



Hayvancılıkta Su Kalitesinin Önemi ve Sürdürülebilir Su Yönetimi Stratejileri Importance of Water Quality in Livestock and Sustainable Water Management Strategies

Kahraman Selvi^{1*}

¹Dr. Öğr. Üyesi, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Yenice Meslek Yüksekokulu, Ormanlık Bölümü, Ormanlık ve Orman Ürünleri Pr.

MAKALE BİLGİSİ

Derleme Makalesi

Geliş Tarihi: 11.12.2025

Kabul Tarihi: 22.12.2025

Anahtar Kelimeler:

Su kalitesi,

Hayvan sağlığı,

Sürdürülebilir su yönetimi,

Biyobirikim

ÖZ

Su, hayvancılıkta metabolik faaliyetlerin sürdürülmesi, verimlilik ve hayvan refahı için en kritik besin maddesidir. Ancak günümüzde artan endüstriyel faaliyetler, tarımsal atıklar ve iklim değişikliği, su kaynaklarını fiziksel, kimyasal ve biyolojik kirlenmelerle tehdit etmektedir. Bu derleme; su kalitesini belirleyen temel parametreleri (pH, toplam çözünmüş katı maddeler, sertlik), toksik mineralleri ve özellikle ağır metaller (arsenik, kurşun, kadmiyum) ile farmasötik kalıntıların çiftlik hayvanları üzerindeki etkilerini incelemektedir. Kalitesi düşük su tüketimi; yem alımında azalma, oksidatif stres, immün baskılanma ve üreme performansında ciddi kayıplara yol açarak ekonomik sürdürülebilirliği tehlikeye atmaktadır. Ayrıca, ağır metallerin ve kalıcı organik kirlenmelerin besin zinciri yoluyla biyobirikimi ve antibiyotik kalıntılarının neden olduğu antimikrobiyal direnç, halk sağlığı açısından “Tek Sağlık” perspektifinde değerlendirilmesi gereken küresel bir risktir. Çalışmada, bu tehditlere karşı su kalitesi izleme programları, biyofilm kontrolü, suluk hijyeni ve alternatif su kaynaklarının kullanımı gibi sürdürülebilir su yönetimi stratejileri irdelenmiştir. Sonuç olarak, su kalitesinin bütüncül bir yaklaşımla yönetilmesi, hayvan sağlığı ve gıda güvenliğinin temini için bir zorunluluktur.

ARTICLE INFO

Review Article

Received: 11.12.2025

Accepted: 22.12.2025

Keywords:

Water quality,

Animal health,

Sustainable water management,

Bioaccumulation

ABSTRACT

Water constitutes the most critical nutrient for maintaining metabolic activities, productivity, and animal welfare in livestock. However, increasing industrial activities, agricultural wastes, and climate change currently threaten water resources with physical, chemical, and biological pollutants. This review examines the fundamental parameters determining water quality (pH, total dissolved solids, hardness), toxic minerals – particularly heavy metals (arsenic, lead, cadmium) – and the effects of pharmaceutical residues on farm animals. Consumption of low-quality water compromises economic sustainability by causing reduced feed intake, oxidative stress, immunosuppression, and significant losses in reproductive performance. Furthermore, the bioaccumulation of heavy metals and persistent organic pollutants through the food chain, along with antimicrobial resistance caused by antibiotic residues, represent global risks that must be evaluated within the "One Health" perspective regarding public health. The study addresses sustainable water management strategies, such as water quality monitoring programs, biofilm control, trough hygiene, and the use of alternative water sources against these threats. In conclusion, managing water quality with a holistic approach is essential for ensuring animal health and food safety.

* Sorumlu yazar.

* kahramanselvi@comu.edu.tr

GİRİŞ

Su, çiftlik hayvanlarının vücut ağırlığının %50 ila %80'ini oluşturan; metabolik faaliyetlerin sürdürülmesi, homeostazın sağlanması, besin maddelerinin taşınması, böbrek fonksiyonları ve toksin eliminasyonu gibi fizyolojik süreçlerin merkezinde yer alan en temel besin maddesidir (NRC, 2001; Giri ve ark., 2020). Hayvancılıkta yeterli ve kaliteli su temini, sadece hayatta kalma meselesi değil; hayvan refahı, verimlilik ve ürün kalitesi açısından hayati bir zorunluluktur. Hayvanların su gereksinimi; tür, yaş ve üretim fizyolojisinin (gebelik, laktasyon) yanı sıra rasyonun kuru madde düzeyi ve çevresel ısı yükü gibi çoklu biyotik ve abiyotik faktörlerin etkileşimiyle şekillenen geniş bir varyasyon aralığı göstermektedir (Can ve Boğa, 2025). Literatürde, günlük 26 kg'ın altında süt veren ineklerde toplam su alımının (Total Water Intake; TWI) üretilen her bir kilogram süt için yaklaşık 3,3–4,2 kg aralığında gerçekleştiği bildirilmektedir. Buna karşılık, yüksek verimli (33–35 kg/gün) laktasyon dönemindeki ineklerde TWI'nın birim süt verimi başına 2,6–3,0 kg düzeyine gerilediği gösterilmiştir (NRC, 2001; Cemek ve ark., 2011).

Günümüzde, küresel iklim değişikliği ve nüfus artışına bağlı gıda talebi, su kaynakları üzerindeki baskıyı benzeri görülmemiş bir seviyeye taşımıştır (Grossi ve ark., 2019). Değişen yağış rejimleri ve artan ortam sıcaklıkları, özellikle kurak ve yarı kurak bölgelerde suyun hem miktarını hem de kalitesini sınırlayıcı bir faktör haline getirmiştir (Tulu ve ark., 2024). Sıcaklık stresi altındaki hayvanlarda su tüketimi, termonötral koşullara kıyasla iki ila üç katına çıkabilmekte; bu durum hayvanların su kaynaklarındaki kirleticilere (yüksek tuzluluk, ağır metaller, patojenler) daha yüksek dozlarda maruz kalmasına neden olarak fizyolojik stresi şiddetlendirmektedir (Potopová ve ark., 2023).

Su kalitesindeki bozulmanın hayvansal üretim üzerindeki çok boyutlu etkileri, sektörün çözüm bekleyen öncelikli sorunları arasında yer almaktadır. Yetersiz su kalitesi; yem tüketimini baskılayarak büyüme geriliğine, bağışıklık sisteminin zayıflamasına ve buzağılarda mortalite (ölüm) oranlarının artmasına yol açmaktadır (Kamal ve ark., 2024). Fiziksel ve kimyasal parametrelerin (pH, TDS, sertlik) yanı sıra, doğal ve antropojenik faktörlerden kaynaklanan kirlilik (feka kaynaklı girdiler, ağır metaller, pestisitler), hayvan sağlığını doğrudan tehdit etmektedir (Akhtar ve ark., 2021; Zendeabad ve ark., 2022). Son yapılan çalışmalar, ağır metal maruziyetinin (arsenik, kurşun, kadmiyum vb.) sadece toksisiteye neden olmadığını, aynı zamanda üreme performansını düşürerek üreticiler için ciddi ekonomik kayıplar yarattığını ortaya koymaktadır (Massányi ve ark., 2020; Rehman ve ark., 2021; Sinha ve ark., 2022; Afzal ve Mahreen, 2024). Bu sorun, sadece hayvancılık sektörü ile sınırlı kalmayıp, halk sağlığı ve çevresel sürdürülebilirliği de ilgilendiren bir “Tek Sağlık (One Health)” problemidir. sağlık problemidir. Hayvancılık faaliyetlerinden kaynaklanan atık suların ve gübrenin yanlış yönetimi, su kaynaklarında ötrofikasyona ve patojen yükünün artmasına neden olurken; ağır metaller başta olmak üzere endüstriyel kirleticilerin besin zinciri boyunca biyobirikimi gıda güvenliğini ciddi biçimde riske atmaktadır (Olkowski, 2009; Cao ve ark., 2021).

Mevcut literatürde hayvan besleme çalışmaları genellikle rasyon formülasyonlarına odaklanmakta, su kalitesi ve yönetimi ise sıklıkla “unutulan besin maddesi” olarak geri planda kalmaktadır (Beede, 2012). Önceki çalışmalarda; sadece pestisitler (Rad ve ark., 2022), ağır metaller (Afzal ve Mahreen, 2024) veya bölgesel atık sular (Cao ve ark., 2021) gibi suyun tekil kirleticileri üzerine yoğunlaşmış olup; fizikokimyasal, toksikolojik ve mikrobiyolojik parametreleri sürdürülebilir yönetim stratejileriyle birlikte ele alan güncel ve bütüncül kaynakların sayısı sınırlıdır. Bu çalışmanın amacı; su kalitesini belirleyen parametreleri güncel araştırmalar ışığında irdeleyerek, kirliliğin hayvan sağlığı ve verimliliği üzerindeki toksikolojik mekanizmalarını ve işletme düzeyinde uygulanabilecek sürdürülebilir su yönetim stratejilerini ortaya koymaktır. Ayrıca hayvancılıkta su güvenliğinin sağlanmasına yönelik politikalara katkı sunması hedeflenmektedir.

1. SU KALİTESİNİ BELİRLEYEN FİZİKOKİMYASAL PARAMETRELER

Su kalitesi, toksikolojik risklerin ötesinde, hayvanların su tüketim isteğini (iştahını) ve gönüllü su alımını belirleyen en kritik faktördür. Suyun fiziksel (sıcaklık, tat, koku) ve kimyasal (pH, çözünmüş katılar) yapısındaki değişimler; su reddine, dehidrasyona, yem tüketiminde azalmaya ve dolaylı olarak verim kayıplarına neden olabilmektedir (Olkowski, 2009; Can ve Boğa, 2025).

1.1. Organoleptik Özellikler: Lezzet ve Koku

Suyun lezzeti (palatabilite); tat, koku, renk ve bulanıklık parametrelerinin bir bütünüdür. Hayvanlar, suyun organoleptik özelliklerine karşı türlere göre değişen hassasiyetler gösterirler. Kirlilik seviyesi toksik sınıra ulaşmasa bile, suyun tadındaki bozulma hayvanların su tüketimini reddetmesine neden olabilir. Örneğin, suda yüksek düzeyde Demir ($>0,3$ mg/L) ve Mangan ($>0,05$ mg/L) bulunması, suya metalik ve acı bir tat vererek hayvanların su alımını ciddi oranda kısıtlamaktadır (NRC, 2001; Can ve Boğa, 2025). Yetersiz su alımı ise süt veriminde ani düşüşlere ve yemden yararlanma oranında gerilemeye yol açabilir (Münster ve Kemper, 2024).

Su kalitesine tolerans konusunda türler arasında belirgin farklar mevcuttur. Atlar, suyun tadına ve kokusuna karşı diğer çiftlik hayvanlarına göre çok daha seçicidir. Kötü lezzete sahip suyu tüketmek yerine susuz kalmayı tercih etmeleri kolik riskini artırabilir (Olkowski, 2009). Buna karşılık sığırlar, orta düzeyde tuzlu veya sülfatlı sulara zamanla adapte olabilseler de ani kalite değişimleri (örneğin temiz sudan gölet suyuna geçiş) su tüketimini %20-30 oranında azaltabilir (Willms ve ark., 2002; Can ve Boğa, 2025).

1.2. Elektriksel İletkenlik (EC), Toplam Çözünmüş Katı Maddeler (TDS) ve Tuzluluk

İçme suyunun kalitesi, kaynağına ve çevre koşullarına bağlı olarak değişiklik gösterir. Bu değişimi izlemeye en pratik parametrelerden biri elektriksel iletkenlik (EC) değeridir. Çözünmüş minerallerin (kalsiyum, magnezyum, sodyum, klorür vb.) miktarı, su tuzluluğunun doğrudan bir ölçüsü olan EC ile pozitif korelasyon gösterir (Hersom ve Crawford, 2008; Iritz ve ark., 2025). Yüksek EC değerleri, suyun lezzetini azaltarak hayvanların gönüllü su alımını kısıtlar. Özellikle uzun süre TDS/EC seviyeleri yüksek suya maruz kalan sığırlar, dehidrasyon riskiyle karşı karşıya kalabilirler veya lezzet bozukluğu nedeniyle yem tüketimini (kuru madde alımını) azaltabilirler (Patra ve ark., 2024). Sığırların sağlığı ve verimliliği için, yüksek EC ve çözünmüş tuz içeriğine sahip su kaynaklarının belirlenmesi ve yönetilmesi kritik öneme sahiptir.

Toplam çözünmüş katı maddeler (TDS); suda çözünmüş inorganik tuzların (kalsiyum, magnezyum, sodyum, klorür, sülfat vb.) genel bir göstergesidir ve genellikle tuzluluk (salinite) ile ilişkilendirilir. Yeraltı sularının çözünmüş tuz içeriği; bölgenin jeolojik yapısı, yağış rejimi, vejetasyon örtüsü ve topoğrafik özelliklerine bağlı olarak değişkenlik gösterebilmektedir (Willms ve ark., 2002). Yüksek TDS seviyeleri, suyun ozmotik basıncını değiştirerek hayvanlarda laksatif etkiye (ishal) ve mineral dengesizliklerine yol açabilir (Patra ve ark., 2024; Can ve Boğa, 2025). Ayrıca sudaki yüksek TDS seviyeleri mineral dengesizliklerine ve metabolik bozulmalara yol açarak sindirim ve üreme fonksiyonlarını olumsuz etkileyebilir (Iritz ve ark., 2025).

Sığırlar için TDS seviyesi genellikle 1.000 mg/L'nin altında olmalıdır. Yüksek TDS seviyelerinin akut toksisitesi; sadece sindirim sistemi sorunlarıyla sınırlı kalmayıp, aşırı tükürük salgısı, ishal, kusma, körlük, nöbetler, ataksi ve yönelim bozukluğu gibi ciddi nörolojik semptomlarla kendini gösterebilmektedir (Valtorta ve ark., 2008; Iritz ve ark., 2025). Özellikle 3.000 mg/L üzerindeki TDS değerleri, laktasyondaki ineklerde ve gebeliğin son dönemindeki hayvanlarda su tüketimini baskılayarak performans kaybına neden olur. 7.000 mg/L üzerindeki sular ise tüm ruminantlar için tüketime uygun değil olarak sınıflandırılır ve kullanımdan menedilmelidir (Olkowski, 2009; Can ve Boğa, 2025).

Kanatlılar (broyler ve yumurtacı tavuklar), suyun tuzluluğuna karşı ruminantlardan çok daha hassastır. Tavuk çiftliklerinde, TDS değeri 1.000 mg/L'den düşük olan sular, sağlıklı su olarak kabul edilir. 3.000 mg/L

üzerindeki TDS seviyeleri, kanatlılarda şiddetli ishale neden olabilir. Ayrıca yüksek TDS; yem tüketiminin azalması, besin emiliminin bozulması ve dışkıdaki su oranının artmasına bağlı olarak altlık kalitesinin bozulması (ayak yanıkları, amonyak artışı) ile ilişkilendirilmiştir (Mohebbi ve ark., 2023).

1.3. pH Değeri ve Su Sertliği

Suyun pH değerinin optimal sınırların dışına çıkması hem hayvan fizyolojisinde hem de işletme altyapısında birbirini tetikleyen çok boyutlu riskler oluşturmaktadır. pH seviyesi; suyun tadı, korozyon potansiyeli ve dezenfeksiyon amacıyla uygulanan klorlama işleminin etkinliği üzerinde belirleyici bir parametredir (Münster ve Kemper, 2024; Kamal ve ark., 2024).

Çiftlik hayvanları için içme suyunda ideal pH aralığı 6,0–8,5 olarak bildirilmektedir (Hersom ve Crawford, 2008). Bu aralığın dışındaki sapmalar, gastrointestinal mikrobiyal dengeyi ve enzimatik süreçleri bozarak sindirim verimliliğini düşürmektedir. Özellikle pH'ın 8,5'in üzerine çıktığı alkali sularda gastrointestinal asit–baz dengesi belirgin şekilde zayıflamakta; buna bağlı olarak protein hidrolizi ve temel minerallerin emilimi kayda değer ölçüde azalmaktadır. Öte yandan pH'ın 5,5'in altına düştüğü asidik koşullar, metal su hatlarında korozyonu hızlandırarak demir, bakır ve kurşun gibi elementlerin suya geçişini artırmakta; bu durum hem altyapı bütünlüğünü zedelemekte hem de metabolik asidozis riskini yükselterek yem tüketimi ve metabolik performans üzerinde olumsuz etki yaratmaktadır (Olkowski, 2009; Can ve Boğa, 2025).

Suyun sertliği ise (kalsiyum ve magnezyum yoğunluğu), doğrudan bir toksisite riski oluşturmaktan ziyade teknik sorunlara yol açar. Yüksek su sertliği, nipel suluk sistemleri, filtreler ve diğer ekipmanlarda kireçlenmeye (kalsifikasyon) yol açabilir. Bu durum, sürü genelinde suya erişimi kısıtlayarak dehidrasyona ve üniformite kaybına yol açabilmektedir (Olkowski, 2009). Ayrıca, sert suyun dezenfektanların ve deterjanların temizleme gücünü azalttığı rapor edilmiştir (Abeliotis ve ark., 2015).

2. MİNERALLER, İYON DENGESİ VE ANTAGONİZMALAR

Suda bulunan mineraller, ruminant beslemede elektrolit dengesi, sinir iletimi, osmotik basınç regülasyonu ve enzimatik süreçlerin devamlılığı açısından kritik öneme sahiptir. Ancak bu elementlerin suya yüksek konsantrasyonlarda karışması veya iyonlar arası antagonistik etkileşimlerin ortaya çıkması, hayvanlarda ciddi metabolik bozukluklara, emilim sorunlarına ve toksik etkilere neden olabilmektedir. Özellikle nitrat, sülfat, flor, demir, mangan gibi parametrelerdeki artış hem rumen fonksiyonlarını hem de genel fizyolojik kapasiteyi olumsuz yönde etkileyerek performans, bağışıklık ve üreme veriminde kayıplara yol açmaktadır (Afzal ve Mahreen, 2024).

2.1. Nitrat (NO₃) ve Nitrit (NO₂) Zehirlenmesi

Nitrat ve nitrit, azotun oksitlenmiş inorganik formları olup sularda doğal olarak bulunur; ancak çoğu doğal akarsu sisteminde nitrat düzeyi genellikle 1 mg/L'nin altında seyrederek (Olkowski, 2009). Tarımsal gübre kullanımı ve organik atık yükünün artmasıyla bu bileşikler özellikle yeraltı ve yüzey sularında hızla birikebilmektedir. Hayvancılık için önerilen üst sınırlar 100 mg/L nitrat (22 mg/L nitrat-N) ve 10 mg/L nitrit (3 mg/L nitrit-N) olarak bildirilmiştir (NRC, 2001; Hersom ve Crawford, 2008).

Ruminantlarda nitrat tek başına düşük toksisite gösterirken, rumen mikroorganizmaları tarafından hızla nitrite indirgenmesi toksik etkilerin başlamasına yol açar. Rumen mikrobiyotasının yüksek redüksiyon kapasitesi, ruminantları monogastrik türlere göre nitrat-nitrit toksisitesine daha duyarlı hale getirir. Kana geçen nitrit, hemoglobini methemoglobine oksitleyerek oksijen taşıma kapasitesini düşürür ve sonuçta hipoksi ile methemoglobinemi gelişebilir (Wright, 2007; Meyer ve Casey, 2012). Ayrıca kronik düşük doz maruziyetinin A vitamini metabolizmasını bozduğu, tiroit fonksiyonlarını etkilediği ve verim kaybına neden olabildiği bildirilmektedir (Kamal ve ark., 2024).

2.2. Fosfor (PO_4^{3-}) Yükü ve Ötrofikasyon Kaynaklı Riskler

Fosfor, sulara çoğunlukla fosfat (PO_4^{3-}) formunda bulunur ve ruminantlar için doğrudan akut toksisite oluşturmaz. Ancak yüzey ve yeraltı sularındaki fosfor yükünün artması, özellikle tarımsal drenaj ve hayvansal atık kaynaklı girdilerle hızlanan ötrofikasyon süreçlerini tetikler. Ötrofikasyon, alg ve siyanobakteri çoğalmasını artırarak suyun tat ve koku özelliklerini bozar, çözünmüş oksijen seviyelerini düşürür ve toksik alg metabolitlerinin birikimine zemin hazırlar (Cesoniene ve ark., 2019; Zahoor ve Mushtaq, 2023). Bu durum, hayvanlarda su tüketiminin azalmasına, performans kayıplarına ve bazı siyanotoksinlerin maruziyeti durumunda nörolojik veya hepatotoksik tablolara yol açabilmektedir (Olkowski, 2009). Dolayısıyla fosfor yükü, ruminantlar ve kümes hayvanları için doğrudan bir mineral toksisitesinden ziyade, ekosistem üzerinden işleyen ikincil bir risk faktörü olarak değerlendirilmelidir.

2.3. Sülfat, Kükürt ve Kümülatif Toksisite

Sülfat (SO_4^{2-}), hayvancılık için kullanılan içme suyunda en yaygın olarak bulunan kükürt formudur. Ancak derin kuyu suları gibi oksijensiz (anaerobik) ve yüksek indirgeme potansiyeline sahip ortamlarda sülfat, çok daha toksik ve kötü kokulu bir form olan sülfüre (H_2S veya S^{2-}) indirgenebilir (Olkowski, 2009). Sülfat konsantrasyonları, jeolojik yapıya bağlı olarak doğal sulara yüksek seyredildiği gibi, özellikle sıcak mevsimlerde buharlaşmanın artmasıyla durgun su kaynaklarında (göletler) tehlikeli boyutlara ulaşabilir. Sülfat için güvenli üst sınır 1.000 mg/L olarak kabul edilir. Sülfat iyonunun kütlece yaklaşık %33,3'ünü saf kükürt oluşturur. Bu, 1.000 mg/L sülfat içeren bir suyu tüketen hayvanın, litre başına yaklaşık 333 mg diyet kükürdü alacağı anlamına gelir. Bu nedenle sülfat toksisitesi değerlendirilirken sadece su değil, diyetle alınan toplam kükürt yükü hesaplanmalıdır (NRC, 2001; Can ve Boğa, 2025). Sülfat biriktirme eğilimindeki bitkilerin veya kükürtçe zengin yan ürünlerin tüketimi, yüksek sülfat içerikli suyla birleştiğinde kümülatif alımı artırır. Bu durum; yemden yararlanma oranında düşüşe, canlı ağırlık artışında düşüşe ve üreme veriminde azalmaya neden olabilmektedir (Kamal ve ark., 2024).

Aşırı sülfat alımı, rumende sülfatın önce sülfidlere, ardından hidrojen sülfür (H_2S) gazına indirgenme hızını artırır. Oluşan H_2S , rumen epitelinden emildikten veya rumen gaz fazı ile birlikte solunduktan sonra sistemik dolaşıma geçerek tiamin (B1 vitamini) metabolizmasını bozar. Tiamin yetersizliğine bağlı olarak sinir dokusunda enerji üretimi aksar ve bunun sonucunda nekrotik beyin hasarıyla karakterize Polioensefalomalazi (PEM) gelişebilir (Olkowski, 2009).

PEM'in klinik tablosu çoğunlukla belirgin nörolojik bozukluklarla seyreder. Körlük, ataksi, çevresel uyaranlara karşı yönelim bozukluğu, duvar veya sabit yüzeylere baş dayama davranışı, durgunluk ve koordinasyon kaybı en sık gözlenen semptomlardır. Olgular ilerledikçe kas seyirmeleri ve nöbet benzeri sinirsel tepkiler de ortaya çıkabilir (Olkowski, 2009; Beede, 2012).

2.4. Demir ve Mangan: Toksisite ve Su Kaynaklı Etkiler

Metaller genel olarak yüksek toksik, düşük toksik, esansiyel ve esansiyel olmayan gruplara ayrılır. Demir, bakır, çinko, mangan gibi esansiyel metaller, hormon sentezi, oksijen ve elektron taşınımı, doğurganlık, antioksidan savunma ve çiftlik hayvanlarında bağışıklık gibi çeşitli fizyolojik fonksiyonları düzenlemek için eser miktarlarda gereklidir (Afzal ve Mahreen, 2024). Çinko ve bakır gibi metaller, bağışıklık fonksiyonu, büyüme ve metabolizmada önemli roller oynadıkları için hayvan yemlerine eklenir. Bu metaller ayrıca protein sentezi ve enerji metabolizmasında rol oynayan birçok enzimin kofaktörleri olarak görev yaparak hayvanlarda verimli besin kullanımı ve büyümeyi destekler (Hill ve Shannon, 2019).

Demir ve mangan ise hemoglobin oluşumu, oksijen taşınımı ve oksidatif stres kontrolünde görev alan enzim sistemleri için vazgeçilmezdir. Ancak, bu elementlerin fizyolojik sınırların ötesinde alınması toksisite riskini önemli ölçüde artırmaktadır (Olkowski, 2009). İçme suyundaki demir, mangan, bakır gibi minerallerin

toksikolojik etkisi, su ve yemden gelen toplam diyet yükünün birlikte değerlendirilmesini gerektirir. Yalnızca sudaki konsantrasyona dayanarak risk değerlendirmesi yapmak çoğu durumda yetersizdir. Özellikle yüksek verimli hayvanlarda (ör. süt sığırları), bu metallerin yeterli düzeyde alımı dokulara optimal oksijen tedariki ve metabolik stabilite için kritik öneme sahiptir (Afzal ve Mahreen, 2024).

Sudaki 0,3 mg/L üzerindeki demir ve 0,05 mg/L üzerindeki mangan konsantrasyonları, belirgin metalik tat ve koku oluşturarak sığırlarda su tüketimini azaltabilir. Bu durum dolaylı olarak kuru madde alımının ve performansın düşmesine yol açabilir (Mohebbi ve ark., 2023; Tulu ve ark., 2024). Yüksek demir seviyeleri ayrıca suya kırmızı-kahverengi görünüm verir ve özellikle feröz (Fe^{2+}) formun yüksek çözünürlüğü nedeniyle boru hatlarında biyofilm oluşumunu hızlandırır. Bu biyofilm, koliformlar dahil patojen mikroorganizmalar için rezervuar işlevi görerek mikrobiyal riskleri artırabilir (Fida ve ark., 2022; Münster ve Kemper, 2024). Suda çözünmüş feröz demir (Fe^{2+}) yüksek biyoyararlanıma sahip olup, ferrik formdan (Fe^{3+}) çok daha hızlı emilir (Olkowski, 2009; Genther ve Beede, 2013). Aşırı demir alımı oksidatif stres artışıyla birlikte bakır ve çinko emilimini kompetitif olarak inhibe eder. Bu durum bağışıklık baskılanması, enfeksiyonlara duyarlılığın artması ve büyüme performansının düşmesiyle sonuçlanabilir (Meyer ve Casey, 2012; Afzal ve Mahreen, 2024). Yüksek mangan konsantrasyonları ise boru tıkanıklıkları ve kireçlenmeye yol açarak su akışını kısıtlayabilir (Olkowski, 2009).

2.5. Bakır: Biyoyararlanım, Antagonizmalar ve Klinik Bulgular

Bakır esansiyel bir element olsa da terapötik ve toksik dozlar arasındaki aralık dardır. Sığırlar genellikle içme suyunda 5 mg/L'ye kadar bakıra tolerans gösterebilse de uzun dönem yüksek maruziyet karaciğer yükünü artırarak hepatik hasar ve verim kaybına neden olabilir. Ruminantlarda bakır eksikliği, özellikle sülfür ve molibdenin birlikte yüksek alımıyla rumende oluşan çözünmeyen bakır, sülfür, molibden kompleksleri nedeniyle ortaya çıkar. Bu kompleksler bakırın emilebilir fraksiyonunu belirgin biçimde azaltarak hayvanın bakır gereksinimini yükseltir ve klinik eksiklik riskini artırabilir (NRC, 2001; Lopez-Alonso ve ark., 2017).

Sülfür düzeyi yüksek içme suları ise bu antagonizmayı güçlendirerek birkaç hafta içinde eksikliğin belirginleşmesine yol açabilir. En ayırt edici bulgular arasında tüy renginde belirgin solma (kırmızı tüylerde sararma; siyah tüylerde kahverengimsi-grimsi görünüm), tüy kalitesinde bozulma ve performans düşüşü yer alır. Sorun tanımlandığında uygun bakır takviyesi yapılması hem tüy örtüsünün görünümünde hem de büyüme ve kondisyon skorunda kısa sürede iyileşme sağlar. Buna karşılık koyunlar bakır toksisitesine yüksek düzeyde duyarlıdır. Sudaki 0,5 mg/L üzerindeki bakır dahi akut hemolitik kriz, sarılık ve hemoglobüriye yol açabilir (Olkowski, 2009; Hill ve Shannon, 2019). Bu nedenle sığır ve koyunların ortak su kaynağı kullandığı işletmelerde bakır seviyesi mutlaka koyun duyarlılığına göre sınırlandırılmalı; ayrıca demir, bakır ve çinko arasındaki antagonistik mineral etkileşimleri göz önünde bulundurularak düzenli su analizi yapılmalıdır (Trouillard ve ark., 2021; Afzal ve Mahreen, 2024).

3. AĞIR METALLER VE ÇEVRESEL TOKSİKOLOJİ

Ağır metaller, biyolojik olarak parçalanamayan yapıları nedeniyle çevrede uzun süre kalıcı olan ve besin zinciri boyunca yüksek biyobirikim riski taşıyan inorganik kirleticilerdir. Su kaynaklarındaki ağır metal yükü; jeolojik kaynaklı çözünmelerin yanı sıra madencilik, endüstriyel deşarjlar ve özellikle fosfatlı gübre kullanımı gibi antropojenik faaliyetler sonucu artış göstermektedir. Kurşun, kadmiyum, arsenik ve cıva gibi temel toksik metaller, kümülatif etkileriyle bağışıklık sistemini baskılayarak enfeksiyona duyarlılığı artırmakta ve aşılara verilen antikor yanıtını zayıflatmaktadır (Genther ve Beede, 2013; Selvi ve ark., 2021; Gupta ve ark., 2021).

3.1. Kurşun (Pb)

Kurşun, hayvancılıkta en sık karşılaşılan ağır metal toksinlerinden biri olup, merkezi sinir sistemi üzerinde kalıcı hasar oluşturan güçlü bir nörotoksiktir (Finnie ve ark., 2011; Slivinska ve ark., 2020). Kurşunun başlıca

antropojenik kaynakları arasında kontamine yem ve su, fosil yakıtların yanması, boya ve metal endüstrileri ile kömür yakımı bulunmaktadır. Ayrıca karayollarına yakın meralar, trafik emisyonları nedeniyle önemli düzeyde Pb birikimi gösterebilir. İçme suyunda izin verilen maksimum kurşun düzeyi 0,1 mg/L'dir (Olkowski, 2009; Zyambo ve ark., 2022).

Vücuda alındıktan sonra kanda taşınan kurşun, kalsiyumu taklit eden kimyasal davranışı nedeniyle uzun dönemde kemik dokuda depolanır (Siddiqui ve Rajurkar, 2008). Aynı zamanda reproduktif sistemi baskılayarak fertilitiyi olumsuz etkilediği bildirilmektedir (Okerefor ve ark., 2020). Klinik tablo özellikle genç hayvanlarda daha ağır seyretmekte olup; körlük, kas tremorları, diş gıcırdatma ve dairesel dönme gibi belirgin nörolojik bulgular öne çıkabilir. Kurşunun plasental bariyeri geçebilmesi, abortus ve ölü doğum gibi ciddi perinatal kayıplara da yol açabilmektedir (Constable ve ark., 2016). Kurşun emilimi mineral antagonizmasından önemli ölçüde etkilenir. Diyetteki yüksek kalsiyum ve fosfor seviyeleri, kurşunun intestinal absorpsiyonunu azaltarak toksisite riskini düşürürken; düşük demir alımı gastrointestinal kurşun emilimini anlamlı ölçüde artırmaktadır. Bu nedenle özellikle genç hayvanlarda kalsiyum, fosfor ve demir dengesinin sağlanması kurşun toksisitesine karşı koruyucu bir strateji olarak değerlendirilmektedir (Olkowski, 2009).

3.2. Kadmiyum (Cd)

Kadmiyum kirliliğinin başlıca kaynağı, kadmiyum içerikli fosfatlı gübrelerin ve arıtma çamurlarının kontrolsüz biçimde tarım arazilerine uygulanmasıdır (Rahimzadeh ve ark., 2017). Toprak ve sudan bitkiler tarafından kolaylıkla alınan kadmiyum, özellikle yaprak dokusunda birikerek otlayan hayvanlar için önemli bir maruziyet yolu oluşturur (Madejon ve ark., 2009). Hayvan içme sularında izin verilen üst sınır 0,08 mg/L gibi oldukça düşük bir düzeydir (Olkowski, 2009; Giri ve ark., 2020).

Vücutta uzun yarılanma ömrüne sahip kadmiyum, özellikle böbreklerde metallerin birikmesiyle birikerek kümlatif birikim gösterebilir (Constable ve ark., 2016). Kadmiyumun yalnızca nefrotoksik değil, aynı zamanda belirgin bir endokrin bozucu etkiye sahip olduğu; folikül gelişimini baskıladığı, oosit kalitesini düşürdüğü ve sperm motilitesini azaltarak sürü düzeyinde döl verimi kayıplarına yol açtığı bildirilmektedir (Dutta ve ark., 2022; Afzal ve Mahreen, 2024).

3.3. Arsenik (As)

Arsenik, yeraltı sularında ve metalik cevher yataklarında doğal olarak bulunan, yüksek toksisiteye ve karsinojenik potansiyele sahip bir elementtir. Hayvan içme suları için önerilen güvenli üst sınır 0,025 mg/L olup, bu değerin üzerindeki seviyeler uzun süreli maruziyette risk taşımaktadır (NRC, 2001; Olkowski, 2009).

Arsenik toksisitesi, hücresel solunumu inhibe etmesi ve oksidatif fosforilasyon sürecindeki kritik enzimleri devre dışı bırakmasıyla ilişkilidir. Akut maruziyet durumunda şiddetli abdominal ağrı, ataksi, kanlı ishal ve ani ölümler görülebilir. Ayrıca kronik arsenik maruziyeti iştahsızlık, kilo kaybı, dermatolojik lezyonlar ve süt veriminde açıklanamayan düşüşlerle karakterizedir (Gupta ve ark., 2021; Fida ve ark., 2022).

3.4. Cıva (Hg)

Cıva; doğal olarak elementel, inorganik ve organik formlarda bulunan ve çiftlik hayvanları için en yüksek toksisiteye sahip metallerden biridir. Kömür yakımı, yoğun tarımsal faaliyetler ve endüstriyel atıklar (elektronik piller, vinil klorür vb.) su kaynaklarındaki cıva kirliliğinin başlıca antropojenik nedenleridir (Akhtar ve ark., 2021; Fida ve ark., 2022).

Özellikle organik formdaki metil cıva, sucul ekosistemlerde ve besin zincirinde yüksek biyobirikim potansiyeli göstermektedir. Bu bileşikler hayvanların karaciğer, böbrek, et ve yumurta gibi dokularında birikerek, bu

ürünlerin tüketilmesi yoluyla halk sağlığı açısından ciddi risk oluşturur. Evcil hayvanlarda zehirlenme nispeten nadir olsa da endüstriyel bölgelerde sığırların kontamine sulara kazaen maruz kaldığı vakalar bildirilmiştir (Barregard ve ark., 2022; de Los Santos ve ark., 2023).

Toksikolojik etki mekanizması cıvanın formuna göre değişir; organik cıva düşük konsantrasyonlarda bile kan-beyin bariyerini aşarak nörotoksik etki gösterirken, inorganik cıva gastrointestinal mukozada nekroz, kolik ve şiddetli diyareye neden olur. Sığırlarda akut zehirlenme tablosu; ani davranış değişiklikleri, körlük, konvülsiyonlar ve ölümle seyreder (Ceccatelli ve ark., 2010; Afzal ve Mahreen, 2024).

Cıvanın vücuttan eliminasyonu (dışkı, idrar ve süt yoluyla) oldukça yavaştır. Tanı açısından böbrekler kritik organlardır. Doku konsantrasyonunun 5 ppm üzerinde olması klinik olarak toksik kabul edilmektedir. Bu nedenle zehirlenmiş hayvanların süt ve etleri insan tüketimi için güvenli değildir (de Los Santos ve ark., 2023).

4. BİYOLOJİK RİSKLER: PATOJENLER VE BİYOFİLMLER

Su kaynaklarının mikrobiyolojik kalitesi, hayvan sağlığı açısından en akut risk grubunu oluşturmaktadır. Bu riskler, hayvansal atıkların (gübre) su kaynaklarına karışması ve patojenlerin su dağıtım sistemlerinde biyofilm oluşturarak direnç kazanmasıyla doğrudan ilişkilidir (Münster ve Kemper, 2024; Kamal ve ark., 2024).

4.1. Hayvansal Atıklar ve Organik Yük

Hayvancılık işletmelerinde gübre yönetimi ve barınakların yıkanmasına bağlı olarak oluşan atık sular; nitrat, fosfor ve organik madde bakımından doğal su kaynaklarına önemli bir yük getirir. Farklı çiftlik tiplerinde (sığır, domuz, kanatlı) yapılan çalışmalar, bu atıkların çevresel su kalite indekslerini belirgin şekilde düşürdüğünü göstermektedir (Cao ve ark., 2021).

Gübrenin suya karışması yalnızca mikrobiyolojik kaliteyi değil, suyun organoleptik özelliklerini de bozabilir. Sığırlar su kirliliğine karşı hassas olmasına rağmen, bazı araştırmalar su kalitesindeki bozulmaların performans ve su tüketimi üzerindeki etkisinin sınırlı olabileceğini bildirmektedir (Willms ve ark., 2002; Olkowski, 2009). Bununla birlikte gübre kaynaklı organik madde, bakteriler ve mantarlar için zengin bir besi ortamı oluşturarak patojen yükünü belirgin biçimde artırır (LeJeune ve ark., 2001; Kamal ve ark., 2024).

4.2. Bakteriye Patojenler ve Biyofimler

Yüzey suları ve işletme içi dağıtım sistemlerinde en yaygın patojenler; fekal kontaminasyon göstergesi koliformlar (*E. coli*), *Salmonella* spp., *Campylobacter jejuni* ve *Pseudomonas* türleridir (Tulu ve ark., 2024). Su dağıtım hatlarında yetersiz klorlama, düşük akış hızı ve düzensiz bakım; bakterilerin boru çeperlerine tutunarak biyofilm oluşturmaya zemin hazırlar (Singh ve ark., 2022; Münster ve Kemper, 2024). Oluşan biyofilm, patojenleri dezenfektanlara ve çevresel streslere karşı koruyarak kontaminasyonun kronik hâle gelmesine neden olur. Bu mekanizma, işletmelerde kaynağı açıklanamayan ve tekrarlayan enfeksiyonların başlıca sebepleri arasında yer alır (LeJeune ve ark., 2001; Brew ve ark., 2009).

Kontamine su, özellikle bağışıklık sistemi olgunlaşmamış buzağılarda yüksek morbidite ve mortaliteyle seyreden ishal vakalarının temel etkenidir (Kamal ve ark., 2024). Ayrıca *Leptospira* türleri su aracılığıyla bulaşarak sığırlarda infertilite, geç dönem abortus ve ani süt verimi düşüşleri gibi önemli üretim kayıplarına yol açmaktadır (Pfof ve ark., 2001; Wright, 2007).

4.3. Parazitler ve Toksik Algler (Siyanobakteriler)

Bakteriyel kontaminasyonun yanı sıra protozoan parazitler ve siyanobakteriler, hayvanların içme suyu güvenliği açısından kritik tehditler oluşturur. *Cryptosporidium* oosistleri ve *Giardia* kistleri klorlamaya dirençlidir ve suda haftalarca canlı kalabilir (Hooda ve ark., 2000). Bu parazitler özellikle buzağı ve kuzularda

ağır, çoğu zaman ölümcül seyreden akut ishal tablolarının başlıca etkenleridir (Olson ve ark., 1997; LeJeune ve ark., 2001).

Siyanobakteriler ise daha akut ve yüksek etkili bir risk sınıfını temsil eder. Sıcak, durağan ve azot-fosfor yükü yüksek sularda gelişen *Anabaena*, *Microcystis* ve *Nodularia* türleri; hepatotoksin, nörotoksin ve sitotoksin içeren güçlü biyotoksinler üretir. Bu toksinler kas titremeleri, ataksi, fotosensitivite, sarılık ve ani ölümlerle karakterize zehirlenmelere yol açarak hayvansal üretim sistemleri için ciddi bir tehdit oluşturur (Hooda ve ark., 2000; Olkowski, 2009).

5. PESTİSİTLER, FARMASÖTİKLER VE ANTİBİYOTİK DİRENCİ

Yaygın kirleticilerin (ağır metaller, vb.) yanı sıra, modern tarım ve hayvancılık uygulamaları, su kaynaklarında yeni bir risk grubunu ortaya çıkarmaktadır. “Yükselen kirleticiler” olarak adlandırılan bu grup; pestisitleri, gübreleri, hayvan atıklarını ve ilaç kalıntılarını kapsamaktadır. Bu kirleticiler, standart arıtma prosesleriyle uzaklaştırılmadığı için düşük konsantrasyonlarda dahi kronik toksisite ve ekosistem bozulmalarına yol açabilmektedir (Akhtar ve ark., 2021).

5.1. Tarımsal Pestisitler

Tarımsal verimliliği artırmak amacıyla kullanılan pestisitlerin (herbisit, insektisit, fungusit vb.) önemli bir bölümü hedef organizmaya ulaşmadan yüzey akışı ve infiltrasyon yoluyla su kaynaklarına taşınır. Bu bileşikler suda kalıcı hale gelerek sucul ekosistemleri ve bu kaynaklardan su tüketen çiftlik hayvanlarını dolaylı biçimde etkiler (Rad ve ark., 2022). Özellikle yoğun tarım yapılan havzalardaki yüzey sularını tüketen çiftlik hayvanlarında görülme olasılığı yüksek olan pestisit maruziyeti, çoğu zaman akut toksisiteden ziyade, endokrin bozucu özellikleri nedeniyle uzun vadeli fizyolojik bozukluklara yol açabilir. Atrazin ve organofosfatlar gibi birçok pestisit, östrojenik veya androjenik etki göstererek hormon reseptörlerini taklit eder. Bunun sonucunda infertilite, düzensiz östrus döngüleri ve gelişim gerilikleri ortaya çıkabilir (Afzal ve Mahreen, 2024).

Pestisitlerin immün sistemi baskılayıcı etkileri de dikkat çekicidir. Lenfosit fonksiyonlarındaki bozulma, aşılama verilen yanıtı zayıflatarak hayvanları enfeksiyonlara daha duyarlı hale getirir. Ayrıca organoklorlu pestisitler gibi lipofilik bileşikler, yağ dokuda birikerek uzun süre vücutta kalır. Bu birikim laktasyon döneminde mobilize olup süte geçebilir ve hem buzağı sağlığını hem de insan tüketimine yönelik gıda güvenliğini riske atar (Akhtar ve ark., 2021; Fida ve ark., 2022).

5.2. Farmasötikler ve Antimikrobiyal Direnç (AMR)

Farmasötik kalıntıların su kaynaklarında giderek artan varlığı, küresel ölçekte önemli bir çevresel risk olarak değerlendirilmektedir. Tıptaki gelişmelerle birlikte farmasötik üretim ve tüketimin hızla yükselmesi, bu maddelerin çevreye taşınmasını kaçınılmaz hâle getirmiştir (Kotwani ve ark., 2022). Veteriner hekimlikte kullanılan antibiyotiklerin büyük bölümü hayvanlar tarafından metabolize edilmeden idrar ve dışkı yoluyla dışarı atılır. Büyük ölçekli işletmelerde atık yönetiminin yetersizliği ve antibiyotik kalıntıları içeren gübrenin tarım arazilerinde kullanılması, bu bileşiklerin yağış ve yüzey akışıyla yeraltı ve yüzey sularına taşınmasına neden olmaktadır (Chen ve ark., 2021).

Düşük konsantrasyonlarda sürekli antibiyotik maruziyeti, sucul mikroorganizmalarda direnç genlerinin seçilimini hızlandırır (Fida ve ark., 2022). Bu suyu tüketen çiftlik hayvanlarında mastitis, metritis ve enterit gibi tedaviye zor yanıt veren enfeksiyonların ortaya çıkması, antimikrobiyal direnci “tek sağlık” bağlamında kritik bir sorun hâline getirmektedir. Ayrıca içme suyu dağıtım hatlarında gelişen biyofilmler, dirençli bakteriler için kalıcı bir rezervuar oluşturarak enfeksiyon döngüsünün kırılmasını güçleştirebilir (LeJeune ve ark., 2001; Zahoor ve Mushtaq, 2023).

6. SÜRDÜRÜLEBİLİR SU YÖNETİMİ VE İYİLEŞTİRME STRATEJİLERİ

Hayvancılık işletmelerinde su kalitesinin korunması; su ve çevre bilimi, ileri teknoloji uygulamaları, ekonomik araçlar ve politika bileşenlerini entegre eden çok katmanlı bir yönetim modeli gerektirir (Zahoor ve Mushtaq, 2023). Sürdürülebilir su yönetimi; izleme, arıtma, geri kazanım ve yasal uyum süreçlerini birleştirerek, su kullanımını optimize etmeyi ve artan iklim baskılarına karşı sektörün dayanıklılığını artırmayı amaçlamaktadır. Etkin yönetim stratejilerinin, hayvancılık kaynaklı su ayak izini %20–40 oranında azaltabildiği öngörülmektedir (Weerasooriya ve ark., 2021). Nitekim sıkı izleme protokollerinin uygulandığı kurak (dryland) bölgelerde, su kaynaklı hastalık insidansının belirgin şekilde azaldığı rapor edilmiştir (Meyer ve Casey, 2012; Tulu ve ark., 2024).

6.1. Bütünleşik Su Kalitesi Yönetimi

Modern hayvancılık sistemlerinde su, farmasötik uygulamalar ve yem yönetimi kadar stratejik bir girdidir. Bu nedenle su kalitesinin temel fizikokimyasal (pH, TDS, nitrat) ve mikrobiyolojik (toplam koliform, *E. coli*) parametreler açısından düzenli olarak analiz edilmesi zorunludur (Kamal ve ark., 2024; Patra ve ark., 2024). Su hatlarının ve sulukların periyodik temizliği, biyofilm oluşumu ve patojen rezervuarlarının gelişimini engelleyen kritik bir hijyen protokolüdür (Münster ve Kemper, 2024). Geleneksel statik su kalitesi limitlerinin günümüz koşullarında yetersiz kaldığı; değerlendirmelerin hayvanın yaşı, fizyolojik dönemi, sıcaklık stresi ve kontaminantların toksikodinamik özellikleri gibi değişkenleri içerecek şekilde dinamik hale getirilmesi gerektiği vurgulanmaktadır (Meyer ve Casey, 2012).

Su tüketiminin izlenmesi, modern sürü yönetiminde erken uyarı mekanizması olarak kritik bir rol oynar. Zira tüketimdeki ani azalmalar çoğu zaman klinik hastalığın en erken belirtileri arasında yer almaktadır. Bu nedenle gerçek zamanlı sensörler ve izleme platformları, güncel hayvancılık işletmelerinde su hijyeni ve kaynak yönetiminin ayrılmaz bir bileşeni haline gelmiştir. Bu bütünsel yaklaşım hem sağlık risklerini azaltmakta hem de üretim verimliliğini optimize ederek işletme sürdürülebilirliğini güçlendirmektedir (Olkowski, 2009; Can ve Boğa, 2025).

6.2. Tarımsal Üretimde Suyun Etkin Kullanımı ve Sürdürülebilirliği

Tarım sektörü, dünya genelinde tatlı su kaynaklarının en büyük kullanıcısı olup toplam tüketimin yaklaşık %70'ini oluşturmaktadır. Bu yüksek pay, yem üretimi ve hayvancılık sistemlerinde su kullanımının daha etkin ve sürdürülebilir biçimde yönetilmesini zorunlu hale getirmektedir (Rojas-Downing ve ark., 2017; Mallareddy ve ark., 2023). Bu kapsamda, özellikle kuraklığa dayanıklı yem bitkisi çeşitlerinin tercih edilmesi ve vahşi sulama yerine basınçlı sulama sistemlerinin (damla veya yağmurlama) yaygınlaştırılması su tasarrufu için kritik öneme sahiptir. Ayrıca, toprak nemini muhafaza eden koruyucu toprak işleme teknikleri ve yağmur suyu hasadı gibi uygulamalar, tarımsal üretimin su kısıtına karşı direncini artırmada etkili stratejiler arasında yer almaktadır.

6.2.1. Akıllı Sulama ve Teknolojik Çözümler

Toprak nem sensörleri, kablosuz iletişim altyapıları ve yapay zekâ tabanlı akıllı sulama (IoT) sistemleri, yem bitkisi üretiminde su kullanım verimliliğini (WUE) artırmaktadır (Mallareddy ve ark., 2023). Bu teknolojiler, bitkinin su stresini gerçek zamanlı izleyerek sulama zamanlamasını optimize etmekte, böylece aşırı sulamadan kaynaklanan derin sızma kayıplarını ve enerji maliyetlerini minimize etmektedir. Ancak küçük ölçekli işletmelerde yatırım maliyetleri önemli bir bariyer oluşturmaktadır (Pacheco ve Pissarra, 2025).

6.2.2. İleri Arıtma Teknolojileri ve Su Geri Kazanımı

Su kaynaklarının kısıtlılığı, arıtılmış atık suların yeniden kullanımını (water reuse) ve dairesel su ekonomisi modeline geçişi zorunlu kılmaktadır. Bu bağlamda, yüksek tuzluluk, sülfat ve ağır metal yükü taşıyan suların

geri kazanımında nano-filtrasyon (NF) ve ters ozmos (RO) membran teknolojileri en etkin seçeneklerdir. Bu ileri arıtma teknikleri, kirleticileri %90'ın üzerinde gidererek suyun tarımsal sulamada veya temizlikte yeniden kullanımını mümkün kılmaktadır (Chen ve ark., 2021). Buna karşılık sedimentasyon ve biyofiltrasyon sistemleri, askıda katı madde konsantrasyonlarını düşüren daha düşük maliyetli ön arıtım alternatifleri olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır (Weerasooriya ve ark., 2021). Mikrobiyolojik kontrol açısından ise; kimyasal kalıntı bırakmayan UV ve ozonlama teknolojilerinin yanı sıra, klorlama halen en yaygın ve maliyet-etkin dezenfeksiyon yöntemi olarak uygulanmaktadır.

6.2.3. Hayvan Sulama Sistemleri: Hijyen, Tasarım ve Sıcaklık Yönetimi

Hayvansal üretimde otomatik suluk sistemleri, hayvanların su ihtiyacını karşılamada kritik bir role sahiptir. Ancak bu sistemlerdeki düşük akış hızı susuzluğa, strese ve davranış bozukluklarına yol açabilirken; çok yüksek akış hızları da su alımını fiziksel olarak engelleyebilmektedir. Su hatlarında oluşan ve patojenler için korunaklı bir ortam sağlayan biyofilm tabakalarının temizlenmesi amacıyla uygulanan düzenli hat temizliği (flushing) işlemleri, özellikle uzun süreli uygulandığında ve kimyasal temizleyicilerle desteklendiğinde su hijyenini sağlamada oldukça etkilidir (El Sabry ve ark., 2024). Metal yalakların, beton veya plastik malzemeden yapılan yalaklara kıyasla daha düşük toplam koliform sayısına sahip olduğu ve temizliğinin daha etkin yapılabildiği gözlemlenmiştir (LeJeune ve ark., 2001). Bu uygulamalar, Avrupa Birliği İçme Suyu Direktifi (98/83/EC) standartlarına uyumu önemli ölçüde kolaylaştırmaktadır.

Su sıcaklığı yönetimi de hayvan performansı üzerinde doğrudan etkilidir. Özellikle ekstrem iklim koşullarında su tüketimini (TWI) etkileyen kritik bir faktördür. Yaz aylarında hayvanlara soğutulmuş su sağlanması, süt verimini ve kuru madde alımını belirgin şekilde artırabilir. Kış aylarında ise özellikle genç buzağılara ılık su sunulması, hem soğuk stresle mücadele etmelerine yardımcı olur hem de katı yem (başlangıç yemi) tüketimini teşvik ederek büyümeyi hızlandırabilir (Münster ve Kemper, 2024). Bu yönetsel faktörlerin doğru uygulanması, hayvan refahını ve bağışıklık sistemini güçlendirerek hastalıklara bağlı kayıpları azaltır ve işletme düzeyinde verimliliği optimize eder.

6.2.4. Su Tasarrufu ve Alternatif Su Kaynakları

Damla sulama sistemleri, suyun bitki kök bölgesine kontrollü iletimini sağlayarak sızma ve yüzey akış kaynaklı kayıpları önemli ölçüde azaltırken; yağmur suyu hasadı (RWH) uygulamaları ise özellikle kurak dönemlerde yeraltı suyu rezervleri üzerindeki baskıyı hafifletmek için etkili bir strateji sunmaktadır (Chen ve ark., 2021). Çek Cumhuriyeti örneğinde yapılan modellemeler, modern sulama ve geri kazanım teknolojilerinin entegrasyonu ile hayvancılık sektörünün su kullanımında önemli oranda optimizasyon sağlanabildiğini göstermiştir (Potopová ve ark., 2023).

6.2.5. Su Ayak İzinin Azaltılması

Su Ayak İzi (Water Footprint - WFP), tarımsal ve endüstriyel süreçlerin gri, mavi ve yeşil su bileşenlerini değerlendirmek için temel bir gösterge olup; su kullanımını sürdürülebilirlik, adalet ve verimlilik açısından stratejik olarak analiz etmeye olanak tanır. Hayvancılıkta “Yeşil Su” (yem bitkileri için kullanılan yağmur suyu) ve “Mavi Su” (yüzey/yeraltı suyu tüketimi) kadar, “Gri Su Ayak İzi” yönetimi de hayati önem taşımaktadır (Weerasooriya ve ark., 2021).

Gri su ayak izi, suya karışan kirletici yükünü (örneğin azot, fosfor) çevre standartlarına indirmek (seyreltmek) için gereken tatlı su miktarını ifade eder. Hayvansal atıkların ve gübrelerin içerdiği besin maddeleri (N ve P) ile farmasötik kalıntıların (antibiyotikler) etkin yönetimi ve arıtılması; bu kirleticilerin konsantrasyonunu düşürerek seyreltme ihtiyacını azaltır. Sonuç olarak bu strateji, işletmelerin gri su ayak izini doğrudan düşürmekte ve tatlı su ekosistemlerinin korunmasına katkı sağlamaktadır (Cao ve ark., 2021).

6.3. Politika, Yönetişim ve Ekonomik Araçlar

Teknoloji temelli çözümler kadar, su yönetiminin kurumsal ve politik boyutları da sürdürülebilir hayvancılık için belirleyici bir çerçeve oluşturur. Su yönetimi politikalarının Su – Gıda – Enerji (WFE) üçlüsü perspektifiyle tasarlanması gerektiği uluslararası literatürde ortak bir yaklaşım haline gelmiştir (Rojas-Downing ve ark., 2017). Bu yapısal yaklaşım, tarım ve hayvancılığın su kaynakları üzerindeki baskısının yalnızca teknolojik iyileştirmelerle değil; aynı zamanda düzenleyici mekanizmalar, teşvik araçları ve çevresel standartlarla yönetilmesi gerektiğini vurgulamaktadır (Pacheco ve Pissarra, 2025). Nitekim su üzerindeki yükü azaltmayı hedefleyen iyi tarım uygulamaları, farklı ülkelerde yasal gereklilikler ve uluslararası sertifikasyon sistemleriyle desteklenmekte, böylece sürdürülebilir üretim davranışları kurumsal bir zorunluluk haline gelmektedir (Cao ve ark., 2021).

Hayvancılık sektörünün küresel sera gazı salınımindaki %14,5’lik payının azaltılması da su yönetimi politikalarıyla doğrudan ilişkilidir; gübre yönetiminin iyileştirilmesi, besi etkinliğinin artırılması ve birim hayvan başına verim artışı bu çerçevenin temel bileşenleridir (Rojas-Downing ve ark., 2017; Grossi ve ark., 2019). Politika araçlarının etkin kullanımına ilişkin örnekler ise ülkeler arasında dikkat çekici farklılıklar göstermektedir. Çin’de uygulanan mali teşvikler ve sübvansiyon programları, gübre geri dönüşüm oranlarını kayda değer ölçüde artırarak su kirliliğini azaltmada etkili bir politika modeli sunmuştur (Wei ve ark., 2021). Benzer şekilde, Su Hizmetleri için Ödeme (PWS) sistemleri çevresel sürdürülebilirliği ekonomik bir değere dönüştürerek çiftçi davranışlarının politika hedefleriyle hizalanmasını sağlamaktadır (Pacheco ve Pissarra, 2025). Bu bütüncül yaklaşım, teknolojik arıtım sistemleriyle kurumsal politikaların aynı yönetim ekosisteminin tamamlayıcı unsurları olduğunu göstermektedir.

SONUÇ VE ÖNERİLER

Su kalitesindeki bozulma, günümüzde yalnızca ekolojik dengeyi tehdit eden çevresel bir problem olmaktan çıkmış; hayvan sağlığı, sürü verimliliği, ürün kalitesi ve halk sağlığı üzerinde geniş kapsamlı etkiler oluşturan sistemik bir risk alanı haline gelmiştir. Bu derleme çalışması, suyun sadece hayati bir sıvı değil, aynı zamanda sürü yönetiminin merkezi bir bileşeni olduğunu ortaya koymaktadır. Yapılan incelemeler ışığında elde edilen sonuçlar ve sürdürülebilir hayvancılık için uygulamaya yönelik öneriler şu şekilde özetlenebilir:

- Görünmez riskler işletme ekonomisini etkiler: Düşük seviyeli kirliliklerin (demir, mangan, sülfat vb.) organoleptik etkiler yoluyla su tüketimini azaltması, yemden yararlanmayı ve bağışıklığı baskılayan subklinik kayıplara neden olur. Bu durum işletme kârlılığını doğrudan etkileyen ancak çoğu zaman fark edilmeyen bir maliyet unsurudur.

- Tek sağlık perspektifi gereklidir: Ağır metaller, pestisitler ve antibiyotik direnç genlerinin su yoluyla hayvansal üretime taşınması, veteriner halk sağlığından gıda güvenliğine uzanan bir zincirleme risk oluşturmaktadır. Su kalitesinin korunması, gıda güvenliğinin teminatı olarak görülmelidir.

- Düzenli izleme ve altyapı modernizasyonu şarttır: İşletmelerde su analizleri sorun odaklı yaklaşımdan çıkarılarak mevsim geçişlerinde rutin hale getirilmeli; kontaminasyon riskine karşı açık kaynaklar yerine kapalı devre sistemlere geçilerek düzenli hat temizliği (flushing) sağlanmalıdır.

- Entegre yönetim ve konfor odaklı yaklaşım benimsenmelidir: Su kalitesi ve mineral yükü yem rasyonu planlamasının bir parçası olarak değerlendirilmeli, mevsimsel sıcaklık yönetimi (yazın serin, kışın ılık su) ile hayvanların gönüllü su tüketimi maksimize edilmelidir.

- Teknolojik dönüşüm ertelenemez: Geleneksel kuyu başı analizi yaklaşımı, günümüz üretim sistemleri için yetersizdir. IoT tabanlı izleme, ileri arıtma teknolojileri (RO, UV) ve kaynaktan sulağa hijyen protokolleri hızlı bir şekilde yaygınlaştırılmalıdır.

- Politika ve teşvikler stratejinin belkemiğidir: Sürdürülebilir su kullanımı ancak güçlü politika çerçeveleri, ekonomik teşvikler ve WFE yaklaşımına dayalı yönetim modelleriyle sağlanabilir. PWS gibi mekanizmalar çevresel hizmetlere ekonomik değer kazandırarak davranış değişimini hızlandırır.

Sonuç olarak, iklim değişikliği ile artan su stresi koşullarında hayvancılık sektörünün sürdürülebilirliği, su güvenliği ve su yönetimindeki sistematik dönüşüm kapasitesine bağlıdır. Bu kapsamda, genetik potansiyelin ve besleme programlarının verime dönüşmesi ancak nitelikli su temini ile güvence altına alınabilir; dolayısıyla su yönetimi, modern hayvancılıkta diğer tüm üretim parametrelerinin etkinliğini belirleyen temel bir ön koşul olarak değerlendirilmelidir. Gelecek çalışmaların özellikle; farklı iklim senaryolarına göre bölgesel su stresi modelleri, küçük ve orta ölçekli işletmeler için maliyet-etkin arıtma teknolojileri ve su ayak izi azaltımına yönelik sistematik değerlendirme çerçeveleri üzerinde yoğunlaşması gerekmektedir.

EXTENDED SUMMARY

Although water is the fundamental determinant of metabolic sustainability and animal welfare in modern livestock farming, it remains a "neglected nutrient" compared to feed formulations. This review transcends the traditional perspective that limits water quality merely to legal thresholds of physicochemical parameters; instead, it provides a holistic assessment synthesizing toxicological mechanisms, watering system management, economic losses, and the "One Health" perspective.

Findings synthesized from current literature indicate that the impacts of water quality degradation proceed through subclinical and chronic processes rather than acute toxicity. Specifically, deviations in physicochemical parameters such as TDS (salinity), pH imbalance, and sulfates have been found to suppress animals' water intake (palatability), leading to "voluntary dehydration" and indirectly reducing feed intake. In this context, the study emphasizes that water quality is not limited to source purity; managerial factors such as trough design, system hygiene (biofilm control), water temperature, and organoleptic features are also decisive for consumption and yield. This phenomenon stands out as a primary cause of undiagnosed yield reductions and immunosuppression in livestock operations.

Another critical inference of the study addresses the cumulative risks posed by heavy metals (lead, arsenic, cadmium), agrochemicals, pharmaceutical residues, and biological contaminants (pathogens, biofilms). It is concluded that these waterborne pollutants not only threaten animal health but also compromise food safety through bioaccumulation in the food chain and act as vectors for the dissemination of antibiotic resistance genes. Therefore, water management is not merely an issue of operational efficiency but a critical public health concern.

In conclusion, given climate change, anthropogenic impacts, and increasing water stress projections, the livestock sector must transition from reactive approaches to proactive strategies. It is posited that for sustainable production, water must be managed as a strategic input where hygienic integrity is maintained from "source to trough." This necessitates a technological transformation adopting IoT-based real-time monitoring, advanced treatment systems (Reverse Osmosis, UV), and strict hygiene protocols. Furthermore, policy frameworks incorporating the Water-Food-Energy (WFE) nexus and economic instruments like "Payment for Water Services" (PWS) are identified as essential tools to incentivize these sustainable practices, ultimately ensuring the sector's resilience.

KAYNAKLAR

- Abeliotis, K., Candan, C., Amberg, C., Ferri, A., Osset, M., Owens, J., & Stamminger, R. (2015). Impact of water hardness on consumers' perception of laundry washing result in five European countries. *International Journal of Consumer Studies*, 39(1). <https://doi.org/10.1111/ijcs.12149>
- Afzal, A., & Mahreen, N. (2024). Emerging insights into the impacts of heavy metals exposure on health, reproductive and productive performance of livestock. *Frontiers in Pharmacology*, 15, 1375137. <https://doi.org/10.3389/fphar.2024.1375137>
- Akhtar, N., Syakir Ishak, M. I., Bhawani, S. A., & Umar, K. (2021). Various natural and anthropogenic factors responsible for water quality degradation: A review. *Water*, 13(19), 2660. <https://doi.org/10.3390/w13192660>
- Barregard, L., Sallsten, G., Lundh, T., & Molne, J. (2022). Low-level exposure to lead, cadmium and mercury, and histopathological findings in kidney biopsies. *Environmental Research*, 211, 113119. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.113119>
- Beede, D. K. (2012). What will our ruminants drink? *Animal Frontiers*, 2(2), 36-43. <https://doi.org/10.2527/af.2012-0040>
- Brew, M. N., Carter, J., & Maddox, M. K. (2009). The impact of water quality on beef cattle health and performance: AN187. *EDIS*, 2009(1). <https://doi.org/10.32473/edis-an187-2008>
- Bubber, P. (2019). A study on prooxidative and neurotoxic effects of mercury chloride in rats. *EC Pharmacology and Toxicology*, 7, 112–124.
- Can, M. E., & Boğa, M. (2025). Determination of water quality in dairy cattle enterprises: A case of Niğde province. *Turkish Journal of Agriculture-Food Science and Technology*, 13(3), 766-776. <https://doi.org/10.24925/turjaf.v13i3.766-776.7377>
- Cao, S. T., Tran, H. P., Le, H. T. T., Bui, H. P. K., Nguyen, G. T. H., Nguyen, L. T., Nguyen, B. T., & Luong, A. D. (2021). Impacts of effluent from different livestock farm types on surrounding water quality: A comprehensive assessment using individual parameter evaluation method and water quality indices. *Environmental Science and Pollution Research*, 28, 59905–59920. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-14284-9>
- Ceccatelli, S., Dare, E., & Moors, M. (2010). Methylmercury-induced neurotoxicity and apoptosis. *Chemico-Biological Interactions*, 188(2), 301–308. <https://doi.org/10.1016/j.cbi.2010.04.007>
- Cemek, B., Çetin, S., & Yıldırım, D. (2011). Çiftlik ve kümes hayvanlarının su tüketimi ve su kalite özellikleri. *International Journal of Agricultural and Natural Sciences*, 4(1), 57-67.
- Cesonienė, L., Dapkiene, M., & Sileikiene, D. (2019). The impact of livestock farming activity on the quality of surface water. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(32), 32678-32686. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-3694-3>
- Chen, C. Y., Wang, S. W., Kim, H., Pan, S. Y., Fan, C., & Lin, Y. J. (2021). Non-conventional water reuse in agriculture: A circular water economy. *Water Research*, 199, 117193. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117193>

- Constable, P. D., Hinchcliff, K. W., Done, S. H., & Grünberg, W. (2016). *Veterinary medicine: A textbook of the diseases of cattle, horses, sheep, pigs and goats*. Elsevier Health Sciences.
- de Los Santos, C., Pastor, J. C., & Calonge, M. (2023). Mercury intoxication and ophthalmic involvement: An update review. *Frontiers in Toxicology*, 5, 1148357. <https://doi.org/10.3389/ftox.2023.1148357>
- Dutta, S., Gorain, B., Choudhury, H., Roychoudhury, S., & Sengupta, P. (2022). Environmental and occupational exposure of metals and female reproductive health. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(41), 62067-62092. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-16581-9>
- El Sabry, M., Romeih, Z. U., Stino, F. K. R., Khosht, A. R., & Aggrey, S. E. (2023). Water scarcity can be a critical limitation for the poultry industry. *Tropical Animal Health and Production*, 55, 215. <https://doi.org/10.1007/s11250-023-03599-z>
- Fida, M., Li, P., Wang, Y., Alam, S. K., & Nsabimana, A. (2023). Water contamination and human health risks in Pakistan: A review. *Exposure and Health*, 15(3), 619-639. <https://doi.org/10.1007/s12403-022-00512-1>
- Finnie, J. W., Windsor, P. A., & Kessell, A. E. (2011). Neurological diseases of ruminant livestock in Australia. II: Toxic disorders and nutritional deficiencies. *Australian Veterinary Journal*, 89(7), 247-253. <https://doi.org/10.1111/j.1751-0813.2011.00793.x>
- Genther, O. N., & Beede, D. K. (2013). Preference and drinking behavior of lactating dairy cows offered water with different concentrations, valences, and sources of iron. *Journal of Dairy Science*, 96(2), 1164-1176. <https://doi.org/10.3168/jds.2012-5877>
- Giri, A., Bharti, V. K., Kalia, S., Arora, A., Balaje, S. S., & Chaurasia, O. P. (2020). A review on water quality and dairy cattle health: A special emphasis on high-altitude region. *Applied Water Science*, 10(3), 79. <https://doi.org/10.1007/s13201-020-1160-0>
- Grossi, G., Goglio, P., Vitali, A., & Williams, A. G. (2019). Livestock and climate change: Impact of livestock on climate and mitigation strategies. *Animal Frontiers*, 9(1), 69-76. <https://doi.org/10.1093/af/vfy034>
- Gupta, A. R., Bandyopadhyay, S., Sultana, F., & Swarup, D. (2021). Heavy metal poisoning and its impact on livestock health and production system. *Indian Journal of Animal Health*, 60(2). <https://doi.org/10.36062/ijah.2021.spl.00421>
- Hersom, M., & Crawford, S. (2008). Water nutrition and quality considerations for cattle: AN195. *EDIS*, 2008(2). <https://doi.org/10.32473/edis-an195-2008>
- Hill, G. M., & Shannon, M. C. (2019). Copper and zinc nutritional issues for agricultural animal production. *Biological Trace Element Research*, 188(1), 148-159. <https://doi.org/10.1007/s12011-018-1578-5>
- Hooda, P. S., Edwards, A. C., Anderson, H. A., & Miller, A. (2000). A review of water quality concerns in livestock farming areas. *Science of the Total Environment*, 250(1-3), 143-167. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(00\)00373-9](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(00)00373-9)
- Iritz, A., Espinoza, D., Taye, M. G., Salhab, F., Portnik, Y., Moallem, U., & Meir, Y. B. (2025). Effect of drinking water salinity on lactating cows' water and feed intake, milk yield, and rumen physiology. *Animal*, 19(2), 101389. <https://doi.org/10.1016/j.animal.2024.101389>

- Kamal, M. A., Khalf, M. A., Ahmed, Z. A. M., Eljakee, J. A., Alhotan, R. A., Al-Badwi, M. A. A., Hussein, E. O., Galik, B., & Saleh, A. A. (2024). Effect of water quality on causes of calf mortality in cattle-farm-associated epidemics. *Archives Animal Breeding*, 67, 25–35. <https://doi.org/10.5194/aab-67-25-2024>
- Kotwani, A., Joshi, J., & Kaloni, D. (2021). Pharmaceutical effluent: A critical link in the interconnected ecosystem promoting antimicrobial resistance. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(25), 32111-32124. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-14178-w>
- LeJeune, J. T., Besser, T. E., & Hancock, D. D. (2001). Cattle water troughs as reservoirs of *Escherichia coli* O157. *Applied and Environmental Microbiology*, 67(7), 3053-3057. <https://doi.org/10.1128/AEM.67.7.3053-3057.2001>
- Lopez-Alonso, M., Rey-Crespo, F., Herrero-Latorre, C., & Miranda, M. (2017). Identifying sources of metal exposure in organic and conventional dairy farming. *Chemosphere*, 185, 1048–1055. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.07.112>
- Madejón, P., Domínguez, M. T., & Murillo, J. M. (2009). Evaluation of pastures for horses grazing on soils polluted by trace elements. *Ecotoxicology*, 18(4), 417-428. <https://doi.org/10.1007/s10646-009-0296-3>
- Mallareddy, M., Thirumalaikumar, R., Balasubramanian, P., Naseeruddin, R., Nithya, N., Mariadoss, A., Eazhilkrishna, N., Choudhary, A. K., Deiveegan, M., Subramanian, E., Padmaja, B., & Vijayakumar, S. (2023). Maximizing water use efficiency in rice farming: A comprehensive review of innovative irrigation management technologies. *Water*, 15(10), 1802. <https://doi.org/10.3390/w15101802>
- Massányi, P., Massányi, M., Madeddu, R., Stawarz, R., & Lukáč, N. (2020). Effects of cadmium, lead, and mercury on the structure and function of reproductive organs. *Toxics*, 8(4), 94. <https://doi.org/10.3390/toxics8040094>
- Meyer, J. A., & Casey, N. H. (2012). Establishing risk assessment on water quality for livestock. *Animal Frontiers*, 2(2), 44-49. <https://doi.org/10.2527/af.2012-0041>
- Mohebbi, F., Akbari, M., Moosavi, S. G. A., Mostafaii, G., Aboosaedi, Z., & Miranzadeh, M. B. (2023). The study of water quality in poultry farms in Ardestan, Iran. *Journal of Environmental Health and Sustainable Development*, 8(3), 2070-2077. <https://doi.org/10.18502/jehsd.v8i3.13705>
- Münster, P., & Kemper, N. (2024). Long-term analysis of drinking water quality in poultry and pig farms in Northwest Germany. *Frontiers in Animal Science*, 5, 1467287. <https://doi.org/10.3389/fanim.2024.1467287>
- NRC (National Research Council). (2001). *Nutrient requirements of dairy cattle* (7th ed.). National Academic Press.
- Okerefor, U., Makhatha, M., Mekuto, L., Uche-Okerefor, N., Sebola, T., & Mavumengwana, V. (2020). Toxic metal implications on agricultural soils, plants, animals, aquatic life and human health. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(7), 2204. <https://doi.org/10.3390/ijerph17072204>
- Olkowski, A. A. (2009). *Livestock water quality: A field guide for cattle, horses, poultry and swine*. Agriculture and Agri-Food Canada.

- Olson, M. E., Thorlakson, C. L., Deselliers, L., Morck, D. W., & McAllister, T. A. (1997). *Giardia and Cryptosporidium in Canadian farm animals*. *Veterinary Parasitology*, 68(4), 375-381. [https://doi.org/10.1016/S0304-4017\(96\)01072-2](https://doi.org/10.1016/S0304-4017(96)01072-2)
- Pacheco, F. A. L., & Pissarra, T. C. T. (2025). Water security in the agriculture and cattle grazing activities: A systematic review. *Water Security*, 100191. <https://doi.org/10.1016/j.wasec.2025.100191>
- Patra, A. K., dos Santos Ribeiro, L. P., Yirga, H., Sonibare, A. O., Askar, A. R., Hussein, A. H., Puchala, R., & Goetsch, A. L. (2024). Effects of the concentration¹⁷ and nature of total dissolved solids in drinking water on feed intake, nutrient digestion, energy balance, methane emission, ruminal fermentation, and blood constituents in different breeds of young goats and hair sheep. *Animal Nutrition*, 16, 84-95. <https://doi.org/10.1016/j.aninu.2023.10.002>
- Pfost, D. L., Fulhage, C. D., & Casteel, S. W. (2001). Water quality for livestock drinking (Publication EQ381). University of Missouri Extension.
- Potopová, V., Musiolková, M., Gaviria, J. A., Trnka, M., Havlík, P., Boere, E., Trifan, T., Muntean, N., & Chawdhery, M. R. A. (2023). Water consumption by livestock systems from 2002–2020 and predictions for 2030–2050 under climate changes in the Czech Republic. *Agriculture*, 13(7), 1291. <https://doi.org/10.3390/agriculture13071291>
- Rad, S. M., Ray, A. K., & Barghi, S. (2022). Water pollution and agriculture pesticide. *Clean Technologies*, 4(4), 1088-1102. <https://doi.org/10.3390/cleantechnol4040066>
- Rahimzadeh, M. R., Rahimzadeh, M. R., Kazemi, S., & Moghadamnia, A. A. (2017). Cadmium toxicity and treatment: An update. *Caspian Journal of Internal Medicine*, 8(3), 135. <https://doi.org/10.22088/cjim.8.3.135>
- Rehman, A. U., Nazir, S., Irshad, R., Tahir, K., ur Rehman, K., Islam, R. U., & Wahab, Z. (2021). Toxicity of heavy metals in plants and animals and their uptake by magnetic iron oxide nanoparticles. *Journal of Molecular Liquids*, 321, 114455. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2020.114455>
- Rojas-Downing, M. M., Nejadhashemi, A. P., Harrigan, T., & Woznicki, S. A. (2017). Climate change and livestock: Impacts, adaptation, and mitigation. *Climate Risk Management*, 16, 145-163. <https://doi.org/10.1016/j.crm.2017.02.001>
- Selvi, K., Tepeli, S. Ö., & Kaya, B. (2021). Terzialan Göleti'nin (Çan, Çanakkale) sulama suyu kalitesi açısından mevsimsel değişimlerinin değerlendirilmesi. *Ege Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 38(3), 317-328. <https://doi.org/10.12714/egejfas.38.3.08>
- Siddiqui, M. F. M. F., & Rajurkar, G. R. (2008). Lead: An emerging threat to livestock. *Veterinary World*, 1(7), 213.
- Singh, A. K., Bhakat, C., & Singh, P. (2022). A review on water intake in dairy cattle: associated factors, management practices, and corresponding effects. *Tropical Animal Health and Production*, 54(2), 154. <https://doi.org/10.1007/s11250-022-03154-2>
- Sinha, B. K., Gour, J. K., Singh, M. K., & Nigam, A. K. (2022). Effects of pesticides on haematological parameters of fish: Recent updates. *Journal of Scientific Research*, 66, 269–283. <https://doi.org/10.37398/jsr.2022.660129>

- Slivinska, L. G., Shcherbatyy, A. R., Lukashchuk, B. O., & Gutyj, B. V. (2020). The state of antioxidant protection system in cows under the influence of heavy metals. *Regulatory Mechanisms in Biosystems*, 11(2). <https://doi.org/10.15421/022035>
- Tahir, I., & Alkheraije, K. A. (2023). A review of important heavy metals toxicity with special emphasis on nephrotoxicity and its management in cattle. *Frontiers in Veterinary Science*, 10, 1149720. <https://doi.org/10.3389/fvets.2023.1149720>
- Trouillard, M., Lebre, A., & Heckendorn, F. (2021). Grazing sheep in organic vineyards: An on-farm study about risk of chronic copper poisoning. *Sustainability*, 13(22), 12860. <https://doi.org/10.3390/su132212860>
- Tulu, D., Hundessa, F., Gadissa, S., & Temesgen, T. (2024). Review on the influence of water quality on livestock production in the era of climate change: Perspectives from dryland regions. *Cogent Food & Agriculture*, 10(1), 2306726. <https://doi.org/10.1080/23311932.2024.2306726>
- Valtorta, S. E., Gallardo, M. R., Sbodio, O. A., Revelli, G. R., Arakaki, C., Leva, P. E., Gaggiotti, M., & Tercero, E. J. (2008). Water salinity effects on performance and rumen parameters of lactating grazing Holstein cows. *International Journal of Biometeorology*, 52(3), 239-247. <https://doi.org/10.1007/s00484-007-0118-3>
- Weerasooriya, R. R., Liyanage, L. P. K., Rathnappriya, R. H. K., Bandara, W. B. M. A. C., Perera, T. A. N. T., Gunarathna, M. H. J. P., & Jayasinghe, G. Y. (2021). Industrial water conservation by water footprint and sustainable development goals: A review. *Environment, Development and Sustainability*, 23(9), 12661-12709. <https://doi.org/10.1007/s10668-020-01184-0>
- Wei, S., Zhu, Z., Zhao, J., Chadwick, D. R., & Dong, H. (2021). Policies and regulations for promoting manure management for sustainable livestock production in China: A review. *Frontiers of Agricultural Science and Engineering*, 8(1), 45–57. <https://doi.org/10.15302/j-fase-2020369>
- Willms, W. D., Kenzie, O. R., McAllister, T. A., Colwell, D., Veira, D., Wilmshurst, J. F., Entz, T., & Olson, M. E. (2002). Effects of water quality on cattle performance. *Rangeland Ecology & Management*, 55(5), 452-460.
- Wright, C. L. (2007). Management of water quality for beef cattle. *Veterinary Clinics of North America: Food Animal Practice*, 23(1), 91-103. <https://doi.org/10.1016/j.cvfa.2006.12.002>
- Zahoor, I., & Mushtaq, A. (2023). Water pollution from agricultural activities: A critical global review. *International Journal of Chemical and Biochemical Sciences*, 23(1), 164-176.
- Zendehbad, M., Mostaghelchi, M., Mojganfar, M., Cepuder, P., & Loiskandl, W. (2022). Nitrate in groundwater and agricultural products: Intake and risk assessment in northeastern Iran. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(52), 78603-78619. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-20831-9>
- Zyambo, G., Yabe, J., Muzandu, K., M'kandawire, E., Choongo, K., Kataba, A., Chawinga, K., Liazambi, A., Nakayama, S. M. M., Nakata, H., & Ishizuka, M. (2022). Human health risk assessment from lead exposure through consumption of raw cow milk from free-range cattle reared in the vicinity of a lead-zinc mine in Kabwe. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(8), 4757. <https://doi.org/10.3390/ijerph19084757>