and Quality of Water Used in Food Production and Processing, 2019
- [12] Gu, G., L. K. Strawn, A. R. Ottesen, P. Ramachandran, E. A. Reed, J. Zheng, R. R. Boyer, ve S. L. Rideout. Correlation of Salmonella enterica and Listeria monocytogenes in irrigation water to environmental factors, fecal indicators, and bacterial communities, *Frontiers in Microbiology*, 11 557289, 2021
- [13] Steele, M. ve J. Odumeru. Irrigation water as source of foodborne pathogens on fruit and vegetables, *Journal of food protection*, 67 2839-2849, 2004
- [14] Liu, X., K. Sathishkumar, H. Zhang, K. K. Saxena, F. Zhang, S. Naraginti, R. Rajendiran, A. Rajasekar, ve X. Guo. Frontiers in environmental cleanup: Recent advances in remediation of emerging pollutants from soil and water, *Journal of Hazardous Materials Advances*, 16 100461, 2024
- [15] Bayabil, H. K., S. M. Guzman, F. S. Zazueta, ve D. Z. Haman. Potential Impacts of Improper Irrigation System Design: AE73/AE027, rev. 8/2022, EDIS, 2022
- [16] Harmancıoğlu, N. B., A. Gül, ve O. Fıstıkoğlu. Entegre su kaynakları yönetimi, 2002
- [17] Zhang WenJun, Z. W., J. F. Jiang FuBin, ve O. J. Ou JianFeng. Global pesticide consumption and pollution: with China as a focus., 2011
- [18] Uzun, H. İ. ve E. Debik. Economic evaluation of fluoride removal by membrane capacitive deionization, *Environmental Research and Technology*, 4 352-357, 2021
- [19] Debik, E. ve H. İ. Uzun. Yeraltı Suyundan İyonik Kirlenmelerin Gideriminde Membran Kapasitif Deiyonizasyon Prosesinin Kullanımı: Performans Parametrelerinin ve Optimum İşletme Şartlarının Tespiti, 3rd International Symposium on Environment and Morality (ISEM2016) 4-6 Nov 2016 Alanya/Antalya-Turkey, 2016
- [20] Kara, C. ve U. Çömlekçioğlu. Karaçay (Kahramanmaraş)'ın kirliliğinin biyolojik ve fiziko-kimyasal parametrelerle incelenmesi, *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 7 1-7, 2004
- [21] Topalcengiz, Z., M. Krug, J. Saha, K. Stull, ve M. Danyluk. Contributions of pathogens from agricultural water to fresh produce, *Present Knowledge in Food Safety*, 357-377, 2023
- [22] Toze, S. Reuse of effluent water—benefits and risks, *Agricultural water management*, 80 147-159, 2006
- [23] Cifuentes, E., M. Gomez, U. Blumenthal, M. M. Tellez-Rojas, I. Romieu, G. Ruiz-Palacios, ve S. Ruiz-Velazco. Risk factors for Giardia intestinalis infection in agricultural villages practicing wastewater irrigation in Mexico., *The American journal of tropical medicine and hygiene*, 62 388-392, 2000
- [24] Topalcengiz, Z., S. Chandran, ve K. E. Gibson. A comprehensive examination of microbial hazards and risks during indoor soilless leafy green production, *International Journal of Food Microbiology*, 411 110546, 2024
- [25] Wadamori, Y., R. Gooneratne, ve M. A. Hussain. Outbreaks and factors influencing microbiological contamination of fresh produce, *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 97 1396-1403, 2017
- [26] Banach, J. L., I. Sampers, S. Van Haute, ve H. J. Van der Fels-Klerx. Effect of disinfectants on preventing the cross-contamination of pathogens in fresh produce washing water, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 12 8658-8677, 2015
- [27] Banach, J. L. ve H. J. Van Der Fels-Klerx. Microbiological reduction strategies of irrigation water for fresh produce, *Journal of food protection*, 83 1072-1087, 2020
- [28] Ssemenda, J. N., H. Joosten, M. C. Bagabe, M. H. Zwietering, ve M. W. Reij. Reduction of microbial counts during kitchen scale washing and sanitization of salad vegetables, *Food Control*, 85 495-503, 2018
- [29] Kilonzo-Nthenge, A., F.-C. Chen, ve S. L. Godwin. Efficacy of home washing methods in controlling surface microbial contamination on fresh produce, *Journal of Food Protection*, 69 330-334, 2006
- [30] Buyrukoğlu, G., J. Moreira, ve Z. Topalcengiz. Causal mediation analysis of foodborne Salmonella outbreaks in the United States: Serotypes and food vehicles, *Pathogens*, 13 1134, 2024
- [31] Partyka, M. L. ve R. F. Bond. Wastewater reuse for irrigation of produce: A review of research, regulations, and risks, *Science of the Total Environment*, 828 154385, 2022
- [32] Greene, S. K., E. R. Daly, E. A. Talbot, L. J. Demma, S. Holzbauer, N. J. Patel, T. A. Hill, M. O. Walderhaug, R. M. Hoekstra, ve M. F. Lynch. Recurrent multistate outbreak of Salmonella Newport associated with tomatoes from contaminated fields, 2005, *Epidemiology & Infection*, 136 157-165, 2008
- [33] The California Food Emergency Response Team (CalFERT). Investigation of the Taco John's Escherichia coli O157:H7 outbreak associated with iceberg lettuce Department of Health, Sacramento, California. 2008 <https://www.cdph.ca.gov/pubsforms/Documents/fdb%20eru%20IceLett%20TacoJohn022008.pdf>

- [34] Food and Drug Administration (FDA). Outbreak Linked to Spinach Forces Reassessment of Food Safety Practices Economic Research Service, FDA Finalizes Report on 2006
<http://www.fda.gov/newsevents/newsroom/pressannouncements/2007/ucm108873.htm> Accessed 16 September, 2024.
- [35] Centers for Disease Control and Prevention (CDC). Outbreak of E. coli Infections Linked to Romaine Lettuce 2018.
<https://www.cdc.gov/ecoli/2018/o157h7-11-18/index.html>.
- [36] Blumenthal, U. J., D. D. Mara, A. Peasey, G. Ruiz-Palacios, ve R. Stott. Guidelines for the microbiological quality of treated wastewater used in agriculture: recommendations for revising WHO guidelines, Bulletin of the World Health Organization, 78 1104-1116, 2000
- [37] Gerba, C. P. ve J. E. Smith. Sources of Pathogenic Microorganisms and Their Fate during Land Application of Wastes, Journal of Environmental Quality, 34 42-48, 2005
- [38] Wilkes, G., T. Edge, V. Gannon, C. Jokinen, E. Lyautey, D. Medeiros, N. Neumann, N. Ruecker, E. Topp, ve D. R. Lapen. Seasonal relationships among indicator bacteria, pathogenic bacteria, Cryptosporidium oocysts, Giardia cysts, and hydrological indices for surface waters within an agricultural landscape, Water research, 43 2209-2223, 2009
- [39] Gannon, V. P. J., T. A. Graham, S. Read, K. Ziebell, A. Muckle, J. Mori, J. Thomas, B. Selinger, I. Townshend, ve J. Byrne. BACTERIAL PATHOGENS IN RURAL WATER SUPPLIES IN SOUTHERN ALBERTA, CANADA, Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A, 67 1643-1653, 2004
- [40] Johnson, J. Y., J. E. Thomas, T. A. Graham, I. Townshend, J. Byrne, L. B. Selinger, ve V. P. Gannon. Prevalence of Escherichia coli O157:H7 and Salmonella spp. in surface waters of southern Alberta and its relation to manure sources, Canadian Journal of Microbiology, 49 326-335, 2003
- [41] Micallef, S. A., R. E. R. Goldstein, A. George, L. Kleinfelter, M. S. Boyer, C. R. McLaughlin, A. Estrin, L. Ewing, J. J.-G. Beaubrun, ve D. E. Hanes. Occurrence and antibiotic resistance of multiple Salmonella serotypes recovered from water, sediment and soil on mid-Atlantic tomato farms, Environmental research, 114 31-39, 2012
- [42] Strawn, L. K., E. D. Fortes, E. A. Bihn, K. K. Nightingale, Y. T. Gröhn, R. W. Worobo, M. Wiedmann, ve P. W. Bergholz. Landscape and Meteorological Factors Affecting Prevalence of Three Food-Borne Pathogens in Fruit and Vegetable Farms, Applied and Environmental Microbiology, 79 588-600, 2013
- [43] Benjamin, L., E. R. Atwill, M. Jay-Russell, M. Cooley, D. Carychao, L. Gorski, ve R. E. Mandrell. Occurrence of generic Escherichia coli, E. coli O157 and Salmonella spp. in water and sediment from leafy green produce farms and streams on the Central California coast, International Journal of Food Microbiology, 165 65-76, 2013
- [44] McEgan, R., G. Mootian, L. D. Goodridge, D. W. Schaffner, ve M. D. Danyluk. Predicting Salmonella Populations from Biological, Chemical, and Physical Indicators in Florida Surface Waters, Applied and Environmental Microbiology, 79 4094-4105, 2013
- [45] Topalcengiz, Z., L. K. Strawn, ve M. D. Danyluk. Microbial quality of agricultural water in Central Florida, PLoS One, 12 e0174889, 2017
- [46] Truchado, P., N. Hernandez, M. I. Gil, R. Ivanek, ve A. Allende. Correlation between E. coli levels and the presence of foodborne pathogens in surface irrigation water: establishment of a sampling program, Water research, 128 226-233, 2018
- [47] Weller, D., M. Wiedmann, ve L. K. Strawn. Irrigation is significantly associated with an increased prevalence of Listeria monocytogenes in produce production environments in New York State, Journal of food protection, 78 1132-1141, 2015
- [48] Ekinci, H., M. Öztürk, ve M. Karaman. Sulama sularında mikrobiyolojik kalite: Hatay örneği, Gıda ve Tarım Bilimleri Dergisi, 12 145-152, 2021
- [49] Yıldırım, M., O. G. Çoban, ve E. Aydın. Şanlıurfa sulama sularında mikrobiyolojik kalite değerlendirmesi. 34(1), 85-92., Ziraat Fakültesi Dergisi, 34 85-92, 2017
- [50] Rodríguez-Lázaro, D., N. Cook, F. M. Ruggeri, J. Sellwood, A. Nasser, M. S. J. Nascimento, M. D'Agostino, R. Santos, J. C. Saiz, ve A. Rzeżutka. Virus hazards from food, water and other contaminated environments, FEMS microbiology reviews, 36 786-814, 2012
- [51] Sano, D., M. Amarasiri, A. Hata, T. Watanabe, ve H. Katayama. Risk management of viral infectious diseases in wastewater reclamation and reuse, Environment International, 91 220-229, 2016
- [52] Bosch, A., R. M. Pintó, ve F. X. Abad. Survival and Transport of Enteric Viruses in the Environment, Viruses in Foods, 151-187, 2006
- [53] Abbaszadegan, M., M. Lechevallier, ve C. Gerba. Occurrence of Viruses in US Groundwaters, Journal AWWA, 95 107-120, 2003
- [54] Cheong, S., C. Lee, S. W. Song, W. C. Choi, C. H. Lee, ve S.-J. Kim. Enteric Viruses in Raw Vegetables and Groundwater Used for Irrigation in South Korea, Applied and Environmental Microbiology, 75 7745-7751, 2009
- [55] Kokkinos, P., Kozyra I, S. Lazic, T. Petrovic, D. Balaz, ve A. Vantarakis. Environmental surveillance of enteric viruses in European fruit production areas indicates regional contamination risks., International Journal of Food Microbiology, 243 2017
- [56] Gabrieli, R., F. Maccari, A. Ruta, A. Panà, ve M. Divizia. Norovirus Detection in Groundwater, Food and Environmental Virology, 1 92-96, 2009
- [57] Rimhanen-Finne, R., S. Lukinmaa, T. Martelius, H. Rossow, R. Karpisková, D. Dedicova, J. Galajeva, A. Bormane, A. Siitonen, ve M. Kuusi. Cases of Salmonella Urbana in Finland, the Czech Republic and Latvia, January-February 2010, Eurosurveillance, 15 2010
- [58] Robertson, L. J., L. Hermansen, ve B. K. Gjerde. Occurrence of Cryptosporidium Oocysts and Giardia Cysts in Sewage in Norway, Applied and Environmental Microbiology, 72 5297-5303, 2006
- [59] Chaidez, C., M. Soto, P. Gortares, ve K. Mena. Occurrence of Cryptosporidium and Giardia in irrigation water and its impact on the fresh produce industry, International Journal of Environmental Health Research, 15 339-345, 2005
- [60] Thurston-Enriquez, J. A., P. Watt, S. E. Dowd, R. Enriquez, I. L. Pepper, ve C. P. Gerba. Detection of protozoan parasites and microsporidia in irrigation waters used for crop production, Journal of food protection, 65 378-382, 2002
- [61] Antaki, E. M., G. Vellidis, C. Harris, P. Aminabadi, K. Levy, ve M. T. Jay-Russell. Low Concentration of Salmonella enterica and Generic Escherichia coli in Farm Ponds and Irrigation Distribution Systems Used for Mixed Produce Production in Southern Georgia, Foodborne Pathogens and Disease, 13 551-558, 2016
- [62] Lothrop, N., K. R. Bright, J. Sexton, J. Pearce-Walker, K. A. Reynolds, ve M. P. Verhoughstraete. Optimal strategies for monitoring irrigation water quality, Agricultural Water Management, 199 86-92, 2018
- [63] Paruch, A. M., T. Mæhlum, ve L. Robertson. Changes in Microbial Quality of Irrigation Water Under Different Weather Conditions in Southeast Norway, Environmental Processes, 2 115-124, 2015

- [64] Sharma, M., E. T. Handy, C. L. East, S. Kim, C. Jiang, M. T. Callahan, S. M. Allard, S. Micallef, S. Craighead, ve B. Anderson-Coughlin. Prevalence of Salmonella and Listeria monocytogenes in non-traditional irrigation waters in the Mid-Atlantic United States is affected by water type, season, and recovery method, PLoS One, 15 e0229365, 2020
- [65] Havelaar, A. H., K. M. Vazquez, Z. Topalcengiz, R. Muñoz-Carpena, ve M. D. Danyluk. Evaluating the US food safety modernization act produce safety rule standard for microbial quality of agricultural water for growing produce, Journal of food protection, 80 1832-1841, 2017
- [66] Santiago-Rodriguez, T. M., R. L. Tremblay, C. Toledo-Hernandez, J. E. Gonzalez-Nieves, H. Ryu, J. W. Santo Domingo, ve G. A. Toranzos. Microbial Quality of Tropical Inland Waters and Effects of Rainfall Events, Applied and Environmental Microbiology, 78 5160-5169, 2012
- [67] Won, G., P. J. Schlegel, J. M. Schrock, ve J. T. LeJeune. Absence of direct association between coliforms and Escherichia coli in irrigation water and on produce, Journal of food protection, 76 959-966, 2013
- [68] Shelton, D. R., Y. A. Pachepsky, L. A. Kiefer, R. A. Blaustein, G. W. McCarty, ve T. H. Dao. Response of coliform populations in streambed sediment and water column to changes in nutrient concentrations in water, Water Research, 59 316-324, 2014
- [69] Cho, K. H., Y. Pachepsky, J. H. Kim, M. Hartmann, ve D. R. Shelton. Modeling seasonal variability of fecal indicator bacteria concentrations in a creek using the modified SWAT., Journal of Environmental Quality, 39 1421-1430, 2010
- [70] Pachepsky, Y. A. ve D. R. Shelton. Escherichia Coli and Fecal Coliforms in Freshwater and Estuarine Sediments, Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 41 1067-1110, 2011
- [71] Meays, C. L., K. Broersma, R. Nordin, A. Mazumder, ve M. Samadpour. Spatial and Annual Variability in Concentrations and Sources of Escherichia coli in Multiple Watersheds, Environmental Science & Technology, 40 5289-5296, 2006
- [72] Liu, H., C. A. Whitehouse, ve B. Li. Presence and persistence of Salmonella in water: the impact on microbial quality of water and food safety, Frontiers in public health, 6 159, 2018
- [73] Cooley, M., D. Carychao, L. Crawford-Miksza, M. T. Jay, C. Myers, C. Rose, C. Keys, J. Farrar, ve R. E. Mandrell. Incidence and tracking of Escherichia coli O157: H7 in a major produce production region in California, PLoS one, 2 e1159, 2007
- [74] Won, G., T. R. Kline, ve J. T. LeJeune. Spatial-temporal variations of microbial water quality in surface reservoirs and canals used for irrigation, Agricultural water management, 116 73-78, 2013
- [75] Luo, Z., G. Gu, A. Ginn, M. C. Giurcanu, P. Adams, G. Vellidis, A. H. C. Van Bruggen, M. D. Danyluk, ve A. C. Wright. Distribution and Characterization of Salmonella enterica Isolates from Irrigation Ponds in the Southeastern United States, Applied and Environmental Microbiology, 81 4376-4387, 2015
- [76] Gu, G., Z. Luo, J. M. Cevallos-Cevallos, P. Adams, G. Vellidis, A. Wright, ve A. H. C. Van Bruggen. Factors affecting the occurrence of Escherichia coli O157 contamination in irrigation ponds on produce farms in the Suwannee River Watershed, Canadian Journal of Microbiology, 59 175-182, 2013
- [77] Haley, B. J., D. J. Cole, ve E. K. Lipp. Distribution, Diversity, and Seasonality of Waterborne Salmonellae in a Rural Watershed, Applied and Environmental Microbiology, 75 1248-1255, 2009
- [78] Atherholt, T. B., M. W. LeChevallier, W. D. Norton, ve J. S. Rosen. Effect of rainfall on Giardia and crypto, Journal AWWA, 90 66-80, 1998
- [79] Stocker, M. D., Y. A. Pachepsky, R. L. Hill, ve M. S. Kim. Elucidating spatial patterns of E. coli in two irrigation ponds with empirical orthogonal functions, Journal of Hydrology, 609 127770, 2022
- [80] Chandran, A. ve A. M. Hatha. Relative survival of Escherichia coli and Salmonella typhimurium in a tropical estuary, Water research, 39 1397-1403, 2005
- [81] Maïga, Y., J. Wethe, K. Denyigba, ve A. S. Ouattara. The impact of pond depth and environmental conditions on sunlight inactivation of Escherichia coli and enterococci in wastewater in a warm climate, Canadian Journal of Microbiology, 55 1364-1374, 2009
- [82] Brooks, J. P., A. Adeli, M. McLaughlin, ve Miles. Microbial ecology of swine effluent lagoons: A review., Journal of Environmental Quality, 33 1903-1921, 2004
- [83] Muirhead, R. W. ve E. D. Meenken. Variability of Escherichia coli Concentrations in Rivers during Base-Flow Conditions in New Zealand, Journal of Environmental Quality, 47 967-973, 2018
- [84] Meays, C. L., K. Broersma, R. Nordin, A. Mazumder, ve M. Samadpour. Diurnal variability in concentrations and sources of Escherichia coli in three streams, Canadian Journal of Microbiology, 52 1130-1135, 2006
- [85] McLain, J. E. ve C. F. Williams. Seasonal variation in accurate identification of Escherichia coli within a constructed wetland receiving tertiary-treated municipal effluent, Water research, 42 4041-4048, 2008
- [86] Holvoet, K., I. Sampers, M. Seynaeve, ve M. Uyttendaele. Relationships among hygiene indicators and enteric pathogens in irrigation water, soil and lettuce and the impact of climatic conditions on contamination in the lettuce primary production, International journal of food microbiology, 171 21-31, 2014
- [87] López-Gálvez, F., P. Truchado, G. Sánchez, R. Aznar, M. I. Gil, ve A. Allende. Occurrence of enteric viruses in reclaimed and surface irrigation water: relationship with microbiological and physicochemical indicators, Journal of Applied Microbiology, 121 1180-1188, 2016
- [88] Gerber, P. J., H. Steinfeld, B. Henderson, A. Mottet, C. Opio, J. Dijkman, A. Falcucci, ve G. Tempio. Tackling climate change through livestock: a global assessment of emissions and mitigation opportunities., 2013
- [89] Ensink, J. H., T. Mahmood, W. Van der Hoek, L. Raschid-Sally, ve F. P. Amerasinghe. A nationwide assessment of wastewater use in Pakistan: An obscure activity or a vitally important one?, Water policy, 6 197-206, 2004
- [90] Qadir, M., D. Wichelns, L. Raschid-Sally, P. G. McCornick, P. Drechsel, A. Bahri, ve P. S. Minhas. The challenges of wastewater irrigation in developing countries, Agricultural water management, 97 561-568, 2010
- [91] Mahmood, A. ve R. N. Malik. Human health risk assessment of heavy metals via consumption of contaminated vegetables collected from different irrigation sources in Lahore, Pakistan, Arabian Journal of Chemistry, 7 91-99, 2014
- [92] Efstratiou, A., J. E. Ongerth, ve P. Karanis. Waterborne transmission of protozoan parasites: review of worldwide outbreaks-an update 2011–2016, Water research, 114 14-22, 2017
- [93] Topalcengiz, Z., R. McEgan, ve M. D. Danyluk. Fate of Salmonella in Central Florida surface waters and evaluation of EPA worst case water as a standard medium, Journal of Food Protection, 82 916-925, 2019
- [94] Topalcengiz, Z. ve M. D. Danyluk. Fate of generic and Shiga toxin-producing Escherichia coli (STEC) in Central Florida surface waters and evaluation of EPA

- Worst Case water as standard medium, Food Research International, 120 322-329, 2019
- [95] Rodrigues, C. ve M. Â. Cunha. Assessment of the microbiological quality of recreational waters: indicators and methods, Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration, 2 25, 2017
- [96] Easton, J. H., J. J. Gauthier, M. M. Lalor, ve R. E. Pitt. Die-Off of pathogenic *E. coli* O157:H7 in sewage contaminated waters, Journal of the American Water Resources Association, 41 1187-1193, 2005
- [97] Cook, K. L. ve C. H. Bolster. Survival of *Campylobacter jejuni* and *Escherichia coli* in groundwater during prolonged starvation at low temperatures, Journal of applied microbiology, 103 573-583, 2007
- [98] Korhonen, L. K. ve P. J. Martikainen. Comparison of the survival of *Campylobacter jejuni* and *Campylobacter coli* in culturable form in surface water, Canadian Journal of Microbiology, 37 530-533, 1991
- [99] Dutka, B. J. ve K. K. Kwan. Bacterial die-off and stream transport studies, Water Research, 14 909-915, 1980
- [100] Medema, G. J., M. Bahar, ve F. M. Schets. Survival of *Cryptosporidium parvum*, *Escherichia coli*, faecal enterococci and *Clostridium perfringens* in river water: influence of temperature and autochthonous microorganisms, Water Science and Technology, 35 249-252, 1997
- [101] Cho, K. H., Y. A. Pachepsky, D. M. Oliver, R. W. Muirhead, Y. Park, R. S. Quilliam, ve D. R. Shelton. Modeling fate and transport of fecally-derived microorganisms at the watershed scale: State of the science and future opportunities, Water research, 100 38-56, 2016
- [102] Berry, E. D., J. E. Wells, J. L. Bono, B. L. Woodbury, N. Kalchayanand, K. N. Norman, T. V. Suslow, G. López-Velasco, ve P. D. Millner. Effect of Proximity to a Cattle Feedlot on *Escherichia coli* O157:H7 Contamination of Leafy Greens and Evaluation of the Potential for Airborne Transmission, Applied and Environmental Microbiology, 81 1101-1110, 2015
- [103] Ibrahim, E. M. E., M. A. El-Liethy, A. L. K. Abia, B. A. Hemdan, ve M. N. Shaheen. Survival of *E. coli* O157: H7, *Salmonella* Typhimurium, HAdV2 and MNV-1 in river water under dark conditions and varying storage temperatures, Science of the Total Environment, 648 1297-1304, 2019
- [104] Verbyla, M. E. ve J. R. Mihelcic. A review of virus removal in wastewater treatment pond systems, Water Research, 71 107-124, 2015
- [105] Aktaş, M. ve L. Özkan. Güneş ışığının sucul ortamlardaki patojen mikroorganizmalar üzerindeki etkisi, Çevre Bilimleri Dergisi, 29 45-54, 2017
- [106] Byappanahalli, M. N., R. Sawdey, S. Ishii, D. A. Shively, J. A. Ferguson, R. L. Whitman, ve M. J. Sadowsky. Seasonal stability of *Cladophora*-associated *Salmonella* in Lake Michigan watersheds, water research, 43 806-814, 2009
- [107] Templeton, M. R., R. C. Andrews, ve R. Hofmann. Inactivation of particle-associated viral surrogates by ultraviolet light, Water research, 39 3487-3500, 2005
- [108] Vital, M., F. Hammes, ve T. Egli. *Escherichia coli* O157:H7: Growth and survival in water and in association with biofilms, Microbiology, 154 835-844,
- [109] Van Elsland, J. D., A. V. Semenov, R. Costa, ve J. T. Trevors. Survival of *Escherichia coli* in the environment: fundamental and public health aspects, The ISME journal, 5 173-183, 2011
- [110] Gordon, C. ve S. Toze. Influence of groundwater characteristics on the survival of enteric viruses, Journal of applied microbiology, 95 536-544, 2003
- [111] Bradford, S. A., V. L. Morales, W. Zhang, R. W. Harvey, A. I. Packman, A. Mohanram, ve C. Welty. Transport and Fate of Microbial Pathogens in Agricultural Settings, Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 43 775-893, 2013
- [112] Foppen, J. W. A. ve J. F. Schijven. Transport of *E. coli* in columns of geochemically heterogeneous sediment, Water Research, 39 3082-3088, 2005
- [113] Factors Potentially Contributing to the Contamination of Leafy Greens Implicated in the Fall 2020 Outbreak of *E. coli* O157:H7 | FDA,
- [114] Muirhead, R. W., R. J. Davies-Colley, A. M. Donnison, ve J. W. Nagels. Faecal bacteria yields in artificial flood events: quantifying in-stream stores, Water research, 38 1215-1224, 2004
- [115] Cho, K. H., Y. A. Pachepsky, M. Kim, J. Pyo, M.-H. Park, Y. M. Kim, J.-W. Kim, ve J. H. Kim. Modeling seasonal variability of fecal coliform in natural surface waters using the modified SWAT, Journal of Hydrology, 535 377-385, 2016
- [116] Solo-Gabriele, H. M., M. A. Wolfert, T. R. Desmarais, ve C. J. Palmer. Sources of *Escherichia coli* in a Coastal Subtropical Environment, Applied and Environmental Microbiology, 66 230-237, 2000
- [117] Byappanahalli, M. N., R. L. Whitman, D. A. Shively, M. J. Sadowsky, ve S. Ishii. Population structure, persistence, and seasonality of autochthonous *Escherichia coli* in temperate, coastal forest soil from a Great Lakes watershed, Environmental Microbiology, 8 504-513, 2006
- [118] Axelsson-Olsson, D., J. Olofsson, L. Svensson, P. Griekspoor, J. Waldenström, P. Ellström, ve B. Olsen. Amoebae and algae can prolong the survival of *Campylobacter* species in co-culture, Experimental parasitology, 126 59-64, 2010
- [119] Cho, K. H., J. Wolny, J. A. Kase, T. Unno, ve Y. Pachepsky. Interactions of *E. coli* with algae and aquatic vegetation in natural waters, Water Research, 209 117952, 2022
- [120] Thomas, V., K. Herrera-Rimann, D. S. Blanc, ve G. Greub. Biodiversity of Amoebae and Amoeba-Resisting Bacteria in a Hospital Water Network, Applied and Environmental Microbiology, 72 2428-2438, 2006
- [121] Korajkic, A., B. R. McMinn, ve V. J. Harwood. Relationships between microbial indicators and pathogens in recreational water settings, International Journal of Environmental Research and Public Health, 15 2842, 2018
- [122] Ijabadeniyi, O. A., L. K. Debusho, M. Vanderlinde, ve E. M. Buys. Irrigation water as a potential preharvest source of bacterial contamination of vegetables, Journal of Food Safety, 31 452-461, 2011
- [123] Walters, S. P., A. L. Thebo, ve A. B. Boehm. Impact of urbanization and agriculture on the occurrence of bacterial pathogens and *stx* genes in coastal waterbodies of central California, Water research, 45 1752-1762, 2011
- [124] Mauro, S. A., H. Opalko, K. Lindsay, M. P. Colon, ve G. B. Koudelka. The Microcosm Mediates the Persistence of Shiga Toxin-Producing *Escherichia coli* in Freshwater Ecosystems, Applied and Environmental Microbiology, 79 4821-4828, 2013
- [125] Organization, W. H. Guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater, 4 2006
- [126] Allende, A. ve J. Monaghan. Irrigation water quality for leafy crops: a perspective of risks and potential solutions, International journal of environmental research and public health, 12 7457-7477, 2015
- [127] Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliğinde Değişiklik Yapılmasına Dair Yönetmelik, Resmi Gazete, Tarih: 17.12.2022, Sayı: 32046.
- [128] Çelebi, H. Karasu kanal sularında belirli mikroorganizma türlerinin araştırılması, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 6 182-189, 2018

- [129] Bartram, J. ve S. Cairncross. Hygiene, sanitation, and water: forgotten foundations of health, *PLoS medicine*, 7 e1000367, 2010
- [130] Petterson, S. R. ve N. J. Ashbolt. QMRA and water safety management: review of application in drinking water systems, *Journal of Water and Health*, 14 571-589, 2016
- [131] Stine, S. W., I. Song, C. Y. Choi, ve C. P. Gerba. Effect of relative humidity on preharvest survival of bacterial and viral pathogens on the surface of cantaloupe, lettuce, and bell peppers, *Journal of food protection*, 68 1352-1358, 2005
- [132] Santiago-Rodriguez, T. M., G. A. Toranzos, ve J. A. Arce-Nazario. Assessing the microbial quality of a tropical watershed with an urbanization gradient using traditional and alternate fecal indicators, *Journal of water and health*, 14 796-807, 2016
- [133] Abimbola, O. P., A. R. Mittelstet, T. L. Messer, E. D. Berry, S. L. Bartelt-Hunt, ve S. P. Hansen. Predicting *Escherichia coli* loads in cascading dams with machine learning: An integration of hydrometeorology, animal density and grazing pattern, *Science of the Total Environment*, 722 137894, 2020
- [134] Buyrukoğlu, S., Y. Yılmaz, ve Z. Topalcengiz. Correlation value determined to increase *Salmonella* prediction success of deep neural network for agricultural waters, *Environmental Monitoring and Assessment*, 194 373, 2022
- [135] Buyrukoğlu, G., S. Buyrukoğlu, ve Z. Topalcengiz. Comparing regression models with count data to artificial neural network and ensemble models for prediction of generic *Escherichia coli* population in agricultural ponds based on weather station measurements, *Microbial Risk Analysis*, 19 100171, 2021
- [136] Demir, M., M. Canayaz, ve Z. Topalcengiz. A Meta-Heuristic Algorithm-Based Feature Selection Approach to Improve Prediction Success for *Salmonella* Occurrence in Agricultural Waters, *Journal of Agricultural Sciences*, 30 118-130, 2024
- [137] Weller, D., A. Belias, H. Green, S. Roof, ve M. Wiedmann. Landscape, water quality, and weather factors associated with an increased likelihood of foodborne pathogen contamination of New York streams used to source water for produce production, *Frontiers in sustainable food systems*, 3 124, 2020
- [138] Weller, D., N. Brassill, C. Rock, R. Ivanek, E. Mudrak, S. Roof, E. Ganda, ve M. Wiedmann. Complex interactions between weather, and microbial and physicochemical water quality impact the likelihood of detecting foodborne pathogens in agricultural water, *Frontiers in Microbiology*, 11 134, 2020
- [139] Al-Sa'ed, R. Pathogens assessment in reclaimed effluent used for industrial crops irrigation, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 4 68-75, 2007
- [140] Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). The state of the world's land and water resources for food and agriculture: Managing systems at risk, 2013.
- [141] Zhao, F.-J., Z. Tang, J.-J. Song, X.-Y. Huang, ve P. Wang. Toxic metals and metalloids: Uptake, transport, detoxification, phytoremediation, and crop improvement for safer food, *Molecular plant*, 15 27-44, 2022
- [142] Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Control of water pollution from agriculture, 1996
- [143] Tchounwou, P. B., C. G. Yedjou, A. K. Patlolla, ve D. J. Sutton. Heavy Metal Toxicity and the Environment, *Molecular, Clinical and Environmental Toxicology*, 101 133-164, 2012
- [144] Förstner, U. ve G. T. Wittmann. Metal pollution in the aquatic environment, 2012
- [145] Ogundele, D. T., A. A. Adio, ve O. E. Oludele. Heavy metal concentrations in plants and soil along heavy traffic roads in North Central Nigeria, *Journal of environmental & analytical toxicology*, 5 1, 2015
- [146] Woldetsadik, D., P. Drechsel, B. Keraita, F. Itanna, ve H. Gebrekidan. Heavy metal accumulation and health risk assessment in wastewater-irrigated urban vegetable farming sites of Addis Ababa, Ethiopia, *International Journal of Food Contamination*, 4 9, 2017
- [147] Zhuang Ping, Z. P., M. B. McBride, X. H. Xia HanPing, L. N. Li NingYu, ve L. Z. Li ZhiAn. Health risk from heavy metals via consumption of food crops in the vicinity of Dabaoshan mine, South China., 2009
- [148] ATSDR. Toxicological profile for lead, US Department of Health and Human Services, 1 582, 2007
- [149] Rai, P. K., V. Kumar, S. Lee, N. Raza, K.-H. Kim, Y. S. Ok, ve D. C. Tsang. Nanoparticle-plant interaction: Implications in energy, environment, and agriculture, *Environment international*, 119 1-19, 2018
- [150] Türkdogan, M. K., F. Kilicel, K. Kara, I. Tuncer, ve I. Uygan. Heavy metals in soil, vegetables and fruits in the endemic upper gastrointestinal cancer region of Turkey, *Environmental toxicology and pharmacology*, 13 175-179, 2003
- [151] El-Kady, A. A. ve M. A. Abdel-Wahhab. Occurrence of trace metals in foodstuffs and their health impact, *Trends in food science & technology*, 75 36-45, 2018
- [152] Uzun, H. İ. ve E. Debik. Detection of effective parameters in arsenic removal with capacitive deionization process and arsenic removal from wastewater, *Environmental Research and Technology*, 2 13-18, 2019
- [153] Chiou, H.-Y., Y.-M. Hsueh, K.-F. Liaw, S.-F. Horng, M.-H. Chiang, Y.-S. Pu, J. Shinn-Nan Lin, C.-H. Huang, ve C.-J. Chen. Incidence of internal cancers and ingested inorganic arsenic: a seven-year follow-up study in Taiwan, *Cancer research*, 55 1296-1300, 1995
- [154] Itoh, H., M. Iwasaki, N. Sawada, R. Takachi, Y. Kasuga, S. Yokoyama, H. Onuma, H. Nishimura, R. Kusama, ve K. Yokoyama. Dietary cadmium intake and breast cancer risk in Japanese women: a case-control study, *International journal of hygiene and environmental health*, 217 70-77, 2014
- [155] Navas-Acien, A., E. Guallar, E. K. Silbergeld, ve S. J. Rothenberg. Lead Exposure and Cardiovascular Disease—A Systematic Review, *Environmental Health Perspectives*, 115 472-482, 2007
- [156] Gaetke, L. M. ve C. K. Chow. Copper toxicity, oxidative stress, and antioxidant nutrients, *Toxicology*, 189 147-163, 2003
- [157] Zhou Hang, Z. H., Y. W. Yang WenTao, Z. X. Zhou Xin, L. L. Liu Li, G. J. Gu JiaoFeng, W. W. Wang WenLei, Z. J. Zou JiaLing, T. T. Tian Tao, P. P. Peng PeiQin, ve L. B. Liao BoHan. Accumulation of heavy metals in vegetable species planted in contaminated soils and the health risk assessment., 2016
- [158] Rattan, R. K., S. P. Datta, P. K. Chhonkar, K. Suribabu, ve A. K. Singh. Long-term impact of irrigation with sewage effluents on heavy metal content in soils, crops and groundwater—a case study, *Agriculture, ecosystems & environment*, 109 310-322, 2005
- [159] Canli, M. ve G. Atli. The relationships between heavy metal (Cd, Cr, Cu, Fe, Pb, Zn) levels and the size of six Mediterranean fish species, *Environmental pollution*, 121 129-136, 2003
- [160] Rainbow, P. S. Trace metal concentrations in aquatic invertebrates: why and so what?, *Environmental pollution*, 120 497-507, 2002
- [161] Shamsudduha, M., G. Joseph, S. S. Haque, M. R. Khan, A. Zahid, ve K. M. U. Ahmed. Multi-hazard Groundwater Risks to Water Supply from Shallow

- Depths: Challenges to Achieving the Sustainable Development Goals in Bangladesh, *Exposure and Health*, 12 657-670, 2020
- [162] Sarker, A., J.-E. Kim, A. R. Md. T. Islam, M. Bilal, Md. R. J. Rakib, R. Nandi, M. M. Rahman, ve T. Islam. Heavy metals contamination and associated health risks in food webs—a review focuses on food safety and environmental sustainability in Bangladesh, *Environmental Science and Pollution Research*, 29 3230-3245, 2022
- [163] Aktar, W., D. Sengupta, ve A. Chowdhury. Impact of pesticides use in agriculture: their benefits and hazards, *Interdisciplinary Toxicology*, 2 1-12, 2009
- [164] Sánchez-Bayo, F. ve K. A. Wyckhuys. Worldwide decline of the entomofauna: A review of its drivers, *Biological conservation*, 232 8-27, 2019
- [165] Woodcock, B. A., N. J. Isaac, J. M. Bullock, D. B. Roy, D. G. Garthwaite, A. Crowe, ve R. F. Pywell. Impacts of neonicotinoid use on long-term population changes in wild bees in England, *Nature communications*, 7 12459, 2016
- [166] Goulson, D. REVIEW: An overview of the environmental risks posed by neonicotinoid insecticides, *Journal of Applied Ecology*, 50 977-987, 2013
- [167] Stehle, S. ve R. Schulz. Agricultural insecticides threaten surface waters at the global scale, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112 5750-5755, 2015
- [168] Morrissey, C. A., P. Mineau, J. H. Devries, F. Sanchez-Bayo, M. Liess, M. C. Cavallaro, ve K. Liber. Neonicotinoid contamination of global surface waters and associated risk to aquatic invertebrates: a review, *Environment international*, 74 291-303, 2015
- [169] Mostafalou, S. ve M. Abdollahi. Pesticides and human chronic diseases: evidences, mechanisms, and perspectives, *Toxicology and applied pharmacology*, 268 157-177, 2013
- [170] Roberts, J. R., C. J. Karr, C. on E. Health, J. A. Paulson, A. C. Brock-Utne, H. L. Brumberg, C. C. Campbell, B. P. Lanphear, K. C. Osterhoudt, ve M. T. Sandel. Pesticide exposure in children, *Pediatrics*, 130 e1765-e1788, 2012
- [171] Thompson, L. A. ve W. S. Darwish. Environmental Chemical Contaminants in Food: Review of a Global Problem, *Journal of Toxicology*, 2019 1-14, 2019
- [172] Beddington, J. Food security: contributions from science to a new and greener revolution, *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 365 61-71, 2010
- [173] Lake, I. R., L. Hooper, A. Abdelhamid, G. Bentham, A. B. A. Boxall, A. Draper, S. Fairweather-Tait, M. Hulme, P. R. Hunter, G. Nichols, ve K. W. Waldron. Climate Change and Food Security: Health Impacts in Developed Countries, *Environmental Health Perspectives*, 120 1520-1526, 2012
- [174] Luzzi, A. F. ve W. P. T. James. European diet and public health: the continuing challenge, *Public Health Nutrition*, 4 275-292, 2001
- [175] Organization, W. H. Public health impact of pesticides used in agriculture, *Public health impact of pesticides used in agriculture*, 128-128, 1990
- [176] Rai, P. K. ve B. D. Tripathi. Heavy metals in industrial wastewater, soil and vegetables in Lohita village, India, *Toxicological & Environmental Chemistry*, 90 247-257, 2008
- [177] Bahemuka, T. E. ve E. B. Mubofu. Heavy metals in edible green vegetables grown along the sites of the Sinza and Msimbazi rivers in Dar es Salaam, Tanzania, *Food Chemistry*, 66 63-66, 1999
- [178] Lal, R. Enhancing crop yields in the developing countries through restoration of the soil organic carbon pool in agricultural lands, *Land Degradation & Development*, 17 197-209, 2006
- [179] Savci, S. An agricultural pollutant: chemical fertilizer, *International Journal of Environmental Science and Development*, 3 73, 2012
- [180] Sharpley, A. N., P. J. A. Kleinman, A. L. Heathwaite, W. J. Gburek, G. J. Folmar, ve J. P. Schmidt. Phosphorus Loss from an Agricultural Watershed as a Function of Storm Size, *Journal of Environmental Quality*, 37 362-368, 2008
- [181] Galloway, J. N., J. D. Aber, J. W. Erisman, S. P. Seitzinger, R. W. Howarth, E. B. Cowling, ve B. J. Cosby. The nitrogen cascade, *Bioscience*, 53 341-356, 2003
- [182] Carpenter, S. R., N. F. Caraco, D. L. Correll, R. W. Howarth, A. N. Sharpley, ve V. H. Smith. NONPOINT POLLUTION OF SURFACE WATERS WITH PHOSPHORUS AND NITROGEN, *Ecological Applications*, 8 559-568, 1998
- [183] Sharpley, A., B. Foy, ve P. Withers. Practical and Innovative Measures for the Control of Agricultural Phosphorus Losses to Water: An Overview, *Journal of Environmental Quality*, 29 1-9, 2000
- [184] Uzun, H. I. ve E. Debik. Economical approach to nitrate removal via membrane capacitive deionization, *Separation and purification technology*, 209 776-781, 2019
- [185] Burkart, M. R. ve J. D. Stoner. Nitrogen in groundwater associated with agricultural systems, *Nitrogen in the Environment*, 177-202, 2008
- [186] World Health Organization (WHO). Guidelines for drinking-water quality, 4th edition, incorporating the 1st addendum, 2017
- [187] Ayers, R. S. ve D. W. Westcot. Water quality for agriculture., 1976
- [188] Raghunath, H. M. Groundwater, Wiley Eastern Ltd, New Delhi, India, 762 1987
- [189] Hounslow, A. Water quality data: analysis and interpretation, 2018
- [190] Subba Rao, N. Seasonal variation of groundwater quality in a part of Guntur District, Andhra Pradesh, India, *Environmental Geology*, 49 413-429, 2006
- [191] Todd, D. K. ve L. W. Mays. Groundwater hydrology, 2004
- [192] Matthes, G., The properties of groundwater, 1982
- [193] Gupta, N., K. K. Yadav, V. Kumar, S. Kumar, R. P. Chadd, ve A. Kumar. Trace elements in soil-vegetables interface: translocation, bioaccumulation, toxicity and amelioration-a review, *Science of the Total Environment*, 651 2927-2942, 2019
- [194] Kumar, S., S. Prasad, K. K. Yadav, M. Shrivastava, N. Gupta, S. Nagar, Q.-V. Bach, H. Kamyab, S. A. Khan, ve S. Yadav. Hazardous heavy metals contamination of vegetables and food chain: Role of sustainable remediation approaches-A review, *Environmental research*, 179 108792, 2019
- [195] Dipankar Chakraborti, D. C., M. M. Rahman, A. M. Amitava Mukherjee, M. Alauddin, M. H. Manzurul Hassan, R. N. Dutta, S. P. Shymapada Pati, S. C. Mukherjee, S. R. Shibtosh Roy, ve Q. Q. Quazi Quamruzzman. Groundwater arsenic contamination in Bangladesh-21 years of research., 2015
- [196] Gall, J. E., R. S. Boyd, ve N. Rajakaruna. Transfer of heavy metals through terrestrial food webs: a review, *Environmental Monitoring and Assessment*, 187 201, 2015
- [197] Boudebouz, A., S. Boudalia, A. Bousbia, S. Habila, M. I. Boussadia, ve Y. Gueroui. Heavy metals levels in raw cow milk and health risk assessment across the globe: A systematic review, *Science of the total Environment*, 751 141830, 2021
- [198] Filippini, T., S. Tancredi, C. Malagoli, M. Malavolti, A. Bargellini, L. Vescovi, F. Nicolini, ve M. Vinceti. Dietary Estimated Intake of Trace Elements: Risk

- Assessment in an Italian Population, Exposure and Health, 12 641-655, 2020
- [199] Islam, M. M., M. R. Karim, X. Zheng, ve X. Li. Heavy metal and metalloid pollution of soil, water and foods in Bangladesh: a critical review, International journal of environmental research and public health, 15 2825, 2018
- [200] Sharmin, S., J. Mia, M. S. Miah, ve H. M. Zakir. Hydrogeochemistry and heavy metal contamination in groundwaters of Dhaka metropolitan city, Bangladesh: Assessment of human health impact, HydroResearch, 3 106-117, 2020
- [201] Xin ShuZhen, X. S., L. H. Li HuaFen, ve S. D. Su DeChun. Concentration characteristics and historical changes of heavy metals in irrigation sewage in China., 2011
- [202] Huang, C. ve X. Wang. China's farmland sewage irrigation development and its impact on crop research, J. Anhui Agric. Sci, 37 10692-10693, 2009
- [203] Gong, S. S. ve T. Zhang. Temporal-spatial distribution changes of cancer villages in China, China Popul. Resour. Environ, 23 e164, 2013
- [204] He GuiZhen, H. G., Z. L. Zhang Lei, A. P. J. Mol, W. T. Wang TieYu, ve L. Y. Lu YongLong. Why small and medium chemical companies continue to pose severe environmental risks in rural China., 2014
- [205] McArthur, J. M., U. Ghosal, P. K. Sikdar, ve J. D. Ball. Arsenic in Groundwater: The Deep Late Pleistocene Aquifers of the Western Bengal Basin, Environmental Science & Technology, 50 3469-3476, 2016
- [206] Mihajlov, I., M. R. H. Mozumder, B. C. Bostick, M. Stute, B. J. Mailloux, P. S. Knappett, I. Choudhury, K. M. Ahmed, P. Schlosser, ve A. van Geen. Arsenic contamination of Bangladesh aquifers exacerbated by clay layers, Nature communications, 11 2244, 2020
- [207] Islam, Md. S., T. Kormoker, M. Mazumder, S. E. Anika, Md. T. Islam, D. H. Hemy, U. S. Mimi, R. Proshad, Md. H. Kabir, ve A. M. Idris. Trace elements concentration in soil and plant within the vicinity of abandoned tanning sites in Bangladesh: an integrated chemometric approach for health risk assessment, Toxin Reviews, 41 752-767, 2022
- [208] Habib, M. A., A. R. M. T. Islam, M. Bodrud-Doza, F. A. Mukta, R. Khan, M. A. B. Siddique, K. Phoungthong, ve K. Techato. Simultaneous appraisals of pathway and probable health risk associated with trace metals contamination in groundwater from Barapukuria coal basin, Bangladesh, Chemosphere, 242 125183, 2020
- [209] Ratul, A. K., M. Hassan, M. K. Uddin, M. S. Sultana, M. A. Akbor, ve M. A. Ahsan. Potential health risk of heavy metals accumulation in vegetables irrigated with polluted river water., International food research journal, 25 2018
- [210] Haque, Md. M., N. M. Niloy, O. K. Nayna, K. J. Fatema, S. B. Quraishi, J.-H. Park, K.-W. Kim, ve S. M. Tareq. Variability of water quality and metal pollution index in the Ganges River, Bangladesh, Environmental Science and Pollution Research, 27 42582-42599, 2020
- [211] Rai, P. K., S. S. Lee, M. Zhang, Y. F. Tsang, ve K.-H. Kim. Heavy metals in food crops: Health risks, fate, mechanisms, and management, Environment international, 125 365-385, 2019
- [212] Song Bo, S. B., L. M. Lei Mei, C. T. Chen TongBin, Z. Y. Zheng YuanMing, X. Y. Xie YunFeng, L. X. Li XiaoYan, ve G. D. Gao Ding. Assessing the health risk of heavy metals in vegetables to the general population in Beijing, China., 2009
- [213] Khan, M. U., R. N. Malik, ve S. Muhammad. Human health risk from heavy metal via food crops consumption with wastewater irrigation practices in Pakistan, Chemosphere, 93 2230-2238, 2013
- [214] Rahman, M. A., M. M. Rahman, S. M. Reichman, R. P. Lim, ve R. Naidu. Heavy metals in Australian grown and imported rice and vegetables on sale in Australia: health hazard, Ecotoxicology and environmental safety, 100 53-60, 2014
- [215] Tom, M., T. D. Fletcher, ve D. T. McCarthy. Heavy metal contamination of vegetables irrigated by urban stormwater: a matter of time?, PloS one, 9 e112441, 2014
- [216] Radwan, M. A. ve A. K. Salama. Market basket survey for some heavy metals in Egyptian fruits and vegetables, Food and chemical toxicology, 44 1273-1278, 2006
- [217] Dère, C., I. Lamy, A. Jaulin, ve S. Cornu. Long-term fate of exogenous metals in a sandy Luvisol subjected to intensive irrigation with raw wastewater, Environmental Pollution, 145 31-40, 2007
- [218] Kabata-Pendias, A. Behavioural properties of trace metals in soils, Applied geochemistry, 8 3-9, 1993
- [219] Abdel-Ghani, N. T. ve G. A. Elchaghaby. Influence of operating conditions on the removal of Cu, Zn, Cd and Pb ions from wastewater by adsorption, International Journal of Environmental Science & Technology, 4 451-456, 2007
- [220] Dassenakis, M., M. Scoullou, E. Foufa, E. Krasakopoulou, A. Pavlidou, ve M. Kloukiniotou. Effects of multiple source pollution on a small Mediterranean river, Applied Geochemistry, 13 197-211, 1998
- [221] Islam, M. S., M. K. Ahmed, M. Raknuzzaman, M. Habibullah-Al-Mamun, ve M. K. Islam. Heavy metal pollution in surface water and sediment: a preliminary assessment of an urban river in a developing country, Ecological indicators, 48 282-291, 2015
- [222] Alam, M. G. M., E. T. Snow, ve A. Tanaka. Arsenic and heavy metal contamination of vegetables grown in Samta village, Bangladesh, Science of the total environment, 308 83-96, 2003
- [223] Mapanda, F., E. N. Mangwayana, J. Nyamangara, ve K. E. Giller. The effect of long-term irrigation using wastewater on heavy metal contents of soils under vegetables in Harare, Zimbabwe, Agriculture, Ecosystems & Environment, 107 151-165, 2005
- [224] Sharma, R. K., M. Agrawal, ve F. M. Marshall. Heavy metal (Cu, Zn, Cd and Pb) contamination of vegetables in urban India: A case study in Varanasi, Environmental pollution, 154 254-263, 2008
- [225] Khan, S., Q. Cao, Y. M. Zheng, Y. Z. Huang, ve Y. G. Zhu. Health risks of heavy metals in contaminated soils and food crops irrigated with wastewater in Beijing, China, Environmental pollution, 152 686-692, 2008
- [226] Shaheen, N., N. M. Irfan, I. N. Khan, S. Islam, M. S. Islam, ve M. K. Ahmed. Presence of heavy metals in fruits and vegetables: Health risk implications in Bangladesh, Chemosphere, 152 431-438, 2016
- [227] Lu YongLong, L. Y., S. S. Song Shuai, W. R. Wang RuoShi, L. Z. Liu ZhaoYang, M. J. Meng Jing, A. J. Sweetman, A. Jenkins, R. C. Ferrier, L. H. Li Hong, ve L. W. Luo Wei. Impacts of soil and water pollution on food safety and health risks in China., 2015
- [228] Williams, P. N., M. Lei, G. Sun, Q. Huang, Y. Lu, C. Deacon, A. A. Meharg, ve Y.-G. Zhu. Occurrence and Partitioning of Cadmium, Arsenic and Lead in Mine Impacted Paddy Rice: Hunan, China, Environmental Science & Technology, 43 637-642, 2009
- [229] Bello, A. A., I. A. Muhammad, A. Yunusa, T. A. Mikail, I. Hamza, I. Y. Habib, ve M. Muhammad. Heavy metals contamination of agricultural land and their impact on food safety, European Journal of Nutrition & Food Safety, 13 104-111, 2021