

MÜHENDİSLİK

ALANINDA ARAŞTIRMALAR VE DEĞERLENDİRMELER

MART 2026

EDİTÖR

Prof. Dr. Selahattin BARDAK

İmtiyaz Sahibi / Yaşar Hız
Yayına Hazırlayan / Gece Kitaplığı

Birinci Basım / Mart 2026 - Ankara
ISBN / 978-625-321-014-4

© copyright

Bu kitabın tüm yayın hakları Gece Kitaplığı'na aittir.

Kaynak gösterilmeden alıntı yapılamaz, izin almadan hiçbir yolla çoğaltılamaz.

Gece Kitaplığı

Kızılay Mah. Fevzi Çakmak 1. Sokak

Ümit Apt No: 22/A Çankaya/ANKARA

0312 384 80 40

www.gecekitapligi.com / gecekitapligi@gmail.com

Baskı & Cilt

Bizim Büro

Sertifika No: 42488

**MÜHENDİSLİK
ALANINDA ARAŞTIRMALAR VE
DEĞERLENDİRMELER**

MART 2026

EDİTÖR

Prof. Dr. Selahattin BARDAK

İÇİNDEKİLER

BÖLÜM 1

KOBİ ÖLÇEĞİNDE İÇ LOJİSTİK SÜREÇLERİNDE KANBAN UYGULAMASININ AMPİRİK ANALİZİ

Merve YILMAZ 7

BÖLÜM 2

AKARSULARDA KIYI KORUMA YAPILARI VE TARIMSAL ALANLARA ÇEVRESEL ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

Şerife Pınar GÜVEL, Mehmet Ali AKGÜL 23

BÖLÜM 3

ERGENE NEHRİ SU KALİTESİNİN BAKTERİYOLOJİK VE FİZİKOKİMYASAL AÇIDAN DEĞERLENDİRİLMESİ

Sadiye YÜCE TAVUKÇU, Gokhan Onder ERGUVEN,
Numan YILDIRIM 33

BÖLÜM 4

SOĞUKTAN KORUYUCU SPOR GİYSİLERDE KATMANLI YAPILAR VE YENİ TEKNOLOJİLER

Esra TAŞTAN ÖZKAN 53

BÖLÜM 5

ERGENE MERİÇ HAVZASI ÇORLU ÇAYI SU KALİTESİNİN BAKTERİYOLOJİK VE FİZİKOKİMYASAL AÇIDAN DEĞERLENDİRİLMESİ

Birce BÜYÜKDUMANLI, Numan YILDIRIM,
Gokhan Onder ERGUVEN 71

BÖLÜM 6

MERA ALANLARI ISLAHINDA KİMYASAL GÜBRELEME VE ALTERNATİF YÖNTEM OLARAK ORGANİK GÜBRELEMENİN ÖNEMİ

Özcan AKIN, Mehmet ÖZCAN 93

BÖLÜM 7

SÜRDÜRÜLEBİLİR KAĞIT KAPLAMA TEKNOLOJİLERİNDE NANOSELÜLOZ UYGULAMALARI

Ekrem DURMAZ 111

BÖLÜM 1

KOBİ ÖLÇEĞİNDE İÇ LOJİSTİK SÜREÇLERİNDE KANBAN UYGULAMASININ AMPİRİK ANALİZİ

Merve YILMAZ¹

¹ Arş. Gör. Merve YILMAZ Bursa Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 16310 Yıldırım, Bursa ORCID: 0000-0002-1236-355X Mail: merve.yilmaz@btu.edu.tr

1. GİRİŞ

Toyota üretim sisteminin temeli, israfların tamamen ortadan kaldırılmasına dayanmakta olup, bu sistemin iki temel dayanağı tam zamanında üretim (*just-in-time*) ve insan dokunuşuyla otomasyon (*autonomation*) olarak tanımlanmaktadır. Tam zamanında üretim; akış süreci içinde montajda gerekli parçaların, montaj hattına tam ihtiyaç duyulduğu anda ve yalnızca ihtiyaç duyulan miktarda ulaşmasını ifade eder. Bu akışın tüm süreç boyunca sağlanabilmesi, işletmelerin sıfır stok seviyesine yaklaşmalarına olanak tanımaktadır. Toyota üretim sisteminin işletim yöntemi Kanban'dır. Toyota üretim sisteminin işletim yöntemi Kanban'dır. En sık kullanılan biçimi, dikdörtgen bir zarf içerisinde yer alan Kanban kartıdır. Kanban kartları, toplama, transfer ve üretim bilgilerini içermekte ve üretim hattı boyunca bilgi akışını hem dikey hem yatay düzlemde sağlamaktadır. Böylece tek bir kart üzerinden üretim miktarı, zamanlama, yöntem, sıralama, transfer miktarı ve ekipman gibi kritik veriler bir bakışta görülebilmektedir. Bu yaklaşım, geleneksel planlama sistemlerinde görülen “erken üretim” veya “fazla stok” sorunlarını ortadan kaldırmakta, tam zamanında üretim (*just-in-time*) felsefesinin uygulanabilirliğini garanti altına almaktadır. Sonuç olarak Kanban, aşırı üretimi engelleyerek fazla stok ihtiyacını ortadan kaldırmakta, depo ve yönetim maliyetlerini azaltmakta ve üretim sisteminde bütünleşik bir akış sağlamaktadır (Ohno, 1988).

Kanban sistemi, stokları ve üretim çevrim süresini azaltmak, bilgi değişim hızını artırmak ve verimliliği geliştirmek amacıyla geliştirilmiş, üretim yönetiminde kritik rol oynayan bir yöntemdir. İş türü, taşınacak parça miktarı ve Kanban türü gibi bilgileri içeren kartlar sayesinde bilgi somut ve kolay anlaşılır hale gelir. Geleneksel olarak sanayide kullanılan “itme” (push) sistemlerinde üretim, ilk aşamadan başlayarak sonraki aşamalara doğru itilirken, Kanban bir “çekme” (pull) sistemi olarak çalışır; her aşama yalnızca kendisinden sonraki aşamanın talep ettiği miktarı üretir. Bu sayede her üretim basamağında neye ihtiyaç duyulduğu net olarak görülür, aşamalar arasında verimli bir iletişim sağlanır ve gereksiz üretim önlenir. Şirketin üretim planı yalnızca nihai montaj hattına verilir, parçalar önceki aşamalardan çekildikçe bir iletişim zinciri oluşur ve her aşama, neyi ne kadar ve ne zaman üreteceğini otomatik olarak bilir. Böylelikle ürün adı, kodu ve miktarı gibi bilgiler Kanban üzerinden kolaylıkla izlenebilir (Huang ve Kusiak, 1996).

Çekme (*pull*), özünde malzeme akışınızı yönetmenin yapılandırılmış bir yoludur. Bir stok (envanter) sınırınız vardır. Ne zaman bir ürün veya iş sistemden çıkarsa, sistem otomatik olarak ya bu ürünü yenilemek için (stok için üretim söz konusuysa) ya da bir sonraki işi başlatmak için (siparişe göre üretim söz konusuysa) harekete geçer. Dolayısıyla, envanterdeki bu sınır; ek parçaların veya işlerin üretiminin başlamasını kontrol eder ve sistemin aşırı yüklenmesini ya da yanlışlıkla eksik kullanılmasını önler. Çekme (*pull*) sistemleri yalın üretim anlayışının temel taşlarından biri olmasına rağmen, literatürde ve uygulamalarda sıkça yanlış tanımlanmaktadır. En yaygın yanlış anlamalardan biri, itme sisteminin stok için üretim (*make-to-stock*), çekme sisteminin ise siparişe göre üretim (*make-to-order*) olarak görülmesidir. Oysa bu yaklaşım eksiktir; nitekim Toyota dahi bazı modellerini stok için üretmekte ancak bunu Kanban aracılığıyla çekme mantığıyla yönetmektedir. Benzer bir şekilde, itmenin pazar tahminine, çekmenin ise yalnızca gerçek müşteri talebine dayalı olduğu görüşü de gerçeği tam olarak yansıtmaz; çünkü her üretim süreci az ya da çok geleceğe yönelik tahmin içerir. Bir diğer yaygın tanım farkı, bilgi akışının yönüyle ilgilidir: itme sisteminde bilgi merkezi bir planla malzeme akışı yönünde ilerlerken, çekmede bilgi müşteriden başlayarak ters yönde akar. Bu açıklama kısmen doğru olsa da, çekme sisteminin özünü tek başına açıklamaya yetmez. Ayrıca, ERP sistemlerinin itmeye, Kanban'ın ise çekmeye karşılık geldiği yönünde yaygın bir inanış vardır; ancak iyi tasarlanmış ERP sistemleri de çekme prensipleriyle çalışabilmekte, aynı zamanda Kanban dijitalleşerek ERP ile entegre edilebilmektedir. Dolayısıyla, çekme sisteminin özünü belirleyen husus, stok veya iş yükü üzerinde açık bir limitin tanımlanması ve bir ürün sistemden çıktığında otomatik bir yenileme sinyali üretilmesidir (Roser, 2021).

2. KANBAN

Etimolojik olarak “Kanban” sözcüğü Japonca kökenli olup “kan” (看) görünür, görsel ve “ban” (板) kart, levha, tabela sözcüklerinden oluşmaktadır. Bu nedenle Kanban, en yalın haliyle “görsel kart” ya da “görsel sinyal” anlamına gelmektedir. Toyota üretim sisteminde Kanban, üretim ve malzeme akışını yöneten görsel bir kontrol aracı olarak geliştirilmiş ve zamanla yalın üretim felsefesinin simgesi haline gelmiştir. Kanban sistemi, stok için üretilen parçaların yenilenmesini çekme mantığına dayalı olarak düzenleyen yalın üretim aracıdır. Süpermarket olarak adlandırılan ara stok alanındaki her parça veya konteynere bir Kanban kartı iliştilir. Parçanın tüketilmesiyle birlikte ilgili Kanban döngünün başına dönerek aynı parçanın üretim ya da ikmal sürecini tetikler. Kanban, üretim ve taşıma süreçlerinde kullanılabilen olup temsil ettiği parça türü ve miktarı envanter sınırını belirler. Böylece sistem, minimum envanter düzeyi ile müşteri talebini karşılama arasında denge kurarak aşırı üretim ve stok birikimini önlemektedir (Roser, 2021). Tam zamanında üretim felsefesinin uygulanma aracı olan Kanban, üretim, montaj ve tedarik zinciri sistemlerinde yaygın olarak kullanılmakta; boşta geçen süreyi azaltarak verimliliği artırmakta ve tüm israf türlerini en aza indirmeye odaklanmaktadır (Wakode ve diğ., 2015).

Kanban sisteminin işleyişini kavrayabilmek için öncelikle onun temel yapı taşlarının bilinmesi gerekir. Bu sistemin merkezinde, üretim akışını yönlendiren yetkilendirme kartları – taşıma Kanban’ı (conveyance Kanban) ve üretim Kanban’ı (production Kanban) – yer alır. Taşıma Kanban’ı, bir sürecin ihtiyaç duyduğu parçaları önceki süreçten talep etmek için kullanılırken; üretim Kanban’ı, sonraki süreç tarafından çekilen miktarın üretilmesini sipariş eden karttır. Her iki Kanban türü de parçaları taşıyan standart konteynerlere iliştilir. Bu konteynerler, malzeme ve parçaların belirli miktarlarda düzenli biçimde taşınmasını sağlar.

Sistemin akışı, üretim sürecinin gerçekleştiği iş merkezleri ile kartların toplandığı ve yönlendirildiği çekme ve üretim Kanban istasyonları aracılığıyla sağlanır. Bir konteynerin içeriği kullanılmaya başlandığında taşıma Kanban’ı çıkarılır ve işçi tarafından önceki sürecin stok noktasına götürülerek gerekli parçaların temini sağlanır. Daha sonra alınan parçaları içeren konteynere bu Kanban iliştilir. Ardından, konteynerde bulunan üretim Kanban’ı çıkarılarak süreç için iş emri bilgisi haline gelir ve üretim başlatılır. Bu mekanizma, çekilen parçanın mümkün olan en kısa sürede yenilenmesini güvence altına alır. Ayrıca üretim sürecine malzemenin girdiği giriş alanları ve tamamlanan ürünlerin aktarıldığı çıkış alanları, sistemin sürekli ve dengeli bir akışla işlemesine katkı sağlar. Böylece nihai montaj hattındaki üretim faaliyetleri, önceki süreçler veya alt yüklenicilerle zincirleme şekilde bağlanarak tüm süreçlerde tam zamanında üretim gerçekleştirilmektedir (Esparrago, 1988).

Kanban sisteminin etkinliği büyük ölçüde, üretim hattında kullanılacak Kanban kartı sayısının doğru belirlenmesine bağlıdır. Fazla sayıda Kanban, gereksiz envanter birikimine yol açarken; yetersiz sayıda Kanban ise üretim akışında kesintilere ve darboğazlara neden olmaktadır. Bu nedenle literatürde, Kanban sayısını belirlemeye yönelik çeşitli matematiksel modeller geliştirilmiştir (Sugimori ve diğ., 1977; Ohno, 1988). Denklem 1’den de görüldüğü gibi Kanban sayısının talep, bekleme süresi, işlem süresi, konteyner kapasitesi ve politika değişkenine bağlı olarak belirlenmektedir.

$$y = \frac{D (T_w + T_p)(1 + \alpha)}{\alpha} \quad (1)$$

Burada;

- y** = Kanban sayısı
- D** = Birim zamandaki talep
- T_p** = İşleme süresi
- T_t** = Kanban'ın bekleme süresi
- a** = Konteyner kapasitesi ((bir seferde taşınan ürün miktarı, günlük ihtiyacın %10'unu geçmez)
- α** = Politika değişkeni (genellikle %10'u aşmayan güvenlik payı)

3. LİTERATÜR

Csernoch ve diğ. (2025), tarafından yürütülen çalışmada, dijital veri işleme süreçlerinde Kanban yönteminin uygulanabilirliği incelenmiştir. Çalışmanın amacı, veri işleme ve yönetiminde karşılaşılan yoğunluk, darboğaz ve koordinasyon sorunlarını görselleştirme ve denetim mekanizmaları aracılığıyla azaltmaktır. Yöntem olarak, dijital ortamda Kanban panosu tasarlanmış ve veri işleme görevlerinin akışı bu sistem üzerinden modellenmiştir. Sonuçlar, geleneksel veri işleme yöntemlerine kıyasla daha yüksek şeffaflık, iş yükü dengelemesi ve süreç içi izlenebilirlik sağlandığını göstermektedir.

Elloumi ve diğ. (2025), tarafından yapılan çalışmada, parçacık sürü optimizasyonu (Particle Swarm Optimization – PSO) algoritması, adaptif bir Kanban sisteminin tasarımında optimizasyon ve simülasyon bütünlük bir yaklaşım içerisinde uygulanmıştır. Çalışmanın amacı, üretim sistemlerinde değişken talep koşullarına uyum sağlayabilecek dinamik ve esnek bir Kanban tasarımı geliştirmektir. Bu kapsamda, simülasyon modeli aracılığıyla sistem performans ölçütleri analiz edilmiş, ardından PSO algoritması ile Kanban kart sayıları optimize edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, klasik sabit Kanban uygulamalarına kıyasla daha düşük stok seviyeleri, daha kısa çevrim süreleri ve artan sistem verimliliği sağlamıştır.

Özkan ve diğ. (2025) tarafından gerçekleştirilen araştırmada, bilgi teknolojileri (BT) proje portföyü yönetiminin etkinliğini artırmak amacıyla çevik (agile) prensipler ve Kanban uygulamaları bütünlleştirilmiştir. Çalışmanın amacı, BT projelerinde karşılaşılan belirsizlikler ve değişken gereksinimlere karşı daha esnek, şeffaf ve uyumlu bir yönetim modeli ortaya koymaktır. Yöntem olarak, proje portföyü yönetim sürecine çevik metodolojilerin ilkeleri entegre edilmiş ve Kanban uygulamasıyla iş akışının görselleştirilmesi sağlanmıştır. Sonuçlar, geleneksel yaklaşımlara kıyasla kaynak kullanımında verimlilik, proje tamamlama oranlarında artış ve karar verme süreçlerinde iyileşme elde edildiğini göstermektedir.

Çelebi ve diğ. (2025) çalışmalarında, Kanban ile entegre edilmiş Heijunka sisteminin tasarımı için simülasyon odaklı bir yaklaşım geliştirilmiştir. Çalışmanın amacı, üretim ortamlarında talep dalgalanmalarına rağmen dengeli üretim akışını sağlamak ve sistem performansını artırmaktır. Yöntem olarak, farklı Kanban kart sayıları ve Heijunka düzenleme stratejileri dikkate alınarak simülasyon modelleri oluşturulmuş, sistemin çıktıları karşılaştırmalı biçimde değerlendirilmiştir. Sonuçlar, talep değişkenliğine karşı daha dengeli üretim çizelgeleri, daha düşük stok seviyeleri ve iyileştirilmiş teslimat performansı elde edildiğini ortaya koymuştur.

Guo ve diğ. (2025) tarafından yapılan çalışmada, otomatik test robotu çerçevesinde pull request (PR) birleştirme sürecinin kolaylaştırılması ele alınmıştır. Çalışmanın amacı, yazılım geliştirme projelerinde sıkça karşılaşılan pull request yönetimi ve entegrasyon süreçlerinde verimliliği artırmak ve hata risklerini azaltmaktır. Yöntem olarak, otomatik test robotları ile desteklenen bir çerçeve geliştirilmiş; bu çerçeve PR'ların test, doğrulama ve birleştirme aşamalarında uygulanmıştır. Elde

edilen sonuçlar, klasik manuel süreçlere kıyasla daha hızlı entegrasyon, daha az hata oranı ve ekipler arası koordinasyonda iyileşme sağlandığını göstermektedir.

Gabr ve Nounou tarafından yapılan çalışmada, malzeme taşıma sistemlerinin modellenmesi ve geliştirilmesine yönelik yeni bir yaklaşım ve metodoloji tartışılmıştır. Çalışmanın amacı, üretim ve lojistik süreçlerinde malzeme akışını daha verimli, esnek ve uyarlanabilir bir yapıya kavuşturmak ve geleneksel yöntemlerin sınırlılıklarını aşmaktır. Yöntem olarak, sistem tasarımıya yönelik yeni bir modelleme çerçevesi sunulmuş ve metodoloji adım adım tanımlanmıştır. Sonuçlar, önerilen yaklaşımın sistem kapasitesinde artış, darboğazların azaltılması ve malzeme akışında iyileştirme sağladığını ortaya koymaktadır.

Liu ve diğ. (2025), tarafından gerçekleştirilen çalışmada, ayrık üretim sistemlerinde dinamik yarı mamul (WIP) kontrolü için çok boyutlu değer akış haritalama (Value Stream Mapping – VSM) ve çok amaçlı optimizasyon tekniklerinin entegrasyonu ele alınmıştır. Çalışmanın amacı, üretim süreçlerinde stok seviyelerini dengelemek, çevrim sürelerini kısaltmak ve kaynak kullanım verimliliğini artırmaktır. Yöntem olarak, çok boyutlu VSM ile süreçlerin görselleştirilmesi yapılmış, ardından çok amaçlı optimizasyon modelleriyle farklı WIP senaryoları değerlendirilmiştir. Sonuçlar, klasik sabit WIP uygulamalarına kıyasla daha esnek, uyarlanabilir ve performans odaklı kontrol mekanizmaları sağlandığını göstermektedir.

Moreano-Arones ve diğ. (2024), çalışmalarında Latin Amerika'daki yalın üretim uygulamaları bağlamında Kanban panosunun rolünü ele almıştır. Araştırmanın amacı, Kanban panosunun üretim süreçlerinde iş akışını düzenlemedeki, darboğazları görünür kılmadaki ve sürekli iyileştirmeyi desteklemedeki etkisini ortaya koymaktır. Yöntem olarak, yalın üretim metodolojileriyle ilişkilendirilmiş kavramsal açıklamalar ve bölgedeki uygulama örnekleri sunulmuştur. Sonuçlar, Kanban panolarının üretim süreçlerinde şeffaflığı artırdığı, kaynak kullanımını dengelediği ve ekipler arası koordinasyonu güçlendirdiğini göstermektedir.

Zeng ve diğ. (2024) inşaat lojistiğinde gerçek zamanlı talep raporlama ve çekme esaslı ikmal için BIM (Building Information Modeling) destekli Kanban sistemi geliştirilmiştir. Araştırmanın amacı, inşaat projelerinde malzeme akışını daha etkin yönetmek ve lojistik süreçlerde zamanında, esnek ve şeffaf bir kontrol mekanizması oluşturmaktır. Yöntem olarak, BIM tabanlı dijital bir Kanban sistemi tasarlanmış; malzeme ihtiyaçlarının gerçek zamanlı takibi ve çekme esaslı ikmal süreci simülasyon ve uygulama örnekleriyle test edilmiştir. Sonuçlar, sistemin malzeme temin sürelerini azalttığını, tedarik zincirinde görünürlüğü artırdığını ve iş gücü verimliliğini yükselttiğini göstermektedir.

Navodi ve diğ. (2024), çalışmalarında hazır giyim üretim sürecinde malzeme akışına ilişkin Kanban boyutunun belirlenmesini incelemiştir. Araştırmanın amacı, Kanban kart sayısının üretim performansı üzerindeki etkilerini analiz ederek optimum Kanban boyutunu ortaya koymaktır. Yöntem olarak, hazır giyim sektöründe gerçekleştirilen bir uygulama kapsamında veri analizi ve deneysel yöntemler kullanılmış; farklı Kanban boyutları altında malzeme akışı ve üretim performansı karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, uygun Kanban boyutunun belirlenmesiyle malzeme akışında süreklilik sağlandığını, darboğazların azaldığını ve üretim verimliliğinin arttığını göstermektedir.

Yamani ve diğ. (2024) çalışmalarında endüstriyel gıda ürün geliştirme projelerinin yönetiminde Kanban yönteminin performansını değerlendirmişlerdir. Araştırmanın amacı, proje yönetiminde Kanban uygulamalarının zaman, maliyet ve kaynak kullanımına etkilerini analiz ederek gıda sektöründeki uygulanabilirliğini ortaya koymaktır. Yöntem olarak, PT. XYZ adlı bir işletmede gerçekleştirilen vaka çalışması kapsamında Kanban yöntemi uygulanmış ve proje performans ölçütleri değerlendirilmiştir. Sonuçlar, Kanban uygulamasının proje süresini kısalttığını, maliyetleri azalttığını ve ekip içi koordinasyonu artırdığını göstermektedir.

Strickroth ve diğ. (2022), çalışmalarında çevik yöntemlerden öğrenilen uygulamaların eğitim ortamlarına aktarılması ve öğretim süreçlerinin daha etkin şekilde yönetilmesini amaçlamıştır. Yöntem olarak, bir sınıf ortamında Kanban panosu uygulanmış; görevlerin dağılımı, öğrenci katılımı ve öğretim faaliyetlerinin görselleştirilmesi üzerinden analizler yapılmıştır. Sonuçlar, Kanban panosunun öğrencilerin öğrenme sürecindeki sorumluluklarını daha net görmelerini sağladığını, öğretim akışını şeffaflaştırdığını ve öğretmen–öğrenci etkileşimini güçlendirdiğini göstermektedir.

Behnam (2022), çalışmasında Kanban panolarının bilgisayarla görü (Computer Vision) teknikleriyle tespit edilmesi ve karşılaştırılması üzerine odaklanmıştır. Çalışmanın amacı, özellikle dijital ortamlarda kullanılan Kanban panolarının otomatik olarak tanımlanması ve farklı panoların görsel özellikler üzerinden karşılaştırılabilmesidir. Yöntem olarak, görüntü işleme ve bilgisayarla görü algoritmaları kullanılarak Kanban panolarındaki sütun, kart ve iş akışı düzenleri analiz edilmiştir. Sonuçlar, bu yöntem sayesinde Kanban panolarının otomatik olarak tanımlanabildiğini ve aralarındaki benzerlik ya da farklılıkların ölçülebilir hale geldiğini göstermektedir.

Damij ve Damij (2021), çalışmalarında Kanban panosu iş akışının optimize edilmesi ve proje yönetim planının kısaltılması üzerine odaklanmıştır. Araştırmanın amacı, Kanban uygulamalarında iş akışındaki verimsizlikleri azaltarak proje yönetimi süreçlerinin daha hızlı ve etkin biçimde yürütülmesini sağlamaktır. Yöntem olarak, Kanban panolarında görevlerin dağılımı ve ilerleme aşamaları analitik yöntemlerle incelenmiş, süreç performansını artırmaya yönelik optimizasyon teknikleri uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar, önerilen yaklaşımın iş akışındaki gecikmeleri azalttığını, kaynak kullanımını iyileştirdiğini ve proje tamamlama sürelerini kısalttığını göstermektedir.

Simić ve diğ. (2021) çalışmalarında otomotiv endüstrisinde malzeme akışının Milk Run ve Kanban sistemleriyle modellenmesini ele almıştır. Araştırmanın amacı, otomotiv üretim ortamlarında malzeme akışını optimize etmek, lojistik verimliliğini artırmak ve üretim sürekliliğini güvence altına almaktır. Yöntem olarak, matematiksel modelleme ve simülasyon teknikleri kullanılmış; Milk run sistemi ile Kanban tabanlı çekme yöntemleri entegre edilerek farklı senaryolar analiz edilmiştir. Sonuçlar, bu iki sistemin birlikte uygulanmasının malzeme taşıma sürelerini azalttığını, stok seviyelerini düşürdüğünü ve üretim hattının daha dengeli çalışmasını sağladığını göstermektedir.

Senapathi ve Drury-Grogan, (2021), çalışmasında Yeni Zelanda’da bir kamu kurumunun dijital hizmet biriminde Kanban uygulaması için STATİK (Systems Thinking Approach to Introducing Kanban) yöntemi kullanılmıştır. Araştırmanın amacı, mevcut süreçten hareketle direnç oluşturmadan Kanban’ı kademeli ve işbirlikçi biçimde hayata geçirmektir. Yöntem olarak, derinlemesine vaka çalışması yürütülmüş; Kanban uygulamaları (görselleştirme, akış yönetimi, hizmet sınıfları, pano tasarımı) tasarım düşüncesi süreciyle bütünleştirilmiştir. Sonuçlar, uygulamanın görünürlük, şeffaflık, işbirliği, çevrim süresi iyileştirmeleri ve etkili geri bildirim mekanizmaları sağladığını; buna karşın ekip bağlılığının sınırlı olması, WIP limitlerinin belirlenmesinde zorluk ve kısa süreli Kanban koşulu gibi sorunlarla karşılaşıldığını ortaya koymuştur.

Andersson ve Nugin (2020), çalışmalarında endüstriyel bir laboratuvarında analiz faaliyetlerinin planlanmasına yönelik elektronik Kanban panosu konfigürasyonunu ele almıştır. Araştırmanın amacı, laboratuvar ortamında iş akışının daha etkin yönetilmesi ve analiz süreçlerinin planlanmasında verimliliğin artırılmasıdır. Yöntem olarak, elektronik Kanban panosunun tasarımı ve uygulanması gerçekleştirilmiş; iş akışının görselleştirilmesi, görevlerin dağılımı ve iş yükü dengelemesi incelenmiştir. Sonuçlar, elektronik Kanban panosunun planlama doğruluğunu artırdığı, kaynak kullanımını optimize ettiği ve iş süreçlerinde şeffaflık sağladığını ortaya koymuştur.

Hasani ve diğ. (2020), çalışmalarında Kanban kontrollü tedarik zinciri sisteminde araç rotalama problemini ele almış ve bu kapsamda cross-docking stratejisini değerlendirmiştir. Araştırmanın

amacı, tedarik zincirinde malzeme akışını hızlandırmak, stok maliyetlerini düşürmek ve lojistik süreçlerde verimliliği artırmaktır. Yöntem olarak, Kanban tabanlı bir tedarik zinciri modeli kurulmuş ve cross-docking uygulaması entegre edilerek araç rotalama problemi matematiksel modeller ve optimizasyon teknikleri ile çözülmüştür. Sonuçlar, önerilen yaklaşımın dağıtım sürelerini kısalttığını, stok seviyelerini azalttığını ve lojistik maliyetlerde iyileşme sağladığını ortaya koymuştur.

Hao ve Shen (2020), çalışmalarında Kanban tabanlı malzeme taşıma sistemine yönelik hibrit bir simülasyon modeli geliştirmiştir. Araştırmanın amacı, üretim ortamlarında malzeme taşıma süreçlerini daha etkin yönetebilmek ve Kanban kontrollü sistemlerin performansını iyileştirmektir. Yöntem olarak, ayrıık olay simülasyonu ve ajan tabanlı modelleme birleştirilerek hibrit bir simülasyon modeli oluşturulmuş ve farklı senaryolar altında sistem performansı test edilmiştir. Sonuçlar, hibrit yaklaşımın malzeme akışında daha yüksek esneklik, darboğazların erken tespiti ve operasyonel verimlilik artışı sağladığını göstermektedir.

Vallas (2019), çalışmasında Kanban çizelgeleme sisteminin planlanması ve uygulanması üzerine odaklanmıştır. Çalışmanın amacı, Kanban yönteminin işletmelerde üretim süreçlerinin planlanması ve kontrolünde nasıl etkin şekilde kullanılabileceğini göstermek ve uygulama sürecine dair yol haritası sunmaktır. Yöntem olarak, Kanban çizelgeleme sisteminin tasarım aşamaları, uygulama adımları ve işletme içindeki entegrasyon süreçleri incelenmiş; örnek uygulamalardan elde edilen bulgular değerlendirilmiştir. Sonuçlar, Kanban çizelgeleme sisteminin stok seviyelerini azalttığını, üretim sürecinde şeffaflığı artırdığını ve teslimat sürelerini kısalttığını ortaya koymuştur.

Sharma ve Singla (2019), çalışmalarında Kanban sisteminin uygulanmasının üretkenlik üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Çalışmanın amacı, otomotiv yedek parça üreten bir şirkette Kanban uygulamasının işletme performansına katkılarını değerlendirmektir. Yöntem olarak, vaka çalışması yaklaşımı benimsenmiş; Kanban uygulaması öncesi ve sonrası üretim verileri karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Sonuçlar, Kanban sisteminin üretim verimliliğini artırdığını, stok seviyelerini azalttığını ve üretim sürecinde süreklilik sağladığını ortaya koymuştur.

Zeng ve diğ. (2019), çalışmalarında inşaat lojistiğinde Kanban sisteminin uygulanmasını ele almışlardır. Araştırmanın amacı, şantiyelerde malzeme ihtiyaçlarının gerçek zamanlı olarak raporlanması ve çekme esaslı ikmal süreçlerinin daha etkin yürütülmesidir. Yöntem olarak, dijital teknolojilerle desteklenen bir Kanban sistemi geliştirilmiş; malzeme taleplerinin anlık takibi ve tedarik süreçlerinin çekme mantığıyla senkronize edilmesi üzerine bir model uygulanmıştır. Sonuçlar, sistemin malzeme temin sürelerini azalttığını, stok seviyelerini düşürdüğünü ve şantiye operasyonlarında verimliliği artırdığını göstermektedir.

Michael ve Kv (2019), çalışmalarında otomotiv yan sanayinde faaliyet gösteren bir işletmede e-Kanban sisteminin uygulanarak iç lojistik süreçlerinin optimize edilmesi ele alınmıştır. Araştırmanın amacı, geleneksel malzeme yönetim yöntemlerinin yarattığı gecikme ve stok fazlası problemlerini ortadan kaldırarak iç lojistikte daha hızlı, şeffaf ve verimli bir malzeme akışını sağlamaktır. Yöntem olarak, vaka çalışması yürütülmüş ve e-Kanban tabanlı bir sistem tasarlanarak işletmenin mevcut süreçlerine entegre edilmiştir. Sonuçlar, e-Kanban uygulamasının stok seviyelerini azalttığını, tedarik sürelerini kısalttığını ve üretim hattında malzeme bulunabilirliğini artırarak iş akışında süreklilik sağladığını göstermektedir.

Mojarro-Magaña ve diğ. (2018) çalışmalarında Kanban sistemine dayalı planlamanın işletmelerin operasyonel faydaları üzerindeki etkisini incelemiştir. Araştırmanın amacı, Kanban uygulamalarının şirketlerde verimlilik, maliyet azaltma ve süreç iyileştirme gibi işletme performansı göstergelerine katkılarını değerlendirmektir. Yöntem olarak, Kanban sistemini uygulayan işletmelerde ampirik bir analiz gerçekleştirilmiş; operasyonel performans ölçütleri istatistiksel yöntemlerle incelenmiştir.

Sonuçlar, Kanban tabanlı planlamanın daha düşük üretim maliyetleri, stok seviyelerinde azalma, teslimat sürelerinde iyileşme ve genel verimlilik artışı sağladığını göstermektedir.

Patil ve Kumar (2018), çalışmalarında yeniden ikmal sisteminin Kanban aracı kullanılarak uygulanmasını ele almışlardır. Çalışmanın amacı, üretim süreçlerinde malzeme ikmalini daha etkin hale getirerek stok maliyetlerini azaltmak, üretim sürekliliğini sağlamak ve süreç verimliliğini artırmaktır. Yöntem olarak, Kanban tabanlı bir yeniden ikmal sistemi tasarlanmış ve uygulama örnekleri üzerinden değerlendirilmiştir. Sonuçlar, Kanban uygulamasının stok seviyelerinde düşüş, malzeme temin sürelerinde kısalma ve üretim hattında kesintisiz akış sağladığını ortaya koymuştur.

Dalton (2018), çalışmasında Kanban panosunu çevik liderlik bağlamında ele almıştır. Çalışmanın amacı, Kanban panolarının iş akışlarını görselleştirerek ekiplerin koordinasyonunu güçlendirmesi ve liderlerin süreç üzerindeki kontrolünü kolaylaştırmasını göstermektir. Bu kapsamda yöntem olarak kavramsal açıklamalara ve uygulama örneklerine yer verilmiş; panoların sütun yapısı, görev yönetimi ve dijital ya da fiziksel kullanım biçimleri değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, Kanban panoları sayesinde darboğazların görünür hale geldiğini, iletişim ve iş birliğinin arttığını ve karar verme süreçlerinin hızlandığını ortaya koymaktadır.

Xanthopoulos ve diğ. (2018), optimal adaptive Kanban-type production control (2018) başlıklı çalışmada, Kanban tabanlı üretim kontrol sistemlerinin optimal ve adaptif biçimde tasarlanması ele alınmıştır. Çalışmanın amacı, değişken talep ve üretim koşullarında Kanban kart sayılarının dinamik olarak ayarlanması yoluyla stok maliyetlerini azaltmak ve sistem performansını artırmaktır. Yöntem olarak, matematiksel modelleme ve optimizasyon teknikleri kullanılmış; farklı talep senaryoları altında adaptif Kanban politikaları test edilmiştir. Sonuçlar, sabit Kanban politikalarına kıyasla daha düşük maliyet, daha dengeli iş akışı ve daha yüksek esneklik sağlandığını ortaya koymuştur.

Phumchusri ve Panyavai (2015), çalışmalarında kauçuk conta üretiminde elektronik Kanban sisteminin uygulanmasını incelemiştir. Araştırmanın amacı, geleneksel üretim kontrol yöntemlerinin sınırlılıklarını aşarak üretim hattında malzeme akışını daha etkin yönetmek, stok seviyelerini azaltmak ve teslimat sürelerini iyileştirmektir. Yöntem olarak, kauçuk conta üretim sürecine yönelik elektronik Kanban tabanlı bir sistem tasarlanmış ve uygulanmıştır. Sonuçlar, sistemin devreye alınmasıyla birlikte stok seviyelerinin azaldığını, üretim sürecinde şeffaflığın arttığını ve malzeme temin sürelerinin kısaldığını göstermektedir.

Leonardo ve diğ. (2017), çalışmalarında hibrit Kanban-CONWIP sisteminin uygulanmasını incelemişlerdir. Araştırmanın amacı, üretim süreçlerinde yalnızca Kanban veya yalnızca CONWIP kullanımının sınırlılıklarını aşarak her iki yöntemin avantajlarını bir arada kullanabilen bir sistem geliştirmektir. Yöntem olarak, bir üretim işletmesinde vaka çalışması gerçekleştirilmiş; hibrit sistemin uygulanmasıyla süreç performans göstergeleri (stok seviyeleri, üretim süreleri, kaynak kullanımı) analiz edilmiştir. Sonuçlar, hibrit Kanban-CONWIP sisteminin daha düşük stok maliyetleri, daha dengeli üretim akışı ve teslimat performansında iyileşme sağladığını göstermektedir.

2015 yılından günümüze uzanan literatür incelendiğinde, Kanban yönteminin yalnızca üretim sistemlerinde kullanılan bir araç olmaktan çıkıp çok daha geniş bir uygulama alanına yayıldığı görülmektedir. Özellikle 2025 yılına ait çalışmalar, Kanban'ın dijital veri işleme, yazılım geliştirme, proje portföy yönetimi ve simülasyon-optimizasyon tabanlı yaklaşımlarla bütünleştirildiğini göstermektedir. Bu durum, Kanban'ın artık yalnızca operasyonel bir yöntem değil, aynı zamanda stratejik bir yönetim yaklaşımı olarak da değerlendirildiğini ortaya koymaktadır.

Literatürde dikkat çeken bir diğer eğilim, Kanban'ın farklı yöntemlerle hibrit biçimde kullanılmasıdır. Kanban-Heijunka (Çelebi, 2025), Kanban-PSO optimizasyon (Elloumi, 2025),

Kanban–CONWIP (Leonardo, 2017) ve Kanban–Milk Run (Simić ve diğ. 2021) entegrasyonları, üretim ve lojistik sistemlerde daha esnek, dengeli ve uyarlanabilir çözümler sunmaktadır. Bu hibrit sistemler sayesinde talep dalgalanmalarına karşı daha dayanıklı üretim planlamaları yapılabilmekte, lojistik verimlilik artmakta ve stok maliyetleri önemli ölçüde azalmaktadır. Özellikle 2020 sonrası çalışmalar, Kanban yönteminin simülasyon ve optimizasyon teknikleriyle desteklendiğini göstermektedir. Hibrit simülasyon modelleri, çok amaçlı optimizasyon yaklaşımları ve veri analizi tabanlı yöntemler, Kanban’ın performansını analitik temelde ölçme ve iyileştirme olanağı sunmaktadır. Böylece, geleneksel deneme-yanılma yöntemlerinden uzaklaşarak daha bilimsel ve ölçülebilir sonuçlar elde edilmektedir.

Kanban uygulamalarının sektör çeşitliliği de son on yılda önemli ölçüde artmıştır. Geleneksel imalat sanayi dışında otomotiv, gıda, hazır giyim, lojistik, inşaat ve yazılım geliştirme gibi çok farklı alanlarda Kanban uygulamalarına rastlanmaktadır. Özellikle BIM tabanlı inşaat lojistiği uygulamaları (Zeng, 2019; 2024), yazılım geliştirme süreçlerinde STATİK yöntemiyle Kanban entegrasyonu (Senapathi, 2021) ve dijital Kanban panoları üzerine yapılan çalışmalar, bu yöntemin hizmet ve bilgi yoğun sektörlere de hızla yayıldığını ortaya koymaktadır.

Kanban’ın işletmelere sağladığı katkılar, literatürde tutarlı biçimde vurgulanmaktadır. Çalışmaların büyük çoğunluğu, Kanban uygulamalarının stok seviyelerini azalttığını, teslimat performansını iyileştirdiğini, üretim akışında süreklilik sağladığını ve şeffaflığı artırdığını ortaya koymaktadır. Bunun yanı sıra, optimizasyon ve simülasyon odaklı yaklaşımlar (Elloumi, 2025; Çelebi, 2025; Xanthopoulos, 2018) ile hibrit sistem tasarımları (Leonardo, 2017) Kanban’ın metodolojik gelişimine katkı sağlamaktadır. Ampirik saha uygulamaları ise gıda (Yamani, 2024), hazır giyim (Navodi, 2024), kauçuk (Phumchusri, 2015) ve otomotiv (Simić, 2021) sektörlerinde Kanban’ın doğrudan verimlilik, maliyet ve iş gücü etkinliği sağladığını ortaya koymuştur. Ayrıca dijitalleşme ekseninde geliştirilen uygulamalar (Guo, 2025; Behnam, 2022; Andersson, 2020) Kanban’ın Endüstri 4.0 bağlamında daha geniş bir kullanım alanına sahip olduğunu göstermektedir.

Bununla birlikte, literatürde bazı boşlukların bulunduğu da görülmektedir. Kanban’ın uzun vadeli performans etkilerini değerlendiren ampirik çalışmalar sınırlıdır. Endüstri 4.0 ve yapay zekâ tabanlı Kanban uygulamalarına yönelik araştırmalar henüz başlangıç aşamasındadır. Sürdürülebilirlik boyutu, yani enerji tüketimi ve karbon ayak izi üzerindeki etkiler çok az incelenmiştir. Ayrıca çalışan motivasyonu, değişim direnci ve kültürel uyum gibi insan faktörlerine odaklanan araştırmalar da yetersizdir. Özellikle gerçek saha verilerine dayalı ve maliyet kazançlarını doğrudan ortaya koyan çalışmaların sayısı oldukça azdır. Bu noktada uygulama odaklı araştırmalar literatürde ayrı bir değer taşımakta; teorik ve simülasyon temelli modellerin öngörülerini doğrulamak, sahadaki zorlukları açığa çıkarmak ve yöntemin işletmelere sağladığı ekonomik katkıları somut biçimde göstermek açısından kritik bir rol oynamaktadır. Bu bağlamda, yürütülen bu çalışma literatüre önemli bir katkı sağlamakta; Kanban sisteminin işletme düzeyindeki uygulanabilirliğini, elde edilen maliyet tasarruflarını ve operasyonel iyileştirmeleri ampirik bulgularla ortaya koymaktadır.

Sonuç olarak, literatür Kanban’ın 2015–2017 döneminde daha çok klasik üretim ve stok kontrolü bağlamında ele alındığını; 2018–2020 arasında hibrit sistemler ve optimizasyon yaklaşımlarının öne çıktığını; 2021 sonrası ise dijitalleşme, yazılım, hizmet sektörleri ve BIM entegrasyonu ile çeşitlendiğini göstermektedir. Bugün gelinen noktada Kanban, yalnızca üretim tabanlı operasyonel bir araç değil, aynı zamanda dijital dönüşüm, stratejik yönetim ve sürdürülebilirlik odaklı bir yöntem olarak değerlendirilmektedir.

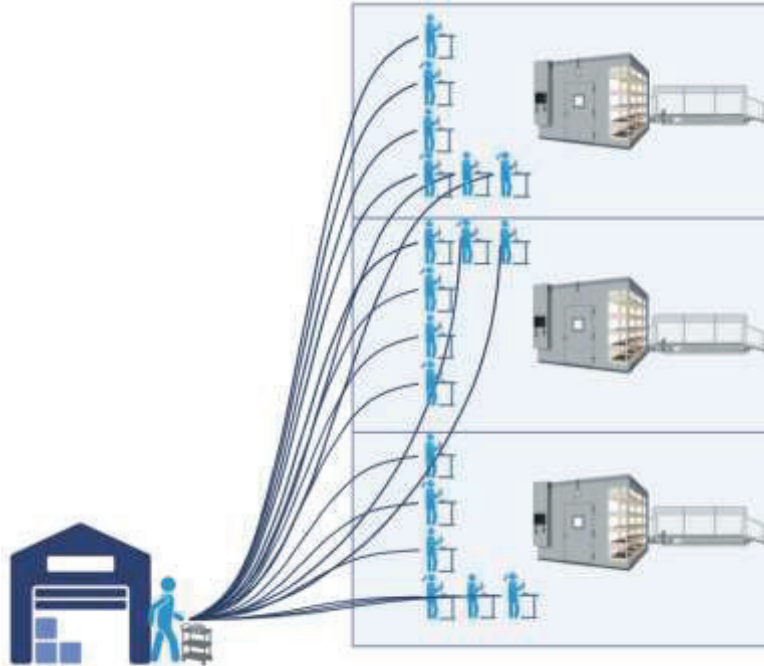
4. UYGULAMA

Uygulama, bir otomotiv yan sanayi firmasında gerçekleştirilmiş olup başlangıç noktası olarak soğuk depo ile üretim hattı arasındaki süreç seçilmiştir. Bu süreçle ilişkin temsili görsel Şekil 1’de verilmiştir. Bu tercihin temel nedeni, söz konusu iki departman arasında malzeme akışında sıkça karşılaşılan zaman kayıpları, işçilik maliyetlerindeki artış ve koordinasyon eksikliğidir. Mevcut durumda, üretim hattının ihtiyaç duyduğu malzemeler zamanında ve doğru miktarda temin edilememekte; bu da hem üretim akışında gecikmelere hem de iş gücünün gereksiz taşıma ve beklemelerle meşgul olmasına yol açmaktaydı. Ayrıca, planlama eksiklikleri sebebiyle kimi zaman depo tarafında gereksiz stok birikimi oluşurken, kimi zaman da üretim hattında malzeme eksiklikleri ortaya çıkmakta, bu durum üretim verimliliğini doğrudan olumsuz etkilemekteydi. Tüm bu nedenlerle manuel Kanban sistemi ilk olarak depo ve üretim hattı arasına entegre edilmiş, böylece talep bilgisinin görsel kartlarla anlık ve düzenli şekilde paylaşılması sağlanarak süreçteki düzensizliklerin giderilmesi hedeflenmiştir.



Şekil 1. Soğuk Depodan Üretim Hattına Malzeme Dağıtım Süreci

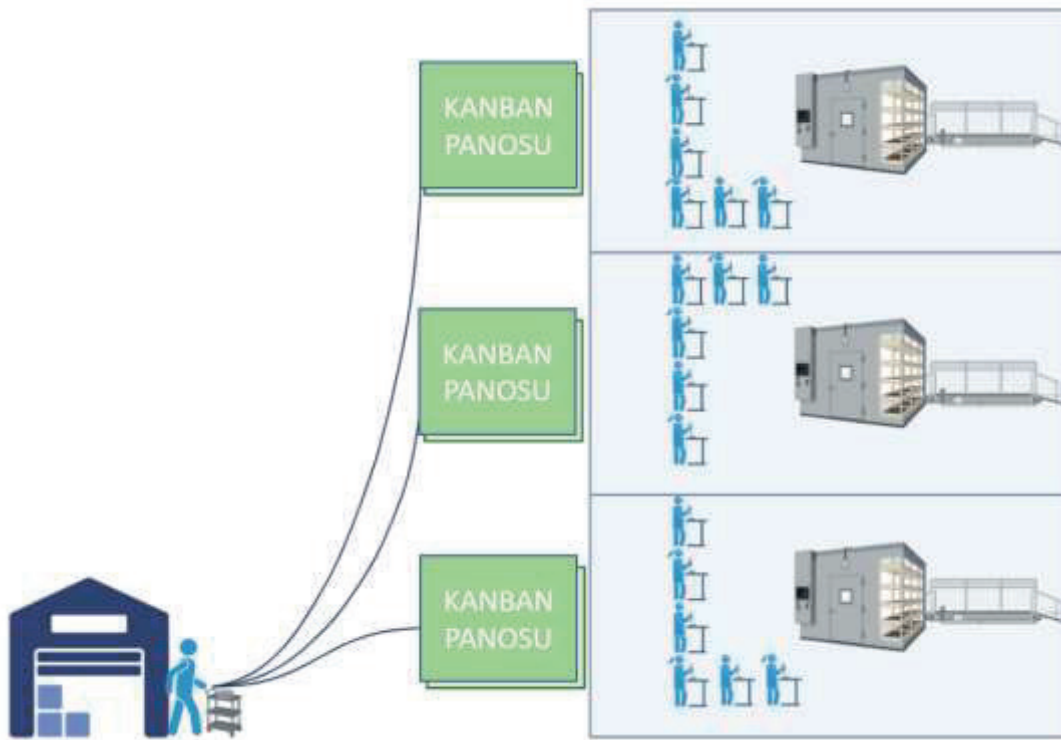
Şekil 2’de görülen mevcut durumda üretim hattındaki personel, Kanban benzeri görsel bir sinyal üzerinden malzeme talebini çekmek yerine, ihtiyaç bilgisini sözlü ve yazılı yollarla depo personeline iletmek zorundaydı. Bu durum, sistemin özünde bir çekme mantığına dayanması gerekirken, uygulamada bir itme sistemiymiş gibi işlemesine yol açmıştır. Yani talep bilgisi görsel bir süpermarket mantığıyla anlık yansıtılamadığı için, operatörler hem üretim hem de malzeme takibiyle meşgul olmuş, bu da sürecin verimliliğini düşürmüştür.



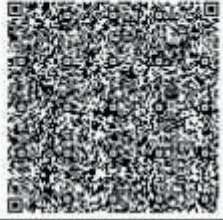
Şekil 2. Kanban Öncesi Depo-Üretim Hattı Malzeme Akış Şeması

Kanban sisteminin devreye alınmasının ardından süreç köklü biçimde yeniden yapılandırılmıştır. Manuel Kanban sisteminin uygulanması kapsamında Kanban panoları oluşturulmuş ve bu panolarda kullanılmak üzere Kanban kartları hazırlanmıştır. Kartların tasarım sürecinde Denklem (1)'den yararlanılmış, tipik bir Kanban örneği esas alınarak ihtiyaç duyulan bilgilerin yer aldığı kartlar geliştirilmiştir. Uygulamada kullanılan Kanban kartlarının tipik bir örneği, gizlilik gereği bazı bilgiler maskelenerek Şekil 3'te sunulmaktadır.

Bu sinyaller sayesinde hangi parçanın, ne miktarda ve hangi zaman aralığında üretim hattına gönderileceği açıkça belirlenmiş, depo personeli ile üretim hattı arasında anlık ve hatasız bir iletişim sağlanmıştır. İkinci olarak, manuel not alma süreci ortadan kaldırılarak yanlış kayıt, tekrar işleme ve iletişim hataları büyük ölçüde elimine edilmiştir. Üçüncü olarak, üretim hattı operatörleri artık kendi iş yüklerini aksatarak stok takibi yapmak zorunda kalmamış, asli görevlerine odaklanabilmektedir. Bu durum hem iş gücü verimliliğini artırmış hem de süreçteki iş bölümü daha adil ve rasyonel bir şekilde dağılmıştır. Ayrıca uygulama sonrasında depo operatörünün günlük adım sayısında ciddi bir azalma sağlanmış, malzeme transferi için harcanan süre kayda değer ölçüde kısalmıştır. Adım sayısındaki bu düşüş yalnızca fiziksel iş yükünü azaltmakla kalmamış, aynı zamanda maliyet analizinde ölçülebilir bir kazanç olarak da ortaya çıkmıştır. Son olarak, Kanban kartlarının sağladığı görselleştirme sayesinde üretim hattında gerçek bir “süpermarket mantığı” oluşturulmuş; talep edilen miktar kadar malzemenin doğru zamanda ve doğru yerde bulunması mümkün hale gelmiştir. Böylece fazla üretim ve stok fazlası önlenmiş, eksik malzeme kaynaklı duruşların önüne geçilmiş, genel üretim çevrimi daha hızlı, dengeli ve esnek bir yapıya kavuşmuştur.



Şekil 2. Kanban Uyarı Sistemi İle Depo-Üretim Hattı Malzeme Akış Şeması

KANBAN KARTI			
Ürün Kodu: YMM-2025-01-111X		Ürün: YMM Model 111X	
Miktar: 5	Miktar Birimi: Parça	Üretim Yeri: Hat 2	
Paketleme: Yok		Müşteri: X	
Depolama Alanı: Depo Bölgesi 1		Kanban No: 03	
Not: Stok takibi Kanban kartı ile yapılacaktır. Fazla üretim yapılmayacak.		Toplam Kanban No: 12	

Şekil 3. Üretim Sürecinde Kullanılan Tipik Bir Kanban Kartı Örneği

Kanban uygulamasının pilot süreci yalnızca teknik bir dönüşüm değil, aynı zamanda insan faktörlerinin de doğrudan etkilediği bir değişim yönetimi süreci olmuştur. Uygulamanın başlangıcında çalışanlar arasında belirli ölçüde değişime direnç ve sistemin gerekliliğine ilişkin tereddütler gözlemlenmiştir. Özellikle depo ve üretim hattı personelinin uzun süredir alışageldiği manuel ve sözlü iletişim yöntemlerinden vazgeçme noktasında isteksizlik sergiledikleri görülmüştür. Bununla birlikte, sistemin pratik faydaları kısa sürede belirginleştiğinde bu olumsuz tavırların yerini kabul ve motivasyonda artış almıştır. Çalışanların iş yükünün azaldığını, görev tanımlarının netleştiğini ve süreç içi iletişimin kolaylaştığını görmeleri, Kanban sistemine yönelik olumlu algının hızla pekişmesini sağlamıştır. Böylece uygulama yalnızca süreçleri düzenlemekle kalmamış, aynı zamanda iş kültüründe de disiplin ve şeffaflık temelli bir yaklaşımı yerleştirmiştir.

Pilot uygulama başarılı olduktan sonra sistem tamamen entegre edilmiş ve altı aylık bir izleme dönemi yürütülmüştür. Bu süre zarfında hem süreç performansı hem de maliyet etkileri sistematik olarak değerlendirilmiştir. Özellikle iş etüdü raporları üzerinden yapılan analizler, Kanban uygulamasının maliyetlere olan etkisini net bir şekilde ortaya koymuştur. Öncesi-sonrası karşılaştırmalarında yalnızca malzeme akışındaki düzenin sağlanması değil, aynı zamanda personelin rutin hareketlerinin azalması sayesinde de gözle görülür bir maliyet avantajı elde edilmiştir. Adım sürelerinin analizi kapsamında tüm üretim ve depo personelinin rutin hareketleri incelenmiş, ortalama adım süresi 0,6 saniye olarak hesaplanmıştır. Bu değer üzerinden yapılan analizler, Kanban sistemiyle birlikte depo personelinin günlük adım sayısında kayda değer bir azalma olduğunu, bu azalmanın doğrudan iş gücü verimliliğine ve maliyet kazançlarına yansıdığını göstermiştir.

Firma tarafından sağlanan güncel işçilik maliyeti verilerine göre saatlik ücret 17 € olarak belirlenmiştir. İşçilik maliyetlerinin hesaplanmasında bu veri temel alınmıştır. Çalışma yılı kapsamında gün sayısı 250 olarak dikkate alınmış, firmanın iki vardiyalı üretim kapasitesine sahip olduğu varsayılmıştır. Parametreler çerçevesinde yapılan hesaplamada yıllık işçilik kazancı 26.250 €/yıl olarak bulunmuştur. Bu durumda net gerçekleşen kazanç 26.197,5 € olarak hesaplanmıştır.

Çalışmanın bulguları ayrıca Kanban sisteminin, küçük ve orta ölçekli işletmeler açısından da kritik bir öneme sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Çünkü söz konusu işletmelerde malzeme dağıtım süreçleri genellikle tam otomatik konveyör sistemleriyle desteklenmemekte, manuel taşıma yöntemlerine dayanmaktadır. Bu koşullar altında Kanban'ın manuel biçimde uygulanması, hem düşük maliyetli hem de yüksek etkinlik sağlayan bir çözüm olarak öne çıkmaktadır. Nitekim bu firma özelinde de Kanban'ın manuel versiyonu ile başlatılan süreç, kısa vadede ölçülebilir iyileştirmeler getirmiş; uzun vadede ise dijital Kanban uygulamalarına geçiş için bir temel oluşturmuştur. Her ne kadar dijital Kanban uygulamalarının tam anlamıyla hayata geçirilmesi daha karmaşık ve maliyetli bir süreç olsa da, mevcut pilot çalışmanın elde ettiği sonuçlar bu yönde güçlü bir potansiyel bulunduğunu göstermektedir.

5. SONUÇ

Verimli bir üretim süreci, doğru iş gücü planlaması ve maliyet optimizasyonu ile mümkündür. Bu çalışma, Kanban'ın teori ve simülasyon literatüründeki öngörülerini saha verisiyle doğrulayarak özgün katkılar ortaya koymaktadır. Öncelikle, iç lojistik ara yüzünde (soğuk depo–hat) görsel çekme sinyalleri kullanılarak akışın standartlaştırılması sağlanmıştır. İkinci olarak, iş etüdü temelli nicel bir model aracılığıyla net tasarrufunun yıllık 26.197,5 € düzeyinde maddi karşılığı gösterilmiştir. Üçüncü olarak ise, insan faktörlerinin etkisi değerlendirilmiş; motivasyon, değişime direnç ve kültürel uyum açısından dönüşümün pilot aşamadan tam entegrasyona ilerlerken nasıl kurumsallaştığı belgelenmiştir. Çalışmanın temel kısıtları, tek firma ve tek hat bağlamında gerçekleştirilmiş olması ile uzun dönemli (12 ay ve üzeri) izleme verisinin sınırlılığıdır. Bununla birlikte, elde edilen bulgular küçük ve orta ölçekli işletmelerde manuel uygulamaların dahi anlamlı getiriler sunduğunu ve e-Kanban ya da ERP ile entegre sistemlere geçiş için haklı bir yatırım gerekçesi oluşturduğunu göstermektedir. Gelecek çalışmalarda çok hatlı ve çok ürünlü üretim ortamlarında kart sayısı ve konteyner kapasitesinin çok amaçlı optimizasyonuna odaklanması, Kanban politikalarının enerji tüketimi ve karbon ayak izi üzerindeki etkilerinin ortak değerlendirmeye tabi tutulması, dijital Kanban uygulamalarının kademeli devreye alınmasında yatırım getirisi ve toplam sahip olma maliyetine ilişkin analizlerin yapılması, ayrıca iş memnuniyeti ve öğrenme eğrisi gibi davranışsal metrikler aracılığıyla sosyo-teknik bütünlüğün ölçülmesi önerilmektedir. Sonuç olarak, çalışma Kanban'ın yalnızca operasyonel bir iyileştirme aracı değil, aynı zamanda stratejik bir dönüşüm mekanizması olduğunu ortaya koymakta; üretim süreçlerinin verimlilik, maliyet ve iş gücü boyutlarında ölçülebilir kazanımlar sağladığını göstermektedir.

KAYNAKLAR

- Andersson, E., & Nugin, J. L. (2020). Configuration of an electronic Kanban board for planning analysis activities at an industrial laboratory.
- Behnam, H. (2022). Detecting and comparing Kanban boards using Computer Vision.
- Csernoch, M., Szűcs, E. G., & Máté, D. (2025). Kanban method in digital data processing. *International Review of Applied Sciences and Engineering*, 16(2), 275-291.
- Çelebi, S., Yılmaz, Ö., Ene Yalçın, S. E. V. A. L., & Öztürk, N. (2025). A Simulation-Oriented Approach To The Design Of Kanban Integrated Heijunka System. *International Journal Of Simulation Modelling*, (2).
- Dalton, J. (2018). Kanban Board. In *Great Big Agile: An OS for Agile Leaders* (pp. 187-188). Berkeley, CA: Apress.
- Damij, N., & Damij, T. (2021). An approach to optimizing Kanban board workflow and shortening the project management plan. *IEEE Transactions On Engineering Management*, 71, 13266-13273.
- Elloumi, K., Ammar, A., & Benaissa, M. (2025). Particle swarm optimization algorithm for design of an adaptive Kanban system based on optimization via simulation. *Journal of Industrial and Production Engineering*, 1-13.
- Esparrago, R. A. Jr. (1988). Kanban. *Production and Inventory Management Journal*, 29(1), 6-10.
- Gabr, A., & Nounou, A. (2025, June). A Discussion of Modeling and Development of Material Handling Systems: A New Approach and a Methodology. In *Operations Research Forum* (Vol. 6, No. 2, p. 81). Cham: Springer International Publishing.
- Guo, Z. Y., Chen, S. H., Garland, A., Chen, W. H., Liang, Y. P., & Liu, C. M. (2025, July). Facilitating the Merging Process of Pull Requests in Automated-Testing Robot Framework. In *2025 IEEE 49th Annual Computers, Software, and Applications Conference (COMPSAC)* (pp. 2313-2318). IEEE.
- Hasani Goodarzi, A., & Zegordi, S. H. (2020). Vehicle routing problem in a kanban controlled supply chain system considering cross-docking strategy. *Operational Research*, 20(4), 2397-2425.
- Huang, C. C., & Kusiak, A. (1996). Overview of Kanban systems. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 9(3), 169–189. <https://doi.org/10.1080/095119296131643>
- Leonardo, D. G., Sereno, B., Silva, D. S. A. D., Sampaio, M., Massote, A. A., & Simões, J. C. (2017). Implementation of hybrid Kanban-CONWIP system: A case study. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 28(6), 714-736.
- Liu, B., Li, Y., & Gao, F. (2025). Integrating Multi-Dimensional Value Stream Mapping and Multi-Objective Optimization for Dynamic WIP Control in Discrete Manufacturing. *Mathematics*, 13(16), 2610.
- Michael, L. K., & Kv, S. (2019). Optimization of Inbound Logistics by Implementing E-Kanban System in an Automobile Accessories Manufacturing Unit-A Case Study. *Quality-Access to Success*, 20(170).
- Mojarro-Magaña, M., Olguín-Tiznado, J. E., García-Alcaraz, J. L., Camargo-Wilson, C., López-Barreras, J. A., & Pérez-López, R. J. (2018). Impact of the Planning from the Kanban System on the Company's Operating Benefits. *Sustainability*, 10(7), 2506.
- Moreano-Arones, N. S., Vasquez-Suejiro, E., & Quiroz-Flores, J. C. (2024). Kanban Board. In *Lean Manufacturing in Latin America: Concepts, Methodologies and Applications* (pp. 175-192). Cham: Springer Nature Switzerland.
- Navodi, W. S., Nixman, L., Ratnayake, V., & Abeysooriya, R. P. (2024, August). Investigating the Kanban Size of the Material Flow in Apparel Manufacturing Process. In *2024 Moratuwa Engineering Research Conference (MERCon)* (pp. 676-681). IEEE.

- Ohno, T. (1988). *Toyota Production System: Beyond Large-Scale Production*. Cambridge, MA: Productivity Press.
- Ozkan, N., Erdogan, T. G., Taskesenlioglu, S., & Gök, M. Ş. (2025). Enhancing information technology project portfolio management with agile principles and Kanban practices. *International Journal of Managing Projects in Business*.
- Patil, V. R., & Vasantha Kumar, S. A. (2018). Implementation of Replenishment System Using Kanban as a Tool. *IUP Journal of Operations Management*, 17(1).
- Phumchusri, N., & Panyavai, T. (2015). Electronic kanban system for rubber seals production. *Engineering Journal*, 19(1), 37-49.
- Roser, C. (2021). All About Pull Production: Designing, Implementing, and Maintaining Kanban, CONWIP, and Other Pull Systems in Lean Production. Offenbach, Deutschland: *AllAboutLean.com Publishing*.
- Senapathi, M., & Drury-Grogan, M. L. (2021). Systems thinking approach to implementing kanban: A case study. *Journal of Software: Evolution and Process*, 33(4), e2322.
- Sharma, S. K., & Singla, V. (2019). The effects of implementation of kanban system on productivity: A case study of auto parts company. *IUP Journal of Operations Management*, 18(1), 56-68.
- Simić, D., Svirčević, V., Corchado, E., Calvo-Rolle, J. L., Simić, S. D., & Simić, S. (2021). Modelling material flow using the Milk run and Kanban systems in the automotive industry. *Expert Systems*, 38(1), e12546.
- Strickroth, S., Kreidenweis, M., & Wurm, Z. (2022, September). Learning from agile methods: using a kanban board for classroom orchestration. In *International Conference on Interactive Collaborative Learning* (pp. 68-79). Cham: Springer International Publishing.
- Sugimori, Y., Kusunoki, K., Cho, F., & Uchikawa, S. (1977). Toyota production system and Kanban system: Materialization of just-in-time and respect-for-human system. *International Journal of Production Research*, 15(6), 553–564. <https://doi.org/10.1080/00207547708943149>
- Vallas, V. (2019). Planning & Implementation of a Kanban Scheduling System.,
- Wakode, R. B., Raut, L. P., & Talmale, P. (2015). Overview on kanban methodology and its implementation. *IJSRD-International Journal for Scientific Research & Development*, 3(02), 2321-0613.
- Xanthopoulos, A. S., Ioannidis, S., & Koulouriotis, D. E. (2018). Optimal adaptive Kanban-type production control. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 97(5), 2887-2905.
- Xue, L., Li, Y., Wang, Z., Chung, S. H., & Wen, X. (2024). Distributed appointment assignment and scheduling under uncertainty. *International Journal of Production Research*, 62(1-2), 318-335.
- Yamani, A. A., Santoso, S., Santosa, H., Maulana, D. B., & Prastyo, Y. (2024). Evaluating the Performance of Kanban Method in Managig Industrial Food Product Development Projects at Pt. XYZ: A Literature Jurnal. *Int. J. Innov. Sci. Res. Technol*, 10, 881-888.
- Yıldırım, H., İnel, M. N. (2018) Operasyonel mükemmellik için israf simülasyonu üzerine ampirik bir çalışma. *Organizasyon ve Yönetim Bilimleri Dergisi*, 10(2). ISSN: 1309-8039.
- Zeng, N., Ye, X., Liu, Y., & König, M. (2024). BIM-enabled Kanban system in construction logistics for real-time demand reporting and pull replenishment. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 31(8), 3069-3096.
- Zeng, N., Ye, X., Peng, X., & König, M. (2019, May). Applying kanban system in construction logistics for real-time material demand report and pulled replenishment. In *Proceedings of the 36th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC)* (pp. 1018-1025).

BÖLÜM 2

AKARSULARDA KIYI KORUMA YAPILARI VE TARIMSAL ALANLARA ÇEVRESEL ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

Şerife Pınar GÜVEL¹, Mehmet Ali AKGÜL²

¹ Dr., DSİ 6.Bölge Müdürlüğü, Adana, Türkiye, pinar.guvel@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-3175-5938

² Dr., DSİ 6.Bölge Müdürlüğü, Adana, Türkiye, mehmetaliakgul@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-5517-9576

1. Giriş

Akarsularda kıyı erozyonu, suyun etkisiyle akarsu kıyısı boyunca toprağın aşınmasından ve taşınmasından oluşan doğal bir süreçtir (Patel ve Kumar, 2023). Akarsuların düzenlenmesi amacıyla inşa edilen yapılar, havza ve iklim özellikleri, akarsu vadilerinin coğrafi özellikleri, bitki örtüsü, akarsu debisi, akarsu kesit özellikleri, toprak yapısı, arazi kullanım durumu gibi çeşitli hidrolojik, meteorolojik ve çevresel parametrelerin dikkate alınmasıyla projelendirilmektedir. Erozyon ve/veya taşkın olayları sonucunda üst havzalardan taşınan sedimentin akarsu yataklarında neden olduğu değişiklikler, zaman içerisinde akarsu boyunca yer alan tarımsal alanlarda veya yerleşim alanlarında olumsuz sonuçlara neden olabilmektedir. Bu değişimlerden kaynaklanan olumsuz sonuçların en aza indirilmesi için yapısal önlemler içeren mühendislik faaliyetleri yürütülmektedir. Üst havzalarda taşkın kontrol çalışmaları konusunda yayınlanan resmi yönetmelik ve uygulamalar, iklim değişikliğiyle artan taşkın olaylarında, alınacak önlemler ve mühendislik çözümleri konusunda proje tasarım ve uygulama aşamaları hakkında teknik detayları açıklamaktadır (OGM, 2024).

Akarsularda katı madde taşınımı ve su yapılarına etkileri konusunda çeşitli bilimsel araştırmalara, saha incelemelerine ve deneysel faaliyetlere literatürde yaygın olarak rastlanmaktadır (Aksoy, 1967; Garbrecht, 1968; Bursalı, 1968; Özbek, 1988; Bor vd., 2010; Mete vd., 2022; Mete vd., 2023). Saha araştırmaları ile ilgili olan çalışmaların bir kısmı erozyondan kaynaklanan nehir kıyısındaki oyulmalar ve yataklardaki yer değişikliğinin nedenlerini ve sonuçlarını araştırmakta, bir kısmı ise su yapılarının işletilmesi kapsamında su kaynakları yönetimi faaliyetlerini incelemektedir. Akarsularda katı madde hareketi sonucunda taban seviyesi değişimlerinin matematiksel modeller ile incelenmesi de su mühendisliğinin önemli konuları arasındadır (Demiröz, 1978). Patel vd. (2023), akarsu yataklarının ve kıyıların stabilitesinin, üç boyutlu hız dağılımı, türbülans kinetik enerjisi, Reynolds kayma gerilimi, türbülans yoğunluğu gibi özelliklerden etkilendiğini ve araştırmacıların türbülans parametrelerinin kanal yatağı boyunca ve kıyılarından sediment hareketinde etkili olduğunu tespit ettiğini belirtmektedir. İnsan-çevre etkileşimi ile hidrolojik döngüye etkileri konusunda ise bilimsel alanda araştırmacıların ilgisinin artmakta olduğu görülmektedir (Akgül vd., 2024; Güvel, 2024; Güvel vd., 2024).

Akarsularda yatak düzenlemesi amacıyla kullanılan yöntemlerden birisi enine yapılar olarak da isimlendirilen mahmuzlardır. Mahmuzlar, genel olarak akışı kanal kıyısından uzaklaştırmak ve akış hızını kontrol ederek kıyıları korumak için tasarlanmaktadır (Patel vd., 2023). Mahmuz setinin, kıyı koruması, akarsu düzenlemesi, taşkın kontrolü ve ekolojik restorasyon için yaygın olarak kullanıldığı belirtilmektedir (Yu vd., 2024). Bu yapıların amacı, akarsu yatağının daraltılmasında, akarsu yatağının yeniden şekillendirilmesinin doğal olarak gerçekleştirilmesini sağlamaktır, mahmuzlar arasında yer alan kısımlar zaman içerisinde akarsularla taşınan askıda katı maddelerle dolmaktadır. Zhang ve Nakagawa (2008a), tarihsel olarak mahmuz bentlerinin akışları uzaklaştırarak kıyıları erozyondan korumak, ana kanal yatağını derinleştirerek nehir navigasyon koşullarını iyileştirmek veya uygun akış debisi ve su seviyesini koruyarak su temini ve tarımsal sulamayı güvence altına almak amacıyla inşa edildiğini belirtmiştir.

Akarsuların düzenlenmesi faaliyetleri kapsamında inşa edilen mahmuzlar, işlevlerine göre veya kullanılan malzeme cinslerine göre sınıflandırılmakta; özellikle eğimi az ve geniş yataklı akarsularda daha etkili olduğu ve daha iyi sonuçlar verdiği, ayrıca değişen şartlara kolaylıkla uyum sağlayabilme ve ekonomik olması özellikleri ile avantajlar sağladığı belirtilmektedir (OGM, 2024). Mahmuzlar, yapı teknikleri ve yapım amaçlarına göre farklılık göstermektedir (Ertürk, 2025). Mahmuzlar, akarsu yatağını daraltan sabit tesisler olarak, plandaki akım yönüne göre tertip edilme tarzına göre farklı isimlerle tanımlanmaktadır, ayrıca plandaki görünüşe göre farklı mahmuz tipleri bulunmaktadır (Ertürk, 2025; Peker, 2025). Mahmuz tiplerinin seçiminde dikkat edilecek temel konular arasında, akarsu kesiti, mahmuzlar arasındaki mesafe, seçilen malzeme cinsi vb. kriterler inceleme konusu olmaktadır. Önceki yıllarda gerçekleştirilen çeşitli çalışmalarda mahmuz uygulamaları ve inşa amaçları verilmektedir (Özbek, 1988; Özbek, 1991). Özölçer (1998) tarafından yapılan çalışmada,

mahmuz çeşitlerinin kullanılan malzeme cinsine göre ahşap, çelik, beton, asfalt, taş mahmuzlar olarak, işlevlerine göre geçirimli ve geçirimsiz, yüksek ve alçak, sabit ve ayarlanabilen mahmuzlar olarak, şekillerine göre ise düz, T ve L mahmuzlar olarak sınıflandırılabilceği ifade edilmiştir.

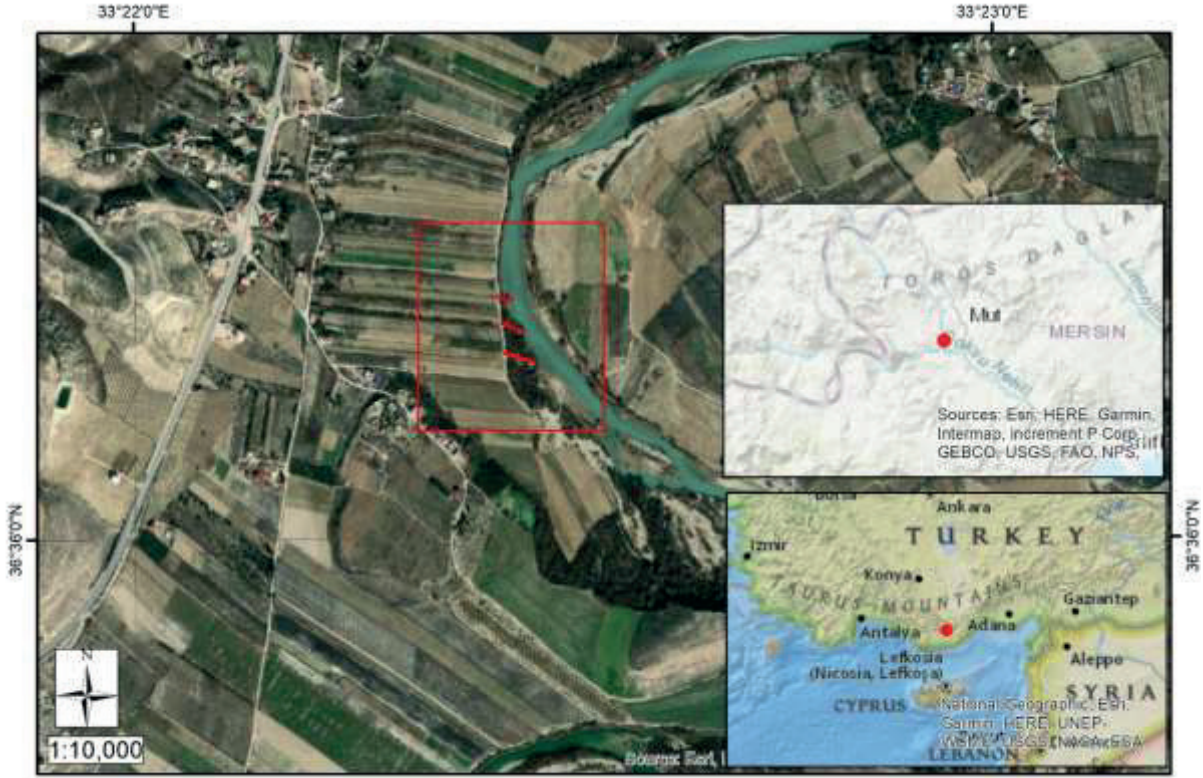
Akarsular üzerinde inşa edilen yapıların tasarım aşamaları ve uygulama sonuçlarına dair geçmiş yıllarda yürütülen çalışmalar, akarsu kıyı koruma faaliyetlerinin yanı sıra, planlanan yapıların akarsu morfolojisine etkileri açısından araştırılmasını kapsamaktadır. Chakravarty vd. (2024) tarafından yapılan çalışmada, akış üzerindeki farklı tipteki mahmuzlar, nehir yatağı morfolojisine etkileri açısından incelenmiş, farklı mahmuz şekillerinin akış hızı ve sediment taşınım modellerine etkileri, nehir kıyısı stabilitesi ve erozyon açısından değerlendirilmiştir. Ayrıca, mahmuzlar gibi hidrolik yapıların bir nehrin yönünü düzenlemek için kullanılan en yaygın yapılardan birisi olduğunu, araştırmaların bu yapıların inşasının nehir kıyıları boyunca erozyonu azalttığını gösterdiğini belirtmiş, ancak bu önlemlerin etkinliğinin sınırlı olduğunu ve bu nedenle çeşitli mahmuz türlerini ve bunların etkilerini anlamının çok önemli olduğunu ifade etmişlerdir (Chakravarty vd., 2024). Zhang ve Nakagawa (2008b), bir mahmuz etrafındaki türbülanslı akış ve yatak deformasyonunu deneysel ve sayısal yöntemlerle incelemiştir. Patel ve Kumar (2023) tarafından yapılan çalışma, farklı sızma yüzdelere sahip üç T-şeklinde mahmuz setinin yakınındaki akış davranışını, sızıntı olmaması, %5 ve %10 aşağıya doğru sızıntı durumlarında deneysel olarak analiz etmekte, aşağı doğru sızıntı hareketinin kanal tabanı yüksekliğinde ve oyulma derinliğinin gelişiminde neden olabileceği değişiklikleri değerlendirmektedir. Yu vd. (2024), üç boyutlu sayısal bir model kullanarak, menderesli kanallarda mahmuz setleri arasındaki mesafenin akış ve yatak deformasyonu üzerindeki etkilerini araştırmıştır.

Bu çalışmada, Türkiye'nin güneyinde, Doğu Akdeniz Havzasında, Göksu Nehri Suçatı mevkiinde, taşkın olayları ve erozyondan kaynaklanan akarsu kıyısındaki değişimler ve kıyıda yer alan tarım alanlarına etkileri uygulamaya alınan üç adet mahmuz örneği ile incelenmiştir. Çalışmada, 2013 ve 2024 yılları arasında farklı tarihlere ait Google Earth (2026) uydu görüntüleri materyal olarak kullanılmıştır. Tarımsal sulama, gıda güvenliği ve tarımsal üretim konuları kapsamında, arazi kullanımı/arazi örtüsü konularının insan-çevre etkileşimi ve hidrolojik döngüye etkilerinin önem kazandığı günümüzde, gelecekte yapılacak bilimsel araştırmalar için bu çalışmanın katkı sağlaması beklenmektedir.

2. Çalışma Sahası

Çalışma sahası olarak seçilen Göksu Nehri Suçatı mevki, Türkiye'nin güneyinde, Akdeniz ikliminin görüldüğü, iç kısımlarda ise karasal iklime sahip ve Türkiye'nin 17 numaralı havzası olan Doğu Akdeniz Havzası'nda yer almaktadır. Çalışma sahasının Türkiye'deki yeri Şekil 1'de verilmektedir.

Göksu Nehrinin drenaj alanı 10 069 km², uzunluğu 260 km'dir. Önceki yıllarda yapılan çalışmalarda, Doğu Akdeniz Havzasının dik eğimli yüksek arazilerden oluştuğu, ayrıca seyrek orman örtüsüne sahip olduğu ve havzada yüksek yağışlar gerçekleştiği, bu nedenle yüzey akışlarının fazla, akarsu rejimlerinin ise düzensiz olduğu belirtilmiştir. (DSİ, 2016).



Şekil 1. Çalışma sahasının Türkiye’deki yeri

Doğu Akdeniz Havzasının iki büyük akarsuları Göksu Nehri ve Tarsus (Berdan) Nehridir. Göksu Nehri Haydar Dağı’ndan doğar, güneybatı yönünde ilerleyerek Mut yakınlarında Ermenek Çayı ile birleşir, Silifke’nin içinden geçerek, bir alüvyal birikinti ovasını geçerek Akdeniz’e ulaşır (DSİ, 2016). Göksu Nehrinin, Toros dağlarının çeşitli akarsu kollarını içine alan geniş bir havzası bulunmaktadır. Nehrin iki ana kolu, Suçatı mevkiine kadar Göksu kolu 130 km uzunluğunda, Ermenek kolu ise 131 km uzunluğundadır.

Göksu Nehri’nde geçmiş yıllarda büyük miktarlarda taşkın hasarlarına neden olan taşkın olayları gerçekleşmiştir. Havza yağış alanında yüksek taşkın risklerinin bulunması sonucunda taşkın kontrol önlemleri hizmete alınarak taşkın koruma faaliyetleri gerçekleştirilmektedir. Göksu nehri taşkınları hem Ermenek çayında, hem de Göksu kolunda meydana gelmektedir. Göksu nehri taşkın dönemi Ocak-Haziran ayları arası ve kar erimesinden kaynaklanan en yüksek aylık akış Mart ve Nisan aylarındadır.

Göksu nehri havzasında gerçekleşen tarihi taşkınlar incelendiğinde; 1910 ve 1932 yıllarında meydana gelen taşkın olaylarında can kaybı olup olmadığına dair bir bilgiye rastlanmamıştır. 1958 ve 1981 yılları arasında farklı yıllarda gerçekleşen taşkın olaylarında, arazilerin taşkın suları altında kaldığı, bazı evlerin yıkıldığı ve tarım arazilerinin taşkın suları altında kaldığı ve zarar gördüğü rapor edilmiştir. Göksu nehri üzerindeki en büyük taşkın olayı ise 6 Mart 2004 tarihinde meydana gelmiş, Göksu nehri boyunca Mut ilçesi Hocantı (Derinçay) köyünden Akdenize kadar yaklaşık 100 km mesafede yerleşim yerleri ve tarım arazileri taşkından etkilenmiştir (Şekil 2).

6 Mart 2004 tarihinde Göksu nehrinin taşması sonucu Silifke ilçe merkezi, Silifke ovası ve Mut ilçesi ile Silifke ilçesi arasındaki Göksu ırmağı kıyısındaki tarım arazilerinde taşkın olayından etkilenen

alanlar olduğu; ayrıca taşkın seddelerinde kıyı oyulmaları veya ırmak yatağı değişikliği gibi çeşitli taşkın zararlarının meydana geldiği belirtilmiştir (DSİ, 2004). Bu sahada mevcut ve develope koşullar taşkın kontrolü özelinde incelenmiş, kırsal yerleşimler, tarım alanlarının taşkınlardan korunması ve taşkın zararlarının en aza indirilebilmesi amacıyla depolamalı ve koruma tesisleri taşkın işletmesi ve yönetimi açısından değerlendirilmiştir.



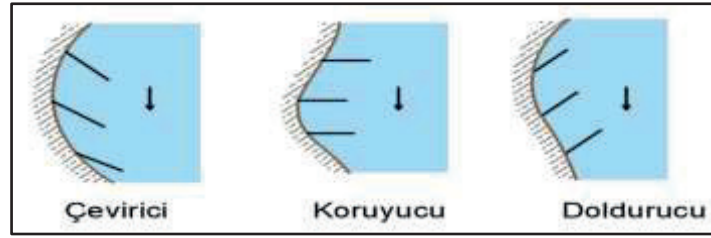
Şekil 2. 6 Mart 2004 tarihli Göksu nehri taşkını, Silifke (DSİ, 2004)

Yüksek kotlarda doğarak Akdeniz’e ulaşan Göksu nehri erozyon riskinin yüksek olduğu bir bölge olarak dikkat çekmektedir. Göksu Nehri havzasının önemli miktarda toprak erozyonuna maruz kaldığı Çilek (2021) tarafından yapılan çalışmada ifade edilmiş, yıllık toprak kaybının araştırılması amacıyla RUSLE erozyon modelleme yaklaşımı kullanılarak Göksu havzası RUSLE tahmini erozyon haritası oluşturulmuştur.

3. Metod

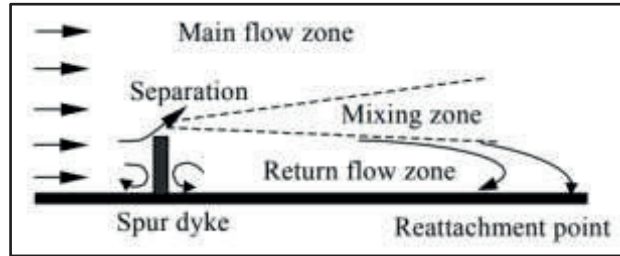
Bu çalışmada, Göksu Nehri Suçatı mevkiinde seçilen inceleme alanında mahmuzların projelendirilmesi ile 2013-2024 yılları arasında kıyı alanındaki değişimin uydu görüntüleri (Google Earth, 2026) üzerinden değerlendirilmesi amaçlanmıştır.

Mahmuzlar, projelendirilmelerine ilişkin teknik detaylar ve proje amaçları doğrultusunda inşa edilmektedir. Mahmuzlar, akım yönü ile yaptığı açıya göre, mansaba yönelik (çevirici), normal (koruyucu), veya membaya yönelik (doldurucu) mahmuzlar olarak isimlendirilmektedir (OGM, 2024).



Şekil 3. İşlevlerine göre mahmuzlar (OGM, 2024).

Zhang ve Nakagawa (2008a) mahmuz setinin etrafındaki akışın genellikle karmaşık olduğunu, mahmuz setinin etrafındaki tipik akışın, mahmuz setinin başından kanalın karşı tarafına kadar olan ana akış bölgesi, mahmuz setinin arkasındaki bölge ve bunların arasındaki karışım bölgesi olarak üç bölgeye ayrılabilirliğini belirtmiştir.



Şekil 4. Mahmuz setinin etrafındaki tipik akış (Zhang ve Nakagawa, 2008a).

4. Araştırma Bulguları ve Tartışma

Göksu Nehri Suçatı mevkiinde akarsu kıyısında tarımsal alanların erozyondan korunması amacıyla projelendirilen mahmuzların akarsu düzenlemesindeki rolü, 2013 ve 2024 yılları arasında, seçilen çalışma alanındaki kıyı değişiminin uydu görüntüleri (Google Earth, 2026) üzerinden araştırılması ile incelenmektedir (Şekil 5).

Aşağı Göksu Havzasında yer alan Silifke ovasında ilk sulama, drenaj ve taşkın koruma amaçlı etüt çalışmaları 1939 yılında başlamıştır ve Göksu Havzasında su ve toprak kaynaklarını geliştirme

hizmetleri kapsamında etüt ve planlama faaliyetleri, proje tasarım ve işletme çalışmaları halen devam etmektedir.



Şekil 5. 2013 ve 2024 yılları arasında Göksu Nehri Suçatı mevkiinde akarsu kıyısında meydana gelen değişimi gösteren uydu görüntüleri (Google Earth, 2026).

Göksu Nehri Suçatı mevkiinde Göksu Nehrinin her iki kıyısında tarımsal araziler bulunmaktadır. Çalışma alanında sol sahilde yer alan Mersin Mut Sulaması işletme aşamasında olup, sulama projeleri kapalı sulama sistemi uygulaması ile geliştirilmiştir. Seçilen çalışma alanında sağ sahilde yer alan tarımsal araziler ise Göksu nehrinin jeomorfolojik yapısından kaynaklanan erozyona maruz kalmış, tarım yapılan toprakların korunması amacıyla 2011 yılında kıyı daraltma yapılarının önerilmesi ile üç adet mahmuz inşaatı yapılarak, kıyı korumasının sağlanması amaçlanmıştır.

Göksu nehri kıyısında inşaatı tamamlanmış ve hizmete alınmış olan üç adet mahmuz yapısı ile akarsularla askıda taşınan katı maddelerin mahmuzlar arasındaki kısımları doldurduğu, bu nedenle akarsu yatağının yeniden şekillendiği Şekil 5’de verilen 12.10.2013 tarihli görüntüde görülmektedir.

Akarsudaki söz konusu yatak düzenlemesinin doğal olarak sonucu olarak bitki örtüsünün yıllar içindeki gelişimi ve değişimi ise, Şekil 5’de verilen 01.09.2024 tarihli görüntüde belirginlik kazanmıştır.

Şekil 5’de verilen 29.01.2018, 12.04.2019 ve 03.04.2020 tarihli görüntüler mahmuzlar arasındaki kısımların akarsularla taşınan askıda katı madde ile dolduğunu ve akarsu yatağının düzenlenmesinde olumlu sonuçlar verdiğini göstermenin yanı sıra, akarsuda yüksek debili akımların gerçekleştiği dönemlerde de mahmuzların işlevini koruduğunu göstermektedir.

Akarsu düzenlenmesi ve kıyıların korunması amacıyla inşa edilen mahmuzların akarsu morfolojisi, kıyı erozyonu, yatak taban oyulması, akarsu kesit daralmasından dolayı akarsu hızının değişimi konularının detaylıca araştırılması, proje tasarım aşamasında tip seçiminde verimliliği etkilemesi yönüyle de önem taşımaktadır.

Bu çalışmada, Şekil 5’de verilen görüntülerden elde edilen sonuçlar, seçilen çalışma alanında akarsu yatağının yeniden şekillendirilmesi amacıyla mahmuzların inşa edilmesiyle nehir kıyısında erozyonun olumsuz etkilerine karşı tarım arazilerinin korunması konusunda başarılı bir uygulamanın geliştirildiğini göstermektedir.

5. Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışmada, Doğu Akdeniz Havzasında yer alan Göksu Nehri Suçatı mevkiinde, taşkın olayları ve erozyonun akarsu kıyısına ve kıyıda tarım alanlarına etkileri, 2013 ve 2024 yılları arasında farklı tarihlere ait uydu görüntüleri kullanılarak incelenmiştir.

Tarımsal üretim, su ve toprak kaynaklarının sürdürülebilir yönetimi kapsamında ekonomik kalkınma ve gıda güvenliği açısından büyük öneme sahiptir. Tarımsal arazilerin korunması da bu kapsamda detaylı çalışmalar ve teknik uygulamalar çerçevesinde önem taşımaktadır. Akarsularda yatak düzenlemesi amacıyla Göksu Nehri Suçatı mevkiinde tarımsal alanların erozyondan korunması amacıyla projelendirilen mahmuzların başarıyla uygulandığı, 2013 ve 2024 yılları arasında değişimi incelenerek belirlenmiştir.

Su ve toprak kaynaklarının sürdürülebilir yönetimi kapsamında, izleme, gözlem ve değerlendirme çalışmalarında kullanılabilme potansiyeli açısından bu çalışmanın gelecekteki araştırmalara destek sağlaması beklenmektedir.

Kaynaklar

- Akgül, M.A., Güvel, Ş.P., Aksu, H. (2024) Sedimentation Analysis on Seyhan Dam Reservoir Using Long Term Bathymetry Data, Journal of Engineering Sciences and Design, DOI: 10.21923/jesd.1353462.
- Aksoy, Ş. (1967) Büyük Barajların Mansap Tarafındaki Nehir Tabanı Alçalmaları, DSİ Teknik Bülten Sayı:10, sayfa:1-55.
- Bor, A., Elçi, Ş., Tayfur, G. (2010) Tahtalı ve Şaşal Derelerinde Taşınan Katı Madde Miktarının Tahmini, VI. Ulusal Hidroloji Kongresi, 22 - 24 Eylül 2010, Pamukkale Üniversitesi, Denizli.
- Bursalı, S. (1968) Akarsular Üzerindeki Yanal Su Alma Yapılarında, Ayırma Duvarının Etkilerinin İncelenmesi, Türkiye İnşaat Mühendisliği IV. Teknik Kongresi Ankara 1968.
- Chakravarty, S., Patel, H.K., Mohanty, B., Kumar, B. (2024) Review on different shapes of spurs and their effects on channel morphology, Water Practice & Technology Vol 19 No 1, 241 doi: 10.2166/wpt.2023.221.
- Çilek, A. (2021) Düzenleyici Ekosistem Hizmetlerinde Toprak Erozyonunun Haritalanması: Göksu Havzası Örneği, Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 36(2), ss. 409-419, Haziran 2021.
- Demiröz, E. (1978) Tabii Akarsularda Katı Madde Hareketinden İleri Gelen Taban Seviyesi Değişimlerinin Matematiksel Modeli ve Sayısal Yöntemle Çözümü, DSİ Teknik Bülten, Sayı:28, Sayfa:53-87.
- DSİ (2004) DSİ 6.Bölge Müdürlüğü arşivi
- DSİ (2016) Doğu Akdeniz Havzası Master Plan Raporu Hazırlanması Danışmanlık Hizmetleri İşi, Üçer Müh. A.Ş., Ekim 2016.
- Ertürk, E. (2025) Akarsu Mansap Planlama Çalışmalarında Temel Prensipler, DSİ Genel Müdürlüğü Taşkın Kontrol Dairesi Başkanlığı Semineri Ders Notları, sf.27-54, 26-30 Mayıs 2025, Antalya.
- Garbrecht, G. (1968) Katı Madde Taşıyan Akarsularda Pirizler Önündeki Ayırma Duvarlarının Formu, Türkiye İnşaat Mühendisliği IV. Teknik Kongresi Ankara 1968.
- Google Earth Pro 7.3.6.10441 (2026) Mut, Mersin, TÜRKİYE. 36°36'11.14"N 33°22'26.43"E, Elevation 120m, Eye alt 600 m. Borders and labels; places layers. Maxar Tech., CNES/Airbus 2026. Available from: <https://earth.google.com/web/>. (Accessed January 12, 2026).
- Güvel, Ş.P. (2024) Assessment of the impact of land cover changes on sediment yield: a case study, Water Supply Vol 24 No 3, 931 doi: 10.2166/ws.2024.036.
- Güvel, Ş.P., Topçu, E., Akgül, M.A. (2024) Multi-Criteria Decision-Making Approach for Analysis of the Impact Of Land Use Change on Sediment Transport: A Case Study of Göksu Himmetli, Seyhan River Basin, p.1-25, İnşaat Mühendisliği, Yaz Yayınları.

- Mete, B., Baki, O.T., Bayram, A. (2022) Değirmendere, Yomra ve Galanima akarsu havzalarında (Trabzon) askıda katı madde taşınımının incelenmesi ve değerlendirilmesi, GUFBD / GUJS (2022) 12(3): 803-817, DOI: 10.17714/gumusfenbil.997032.
- Mete, B., Nacar, S., Bayram, A., Baki, O.T. (2023) Regresyon ve Yapay Sinir Ağları Yöntemleri ile Akarsularda Askıda Katı Madde Konsantrasyonu Tahmini, Doğal Afetler ve Çevre Dergisi, 2023; 9(1): 125-135, DOI: 10.21324/dacd.1133981.
- OGM (2024) Yukarı Havza Sel Kontrol Çalışmalarına İlişkin Tamim ve Uygulama Teknikleri, Tamim No:7351, Orman Genel Müdürlüğü, Toprak Muhafaza ve Havza Islahı Dairesi Başkanlığı.
- Özbek, T. (1988) Yanal Su Alma Yapılı Sabit Bağlamalarda Katı Madde Girişini Engelleyici Önlemler, DSİ Teknik Bülten, Sayı:66, s.43-51.
- Özbek, T. (1991) Yanal Su Alma Yapıları Tasarım İlkeleri, Türkiye İnşaat Mühendisliği 11. Teknik Kongresi-1.Cilt, 8-11 Ekim 1991, sayfa: 396-408.
- Özölçer, İ.H. (1998) Kıyı Korunmasında Mahmuzların Etkilerinin Araştırılması, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Trabzon 1998.
- Patel, H.K., Arora, S., Lade, A.D., Kumar, B., Azamathulla, H.M. (2023) Flow behaviour concerning bank stability in the presence of spur dike – A review, Water Supply Vol 23 No 1, 237 doi: 10.2166/ws.2022.418.
- Patel, H.K., Kumar, B. (2023) Hydro-morphological behavior around T-shaped spur dikes with downward seepage, Scientific Reports (2023) 13:10454, <https://doi.org/10.1038/s41598-023-37694-w>.
- Peker, A.S. (2025) Taşkın Kontrol Yapılarında Projelendirme Esasları, DSİ Genel Müdürlüğü Taşkın Kontrol Dairesi Başkanlığı Semineri Ders Notları, sf.181-192, 26-30 Mayıs 2025, Antalya.
- Yu, H., Kawaike, K., Yamanoi, K., Koshiba, T. (2024) 3D Simulation of The Effect of Spur Dikes Spacing on Bed Deformation, Flow and Performance Evaluation in Meandering Channels, Journal of JSCE, Vol.12, No.2, 23-16178, 2024.
- Zhang, H., Nakagawa, H. (2008a), Scour Around Spur Dyke: Recent Advances and Future Researches, Annuals of Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ., No.51 B, 633-652.
- Zhang, H., Nakagawa, H. (2008b) : Investigation on Morphological Consequences of Spur Dyke with Experimental and Numerical Methods. In: Wang, Sam S. Y. (Hg.): ICHE 2008. Proceedings of the 8th International Conference on Hydro-Science and Engineering, September 9-12, 2008, Nagoya, Japan. Nagoya: Nagoya Hydraulic Research Institute for River Basin Management.

BÖLÜM 3

ERGENE NEHRİ SU KALİTESİNİN BAKTERİYOLOJİK VE FİZİKOKİMYASAL AÇIDAN DEĞERLENDİRİLMESİ

*Sadiye YÜCE TAVUKÇU¹, Gokhan Onder ERGUVEN²,
Numan YILDIRIM³*

¹ Tekirdağ Büyükşehir Belediyesi, Tekirdağ, Türkiye sadiyeyuce@gmail.com ORCID: 0009-0004-3598-2830

² Prof. Dr., Munzur Üniversitesi, İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi, Siyaset Bilimi ve Kamu Yönetimi Bölümü, Kentleşme ve Çevre Sorunları ABD, Tunceli, Türkiye gokhanondererguven@gmail.com ORCID: 0000-0003-1573-080X

³ Prof.Dr., Munzur Üniversitesi, Tunceli Meslek Yüksek Okulu, Bitki ve Hayvansal Üretim Bölümü, Organik Tarım Programı, Tunceli, Türkiye numanyildirim44@gmail.com ORCID: 0000-0003-1109- 8106

GİRİŞ

Nehir ekosistemleri, açık sistem yapıları nedeniyle hem doğal süreçlerin hem de antropojenik faaliyetlerin etkisine doğrudan maruz kalan, oldukça hassas su ortamlarıdır (Wetzel, 2011). Yağmur suyu, yüzey akışları, atmosferik taşınım gibi doğal süreçlerin yanı sıra, evsel atıklar, sanayi kirliliği ve tarımsal faaliyetler de nehir sularının kalitesini büyük ölçüde etkilemektedir (Zgrundo & Bogaczewicz-Adamczak, 2004). Nehre deşarj edilen sanayi ve evsel atıklar, zamanla suyun hem kimyasal hem de biyolojik dengesini bozarak, kirlilik düzeyinin artmasına ve nehir ekosisteminde ciddi problemlere yol açmaktadır (Noga vd., 2013).

Su kirliliği, insan faaliyetleri veya doğal süreçler sonucunda su ortamının fiziksel, kimyasal ve biyolojik dengesinin bozulması ve bu değişimin ekosistem işleyişini olumsuz yönde etkilemesi olarak değerlendirilmektedir. Kirliliğin en yaygın kaynakları arasında sanayi atıkları, tarımsal faaliyetlerden gelen kimyasal gübre ve pestisitler, evsel atık sular, yağmur suyu akıntıları ve doğal olaylar (volkanik patlamalar, toprak kaymaları) yer almaktadır (Yılmaz vd., 2020).

Alıcı ortamlardaki kirliliğin temel kaynağı, nehre doğrudan veya dolaylı yollarla yayılan kimyasal, biyolojik kirlilik ve besin yükleridir. Bu kirleticiler, sudaki çözülmüş oksijen seviyesini düşürerek balık türlerinin ve su bitkilerinin yaşamını tehdit eder; aynı zamanda bazı parametrelerin eşik değerleri geçildiğinde, ekosistemdeki trofik zincir boyunca biyobirikim yoluyla kalıcı toksisite oluşturabilir (Barinova & Mamanazarova, 2021). Bu kirleticiler, suyun kimyasal yapısını değiştirir ve su ekosistemlerinde yaşayan organizmaların sağlığı üzerinde zararlı etkiler yaratabilir. Özellikle ağır metaller, biyolojik birikim yoluyla sucul organizmaların vücudunda birikir ve besin zinciri boyunca insanlara ulaşarak ciddi sağlık sorunlarına yol açabilmektedir (Akkan & Mutlu, 2022).

Su kirliliği ve su kalitesi kavramları, ekosistem sürekliliği ve toplum sağlığı açısından birbirini tamamlayan temel çevresel göstergeler olarak değerlendirilmektedir (WHO, 2017; EC, 2000). Su kaynaklarının kirliliğinin kontrol altına alınması ve su kalitesinin düzenli olarak izlenmesi, ekosistemlerin dengesini korurken, temiz suyun sağlanması, insan sağlığı ve tarımsal üretimin sürdürülebilirliği açısından da elzemdir (Noga vd., 2013). Özellikle sanayi ve tarım sektörlerinde alınan önlemler, su kaynaklarının kirlenmesini önlemeye yönelik stratejik adımları içerir. Günümüzde su kirliliği, hem gelişmiş hem de gelişmekte olan ülkelerde çevresel sürdürülebilirliği tehdit eden küresel ölçekli bir sorun olarak önemini artırarak sürdürmektedir (Tokatlı, 2020).

Bu çalışmada, nehrin farklı noktalarında belirlenen istasyonlardan ilkbahar ve sonbahar mevsimlerinde toplanan su numuneleri ile fizikokimyasal ve bakteriyolojik analizler yapılarak, su kalitesinin mevsimsel olarak nasıl değiştiğini ve kirlilik seviyelerini tespit etmek amaçlanmıştır. Fizikokimyasal analizler kapsamında çözülmüş oksijen, pH, sıcaklık, tuzluluk, bulanıklık, AKM (Askıda Katı Madde), TOK (Toplam Organik Karbon), KOİ (Kimyasal Oksijen İhtiyacı) ve BOİ (Biyolojik Oksijen İhtiyacı) gibi parametreler bakteriyolojik analizlerde koliform bakterilerin varlığı nehrin kirlilik düzeyini ortaya konulmuştur. Ayrıca analiz sonuçları Yerüstü Su Kalitesi Yönetmeliği ile kıyaslanacak olup sanayi ve kentleşmenin getirdiği kirlilik yükü belirlenmiştir.

Su Kalitesini Etkileyen Faktörler

Su kalitesini etkileyen faktörler, doğal ve insan kaynaklı olmak üzere iki ana gruba ayrılabilir. Doğal faktörler, suyun kaynağı, iklim koşulları, mevsimsel değişiklikler, yer altı suları ve suyun jeolojik özellikleri gibi unsurları içerir (Shen vd., 2018). Yağışlı dönemlerde artan yüzey akışları, suya taşınan organik ve inorganik maddelerin miktarını artırarak su kalitesini düşürebilir. Buna karşılık, kurak dönemlerde suyun debisinin azalması, kirleticilerin yoğunlaşmasına neden olabilir (Şahin vd., 2020). Ayrıca, su kalitesi üzerinde etkili olan bir diğer doğal faktör ise suyun bulunduğu bölgenin bitki örtüsüdür. Yoğun bitki örtüsü, suyun nitrat ve fosfat gibi kirleticilerden arındırılmasında önemli bir rol oynarken, bitki örtüsünün az olduğu alanlarda bu kirleticiler su kaynaklarına kolayca karışabilmektedir (Hwang vd., 2006).

İnsan kaynaklı faktörler ise su kalitesi üzerinde çok daha belirgin ve genellikle olumsuz etkiler yaratmaktadır. Sanayi, tarım ve kentleşme gibi insan faaliyetleri, su kaynaklarına doğrudan ya da dolaylı yoldan kirleticilerin taşınmasına neden olur (Shen vd., 2018). Sanayi tesislerinden salınan ağır metaller, kimyasallar ve organik kirleticiler, suyun kimyasal yapısını bozarak ekosistemler ve halk sağlığı üzerinde ciddi tehlikeler yaratır. Tarımsal faaliyetlerden kaynaklanan gübre ve pestisitler, yağmur suyu ile birlikte yüzey akıntıları yoluyla su kaynaklarına karışarak suyun nitrat, fosfat ve amonyak içeriğini artırır (Sawaiker & Rodrigues, 2017). Bu durum, özellikle göl ve nehirlerde ötrofikasyona yol açar; bu da sucul yaşamı olumsuz etkileyen alg patlamalarına ve oksijen yetersizliğine neden olabilir. Ayrıca, kentleşme ile birlikte evsel atıkların yetersiz arıtma tesislerinden doğrudan su kaynaklarına boşaltılması, suyun mikrobiyal ve kimyasal kalitesini ciddi şekilde bozabilmektedir (Yan vd., 2024). Evsel atıklardan kaynaklanan koliform bakteriler ve diğer patojenler, suyun içme suyu olarak kullanılmasını tehlikeli hale getirir (Darvishi vd., 2016).

Su kalitesini etkileyen diğer bir faktör ise enerji santralleri ve barajlardır. Bu tür tesisler, su sıcaklığını artırarak suyun oksijen tutma kapasitesini azaltabilir, bu da sucul yaşamın devamlılığı açısından olumsuz bir etki yaratabilir (Kalyoncu vd., 2009). Termal kirlilik olarak adlandırılan bu durum, özellikle balık popülasyonlarının azalmasına ve su ekosistemlerinin bozulmasına yol açabilmektedir (Shen vd., 2018). Sonuç olarak, su kalitesini etkileyen faktörler, hem doğal süreçlerden hem de insan kaynaklı faaliyetlerden kaynaklanmakta ve su kaynaklarının sürdürülebilir bir şekilde korunması için bu faktörlerin dikkatle izlenmesi gerekmektedir (Maraşlıoğlu vd., 2020).

Su Kirliliğinin Ekosistemler Üzerindeki Etkileri

Su kirliliği, su ekosistemleri üzerinde geniş çaplı ve ciddi olumsuz etkiler yaratmaktadır. Su ekosistemleri, balıklar, bitkiler, mikroorganizmalar ve diğer sucul canlılar için yaşam alanı sağlamaktadır (Albay and Koker 2020). Ancak kirleticiler, bu hassas dengeyi bozarak sucul organizmaların yaşamını tehdit eder. Kimyasal kirleticiler, özellikle ağır metaller ve toksik maddeler, sucul organizmalar üzerinde doğrudan toksik etkilere sahiptir (Ustaoglu vd., 2021). Bu tür maddeler, balıkların ve diğer sucul canlıların vücutlarında biyolojik birikim yaparak besin zinciri boyunca insanlara kadar ulaşabilir. Ayrıca, bu toksik maddeler, sucul bitki örtüsünü de olumsuz etkileyerek fotosentez sürecini yavaşlatır ve suyun oksijen seviyesinin düşmesine yol açar (Shen vd., 2018).

Su kirliliği ayrıca ekosistemlerin biyolojik çeşitliliğini de olumsuz etkiler. Kirletici maddeler, habitatların bozulmasına ve bazı türlerin yok olmasına yol açabilir (Celekli vd., 2019). Özellikle hassas sucul organizmalar, su kalitesindeki değişikliklere karşı daha duyarlıdır

ve bu türlerin popülasyonları, kirlilik seviyeleri arttıkça azalır. Bununla birlikte, kirli suların akışkanlığı azalabilir ve bu da nehir yataklarının ve göllerin tortu ile dolmasına neden olabilir (Shen vd., 2018).

Su Kalitesinin Halk Sağlığı Üzerindeki Etkileri

Su kaynaklarında bulunan patojen mikroorganizmalar, özellikle koliform bakteriler ve *E. coli* gibi dışkı kökenli bakteriler, su yoluyla bulaşan hastalıkların başlıca sorumlularıdır (Atıcı vd., 2018). Bu tür bakteriler, özellikle içme suyu kaynaklarına karıştığında, ishal, tifo, dizanteri ve kolera gibi hastalıkların yayılmasına neden olabilir. Kirli suyun tarımsal sulamada kullanılması, bu patojenlerin gıda zincirine taşınmasına ve insanların kirli gıdalar tüketerek hastalanmasına yol açabilir.

Su kalitesinin düşük olması, sadece mikrobiyal kirlleticilerle sınırlı kalmaz, aynı zamanda kimyasal kirleticiler de halk sağlığını tehdit eder. Özellikle ağır metaller, endüstriyel kimyasallar ve pestisitler suya karışarak içme suyu yoluyla insan vücuduna alınabilir. Bu kirleticiler, uzun vadede kansere, sinir sistemi bozukluklarına ve üreme sistemi problemlerine yol açabilmektedir (Tokatlı, 2018).

Su Kirliliğinin Ekonomik ve Sosyal Boyutları

Su kirliliğinin ekonomik boyutlarından ilki, tarımsal üretim üzerindeki olumsuz etkilerdir. Su kaynaklarının kirlenmesi, tarımsal sulamada kullanılan suyun kalitesini düşürür ve bu da tarım ürünlerinin verimliliğini doğrudan etkiler. Kirli suyla sulanan bitkiler, büyüme süreçlerinde yavaşlama ve zararlı kimyasal maddelerden kaynaklanan sağlık sorunları yaşar (Nubi vd., 2024). Yüksek tuzluluk, ağır metal ve kimyasal maddelerle kirlenmiş suyun tarımsal sulamada kullanılması, bitkilerde tuz birikimine, toprakta verim kaybına ve ürün kalitesinin düşmesine neden olabilir. Çiftçiler, kirlenmiş sulardan etkilenen ürünlerde meydana gelen zararları telafi etmek için daha fazla gübre ve kimyasal kullanmak zorunda kalabilir, bu da maliyetleri artırır ve çevresel sorunları derinleştirir (Hepsağ, 2003).

Kirli su kaynaklarına sahip bölgelerde, turizm faaliyetleri azalır ve bu da turizm sektöründe büyük ekonomik kayıplara yol açar (Nubi vd., 2024). Aynı zamanda, turistik tesisler, kirli su nedeniyle operasyonlarını sürdüremeyebilir ve bu durum, hem yerel halkın hem de işletmelerin gelir kaybı yaşamasına neden olur (Dalkıran vd., 2020).

Fizikokimyasal Su Kalitesi Parametreleri

Su kalitesi üzerinde belirleyici rol oynayan fizikokimyasal parametreler arasında çözülmüş oksijen (DO), pH, sıcaklık, tuzluluk, iletkenlik, toplam çözülmüş katı (TDS), kimyasal oksijen ihtiyacı (KOI) ve biyokimyasal oksijen ihtiyacı (BOI) gibi temel göstergeler yer alır (Xue vd., 2023). Bu parametreler, suyun içindeki maddelerin konsantrasyonu, oksijen taşıma kapasitesi, organik madde miktarı ve diğer fiziksel özellikleri hakkında kritik bilgiler sunar.

Bakteriyolojik Su Kalitesi Parametreleri

Bu parametreler, suyun insan sağlığı ve çevresel sürdürülebilirlik açısından uygun olup

olmadığını belirlemek amacıyla kullanılır (Tokatlı, 2013). Özellikle içme suyu kaynakları ve tarımsal sulamada kullanılan suyun güvenliği, bakteriyolojik parametrelerin incelenmesiyle sağlanır. Bakteriyolojik su kalitesini belirleyen en önemli göstergeler arasında koliform bakteriler, *E. coli* ve diğer patojen mikroorganizmalar bulunur. Bu mikroorganizmalar, insan veya hayvan dışkı yoluyla su kaynaklarına karışır ve suyun kirli olduğuna dair en belirgin işaretler arasında yer alır (Tan vd., 2013).

Türkiye’de Su Kirliliği Yönetimi ve Mevzuat

Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği, Türkiye’de su kalitesinin korunması ve kirlilikle mücadele edilmesi amacıyla 1988 yılında yürürlüğe girmiş ve zamanla güncellenmiştir. Yönetmelik, su kaynaklarına atık deşarjı yapan tesislerin uyması gereken sınır değerleri belirleyerek, su kirliliğini önlemeyi hedefler. Aynı zamanda, su kaynaklarının izlenmesi, korunması ve iyileştirilmesi için yapılması gereken çalışmaları detaylandırır. Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği, atık su deşarj izinleri ve arıtma tesislerinin işletilmesi konularında kapsamlı düzenlemeler getirir.

MATERYAL VE METOD

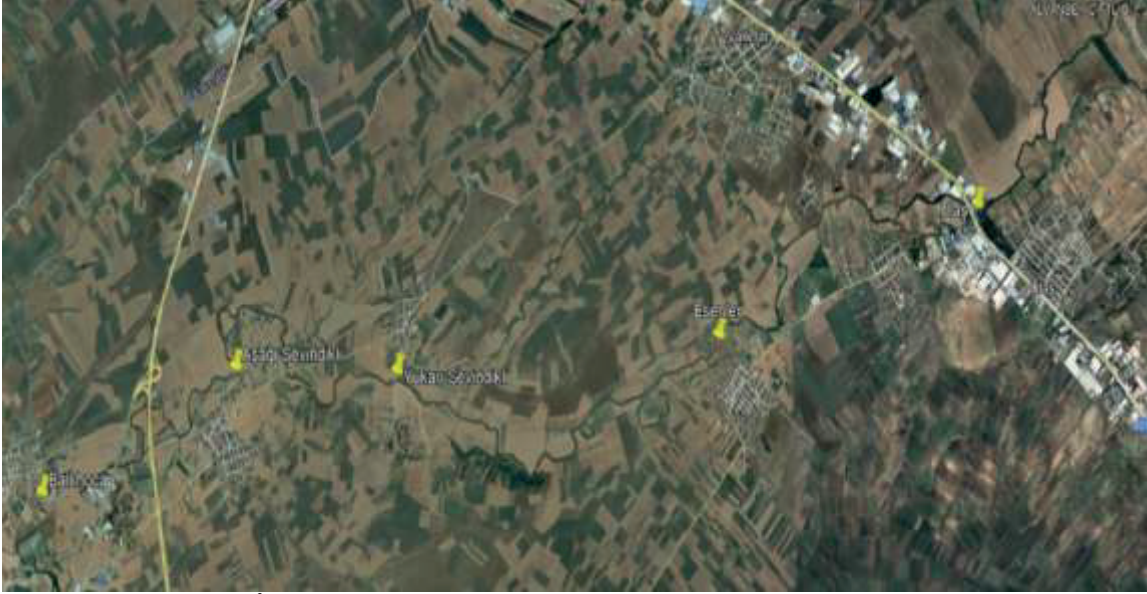
Çalışma sahası

Ergene Nehri, Tekirdağ Saray ilçesinin kuzeyinde Yıldız (Istranca) Dağları’ndan doğar ve güneybatı yönünde akar. İnanlı yakınlarında Çorlu Deresi ile birleşerek kuzeybatıya döner. Uzunköprü ilçesinin Adasarhanlı Köyü yakınlarında Meriç Nehri ile birleşir. Ergene Nehri, uluslararası su olan Meriç Nehri’nin en önemli kolu durumundadır. Ergene Nehri’nin en önemli kolları Çorlu Deresi, Soğucak Deresi, Lüleburgaz Deresi, Şeytan Dere, Teke Dere, Ana Dere ve Hayrabolu Deresi’dir (Tarım ve Orman Bakanlığı, 2010).

Çalışmada, Ergene Nehri’nin su kalitesinin belirlenmesi için 5 istasyondan su numunesi alınarak parametrelerin analizi yapılmıştır. Ergene Nehri’nin Ulaş, Esenler, Yukarı Sevindikli, Aşağı Sevindikli ve Ballıhoca güzergahında belirlenen beş ayrı istasyondan 2024 yılının ilkbahar ve sonbahar dönemlerinde numuneler alınmıştır. İstasyonlara ait koordinat bilgileri Tablo 2.1’de ve işaretlenen istasyonlar ise Şekil 2.1’de yer almaktadır. Ayrıca arazi çalışması sırasında çekilen fotoğraflar Resim 2.1, 2.2, 2.3, 2.4 ve 2.5’te bulunmaktadır.

Tablo 2.1. Numune Alım İstasyonlarına Ait GPS Koordinatları

Numune Noktası	Mahalle	İlçe	Enlem	Boylam
1. Nokta	Ulaş	Ergene	41.243268°	27.694244°
2. Nokta	Esenler	Ergene	41.228722°	27.642701°
3. Nokta	Yukarı Sevindikli	Muratlı	41.224912°	27.579919°
4. Nokta	Aşağı Sevindikli	Muratlı	41.219108°	27.537683°
5. Nokta	Ballıhoca	Muratlı	41.211688°	27.511285°



Şekil 2.1. Çalışma İstasyonları



Şekil 2.2. Çalışma İstasyonu Çevresinde Bulunan OSB Arıtma Tesisleri



Resim 2.1. Ulaş İstasyonu



Resim 2.2. Esenler İstasyonu



Resim 2.3. Yukarı Sevindikli İstasyonu



Resim 2.4. Aşağı Sevindikli İstasyonu



Resim 2.5. Ballıhoca İstasyonu

Numune Alımı ve Analiz Yöntemleri

Tablo 2.1’de belirtilen istasyonlardan alınan su numuneleri standart metotlara uygun şekilde alınmış ve saklanmıştır. (TS EN ISO 5667-3, TS 9547 ISO 5667-12). Her istasyondan sodyum tiyosülfatlı polipropilen şişelere su örnekleri alınarak fizikokimyasal ve bakteriyolojik analizler yapılmıştır. Laboratuvar analizleri için koruma önlemleri alınarak +4 °C’de saklanmıştır.

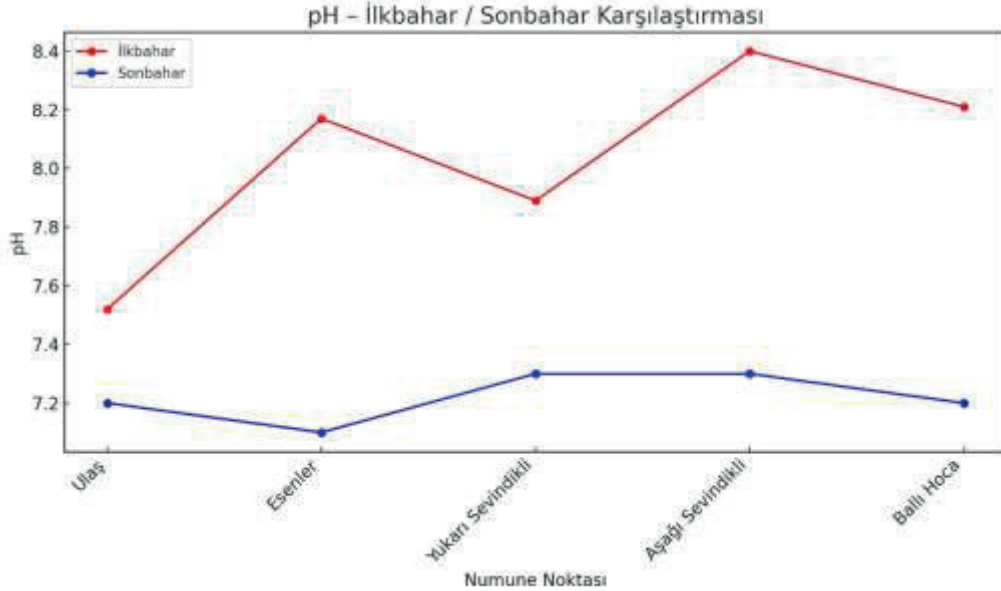
Fizikokimyasal parametreler; sıcaklık (SM 2550 B), çözülmüş oksijen (ASTM D888 Metot C), pH (TS EN ISO 10523), tuzluluk (SM 2520 B) değerleri WTW markalı Multi 3430 modeli multiparametre cihazı ile, bulanıklık (TS EN ISO 7027-1) değeri VELP SCIENTIFICA marka TB1 model türbidimetre cihazı ile, AKM (2540 D) değeri gravimetrik standard metot ile, TOK değeri (TS 8195 EN 1484) ile, KOİ (SM 5220 B) değeri açık reflaks-titrimetrik metot ile ve BOİ (SM 5210 B) değeri 5 günlük test uygulanarak tespit edilmiştir.

Escherichia coli (TS EN ISO 9308-1) ve Koliform bakteriler (TS EN ISO 9308-1) kromojenik besiyeri (CCA) kullanılarak tespit edilmiştir.

BULGULAR ve TARTIŞMA

Bu bölümde, Ergene Nehri'nden toplanan fizikokimyasal ve bakteriyolojik verilere dayanarak yapılan analizlerin sonuçları sunulmuştur. Veriler, örnekleme yapılan beş istasyon bazında karşılaştırılmış, mevsimsel değişiklikler ve kirlilik kaynakları detaylı bir şekilde incelenmiştir. Elde edilen veriler 30.11.2012 tarihli ve 28483 sayılı Resmî Gazete’de yayımlanarak yürürlüğe giren Yerüstü Su Kalitesi Yönetmeliği hükümlerine göre değerlendirilip ve ilgili parametreler için su kalite sınıfları da tespit edilmiştir. Hem fizikokimyasal hem de bakteriyolojik parametrelerin coğrafi ve zamansal dağılımlarını gösteren grafikler, Şekil 3.1, Şekil 3.2, Şekil 3.3, Şekil 3.4, Şekil 3.5, Şekil 3.6, Şekil 3.7, Şekil 3.8 ve Şekil 3.9’da sunulmuştur. Ayrıca, belirlenen kirlilik kaynaklarının etkileri ve bu etkilerin genel ekosistem üzerindeki yansımaları da tartışma kısmında ele alınmıştır.

Şekil 3.1 pH değerinin mevsimsel ve istasyonlar arası değişkenliğini göstermektedir. İstasyonlar ve mevsimler arası pH 7,1-8,4 arasında değişmekte olup akarsu ekosistemleri için kabul edilen doğal sınırlar içinde kalmaktadır. Sucul organizmaların büyük çoğunluğunun pH 7–8,5 aralığında optimum gelişim gösterdiği ve bu sınırların ekosistem sağlığı açısından kritik olduğu çeşitli güncel çalışmalarda vurgulanmaktadır (Salem et al., 2025).

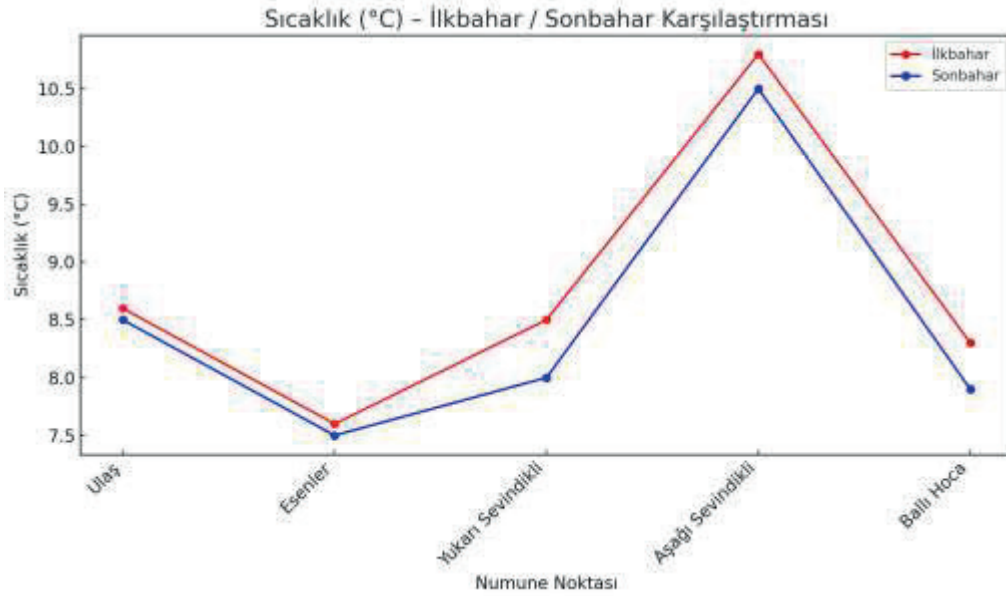


Şekil 3.1. pH Parametresinin İlkbahar/Sonbahar Karşılaştırması

İstasyonlar bazında değerlendirildiğinde “Ulaş” istasyonu her iki dönemde de nötr aralıkta kalırken, “Esenler” istasyonundan itibaren alkali karakter ilkbaharda belirginleşmekte, sonbaharda ise nötrleşme eğiliminde olduğu tespit edilmiştir. İlkbaharda pH değerlerinin sonbahara kıyasla daha yüksek olması, bu dönemde artan sıcaklık ve güneşlenme süresine bağlı olarak biyolojik aktivitenin yükselmesiyle ilişkilendirilebilir. Sonbaharda ise pH değerinin düşmesi azalan biyolojik aktivite ile açıklanabilir. Bu bulgu, literatürde bildirilen mevsimsel pH değişim eğilimleriyle uyumludur (Oğuz et al., 2019).

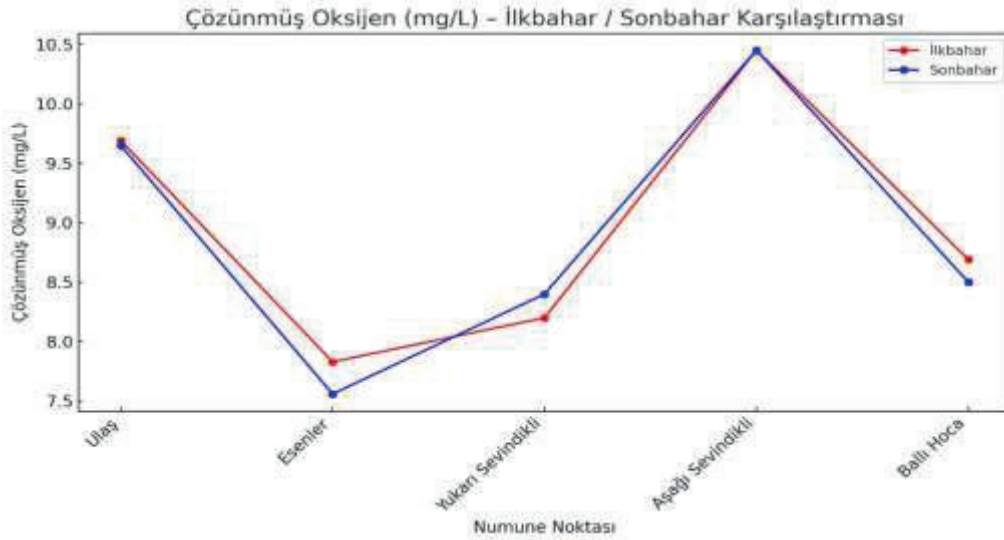
Şekil 3.2 sıcaklık parametresinin mevsimsel ve istasyonlar arası değişkenliği incelendiğinde, değerlerin 7,5–10,8 °C aralığında değiştiği görülmektedir. Bu durum, ilkbahar dönemine ait numunelerin Nisan ayı sonuna doğru alınmış olması nedeniyle su kütlelerinin atmosferik sıcaklık artışına bağlı olarak ısınma sürecine girmiş olması ile açıklanabilir. Tüm

istasyonlarda ilkbahar döneminde ölçülen sıcaklık değerlerinin sonbahar dönemine kıyasla daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Buna karşılık sonbahar döneminde sıcaklık değerlerinin daha düşük seyretmesi, numunelerin Kasım ayı sonuna yakın bir tarihte alınması ve bu dönemde bölgede kış koşullarına geçişin etkisi ile ilişkili olduğu düşünülmektedir. Su sıcaklığının mevsimsel değişimlere ve hava sıcaklığına yüksek duyarlılık gösterdiği, özellikle ilkbahar ve sonbahar dönemlerinde belirgin farklılıklar sergilediği ortaya konmuştur (Nam ve ark., 2021).



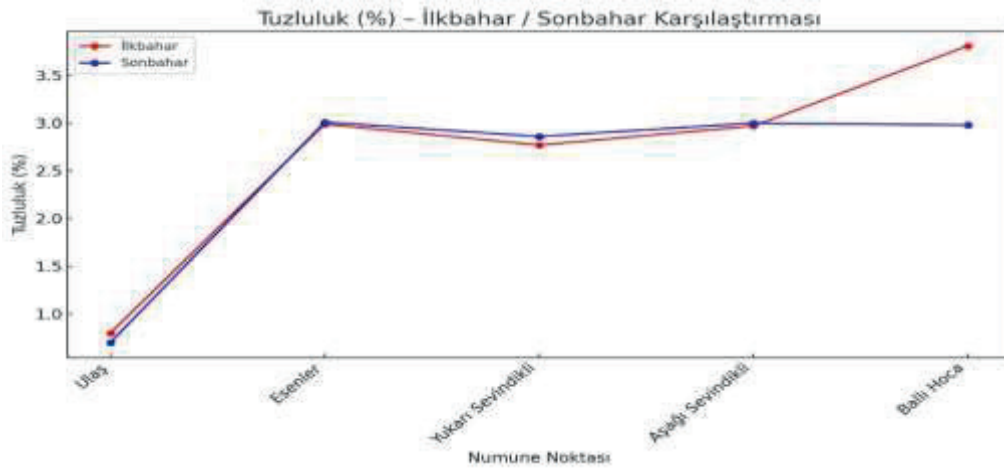
Şekil 3.2. Sıcaklık Parametresinin İlkbahar/Sonbahar Karşılaştırması

Şekil 3.2 ve 3.3 sıcaklık ve çözülmüş oksijen parametrelerinin birlikte değerlendirildiğinde, mevsimsel sıcaklık değişimlerinin çözülmüş oksijen değerleri üzerinde dalgalanmalara neden olduğu görülmektedir. Genel olarak su sıcaklığı ile çözülmüş oksijen arasında ters yönlü bir ilişki bulunmaktadır. Ancak “Aşağı Sevindikli” istasyonunda yüksek sıcaklık değerlerine (10,5–10,8 °C) rağmen çözülmüş oksijen konsantrasyonunun da yüksek (10,45 mg/L) olduğu tespit edilmiştir. Yine “Yukarı Sevindikli” istasyonunda da sonbahar mevsiminde sıcaklık artışı çözülmüş oksijen değerini arttırmıştır. Bu durum, suyun daha iyi havalanması ile açıklanabilir. Suyun aerasyon ve karışım koşulları oksijen transferi üzerinde sıcaklığa bağlı fizikokimyasal sınırlamanın ötesinde etkili olabilmektedir (Yavuz ve ark., 2025; Yao ve ark., 2022).



Şekil 3.3. Çözünmüş Oksijen Parametresinin İlkbahar/Sonbahar Karşılaştırması

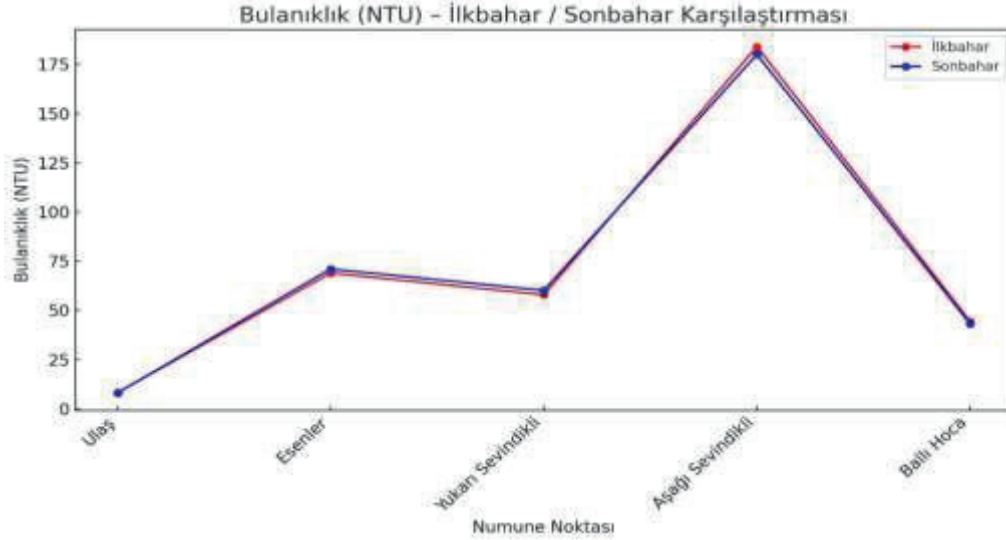
Şekil 3.4'te tuzluluk parametresinin mevsimsel ve istasyonlar arası dağılımı incelendiğinde, en düşük değerlerin “Ulaş” istasyonunda (%0,7–%0,8) ölçüldüğü, en yüksek tuzluluk değerlerinin ise özellikle ilkbahar döneminde “Ballı Hoca” istasyonunda (%3,81) kaydedildiği görülmektedir. Bu durum, akarsu boyunca aşağı havza yönünde ilerledikçe tuzluluk seviyesinin kademeli olarak arttığını göstermektedir. “Ulaş” istasyonundan sonra, özellikle “Ballı Hoca” istasyonunda gözlenen tuzluluk artışı, bölgede etkili olan noktasal (endüstriyel deşarjlar, evsel atık sular) ve yayılı kirlilik kaynakları (tarımsal drenaj, gübre taşınımı ve yüzey akış) ile ilişkilendirilebilir. Akarsu sistemlerinde tuzluluk artışının, antropojenik baskılar, tarımsal girdiler ve yerleşim alanlarına bağlı olarak önemli ölçüde değişkenlik göstermekte ve havza boyunca aşağı yönlü birikim eğilimi sergilemektedir (Zhang ve ark., 2020; Varol, 2021). Özellikle tarımsal faaliyetlerin yoğun olduğu alanlarda, sulama geri dönüş sularının nehir sistemlerine karışması tuzluluk düzeyini artıran temel etkenlerden biri olarak gösterilmektedir (Karadavut & Yıldırım, 2019).



Şekil 3.4. Tuzluluk Parametresinin İlkbahar/Sonbahar Karşılaştırması

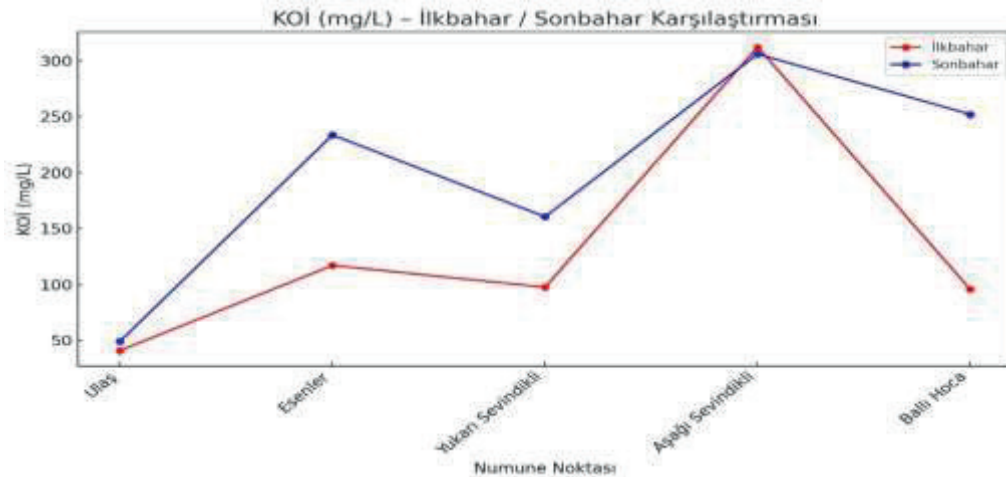
Şekil 3.5'te bulanıklık parametresinin mevsimsel ve istasyonlar arası dağılımı incelendiğinde, ilkbahar ve sonbahar dönemleri arasında belirgin bir mevsimsel farklılık görülmemekte, buna karşın istasyonlar arasında önemli düzeyde mekânsal değişkenlik olduğu

dikkat çekmektedir. Her iki mevsimde de en düşük bulanıklık değerleri “Ulaş” istasyonunda, en yüksek değer ise “Aşağı Sevindikli” istasyonunda ölçülmüştür. Bu durum, bulanıklık parametresi üzerindeki temel belirleyicinin mevsimsel koşullardan ziyade istasyonların çevresel özellikleri ve lokal baskılar olması ile açıklanabilir. “Aşağı Sevindikli” istasyonunda her iki dönemde de yüksek bulanıklık değerlerinin kaydedilmesi, bu bölgedeki tarımsal faaliyetler, yüzey akışıyla taşınan ince sedimentler, toprak erozyonu ve noktasal deşarjların sudaki askıda katı madde miktarını artırmasıyla ilişkilendirilebilir (Li et al., 2020).

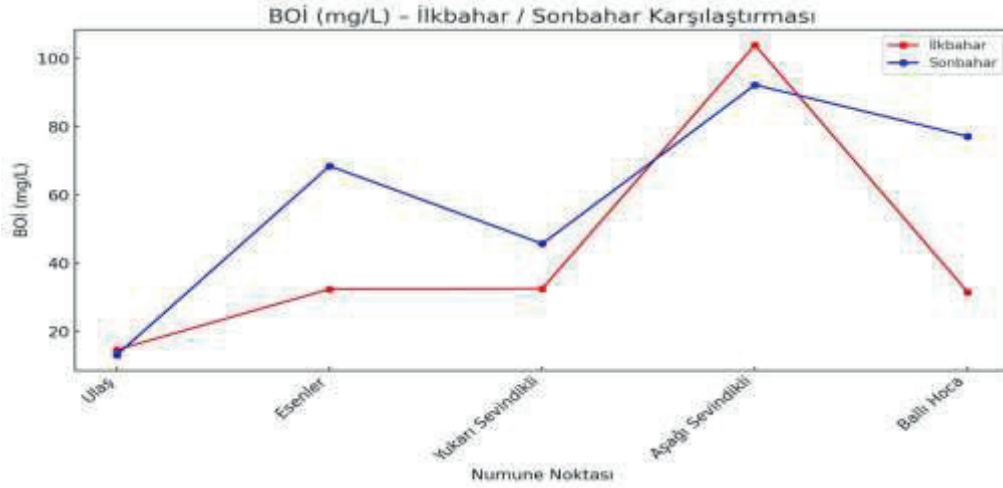


Şekil 3.5. Bulanıklık Parametresinin İlkbahar/Sonbahar Karşılaştırması

Şekil 3.6’da görüldüğü üzere, KOİ değerleri sonbahar döneminde genel olarak ilkbahara kıyasla daha yüksek seyretmektedir. Özellikle “Esenler”, “Yukarı Sevindikli” ve “Ballı Hoca” istasyonlarında sonbahar döneminde KOİ değerlerinde belirgin artışlar olduğu tespit edilmiştir. Bu durum, sonbaharda debinin azalmasına bağlı olarak suyun seyrelme kapasitesinin düşmesi ve organik kirleticilerin daha yoğun hale gelmesi ile açıklanabilir (Patil et al., 2022).



Şekil 3.6. KOİ Parametresinin İlkbahar/Sonbahar Karşılaştırması

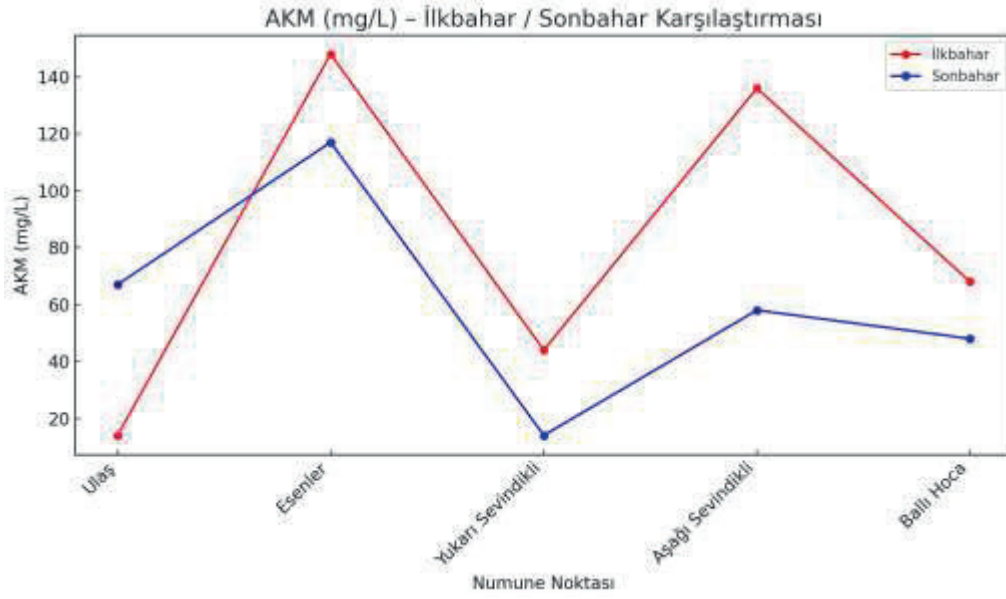


Şekil 3.7. BOİ Parametresinin İlkbahar/Sonbahar Karşılaştırması

3.7’de BOİ değerlerinin mevsimsel değişimi incelendiğinde, sonbahar döneminde birçok istasyonda ilkbahara kıyasla daha yüksek değerler ölçüldüğü görülmektedir. “Esenler”, “Yukarı Sevindikli” ve “Ballı Hoca” istasyonlarında sonbahar BOİ değerlerinin belirgin şekilde artması, bu dönemde su hacminin azalmasıyla birlikte biyolojik olarak parçalanabilir organik maddelerin birikmesiyle ilişkilendirilebilir. Düşük debi koşullarında mikroorganizmaların tükettiği çözünmüş oksijen miktarının artması ve organik madde yükünün yoğunlaşması, BOİ seviyelerini yükselten temel faktörler arasında gösterilmektedir (Varol, 2021).

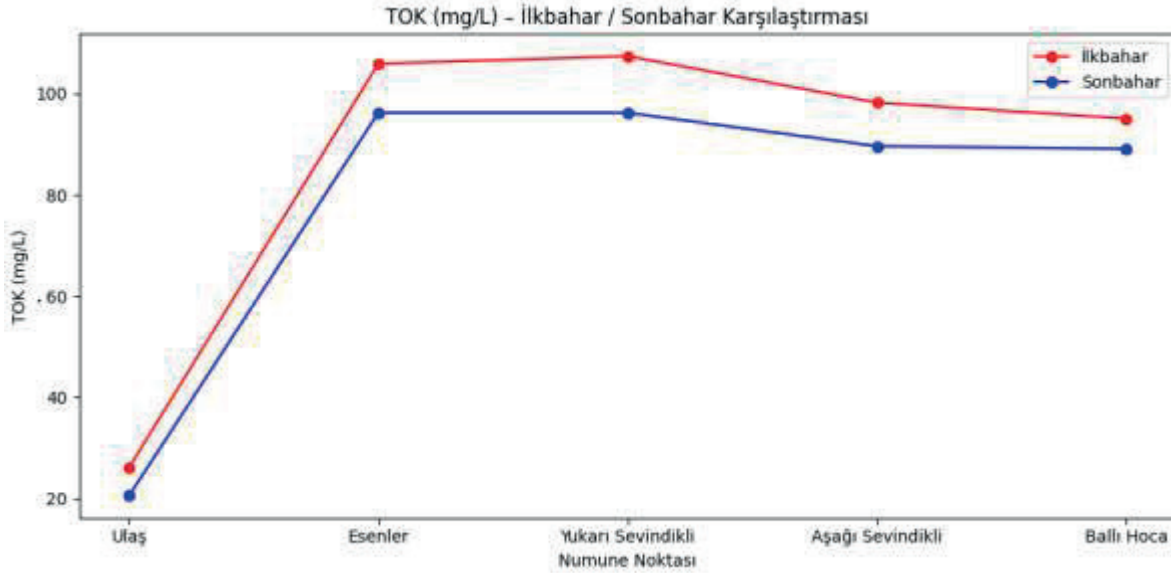
Özellikle sonbahar döneminde KOİ ve BOİ değerlerinin birçok istasyonda ilkbahara kıyasla daha yüksek olduğu görülmektedir. “Esenler”, “Yukarı Sevindikli” ve “Ballı Hoca” istasyonlarında sonbahar KOİ ve BOİ konsantrasyonlarının artması, bu dönemde organik kirliliğin yoğunlaştığını ortaya koymaktadır. Bu durum, sonbaharda debinin düşmesi ve suyun seyreltme kapasitesinin azalması sonucu organik maddelerin ortamda birikmesiyle ilişkilendirilebilir (Patil et al., 2022).

Şekil 3.8’de AKM parametresinin mevsimsel ve istasyonlar arası dağılımı değerlendirildiğinde, ilkbahar döneminde ölçülen değerlerin genel olarak sonbahara kıyasla daha yüksek seyrettiği görülmektedir. Özellikle “Esenler” ve “Aşağı Sevindikli” istasyonlarında ilbaharda gözlenen belirgin artışlar, bu dönemde artan yüzey akışıyla taşınan partikül madde ve organik yükün birikmesiyle ilişkilendirilebilir (Varol, 2021).



Şekil 3.8. AKM Parametresinin İlkbahar/Sonbahar Karşılaştırması

Şekil 3.9’ incelendiğinde, TOK değerlerinin genel olarak sonbahar döneminde ilkbahara kıyasla daha düşük seyrettiği görülmektedir. Bu durum, sonbaharda organik madde miktarında kısmi bir azalma eğilimine işaret etmektedir. İlkbahar döneminde özellikle “Esenler” ve “Yukarı Sevindikli” istasyonlarında yüksek TOK değerlerinin ölçülmesi, bu dönemde artan yüzey akışıyla taşınan organik partiküller ve tarımsal kaynaklı girdiler ile ilişkilendirilebilir. Bu durum, TOK konsantrasyonlarının mevsimsel hidrometeorolojik koşullara duyarlı olduğunu ortaya koyan literatürle uyumludur (Zhang ve ark., 2019).



Şekil 3.9. TOK Parametresinin İlkbahar/Sonbahar Karşılaştırması

Mevzuata göre değerlendirmeler

30.11.2012 tarihli ve 28483 sayılı Resmî Gazete’de yayımlanarak yürürlüğe giren Yerüstü Su Kalitesi Yönetmeliği hükümlerine göre pH, çözünmüş oksijen, kimyasal oksijen ihtiyacı ve biyolojik oksijen ihtiyacı parametreleri Tablo 3.4’e göre değerlendirilmiştir.

pH değeri 7,1-8,4 arasındadır. pH parametresi açısından 3 sınıfa da dahil olduğu görülmektedir. Bu noktada I. (çok iyi) sınıfa konulabilir. Çözünmüş oksijen ölçümleri 7,56-10,45 mg/L arasındadır. Çözünmüş oksijen parametresi açısından “Esenler” istasyonu II. (az kirlenmiş su) sınıf, diğer istasyonlar ise I. sınıf (çok iyi) su kalite sınıfında yer almaktadır. BOİ ölçümleri 13,1-104,0 mg/l arasındadır. BOİ parametresi açısından III. (kirlenmiş su) su kalite sınıfında yer almaktadır. KOİ ölçümleri 41,0-312,2 mg/l arasındadır. KOİ parametresi açısından “Ulaş” istasyonu II. (az kirlenmiş su) sınıf, diğer istasyonlar ise III. (kirlenmiş su) su kalite sınıfında yer almaktadır.

Tablo 3.7. Kıtaiçi Yerüstü Su Kaynaklarının Genel Kimyasal ve Fizikokimyasal Parametreler Açısından Sınıflarına Göre Kalite Kriterleri

Su Kalite Parametreleri	Su Kalite Sınıfları ^(a)		
	I (çok iyi)	II (iyi)	III (orta)
Renk (m ⁻¹)	RES 436 nm: ≤ 1,5 RES 525 nm: ≤ 1,2 RES 620 nm: ≤ 0,8	RES 436 nm: 3 RES 525 nm: 2,4 RES 620 nm: 1,7	RES 436 nm: > 4,3 RES 525 nm: > 3,7 RES 620 nm: 2,5
pH	6-9	6-9	6-9
İletkenlik (µS/cm)	< 400	1000	> 1000
Yağ ve Gres (mg/L)	< 0,2	0,3	> 0,3
Çözünmüş oksijen (mg/L)	> 8	6	< 6
Kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ) (mg/L)	< 25	50	> 50
Biyokimyasal oksijen ihtiyacı (BOİ ₅) (mg/L)	< 4	8	> 8
Amonyum azotu (mg NH ₄ ⁺ -N/L)	< 0,2	1	> 1
Nitrat azotu (mg NO ₃ ⁻ -N/L)	< 3	10	> 10
Toplam kjeldahl-azotu (mg N/L) ^(b)	< 0,5	1,5	> 1,5
Toplam azot (mg N/L) ^(c)	< 3,5	11,5	> 11,5
Orto fosfat fosforu (mg o-PO ₄ -P/L)	< 0,05	0,16	> 0,16
Toplam fosfor (mg P/L)	< 0,08	0,2	> 0,2
Florür (µg/L)	≤ 1000	1500	> 1500
Mangan (µg/L)	≤ 100	500	> 500
Selenyum (µg/L)	≤ 10	15	> 15
Sülfür (µg/L)	≤ 2	5	> 5

Bulgular, nehrin su kalitesinin özellikle orta ve aşağı kesimlerde belirgin şekilde bozulduğunu ve kirlilik baskısının istasyonlar arasında heterojen bir dağılım gösterdiğini ortaya koymakta olup Ergene Havzası’nın uzun süredir maruz kaldığı yoğun endüstri, tarım ve yerleşim baskısının su kalitesi üzerindeki olumsuz etkilerini güncel verilerle doğrulamaktadır. Bu durum, Ergene Havzası’nda yoğun sanayi faaliyetleri, tarımsal üretim, yerleşim alanları ve yetersiz arıtma uygulamalarının su kalitesi üzerinde belirleyici rol oynadığını göstermektedir (Mutlu & Uncumusaoğlu, 2020).

Çalışmadn elde edilen veriler, Ergene Havzası’nın uzun süredir ağır bir kirlilik baskısı altında olduğunu ortaya koyan önceki çalışmalarla (özellikle organik kirlilik ve mikroorganik kirlleticiler açısından) büyük ölçüde uyum göstermektedir. Tokatlı’nın (2020) çok değişkenli istatistiksel analizlerle yaptığı değerlendirmede, Ergene Nehri’nin genel su kalitesinin çoğunlukla III.–IV. sınıf aralığında olduğu ve özellikle endüstriyel ve evsel deşarjların yoğun olduğu kesimlerde kirlilik yükünün kritik seviyelere ulaştığı rapor edilmiştir.

pH değerlerinin 7,1–8,4 aralığında değiştiği ve genel olarak nötr-hafif alkali karakterde seyrettiği belirlenmiştir. Bu durum, akarsuyun tamponlama kapasitesinin yüksek olduğunu yansıtmaktadır. Benzer şekilde, Türkiye’deki birçok akarsuda pH değerlerinin jeolojik yapı ve

hidrojeokimyasal süreçlerle ilişkili olarak nötraliteye yakın seyrettiği bildirilmektedir (Varol & Şen, 2018).

Çözünmüş oksijen değerleri genel olarak (7,56–10,45 mg/L) kabul edilebilir aralıklarda bulunmuş olsa da, yüksek organik yük göstergeleri nehirde potansiyel bir oksijen tüketim baskısının varlığına işaret etmektedir. Özellikle düşük debi dönemlerinde seyreltme kapasitesinin azalması, organik maddelerin daha yoğun birikmesine ve oksijen rejiminin bozulmasına neden olabilmektedir. Bu durum, düşük akış koşullarında organik kirlilik konsantrasyonlarının arttığını gösteren literatüre de uygundur (Gani, 2023).

KOİ ve BOİ değerlerinde gözlenen artışlar, özellikle Esenler, Aşağı Sevindikli ve Ballı Hoca istasyonlarında belirgin olup, bu alanlarda yoğun organik kirlilik baskısına işaret etmektedir. Literatürde, KOİ ve BOİ değerlerindeki artışın düşük debi dönemlerinde seyreltme kapasitesinin azalmasına bağlı olarak arttığı belirtilmektedir (Varol et al., 2019).

Bulanıklık ve AKM değerlerinin bazı istasyonlarda yüksek seyretmesi, sudaki partikül yükünün arttığını ve bunun büyük ölçüde tarımsal yüzey akışı, erozyon ve yayılı kirlilik kaynaklarıyla ilişkili olduğunu düşündürmektedir. Özellikle Aşağı Sevindikli istasyonunda bulanıklığın 184 NTU'ya ulaşması, bu bölgede fiziksel kirlilik yükünün de belirgin olduğunu göstermektedir. Bu tür yüksek bulanıklık değerlerinin suyun ışık geçirgenliğini azaltarak ekosistem dengesini bozduğu belirtilmektedir (Bilgin & Konuk, 2020).

Tokatlı (2019) ve Tokatlı vd. (2021)'nin Meriç–Tunca–Ergene sistemi üzerinde yürüttüğü izleme çalışmalarında, Tunca ve Ergene kollarının Meriç ana kolu üzerinde bozucu etkiye sahip olduğu, organik madde ve besin tuzu yüklerinin havza genelinde su kalitesini düşürdüğü vurgulanmıştır. Bu tezde de Aşağı Sevindikli, Esenler ve Ballı Hoca istasyonlarında tespit edilen yüksek KOİ, BOİ, AKM ve bulanıklık değerleri, bahsi geçen çalışmaların bulgularını destekler niteliktedir ve söz konusu istasyonların, havzadaki organik ve partikül kirliliğin “odak bölgeleri” olduğunu göstermektedir.

Bu çalışma kapsamında ölçülen yüksek KOİ, BOİ ve TOK değerleri; literatürde Ergene'nin “yüksek organik yük altında, kirli bir akarsu” olarak tanımlanmasıyla tam bir paralellik göstermektedir. Özellikle Aşağı Sevindikli istasyonunda maksimum KOİ (312,2 mg/L) ve BOİ (104 mg/L) değerlerinin elde edilmesi, Emadian vd. (2021) ve Tokatlı (2020) çalışmalarında rapor edilen yüksek organik kirlilik bulgularını desteklemekte ve söz konusu kesimin hem noktasal (OSB deşarjları, yerleşim atıkları) hem de yayılı (tarımsal drenaj, yüzey akışı) kirlilik kaynakları açısından kritik bir karışım bölgesi olduğunu göstermektedir.

Bu çalışmada tüm istasyonlarda bakteriyolojik parametrelerin >100 CFU/mL düzeyine ulaştığı tespit edilmiş; bu durum nehir suyunun halk sağlığı açısından potansiyel risk barındırdığını ve özellikle Dünya Sağlık Örgütü'nün rekreasyonel su kalite rehberine göre rekreasyonel kullanım için uygun olmadığını göstermiştir (WHO, 2021).

Ergene Nehri'ne ilişkin bu bulgular, Türkiye'deki diğer yoğun baskı altındaki nehir sistemleriyle karşılaştırıldığında da benzer bir tabloyu işaret etmektedir. Benzer iekilde Bakan vd. (2010), Kızılırmak Nehri için yaptıkları kapsamlı çalışmada, nehrin endüstriyel deşarjlar, tarımsal drenaj ve kentsel atıklar nedeniyle yüksek besin tuzu, ağır metal ve organik madde yüküne maruz kaldığını ve su kalitesinin birçok kesitte zayıf seviyede olduğunu rapor etmişlerdir. Kızılırmak'taki bu durum, Ergene'de gözlenen yüksek KOİ/BOİ, bulanıklık ve

AKM değerleriyle benzer bir kirlilik dinamiğine işaret etmektedir. Kirmir Çayı ve Sakarya Havzası üzerine yapılan çalışmalarda, organik kirlilik yükünün doğrudan kanalizasyon deşarjları ve arıtılmamış atıksularla ilişkili olduğu; özellikle düşük akış dönemlerinde KOİ, BOİ ve bakteriyel yüklerin belirgin şekilde arttığı vurgulanmıştır (Küçük, 2008). Benzer şekilde Karasu Nehri, Büyük Menderes ve bazı diğer akarsular için yapılan değerlendirmelerde de, arıtma yetersizliği ve tarımsal faaliyetlerin etkisiyle yüzey sularının organik ve besin tuzu kirliliği bakımından bozulduğu ve bu durumun su kalitesini önemli ölçüde olumsuz etkilediği ortaya konulmuştur (Elhatip & Koçyiğit, 2016).

Ayrıca Ergene Nehri ve yan kollarıyla birlikte Sazlıdere, Tunca Nehri, Meriç Nehri üzerine yürütülen izleme çalışmalarında da, organik kirlilik, askıda katı madde taşınımı ve düşük su kalitesinin havza geneli üzerinde olumsuz etkiler yarattığı defalarca vurgulanmıştır (Tokatlı, 2020).

Bu çalışmada Kasım döneminde KOİ ve BOİ değerlerinde gözlenen artışın, düşük debi ve azalan seyreltme kapasitesi ile ilişkilendirilmesi hem Türkiye’deki diğer nehirlerde hem de dünya genelindeki çalışmalarla tamamen uyumludur. Düşük akış koşullarında organik madde ve besin tuzu konsantrasyonlarının artması, biyolojik oksijen tüketimini tetiklemekte ve su kolonunda oksijen rejimini baskılamaktadır.

SONUÇ ve ÖNERİLER

Ergene Nehri’nin seçilen beş istasyonunda 2024 yılının Nisan ve Kasım dönemlerinde yapılan izleme çalışmalarıyla, su kalitesinin mevsimsel ve mekânsal boyutta değerlendirilmesi sağlanmıştır. Elde edilen bulgular ve literatürle yapılan karşılaştırmalar doğrultusunda aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

Nehir suyu, özellikle orta ve aşağı kesimlerde organik ve bakteriyolojik açıdan ciddi kirlilik baskısı altındadır. Bu durum, nehir ekosisteminin doğal işleyişini olumsuz etkilemekte ve su kalitesini sürdürülebilirlik sınırlarının dışına taşımaktadır.

Aşağı Sevindikli istasyonu, KOİ, BOİ ve bulanıklık parametreleri açısından en kritik nokta olarak belirlenmiştir. Bu istasyonda gözlenen yüksek değerler, yoğun organik yük ve partikül taşınımının varlığına işaret etmiştir. Bu durum, söz konusu bölgenin hem noktasal hem de yayılı kirlilik kaynaklarının birleşik etkisi altında olduğunu açıkça ortaya koymaktadır.

Ulaş istasyonu, diğer istasyonlara kıyasla daha düşük organik ve bakteriyolojik yük göstermekte; ancak bu durum nehrin genel olarak “temiz” olduğu anlamına gelmemektedir. Ergene Havzası genelinde endüstri, tarım ve yerleşim baskısının devam ettiği ve kirlilik probleminin havza ölçeğinde yaygın olduğu anlaşılmaktadır.

Kasım döneminde KOİ ve BOİ değerlerinde gözlenen artış, düşük debi ve azalan seyreltme kapasitesiyle ilişkilendirilmiştir. Bu durum, hem Türkiye’deki (Kızılırmak, Kirmir, Karasu vb.) hem de dünya genelindeki nehirlerde rapor edilen “düşük akış- yüksek kirlilik” ilişkisiyle uyumludur.

Tüm istasyonlarda >100 CFU/mL seviyesindeki bakteriyolojik değerler, Dünya Sağlık Örgütü’nün rekreasyonel su kalite kriterlerine göre Ergene Nehri’nin doğrudan temaslı kullanım (yüzme, su sporları vb.) açısından riskli olduğunu ve halk sağlığı bakımından

potansiyel tehdit oluşturduğunu ortaya koymuştur.

Ergene Nehri, özellikle orta ve aşağı kesimlerinde yüksek organik madde, askıda katı madde, bulanıklık ve bakteriyolojik yük altında olup, Yerüstü Su Kalitesi Yönetmeliği (2012) sınıflandırmasına göre genel olarak III. sınıf (kirlenmiş su) su kalitesi aralığında yer almaktadır. Bu durum, Tokatlı (2020) ve diğer Ergene Nehri üzerine çalışmalarla uyumludur.

Aşağı Sevindikli, Esenler ve Ballı Hoca istasyonları; yüksek KOİ, BOİ, AKM ve bulanıklık değerleri ile nehrin en kritik bölgeleri olarak öne çıkmaktadır. Bu istasyonlar, noktasal (OSB, evsel atıksu deşarjları) ve yayılı (tarımsal faaliyetler, erozyon ve sediman taşınımı) kirlilik kaynaklarının birleşik etkisi altındadır.

Ergene Nehri'nde organik kirlilik, askıda katı madde ve mikrobiyolojik yükün birlikte bulunması, nehrin yalnızca kimyasal açıdan değil, ekolojik açıdan da baskı altında olduğunu göstermektedir. Yapılan çalışmaların da ortaya koyduğu üzere, Ergene Havzası, uzun vadeli çevresel ve sağlık riskleri barındıran kritik bir bölge niteliğindedir.

Bu sonuçlar doğrultusunda Ergene Havzası'nda su kalitesinin iyileştirilmesine yönelik uygulanması gereken önlemler; mevcut atıksu arıtma tesislerinin etkinliğinin artırılması ve düzenli olarak denetlenmesi, özellikle kritik istasyonlar çevresinde ileri arıtma teknolojilerine geçişin teşvik edilmesi, OSB ve sanayi tesislerinden kaynaklanan deşarjların sıkı kontrol altına alınması ve çevrimiçi izleme sistemlerinin yaygınlaştırılmasını içermelidir. Bunun yanı sıra tarımsal kaynaklı yayılı kirliliğin azaltılması amacıyla kontrollü gübreleme ve bilinçli pestisit kullanımı sağlanmalı, nehir kenarlarında tampon bölgeler oluşturularak yüzey akışıyla taşınan askıda katı madde ve besin tuzu yükü sınırlandırılmalıdır. Düşük debi dönemlerinde su kalitesinin daha da bozulabildiği dikkate alınarak bu dönemlere özgü izleme ve yönetim stratejileri geliştirilmesi, mikrobiyolojik kirlilik açısından rekreasyonel kullanımın sınırlandırılması ve kamuoyunun bilgilendirilmesi de büyük önem taşımaktadır.

Teşekkür: Bu çalışma, Munzur Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından desteklenmiştir. **Proje No:** YLMU024-05

5. KAYNAKLAR

- Akkan, T., & Mutlu, T. (2022).** Assessment of heavy metal pollution of Çoruh river (Turkey). *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi*, 12(1), 355-367.
- Albay, R.A., Köker, L. (2020).** Composition and Distribution of Benthic Diatoms in Different Habitats of Burdur River Basin. *Turkish Journal of Water Science and Management*, 4(1), 31-57.
- Atıcı, T., Tokatlı, C., & Çiçek, A. (2018).** Diatoms of Seydisuyu Stream Basin (Turkey) and assessment of water quality by statistical and biological approaches. *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences*, 36(1).
- Barinova, S., & Mamanazarova, K. (2021).** Diatom algae-indicators of water quality in the lower Zarafshan river, Uzbekistan. *Water*, 13(3), 358.
- Bilgin, A., & Konuk, M. (2020).** Influence of turbidity and suspended solids on aquatic ecosystem functions. *Turkish Journal of Water Science & Management*, 4(2), 85–94.
- Celekli, A., Toudjani, A., Gümüş, E. Y., Kayhan, S., Lekesiz, H., & Cetin, T. (2019).** Determination of trophic weight and indicator values of diatoms in Turkish running waters for water quality assessment. *Turkish Journal of Botany*, 43(1), 90-101.
- Çevre ve Şehircilik Bakanlığı (2018).** Meriç–Ergene Havzasında Endüstriyel Atıksu Yönetimi Raporu. Ankara.
- Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı (ÇŞİDB). (2021).** Ergene Havzası Su Kalitesi Raporu. Ankara.
- Dalkıran, N., Karacaoğlu, D., Mestik, D. T., Karabayırlı, G., Atak, S., Koşucu, T. N. A., Coşkun, F., & Akay, E. (2020).** Mustafakemalpaşa Çayı'nın (Bursa) su kalitesinin faktör analizi kullanılarak değerlendirilmesi. *Acta Aquatica Turcica*, 16(1), 124-137.
- Elhatip, H., & Koçyiğit, H. (2016).** Environmental effects of water quality of Melendiz Stream and Mamasin Dam site in Aksaray City in the Central Anatolia of Turkey. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 6, 321–330.
- Gani, M. (2023).** Impact of low flow conditions on pollutant concentration in river systems. *Journal of Water and Environmental Management*, 37(4), 215–223.
- Hepsağ, E. (2003).** Köyceğiz-Dalyan Lagün havzası su kaynaklarının su kalitesi.
- Hwang, S.-J., Kim, N.-Y., Won, D. H., An, K. K., Lee, J. K., & Kim, C. S. (2006).** Biological assessment of water quality by using epilithic diatoms in major river systems (Geum, Youngsan, Seomjin River), Korea. *Journal of Korean Society on Water Environment*, 22(5), 784-795.
- Kalyoncu, H., Çiçek, N. L., Akköz, C., & Yorulmaz, B. (2009).** Comparative performance of diatom indices in aquatic. *African Journal of Agricultural Research*, 4(10), 1032-1040.
- Karadavut, U., & Yıldırım, M. (2019).** Effects of agricultural drainage and land use on salinity levels in freshwater ecosystems. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 43(4), 456–468.
- Küçük, S. (2008).** The effect of organic pollution on benthic macroinvertebrate fauna in the Kirmir Creek in the Sakarya Basin. *ADÜ Ziraat Fakültesi Dergisi*, 5(1), 5–12.
- Maraşlıoğlu, F., Bektaş, S., & Özen, A. (2020).** Comparative performance of physicochemical and diatom-based metrics in assessing the water quality of Mert Stream, Turkey. *Journal of Ecological Engineering*, 21(8).
- Mutlu, E., & Uncumusaoğlu, A. A. (2020).** Water pollution evaluation of Ergene River using multivariate statistical techniques. *Environmental Earth Sciences*, 79, 1–15.
- Nam, S., Lim, H., Choi, B., Li, Q., Moon, H., & Choi, H. T. (2021).** Seasonal water temperature variations in response to air temperature and discharge changes in a

- forested headwater stream: a case study from the Bukhan River basin, South Korea. Forest Science and Technology*, 17(1), 39–45.
- Noga, T., Stanek-Tarkowska, J., Pajaczek, A., Peszek, Ł., & Kochman, N. (2013).** Ecological characterization of diatom communities in the Wisłok River with application of their indicatory role to the evaluation of water quality. *Journal of Ecological Engineering*, 14(4).
- Nubi, O. A., Oyatola, O. O., & Adeleye, A. O. (2024).** Hydrological distribution of physicochemical parameters, heavy metals, and their ecotoxicological implications in Lagos Lagoon, off the Gulf of Guinea Basin. *Sustainable Water Resources Management*, 10(2), 84.
- Oğuz, İ., Yılmaz, E., & Kaya, M. (2019).** Investigation of the temporal variation of water quality in Ziyaret Pond Basin. *Journal of Agricultural Sciences*, 25(2), 215–223.
- Patil, R. R., Desai, S. S., & Kulkarni, A. R. (2022).** Impact of seasonal flow variation on organic pollution indicators in river ecosystems. *Journal of Water Process Engineering*, 49, 103012.
- Salem, M. S., Hassan, N. M. H., Aly, M. M., Soliman, Y., Peters, R. W., & Mostafa, M. K. (2025).** Integrating deep learning and process-based modeling for water quality prediction in canals: CNN-LSTM and QUAL2K analysis of Ismailia Canal. *Sustainability*, 17(17), 7743.
- Sawaiker, R. U., & Rodrigues, B. F. (2017).** Biomonitoring of selected freshwater bodies using diatoms as ecological indicators.
- Şahin, B., Akar, B., & Barinova, S. (2020).** Bioindication of Water Quality by Diatom Algae in High Mountain Lakes of the Natural Park of Artabel Lakes, (Gümüşhane, Turkey). *Transylvanian Review of Systematical and Ecological Research*, 22(1), 1-28.
- T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. (2024).** Tekirdağ İli 2024 Çevre Durum Raporu
- T.C. Tekirdağ Valiliği. (2021).** Tekirdağ İli Çevre Durum Raporu.
- Tan, L., Wong, K., & Hassan, R. (2013).** Microbial contamination in surface water and its public health implications. *Journal of Water and Health*, 11(4), 623–635.
- Tarım ve Orman Bakanlığı (2022).** Meriç-Ergene Havzası Su Kalitesi İzleme Raporu. Ankara.
- Taş, B. (2021).** Trophic state assessment based on summer phytoplankton community structure and trophic indices: A small tectonic lake in Turkey. *Desalination and Water Treatment*, 214, 390-401.
- Tokath, C. (2013).** Use of statistical methods in water quality assessment: A case study of Balkan Arboretum Area in Trakya University (Edirne, Turkey). *Journal of Applied Biological Sciences*, 7(3), 79-83.
- Tokath, C. (2018).** Drinking water quality assessment in villages located in Meriç River Basin (Edirne, Turkey). *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences*, 36(3), 871-886.
- Tokath, C., Solak, C. N., & Yılmaz, E. (2020).** Water quality assessment by means of bio-indication: A case study of ergene river using biological diatom index. *Aquatic Sciences and Engineering*, 35(2), 43-51.
- Tokath, C., & Gümüş, T. (2021).** Impact of the COVID-19 lockdown period on surface water quality in the Meriç-Ergene River Basin, Northwest Turkey. *Environmental Research*, 197, 111051.
- Tokatli, C. (2019).** Sediment quality of Ergene River Basin: Bio–ecological risk assessment of toxic metals. *Environmental Monitoring and Assessment*, 191(11), 706.
- Ustaoglu, F., Taş, B., Tepe, Y., & Topaldemir, H. (2021).** Comprehensive assessment of water quality and associated health risk by using physicochemical quality indices and

- multivariate analysis in Terme River, Turkey. *ESPR*, 28(44), 62736-62754.
- Varol, M., & Şen, B. (2018).** Assessment of surface water quality using water quality indices and multivariate statistical techniques: A case study of Tigris River, Turkey. *Environmental Monitoring and Assessment*, 190(4), 1–16.
- Varol, M., Gökot, B., Bekleyen, A., & Şen, B. (2019).** Spatial and temporal variations in surface water quality of the Tigris River, Turkey. *Journal of Geochemical Exploration*, 201, 1–10.
- Varol, M. (2021).** Assessment of surface water quality in a large river basin influenced by agricultural and industrial activities. *Environmental Monitoring and Assessment*, 193(2), 1–15.
- Wetzel, R. G. (2011).** Limnology: Lake and river ecosystems (3rd ed.). Academic Press.
- World Health Organization (WHO). (2017).** *Guidelines for drinking-water quality* (4th ed., incorporating the 1st addendum). World Health Organization.
- WHO. (2021).** Guidelines on recreational water quality: Coastal and fresh waters (Vol. 1).
- Xue, H., Wang, L., Zhang, L., Wang, Y., Meng, F., & Xu, M. (2023).** Exploration of Applicability of Diatom Indices to Evaluate Water Ecosystem Quality in Tangwang River in Northeast China. *Water*, 15(20), 3695.
- Yao, Y., vd. (2022).** *Research on the release relationship between dissolved oxygen and aeration rates under varying temperature and flow conditions*. Water Science & Technology: Water Supply.
- Yavuz, V. S., Kartal, V., & Sambito, M. (2025).** Impact of temperature and flow rate on oxygen dynamics and water quality in major Turkish rivers. *Scientific Reports*, 15, Article 22830.
- Yılmaz, E., Koç, C., & Gerasimov, I. (2020).** A study on the evaluation of the water quality status for the Büyük Menderes River, Turkey. *Sustainable Water Resources Management*, 6(6), 100.
- Zhang, Y., Li, H., Wang, Y., & Chen, J. (2020).** Spatiotemporal variation of salinity and its driving factors in river systems under anthropogenic pressure. *Science of the Total Environment*, 715, 136912.
- Zhang, Y., Li, H., Chen, J., & Wang, Q. (2019).** Seasonal variation of dissolved organic carbon and its relationship with land use and hydrological conditions in river systems. *Science of the Total Environment*, 683, 1–10.
- Zgrundo, A., & Bogaczewicz-Adamczak, B. (2004).** Applicability of diatom indices for monitoring water quality in coastal streams in the Gulf of Gdańsk region, northern Poland. *Oceanological and Hydrobiological Studies*, 33(3), 31-46.

BÖLÜM 4

SOĞUKTAN KORUYUCU SPOR GİYSİLERDE KATMANLI YAPILAR VE YENİ TEKNOLOJİLER

Esra TAŞTAN ÖZKAN¹

¹ Doç. Dr. Esra Taştan Özkan, Bitlis Eren Üniversitesi, Güzel Sanatlar Fakültesi, Geleneksel Türk Sanatları, Bitlis, Türkiye. e-mail: etas-tan@beu.edu.tr. (ORCID: 0000-0001-8950-6048)

1. Giriş

Soğuktan koruyucu spor giyim, sporcuları ve açık hava meraklılarını spor veya fiziksel aktiviteler sırasında soğuk ortamların olumsuz etkilerinden korumak için özel olarak tasarlanmış giyim ve ekipman anlamına gelir. Bu spor giyim kategorisi, vücut ısını koruyan, ısı kaybını önleyen ve giyen kişiyi rüzgardan, nemden ve düşük sıcaklıklardan koruyan yalıtım malzemeleri ve yapısal özellikler içerir. Bu sayede, soğuktan koruyucu spor giyim, soğuk koşullara maruz kalmanın neden olduğu hipotermi, donma ve kas performansında azalma gibi riskleri en aza indirir.

Soğuk iklim koşullarında kullanılan koruyucu spor giysilerin üretiminde katmanlı giysi yapıları kullanılmaktadır. Katmanlı yapıların en iç katmanında nem yönetimini sağlamak için nem emici katman yer almaktadır. Bu katman cilt üzerinde biriken nemi dış ortama atarak kullanıcının konforlu hissetmesini sağlamaktadır. Orta katmanda ısı izolasyonu özelliğine sahip bir katman bulunmaktadır. Bu katman sayesinde vücut ısısı stabil tutulabilmektedir. En üstte ise su geçirmezlik veya rüzgar geçirmezlik özelliğine sahip dış katman bulunmaktadır. Bu katmanın görevi ise kar, rüzgar, yağmur gibi koşullara karşı kullanıcıyı korumaktır. Eller, kollar ve baş içinde koruma sağlayan şapka, çorap ve eldiven gibi aksesuarlar kullanılmaktadır. Bununla birlikte katmanlarda artırma veya azaltma yapılarak giysinin kullanılacağı iklim koşullarına göre uyarlama yapılabilir. Özellikle Goretex ismiyle bilinen malzeme sayesinde su iticilik ve nefes alabilirlik özelliği birlikte sağlanabilir.



Şekil 1. Soğuktan koruyucu spor giysi örnekleri (<https://www.thenorthface.com.tr>)

Koruyucu spor giysilerin tasarımında sentetik ve doğal lifler birlikte kullanılabilir. Lif seçimi yapılırken giysiden beklenen izolasyon, nem yönetimi, dayanıklılık ve antimikrobiyal

özelliklere dikkat edilmelidir. Sentetik malzemelere örnek olarak polyester lifleri, Thinsulate, aerojel ile takviye edilen poliüretan nanolifler verilebilir. Bu lifler termal izolasyon ve nem yönetimi özellikleri nedeniyle tercih edilmektedir. Aerojel katkılı poliüretan nanolifler mükemmel termal stabilite ve izolasyon sağlamanın yanında giysinin hacmini ve ağırlığını düşürerek geleneksel malzemelere göre daha avantajlı bir yapı sağlar (Venkataraman ve ark., 2018). Aerojel dokusuz yüzey sentetik kumaşlar piyasadaki malzemelere göre daha fazla termal izolasyon sağlayarak hem giysinin konforunu hem de koruyuculuğunu arttırmaktadırlar. Sentetik kumaşlar aynı zamanda giysi içerisindeki sıcaklık ve nemi dengeleyerek, soğuğa maruz kalınan durumlarda sıcaklık ve nem algısını olumlu yönde etkilemektedirler. Bununla birlikte sentetik malzemelerin aşınma direnci ve dayanıklılığının iyi olması nedeniyle, bu malzemelere yanmazlık, ultraviyole ışınlara karşı koruma ve antimikrobiyal özellikler gibi çok fonksiyonlu özellikler entegre ederek koruyucu giysiler tasarlanabilir (Bhattacharjee ve ark., 2019; Schwarz ve ark., 2024).

Doğal malzemelerden olan yün, tüy, hayvansal ve bitkisel lif özleri doğal yalıtım ve nefes alabilirlik özellikleri nedeniyle önemlidir. Doğal liflerin kıvrımlı yapıları, nem yönetimi özellikleri nedeniyle yüksek termal konfor özellikleri bulunmasından dolayı soğuk hava koşullarında bile kişileri konforlu hissettirmektedirler. Antimikrobiyal açıdan bakıldığında, özler ve uçucu yağlarla işlem gören doğal tekstiller, daha çok çevre dostu özelliklere sahiptir (Bibi ve ark., 2024). Fakat doğal lifler sentetik liflere göre daha dayanıksız, aşınmaya ve biyolojik bozunmaya daha yatkındırlar. Bu nedenle çoğunlukla sentetik liflerin sunduğu avantajları sağlamamaktadırlar. Sentetik kumaşlar yalıtım, nefes alabilirlik ve su buharı geçirgenliği açısından geleneksel doğal kumaşlardan daha iyi performans gösterir; bu da aşırı terleme veya üşüme olmadan vücut ısını korumada önemli bir faktördür (Lee ve Obendorf, 2007). Bir diğer sınırlayıcı faktör ise doğal liflerin yüksek nem emme ve şişme davranışdır; bu durum, soğuk ortamlarda giyim sırasında sıklıkla karşılaşılan nemli veya ıslak koşullar altında mekanik performansı ve boyutsal kararlılığı düşürür. Nem, lif yapısını değiştirerek lif-matris yapışmasının zayıflamasına ve sertlik ile mukavemetin azalmasına yol açar (İslam ve Hasan, 2024). Bu durum, tutarsız mekanik özelliklere katkıda bulunur, performansı ve suya karşı olan direnci iyileştirmek için kimyasal veya fiziksel işlemlere ihtiyaç duyulmasına neden olur. Doğal lifler doğası gereği daha düşük çekme dayanımı, eğilme dayanımı ve darbe direncine sahiptir, neme bağlı mekanik bozulmaya karşı hassastır ve değişken kalite ve zayıf lif-matris bağları sergiler. Bu mekanik sınırlamalar, dayanıklılık ve yapısal bütünlük gerektiren zorlu soğuk iklim uygulamalarında doğrudan kullanımlarını kısıtlamaktadır; ancak hibritleştirme ve nano

mühendislik stratejileri mekanik performanslarını önemli ölçüde iyileştirebilir (Jariwala ve Jain, 2019; Sarker ve ark., 2019; Shah ve ark., 2019). Sentetik malzemeler ısı yalıtımı, nem yönetimi, ve dayanıklılık sağlamak için tasarlanırken, doğal malzemeler sürdürülebilirlik, doğal konfor ve çevre dostu özellik gerektiren yerlerde kullanılırlar. Soğuktan koruyucu spor giysiler tasarlanırken sentetik veya doğal malzeme seçimi giysinin kullanılacağı iklim koşuluna bağlıdır. Hibritleştirme, doğal lifleri sentetik liflerle veya diğer doğal liflerle birleştirerek her türün sinerjik güçlerinden yararlanmak suretiyle soğuk giyim uygulamaları için doğal liflerin mekanik özelliklerini geliştirmek için yapılan bir işlemdir. Bu uygulama soğuk havada kullanılacak spor giysilerde kullanılan kompozit malzemelerin çekme mukavemetini, sertliğini, darbe direncini ve termal kararlılığını iyileştirmektedirler. Yüzey kimyasal işlemleri ve bağlayıcı maddeler, doğal lifler ve polimer matrisler arasındaki ara yüzey yapışmasını iyileştirerek yük transfer verimliliğini ve genel mekanik stabiliteyi artırır (Awad ve ark., 2022). Bu, daha yüksek çekme ve eğilme dayanımlarına yol açarak, mekanik stres altında soğuktan koruyucu giysilerin daha iyi performans göstermesini sağlar.

Kenevir, jüt, hindistan cevizi lifi, keten, sisal veya rami gibi doğal liflerin cam, karbon, Kevlar veya aramid gibi sentetik liflerle hibritleştirilmesiyle, her lif türünün tamamlayıcı özellikleri sayesinde kompozitin genel mekanik performansı önemli ölçüde artar (Nugraha ve ark., 2022). Sentetik lifler genellikle kompozitlerde dış katmanları veya deriyi oluşturarak daha yüksek mukavemet ve dayanıklılık sağlarken, doğal lifler çekirdek görevi görerek hafif ve çevre dostu özellikleri korur (Shahzad ve Nasir, 2016). Bambu kaynaklı nano ve mikro liflerin birleştirilmesi gibi çok ölçekli hibritleştirme, farklı ölçeklerde etkili lif yüzey kaplaması ve yapışması yoluyla çekme dayanımı, uzama, Young modülü ve tokluğu artırarak mekanik özellikleri daha da iyileştirir (Bang ve ark., 2021). Özünde, hibritleştirme teknikleri, doğal liflerin çevresel faydalarını sentetik liflerin veya nanomalzemelerin üstün mekanik özellikleriyle birleştirerek, soğuktan koruyucu giyim uygulamaları için uygun, gelişmiş yapısal bütünlüğe, esnekliğe ve termal kararlılığa sahip kompozitler üretir (Atmakuri ve ark., 2020).

Sentetik liflerin dezavantajları ise petrol türevi olmaları, biyolojik olarak parçalanamamaları ve fosil yakıt kaynaklarına bağımlılıklarıdır. Bu nedenle çevreye zarar verebilirler, doğada bozunmaları uzun sürer, küresel karbon emisyonlarına ve mikroplastik kirliliğe sebep olabilirler (Jhanji Dhir, 2022). Bununla birlikte sentetik lifler antimikrobiyal işlem gördüğünde insan sağlığına ve çevreye zehirli etkileri olabilir. Diğer yandan jüt, keten, bambu ve pamuk gibi doğal lifler yenilenebilir, biyolojik olarak parçalanabilir ve genel olarak yaşam döngüleri boyunca daha düşük çevresel ayak izine sahiptirler. Doğal malzemeler sentetiklere göre

karbondioksit açısından nötr olmaları ve bitki materyallerinden elde edilmeleri nedeniyle; tekstil ve kompozit uygulamaları için sentetiklere göre daha sürdürülebilirdirler (Lozada ve ark., 2023). Doğal elyaflardan üretilen kompozitler, iyi mekanik özellikleri sağlarken daha ağır sentetik malzemelerin yerini alabilir; bu da hafif ve çevre dostu koruyucu giysilerin üretiminde kullanılabilir (Jeff Jomboh ve ark., 2024). Yüzey işlemleri ve nanomalzemelerle birleştirme de dahil olmak üzere doğal elyaf kompozit teknolojisindeki gelişmeler, koruyucu giysilerde sürdürülebilir seçenekler olarak rekabet güçlerini artırmaktadır. Yani soğuktan koruma giysilerinde doğal lifler kullanıldığında daha sürdürülebilir, biyobozunur ve karbon ayak izi düşük giysiler elde edilir. Ayrıca, sentetik kompozitlere kıyasla üretim sırasında daha düşük enerji tüketimi, geri dönüştürülebilirlik ve kullanım ömrü sonunda daha iyi bertaraf seçenekleri gibi avantajlar da sunmaktadırlar (Munimathan ve ark., 2024).

2. Soğuktan Koruyucu Spor Giysilerde Katmanlı Yapı Özellikleri:

Soğuktan koruyucu spor giysiler ısı izolasyon, nem yönetimi ve yağmur, kar gibi dış ortam koşullarına karşı koruma sağlayan katmanlar gibi çoklu katmanlı yapılardan oluşmaktadır. Katmanlı giyim sistemi sayesinde, aktivite seviyesine ve çevresel koşullara göre katman ekleyerek veya çıkararak termal konfor optimize edilebilir.

Bu katmanlar:

1. İç katman: Deri ile temas halinde olan katmandır, bu katmanın temel amacı deri yüzeyinde oluşan terin dış ortama atılmasını sağlayarak deri yüzeyinin kuru kalmasını sağlamaktır. Bu katman genel olarak yün veya sentetik liflerden yapılmaktadır.
2. İzolasyon katmanı: Vücut ısını hapsederek ısı yalıtımı sağlayan katmandır. Bu katmanda kullanılan malzemeler polar, kuş tüyü ve sentetik malzemelerden oluşmaktadır.
3. Dış katman: Bu katman rüzgar, yağmur ve kar gibi iklim koşullarına karşı koruma sağlayan su iticilik veya rüzgar geçirmezlik gibi özelliklere sahip olan katmandır.

Bütün katmanlarda bulunan malzemeler izolasyon, nem yönetimi ve ısı transferi gibi özellikleri ile termal stabilite sağlayarak soğuğa karşı koruma sağlar. İç katmanda, sentetik elyaflar veya yün karışımları gibi etkili nem emici özelliklere sahip malzemeler çok önemlidir çünkü teri ciltten uzaklaştırarak nem yönetimi sağlarlar. Bu nem yönetimi özelliği, ıslak kumaşların neden olduğu soğutma etkisini önleyerek soğuk ortamlarda termal konforu ve yalıtımı artırır (Houshyar ve ark., 2017). Nem yönetimi çok önemlidir çünkü fiziksel aktivite sırasında terleme ısı yalıtımını bozabilir. Etkili nem emici iç katmanlar ve optimize edilmiş katman dizilimleri,

giyim sistemi içindeki yoğuşmayı azaltabilir ve su buharı geçirgenliğini arttırabilir. Coolmax® içeren kumaşlar, hem termal direnç hem de nem transferi ve termofizyolojik konfor göstererek vücut ısını daha etkili bir şekilde korumaktadır (Houshyar ve ark., 2017). Polar kumaşı nefes alabilen dış katmanlarla birleştirerek katmanlı yapı oluşturma'nın daha iyi nem difüzyonuna ve daha az nem birikimine yol açarak, ıslaklıktan kaynaklanan rahatsızlığı ve ısı yalıtım kaybını önlediği daha önceki çalışmalarda görülmüştür (Yoo ve Kim, 2008). Nem emici teknolojiler, cildi kuru tutarak, nem kaynaklı ısı kaybını en aza indirerek, katmanlar içindeki yoğuşmayı yöneterek ve nefes alabilirliği kolaylaştırarak, soğuktan koruyucu giysilerin ısı yalıtım özelliklerini etkili bir şekilde korur (Meng ve ark., 2023). Artan nem emilimi ve nemin kumaş yüzeyinden etkili bir şekilde buharlaştırılmaması veya uzaklaştırılmaması durumunda giysi yapışkan veya nemli hissettirebilir (Yoo ve Barker, 2004). Nem emilimini kolaylaştıran hidrofilik özellikteki lif yapıları ise, sıvı nem iletimini olumsuz etkileyebilir; bu da bazı kumaşların nemi daha uzun süre tutmasına ve hızlı kuruma verimliliğini azaltmasına neden olabilir (Das ve ark., 2009).

İzolasyon katmanının ısı özelliklerini etkileyen en önemli faktör bu katmanda kullanılan lif tipi ve yapısıdır. Polar, kuş tüyü veya özel çekirdekli iplikler gibi malzemeler, termal direnci ve hava geçirgenliğini etkileyerek izolasyon katmanının özelliklerini değiştirmektedir. Meta-aramid veya e-cam çekirdekli elyaflar gibi kumaşlardaki çekirdek/kılıf oranının arttırılmasının, hava geçirgenliğini arttırdığını ve termal iletkenliği azalttığını, bunun da koruyucu dış giysilerin yalıtım kapasitesini etkilediğini göstermiştir (Ertekin ve ark., 2017). Bu katmanda faz değişim malzemeleri (PCM) kullanılması, sıcaklık dalgalanmaları sırasında fazla ısıyı emerek veya salarak termal konforu dengeleyebilir (Reinertsen ve ark., 2008). Çok katmanlı sisteme faz değişim malzemeleri (PCM'ler) ve aerogeller gibi malzemelerin dahil edilmesi, ısıyı gerektiği gibi emerek, depolayarak ve salarak termal yalıtımı aktif olarak düzenleyebilir. Bu malzemeler, sıcaklık ve aktivite seviyesindeki değişikliklere göre termal özelliklerini uyarlayarak giyim sistemindeki mikro klimayı düzenler ve hem dinlenme halindeyken hem de yoğun egzersiz sırasında konforu korur (Greszta ve ark., 2022).

Dış katmanın nefes alabilirliği ve geçirgenliği katmanlı yapı içerisinde nem birikimine ve ısı transferine etki ettiğinden kritik bir önemi vardır. Yarı geçirgen dış katman, tamamen geçirimsiz malzemelere kıyasla daha yüksek vücut ısı depolamasına olanak tanır; tamamen geçirimsiz malzemeler ise nemi hapsedebilir ve ısı gerilimini artırarak termal olarak konforsuz hissettirebilir (Rissanen ve Rintamäki, 1997). Bir diğer önemli faktör giysi tabakaları arasındaki hava boşluğu olarak bilinen tabakanın kalınlığıdır. Bununla birlikte şekil hafızalı malzemelerde

bu katmanlı yapılar içerisinde kullanılarak ayarlanabilir bir hava boşluğu oluşturur. Böylece ısı direnci arttırarak ve radyasyon yoluyla ısı transferini azaltarak yalıtımı iyileştirir (He ve ark., 2018; Ma ve ark., 2018). Dış katman için yaygın olarak kullanılan malzemeler arasında, hafiflik ve mekanik dayanıklılık sunan naylon veya polyester gibi sentetik elyaflar bulunur. Ek olarak, Gore-Tex veya diğer mikro gözenekli membranlar gibi yüksek performanslı bariyer kumaşlar, su geçirmez ancak nefes alabilen yapıya sahip oldukları için tercih edilir. Nanolifler aerojel parçacıkları veya faz değişim malzemesi (PCM) mikro kapsülleri içeren gelişmiş kompozit malzemeler, yalıtımı daha da iyileştirmek ve termal düzenlemeyi değişen ortamlara uyarlamak için daha önceki çalışmalarda incelenmiştir (Greszta ve ark., 2022). Soğuktan koruyucu giysilerin dış katmanı tipik olarak dayanıklı, rüzgar geçirmez ve su geçirmez sentetik kumaşlar; koruma ve nefes alabilirliği dengelemek için özel kaplamalar veya membranlarla donatılmış kompozit malzemelerden oluşabilir. Nanoteknoloji ve kompozit malzemelerdeki gelişmeler, dış kabuğun ısı yalıtımını, dayanıklılığını ve soğuk koşullara uyumunu arttırarak, zorlu ortamlara maruz kalan kullanıcılar için daha iyi koruma ve konfor sağlamaktadır (Bhattacharjee ve ark., 2019; Maurya ve ark., 2021).

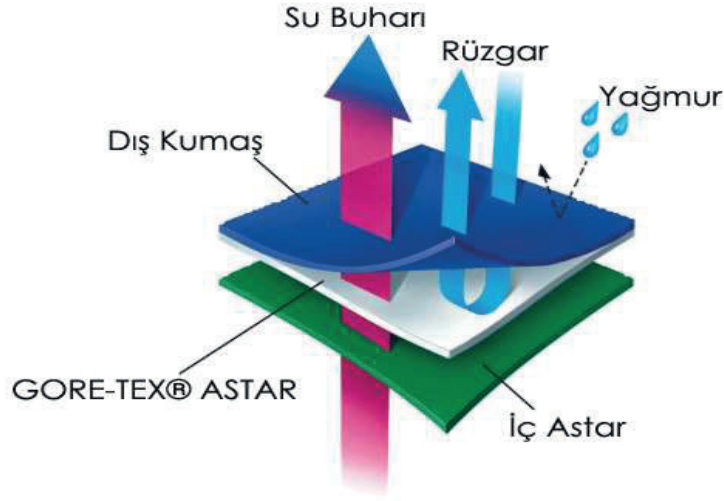
Ortam sıcaklığına veya vücut ısısına bağlı olarak açılıp kapanan dinamik nem geçiş kanallarına sahip akıllı tekstiller, bir başka optimizasyon katmanı sunar. Bu akıllı kumaşlar, nem geçirgenliğini sınırlayarak düşük aktivite ve soğuk koşullarda ısıyı korurken, yüksek aktivite sırasında terleme meydana geldiğinde nem iletimini artırarak sıcaklık ve nefes alabilirlik arasında denge sağlar. Soğuk iklim koşullarına karşı koruyucu giysiler tasarlanırken aktivite seviyesine göre giysi sisteminin ayarlamasına olanak tanıyan modüler veya çıkarılabilir katmanlarla tasarlanmalıdır. Egzersiz sırasında yalıtımın çıkarılması ve dinlenme sırasında termal dengeyi korumak için yeniden eklenmesi mümkün olacak şekilde giysi tasarımları yapılmalıdır. Bunun yanında tasarımda dayanıklılık ve konfor da göz önünde bulundurulmalıdır. Aktivite sırasında termal ve nem performansını koruyan hafif, nefes alabilen ve elastik malzemelerin birleştirilmesi, kullanıcının hareket kabiliyetini arttırır ve yüksek fiziksel aktivite sırasında aşırı yalıtımdan kaynaklanan ısı stresini azaltır (Gavin, 2003). Değişken fiziksel aktiviteler için çok katmanlı soğuktan koruyucu giysilerin optimizasyonu, faz değiştiren malzemeler ve aerojeller gibi termal olarak ayarlanabilir malzemelerin kullanılmasını, nem transferini ve hava boşluğu yalıtımını teşvik etmek için katmanların stratejik olarak düzenlenmesini, dinamik nem düzenlemesine sahip akıllı kumaşların kullanılmasını içerir (He ve Yu, 2018; Lin ve ark., 2023; Wang ve ark., 2015).

3. Soğuktan Koruyucu Spor Giyim Ürünlerinde Kullanılan Teknolojiler

3.1. Gore-Tex

Gore-tex ürünü daha çok su geçirmezlik ve nefes alabilirlik özellikleri ile bilinen bir teknolojiye sahiptir. Bu nedenle özellikle soğuk iklim koşullarından koruma gerektiren giyim ürünlerinde ve ayakkabılarda kullanımı bulunmaktadır. Gore-Tex çok katmanlı spor giyim ürünleri, öncelikle genişletilmiş politetrafloroetilen (ePTFE) ile tanınan W.L. Gore & Associates tarafından geliştirilen su geçirmez ve nefes alabilen membran teknolojisi olarak ortaya çıkmıştır. Gore-Tex kumaş sistemi tipik olarak dayanıklılık, su geçirmezlik ve nem buharı geçirgenliğini birleştiren çoklu katmanlardan oluşur ve bu da onu zorlu dış mekan ve spor giyim uygulamaları için uygun hale getirir. Bu yapılar sıvı buhar formunda terin dış ortama atılmasına olanak sağlarken, giysi yapısı içerisine dış ortamdan sıvı girişine olanak tanımamaktadır. Bu özelliği sayesinde giyilebilir elektroniklerle ve sensörlerle kullanımı mümkün olmaktadır (Chuang ve ark., 2010). Goretex dayanıklılık, nefes alabilirlik ve su geçirmezlik için tasarlanmış özel kumaşlar sınıfına girmektedir. Gore-tex teknolojisi mikrogözenekli bir yapıyı dayanıklı hidrofobiklikle birleştiren floropolimer bazlı bir laminant teknolojisidir. Bu özellikleri sayesinde yüksek performanslı dış giyimden tıbbi implantlara kadar, su geçirmezlik, konfor, dayanıklılık ve biyo-uyumluluk gerektiren alanlarda kullanılabilir (Conrad ve ark., 2008). Hidrofobik kaplamalar farklı malzeme kimyalarına sahip olsalar da yüzeyleri su geçirmez hale getirirken nefes alabilirliği koruyarak alt tabaka özelliklerini geliştirir ve Gore-Tex yapısına benzerdir (You ve ark., 2014).

Gore-Tex spor giyiminin çok katmanlı yapısı genellikle dış koruyucu tekstil katmanı, Gore-Tex membran, ve konforu ve nem yönetimini destekleyen iç astardan oluşur. ePTFE membranın mikro gözenekli yapısı, sıvı suyun içeri girmesini engellerken su buharının (terin) dışarı çıkmasına izin vererek fiziksel aktivite sırasında termal konforu ve kuruluşu korur. Bu özellik, iç nem birikimini azaltarak ve dışarıdan su girişini engelleyerek aktif spor giyiminde termal konforu önemli ölçüde artırır.



Şekil 2. Goretex katmanlı yapı örneği (<https://www.motodium.com.tr>)

Gore-Tex çok katmanlı spor giyiminin genel avantajı, nefes alabilirliği tehlikeye atmadan su geçirmez koruma sağlamasıdır; bu da fiziksel aktivite sırasında olumsuz hava koşullarına maruz kalan sporcular ve açık hava meraklıları için kritik öneme sahiptir. Bu teknoloji, dış korumayı iç konforla dengeleyerek, nefes almayan yağmurluklarla ilişkili aşırı ısınmayı ve terlemeyi azaltarak geleneksel su geçirmez kumaşlardan daha üstün performans gösterir. Gore-tex kumaşların dayanıklılıkları, mekanik özellikleri, yıkanabilirlik özellikleri ve değişen koşullara karşı uyum sağlamaları nedeniyle özellikle soğuktan koruyucu spor giyim ürünlerinde tercih edilirler. Gore-Tex çok katmanlı giysi sistemi yürüyüş, kayak, bisiklet ve koşu gibi çeşitli açık hava aktiviteleri için tercih edilmektedir.

Günümüzde yeni nesil kumaşlarda ve Goretex yapılarında nem emme verimliliğini önemli ölçüde arttıran nanoteknoloji ve mühendislik ürünü polimerler kullanılmaktadır. Örneğin, grafen ve gümüş nanopartiküller gibi nanomalzemeler içeren spor giyim ürünleri, geleneksel kumaşlara kıyasla nem emme verimliliğinde %25'e varan bir iyileşme göstermektedir. Bu malzemelerin nem yönetimi özellikleri ile birlikte, UV direnci ve ısı konfor özellikleri de gelişmiştir (Zhao ve ark., 2024). Modal veya viskoz gibi nem emici ipliklerle mikrolifleri birleştiren kumaşlar, çok katmanlı yapılarda üstün nem yönetimi davranışı göstererek Gore-Tex spor giysilere benzer avantajlar sağlamaktadır (Suganthi ve Senthilkumar, 2017).

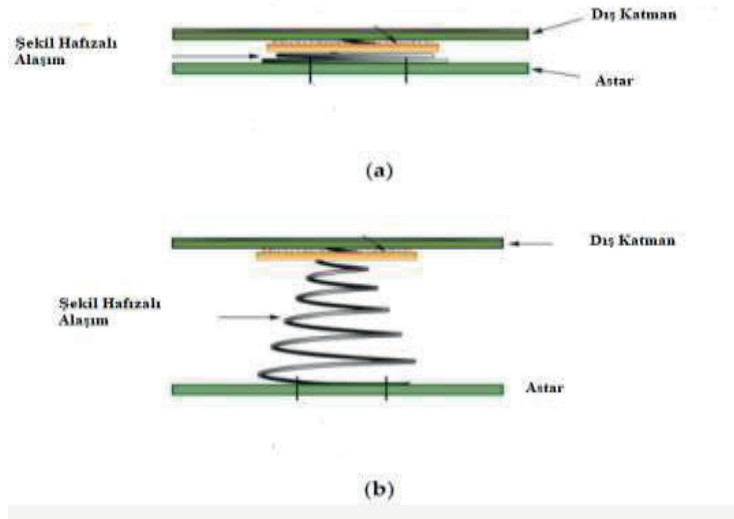
Termal ve nem yönetimi tekstillerindeki yenilikler, ısı yalıtımı ve nefes alabilirliği dengeleyerek Gore-Tex ürünlerinin konforunu arttırmaktadır. Outlast® ve Coolmax® gibi tekstiller, hammadde seçimi ve örgü yapısının hava ve su buharı geçirgenliğini nasıl optimize edebileceğini göstererek, sıcak veya soğuk iklimler için tasarlanmış spor giyim ürünlerine

gelişmiş nem yönetimi sağlamaktadır. Günümüzdeki çalışmalar Gore-Tex'in üstün termal-nem düzenlemesi için membran teknolojisi ile birleştirmek üzerine yoğunlaşmaktadır (Onofrei ve ark., 2011). Spor tekstillerinde kullanılan malzemeler ve üretim tekniklerine ilişkin son incelemeler, sadece su geçirmezlik ve nefes alabilirlik özelliklerini artırmakla kalmaz, aynı zamanda nem buharı transferini de hızlandırarak fizyolojik konfora ve atletik performansa katkı sağlar (Ahmad ve ark., 2023).

Sonuç olarak, Gore-Tex teknolojisindeki nem yönetimini iyileştirmeye yönelik gelişmeler, nanoteknoloji kaplamalarının, çift katmanlı örgü gibi özel olarak tasarlanmış kumaş yapılarının ve geliştirilmiş polimer membran formülasyonlarının kullanımını kapsamaktadır. Bunların tümü, Gore-Tex'in bilinen su geçirmez koruma özelliğini korurken, nem emilim verimliliğinin artmasına, buhar geçirgenliğinin iyileşmesine ve kullanıcı konforunun optimize edilmesine yol açmaktadır (Zhao ve ark., 2024).

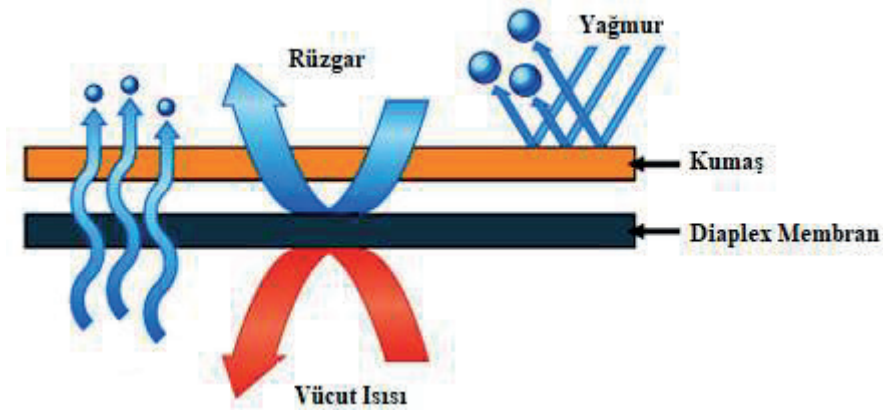
3.2.Şekil Hafızalı Malzemeler

Şekil hafızalı malzemeler (SMM), sıcaklık değişimlerine uyum sağlayarak konfor, yalıtım ve işlevselliği artırma yetenekleri sayesinde soğuk havalarda kullanılan spor giysilerde umut vadeden uygulamalar sunmaktadır. Bu malzemeler, ısı gibi belirli uyaranlara maruz kaldıklarında önceden tanımlanmış bir şekli "hatırlayabilir" ve bu şekle geri dönebilir; bu da onları giysilerde dinamik termal düzenleme için uygun hale getirir. Şekil hafızalı malzemeler (SMM), şekil hafızalı polimerler (SMP) ve şekil hafızalı alaşımlar (SMA) olmak üzere sıcaklık gibi dış uyaranlara karşı farklı yanıt verme yetenekleri sayesinde gelişmiş termal koruma ve konfor sağlayarak soğuk havaya karşı koruyucu spor giysilerde kullanılmaktadır. Şekil hafızalı malzemeler soğuk hava koşullarında kullanıldığında ısı izolasyonu arttırmak amacıyla kumaş katmanları arasında ayarlanabilir hava boşlukları oluşturarak dinamik termal konfor sağlarlar. Örneğin, çok katmanlı kumaş düzeneklerine entegre edilmiş şekil hafızalı alaşımlara sahip akıllı tekstiller, aktivasyon üzerine kumaş katmanlarını ayırarak, termal korumayı önemli ölçüde iyileştiren yalıtıcı bir hava katmanı oluşturabilir. Bu mekanizma soğuktan koruyucu giysilerde şekil hafızalı alaşımlar (SMA) kullanımıyla soğuk iklim koşullarında yaylar yardımıyla kumaş katmanları arasında hava boşluğunu arttırarak termal izolasyonun artmasına neden olur (Bartkowiak ve ark., 2020). Şekil hafızalı alaşımlar genel olarak termal ve mekanik hafıza özelliklerine sahip metal kompozitlerden yapılır ve elastikiyet özellikleri çok iyi olduğundan malzeme büyük geri kazanılabilir gerinimler sergiler.



Şekil 3. Şekil hafızalı alaşım örneği a) pasif durum b) aktif durum

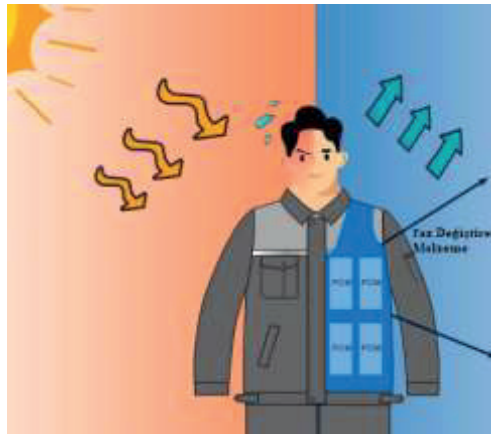
Şekil hafızalı polimerler, nefes alabilen, su geçirmez ve termal olarak farklı koşullara uyum sağlayan kumaşlar sunarak soğuktan koruyucu spor giyim ürünlerinde kullanılmaktadır. Tekstiller üzerindeki segmentli şekil hafızalı poliüretan kaplamalar, geçirgenliği düzenleyerek düşük sıcaklıklarda veya nemde termal yalıtım sağlarken, yüksek sıcaklıklarda veya nemde nem buharı geçişine izin verir. Bu özellik, özellikle soğuk hava spor aktiviteleri sırasında kritik öneme sahip olan ısı tutma ve nem yönetimi sağlayarak kullanıcıya konfor sağlar (Jahid ve ark., 2018). Şekil hafızalı polimerler, şekil hafızalı alaşımlara göre daha yüksek esneme özelliği ve daha düşük gerinim özellikleri gösterirler. Şekil hafızalı polimer kullanımı ile ilgili en bilinen örneklerden biri Mitsubishi tarafından üretilen DiAPLEX kumaşıdır. Bu kompozit malzeme, iki kumaş katmanı arasına yerleştirilen bir üretan şekil hafızalı polimer laminatından yapılmıştır. Şekil hafızalı polimer, ısıtma ve soğutma döngüsü üzerine moleküler olarak şeklini değiştirebilir, bu da onu nem ve ısı kontrolünde verimli hale getirir. DiAPLEX' ten yapılan giysiler, üstün nem tutma, nefes alabilirlik ve su geçirmezlik özellikleri sayesinde hem aşırı soğuk hem de sıcak havalarda giyilebilir (Biswas ve ark., 2021).



Şekil 4. DİAPLEX kumaş iç yapısı (https://www.amaterrace.com/product/dl_2.html)

3.3. Faz Değiştiren Malzemeler

Spor giysilerde kullanılan faz değiştiren malzemeler (PCM), katı ve sıvı haller arasındaki faz geçişleri sırasında termal enerjiyi emerek, depolayarak veya serbest bırakarak sıcaklığı düzenlerler. Bu termoregülasyon, cilde yakın istikrarlı bir mikro klimayı koruyarak giysinin konforunu ve performansını artırır. Faz değiştiren malzemeler cilt sıcaklıklarını kontrol ederek, sporcuları aşırı ısınma veya yetersiz soğumanın olumsuz sonuçlarından koruyabilir. Spor giysilerin ihtiyaçlarını karşılamak için araştırmacılar, özel faz değişim sıcaklıklarına ve gelişmiş dayanıklılığa sahip son teknoloji faz değiştiren malzemeleri geliştirmektedir. Nefes alabilirlik, esneklik ve nem yönetimi gibi önemli giyim özelliklerini korurken optimum faz değiştiren malzeme entegrasyonunu sağlamak zordur. Faz değiştiren malzeme içeren kumaşların faz değişim yeteneklerini korurken aynı zamanda uzun süreli kullanımda yıkama özelliklerini ve dayanıklılıklarını garanti etmekte zor olabilir. Bununla birlikte, faz değiştiren malzemelerin spor giysilerle entegrasyonu ile oluşturulan giysi tasarımlarının büyük bir gelişme potansiyeli vardır (Shadid ve ark., 2024).



Şekil 5. Faz değiştiren malzeme örneği

Ortam sıcaklığının faz değiştiren malzemenin erime sıcaklığından daha yüksek olması durumunda vücut sıcaklığı yükselir, çekirdek malzeme (faz değişim malzemesi) buna tepki verir ve ısıyı emer. Isı emilimi sonrası kimyasal bağlar kırılır ve faz değişim malzemesi katı halden sıvı hale dönüşür. Erime işlemi sırasında faz değiştiren malzeme, çevreden ısı enerjisi emer ve fazladan enerji depolanır. Ortam sıcaklığının faz değiştiren malzemenin kristalleşme sıcaklığından daha düşük olması nedeniyle vücut sıcaklığı düştüğünde, çekirdek malzeme (faz değişim malzemesi) buna tepki verir ve daha önce depoladığı ısıyı serbest bırakır. Isıyı serbest bıraktığında kimyasal bağlar oluşur ve çekirdek faz değişim malzemesi sıvı halden katı hale dönüşür. Kristalleşme işlemi sırasında çevreye ısı verilir termal konfor sağlanır (Muhammad ve Shahnawaz, 2010).

Soğuk iklim koşullarında kullanılacak giysilerin kullanılacakları koşullara göre tercih edilmeleri gerekmektedir. Soğuktan kaynaklanan rahatsızlığın azalması, sıcaktan kaynaklanan rahatsızlığın artmasıyla birlikte gelir. Faz değiştiren malzemeler tekstil yapısına uygulanmadan önce, çok küçük küreler içine kapsüllenirler. Bu mikro kapsüllerin çapları yaklaşık 1 ila 30 μm arasındadır. Mikro kapsüller mekanik etkiye, ısıya ve çoğu kimyasal maddeye karşı dayanıklıdır. Kaplama, laminasyon, apreleme, çift bileşenli sentetik elyaf ekstrüzyonu, enjeksiyon kalıplama, köpük teknikleri, faz değişim malzemelerinin tekstil matrisine dahil edilmesinde kullanılan tekniklerdir. Mikrokapsül üretimi fiziksel veya kimyasal tekniklerle gerçekleştirilebilir. Bazı tekniklerin kullanımı, yüksek işlem maliyeti, düzenleyici konular ve sağlık ve çevre açısından endişe yaratan organik çözücülerin kullanımı nedeniyle sınırlı kalmıştır. Fiziksel yöntemler esas olarak sprey kurutma veya santrifüj ve akışkan yataklı işlemlerdir ve bunlar doğası gereği 100 μm 'den küçük mikrokapsüller üretme yeteneğine sahip değildir (Mondal, 2008).

Spor giyimde kullanılan faz değişim malzemesi (PCM) miktarının, giysinin kullanılacağı iklim koşulu ve kullanım süresiyle uyumlu olması gereklidir. Spor aktivitesi sırasında vücut tarafından üretilen ısı genellikle gerekli miktarda çevreye salınmaz, bu da termal stresi artırır. Faz değişim malzemeleri spor giyime dahil edildiğinde, fiziksel aktivite sırasında giyen kişinin vücut ısısı aşırı artar ve kapsüllenmiş faz değişim malzemeleri tarafından emilir ve gerektiğinde salınır. Snowboard eldivenleri, iç çamaşırları, spor giyim, buz tırmanışı, bisiklet ve koşu için iç çamaşırları, spor giyimde PCM uygulamalarına örnek olarak verilebilir.

SONUÇ

Bu çalışmada soğuktan koruyucu spor giysilerde kullanılan katmanlı yapılar ve yeni nesil teknolojilerden bahsedilmiştir. Soğuktan koruyucu spor giysilerde kullanılan katmanlı yapıların iç, orta ve dış katman olarak üç ana katmandan oluştuğu belirtilmiştir. Giysinin kullanılacağı iklim ve aktivite koşullarına bağlı olarak katman sayısının azaltılabileceği veya arttırılabileceği belirtilmiştir. Ayrıca nanoteknoloji ve kompozit yapılardaki gelişmelerin soğuktan koruyucu spor giysilerin daha da gelişimine olanak sağlayacağı belirtilmiştir. Bununla birlikte soğuktan koruyucu spor giysilerde kullanılan Gore-tex, Şekil Hafızalı Malzemeler (SMM) ve Faz Değiştiren Malzemeler (PCM) gibi yeni nesil teknolojiler hakkında bilgi verilmiştir. Sonuç olarak soğuk iklim koşullarında kullanılacak giysi teknolojilerinin gelişmekte olan bir alan olduğu, yeni nesil teknolojilerle birlikte bu alanda beklenen performansın sağlandığı söylenebilir.

KAYNAKÇA

- Ahmad, F., Ahmad, S., Rasheed, A., Nawab, Y., Azam, F., Mushtaq, B., Akhtar, K. S., & Anam, W. (2023). Recent Developments in Materials and Manufacturing Techniques Used for Sports Textiles. *International Journal of Polymer Science*, 2023, 1–20. <https://doi.org/10.1155/2023/2021622>
- Atmakuri, A., Palevicius, A., Vilkauskas, A., & Janusas, G. (2020). Review of Hybrid Fiber Based Composites with Nano Particles-Material Properties and Applications. *Polymers*, 12(9), 2088. <https://doi.org/10.3390/polym12092088>
- Awad, S. A., Alothman, O. Y., Saba, N., Khalaf, E. M., Dhakal, H. N., Fouad, H., & Jawaid, M. (2022). A comparative assessment of chemical, mechanical, and thermal characteristics of treated oil palm/pineapple fiber/bio phenolic composites. *Polymer Composites*, 43(4), 2115–2128. <https://doi.org/10.1002/pc.26525>
- Bang, J., Kwak, H. W., Lee, H., Oh, J.-K., & Yang, Y. (2021). Nano/Micro Hybrid Bamboo Fibrous Preforms for Robust Biodegradable Fiber Reinforced Plastics. *Polymers*, 13(4), 636. <https://doi.org/10.3390/polym13040636>
- Bartkowiak, G., Dąbrowska, A., & Greszta, A. (2020). Development of Smart Textile Materials with Shape Memory Alloys for Application in Protective Clothing. *Materials*, 13(3), 689. <https://doi.org/10.3390/ma13030689>
- Bhattacharjee, S., Joshi, R., Chughtai, A. A., & Macintyre, C. R. (2019). Graphene Modified Multifunctional Personal Protective Clothing. *Advanced Materials Interfaces*, 6(21), 1900622. <https://doi.org/10.1002/admi.201900622>
- Bibi, A., Afza, G., Afzal, Z., Farid, M., Sumrra, S. H., Hanif, M. A., Kolita Kama Jinadasa, B. K., & Zubair, M. (2024). Synthetic vs. natural antimicrobial agents for safer textiles: a comparative review. *RSC Advances*, 14(42), 30688–30706. <https://doi.org/10.1039/d4ra04519j>
- Biswas, M. C., Chakraborty, S., Bhattacharjee, A., & Mohammed, Z. (2021). 4D printing of shape memory materials for textiles: mechanism, mathematical modeling, and challenges. *Advanced Functional Materials*, 31(19), 2100257.
- Chuang, M., Galik, M., Windmiller, J. R., Wang, J., Santhosh, P., Ramírez, G. V., & Chou, T. (2010). Textile-based Electrochemical Sensing: Effect of Fabric Substrate and Detection of Nitroaromatic Explosives. *Electroanalysis*, 22(21), 2511–2518. <https://doi.org/10.1002/elan.201000434>
- Conrad, K., Torgerson, C. S., & Gillman, G. S. (2008). Applications of GORE-TEX Implants in Rhinoplasty Reexamined After 17 Years. *Archives of Facial Plastic Surgery*, 10(4), 224–231. <https://doi.org/10.1001/archfaci.10.4.224>
- Das, B., Kothari, V., Fanguiero, R., Das, A., & Araujo, M. D. (2009). Moisture Flow through Blended Fabrics – Effect of Hydrophilicity. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, 4(4), 155892500900400. <https://doi.org/10.1177/155892500900400405>
- Ertekin, M., Ertekin, G., & Marmaralı, A. (2017). Analysis of thermal comfort properties of fabrics for protective applications. *The Journal of The Textile Institute*, 109(8), 1091–1098. <https://doi.org/10.1080/00405000.2017.1402425>
- Gavin, T. P. (2003). Clothing and thermoregulation during exercise. *Sports Medicine*, 33(13), 941–947. <https://doi.org/10.2165/00007256-200333130-00001>

- Greszta, A., Bartkowiak, G., Dąbrowska, A., Gliścińska, E., Machnowski, W., & Kozikowski, P. (2022). Multilayer Nonwoven Inserts with Aerogel/PCMs for the Improvement of Thermophysiological Comfort in Protective Clothing against the Cold. *Materials*, 15(6), 2307. <https://doi.org/10.3390/ma15062307>
- He, H., & Yu, Z. (2018). Effect of Air Gap Entrapped in Firefighter Protective Clothing on Thermal Resistance and Evaporative Resistance. *Autex Research Journal*, 18(1), 28–34. <https://doi.org/10.1515/aut-2017-0006>
- He, J., Lu, Y., Wang, L., & Ma, N. (2018). On the Improvement of Thermal Protection for Temperature-Responsive Protective Clothing Incorporated with Shape Memory Alloy. *Materials*, 11(10), 1932. <https://doi.org/10.3390/ma11101932>
- Houshyar, S., Nayak, R., & Padhye, R. (2017). Effect of moisture-wicking materials on the physical and thermo-physiological comfort properties of firefighters' protective clothing. *Fibers and Polymers*, 18(2), 383–389. <https://doi.org/10.1007/s12221-017-6746-2>
- Islam, S., & Hasan, B. (2024). An overview of the effects of water and moisture absorption on the performance of hemp fiber and its composites. *SPE Polymers*, 6(1). <https://doi.org/10.1002/pls2.10167>
- Jahid, M. A., Hu, J., Wong, K., Wu, Y., Zhu, Y., Sheng Luo, H. H., & Zhongmin, D. (2018). Fabric coated with shape memory polyurethane and its properties. *Polymers*, 10(6), 681.
- Jariwala, H., & Jain, P. (2019). A review on mechanical behavior of natural fiber reinforced polymer composites and its applications. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 38(10), 441–453. <https://doi.org/10.1177/0731684419828524>
- Jeff Jomboh, K., Cephas Alkali, V., Uzochukwu Eze, W., Lawal, N., Dzikwi Garkida, A., Kabir Yakubu, M., & Majiyebo Alemaka, E. (2024). Properties and applications of natural, synthetic and hybrid fiber reinforced polymer composite: A review. *AIMS Materials Science*, 11(4), 774–801. <https://doi.org/10.3934/materci.2024038>
- Jhanji Dhir, Y. (2022). Natural Fibers: The Sustainable Alternatives for Textile and Non-Textile Applications. Intechopen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.106393>
- Lee, S., & Obendorf, S. K. (2007). Barrier effectiveness and thermal comfort of protective clothing materials. *The Journal of The Textile Institute*, 98(2), 87–98. <https://doi.org/10.1533/joti.2005.0143>
- Lin, Y., Ding, B., Wang, C., Yu, J., Wang, X., Meng, N., & Cheng, N. (2023). A Patterned Knitted Fabric with Reversible Gating Stability for Dynamic Moisture Management of Human Body. *Advanced Functional Materials*, 33(44). <https://doi.org/10.1002/adfm.202304109>
- Lozada, E., Barrera Torres, G., Sánchez, J. C., Gutiérrez Aguilar, C. M., & Jaramillo Carvalho, J. A. (2023). Vegetable Cellulose Fibers in Natural Rubber Composites. *Polymers*, 15(13), 2914. <https://doi.org/10.3390/polym15132914>
- Ma, N., Lu, Y., He, J., & Dai, H. (2018). Application of shape memory materials in protective clothing: a review. *The Journal of The Textile Institute*, 110(6), 950–958. <https://doi.org/10.1080/00405000.2018.1532783>
- Maurya, A. K., Mandal, S., Wheeldon, D. E., Schoeller, J., Schmid, M., Annaheim, S., Camenzind, M., Fortunato, G., Dommann, A., Neels, A., Sadeghpour, A., & Rossi, R. M. (2021). Effect of radiant heat exposure on structure and mechanical properties of thermal protective fabrics. *Polymer*, 222, 123634. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2021.123634>

- Meng, N., Yu, J., Lin, Y., Li, Z., Wang, X., Zhao, C., Zhang, Y., & Ding, B. (2023). Integrated High Barrier and Efficient Moisture-Wicking Multilayer Textile for Medical and Health Protection. *Advanced Functional Materials*, 33(51). <https://doi.org/10.1002/adfm.202305411>
- Mondal, S. (2008). Phase change materials for smart textiles—An overview. *Applied thermal engineering*, 28(11-12), 1536-1550.
- Muhammad, Z.N., & Shahnawaz, M. (2010) Applications of Ultra Smart Textiles in Sportswear and Garments. *Ultra Smart Textiles in Sports Wear and Garments*.
- Munimathan, A., Muthu, K., Subramani, S., & Rajendran, S. (2024). Environmental behaviour of synthetic and natural fibre reinforced composites: A review. *Advances in Mechanical Engineering*, 16(10). <https://doi.org/10.1177/16878132241286020>
- Nugraha, A. D., Nuryanta, M. I., Budiman, K., Kusni, M., Muflikhun, M. A., & Sean, L. (2022). Recent Progress on Natural Fibers Mixed with CFRP and GFRP: Properties, Characteristics, and Failure Behaviour. *Polymers*, 14(23), 5138. <https://doi.org/10.3390/polym14235138>
- Onofrei, E., Rocha, A. M., & Catarino, A. (2011). The Influence of Knitted Fabrics' Structure on the Thermal and Moisture Management Properties. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, 6(4), 155892501100600. <https://doi.org/10.1177/155892501100600403>
- Reinertsen, R. E., Færevik, H., Holbø, K., Nesbakken, R., Reitan, J., Røyset, A., & Suong Le Thi, M. (2008). Optimizing the Performance of Phase-Change Materials in Personal Protective Clothing Systems. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, 14(1), 43–53. <https://doi.org/10.1080/10803548.2008.11076746>
- Rissanen, S., & Rintamäki, H. (1997). Thermal responses and physiological strain in men wearing impermeable and semipermeable protective clothing in the cold. *Ergonomics*, 40(2), 141–150. <https://doi.org/10.1080/001401397188260>
- Sarker, F., Afroj, S., Novoselov, K. S., Karim, N., Koncherry, V., & Potluri, P. (2019). Ultrahigh Performance of Nanoengineered Graphene-Based Natural Jute Fiber Composites. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 11(23), 21166–21176. <https://doi.org/10.1021/acsami.9b04696>
- Schwarz, I., Rogale, D., Kovačević, S., & Firšt Rogale, S. (2024). A Multifunctional Approach to Optimizing Woven Fabrics for Thermal Protective Clothing. *Fibers*, 12(4), 35. <https://doi.org/10.3390/fib12040035>
- Shahid, M. A., Hossain, M. T., Hossain, I., Limon, M. G. M., Rabbani, M., & Rahim, A. (2024). Research and development on phase change material-integrated cloth: A review. *Journal of Industrial Textiles*, 54, 15280837241262518.
- Shah, N., Fehrenbach, J., & Ulven, C. A. (2019). Hybridization of Hemp Fiber and Recycled-Carbon Fiber in Polypropylene Composites. *Sustainability*, 11(11), 3163. <https://doi.org/10.3390/su11113163>
- Shahzad, A., & Nasir, S. U. (2016). Mechanical Properties of Natural Fiber/Synthetic Fiber Reinforced Polymer Hybrid Composites (pp. 355–396). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-46610-1_15
- Shaid, A., Bhuyian, M. A. R., Padhye, R., & Wang, L. (2018). Aerogel nonwoven as reinforcement and batting material for firefighter's protective clothing: a comparative study. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 87(1), 95–104. <https://doi.org/10.1007/s10971-018-4689-8>

- Suganthi, T., & Senthilkumar, P. (2017). Moisture-management properties of bi-layer knitted fabrics for sportswear. *Journal of Industrial Textiles*, 47(7), 1447–1463. <https://doi.org/10.1177/1528083717692594>
- Venkataraman, M., Marek, J., Militky, J., Mishra, R., Xiong, X., Yao, J., & Zhu, G. (2018). Electrospun nanofibrous membranes embedded with aerogel for advanced thermal and transport properties. *Polymers for Advanced Technologies*, 29(10), 2583–2592. <https://doi.org/10.1002/pat.4369>
- Wang, F., Song, G., Lu, Y., Rossi, R. M., Anaheim, S., & Shi, W. (2015). Effects of moisture content and clothing fit on clothing apparent ‘wet’ thermal insulation: A thermal manikin study. *Textile Research Journal*, 86(1), 57–63. <https://doi.org/10.1177/0040517515580527>
- Yoo, S., & Barker, R. L. (2004). Moisture Management Properties of Heat-Resistant Workwear Fabrics— Effects of Hydrophilic Finishes and Hygroscopic Fiber Blends. *Textile Research Journal*, 74(11), 995–1000. <https://doi.org/10.1177/004051750407401110>
- Yoo, S., & Kim, E. (2008). Effects of Multilayer Clothing System Array on Water Vapor Transfer and Condensation in Cold Weather Clothing Ensemble. *Textile Research Journal*, 78(3), 189–197. <https://doi.org/10.1177/00405175>
- You, J. B., Oh, M. S., Im, S. G., & Yoo, Y. (2014). Simple and Reliable Method to Incorporate the Janus Property onto Arbitrary Porous Substrates. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 6(6), 4005–4010. <https://doi.org/10.1021/am4054354>
- Zhao, X., Wang, X., Zhao, J., & Li, M. (2024). Intelligent sportswear design: Innovative applications based on conjugated nanomaterials. *Science and Engineering of Composite Materials*, 31(1). <https://doi.org/10.1515/secm-2024-0032>

BÖLÜM 5

ERGENE MERİÇ HAVZASI ÇORLU ÇAYI SU KALİTESİNİN BAKTERİYOLOJİK VE FİZİKOKİMYASAL AÇIDAN DEĞERLENDİRİLMESİ

*Birce BÜYÜKDUMANLI¹, Numan YILDIRIM²,
Gokhan Onder ERGUVEN³*

¹ Tekirdağ Büyükşehir Belediyesi, Tekirdağ, Türkiye bircebuyukduman26@gmail.com ORCID: 0009-0008-9999-5146

² Prof.Dr., Munzur Üniversitesi, Tunceli Meslek Yüksek Okulu, Bitki ve Hayvansal Üretim Bölümü, Organik Tarım Programı, Tunceli, Türkiye numanyildirim44@gmail.com ORCID: 0000-0003-1109- 8106

³ Prof. Dr., Munzur Üniversitesi, İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi, Siyaset Bilimi ve Kamu Yönetimi Bölümü, Kentleşme ve Çevre Sorunları ABD, Tunceli, Türkiye gokhanondererguven@gmail.com ORCID: 0000-0003-1573-080X

GİRİŞ

Ergene Meriç Havzası, Türkiye'nin en önemli su havzalarından biri olarak tarımsal, endüstriyel ve yerleşimsel faaliyetler açısından büyük bir öneme sahiptir. Bu havza, Trakya Bölgesi'nde hem tarımsal üretim hem de sanayi faaliyetlerinin yoğunlaştığı bir coğrafyada yer alması nedeniyle su kaynakları üzerinde ciddi baskılarla karşı karşıyadır. Havzanın ana su kaynaklarından biri olan Çorlu Çayı, özellikle çevresindeki yoğun sanayi faaliyetleri ve yerleşim yerlerinden kaynaklanan atık suların doğrudan deşarj edildiği bir bölgedir. Bu durum, su kalitesinin hızla bozulmasına ve ekosistem dengesinin ciddi şekilde tehdit edilmesine neden olmuştur. Sanayi kaynaklı ağır metal kirliliği, kimyasal atıklar, organik kirlilik ve evsel atıklar, Çorlu Çayı'nın hem çevresel hem de ekonomik sürdürülebilirliği için büyük bir risk oluşturmaktadır. Bu bağlamda, Çorlu Çayı'nın fizikokimyasal ve bakteriyolojik açıdan değerlendirilmesi, su kaynaklarının korunması ve iyileştirilmesi için önemli bir gereklilik olarak karşımıza çıkmaktadır (Buldur vd., 2007).

Çorlu Suyu yaklaşık 62 km uzunlukta ve yaklaşık 1319 km² su toplama sahasına sahiptir. Genelde kış aylarında su miktarı yüksek, yaz aylarında ise oldukça az, hatta bazı kesimlerinin Temmuz-Eylül aylarında kuruduğu gözlemlenmektedir. Sanayinin yoğun olduğu Çerkezköy'de bulunan fabrikaların atıkları (özellikle bunların %65'ini oluşturan tekstil fabrikalarının boya atıkları) gerekli arıtma işlemleri yapılmaksızın Çorlu Suyu'na verilerek Ergene ve Meriç nehirleri ile Ege Denizi'ne akıtılmaktadır. Ergene Nehri'nin en önemli kollarından biri olan Çorlu Suyu; Çerkezköy, Kızılpınar, Veliköy, Velimeşe, Çorlu ve Muratlı Belediyeleri'nin evsel atık suları ile Çerkezköy, Çorlu ve Muratlı ilçeleri sınırları içindeki değişik sektörlerle ait sanayi kuruluşlarının evsel ve endüstriyel arıtılmış ve arıtılmamış atık sularını toplamaktadır. (Hallı, 2013). Çorlu Çayı'nın geçtiği güzergâh üzerinde yoğun olarak tekstil, deri, kimya ve metal sanayisi faaliyet göstermektedir. Endüstriyel tesislerin çokluğu, bölgenin Türkiye'nin en kritik kirlilik baskısına sahip su kaynaklarından biri olarak değerlendirilmeye başlanmasına neden olmuştur. Tekirdağ Çevre Durum Raporları, Çorlu Çayı'nın uzun yıllardır organik madde, ağır metal, askıda katı madde ve bakteriyolojik parametreler açısından yüksek kirletici yükü taşıdığını göstermektedir (Tekirdağ İli Çevre Durum Raporu, 2021; 2023).

Bölgedeki su kalitesiyle ilgili mevcut literatüre bakıldığında, Çorlu Çayı gibi yoğun sanayi ve yerleşim baskısı altında olan su kaynaklarının su kalitesinin izlenmesinin ve bu konuda önlemler alınmasının gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Bu çalışma, su kalitesi analizlerinin mevsimsel farklılıklarını da ele alarak, özellikle ilkbahar ve sonbahar aylarında yapılacak olan analizlerle kirliliğin mevsimsel değişkenliğini de ortaya koyacaktır. ilkbahar ve sonbahar aylarında farklı mevsimlerde alınan numuneler ile su kalitesindeki mevsimsel dalgalanmaları tespit etme ve kirliliğin su kaynakları üzerindeki uzun vadeli etkilerini anlama açısından önemli veriler sağlayacaktır.

Su Kirliliğinin Kaynakları

Evsel kaynaklı kirlilik, özellikle şehirleşmenin yoğun olduğu bölgelerde önemli bir kirlilik yükü oluşturmaktadır. Evsel nitelikli atık sular; deterjanlar, organik madde, azot ve fosfor bileşikler ile mikroorganizmalar açısından zengindir ve arıtılmadan alıcı ortamlara bırakılması durumunda su ekosistemlerinde oksijen azalması ve ötrofikasyona yol açmaktadır (Altınbaş vd., 2010). Endüstriyel kaynaklı kirlilik, Türkiye'de özellikle tekstil, deri, metal

kaplama, kimya ve gıda sanayi gibi sektörlerin yoğun olduğu bölgelerde önemli bir çevresel sorun oluşturmaktadır. Endüstriyel atık suların içerdiği ağır metaller (Cr, Pb, Cd), deterjanlar, çözücüler ve toksik kimyasallar su kalitesi üzerinde ciddi tehdit oluşturmaktadır (Dede & Sezer, 2017). Tarımsal kaynaklı kirlilik, gübre ve pestisit kullanımının yoğun olduğu bölgelerde yüzey ve yeraltı sularını etkileyen önemli bir kirlilik kaynağıdır. Nitrat, fosfat ve pestisit türevleri yağış, sulama ve yüzey akışıyla su kaynaklarına taşınarak hem içme suyu kalitesini hem de sucul yaşamı olumsuz yönde etkiler (Küçükbalı & Sönmez, 2019). Kentsel yüzey akışları, şehirlerde yol, kaldırım ve binalar üzerinden yağışla taşınan petrol türevleri, ağır metaller, mikroplastikler ve partikül maddeler gibi kirleticilerden oluşmaktadır. Yoğun trafik bulunan şehirlerde yüzey akışı, su kirliliğinin önemli bileşenlerinden biridir (Bulut vd., 2012). Madencilik faaliyetleri de su kirliliği açısından önemli bir kaynak olup, maden ocaklarından kaynaklanan asit drenajı, ağır metaller ve kimyasal çözücüler yerüstü ve yeraltı sularına karışarak kirlenmeye neden olabilmektedir. Özellikle Doğu Karadeniz ve İç Anadolu'daki metalik maden işletmeleri çevresinde yapılan araştırmalar, bu bölgelerde su kalitesinin madencilik nedeniyle bozulduğunu göstermektedir (Altan, 2016). Kimyasal kirlilik; ağır metaller (Pb, Cd, Hg, Cr), pestisitler, deterjanlar, petrol türevleri, organik kimyasallar ve endüstriyel atıklarda bulunan toksik bileşiklerin su ortamına karışması ile meydana gelir. Kimyasal kirleticiler, yüksek toksisiteleri nedeniyle su ekosistemlerinde biyolojik birikim ve zehirlenmelere yol açabilmektedir. Türkiye'de özellikle Ergene Havzası, Bursa-Nilüfer Çayı ve İzmir Körfezi gibi yoğun sanayileşmiş bölgelerde yapılan çalışmalar, ağır metal ve organik kirletici seviyelerinin su kalitesini ciddi ölçüde bozduğunu ortaya koymuştur (Turan vd., 2020; Çamur & Aksu, 2018).

MATERYAL VE METOD

Araştırma Alanı

Çalışmada, Çorlu Çayı'nın su kalitesinin belirlenmesi için bölgeyi en iyi temsil ettiği değerlendirilen 5 beş istasyondan su numunesi alınarak su kalitesi parametreleri analizi yapılmıştır. Deri OSB Arıtma Öncesi, Deri OSB Arıtma Sonrası, Asrın Çiftliği Sonrası, Asrın Çiftliği Öncesi, Muratlı Lise Köprü güzergahında belirlenen beş ayrı istasyondan 2024 yılının ilkbahar ve sonbahar dönemlerinde numuneler alınmıştır. İstasyonlara ait koordinat bilgileri Tablo 3.1' de ve işaretlenen istasyonlar ise Şekil 3.1.'de yer almaktadır. Ayrıca arazi çalışmasında çekilen fotoğraflar Resim 3.1, 3.2, 3.3, 3.4 ve 3.5'te bulunmaktadır.



Şekil 3.1. Numune Noktaları

Tablo 3.1. Çorlu Çayı Numune Noktaları ve Koordinatlar

Numune Noktası	Konum	Mahalle/İlçe	Enlem	Boylam
1. Nokta	Deri OSB Arıtma Öncesi	Sağlık Mahallesi/Ergene	41.180800°	27.777235°
2.Nokta	Deri OSB Arıtma Sonrası	Sağlık Mahallesi/Ergene	41.175277°	27.763984°
3. Nokta	Asrın Çiftliği Sonrası	Kırkkepenekli Mahallesi/Muratlı	41.141665°	27.598560°
4. Nokta	Asrın Çiftliği Öncesi	Kırkkepenekli Mahallesi/Muratlı	41.142241°	27.637209°
5. Nokta	Muratlı Lise Köprü	MuradiyeMahallesi/Muratlı	41.163797°	27.494093°

1.Nokta Deri OSB arıtma öncesi;

Sağlık Mahallesi, Tekirdağ ili Ergene ilçesi sınırları içerisinde yer alan ve hem konut hem de sanayi alanlarına yakınlığıyla dikkat çeken bir yerleşim bölgesidir. Ergene ilçesi, özellikle tekstil, deri, kimya ve metal sanayilerinin yoğun olarak bulunduğu bir endüstriyel odak niteliğindedir. Mahallenin en belirgin özelliği, Çorlu Çayı'na yakın konumlanmış olması ve Deri Organize Sanayi Bölgesi arıtma tesisine komşu bir bölgede yer almasıdır. Bu durum, bölgeyi hem çevresel açıdan riskli bir konuma getirmekte hem de su kaynakları üzerindeki baskının doğrudan hissedildiği bir izleme alanı niteliği kazandırmaktadır. Tekirdağ İl Çevre Durum Raporları, Ergene Havzası'nın yıllardır Türkiye'nin en yoğun kirleticilere maruz kalan havzalarından biri olduğunu ve sanayi kaynaklı atık suların su kalitesini önemli ölçüde etkilediğini belirtmektedir (T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2021).

**Resim 3.1.** Deri OSB Arıtma Öncesi

2.Nokta Deri OSB arıtma sonrası;

Bu araştırmada belirlenen 2. numune noktası, Tekirdağ'ın Ergene ilçesi Sağlık Mahallesi sınırları içerisinde yer almaktadır. Bölgenin seçilme amacı, Ergene Havzası'nda yoğun endüstriyel faaliyetlerin su kalitesi üzerindeki etkilerini ve arıtma sonrası suyun alıcı ortamdaki yayılımını, ekosistem üzerindeki etkilerini ve sanayi kaynaklı bileşiklerin çevresel sürdürülebilirliğini değerlendirmek amacıyla seçilmiştir.

Sağlık Mahallesi, Ergene ilçesinde konut alanlarının Organize Sanayi Bölgesi ve geniş tarımsal arazilerle iç içe olduğu geçiş bölgelerinden biridir. Mahallede büyük ölçekli tarımsal üretim alanları, hayvancılık işletmeleri ve yerleşim birimleri bir arada bulunmaktadır. Bu bölge, yerleşim alanlarının, tarımsal faaliyetlerin ve endüstriyel baskının iç içe geçtiği bir arazi yapısına sahiptir. Ergene ilçesi genel olarak Türkiye'nin en yoğun sanayi faaliyetlerinin gerçekleştiği Ergene Havzası içerisinde yer almakta olup, su kirliliği açısından kritik bölgelerden biridir (Tekirdağ Çevre Durum Raporu, 2023).



Resim 3.2. Deri OSB Arıtma Sonrası

3. Nokta Asrın çiftliği sonrası;

Çalışmada 3. numune noktası olarak ele alınan istasyon, Tekirdağ ili Muratlı ilçesine bağlı Kırkkepenekli Mahallesi sınırları içerisinde yer almaktadır. Kırkkepenekli Mahallesi, Muratlı ilçe merkezine yaklaşık 7 km, Tekirdağ il merkezine ise yaklaşık 30 km uzaklıkta bulunan, kırsal yerleşim karakteri ile sanayi alanlarına komşu bir mahalledir (Kırkkepenekli, Muratlı; Wikipedia, 2025).

Bölgenin seçilme gerekçesi, Tekirdağ'ın Muratlı ilçesi gösteren Asrın Çiftliği'nin ardından Çorlu Çayı'nın akış yönünde konumlanmaktadır. Bu nokta, tarımsal faaliyetler, hayvansal üretim kaynaklı atıklar ve yerleşimsel yüzey akışlarının su kalitesi üzerindeki etkilerini değerlendirebilmek amacıyla ve su kalitesinin tarımsal kullanım, hayvansal atık kaynaklı yüzey akışı ve yerleşimsel etkiler altında nasıl değiştiğini değerlendirmek amacıyla seçilmiştir.



Resim 3.3. Asrın Çiftliği Sonrası

4. Nokta Asrın çiftliği öncesi;

Çalışma alanının 4. numune noktası, Tekirdağ ili Muratlı ilçesine bağlı Kırkkepenekli Mahallesi sınırlarında, Asrın Çiftliği'ne ulaşmadan önceki kesimde yer almaktadır. Bölge, hem tarımsal üretim alanları hem de çevredeki sanayi bölgelerinden etkilenebilecek bir konumda olması nedeniyle, Çorlu Çayı'nın kirlilik yükünü analiz etmede önemli bir izleme noktasıdır (Tekirdağ İli Çevre Durum Raporu, 2023). Kırkkepenekli Mahallesi, Muratlı ilçesinin kırsal

karaktere sahip yerleşimlerinden biri olup, çevresinde geniş tarım arazileri, hayvancılık faaliyetleri ve dağınık yerleşim alanları bulunmaktadır. Ayrıca mahalle, Ergene Havzası'nın yoğun kirletici baskı altındaki bölgelerinden biri olan Muratlı OSB'ye yakın konumdadır.



Resim 3.4. Asrın Çiftliği Öncesi

5.Nokta Muratlı lise köprüsü;

Bu çalışmada değerlendirilen 5. numune noktası, Tekirdağ ili Muratlı ilçesine bağlı Muradiye Mahallesi sınırlarında, Çorlu Çayı üzerindeki Muratlı Lise Köprüsü çevresinde yer almaktadır. Bu bölge, akarsu akışının kentsel yerleşim dokusu içinden geçmesi sebebi ile hem kentsel hem de sanayi-tarımsal çevresel baskıların bir arada görüldüğü bir kesimi temsil etmektedir (Tekirdağ İli Çevre Durum Raporu, 2023).

Muradiye Mahallesi, Muratlı ilçe merkezinin önemli yerleşim alanlarından biri olup, bölgede bulunan yerleşim alanlarının akarsuya yakın şekilde konumlandığı, çevresinde ticaret alanları, eğitim kurumları, küçük ölçekli işletmeler ve hizmet yapılarının bulunduğu bir bölgedir.



Resim 3.5. Muratlı Lise Köprü

3.2. Belirlenen Noktalardan Su Numunesi Alımı

Tablo 4.1'de belirtilen istasyonlardan alınan su numuneleri standart metotlara uygun şekilde alınmış ve saklanmıştır. (TS EN ISO 5667-3, TS 9547 ISO 5667-12). Her istasyondan sodyum tiyosülfatlı polipropilen şişelere su örnekleri alınarak fizikokimyasal ve bakteriyolojik analizler yapılmıştır. Laboratuvar analizleri için koruma önlemleri alınarak +4 °C'de saklanmıştır.

Fizikokimyasal parametreler; sıcaklık (SM 2550 B), çözünmüş oksijen (ASTM D888 Metot C), pH (TS EN ISO 10523), tuzluluk (SM 2520 B) değerleri WTW markalı Multi 3430 modelli multiparametre cihazı ile, bulanıklık (TS EN ISO 7027-1) değeri VELP SCIENTIFICA

marka TB1 model türbidimetre cihazı ile, AKM (2540 D) değeri gravimetrik standard metot ile, TOK değeri (TS 8195 EN 1484) ile, KOİ (SM 5220 B) değeri açık reflaks-titrimetrik metot ile ve BOİ (SM 5210 B) değeri 5 günlük test uygulanarak tespit edilmiştir.

Escherichia coli (TS EN ISO 9308-1) ve Koliform bakteriler (TS EN ISO 9308-1) kromojenik besiyeri (CCA) kullanılarak tespit edilmiştir.

Fizikokimyasal ve bakteriyolojik analizler hizmet alımı yöntemi ile yerel bir Çevre Analiz Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Tüm parametrelerin analizi belirtilen standart metodlara göre gerçekleştirilmiştir.

Fizikokimyasal Analizler

Fizikokimyasal parametrelerin ölçümleri aşağıdaki yöntemlerle yöntemlere göre yapılmıştır:

- pH, Sıcaklık, Tuzluluk ve Çözünmüş Oksijen analizleri indüksiyon tipinde elektrotları bulunan WTW markalı Multi 3430 modelli multiparametre ölçüm cihazı ile laboratuvar ortamında yapılmıştır. Ölçümde kullanılan cihaz kalibre edilerek kullanılmıştır.
- Bulanıklık : Bulanıklık analizinde numune ile çalışmaya başlamadan önce cihazın kalibrasyonu yapılmıştır. Kalibrasyonlarda, bulanıklığı giderilmiş su ile aletin blank ayarı yapılarak numune iyice çalkalanıp cam tüpte belirtilen çizgiye kadar doldurulmuş ve VELP SCIENTIFICA marka TB1 model türbidimetre cihazından direkt okunan değer bulanıklık değerleri NTU cinsinden kaydedilmiştir.
- Kimyasal Oksijen İhtiyacı : Numunedeki organik ve indirgenebilir inorganik maddeler, sülfürik asit ve ısıtma altında (reflaks - geri soğutma) belirli bir miktar potasyum dikromat ($K_2Cr_2O_7$) ile reaksiyona sokularak oksitlenmektedir. Harcanan dikromat miktarı, sonradan bir titrimetrik yöntemle (demir (II) amonyum sülfat ile) belirlenir. Bu harcanan dikromat miktarı, oksijen cinsinden KOİ değerini verir.
- Biyolojik Oksijen İhtiyacı (BOİ): Bu metot BOİ şişesinin içerisinde hava kalmayacak şekilde ağzına kadar numune ile doldurulduktan sonra sabit sıcaklıkta 5 gün inkübasyonunu içerir. Numune içerisindeki çözünmüş oksijen deneye başlamadan önce ölçülür ve deney sonunda tekrar ölçülerek iki ölçüm arasındaki fark alınır.
- Askıda Katı Madde (AKM): Analiz sürecinde iyice karıştırılmış numune, tartımı alınmış standart bir cam-elyaf filtreden ($<2 \mu m$ gözenek aralığında) geçirilerek, filtre üzerinde kalan maddelerle birlikte 103-105 °C'de sabit tartıma gelene kadar kurutulur. Filtre kağıdının ağırlığındaki artış miktarı, toplam askıda katı maddeyi temsil etmektedir.
- Toplam Organik Karbon (TOK): Suyun organik karbon bileşimini belirleme prosedürünün temeli, organik olarak bağlı bileşenlerin karbonlarının oksidasyon sonucu karbondioksite dönüşmesi ve NDIR detektörü kullanılarak karbondioksitin belirlenmesine dayanır. TOK değeri, toplam karbon ile toplam inorganik karbon ölçümlerinin arasındaki farkla elde edilir.

Bakteriyolojik Analizler

Burada kullanılan yöntemin prensibi numunenin organizmaları tutan bir membran filtreden filtrelenmesi ve membran filtrenin kromojenik koliform agar plakasına yerleştirilerek (36 ± 2) °C'de (21 ± 3) saat süreyle inkübasyonu şeklindedir. β -D-galaktosidaz pozitif koloniler (pembeden kırmızıya), E. coli olmayan olası koliform bakteriler olarak sayılır. β -D-

galaktosidaz ve β -D-glukuronidaz pozitif koloniler (koyu maviden mora) E. coli olarak sayılır.

BULGULAR ve TARTIŞMA

Bu bölümde, Çorlu Çayı üzerinde yapılan fizikokimyasal ve bakteriyolojik analizlerin sonuçları detaylı bir şekilde sunulmuştur. Elde edilen bulgular, seçilen beş istasyondan toplanan numuneler aracılığıyla mekânsal ve mevsimsel farklılıkları ortaya koymayı amaçlamaktadır. Analizler, her bir parametrenin su kalitesi üzerindeki etkisini anlamak ve kirlilik kaynaklarını değerlendirmek için gerçekleştirilmiştir. Bulgular, farklı istasyonlardaki değerlerin su yönetim standartlarıyla uyumunu incelemek, mevsimsel değişimlerin su kalitesine etkisini ortaya koymak ve parametreler arasındaki ilişkileri değerlendirmek için Şekil 4.1., Şekil 4.2., Şekil 4.3., Şekil 4.4., Şekil 4.5., Şekil 4.6., Şekil 4.7., Şekil 4.8. ve Şekil 4.9. ve Tablo 4.1., Tablo 4.2., Tablo 4.3., Tablo 4.4., Tablo 4.5., Tablo 4.6. ve Tablo 4.7 da yer alan analizlerle desteklenmiştir. Bu çerçevede, fizikokimyasal parametrelerin ve bakteriyolojik analizlerin sonuçları ayrı alt başlıklar halinde sunularak değerlendirilmiştir.

Nisan 2024 Tarihli Analizler

Beş istasyondaki Nisan 2024 tarihli fizikokimyasal parametre sonuçlarını Tablo 4.1’de sunulmuştur. Su kalitesi standartları ve kirlilik yükleri incelenmiştir. Analiz sonuçlarına bakıldığında Çorlu Deresi'nin kirlilik yükünün yüksek olduğunu ve su kalitesinin sucul ekosistem için elverişsiz seviyelerde bulunduğunu göstermektedir.

Tablo 4.1. Nisan 2024 Fizikokimyasal Analiz Sonuçları

İstasyon	pH	Sıcaklık (°C)	Çözülmüş Oksijen (mg/L)	Tuzluluk (%)	Bulanıklık (NTU)	KOİ (mg/l)	BOİ (mg/l)	AKM (mg/l)	TOK (mg/l)
1.Nokta	7,56	8,4	1,8	3,3	141	253,7	84,6	194	158,6
2.Nokta	7,3	9,0	0,78	3,39	229	437,1	146	228	182,8
3.Nokta	7,98	8,7	4,03	4,67	261	374,6	129	434	151
4.Nokta	7,92	8,5	0,85	4,53	269	316,1	105,5	404	196,6
5.Nokta	7,86	9,5	2,45	4,06	202	308,3	103	292	172,1

2. ve 4. noktalarda ölçülen ÇO konsantrasyonları (sırasıyla 0,78 mg/L ve 0,85 mg/L) kritik seviyelerin çok altında olmasından dolayı suyun anaerobik koşullara yakın olduğunu ve aerobik sucul yaşamın büyük ölçüde yok olduğunu gösterir. Yüksek organik yük (KOİ ve BOİ) ve KOİ/BOİ Oranı tüm istasyonlarda son derece yüksektir (KOİ 253,7 mg/L ile 437,1 mg/L arasında). 2. nokta arıtma sonrası istasyonunda KOİ (437,1 mg/L) ve BOİ (146 mg/L) değerlerinin en yüksek seviyede ölçülmesi, bu noktanın ya büyük bir deşarjın hemen sonrası olduğunu ya da bölgedeki atıksu arıtma tesislerinin beklenen verimlilikte çalışmadığını göstermektedir. KOİ/BOİ oranının 3 civarında seyretmesi 2. nokta Deri OSB arıtma sonrası

için $(437,1 / 146 = 2,9)$ ve 3. nokta Asrın Çiftliği sonrası $(374,6 / 129 = 2,9)$, kirletici yükün büyük bir kısmının biyolojik olarak zor ayrışan, muhtemelen sanayi kaynaklı organik maddelerden oluştuğunu düşündürmektedir. Tuzluluk ve askıda katı madde (AKM) Etkisi 3. nokta (Asrın Çiftliği sonrası) ve 4. nokta (Asrın Çiftliği öncesi) istasyonlarında kaydedilen yüksek tuzluluk değerleri (%4,67 ve %4,53) ve çok yüksek AKM değerleri (434 mg/L ve 404 mg/L), bölgede yoğun endüstriyel atıksu deşarjlarının varlığına işaret etmektedir.

Kasım 2024 Tarihli Analizler

Çorlu Deresi'ne ait Kasım 2024 fizikokimyasal analiz sonuçları Tablo 4.2'de verilmiştir.

Tablo 4.2. Kasım 2024 Fizikokimyasal Analiz Sonuçları

İstasyon	pH	Sıcaklık (°C)	Çözülmüş Oksijen (mg/L)	Tuzluluk (%)	Bulanıklık (NTU)	KOİ (mg/l)	BOİ (mg/l)	AKM (mg/l)	TOK (mg/l)
1.Nokta	7,6	8,6	1,49	3,65	146	<10	<2	69	133,4
2.Nokta	7,7	8,8	4,08	4,67	274	96,8	30,3	259	156,2
3.Nokta	7,6	9,5	0,68	3,41	226	99,9	40,2	317	109,2
4.Nokta	7,4	8,6	0,9	4,68	271	134,5	43,5	213	142,6
5.Nokta	7,6	9,6	2,42	4,28	195	123	42,4	708	158,3

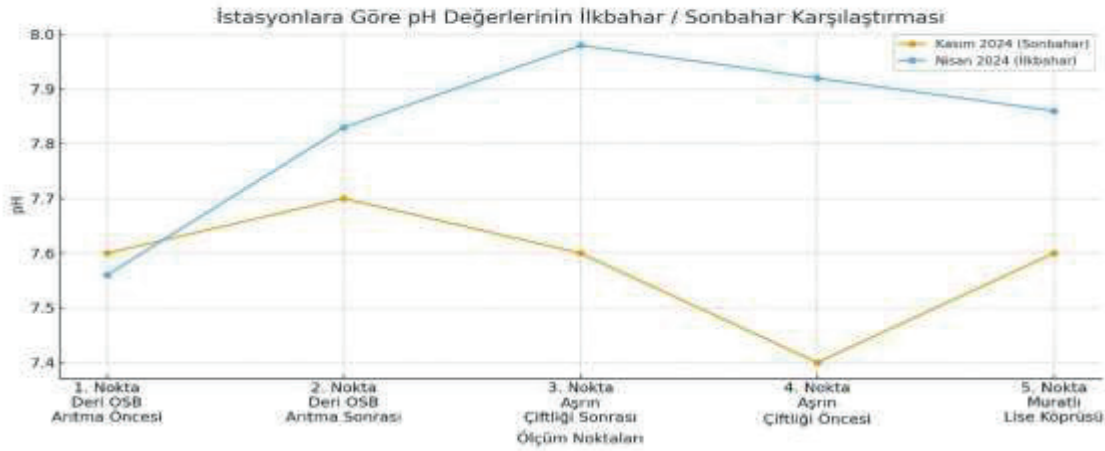
Burada ise; ciddi düzeyde organik ve askıda katı madde kirliliği bulunduğunu ve bu kirliliğin noktasal ve yayılı kaynaklardan etkilendiğini göstermektedir. KOİ değerleri özellikle 2. nokta Deri OSB arıtma sonrası ve 4. nokta Asrın Çiftliği öncesinde (96,8 - 134,5 mg/L aralığında) ve BOİ değerleri (30,3 - 43,5 mg/L aralığında) oldukça yüksektir. Yüksek BOİ ve KOİ, dereye yoğun organik kirlilik (evsel veya endüstriyel atıksu deşarjları) olduğunu ve sucul yaşam için tehlikeli bir ortam yarattığını gösterir. BOİ/KOİ oranı örneğin 2. nokta Deri OSB arıtma sonrasında $30,3 / 96,8 = 0,31$ olmaktadır. Bu oran, atıksuyun biyolojik olarak ayrışabilen kısmının hala yüksek olduğunu, ancak biyolojik olarak parçalanamayan muhtemelen endüstriyel kaynaklı organik maddelerin de önemli bir paya sahip olduğunu düşündürmektedir. ÇO değerleri, özellikle 3. nokta (Asrın Çiftliği sonrası) (0,68 mg/L) ve 4. Nokta (Asrın Çiftliği öncesi) (0,90 mg/L) gibi noktalarda kritik derecede düşüktür (<1 mg/L). Bu sudaki organik maddelerin ayrışması yüksek BOİ kaynaklı çok fazla oksijen tüketildiğini bu durumun sucul canlılar için yaşamı imkansız hale getirdiğini gösterir. AKM değerleri (69-708 mg/L aralığında) olduğu gözlemlenmiştir. Özellikle 5. nokta (Muratlı Lise Köprüsü) (708 mg/L) ve 3. nokta (Asrın Çiftliği sonrası) (317 mg/L) noktalarında aşırı derecede yüksektir. Bu, yoğun sedimentasyon, erozyon veya kontrolsüz atıksu deşarjları sonucu oluşan katı maddelerin varlığını göstermektedir. Ayrıca; Kasım 2024 analiz sonuçlarına göre 1. noktada ölçülen (Deri OSB arıtma öncesi) KOİ ve BOİ değerlerinin KOİ (Kimyasal Oksijen İhtiyacı): <10 mg/L, BOİ (Biyokimyasal Oksijen İhtiyacı): <2 mg/L olarak ölçülmüştür.

Bu durum genelde şu iki nedenle olur; numunenin toksik içeriğe sahip olması, biyolojik oksidasyonu baskılar, BOİ düşük çıkar. 1. noktanın Asrın Çiftliği Arıtma öncesi sanayi bölgesinde olması, ağır metaller, fenoller, krom vb. maddeleri içermesinden kaynaklı biyolojik

arıtmayı baskılamasından, BOİ'nin çok düşük çıkması kirleticinin yokluğu anlamına gelmez. Organik yük biyolojik olarak parçalanabilir değildir. Toksik ve inhibitör maddelerin varlığı muhtemel olduğu düşünülebilir. Bu nedenle 1. nokta, biyolojik kirlilik açısından düşük görünse de kimyasal-toksik kirlilik potansiyeli yüksek bir alan olarak değerlendirilebilir.

Mevsimsel Karşılaştırma

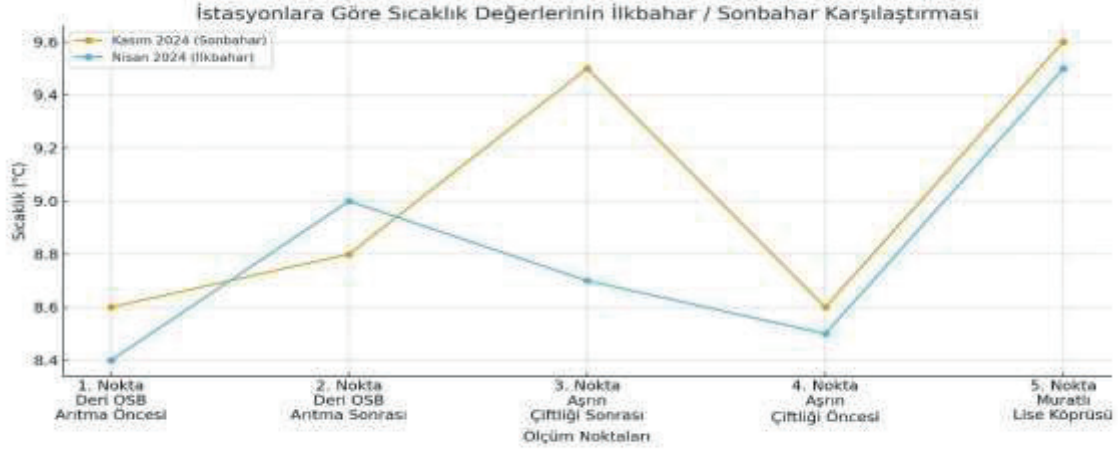
Şekil 4.1.'de yer alan grafikte pH değerleri 7,5–7,8 aralığında değişmekte olup akarsu ekosistemleri için kabul edilen doğal sınırlar içinde kalmaktadır. İstasyonlar arasında yaklaşık 0,3–0,4 birimlik farklılık gözlemlenmiştir. Bu değişim özellikle arıtma tesisi öncesi/sonrası ve tarımsal faaliyet alanları çerçevesinde belirginleşmektedir. Nisan ayındaki pH değeri Kasım ayına göre biraz daha yüksek olup bu durum mevsimsel sıcaklık artışı, biyolojik aktivitenin artması ile ilişkilendirilebilir. Kasım dönemi pH değerinin hafif düşmesi yağışların artmasıyla, suyun seyrelmesi ile açıklanabilir. Çetin ve Demir'in 2021 yılında, Boyd, 2020'de yapmış olduğu çalışmada ilkbaharda artan fotosentez, sudaki CO₂ tüketimini artırarak pH değerinin bazik yöne kaymasına neden olduğu belirtilmiştir (Çetin & Demir, 2021; Boyd, 2020). Benzer şekilde Kılıç ve Aydın tarafından 2023 yılında yapılan çalışmada endüstriyel deşarjların içerik ve debisindeki mevsimsel değişimler pH üzerinde etkili olabileceği (Kılıç & Aydın, 2023) ve yine Topuz ve Arslan'ın 2020 yılında yapmış olduğu çalışmada Asrın Çiftliği çevresindeki istasyonlarda ilkbaharda pH değerlerinin yükselmesi, tarımsal ve organik kirlilik baskısının belirgin olduğunu gösterdiği belirtilmiştir (Topuz & Arslan, 2020).



Şekil 4.1. pH Parametresinin İlkbahar/Sonbahar Karşılaştırması

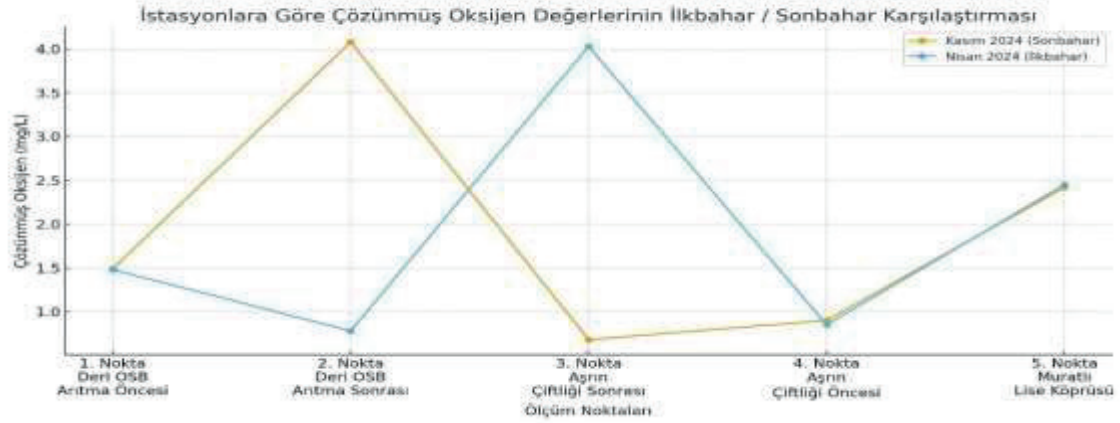
Şekil 4.2'de Çorlu Çayı'nda 2024 yılı Nisan (ilkbahar) ve Kasım (sonbahar) sıcaklık değerleri arasında belirgin bir fark gözlenmemekle birlikte, mevsimsel geçişin etkileri görülmektedir. İlkbahar döneminde sıcaklık değerleri 8,4–9,5°C, sonbahar döneminde ise 8,6–9,6°C aralığında ölçülmüştür. Literatürde, sonbahar döneminde yüzey sularının yaz aylarına kıyasla soğumaya başlamasına rağmen, sıcaklık düşüşünün ilkbahar dönemine göre her zaman daha yüksek seyredebildiği belirtilmiştir. Bunun nedeni; Boyd'un 2020'de yapmış olduğu çalışmada yaz sonu ve sonbahar başında su kütlelerinin termal olarak hâlâ ısını korumasıdır

(Boyd, 2020) şeklinde vurgulamıştır. Çorlu Çayı'nda Kasım sıcaklıklarının Nisan dönemine göre hafif yüksek seyretmesi de bu doğal termal gecikmeyle uyumludur. Mevsimsel analiz genel olarak değerlendirildiğinde; ilkbahar sıcaklıkları, düşük güneşlenme süresi ve kış sonrası termal koşullara uygun olarak daha düşüktür, sonbahar sıcaklıkları, yaz mevsiminden devralınan termal birikim nedeniyle nispeten yüksektir.



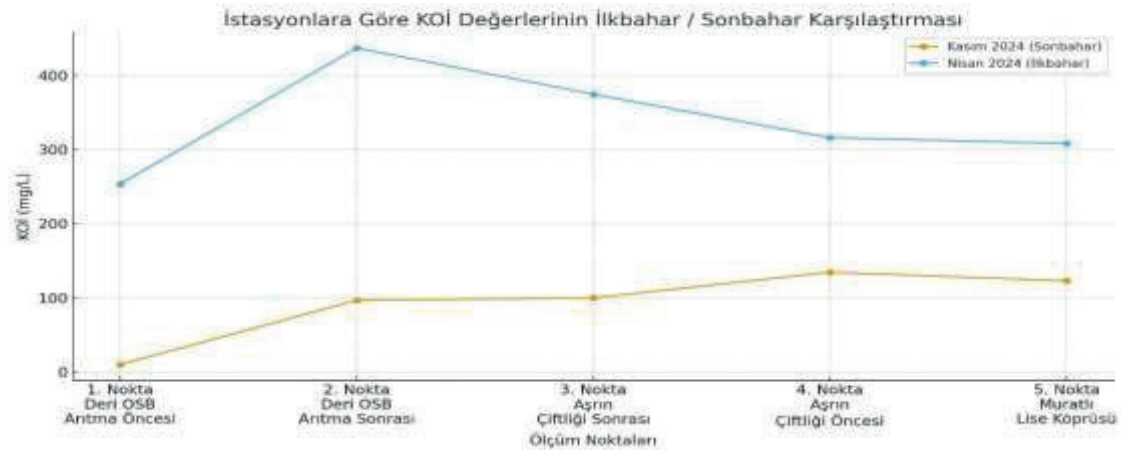
Şekil 4.2. Sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$) Parametresi İlkbahar ve Sonbahar Karşılaştırması

Çorlu Çayı'nın 2024 yılı Nisan (ilkbahar) ve Kasım (sonbahar) dönemlerine ait ÇO değerleri Şekil 4.3.'te sunulmuş olup mevsimsel değişimin oldukça belirgin olduğu görülmektedir. 4. nokta (Asrın Çiftliği öncesi) istasyonunda hem ilkbahar hem sonbahar döneminde ÇO'nun 1 mg/L'nin altında kalması, su ekosistemi açısından ciddi oksijen yetersizliğine işaret etmektedir. Özellikle 3. nokta (Asrın Çiftliği sonrası) istasyonunda ilkbaharda 4,03 mg/L, sonbaharda ise sadece 0,68 mg/L ölçülmesi, istasyonun organik yük ve mikrobiyal oksijen tüketimi bakımından yüksek baskı altında olduğunu göstermektedir. 2. nokta (Deri OSB arıtma sonrası) istasyonunda Kasım ayında ölçülen 4,08 mg/L değeri, bölgedeki arıtma tesisinin dönemsel olarak daha etkin çalıştığına işaret etmektedir. Ancak aynı istasyonda ilkbaharda ÇO'nun 0,78 mg/L'ye kadar düştüğü görülmektedir. Çalışma alanındaki birçok istasyonda her iki dönemde de ÇO seviyesinin 4 mg/L'nin altında kalması, Çorlu Çayı'nın oksijen açısından baskı altında olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.3. Çözünmüş Oksijen (mg/L) Parametresi İlkbahar ve Sonbahar Karşılaştırma

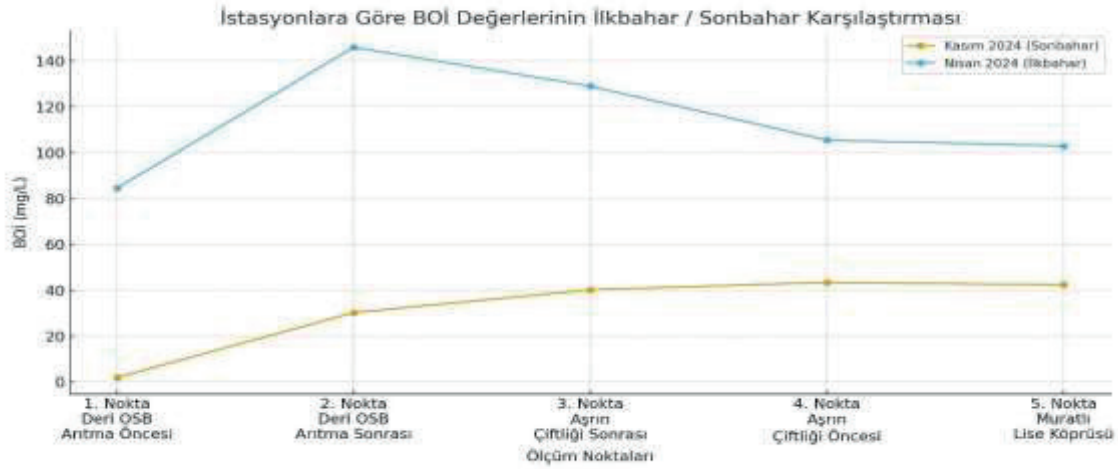
Şekil 4.4.'de Nisan dönemine ait KOİ değerleri 253,7–437,1 mg/L aralığında seyretmekte olup tüm istasyonlarda sonbahar dönemine kıyasla çok daha yüksek sonuçlar elde edilmiştir. Bu durum ilkbahar aylarında bölgede artan yağış, tarımsal faaliyetler ve yüzey akışının organik yükü su ortamına taşımış olabileceğini göstermektedir. Literatürde yağışlı dönemlerde yüzey akışının KOİ konsantrasyonunu arttırdığı sıkça rapor edilmiştir (Çetin & Demir, 2021; Kılıç & Aydın, 2023). Sonbaharda KOİ değerleri düşmektedir, fakat bazı istasyonlarda (özellikle 4 ve 5. nokta) hâlâ yüksek organik kirlilik devam etmektedir. En kritik artış 2. istasyonda görülmektedir, bu durum Deri OSB arıtma çıkışındaki mevsimsel yük değişiminin güçlü bir göstergesidir. Bu bulgular, Çorlu Çayı'nda organik madde yükünün mevsimsel olarak dalgalandığını ve özellikle ilkbahar döneminde hem tarımsal hem de endüstriyel baskı altında olduğunu düşündürmektedir.



Şekil 4.4. KOİ (mg/L) Parametresi İlkbahar ve Sonbahar Karşılaştırma

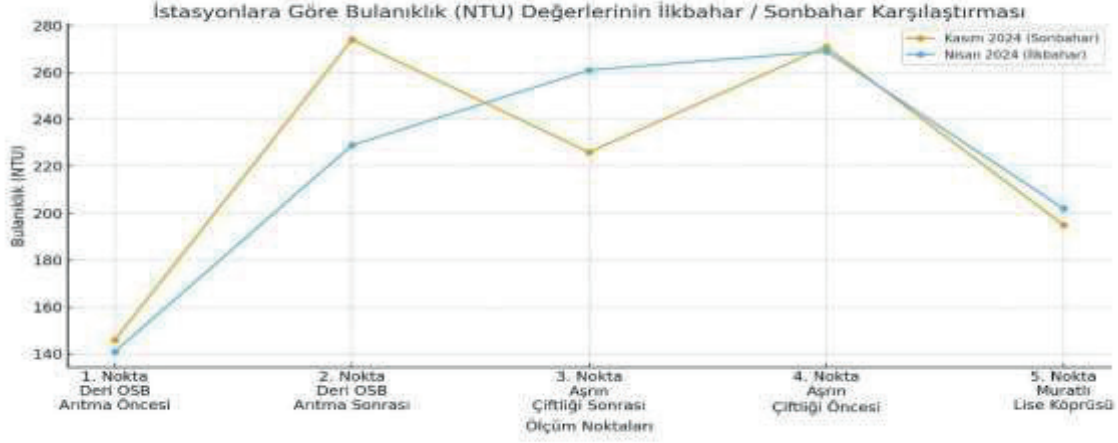
Çorlu Çayı'nın 2024 yılı Nisan (ilkbahar) ve Kasım (sonbahar) BOİ dağılımı Şekil 4.5'te verilmiş olup mevsimler arası belirgin bir fark olduğu görülmektedir. En yüksek BOİ değeri 2. nokta (Deri OSB arıtma sonrası) istasyonunda 146 mg/L olarak ölçülmüştür. Bu değer, arıtma tesisinden çıkan suların özellikle ilkbahar döneminde organik yük açısından yüksek

olduğu ve endüstriyel faaliyetlerin mevsimsel yoğunluğunun çaya yansıdığı şeklinde değerlendirilebilir. Aynı durum literatürde de OSB çevresindeki akarsularda yüksek BOİ değerleri şeklinde rapor edilmiştir (Kılıç & Aydın, 2023) 4. nokta (Asrın Çiftliği öncesi) istasyonunda sonbaharda dahi 43,5 mg/L ölçülmüş olması, bölgenin hayvancılık ve tarımsal atık kaynaklı sürekli bir organik kirlilik baskısı altında olduğunu göstermektedir. İlkbaharda BOİ çok yüksektir bu durumda organik kirlilik ve biyolojik ayrışmanın arttığını düşündürmektedir. Sonbaharda BOİ azalmaktadır, ancak bazı istasyonlarda hâlâ “yüksek organik yük” seviyesindedir. En yüksek mevsimsel fark 2. noktada görülmektedir endüstriyel etkinin en güçlü olduğu yer olarak değerlendirilebilir. BOİ sonuçları Çorlu Çayı’nın özellikle ilkbaharda ciddi organik madde baskısı altında olduğunu işaret etmektedir.



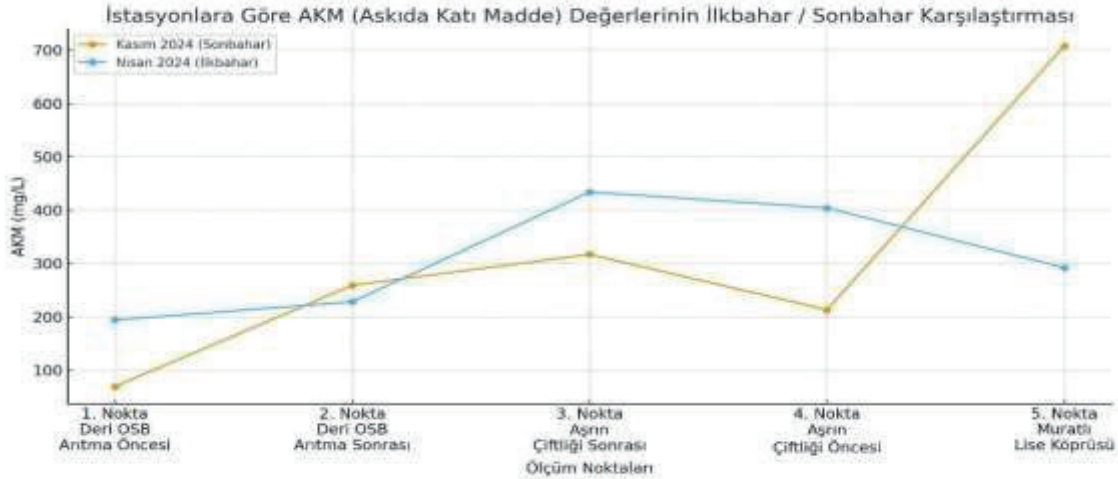
Şekil 4.5. BOİ (mg/L) Parametresi İlkbahar ve Sonbahar Karşılaştırma

Şekil 4.6.'ya göre İlkbahar dönemi için en yüksek değer 4. nokta (Asrın Çiftliği öncesi) istasyonunda 269 NTU olarak kaydedilmiştir. Bu durum bölgenin tarımsal aktivite ve hayvansal atık kaynaklı partikül yüküne maruz kaldığını göstermektedir. En yüksek değer 2. nokta (Deri OSB arıtma sonrası) istasyonunda 274 NTU olarak ölçülmüştür. Bu sonuç, arıtma çıkışındaki partikül yükünün özellikle sonbaharda arttığını ve endüstriyel baskının bu noktada güçlü olduğunu göstermektedir. Sonbahar döneminde bulanıklık değerleri 146–274 NTU aralığındadır. Şimşek ve Yılmaz'ın 2022'de yapmış olduğu çalışmada sıcaklıkların düşmesi, akış hızındaki değişim ve yaz dönemi boyunca biriken partikül birikimleri sonbaharda akarsu bulanıklığının yüksek çıkmasına neden olabildiği (Şimşek & Yılmaz, 2022) belirtilmiştir. İstasyon bazlı değerlendirmede; 1. nokta (Deri OSB arıtma öncesi) her iki dönemde de nispeten daha düşük bulanıklık göstermiş olsa da, değerler yine de yüksek olup akarsuya giren partikül yükünün önemli olduğunu göstermektedir. 3. nokta (Asrın Çiftliği sonrası) ilkbaharda 261 NTU, sonbaharda 226 NTU olup tarımsal kaynaklı partikül yükünün etkisini göstermektedir. 4. nokta ve 2. nokta bulanıklık açısından en kritik istasyonlardır.



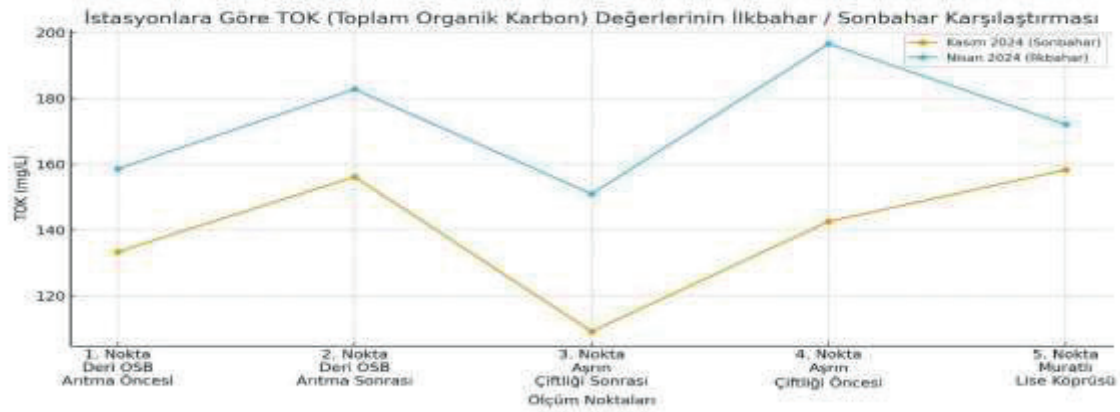
Şekil 4.6. Bulanıklık (NTU) Parametresinin İlkbahar/Sonbahar Karşılaştırması

Şekil 4.7'ye bakıldığında en yüksek AKM değeri 3. nokta (Asrın Çiftliği sonrası) istasyonunda 434 mg/L olarak ölçülmüştür. Bu sonuç, bölgedeki tarımsal faaliyetlerin ve hayvansal atıkların AKM yükü üzerindeki etkisini ortaya koymaktadır. Sonbahar döneminde AKM değerlerinin 69–708 mg/L aralığında değiştiği görülmektedir. Özellikle 5. nokta (Muratlı Lise Köprüsü) istasyonunda 708 mg/L gibi yüksek bir değer ölçülmüştür. Bu durum bölgedeki akış rejiminin değiştiğini, sediment taşınımının arttığını ve muhtemelen hem tarımsal hem de evsel deşarjların etkisini göstermektedir. Sonbaharda 3 ve 4. noktalarda AKM'nin nispeten daha düşük olması, Şimşek ve Yılmaz'ın 2022 yılında yapmış oldukları çalışmada yaz boyunca akarsu yatağında biriken sedimentin mevsimsel değişimle yeniden taşınmasının etkisini gösterdiği belirtilmiştir (Şimşek & Yılmaz, 2022).



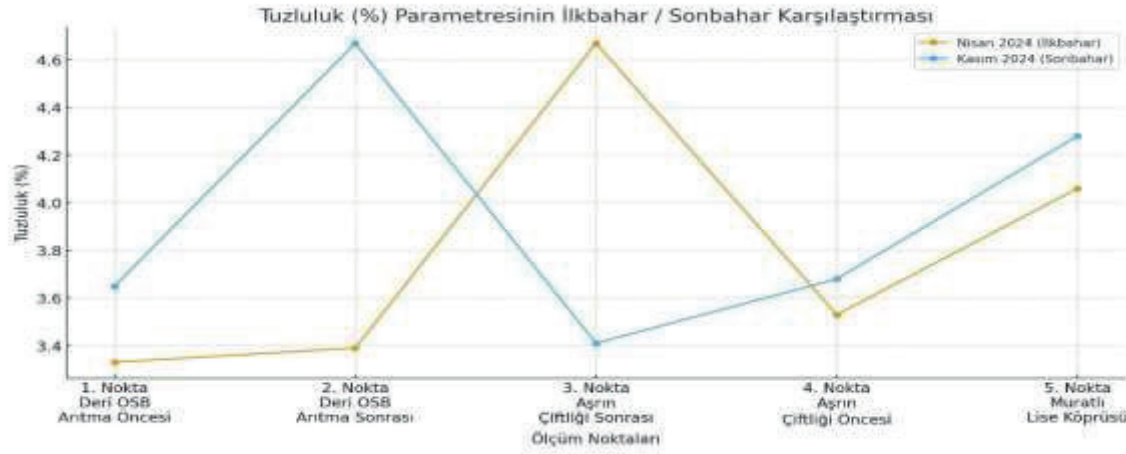
Şekil 4.7. AKM (mg/L) Parametresi İlkbahar ve Sonbahar Karşılaştırma

İlkbahar döneminde TOK değerleri şekil 4.8.'de 151–196.6 mg/L aralığındadır. Çetin ve Demir'in 2021'de yapmış olduğu çalışmada bu dönemde özellikle yağışların artmasıyla yüzey akışına karışan çözünmüş organik maddeler ve tarımsal faaliyetler TOK seviyelerini yükselttiği belirtilmiştir (Çetin & Demir, 2021). 4. nokta (Asrın Çiftliği öncesi) istasyonu en yüksek TOK değerine (196,6 mg/L) sahiptir. Bu durum, bölgedeki tarımsal/hayvansal faaliyetlerin organik karbon birikimine önemli katkı sağladığını göstermektedir. Sonbahar değerleri 109,2–158,3 mg/L arasında değişmektedir. Şimşek ve Yılmaz'ın 2022 yılında yapmış olduğu çalışmada sonbaharda üretim faaliyetlerinin azalması ve daha düşük sıcaklık nedeniyle mikrobiyal ayrışmanın yavaşlaması TOK değerlerinde düşüşe yol açtığı belirtilmiştir (Şimşek & Yılmaz, 2022). İlkbaharda TOK değerleri genel olarak daha yüksektir, yağış, yüzey akışı ve tarımsal aktivite ile uyumludur. Sonbaharda değerler düşmüş olsa da, TOK hâlâ yüksek organik yük sınıfındadır.



Şekil 4.8. TOK (mg/L) Parametresi İlkbahar ve Sonbahar Karşılaştırma

Şekil 4.9.'da ilkbahar döneminde tuzluluk değerlerinin %3,33 ile %4,67 arasında değiştiği görülmektedir. Çelik ve Aydın'ın 2021'de yapmış olduğu çalışmada ilkbaharda yağışların artması ve yüzey akışının yükselmesi nedeniyle bazı noktalarda tuzluluk seviyeleri seyrelme etkisiyle düşebileceği belirtilmiştir (Çelik ve Aydın, 2021). Bu dönemde 3. nokta (Asrın Çiftliği sonrası) istasyonu %4,67 ile en yüksek tuzluluk değerine sahiptir. Bu durum, çiftlik faaliyetlerine bağlı olarak suya iyonik yüklerin karışmasıyla açıklanabilir. Sonbaharda tuzluluk değerleri %3,41–%4,67 aralığında ölçülmüştür. Şahin & Duman'ın 2020'de yapmış oldukları çalışmada; bu dönemde daha düşük yağış, artan buharlaşma ve yaz aylarının etkisi nedeniyle bazı noktalarda tuzluluk seviyelerinin yükseldiği görüldüğü belirtilmiştir (Şahin & Duman, 2020). Genel değerlendirmede; endüstriyel alanlar (OSB çevresi) ve tarımsal/hayvansal üretim bölgeleri tuzluluk değişiminin temel belirleyicileridir.



Şekil 4.9. Tuzluluk (%) Parametresi İlkbahar ve Sonbahar Karşılaştırma

Aşağıdaki Tablo 4.3.'de Çorlu Çayı için gerçekleştirilen mevsimsel analiz sonuçları, ilkbahar ve sonbahar dönemleri arasında fizikokimyasal farklılıklar olduğunu göstermektedir. İlkbaharda ortalama sıcaklık $8,8^{\circ}\text{C}$ iken sonbaharda $9,0^{\circ}\text{C}$ 'ye yükselmiştir. Bu artış Çözünmüş oksijenin azalmasına, organik madde ayrışmasının hızlanmasına ve kirletici etkilerin daha belirgin hale gelmesine yol açabilecek bir değişimdir. pH değerinin $7,8$ 'den $7,5$ 'e düşmesi sonbahar mevsiminde endüstriyel ve evsel kaynaklı girdilerin etkisinin arttığını düşündürmektedir. Tuzluluk değerlerinin $\%3,9$ 'dan $\%4,1$ 'e yükselmesi sıcaklık ile birlikte artan buharlaşmanın havza genelindeki iyon yükünün ve potansiyel kirletici baskısının sonbahar döneminde daha yüksek olduğunu göstermektedir. Bu bulgular birlikte değerlendirildiğinde Çorlu Çayında ilkbahar mevsimine göre Sonbaharda daha fazla kirletici etkiye maruz kaldığı ve su kalitesinin mevsimsel olarak olumsuz yönde değiştiği sonucuna ulaşılmaktadır.

Tablo 4.3. Ortalama Değerlerin Mevsimsel Karşılaştırması

Dönem	Sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$)	pH	Tuzluluk (%)	Çözünmüş Oksijen (mg/L)	Bulanıklık (NTU)	KOİ (mg/L)	BOİ (mg/L)	AKM (mg/L)	TOK (mg/L)
İlkbahar	8,8	7,8	3,9	1,91	220,4	337,96	113,62	310,4	177,22
Sonbahar	9,0	7,5	4,1	1,91	222,4	90,84	31,28	313,2	140,74

Tablo 4.4. Nisan- Kasım (2024) Ölçüm Parametrelerin Maksimum ve Minimum Değerleri

Parametre	Min.Değer	Mak.Değer
pH	7,4	7,98
Sıcaklık	8,4	9,6
Çözünmüş Oksijen	0,68	4,08
Tuzluluk	3,33	4,68
Bulanıklık	141	274
KOİ	96,8	437,1
BOİ	30,3	146

Tablo 4.4’de Nisan- Kasım (2024) ölçüm parametrelerinin maksimum ve minimum değerler incelendiğinde; Çorlu Çayı’nın Nisan–Kasım 2024 döneminde su kalitesinin birçok parametre açısından olumsuz özellikler gösterdiği belirlenmiştir. pH ve sıcaklık değerleri kabul edilebilir düzeylerde olsa da, çözünmüş oksijen değerlerinin 0,68 mg/L’ye kadar düşmesi, ekosistem açısından kritik bir oksijen yetersizliğine işaret etmektedir. Tuzluluk ve bulanıklık değerlerinin yüksek seyretmesi, çayın antropojenik baskılar altında olduğunu göstermektedir. KOİ ve BOİ değerlerinin tüm ölçümlerde yüksek çıkması ise suyun hem kimyasal hem biyolojik olarak ağır bir organik kirlilik yükü altında bulunduğunu ortaya koymaktadır. Nisan ayı için KOİ ve BOİ değerinin en yüksek 2. nokta olan Deri OSB arıtma sonrasında olması KOİ açısından akarsuda yoğun endüstriyel organik kirlilik bulunduğu, BOİ açısından çayın biyolojik olarak parçalanabilir organik maddelerle yüklendiğini ve oksijen tüketiminin çok yüksek olduğunu ortaya koymaktadır.

Bakteriyolojik İnceleme

Çorlu Çayı’nda Nisan ve Kasım 2024 dönemlerinde gerçekleştirilen bakteriyolojik analizlerde, hem toplam koliform hem de *Escherichiacoli* (*E. coli*) değerlerinin her iki dönemde de >100 kob/100 mL seviyesinin üzerinde olduğu belirlenmiştir. Tablo 4.6.’da Nisan ve Kasım (2024) ait ölçüm sonuçları bulunmaktadır.

Tablo 4.6. Nisan ve Kasım (2024) Bakteriyolojik Analiz

Parametre	Nisan 2024	Kasım 2024
Toplam Koliform	>100	>100
<i>E. coli</i>	>100	>100

Her iki dönemde de >100 kob/100 mL seviyesinin üzerinde olmasından dolayı, bu bulgu, suyun yoğun fekal kökenli kirlenmeye maruz kaldığını ve insan sağlığı açısından risk taşıdığını göstermektedir.

Türkiye’de yüzeysel sular için yürürlükte olan Su Kirliliği Kontrol Yönetmeliği’ne göre içme ve rekreasyonel amaçlı kullanılacak sularda koliform bakteri sayısının düşük düzeylerde bulunması gerekmekte olup (Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2022), tespit edilen konsantrasyonlar su kalitesinin bu standartların oldukça üzerinde olduğunu ortaya koymaktadır. Tokatlı’nın 2020 yılında, Çiçek ve Ertan’nın 2023 yılında yapmış oldukları çalışmada, Ergene Havzası’nda yerleşim bölgeleri, hayvancılık faaliyetleri ve endüstriyel deşarjların bulunduğu kesimlerde yüksek koliform ve *E. coli* düzeylerinin yaygın olduğunu bildirmişlerdir (Tokatlı, 2020; Çiçek ve Ertan, 2023). Nisan ve Kasım ayları arasında bakteriyolojik açıdan dikkate değer bir fark gözlenmemiştir.

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada Çorlu Çayı’nın Nisan ve Kasım 2024 dönemlerinde gerçekleştirilen fiziko-kimyasal ve bakteriyolojik analizleri değerlendirilmiş olup, elde edilen bulgular akarsuyun genel su kalitesinin yıl boyunca ciddi ölçüde bozunmuş olduğunu göstermektedir. Çalışmanın sonuçları, özellikle organik kirlilik göstergeleri, çözünmüş oksijen düzeyleri ve bakteriyolojik yük açısından akarsuyun ağır kirlenme baskısı altında olduğunu ortaya koymaktadır. pH değerlerinin her iki dönemde de 7,4–7,9 aralığında olması, suyun genel olarak nötr–hafif alkali karakterde olduğunu göstermektedir. Benzer şekilde sıcaklık değerleri de

mevsim koşullarıyla uyumludur ve akarsu boyunca küçük farklılıklarla seyretmiştir. Çözünmüş oksijen ise Çorlu Çayı için en kritik parametrelerden biridir. Her iki dönemde de özellikle bazı istasyonlarda oksijen seviyeleri 1 mg/L düzeyinin altına kadar düşmüş ve akarsu boyunca hipoksik (oksijenin yetersiz olduğu) koşullar hâkim olmuştur. Kasım ayında Oksijen tüketiminde akarsu ekosistemini yağışların etkisiyle belirli istasyonlarda kısmen artış görülse de genel oksijen seviyesi ekolojik açıdan yeterli değildir. En yüksek kirlilik seviyeleri, her iki dönemde de 2. nokta (Deri OSB arıtma sonrası) ile 3. nokta (Asrın Çiftliği sonrası) bölgelerinde tespit edilmiştir. Bu noktalar, endüstriyel ve tarımsal faaliyetlerin yoğun olarak yer aldığı alanlar olup, akarsuya doğrudan veya dolaylı şekilde yüksek miktarda kirletici yük taşımaktadır.

2. nokta Deri OSB arıtma tesisi sonrası Nisan 2024 döneminde KOİ (437,1 mg/L) ve BOİ (146 mg/L) değerlerinin tüm istasyonlar arasında en yüksek seviyede ölçülmesi, arıtma tesisi çıkışında dahi yüksek organik yükün varlığını göstermektedir. Kasım 2024 döneminde bulanıklık ve askıda katı madde değerlerinin yüksek seyretmesi, arıtma verimliliğinin mevsimsel koşullara ve debi artışlarına bağlı olarak değişebildiğini düşündürmektedir. Arıtma sonrası noktanın, arıtma öncesine göre daha yüksek kirlilik seviyeleri göstermesi, dışarın akarsu üzerindeki baskın etkisini açıkça ortaya koymakta olup, Yerüstü Su Kalitesi Yönetmeliği hükümlerine göre III. Sınıf (kirlenmiş su) su kalite sınıfında yer aldığı görülmektedir. Ayrıca; Kasım (2024) için 5. nokta Muratlı Lise Köprüsü en yüksek AKM (708 mg/L) değeri ile kirlilik yükünün dere yatağı boyunca ciddi şekilde biriktiği ve/veya bu noktaya yakın yeni bir katı madde kaynağının olduğu anlaşılmaktadır. Muratlı Lise Köprüsü için Bulanıklık ve AKM değerleri her iki dönemde de yüksektir.

3. nokta Asrın Çiftliği sonrasında özellikle askıda katı madde yükü ve düşük çözünmüş oksijen değerleri dikkat çekicidir. Nisan döneminde AKM'nin 434 mg/L gibi yüksek bir değere ulaşması, bölgedeki yüzeysel akış, toprak taşınımı ve organik materyal girişini işaret etmektedir. Kasım döneminde çözünmüş oksijenin 0,68 mg/L'ye kadar düşmesi ise bu kesimin sucul yaşam açısından kritik koşullar altında olduğunu göstermektedir. Bu bölgenin tarımsal ve hayvansal üretim faaliyetlerinin etkisi altında olması, organik ve partikül madde yükünü artırmaktadır. 4. nokta Asrın Çiftliği öncesinde çiftlik faaliyetlerinin başlangıç bölgesinde yer almakta olup hem Nisan hem Kasım dönemlerinde KOİ ve BOİ değerleri yüksek seyretmiştir. Bu durum, yüzeysel gübre taşınımı, hayvansal atıklar ve tarımsal kimyasal girdilerin akarsuya ulaşması sonucu oluşan kirlilik baskısını göstermektedir. 1. nokta Deri OSB arıtma tesisi öncesi noktası olmasına rağmen yüksek KOİ, BOİ ve AKM değerlerinin ölçülmesi, bölgenin arıtma tesisine ulaşmadan önce dahi sanayi faaliyetlerinden etkilendiğini göstermektedir.

Sonuç olarak; Çorlu Çayı'nda kirlilik merkezi olarak 2. ve 3. noktaların öne çıktığı görülmektedir. Bu noktaların ortak özellikleri; yoğun endüstriyel aktivite, tarımsal ve hayvansal faaliyetlerin bir arada bulunması ve arıtma süreçlerinin yetersizliği nedeniyle akarsuya yüksek miktarda organik ve inorganik yük taşınmasıdır. Nisan ve Kasım dönemleri arasında genel bir iyileşme eğilimi gözlenmemiş olup, kirlenmenin yapısal ve süreklilik gösteren bir problem olduğu anlaşılmaktadır. Çorlu Çayı özelinde 2024 yılına ait bulgular, havzada 2020 sonrası yayımlanan literatürle büyük ölçüde paralellik göstermektedir. Tokatlı C. ve Varol M.'nin Meriç-Ergene Havzası'na ilişkin çalışmalarında, Çorlu Çayı'nın havza bileşenleri içinde en kirli su kütlelerinden biri olduğu, su kalitesinin çoğu parametrede IV. sınıf düzeyinde seyrettiği ve özellikle organik kirlilik-hipoksi ilişkisi açısından kritik bir alan olduğu vurgulanmaktadır (Tokatlı, C. 2020; Varol, M. 2023). Bu tez kapsamında elde edilen sonuçlar, literatürde bildirilen eğilimlerin güncel durumda da devam ettiğini ve Çorlu Çayı'nın ekosistem sağlığı ile insan kullanımı açısından acil müdahale gerektiren bir su kütlesi olduğunu göstermektedir.

Çorlu Çayı'nın mevcut durumu, hem ekosistem sağlığı hem de insan sağlığı açısından

önemli riskler taşımaktadır. Yıl boyunca devam eden organik kirlilik yükü, oksijen yetersizliği ve fekal kirlilik göstergeleri, havza bazlı daha sıkı denetim, gelişmiş arıtma teknolojileri ve yayılı kaynak kontrolünün gerekliliğini ortaya koymaktadır. Çorlu Çayı'nın mevcut ekolojik durumunun iyileştirilmesi için kapsamlı bir rehabilitasyon sürecine ihtiyaç olduğu bu çalışma ile daha net bir şekilde ortaya çıkmıştır.

Teşekkür: Bu çalışma, Munzur Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından desteklenmiştir. Proje No: YLMU024-03

KAYNAKLAR

- Altan, M. (2016). Madencilik faaliyetlerinin su kaynakları üzerindeki etkileri. *Çevre Bilimleri Dergisi*, 4(2), 45–58.
- Altınbaş, Ü., Çakmak, B., & Atay, D. (2010). Evsel ve endüstriyel atıksuların özellikleri ve arıtımı. İstanbul Üniversitesi Yayınları.
- Anonim (2004) “Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği”, T.C. Resmi Gazete (31 Aralık 2004), Ankara, sayı:25687
- Aydın, A., & Cürebal, İ. (2020). Ergene Havzası’nda Su Kalitesi Değerlendirmesi. *Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*(8), <https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/1061594>
- Aydın, H. (2020). Ergene Havzası’nda akarsu rejimindeki değişimlerin değerlendirilmesi. *Trakya University Journal of Natural Sciences*, 21(2), 134–145.
- Boyd, C. E. (2020). *Water Quality: An Introduction*. Springer. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-23335-8>
- Buldur, A. D., Pınar, A., & Başaran, A. (2007). 05-07 Mart 2004 Tarihli Göksu Nehritaşkını Ve Silifke’ye Etkisi. *Selçuk Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 17, 139-160. <https://dergipark.org.tr/en/pub/susbed/issue/61793/924130>
- Bulut, V., Kızılelma, Y., & Ersolmaz, A. (2012). Kentsel yüzey akışlarının su kalitesine etkileri. *Toprak Su Dergisi*, 1(2), 25–34.
- Çelik, S., & Aydın, T. (2021). Akarsu sistemlerinde tuzluluk değişimi ve antropojenik etkiler.
- Çetin, M., & Demir, T. (2021). Tarım alanlarının yüzey suyu Ph değişimine etkisi. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/anadolucevre>
- Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. (2022). Su Kirliliği Kontrol Yönetmeliği. <https://www.csb.gov.tr/su-kirliligi-kontrol-yonetmeliği>
- Çiçek, A. (2020). Water Quality Assessment of Felent Stream (Kütahya/Turkey). *Biological Diversity and Conservation*, 13(3), 1–12.
- Çiçek, A., & Ertan, İ. (2023). Ergene Nehri’nde mikrobiyolojik su kalitesideğerlendirmesi. *Trakya University Journal of Natural Sciences*, 24(1), 15–26.
- Dede, Ö. T., & Sezer, M. (2017). Endüstriyel faaliyetlerin yüzeysel su kaynaklarına etkisi: Ergene Havzası örneği. *Tekirdağ Ziraat Fakültesi Dergisi*, 14(3), 45–56.
- Demir, M., Yılmaz,F., & Karaca, B. (2021). Endüstriyel Kirliliğin Çorlu Çayı Su Kalitesine Etkisi. *Çevre Bilimleri Akademik Dergisi*, <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezDetay.jsp?id=Pmgdq64pHfQr4YuHmJCuYA&no=eogBx7-SrRvZPBf6U8BV8w>
- Deniz, O. (2012). Van Gölü Havzası’nda Su Kirliliği. *Atatürk Kültür, Dil ve Tarih Yüksek Kurumu Yayınları*.
- Erdoğan Üniversitesi (2020). Doğu Karadeniz Havzası Akarsularının Fiziko-Kimyasal Su Kalitesi. *Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Yayınları*.
- Fakir, Y. (2012). Denizli içme suyu şebekesindeki su kalitesi parametrelerinin zamana ve

- konuma göre değişiminin incelenmesi [Master's Thesis, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü]. <https://gcris.pau.edu.tr/handle/11499/1781>
- Hallı M. (2013). Ergene Nehri'nin Ege Denizi'ne Olan Kirlilik Etkisinin Güncel Çökel Jeokimyası Ve Sedimentolojik Yöntemlerle Araştırılması(9), <https://nek.istanbul.edu.tr/ekos/TEZ/ET001377.pdf>
- Keskin, A. Ü., & Demir, Ş. D. (2018). Amasya Değirmendere Barajında Sulama Alanı ve Baraj Yüksekliği Arasında Ekonomik Analiz. Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi, 20(60), 755-764. <https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/629245>
- Kılıç, E. (2020). Evaluation of water quality by water quality index method using long time monitoring data in Göksu River. <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/20219984336>
- Kılıç, O., & Aydın, F. (2023). OSB'lerin su kalitesine etkisi. <https://dergipark.org.tr>
- Kırkkepenekli, Muratlı. (2025). Vikipedi, Özgür Ansiklopedi. Erişim tarihi: 24 Kasım 2025 https://tr.wikipedia.org/wiki/K%C4%B1rkkepenekli,_Muratlı%C4%B1
- Koçak, T. K. (2021). Türkiye'de Su Kirliliği ve Su Yönetimi Üzerine Bir Değerlendirme. Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi, 6(2), 82–98.
- Kurt, A., & Çam, S. (2018). Ergene Nehri ve kollarında makroomurgasız faunasının su kalitesi göstergesi olarak kullanımı. Journal of Limnology and Freshwater Fisheries, 4(1), 22–33.
- Küçükbalı, A., & Sönmez, B. (2019). Türkiye'de tarımsal kirlilik ve nitrat kirliliğinin su kaynaklarına etkisi. Tarım Bilimleri Araştırma Dergisi, 12(1), 77–86.
- Muratlı Organize Sanayi Bölgesi Kurumsal Bilgileri. (2024). Muratlı OSB Resmî Web Sayfası.
- Omuzlu Acar, M. (2021). Demiryazı göleti (sivas)'nin su kalitesinin incelenmesi [PhD Thesis]. Kastamonu üniversitesi.
- Özdemir, S., Aksu, M., & Yalçın, M. (2019). Ergene Havzası'nda ağır metal kirliliğinin ekolojik etkileri. Çevre Bilimleri Dergisi, 17(2), 89–102.
- Özdemir, S., Aksu, M., & Yalçın, M. (2019). Ergene Havzası'nda ağır metal kirliliğinin ekolojik etkileri. Çevre Bilimleri Dergisi, 17(2), 89–102.
- Özdemir, S., Usta, C., & Karaca, M. (2015). Atmosferik çökeltmenin su kalitesine etkileri. Ekoloji Dergisi, 24(96), 30–38.
- Özkan, H., Yalçın, M., & Aydın, Ş. (2017). Marmara Denizi kıyı sularında mikrobiyolojik kirlilik değerlendirmesi. Çevre Bilimleri Dergisi, 10(2), 89–101.
- Şahin, M., & Duman, H. (2020). Mevsimsel faktörlerin su tuzluluğu üzerine etkisi. <https://dergipark.org.tr>
- Şimşek, B., & Yılmaz, H. (2022). Mevsimsel değişimlerin sediment taşınımı ve AKM üzerine etkisi. <https://dergipark.org.tr>
- Şimşek, B., & Yılmaz, H. (2022). Mevsimsel faktörlerin akarsu bulanıklığı üzerine etkisi. <https://dergipark.org.tr>
- T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı. (2018). Ergene Havzası Koruma Eylem Planı Durum

- Değerlendirme Raporu. <https://www.marmara.gov.tr/tr/ergene-havzasi-koruma-cylem-plani-durum-degerlendirme-raporu-guncellendi>
- T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. (2021). Tekirdağ İli 2021 Yılı Çevre Durum Raporu. https://webdosya.csb.gov.tr/db/ced/icerikler/tek-rdag_-cdr2021-20221220070139.pdf
- T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. (2023). Tekirdağ İli 2023 Yılı Çevre Durum Raporu. https://webdosya.csb.gov.tr/db/ced/icerikler/tek-rdag_-cdr2023-20240701132911.pdf
- Thrace, Türkiye. Chemosphere, 311, 136998. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045653522035895>
- Tokatlı, C. (2020). Ergene Havzası yüzeysel sularında mikrobiyolojik kirlilik düzeylerinin analizi. Sakarya University Journal of Science, 24(6), 1234–1244.
- Tokatlı, C. (2020). Ergene Nehir Havzası Su Kalitesinin Çok Değişkenli İstatistik Analizler Kullanılarak Değerlendirilmesi. LimnoFish, 6(1), 1–14.
- Tokatlı, C. (2020). Water quality assessment of Ergene Basin. Tokatlı, C. et al. (2023). Organic pollution and hypoxia in Meriç–Ergene Basin. Varol, M. (2022, 2023). Water quality evaluation in polluted streams.
- Tokatlı, C. (2023). Spatiotemporal distributions, probable health risks, and organic pollution in Meriç–Ergene River Basin (NW Turkey). Environmental Monitoring and Assessment, 195, 11042. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10661-023-11042-x>
- Tokatlı, C., Emiroğlu, Ö., Çiçek, A., Köse, E., Başkurt, S., Aksu, S., Uğurluoğlu, A., Şahin, M., Başatlı, Y. (2016). “Meriç Nehri Deltası (Edirne) Balıklarında Toksik Metallerin Biyolojik Birikimlerinin Araştırılması” Anadolu Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi 5,1, 1-11
- Topuz, B., & Arslan, N. (2020). Organik yük ve mikrobiyal faaliyetlerin pH etkisi. <https://dergipark.org.tr>
- Turan, F. (2007). Gökpınar çayı ve Çürüksu kirlilik parametre ve yüklerinin mevsimlere göre saptanması ve irdelenmesi [Master’s Thesis, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü]. <https://gcris.pau.edu.tr/handle/11499/1340>
- Turan, F. M., Aydın, H., & Kocaman, S. (2020). Çorlu Çayı su kalitesinin endüstriyel kirlilik açısından değerlendirilmesi. Çevre Koruma Dergisi, 5(1), 10–22.
- Varol, M. (2012). Water Quality Assessment and Apportionment of Pollution Sources of Tigris River (Turkey) Using Multivariate Statistical Techniques—A Case Study. River Research and Applications, 28, 1428–1438.
- Varol, M. (2023). Evaluation of the water quality of a highly polluted stream with water quality indices and health risk assessment methods: Çorlu Stream
- Varol, Z., Erdem Boyraz D., (2020), Çorlu deresi ve yakın çevresi (Çerkezköy-Çorlu hattı) topraklarının ağır metal kirliliğinin değerlendirilmesi, Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Dergisi, <https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/1165328>
- Yıldız, D., Sağlam, C., & Güler, Ç. (2016). Kızılırmak Nehri’nin fiziksel su kalitesi parametrelerinin mevsimsel değişimi. Su Bilimleri ve Teknolojisi Dergisi, 7(1), 33–44.

BÖLÜM 6

MERA ALANLARI ISLAHINDA KİMYASAL GÜBRELEME VE ALTERNATİF YÖNTEM OLARAK ORGANİK GÜBRELEMENİN ÖNEMİ¹

Özcan AKIN², Mehmet ÖZCAN³

¹ Bu çalışma Düzce Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsünde Doç. Dr. Mehmet Özcan'ın danışmanlığında devam etmekte olan “Bolu Aladağ Merasında Farklı Islah Metotlarının Bitki Gelişimi ve Karbon Bağlamaya Etkileri” isimli doktora tez çalışmasından üretilmiştir.

² Arş. Gör. Düzce Üniversitesi, Orman Fakültesi, Orman Mühendisliği Bölümü, Havza Yönetimi ABD, Düzce ORCID: 0000-0002-6047-8183

³ Doç. Dr. . Düzce Üniversitesi, Orman Fakültesi, Orman Mühendisliği Bölümü, Havza Yönetimi ABD, Düzce ORCID: 0000-0002-0994-4679

1. GİRİŞ

Mera alanları, dünya genelinde yaklaşık 80 milyon kilometrekarelik bir alanı kaplamakta ve karasal yüzeyin %54'ünden fazlasını oluşturarak yeryüzündeki en geniş arazi kullanım tipini meydana getirmektedir. Bu devasa ekosistemler, özellikle hayvancılığa dayalı geçim modellerinin yaygın olduğu bölgelerde yaklaşık iki milyar insanın gıda güvenliğini ve ekonomik varlığını doğrudan veya dolaylı olarak desteklemektedir (UNCCD, 2024). Çayır ve meralar, genellikle belirli bir bölgenin iklim ve toprak koşullarına uyum sağlamış, doğal yollarla gelişen bitki topluluklarıdır. Bu vejetasyon yapısı, çoğunlukla çok yıllık buğdaygiller ve baklagillerin baskın olduğu; bununla birlikte tek yıllık otlar ile yer yer çalı veya ağaççık gibi odunsu türlerin de dahil olduğu zengin bir floristik kompozisyonundan oluşur (Gibson ve Newman, 2019).

Bu alanlardaki bitki örtüsü, "sıralı değişim" (süksesyon) süreciyle şekillenmektedir. Gelişme aşamaları boyunca toprak yapısı ve bitki birlikleri karşılıklı etkileşim içinde değişerek, söz konusu çevre koşullarının ulaşabileceği en dengeli aşama olan “doruk bitki örtüsü” (klimaks vejetasyon) seviyesine erişir. Ancak vejetasyon her aşamada yağış, sıcaklık gibi abiyotik ve otlatma baskısı gibi biyotik faktörlerin etkisi altındadır (Holechek vd., 2011). Yanlış kullanım tarzları, meraların bu üstün üretim yeteneğini ve ekosistem dengesini kaybetmesine yol açabilmektedir. Bu nedenle, bilimsel mera yönetiminde temel hedef; bitki örtüsünü biyolojik ve ekolojik açıdan doruk konuma en yakın seviyede tutarak sürdürülebilirliği sağlamaktır (Altın vd., 2025).

Çayır ve meralar, yalnızca hayvancılık faaliyetleri için temel kaba yem kaynağı ve hayvan sağlığının güvencesi olmalarının ötesinde; sundukları çok yönlü ekolojik, çevresel ve sosyoekonomik işlevlerle kritik bir öneme sahiptir (Şen, 2025; Altın vd., 2025). Bu devasa ekosistemler; biyoçeşitliliğin korunması, karbon tutumu, oksijen üretimi ve su döngüsünün düzenlenmesi gibi hayati süreçlerde merkezi bir rol oynamaktadır (FAO, 2018; Gökkuş, 1999). Aynı zamanda erozyonun önlenmesi, toprak verimliliğinin muhafazası, yaban hayatı ve arıcılık için uygun habitat sağlanması gibi fonksiyonları eş zamanlı olarak barındıran bu alanlar; estetik görünümleriyle sundukları rekreasyonel imkanlarla ekosistemin sürdürülebilirliğini ve sosyo-ekonomik yapıyı bütünlemektedir (Altın vd., 2025).

1.1. Türkiye’de Mera Varlığı ve Mevcut Durum

Türkiye, biyoçeşitlilik ve ekosistem çeşitliliği bakımından zengin bir potansiyele sahip olmasına rağmen, çayır ve mera alanları açısından son yıllarda ciddi bir daralma ile karşı

karşıyadır. TÜİK (2024) verilerine göre, meralar ülkemizin toplam kara alanının %18,8'ini (yaklaşık 14,6 milyon hektar) oluşturmaktadır. Bu alanlar; fotosentez kapasitesi, karbon tutulumu, biyolojik çeşitliliğin korunması ve kaba yem kaynağı olma gibi hayati fonksiyonlarının yanı sıra, erozyon kontrolü ve su rejiminin düzenlenmesi gibi kritik ekolojik hizmetler sunmaktadır.

Ancak, ülkemizdeki mera varlığının tarihsel gelişimi incelendiğinde tablonun oldukça kaygı verici olduğu görülmektedir. Son 70 yıllık periyotta, mera alanları çeşitli sosyo-ekonomik ve tarımsal nedenlerle yaklaşık %60 oranında bir kayba uğramıştır (Gökkuş, 2018). Nitekim 1950 lili yıllarda yaklaşık 38 milyon hektar olan mera alanları günümüzde 14 milyon hektara kadar gerilemiştir. Bu dramatik azalma, sadece alan miktarını değil, aynı zamanda mevcut meraların kalitesini ve verimliliğini de doğrudan etkilemiştir.

Bugün ülkemizdeki mera alanlarının büyük bir bölümü çeşitli etkenler nedeniyle zarar görmüş ve verimliliklerini kaybetmiştir. Bu durum, sürdürülebilir bir mera yönetim stratejisini artık bir seçenek değil, zorunluluk haline getirmektedir. Zira mera ekosistemlerinin; iklim, toprak yapısı, topoğrafya, bitki, hayvan ve insan müdahalesi gibi birçok biyotik ve abiyotik faktörün etkileşimiyle şekillenen hassas bir denge üzerine kurulmuş olması sebebiyle, bu sistemlerdeki herhangi bir bozulma, tüm ekosistemin sürdürülebilirliğini tehdit eder boyuta ulaşmasına neden olmaktadır (Şen, 2025).

1.2. Mera Ekosistemlerini Tehdit Eden Unsurlar ve İklim Değişikliği

Mera alanlarının bu stratejik önemlerine karşın, bu alanlar günümüzde giderek küçülen bir yaşam kuşağı haline gelmiştir. Arazi kullanımındaki değişimler, tarımsal yoğunlaşma ve küresel ısınmaya bağlı değişen yağış rejimleri gibi insan kaynaklı faktörler, otlatma alanlarını ciddi şekilde tehdit etmektedir (Gibson ve Newman, 2019). Ancak meralarda gözlenen bozulmalar yalnızca insan ve hayvan odaklı etkilerle sınırlı değildir. Son yıllarda etkisini artıran iklim değişikliği, mera ekosistemlerini doğrudan tehdit eden temel bir unsur haline gelmiştir. Bu iklimsel düzensizlikler; mera bitki örtüsünün gelişimini sekteye uğratmakta, tür kompozisyonunda bozulmalara, biyoçeşitlilik kayıplarına ve yem kalitesinde belirgin düşüşlere yol açmaktadır (Şen, 2025).

Türkiye özelinde durum incelendiğinde, mera varlığımızın %87,6 gibi büyük bir kısmının "orta" ve "zayıf" mera sınıfında yer alması (Avağ vd., 2012), bu alanların dış etkenlere karşı ne kadar kırılgan olduğunu göstermektedir. Bu hassasiyetin en somut sonucu ise erozyondur. Nitekim ülkemiz mera alanlarının %57,64'ünde hafif ve çok hafif, %13,59'unda orta, geriye

kalan %28,77'lik kısmında ise şiddetli ve çok şiddetli erozyon görülmektedir (ÇEM, 2018). Bu veriler, meraların korunması ve rehabilitasyonu için zaman kaybedilmeden harekete geçilmesi gerektiğini açıkça ortaya koymaktadır.

1.3. Toprak Sağlığı ve Organik Maddenin Önemi

Mera ekosistemlerinin sürdürülebilirliği ve vejetasyon kalitesi, doğrudan toprak sağlığı ve topraktaki organik madde içeriği ile ilişkilidir. Meralarda toprak organik maddesi; sadece bitki gelişimi için gerekli besin elementlerini sağlamakla kalmaz, aynı zamanda toprağın gözenekli yapısını koruyarak su tutma kapasitesini artırır. Bu durum, özellikle kurak dönemlerde mera vejetasyonunun hayatta kalma şansını yükselten kritik bir faktördür.

Türkiye'deki mera ve tarım arazilerinde çeşitli yanlış uygulamalar sonucu meydana gelen bozulmalar, değerli doğal varlıklarımızı tehdit edecek boyutlara ulaşmıştır. Toprağın yapısının, sağlığının ve verimliliğinin en önemli göstergelerinden biri olan organik madde, ülkemizde tarımsal üretimi sınırlayıcı en temel faktördür. Nitekim topraklarımızın %99'unda organik madde miktarının %3'ün altında olması (Anonim, 2019) ekosistemin sürdürülebilirliğini tehlikeye atmaktadır.

İklim sisteminde genellikle ihmal edilen bir unsur olan toprak, okyanuslardan sonra ikinci en büyük karbon yutağı olma özelliğine sahip olmasından dolayı (Anonim, 2019), yeniden iyileştirilmesi ve sürdürülebilir şekilde kullanılması, iklim değişikliğini hafifletme ve uyum sağlama süreçlerinde kritik bir rol oynayacaktır. Mevcut kimyasal gübreleme alışkanlıklarının toprak yapısı üzerindeki olumsuz etkileri, verim ve kaliteyi artırıcı yeni ve sürdürülebilir yöntem ihtiyacını ortaya çıkarmıştır.

1.4. Ulusal Hedefler, Stratejiler ve 12. Kalkınma Planı

Türkiye'de meraların korunması ve rehabilitasyonu, sadece bir tarımsal faaliyet alanı değil; gıda güvenliği, biyolojik çeşitliliğin korunması ve iklim değişikliği ile mücadele stratejilerinin ayrılmaz bir parçasıdır. III. Tarım Orman Şûrası kararlarında meraların amaç dışı kullanımının engellenmesi ve toprak yönetiminin bilimsel temellere oturtulması vurgulanmıştır. Özellikle "Toprak Yönetimi ve Politikaları" başlığı altında, kimyasal girdilerin toprak yapısında yarattığı tahribatı minimize etmek ve toprak organik maddesini artırmak amacıyla, organik kaynakların kullanımına yönelik destek ve teşviklerin artırılması önerilmiştir (Anonim, 2019). Bu hedefler, meraların sadece ekonomik bir girdi kaynağı olarak değil, gelecek nesillere aktarılması gereken hayati bir doğal varlık olarak görüldüğünü kanıtlamaktadır.

12. Kalkınma Planı (2024-2028), doğal kaynakların sürdürülebilir yönetimi vizyonu doğrultusunda, çayır ve meraların ekolojik sağlığını geri kazandırmayı ve bu alanların korunmasını temel öncelikler arasında tanımlamıştır. Bu genel strateji, meraların sunduğu ekosistem hizmetlerinin devamlılığını sağlayarak ulusal düzeyde çevresel direnç (rezilyans) oluşturmayı amaçlamaktadır (T.C. Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı. 2023).

2. MERA YÖNETİMİ VE ISLAHINDA TEMEL İLKELER

Düşük verimli meraların kapasitesini artırmak, elde edilen yemin kalitesini yükseltmek ve hayvanların bu vejetasyondan en yüksek düzeyde yararlanmasını sağlamak amacıyla uygulanan teknik, kültürel ve fiziksel işlemlerin bütünü "mera ıslahı" olarak tanımlanmaktadır. Yapılan ıslah çalışmalarında temel öncelik, birim alandan elde edilen otun miktar ve kalitesini artırmak; nihai hedef ise üretilen bu kaynağın hayvansal ürüne dönüşümünü en etkin şekilde gerçekleştirmektir (Altıntaş vd., 2018; Altın vd., 2021).

Meralar, sadece birer yem üretim alanı değil, aynı zamanda yaban hayatı için habitat, su havzaları için koruma, rekreasyonel imkânlar ve estetik değerler sunan kritik yaşam destek sistemleridir (Gökkuş ve Koç, 2001; Özyazıcı vd., 2025). Ekolojik perspektifte bu alanlar, klimaks (doruk) vejetasyon yapısıyla en yüksek düzeyde kalite ve kantiteye sahip yem üretme potansiyeline sahiptir. Ancak çevre koşullarının bitki gelişimini engelleyecek şekilde değişmesi veya ekosistem prensipleri dikkate alınmaksızın yapılan müdahaleler, sistemin bölümleri arasındaki madde dolanımı ve enerji akışının etkenliğini yitirmesine neden olmaktadır. Bu dengenin bozulmasıyla birlikte vejetasyon en üst düzeydeki durumunu koruyamamakta; en nitelikli türlerden başlayarak bitki örtüsünde seyrelme ve vejetasyondan çekilme süreci başlamaktadır (Tükel, 2021; Altın vd., 2021, Altın vd., 2025).

Nitekim bitki örtüsünün bu gelişim dinamikleri göz ardı edilerek kurulan hatalı mera-hayvan dengesi, ülkemiz meralarının yaklaşık %85'inin "orta" ve "zayıf" duruma düşmesine neden olmuştur (Avağ vd., 2012; Aydoğdu vd., 2020). Meralardan sürdürülebilir şekilde yararlanabilmek için ıslah çalışmaları kadar, doğru yönetim ve otlatma planlaması da büyük önem arz etmektedir (Altın vd., 2021, Altın vd., 2025). Dünyada ve Türkiye'de mera bozulmalarının temelinde yatan zamansız ve hatalı otlatma alışkanlıkları, meraların doğal yenilenme kapasitesini bozarak ıslah müdahalelerini bir zorunluluk haline getirmektedir (Altıntaş vd., 2018). Sağlıklı ve iyi yönetilen meralar; daha üretken, dayanıklı ve istikrarlı bir yapı sergileyerek zayıf meralara oranla çok daha yüksek ekosistem hizmeti ve ekonomik kazanç sağlamaktadır (Oosterheld vd., 1992; Wessels vd., 2007; Teague vd., 2011; Özyazıcı vd., 2025).

Mera ıslahında; yakma, tohumlama, yabancı otlarla mücadele ve gübreleme gibi yöntemler genellikle birbirini destekleyecek şekilde uygulanır (Altın vd., 2021). Özellikle verim gücünü yitirmiş meralarda, nitelikli türlerle yapılacak tohumlamanın başarısı, ekilen bitkilerin rekabet gücünü artıracak olan gübreleme gibi uygulamalarla doğrudan ilişkilidir. Üretim gücünü kaybeden bu alanların yeniden eski haline getirilmesi ise uzun zaman, yoğun emek ve yüksek maliyet gerektirmektedir (Altın vd., 2025).

Türkiye meralarının ıslahında gübreleme, bir tercih değil zorunluluktur. Yıllardır süregelen sömürü şeklindeki kullanım, toprağın fiziksel ve kimyasal yapısında ciddi bozulmalara yol açmıştır. "Mera bitkilerinin kendiliğinden geliştiği ve gübrelemeye ihtiyaç duymadığı" yönündeki yaygın yanlış inanın aksine, toprağın besin maddesi dengesinin korunması sürdürülebilir üretim için şarttır (Altın vd., 2021). Vallentine (1989) tarafından da vurgulandığı üzere, başarılı bir ıslah ve gübreleme programı; sadece yem verimini artırmakla kalmaz, aynı zamanda erozyonu önler, su verimini artırır ve hayvancılık işletmelerinin karlılığını doğrudan yükseltir.

3. MERA ISLAHINDA ORGANİK GÜBRELEME

Meralarda otlatma kapasitesinin artırılması ve bitki örtüsünün kalitesinin iyileştirilmesi için uygulanan ıslah yöntemleri arasında gübreleme, en hızlı ve etkili sonuç veren tekniklerden biridir. Meralardan otlatma veya biçilme yoluyla uzaklaştırılan bitki besin maddelerinin doğal yollarla geri dönüşü, özellikle yoğun kullanım altındaki alanlarda yetersiz kalmaktadır. Bu durum, toprakların zamanla besin elementleri bakımından fakirleşmesine ve vejetasyonun seyrelmesine yol açmaktadır.

Mera ıslahında gübreleme faaliyetleri; sadece kuru madde verimini artırmakla kalmaz, aynı zamanda botanik kompozisyondaki arzu edilen türlerin (baklagiller ve kaliteli buğdaygiller) oranını da optimize eder. Ancak bu noktada uygulanacak gübreleme stratejisinin, mera tipine, toprak yapısına ve iklim özelliklerine göre planlanması sürdürülebilirlik açısından temel bir zorunluluktur.

Mevcut iklim şartlarında bitkilerin verim potansiyellerini sergileyebilmeleri için büyüme ortamının optimum koşullara sahip olması bir zorunluluktur. Bitkisel üretimi sınırlayan en temel etkenlerden biri, bitki besin elementlerinin yetersizliği veya dengesizliğidir. Bu bağlamda gübreleme; eksik olan besin maddelerinin uygun zaman ve şekilde toprağa veya bitkiye verilmesi olayıdır. Çayır ve mera bitki örtüleri de bu uygulamaya olumlu tepki vermekte; bu alanların ıslahında, bitki örtüsünü güçlendirmek ve ot üretimini artırmak amacıyla yapılan

bilinçli gübreleme çalışmaları en önemli yöntemlerden biri olarak öne çıkmaktadır. Bazı durumlarda kârlılık ikinci plana atılarak, erozyona karşı toprağı koruyan güçlü bir vejetasyon oluşturmak ana hedef haline gelebilmektedir. Zira bilinçli bir gübreleme ile hem ot verimi ve hayvansal üretim artmakta hem de bitki örtüsünde istenilen yönde değişimler sağlanabilmektedir (Altın vd., 2021).

Ancak mera gübrelemesi, tek tür bitki yetiştiriciliğinden farklı olarak; bitki örtüsünün tür bileşimi, iklim ve toprak özellikleri, yararlanma şekli, uygulama zamanı, miktarı ve yönetim planlaması gibi çok sayıda parametrenin dikkate alınmasını gerektiren kompleks bir süreçtir (Tosun ve Altın, 1981; Altın, 1999; Altın vd., 2021). Gübrelemeden beklenen faydalar sadece ot üretimi ve besin değeri artışı ile sınırlı değildir; aynı zamanda uygun bitki örtüsü oluşturma, bitki sıklığını artırma, hayvan dağılışını düzenleme ve tohumlanan meralarda fide gelişimini teşvik etme gibi amaçlara da hizmet etmektedir (Altın vd., 2021).

3.1. Sürdürülebilir Bitki Gelişimi ve Besleme Prensipleri

Bitkinin sağlıklı ve gelişmiş bir kök sistemine sahip olması iyi bir gelişim göstermesi için en önemli koşullardan biridir. Organik madde, bitki besin maddelerini içermesi nedeniyle önemlidir. Ayrıca, toprağı verilen organik madde toprakların verimlilik güçlerini iyileştirmenin yanında, toprakların fiziksel, kimyasal ve biyolojik özelliklerini de olumlu etkiler. Organik maddenin ortamdaki varlığı mikroorganizmaların sayısını ve cinsini etkilemesi sebebiyle, topraktaki mineralizasyon olayları, havanın serbest azotunu bağlama, toprak strüktür oluşumunun desteklenmesi olaylarını da dolaylı olarak hızlandırmakta (Soyergin, 2003), bunun yanında organik gübreleme ile toprağın su tutma potansiyeli, sürdürülebilirliği, verimini artırılabilir (Yüksek vd., 2019). Toprağı serilen organik materyal bir yandan toprakları yağmur damlası erozyonundan korurken, bir yandan da topraktaki suyun buharlaşmasını da engellemektedir (Soyergin, 2003). Organik maddelerin toprak ortamının fiziksel, kimyasal ve biyolojik özelliklerini düzeltmede ve sürekliliğini sağlamadaki yeri çok önemli olduğundan, toprak iyileştiricisi olarak organik gübreler kullanılabilir (Tejada vd., 2003; Soyergin, 2003; Perez vd., 2007; Sarioglu, 2017). Bunların yanı sıra bitki kök morfolojik özelliklerini de artırabilmektedir (Chen, 2006). Kök gelişiminin verime olan etkisinin yanı sıra kuraklık stresine karşı bitkinin direncini ve bitkinin beslenmesini artırdığı da bilinmektedir (Su vd., 2019). Sürdürülebilir bir mera yönetiminde bitki gelişimi, sadece yer üstü yeşil aksamın artırılması olarak değil, güçlü bir kök sistemi ve aktif bir toprak mikroorganizma faaliyetinin tesisi olarak ele alınmalıdır.

Ji vd. (2017), organik gübre ve kimyasal gübre ile yaptıkları çalışmada organik gübre uygulamalarının kök ve yer üstü büyümesinde sırasıyla %10,2-77,8 ve %10,7-33,3 oranında daha iyi sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir. Akın ve Özcan (2024), gübreleme ile mera ıslahı denemelerinde toprak üstü biyokütle ölçümlerinde düzenli otlatma yapılan düzenli otlatma yapılan bir alanda 625,762 kg/da olan kuru ot verimini solucan gübresi ile 702,383 kg/da kimyasal gübre ile 891,703 kg/da, yine düzenli otlatma yapılan bir başka alanda 681,275 kg/da olan kuru ot veriminin koyun gübresi ile 787,596 kg/da kimyasal gübre ile 811,422 kg/da'a yükseldiğini belirlemişlerdir. Akın ve Özcan (2025), kimyasal gübre, koyun gübresi ve solucan gübresi kullanarak deneme sahaları oluşturmuşlardır. Yapılan ölçümlerde solucan gübresi uygulamalarının toprak organik madde miktarını %3'lerden %5,5-6 düzeyine yükselterek organik madde miktarına göre çok yüksek kalite sınıfına yükselmiş olduğunu belirlemişlerdir.

Toprağa uygulanan organik materyallerin, toprağın fiziksel ve kimyasal özellikleri ile verimlilik parametreleri üzerindeki olumlu etkileri göz önüne alındığında, organik madde içerikleri düşük ve besin elementleri eksikliği bulunan ülkemiz toprakları için, organik gübrelerin topraklara verilmesinin gerekliliği ve önemini ortaya çıkarmaktadır (Kılıç ve Sönmez, 2019).

3.2. Su Kullanım Etkinliği ve Besin Döngüsü

Gübrelemenin en stratejik etkilerinden biri su kullanım etkinliğinin (SKE) artırılmasıdır. Toprakta besin elementlerinin artmasıyla bitkiler, birim miktarda su ile daha fazla mineral alarak su tüketimlerini azaltmaktadır (Gökkuş ve Koç, 2025). Örneğin, gübreleme sayesinde 1 kg kuru madde üretimi için gerekli su miktarı buğdayda 928 litreden 349 litreye, yem bitkilerinde ise 1586 litreden 637 litreye düşmektedir (Andiç, 1993).

Bu süreç, toprak-bitki-atmosfer arasındaki hassas besin döngüsünün bir parçasıdır. Ancak bu döngüde erozyon, besin elementlerinin sistemden uzaklaşmasında en kritik faktörlerden biridir. Su ile taşınan toprakla birlikte sistemden uzaklaşan elementler, özellikle derin sularda biriktiğinde geri dönüşü ancak su içi canlılarının bu elementleri bünyelerine alıp karaya çıkmaları ile mümkün olabilmektedir (Altın vd., 2021). Dolayısıyla sürdürülebilirlik açısından, hasat ve erozyonla uzaklaştırılan bu elementlerin gübreleme ile yerine konması, küresel gıda güvenliği ve açlık sorununun önlenmesi adına kaçınılmazdır (Gökkuş ve Koç, 2025). Eğer bu döngü doğru yönetilmez ve sistemden uzaklaştırılan elementler yerine konmazsa, toprak verimliliği kalıcı olarak azalır ve sonuçta küresel açlık gibi makro sorunlar tetiklenir.

3.3. Besin Elementlerinin Elverişliliği ve Kimyasal Gübrelerin Riskleri

Bitkiler ihtiyaç duydukları elementlerin büyük kısmını topraktan alsalar da, bu elementlerin çoğu bitki için elverişsiz formda tutulmaktadır (Andiç, 1993). Elverişsiz durumdaki elementlerin elverişli hale dönüşme hızı, toprakların mikroorganizma düzeyine ve fiziksel/kimyasal yapısına bağlıdır (Coleman, 1985; Haselwandter, 1997). Mikroorganizma yapısındaki bozulma, ekosistemin işlevini ve besin elementi çevrimini doğrudan sekteye uğratmaktadır.

Kimyasal gübreler ise hızlı verim artışı sağlasa da, uzun vadede toprak ekosistemini ve mikroflorayı olumsuz etkileyebilmesi ve toprak asiditesini değiştirebilmesi (Geisseler ve Scow, 2014), azotlu gübrelerin kullanım etkinliğinin %30-60 arasında kalması (Bhattacharya, 2019), kalan miktarın küresel ısınmaya (metan/nitrooksit salınımı) veya su kaynaklarının kirlenmesine yol açması gibi ciddi sorunları beraberinde getirmiştir (Gökkuş ve Koç, 2025). Ayrıca, 1970'lerde 1 kg NPK'ya karşılık alınan 13,4 kg ürün miktarının 2005'te 3,7 kg'a düşmesi, toprak verimliliğinin ve mikroorganizma varlığının olumsuz etkilendiğini göstermektedir (Bhattacharya, 2019; Geisseler ve Scow, 2014).

4. ORGANİK GÜBRE KAYNAKLARI VE UYGULAMA YÖNTEMLERİ

Meralarda organik gübreleme; sadece bitki besin elementi sağlamakla kalmayıp, toprağın fiziksel, kimyasal ve biyolojik yapısını düzelten bütüncül bir ıslah yöntemidir (Sezen, 1991). Kimyasal gübrelerin aksine, toprağın mikrobiyolojik canlılığını teşvik ederek sürdürülebilir bir verimlilik sunar.

Buna karşın, çiftlik gübresi gibi organik kaynakların yanlış yönetimi riskler doğurabilmektedir. Taze çiftlik gübrelerinin meralara doğrudan atılması vejetasyonu tahrip ederek istilacı yabancı otların yerleşmesine yol açabilmektedir (Gökkuş ve Koç, 2025). Ayrıca, hayvanlarda kullanılan antibiyotiklerin gübre yoluyla toprağa ve oradan insana geçerek antibiyotik direncine yol açması (Konca ve Uzun, 2012) ve sızıntıların su kaynaklarında koliform bakteri kirliliği oluşturması (Boyacı ve ark., 2011) dikkatle yönetilmesi gereken hususlardır.

4.1. Katı Çiftlik Gübreleri (Ahır ve Ağıl Gübresi)

- **Ahır Gübresi:** En eski gübreleme yöntemidir. Azotça zengin ancak fosforca fakir olduğundan, meralarda fosforlu gübrelerle desteklenerek uygulanması önerilir (Van Faassen ve Van Dijk, 1987). Meralarda 1000-1200 kg/da dozunda, 3-4 yılda bir

tekrarlanması yeterlidir (Bakır, 1985). Uygulama sonrası bitkilerin ışık almasını engelleyen dışkı tabakalarının dağıtılması (sürgü çekme) yönetsel bir zorunluluktur.

- **Ağıl Gübresi:** Koyun ve keçilerin dışkılarından oluşur. Özellikle serin ve yağışlı şartlarda vejetasyondaki baklagil oranını artırarak mera kalitesini yükseltir (Mut vd., 2010). Sıcak ve kurak şartlarda bitki örtüsüne zarar vermemesi (yanma riski) için mutlaka "olgunlaşmış" şekilde ve homojen dağıtılarak verilmelidir.

4.2. Sıvı Çiftlik Gübreleri (İdrar ve Şerbet)

- **İdrar:** Potasyumca zengin ancak kalsiyum ve magnezyumca fakirdir. Doğrudan uygulanması yakıcı etki yapabileceğinden ve azot kaybına yol açabileceğinden, 4 katına kadar sulandırılarak verilmesi esastır (Boeker, 1963).
- **Şerbet:** Su içeriği sayesinde toprağın nem ve humus dengesine katkı sağlar. Mart ayında, nemli toprağa yapılan uygulamalar en iyi sonucu verir (Çankaya, 2014). Kuru topraklarda veya donmuş zeminlerde bitki ölümlerine ve azot kayıplarına yol açabileceği unutulmamalıdır (Van Der Meer vd., 1987).

4.3. Alternatif Organik Kaynaklar ve Arıtma Çamuru

- **Arıtma Çamuru:** Tahrip olmuş meraların restorasyonunda ve erozyonla mücadelede (Wester vd., 2003) kimyasal azot uygulamalarına eşdeğer verim artışı sağlayabilmektedir (Yılmaz vd., 2001). Ancak toprakta ağır metal birikimi riskine karşı dozajı matematiksel modellerle titizlikle hesaplanmalıdır.
- **Kompost ve Yeşil Gübre:** Yeşil gübreleme, doğal meralarda toprak işleme yapılamadığı için ancak yapay mera tesisi öncesinde "tohum yatağı hazırlığı" aşamasında tercih edilir (Sezen, 1991). Kompost ise farklı organik atıkların mikrobiyolojik olarak ayrışmaya bırakılarak elde edilir. Ahır gübresine benzer şekilde kullanılsa da doğal çayır ve meralarda kompost gübrelemeye pek rastlanılmaz (Altın vd., 2021).

III. Tarım Orman Şurası kararları (Anonim, 2019) ve 12. Kalkınma Planında (T.C. Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı, 2023) meraların ıslahı için yeni yaklaşımlara ihtiyaç olduğu ve özellikle organik ıslah yöntemlerinin denenmesi gerektiği vurgulanmıştır. Bu kapsamda mera alanlarında bir takım solucan gübresi denemeleri gerçekleştirilmiştir (Doğan Demir vd. (2022), Akın ve Özcan, 2024;2025).

Organik gübre sınıfında yer alan solucan gübresi katı halde toprağa karıştırılabildiği gibi, sıvı formu ile tohumla ve yaprağa uygulanabilmektedir (Demir, 2010).

5. SONUÇ VE GENEL DEĞERLENDİRME

Mera alanlarının mülkiyet yapısı (orta malı olması) ve ekonomik getirisinin diğer tarım alanlarına göre düşük algılanması nedeniyle gübreleme uygulamaları yeterince yaygınlaşmamıştır (Heady ve Child, 1994). Ancak tarımsal üretimin devamlılığı ve gıda güvenliği için gübreleme bir zorunluluktur. Bu süreçte çevre kirliliğini önlemek adına toprak analizlerine dayalı, doğru zamanlı ve doğru miktarda uygulamalar esas alınmalıdır (Gökkuş ve Koç, 2025).

Kimyasal gübreleme yöntemleri hızlı bir verim artışı sağlasa da, uzun vadede toprak ekosistemini ve mikroflorayı olumsuz etkileyebilmekte, toprak asiditesini değiştirebilmektedir. Buna karşın organik gübreleme; topraktaki mikrobiyal aktiviteyi tetikleyerek besin elementlerinin bitki tarafından daha etkin alınmasını sağlayan biyolojik bir süreç başlatır.

Meraların sürdürülebilir yönetimi, sadece klasik katı gübrelemeyle değil, besin maddelerinin bitki tarafından emilim etkinliğini artıran hassas sıvı uygulama teknikleri ve azot kayıplarını minimize eden sıvı enjeksiyon yöntemleri ile desteklenmelidir (Van Der Meer vd., 1987). Özellikle atık yönetimini bir ıslah aracına dönüştüren arıtma çamuru gibi alternatif kaynakların kontrollü kullanımı, tahrip edilmiş mera ekosistemlerinin restorasyonunda stratejik bir rol oynamaktadır (Wester vd., 2003).

Besin elementlerinin alımını kolaylaştıran mikrobiyal gübreler ve kaynak israfını önleyen yeni nesil (nano) gübre teknolojileri, mera yönetiminde ekolojik denge ile yüksek verimi buluşturan kilit unsurlardır (Gökkuş ve Koç, 2025). Meradaki otun niceliği kadar niteliğinin de (mineral dengesi) hayvan sağlığı ve verimliliği üzerindeki belirleyici etkisi (Aksoy vd., 2000), gübreleme kararlarında sadece agronomik değil, zooteknik verileri de kapsayan multidisipliner bir yaklaşımı zorunlu kılmaktadır. Nihayetinde meralar, sadece birer yem kaynağı değil; doğru gübreleme stratejileriyle korunan, karbon tutma kapasitesi yüksek ve biyolojik çeşitliliği stabilize edilmiş yaşayan birer ekosistem olarak yönetilmelidir.

Organik gübreler, bitkilerin besin ihtiyaçlarını karşılarken, kimyasal gübrelerin neden olduğu kirlenmelere de sebep olmamaktadır. Kimyasal girdilere olan bağımlılığı azaltan bu yöntem, toprağın biyolojik canlılığını geri kazandırarak ekosistem tabanlı bir üretim modelini

desteklemektedir. Kimyasal girdilerin toprak sağlığı üzerindeki olumsuz etkilerini minimize etmek adına organik gübreleme, sürdürülebilir bitki gelişimi için güçlü bir alternatif olarak öne çıkmaktadır (Dere vd., 2019; Uçar, 2019).

TEŞEKKÜR

Özcan Akın, YÖK 100/2000 bursu (İklim değişikliği öncelikli alan) ile desteklenmiştir.

Bu çalışma Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü tarafından “Bolu Aladağ Merasında Farklı Islah Metotlarının Bitki Gelişimi ve Karbon Bağlamaya Etkileri” isimli 2023.02.02.1397 nolu LÜTEP (Lisansüstü Öğrenim Tez Projeleri) kapsamında desteklenmiştir.

Katkılarından dolayı YÖK Başkanlığı ve Düzce Üniversitesi Rektörlüğü’ne teşekkür ederiz.

KAYNAKÇA

- Akın, Ö., ve Özcan, M. (2024). Mera ıslahında kullanılan farklı gübrelerin bitki verimi üzerine etkisi: Bolu Aladağ merası örneği [Bildiri sunumu]. 3. Bilsel Uluslararası Efes Bilimsel Araştırmalar ve İnovasyon Kongresi, İzmir, Türkiye.
- Akın, Ö. ve Özcan, M. (2025) *Organik ve kimyasal gübreler kullanılan meralarda karbon bağlama kapasitesi ve toprak verimliliğinin belirlenmesi: Bolu Aladağlar merası örneği* (Proje No: 224O152) [TÜBİTAK Sonuç Raporu].
- Altın, M. (1999). *Mera gübrelemesi. Çayır-mera amenajmanı ve ıslahı* içinde. T.C. Tarım ve Köyişleri Bakanlığı TAGEM Mera Kanunu ve Uygulama El Kitabı 1
- Altın, M., Gökkuş, A., ve Koç, A. (2021). *Çayır ve mera ıslahı* (2.Baskı). Palme Yayınevi.
- Altın, M., Gökkuş, A., ve Koç, A. (2025). *Çayır mera yönetimi* (2. Baskı). T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı, Tarımsal Araştırmalar ve Politikalar Genel Müdürlüğü.
- Altıntaş, G., Altıntaş, A., Çakmak, E., ve Demir, O. (2018). Islah edilmiş meraların sürdürülebilirliği üzerine bir araştırma: Amasya-Tokat-Sivas örneği. *Tarım Ekonomisi Araştırmaları Dergisi*, 4(2), 1-16.
- Andiç, C. (1993). *Tarımsal ekoloji* (Ders Notları No: 106). Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi.
- Anonim. (2019). *III. Tarım Şurası çalışma grupları belgeleri* (2. Cilt). T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı.
- Avağ, A., Koç, A., ve Kendir, H. (2012). *Ulusal mera kullanımı ve yönetimi projesi (106G017)* (TÜBİTAK Sonuç Raporu). Ankara.
- Aydoğdu, M., Yıldız, H., Ünal, K. A., Özaydın, F., Ataker, S., ve Kuz, V. Ö. (2020). *Mera varlığının ve mera durum sınıflarının belirlenmesi* (Proje Sonuç Raporu). T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı, TAGEM, Tarla Bitkileri Merkez Araştırma Enstitüsü.
- Bakır, Ö. (1985). *Çayır ve mera ıslahı, prensip ve uygulamalar* (Yayın No. 947, Ders Kitabı No. 272). Ankara Üniversitesi Ziraat Fakültesi Yayınları.
- Bhattacharya, A. (2019). *Changing climate and resource use efficiency in plants*. Academic Press.
- Boeker, P. (1963). *Çayır-Mer'a* (İ. Demir, Çev.). Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesi Yayınları.

- Boyacı, S. Akyüz, A. ve Kükürtçü, M. (2021). Büyükbaş hayvan barınaklarında gübrenin yarattığı çevre kirliliği ve çözüm olanakları. *Tarım Bilimleri Araştırma Dergisi*, 4, 49-55
- Chen, J. H. (2006). *The combined use of chemical and organic fertilizers and/or biofertilizer for crop growth and soil fertility*. International Workshop on Sustained Management of the Soil-Rhizosphere System for Efficient Crop Production and Fertilizer Use, Thailand (ss. 1-20). Land Development Department.
- Coleman, D. C. (1985). Through a ped darkly—An ecological assessment of root soil–microbial–faunal interactions. A. H. Fitter, D. Atkinson, D. J. Read, ve M. B. Usher (Ed.), *Ecological interactions in the soil: Plants, microbes and animals* içinde (ss. 1-21). Blackwell Science Publication.
- Çankaya, S. (2014). *Sıvı çiftlik gübresi uygulamalarının doğal meranın botanik kompozisyonu, ot verimi ve kalitesine etkileri*. Yüksek lisans tezi, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
- ÇEM (2018). *DEMİS Türkiye su erozyonu istatistikleri, teknik özet*. Çölleşme ve Erozyonla Mücadele Genel Müdürlüğü Yayınları
- FAO (2018). *Pasture and fodder systems under climate change*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Demir, H., Polat, E. ve Sönmez, İ. (2010) Ülkemiz için yeni bir organik gübre: Solucan gübresi. *Tarım Aktüel* (14), 54-60.
- Dere, S., Coban, A., Akhoundnejad, Y., Ozsoy, S., ve Dasgan, Y. D. (2019). Use of mycorrhiza to reduce mineral fertilizers in soilless melon (*Cucumis melo* L.) cultivation. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 47(4), 1331-1336.
- Doğan Demir, A., Kökten, K., Şahin, Ü., ve Canbolat, M. Y. (2022). Farklı özellikteki gübrelerin mera topraklarının bazı özellikleri ile *Poa bulbosa* var. *vivipara* bitkisinin besin elementi içeriğine etkisi. *Düzce Üniversitesi Ormancılık Dergisi*, 18(2), 327-341.
- Geisseler, D., ve Scow, K. M. (2014). Long-term effects of mineral fertilizers on soil microorganisms – A review. *Soil Biology and Biochemistry*, 75, 54-63.

- Gibson, D. J., ve Newman, J. A. (2019). Grassland and climate change: An overview. D. J. Gibson ve J. A. Newman (Ed.), *Grasslands and Climate Change* içinde. Cambridge University Press.
- Gökkuş, A. (1999). *Çayır-mera yem bitkileri*. Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Yayınları.
- Gökkuş, A. (2018). Meralarımız ile ilgili bir değerlendirme. *TÜRKTOB Dergisi*, 25, 6-8.
- Gökkuş, A., ve Koç, A. (2001). *Mera ve çayır yönetimi* (Ders Yayınları No. 228). Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi.
- Haselwandter, K. (1997). Soil micro-organisms, mycorrhiza and restoration ecology. K. M. Urbanska, N. R. Webb, ve P. J. Edwards (Ed.), *Restoration ecology and sustainable development* içinde (ss. 65-80). Cambridge University Publ.
- Gökkuş, A., ve Koç, A. (2025). *Tarımsal ekoloji*. T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı, Tarımsal Araştırmalar ve Politikalar Genel Müdürlüğü.
- Holechek, J. L., Pieper, R. D., ve Herbel, C. H. (2011). *Range management: Principles and practices* (6. Baskı). Pearson.
- Ji, R., Dong, G., Shi, W., ve Min, J. (2017). Effects of liquid organic fertilizers on plant growth and rhizosphere soil characteristics of chrysanthemum. *Sustainability*, 9(5), 841.
- Kılıç, B., ve Sönmez, İ. (2019). Farklı organik gübre ve dozlarının toprak özellikleri üzerine etkilerinin belirlenmesi. *Mediterranean Agricultural Sciences*, 32(Özel Sayı), 91-96.
- Konca, Y. ve Uzun, O. (2012) *Hayvansal gübrelerin toprak ve çevre üzerine olan etkileri*. 4th Congress of Soil Scientist of Azerbaijan, 23-25 Mayıs 2012
- Mut, H., Ayan, İ., Başaran, U., Önal-Aşçı, Ö., ve Acar, Z. (2010). The effects of sheep manure application time and rates on yield and botanical composition of secondary succession rangeland. *African Journal of Biotechnology*, 9(23), 3388-3395
- Oosterheld, M., Sala, O. E., ve McNaughton, S. J. (1992). Effect of animal husbandry on herbivore carrying capacity at the regional scale. *Nature*, 356, 234-236.
- Özyazıcı, M. A., Yavuz, T., ve Sürmen, M. (2025). Mera yönetimi: Mera amenajmanının genel ilkeleri. C. Şen (Ed.), *Çayır mera yönetimi* içinde (ss. 93-122). Akademisyen Kitabevi.

- Perez, D. V., Alcantara, S., Ribeiro, C. C., Pereira, R. E., Fontes, G. C., Wasserman, M. A., ... ve De Macedo, J. R. C. (2007). Composted municipal waste effects on chemical properties of a Brazilian soil. *Bioresource Technology*, 98, 525-533.
- Sarioglu, A., Dogan, K., Kiziltug, T., ve Coskan, A. (2017). Organo-mineral fertilizer applications for sustainable agriculture. *Scientific Papers Series A. Agronomy*, 60, 161-166.
- Sezen, Y. (1991). *Gübreler ve Gübreleme*. Atatürk Üni. Yay. No:679, Ziraat Fak. Yay. No:303.
- Soyergin, S. (2003). *Organik tarımda toprak verimliliğinin korunması, gübreler ve organik toprak iyileştiricileri*. Atatürk Bahçe Kültürleri Merkez Araştırma Enstitüsü.
- Su, R., Zhou, R., Mmadi, M. A., Li, D., Qin, L., Liu, A., ... ve Wu, Z. (2019). Root diversity in sesame (*Sesamum indicum* L.): Insights into the morphological, anatomical and gene expression profiles. *Planta*, 250, 1461-1474.
- Şen, C. (Ed.). (2025). *Çayır mera yönetimi*. Akademisyen Yayınevi.
- T.C. Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı. (2023). *12. Kalkınma Planı (2024-2028)*. (Erişim tarihi: 23.09.2024).
- Teague, W. R., Dowhower, S. L., Baker, S. A., Haile, N., DeLaune, P. B., ve Conover, D. M. (2011). Grazing management impacts on vegetation, soil biota and soil chemical, physical and hydrological properties in tall grass prairie. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 141, 310-322.
- Tejada, M., ve Gonzalez, J. (2003). Effects of the application of a compost originating from crushed cotton gin residues on wheat yield under dryland conditions. *European Journal of Agronomy*, 19, 357-368.
- Tosun, F. ve Altın, M. (1981). *Çayır-mera-yayla kültürü ve bunlardan yararlanma yöntemleri*. Ondokuz Mayıs Üniversitesi Ziraat Fakültesi Yayınları
- TÜİK. (2024). *Tarım alanları, 2001-2023 istatistikleri*. (Erişim tarihi: 21.06.2024).
- Tükel, T. (2021). *Doğal kaynakların sürdürülebilir kullanım yönetimi*. Cinius Yayınları.
- UNCCD. (2024). *Global land outlook thematic report on rangelands and pastoralism*. United Nations Convention to Combat Desertification.

- Uçar, Ö. (2019). Nohut yetiştiriciliğinde organik madde içeren gübrelerin önemi. *ISPEC Journal of Agricultural Sciences*, 3(1), 116-127.
- Vallentine, J. F. (1989). *Range development and improvements* (3. Baskı). Academic Press Inc.
- Van Der Meer, H. G., Thompson, R. B., Snijders, P. J. M., ve Geurink, J. H. (1987). Utilization of nitrogen from injected and surface-spread cattle slurry applied to grassland. H. G. Van Der Meer, R. J. Unwin, T. A. Van Dijk, ve G. C. Ennik (Ed.), *Animal manure on grassland and fodder crops. Fertilizer or waste?* içinde (ss. 47-71). Springer.
- Van Faassen, H. G., ve Van Dijk, H. (1987). Manure as a source of nitrogen and phosphorus in soils. H. G. Van Der Meer, R. J. Unwin, T. A. Van Dijk, ve G. C. Ennik (Ed.), *Animal manure on grassland and fodder crops. Fertilizer or waste?* içinde (ss. 27-45). Springer.
- Wessels, K. J., Prince, S. D., Carroll, M., ve Malherbe, J. (2007). Relevance of rangeland degradation in semi-arid northeastern South Africa to the non-equilibrium theory. *Ecological Applications*, 17, 815-827.
- Wester, D. B., Sosebee, R. E., Zartman, R. E., Fish, E. B., ve Villalobos, J. C. (2003). Biosolids in a Chihuahuan Desert ecosystem. *Rangelands*, 25(4), 27-32.
- Yılmaz, İ.h., Bozkurt, M.A., ve Akdeniz, H. (2001). *Kışlık arpa tarımında arıtma çamuru kullanma olanakları üzerinde bir araştırma*. Ulusal Sanayi-Çevre Sempozyumu ve Sergisi. 25-28 Nisan 2001, Mersin, 169-177.
- Yüksek, T., Atamov, V., ve Türüt, K. (2019). Demlenmiş çay atığı ve evsel yemek atıkları ile beslenen kırmızı kalifornia solucanından elde edilen katı solucan gübresindeki bazı besin elementlerinin belirlenmesi. *Journal of Anatolian Environmental & Animal Sciences*, 4(2), 263-271.

BÖLÜM 7

SÜRDÜRÜLEBİLİR KAĞIT KAPLAMA TEKNOLOJİLERİNDE NANOSİLÜLOZ UYGULAMALARI

Ekrem DURMAZ¹

¹ Dr. Öğr. Üyesi Ekrem Durmaz, Kastamonu Üniversitesi Orman Fakültesi Orman Endüstri Mühendisliği Bölümü, 37150, Kastamonu, Türkiye Email: edurmaz@kastamonu.edu.tr ORCID: 0000-0002-6345-5673

GİRİŞ

21. yüzyılın başlarından itibaren küresel ölçekte artan çevresel kaygılar, özellikle kimya temelli sanayi sektörlerinde üretim anlayışının ve kullanılan hammaddelerin yeniden değerlendirilmesini gerekli kılmıştır. Bu bağlamda, biyo-esaslı ürünlerin geliştirilmesini ve kullanımını teşvik eden “yeşil kimya” (*green chemistry*) yaklaşımı önemli bir araştırma ve uygulama alanı olarak öne çıkmaktadır. Yeşil kimya, çevre ve insan sağlığı üzerinde olumsuz etkiler oluşturabilecek petrol ve türevleri gibi fosil kaynaklı kimyasalların kullanımını azaltmayı ya da tamamen ortadan kaldırmayı hedefleyen kimyasal tasarım ve üretim süreçlerini kapsamaktadır. Bu yaklaşımın temel amaçları arasında yenilenebilir ve biyo-esaslı hammaddelerin etkin ve verimli bir şekilde değerlendirilmesi, enerji ve kaynak kullanımının optimize edilmesi ve üretim süreçleri sonucunda ortaya çıkan atık miktarının en düşük düzeye indirilmesi yer almaktadır. Bu yönüyle yeşil kimya, sürdürülebilir üretim anlayışının geliştirilmesinde ve çevre dostu teknolojilerin yaygınlaştırılmasında önemli bir rol üstlenmektedir. Bu tür hammaddelerin katkısıyla üretilen “yenilenebilir” biyo-esaslı ürünler, çevresel meselelerin meydana getirdiği zararları ortadan kaldırmak ve “sürdürülebilir” bir dünya yaratmak adına hayati öneme sahiptir.

Günümüzde dünya, etkili ve verimli atık yönetimi süreçlerinin eksikliği nedeniyle doğal sirkülasyonun dengesizliği ve atıkların bertaraf edilmesi gibi ciddi bir sorunla karşı karşıyadır. Bu durum doğada biyolojik olarak parçalanamayan toksik malzemelerin sürekli birikmesine neden olmaktadır. Atıkların yok edilmesi meselesi ve verimsiz iyileştirme sistemlerinde yaşanan olumsuzluklar, araştırmacıların dikkatini zararsız ve biyolojik olarak kolayca parçalanabilen malzemelere çekmektedir. Bu bakımdan selülozun, mevcut biyobozunur malzemeler arasında en umut verici olanlarından birisi olduğu görülmektedir. Yenilenebilirliği, biyo-uyumluluğu ve biyolojik olarak parçalanabilirliği gibi özellikleri sayesinde selüloz, uzun yıllardır farklı sektörlerde hammadde olarak değerlendirilmektedir. Artan toplumsal çevre bilinci ve sürdürülebilir üretim yaklaşımlarına yönelik ilginin artmasıyla birlikte, yenilenebilir doğal kaynaklardan elde edilen selüloz esaslı nanomalzemelerin üretimi önemli bir araştırma alanı haline gelmiştir. Bu kapsamda geliştirilen nanoselülozik yapılar; yüksek mekanik dayanım, geniş özgül yüzey alanı, düşük yoğunluk ve biyobozunur olma gibi üstün özellikleri sayesinde ileri düzey fonksiyonel malzemelerin geliştirilmesinde önemli bir potansiyel sunmaktadır. Nanoselüloz temelli parçacıklar, çevresel sürdürülebilirlik hedefleri doğrultusunda yüksek performanslı ve çevre dostu yeni nesil malzemelerin tasarlanmasına olanak sağlayarak günümüz toplumunun artan çevresel kaygılarına yönelik etkili çözümler sunabilecek bir alternatif olarak değerlendirilmektedir.

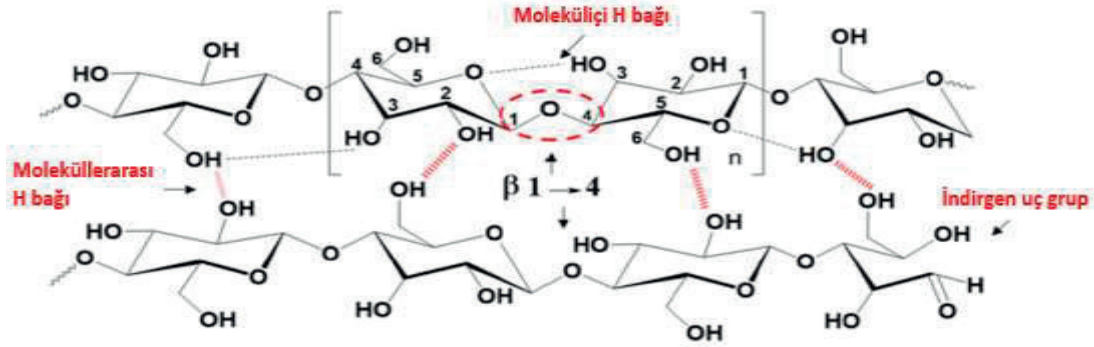
Bu bağlamda nanoselülozların kullanımı, özellikle kağıt ve ambalaj endüstrisinde önemli uygulama alanları bulmaktadır. Nanoselülozların kağıt yüzeyi kaplama uygulamalarında kullanılması; yüzey düzgünlüğü, mekanik dayanım, bariyer özellikleri ve baskı kalitesi gibi özelliklerin iyileştirilmesine katkı sağlamakta, aynı zamanda sentetik ve petrol türevi kaplama materyallerine çevre dostu bir alternatif sunmaktadır. Bu nedenle nanoselüloz esaslı kaplama sistemleri, sürdürülebilir kağıt üretimi ve yüksek performanslı kağıt ürünlerinin geliştirilmesi açısından giderek daha fazla ilgi gören bir araştırma konusu haline gelmektedir.

SELÜLOZ

Selüloz, yeryüzünde en bol bulunan ve en yaygın şekilde karşılaşılan doğal organik polimerlerden biridir. Bitkiler tarafından gerçekleştirilen yıllık biyosentez sonucunda oluşan selüloz miktarının yaklaşık 10^{12} ton düzeyinde olduğu tahmin edilmektedir. Bitkisel biyokütlenin önemli bir bileşeni olan selüloz; yıllık bitkilerde yaklaşık %33, odun yapısında yaklaşık %50 ve pamuk liflerinde ise %90 oranında bulunmaktadır. Sahip olduğu yüksek bulunurluk ve yenilenebilirlik özellikleri sayesinde selüloz, endüstriyel ölçekte en yaygın kullanılan doğal hammaddelerden biri olup özellikle kâğıt ve kâğıt hamuru üretiminde temel bir hammadde olarak değerlendirilmektedir. Bu doğrultuda, selülozun önemli bir bölümü kâğıt üretiminde kullanılarak yıllık yaklaşık 10^{12} ton seviyesinde kâğıt hamuru üretimine karşılık gelmektedir. Bununla birlikte, toplam selüloz üretiminin yalnızca yaklaşık 4 milyon tonluk kısmı kimyasal dönüşüm süreçlerinde değerlendirilmekte ve farklı kimyasal uygulamalarda kullanılmaktadır. (Granström, 2009). Bununla birlikte, selüloz yalnızca bitkisel kaynaklardan değil, aynı zamanda bakteriler ve tunikatlar gibi bitkisel kökenli olmayan çeşitli biyolojik kaynaklardan da elde edilebilmektedir. (Jonoobi vd. 2015).

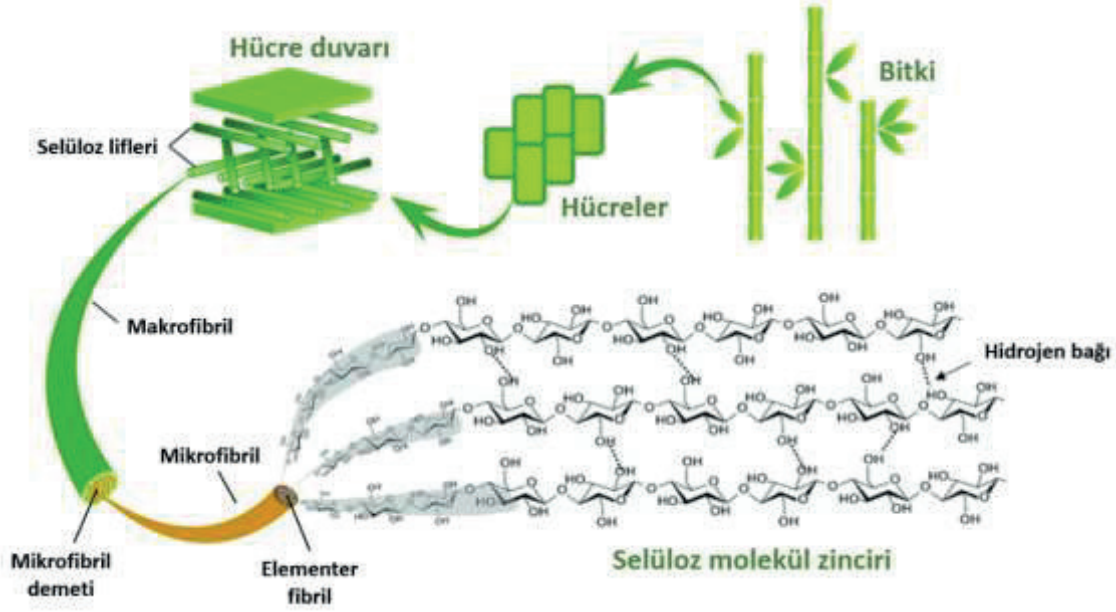
Fransız kimyager Anselme Payen, 1838 yılında gerçekleştirdiği çalışmalarla selülozun kimyasal bileşimini ilk kez ortaya koymuş ve bu doğal polimerin yaklaşık %44–45 karbon, %6–6,5 hidrojen ve geri kalan kısmının ise oksijenden oluştuğunu belirlemiştir. Bu çalışma, selülozun kimyasal yapısının anlaşılmasına yönelik ilk bilimsel adımlardan biri olarak kabul edilmektedir (Granström, 2009). Selüloz, $\beta(1\rightarrow4)$ glikozidik bağlar ile birbirine bağlanmış D-anhidroglukopiranoz birimlerinden oluşan doğrusal yapıli bir homopolimerdir. Selüloz zinciri, genel formülü $(C_6H_{10}O_5)_n$ olan anhidroglukoz birimlerinin ardışık olarak birbirine bağlanmasıyla meydana gelmektedir. Selüloz zincirinde tekrar eden yapısal birim sellobiyoz olarak adlandırılmakta olup, bu birimin uzunluğunun yaklaşık 1,03 nm olduğu bilinmektedir.

(Fengel ve Wegener, 1989). Şekil 1’de selülozun moleküler yapısı, moleküliçi ve molekülarası hidrojen (H) bağları görülmektedir.



Şekil 1. Selülozun moleküler yapısı, moleküliçi ve molekülarası hidrojen (H) bağları
(Tayeb vd. (2018)’den alınarak yeniden düzenlenmiştir)

Selüloz molekülleri bitki hücre duvarı içerisinde demetler halinde düzenlenmiş bir yapı sergilemektedir. Aynı doğrultuda uzanan yaklaşık 40 selüloz zincirinin bir araya gelmesiyle oluşan en küçük yapısal birim elementer fibril olarak adlandırılmakta olup bu yapının çapı yaklaşık 3,5 nm civarındadır. Elementer fibrillerin bir araya gelmesiyle daha büyük yapısal organizasyonlar olan mikrofibriller meydana gelmektedir. Elektron mikroskobu ile gözlemlenebilen en küçük selüloz yapısal birimi mikrofibril olarak kabul edilmektedir. Hiyerarşik bir organizasyon gösteren bu yapıda, çok sayıdaki selüloz molekülü zincir halinde birleşerek elementer fibrilleri oluşturmakta; elementer fibrillerin birleşmesiyle mikrofibriller, mikrofibrillerin birleşmesiyle makrofibriller ve nihayetinde makrofibrillerin bir araya gelmesiyle selüloz lifleri meydana gelmektedir. Bu yapısal düzenleme, Şekil 2’de şematik olarak gösterilmektedir. (Fengel ve Wegener, 1989).



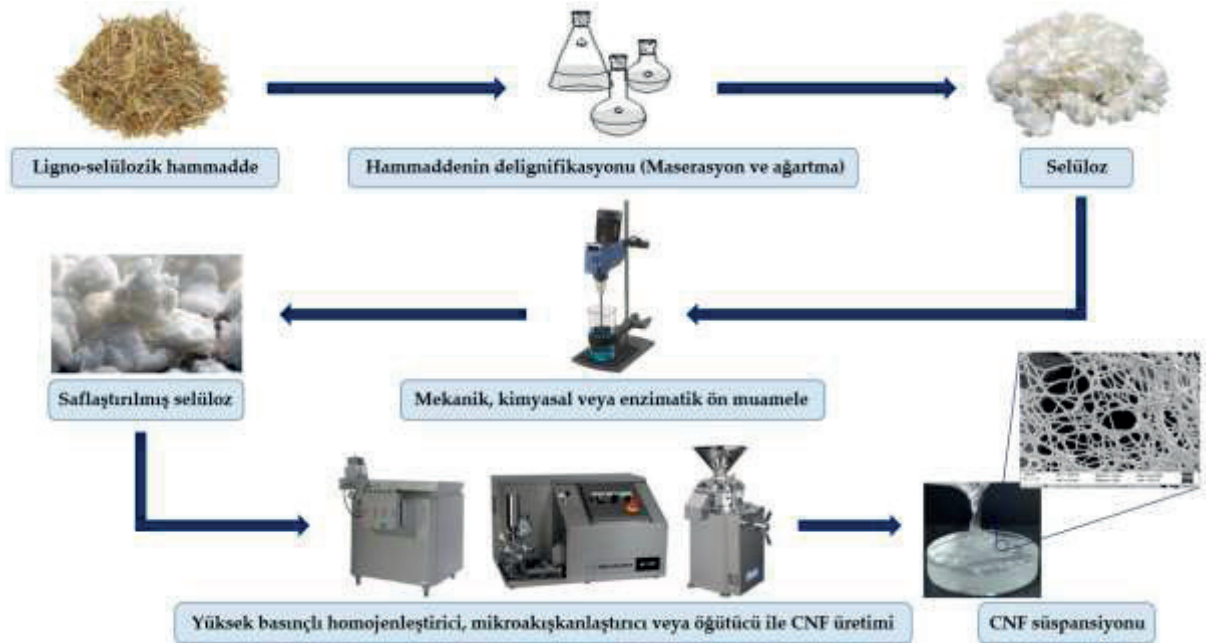
Şekil 2. Selüloz molekülü, elementer fibriller, mikrofibriller ve makrofibriller (Han 2019)’dan alınarak yeniden düzenlenmiştir)

NANOSELÜLOZ

Günümüz dünyası, fosil kaynakların aşırı kullanımı, iklim değişikliği, atık yöntemi, toplum sağlığı vb. konularda artan çevresel endişelerden ötürü, yaşamın her alanında yenilenebilir ve sürdürülebilir teknolojilerin kullanılmasını zorunlu kılmaktadır. Biyo-esaslı malzemelerin üretimi hususunda var olan ilginin daha da artması ve buna bağlı olarak başarılı bilimsel yöntemlerin ortaya konulması, günümüzde daha iyi ve sürdürülebilir bir gelecek adına bilim dünyasında çığır açmıştır. Bu bakımdan, farklı polisakkaritler göz önüne alındığında selüloz, ileri karakteristik özellikleri, düşük maliyeti, yenilenebilirliği, biyo-bozunabilirliği vb. üstün yönlerinden dolayı, farklı uygulama alanlarındaki kullanımı açısından çarpıcı bir doğal hammadde adayı olarak ön plana çıkmaktadır (Thomas vd. 2020).

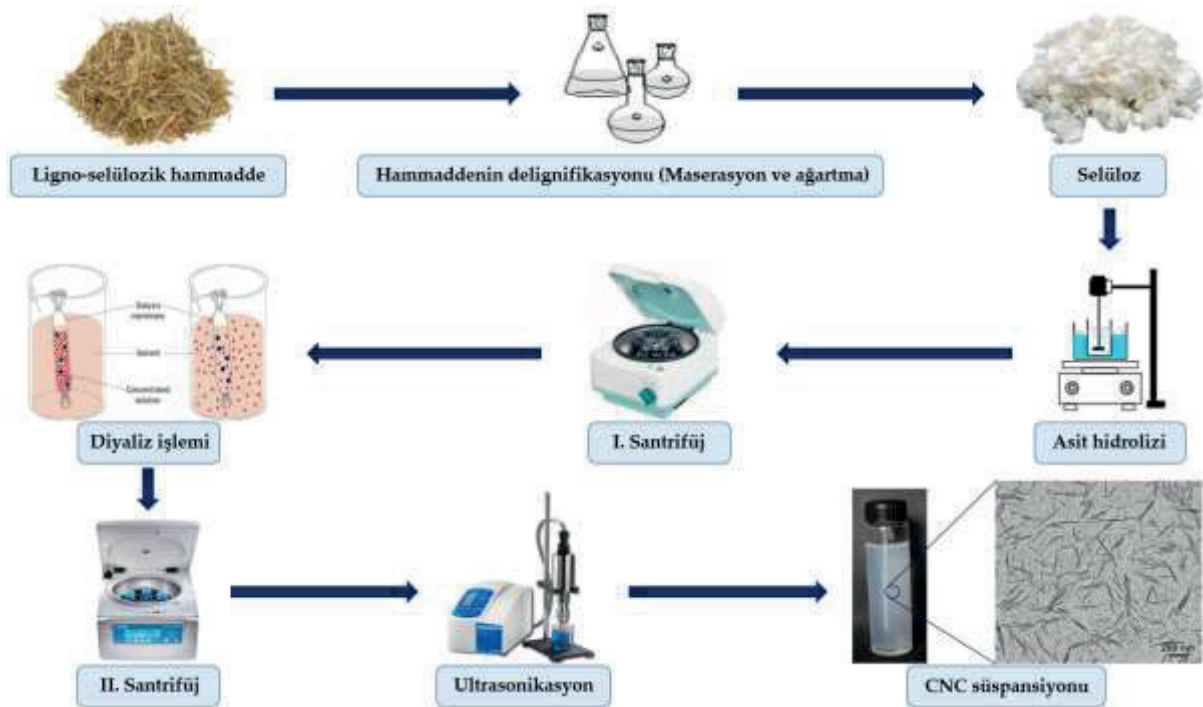
Selüloz, lignoselülozik biyokütlenin yapısında bulunan en önemli kimyasal bileşenlerden biri olup, uzun yıllardır birçok endüstriyel alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Selüloz esaslı malzemeler başta kâğıt, karton ve ambalaj endüstrisi (Jonoobi vd., 2015) olmak üzere tekstil ve gıda (Mansouri vd., 2015), tutkal ve yapıştırıcı üretimi (Khiari vd., 2011) ile ilaç ve kozmetik sektörleri (Olaru vd., 1998) gibi çok çeşitli alanlarda geniş bir kullanım potansiyeline sahiptir. Ancak, 21. yüzyılın başından itibaren nanoselülozun değerinin anlaşılması ile selüloz geleneksel kullanımının dışına çıkmıştır (Kallel vd. 2016). Nanoselüloz veya nano yapıli selüloz, en az bir boyutu (çapı) 100 nm'den küçük ve bazı türleri için uzunluğu birkaç mikrometre olan tüm selüloz esaslı nano parçacıkların genel adıdır. Nanoselülozlar,

yüksek polimerizasyon derecesi, yüksek kristalite, düşük yoğunluk, iyi boyutsal stabilite, yüksek gerilme mukavemeti, yüksek sertlik, geniş spesifik yüzey alanı, hafiflik, yüksek şeffaflık, ileri termal stabilite, biyo-bozunabilirlik, biyo-uyumluluk, toksik olmama vb. göz alıcı özelliklere sahiptir (Jozala vd. 2016; Zhu ve Lin 2019; Trache vd. 2020). Nanoselülozlar, üretim yöntemlerine ve nihai ürün özelliklerine bağlı olarak genellikle selüloz nanofibril (cellulose nanofibril, CNF) ve selüloz nanokristal (cellulose nanocrystal, CNC) olmak üzere iki ana gruba ayrılır (Nechyporchuk vd. 2016). Nanofibril selüloz (Baati vd. 2017) ya da nanoliflendirilmiş selüloz (Ilyas vd. 2019) olarak da isimlendirilen selüloz nanofibril, 1 – 100 nm çapında ve 100 nm’den birkaç μm ’ye kadar değişen uzunlukta, selülozun hem kristal hem de amorf bölgelerini içeren uzun, esnek ve ağsı bir yapıya sahip nanoselüloz türüdür. CNF’ler, yüksek basınçlı homojenleştirme, mikroadışkanlaştırma, öğütme, dondurup-parçalama, buhar patlaması, ultrasonikasyon, ekstrüzyon, sulu karşı çarpışma, elektrospin vb. gibi mekanik yöntemler vasıtasıyla üretilmektedir (Kargarzadeh vd. 2018). Uygulanan mekanik işlemlerin tekrar sayısının artmasıyla, daha yeksenak ve boyutsal olarak daha küçük CNF’ler elde edilmektedir. Ancak bu mekanik işlemlerin temel dezavantajı, CNF’nin yüksek viskozitesinden ötürü ekipmanların yüksek enerji tüketimi ve tıkanmalarındır. O nedenle, bu dezavantajları ortadan kaldırmak adına CNF üretiminden önce 2,2,6,6,-tetrametilpiperidin-1-oksil (TEMPO) oksidasyonu, karboksimetilasyon, sülfonasyon, kuaternizasyon, derin ötektik çözücüler, organosolv işlemi, iyonik sıvılar, hafif asit veya enzimatik hidroliz gibi bazı ön işlemler veya modifikasyon işlemleri uygulanmaktadır (Kargarzadeh vd. 2017; Dhali vd. 2021). Şekil 3’de CNF üretiminde geleneksel iş akışı verilmiştir.



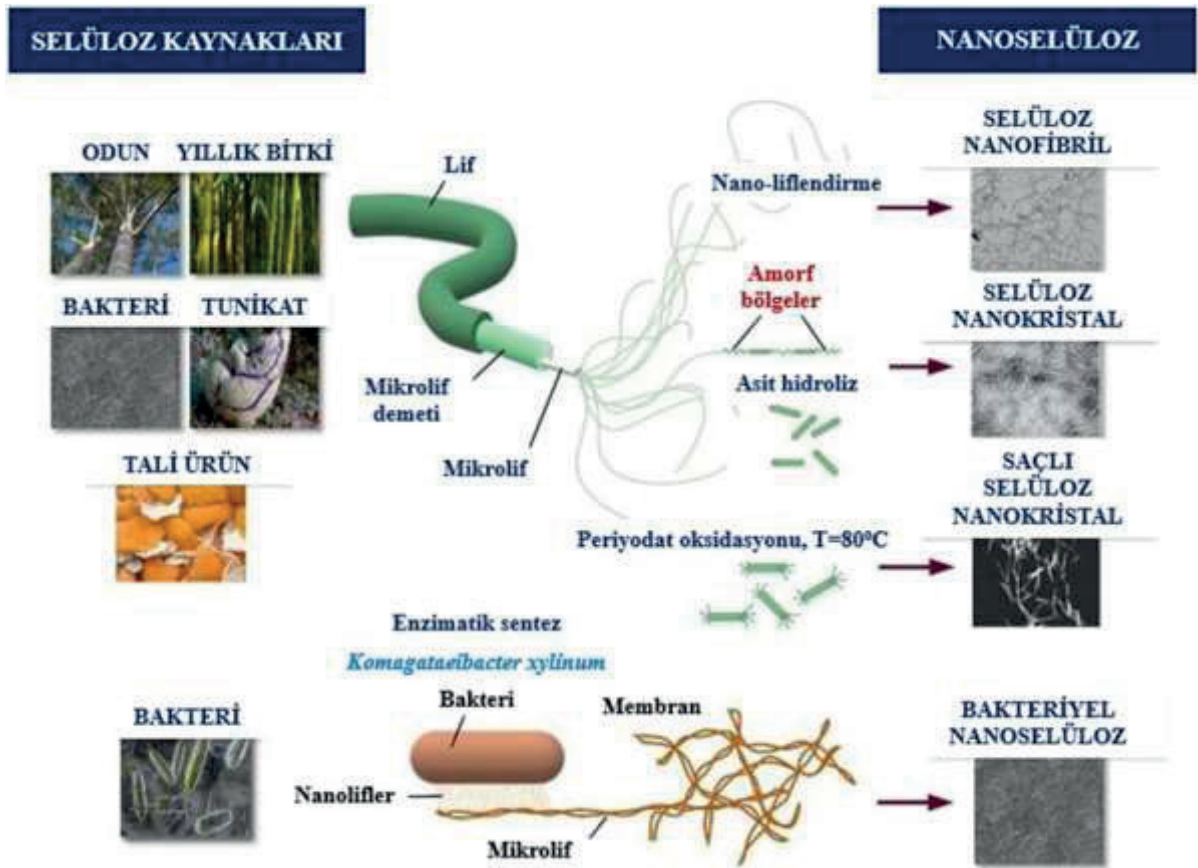
Şekil 3. CNF üretiminde iş akışı (Durmaz (2021)’den alınarak tekrar düzenlenmiştir)

CNF'nin aksine, nanokristalin selüloz (Ilyas vd. 2018), kristalin nanoselüloz (Lenfant vd. 2017) veya selülozik nanoiğne (Motta Neves vd. 2020) olarak da bilinen selüloz nanokristal farklı asit hidroliz yöntemleriyle elde edilmektedir. Selülozun sadece kristal bölgelerini içeren CNC, 2 – 20 nm çapa ve 100 – 500 nm uzunluğa sahip, iğne şeklindeki selülozik nano parçacıklardır (Phanthong vd. 2018). CNC'lerin eldesinde uygulanan geleneksel yöntem sülfürik asit, hidroklorik asit, nitrik asit, hidrobromik asit ve fosforik asit gibi inorganik asitlerle yapılan hidroliz işlemidir. Bu asit türlerinin arasında sülfürik asit ile yapılan hidroliz, sulu süspansiyonlarda CNC'lerin iyi dağılıbilirlik özelliği göstermesi bakımından en iyi bilinen, etkili ve kabul görmüş işlemdir. Her ne kadar CNC üretiminde uygulanan asit hidroliz işlemleri basit ve zaman kazandıran bir süreç olarak görülse de, bu işlemin beraberinde getirdiği önemli derecede çevre kirliliği, nispeten düşük verim, ekipmanlarda oluşturduğu korozyon ve arındırma esnasında aşırı miktarda su kullanımı ele alınması gereken ciddi konular arasında bulunmaktadır. Ancak öte yandan, söz konusu problemleri bertaraf etmek adına son dönemlerde enzimatik hidroliz, organik asit (oksalik asit, formik asit) hidrolizi, katı asit (fosfotungstik asit) hidrolizi, derin ötektik çözelti muamelesi, oksidasyon indirgenmesi ve iyonik sıvı muamelesi gibi yenilenebilir ve geri dönüştürülebilir çevreye duyarlı yöntemler denenmektedir. Bununla birlikte hidroliz işleminde kullanılan kimyasal türü ve konsantrasyonu, hidroliz reaksiyon süresi ve sıcaklığı, CNC'lerin kristallik derecesini, verimini ve ısıl kararlılığını önemli ölçüde etkilemektedir (Kargarzadeh vd. 2017, 2018; Xie vd. 2018; Du vd. 2019). Şekil 4'de CNC üretiminde geleneksel iş akışı gösterilmiştir.



Şekil 4. CNC üretiminde iş akışı (Durmaz (2021)'den alınarak tekrar düzenlenmiştir)

Bu nanoselüloz türlerine ilave olarak, bazı araştırmacılar bu sınıflandırmaya bakteriyel nanoselülozları (BNC) da ilave etmişlerdir. Dhali vd. (2021), bakteriyel nanoselülozun (BNC) veya diğer bir ismiyle mikrobiyal selülozun, karbonhidratların bakteriyel yollarla fermentasyonu ile elde edildiğini ifade etmişlerdir. BNC'ler, 20 – 100 nm çapında, birkaç mikrometre uzunluğunda, geniş yüzey alanına sahip bükülmüş şeritler halinde elde edilmektedirler (Phanthong vd. 2018). Yukarıda bahsedilen nanoselüloz türlerinin yanı sıra, Van de Ven ve ekibi yapmış oldukları çalışmalarında, selülozun kristal gövdesinin her iki ucundan bazı çıkıntılı parçacıklara sahip olan saçlı selüloz nanokristal (HCNC) adı verilen başka bir nanoselüloz türünü ortaya koymuşlardır. Bu nanoselüloz türü, selülozun hem kristal hem de amorf bölgelerini açığa çıkarmak suretiyle periyodat oksidasyonunu içeren bir kimyasal uygulama ile elde edilir (Van De Ven ve Sheikhi 2016; Tavakolian vd. 2020; Koshani vd. 2021). Şekil 5'de farklı selüloz kaynaklarından üretilen nanoselüloz türleri görülmektedir.



Şekil 5. Farklı selüloz kaynaklarından üretilen nanoselüloz türleri (Negro vd. (2020)'den alınarak yeniden üretilmiştir)

Nanoselülozlar, selüloz oranı bakımından zengin bitkiler, mikroorganizmalar ve suda yaşayan hayvanlar (tunikat) gibi biyo-esaslı kaynaklardan üretilmektedirler (Abraham vd.

2013). Literatüre bakıldığında, nanoselülozların üretiminde hammadde olarak odun ve odun esaslı biyo-kütlelerden (odun tozu, sülfite hamuru, ağartılmış sülfite hamuru, ağartılmış kraft hamuru); yıllık bitkiler, tarımsal bitkiler ve bunların atıklarından (şeker kamışı, pirinç sapı, kendir, kenevir, buğday sapı, ayçiçeği sapı, yulaf kabuğu, mısır koçanı, muz kabuğu, şeker pancarı küspesi, arpa sapı, limon otu, bambu, şalgam kökü, patates kabuğu, soğan kabuğu, pirinç kabuğu, jüt, soya kabuğu, pamuk, fındık kabuğu, mango çekirdeği, fıstık kabuğu, hindekstan cevizi kabuğu, su zambağı, rami, su kamışı, fil otu, kenaf, sisal vb.) yararlanıldığı görülmektedir (García vd. 2016; Hernandez ve Rosa 2016; Kargarzadeh vd. 2017; Huang vd. 2019; Vanderfleet ve Cranston, 2021; Norfarhana vd. 2022; Perumal vd. 2022). Bununla birlikte son yıllarda okara, kahve çekirdeği, zencefil, bezelye kabuğu, çay sapı, limon çekirdeği, *Phragmites australis*, durian meyvesi kabuğu atığı ve *Hevea brasiliensis* (kauçuk ağacı) gibi ilginç doğal lif kaynaklarından da nanoselüloz üretimi denenmiştir (Patil vd. 2022). BNC üretiminde ise *Aerobacter*, *Rhizobium*, *Acetobacter*, *Xanthococcus Agrobacterium*, *Sarcina*, *Alcaligenes*, *Pseudomonas*, *Azotobacter*, *Acanthamoeba* ve *Achromobacter* gibi mikroorganizmalar kullanılmaktadır. Ayrıca, *Microdictyon*, *Chaetomorpha*, *Rhizoclonium* ve *Cladophora* gibi alg türleri de nanoselüloz üretiminde potansiyel hammadde olarak tercih edilmektedir (Islam vd. 2014; Menon vd. 2017).

Üstün özellikleri sayesinde CNF ve CNC'ler takviye dolgu malzemesi, optik malzemeler, elektro-iletken malzemeler, biyo-medikal malzemeler, ambalaj ürünleri, kağıt sanayi, enerji ve elektronik cihazlar, biyo-adsorban, gıda ürünleri, kozmetik, kaplama, boya, vernik vb. farklı sektörlerde değerlendirilmektedir (Dhali vd. 2021; Du vd. 2019). BNC'ler, sahip oldukları ileri mekanik dirençler, yüksek yüzey alanı, yüksek kristallik ve iyi sıvı emicilik gibi özelliklerinden dolayı bilhassa elektronik, biyo-medikal ve gıda ambalajlama alanlarında kullanılmaktadırlar (Abol-Fotouh vd. 2020). HCNC'ler ise selülozik hidrojel, ağır metal iyon temizleyici, süper hidrofobik filmler, polimer takviye ajanı, boya giderme, gıda ambalajı vb. uygulamalar için oldukça önem arzeden iyi fiziko-kimyasal özelliklere sahiptirler (Cherian vd. 2022).

Nanoselülozlar ticari açıdan ekonomik getirisi yüksek olan ürünlerden biri olarak son yıllarda ön plana çıkmaktadır. Özellikle yurtdışında birçok ülkede CNF ve CNC üretimi yapılmakta ve her geçen gün üretim yapan firma sayısı artmaktadır. Kanada, Amerika, Brezilya, Norveç, İsveç, İngiltere, İspanya, Fransa, Belçika, Almanya, İsviçre, Avusturya, İtalya, İsrail, İran, Çin, Güney Kore, Malezya ve Avustralya bu malzemelerin üretimini yapan ülkeler arasındadır. Bu ülkelerde üretim yapan firmaların bir kısmı büyük ölçekli, bir kısmı da pilot ölçekli üretimler gerçekleştirmektedir. Üretim yöntemi, partikül boyutu, saflık derecesi ve ürün

formu açısından farklı karakteristik özelliklere sahip CNF ve CNC'ler üretilmektedir. Tablo 1'de CNF ve CNC üretimi yapan farklı firmaların 2022 yılına ait üretim kapasiteleri ve kullandıkları yöntemler yer almaktadır.

Tablo 1. CNC ve CNF üretimi yapan şirketlerin üretim yöntemleri ve kapasiteleri (2022, ton/yıl, kuru madde) (TAPPI, Cellulose Nanomaterials Production Update, 2022)

CNF		
Üretici Firma, Ülke	Üretim yöntemi	Kapasite
Sappi Biotech, Global	Patentli	650
Nippon Paper, Japonya	TEMPO ve karboksilleme	560
University of Maine, ABD	Mekanik	260
GranBio, ABD	SO ₂ fraksiyonu	130
CelluComp, İngiltere	Kimyasal ön işlem	100
Oji Paper, Japonya	Fosfat esterifikasyonu	40
Chuetsu Pulp and Paper, Japonya	Aqueous counter collision	30
Sugino Machine, Japonya	Oblique collision	26
Seiko PMC, Japonya	Modifiyeli hidrofobik	24
Cellulose Lab, Kanada	TEMPO, diğerleri	18
Tianjin Haojia Cellulose Co., Ltd, Çin	TEMPO ve karboksilleme	3
Dai-ichi Kyogo (DKS), Japonya	TEMPO	1
Forest Products Lab, ABD	TEMPO, mekanik	<1
VTT, Finlandiya	Kimyasal, enzimatik, mekanik	Pilot
CNC		
Üretici Firma, Ülke	Üretim yöntemi	Kapasite
CelluForce, Kanada	Sülfürik asit hidrolizi	300
Anomera, Kanada	Karboksilasyon	170
Granbio, ABD	SO ₂ fraksiyonu	130
Navitas, Slovenya	Patentli	50
Melodea, İsveç	Sülfürik asit hidrolizi	35
Fibenol, Estonya	Reaktif ekstraksiyon	6
Forest Products Lab, ABD	Sülfürik asit hidrolizi	3
Blue Goose Biorefineries, Kanada	Metal katalitik oksidasyonu	2
Cellulose Lab, Kanada	Çeşitli yöntemler	<1
FPIinnovations, Kanada	Sülfürik asit hidrolizi	Pilot
Hangzhou Yeuha Technology Co., Çin	Patentli	Pilot
Sweetwater Energy, ABD	Reaktif ekstrüzyon	Pilot
Tianjin Haojia Cellulose Co., Ltd., Çin	Modifiyeli/modifiye edilmemiş	Pilot

NANOSELÜLOZ ESASLI KAPLAMA İŞLEMLERİ

İnce film şeklindeki kaplamalar, kaplanmış işlevsel malzemelerin üretimindeki kolaylıklar nedeniyle son yıllarda ilgi çekici bir araştırma konusu haline gelmiştir ve “yeşil kaplama” ihtiyacının hayati önem taşıdığı ortaya çıkmaktadır. Bu anlamda, kendi kendini temizleyen, onaran ve montajlanan akıllı ve çevre dostu kaplamalar üretmek adına yoğun araştırmalar yürütülmektedir. Pürüzsüz ve yeksenak kaplama, taşıyıcı tabakaya iyi yapışması,

kimyasallara ve diğer etkenlere karşı iyi direnç göstermesi ve uygulama alanlarına göre kaplamanın ayarlanabilir fiziko-kimyasal özelliklere sahip olması, etkili bir kaplama formülasyonunun oluşturulması bakımından temel koşullardır. Nanoteknoloji sayesinde artık birçok nano-esaslı geleneksel ve güncel kaplamaların üretilmesinin yolu açılmıştır. Ancak çağımızda geleneksel kaplamalara duyulan ihtiyaç, çevresel sürdürülebilirlik açısından hala önem taşımaktadır. Polisakkaritler, proteinler ve poli-hidroksialkanoatlar (PHA) gibi biyopolimerler bu amaç için oldukça fazla araştırılmaktadır, ancak bazı uygulamalar göz önüne alındığında biyopolimerlerin hidrofilikliği, kristal davranışı, erime sıcaklığı düzensizliği, kırılgenliği vb. dezavantajları bu kaplamaların başarısızlıkla sonuçlanmasına neden olmaktadır. Bundan dolayı, farklı uygulama alanlarında pazarın geniş talepleri karşılanmaya çalışılırken, aynı zamanda da üstün özelliklere sahip yeni işlevsel kaplamaların üretiminin gerçekleştirilmesi gerekmektedir (Pulikkalparambil vd. 2018; Rawat vd. 2018; Rovera vd. 2020; Tharayil vd. 2021; Tyagi vd. 2021).

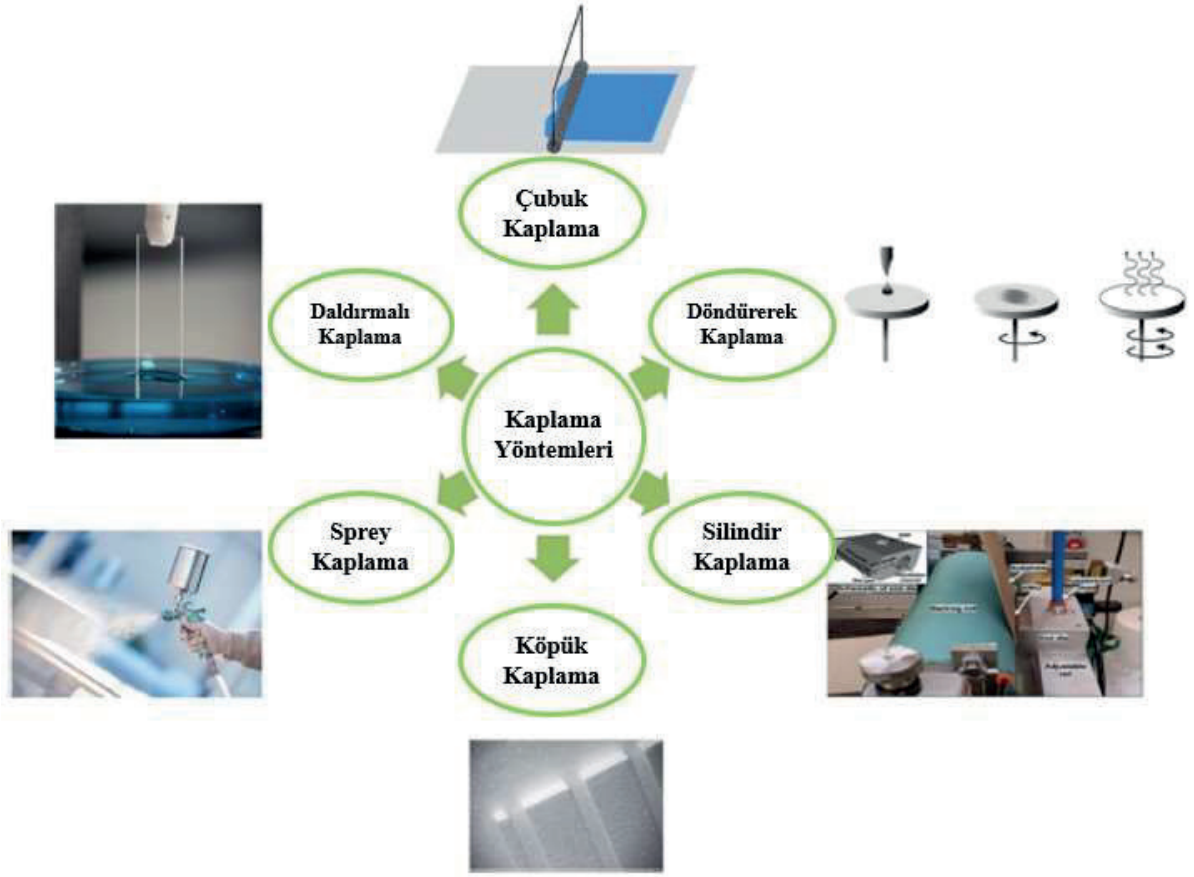
Kaplama işlemlerinde nanoselüloz türleri tek başlarına veya farklı süspansiyonlar içerisinde takviye ajanı olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır. Düşük maliyet, yüksek üretim verimi, biyo-uyumluluk ve yenilenebilirlik, nanoselülozların kaplama uygulamalarında kullanılabilirliğini daha da arttırmaktadır. Nanoselüloz süspansiyonları ile yapılan kaplamalar, nispeten üretim kolaylıkları nedeniyle nanoselüloz esaslı filmler, hidrojeller ve aerojeller arasında daha çok ön plana çıkmaktadır. Yine de bu tür kaplamaların daha etkili uygulanabilmesi için bir çok problemin ele alınması ve çözülmesi gerekmektedir. Yapılan literatür çalışmalarında, nanoselüloz esaslı kaplamaların günlük yaşamın her alanında uygulanabilirliği ortaya konulmuştur, ancak bu kaplamaların formülasyonu hakkındaki çalışmalar henüz yeterli seviyeye ulaşmamıştır. Nanoselüloz esaslı kaplamaların tek başına daha çok gıda ambalajları, optik ve nano/mikroelektronik cihazlar; farklı polimer matrislerle kombinasyon halinde ise bariyer kaplama, biyomedikal uygulamalar, su arındırma membranları vb. alanlarda uygulamaları olduğu görülmektedir (Fekry ve Azab, 2020; Sharma vd. 2020; Paul, 2017; Khelifa vd. 2016; Wei vd. 2014).

Farklı türde katı alt katmanlar üzerine kaplama işlemini gerçekleştirmek için çeşitli yöntemler mevcuttur. Bu yöntemler ölçüm sürecine bağlı olarak genellikle üç temel kategoriye ayrılmaktadır: Otomatik ölçümlü, ön ölçümlü ve düzeltilmiş. Otomatik ölçümde, kaplama ekipmanının kendisi yapılan kaplamanın kalınlığını ve son kaplamayı kontrol etmektedir. Ön ölçümde, aplikatördeki kaplama süspansiyonu son kaplamayı kontrol etmektedir. Düzeltilmiş durumda ise, aplikatör son kaplamayı kontrol etmek bakımından fazla kaplamayı engellemek için ölçüm işlemini sonlandırır (Tyagi vd. 2021). Nanoselüloz esaslı kaplamalar için belirtilen

farklı kaplama teknikleri arasında spreycaplama, silindir kaplama, daldırmalı kaplama, döndürmeli kaplama ve çubuk kaplama bulunmaktadır. Spreycaplamada, kaplanacak süspansiyon sıkıştırılmış ve basınçlı uçucu solventlerle birlikte kaplama işlemi için atomize edilir ve püskürtülür, ancak bu yöntemde karşılaşılan asıl dezavantaj, kaplama kalınlığının yeksenak olmamasıdır (Shanmugam vd. 2017). Silindir kaplamada, büyük hacimlerdeki kaplama süspansiyonu, kaplanacak yüzeylerde homojen bir kaplama elde etmek amacıyla baskı silindirleri arasında toplanır. Bu yöntemin dezavantajı, ekipmanların yüksek maliyetidir (Kumar vd. 2017; 2016). Daldırmalı kaplama işleminde, substrat malzemesi viskoziteye, sıcaklığa ve daldırma süresine bağlı olarak kaplama süspansiyonuna daldırılır. Bu yöntem genellikle alt tabakaları çeşitli şekillerde kaplamak amacıyla kullanılmaktadır (Herrera vd. 2016; 2017). Döndürerek kaplamada, substrat bir vakuma yerleştirilir ve süspansiyon yüksek hız ve ivmeye sahip bir döndürücü kullanılarak homojen biçimde yüzeye dağıtılarak kaplanır. Yapılan kaplamanın özellikleri süspansiyonun viskozitesine ve dönme hızına bağlıdır (Herrera vd. 2016). Çubuk kaplamada, kaplama süspansiyonu eğimli bir plaka ve substrat arasına yerleştirilir. Plakanın yavaşça yukarı doğru hareket ettirilmesiyle kapilarite, kaplama süspansiyonunun substrat yüzeyinde ilerleyerek yüzeyin belirli kalınlıkta kaplanmasını sağlar. Yöntem basit, hızlı, kolay ayarlanabilir ve uygun maliyetlidir (Prevo ve Velez, 2004). Lifsel yüzeyler üzerine nanoselüloz süspansiyonlarının kaplanması bakımından en verimli olduğu düşünülen ve köpük kaplama olarak adlandırılan başka bir kaplama tekniği ortaya konulmuştur. Bu teknik, ortalama kabarcık boyutuna sahip stabilize köpük kullanarak ultra ince kaplama sağlamaktadır (Kinnunen-Raudaskosko vd. 2014). Bahsedilen bu kaplama teknikleri Şekil 6’da görsel olarak ifade edilmiştir.

Günümüzde nanoselülozların uygulama alanları genişlemekte ve kullanımları son ürün kalitesi açısından farklı yararlar sağlamaktadır (Lengowski vd. 2019). Nanoselülozik partiküller selülozik kaynaklardan elde edilmelerinden ve süspansiyon biçiminde mevcut olmalarından ötürü, kağıdın üretim aşamasında biyo-esaslı ajan olarak veya nihai kağıtların yüzeylerinde biyo-esaslı nano kaplama malzemesi olarak kullanılabilirler. CNF ve CNC olarak bu partiküllerin kağıt endüstrisinde kullanımları kağıtçılık tarihine yeni bir boyut kazandırmıştır (Brodin ve Eriksen, 2015). Nanoselülozlar, kağıt üretiminde katkı veya dolgu maddesi olarak kullanılabilirler gibi, kaplama malzemesi olarak da kağıt endüstrisinde kendilerine yer bulabilmektedir. Kaplama malzemesi olarak nanoselülozların kullanımı kağıt üretiminden sonra gerçekleştirildiği için, kağıtçılıktaki drenaj problemine bir çözüm getirebileceği düşünülmektedir. Kaplama malzemesinin miktarı ve uygulanan kaplama tekniği, kaplanmış kağıtların fiziksel, mekanik, optik ve bariyer özelliklerini belirlemektedir (Boufi vd. 2016). İnce

bir nanoselüloz tabakası kağıdın yüzey özelliklerini iyileştirmek için yeterli olmaktadır, ancak yüksek bariyer özelliklerinin arandığı uygulamalarda kağıt yüzeylerine daha kalın bir kaplama yapılması gerekmektedir. Kağıt kaplamalarında bariyer malzemesi olarak özellikle CNF süspansiyonları tercih edilmektedir. Kağıt yüzeylerine kaplama malzemesi olarak nanoselüloz süspansiyonlarının uygulanması sonucunda, kaplanmış kağıtların mukavemet özelliklerinin kaplanmamışlara kıyasla arttığı görülmüştür. Nanoselülozik süspansiyonların içerdikleri nano partiküller sayesinde, makro veya mikro boyutlardaki kağıt hamuru liflerine kıyasla daha fazla miktarda lifler arası bağ meydana geldiği ve bu sayede kağıdın mukavemet özelliklerinin geliştiği ortaya konulmuştur (Brodin vd. 2014). Benzer şekilde, nanoselülozlar ile kaplanmış kağıt ve kartonların kontrol örneğine kıyasla daha yüksek bükülme sertliği değerlerine sahip oldukları saptanmıştır (Ridgway ve Gane, 2012). Kağıt ve kartonların nanoselülozlarla kaplama sonrası yüzeylerinde meydana gelen bağların sayısındaki artış, bu malzemelerin bükülme özelliklerini iyileştirmektedir (Brodin vd. 2014). Nanoselüloz süspansiyonları uygulandıkları kağıt ve karton yüzeylerinin yüzey pürüzsüzlük özelliklerini de geliştirmektedir (Ridgway ve Gane, 2012). Lif-lif kesitleri tarafından meydana gelen boşluklar nanoselüloz süspansiyonları tarafından doldurulmakta ve böylece bu durum kağıt ve kartonların yüzey pürüzsüzlüklerini arttırmaktadır (Brodin vd. 2014). Nanoselülozların kağıt üzerinde bir film biçiminde ya da kaplama malzemesi olarak kullanımları, bu kağıtların hava geçirgenliklerini azaltmaktadır. Konu hakkında yapılmış çalışmalardan elde edilen sonuçlar, lifler arasındaki boşlukların nanoselüloz partikülleri ile doldurulması neticesinde, bu nano-partiküllerin kağıtların hava geçirgenlikleri için bir bariyer görevi gördüğünü ortaya koymuştur (Brodin vd. 2014). Nanoselüloz ile yapılan kaplama işlemlerinin, kağıtların oksijen emisyon oranı ve oksijen geçirgenliğinin azaltılması bakımından etkisi olduğu ifade edilmektedir. Fukuzumi vd. (2009), TEMPO-CNF ile kaplanmış kağıtların, polilaktik asit ile kaplanmış kağıtlara kıyasla daha düşük oksijen geçirgenliğine sahip olduklarını belirlemişlerdir. Aulin vd. (2010), yüksek bağıl nemin yüksek oksijen emisyon oranına sebep olduğunu açıklamışlardır. Yüksek bağıl nemde CNF-CNF hidrojen bağları, CNF-H₂O hidrojen bağlarıyla yer değiştirmekte ve lifsel ağ yapısı şişmektedir. Bu durum daha yüksek oksijen emisyon oranına sebep olmaktadır. Bu özelliklerinden ötürü CNF esaslı kaplama veya filmler, etilen vinil alkol (EVOH) vb. sentetik filmlere bir alternatif olarak kullanılabilir (Aulin ve Ström, 2013). Bunlara benzer şekilde kağıtların yağ direnç özelliklerinin, nanoselüloz esaslı süspansiyonlarla kaplanması sonrasında artış gösterdiği belirtilmiştir (Aulin vd. 2010). Kağıt lifleri arasındaki boşluklar selülozik nano-partiküller ile doldurularak, kağıdın yağ geçirgenlik kapasitesi azaltılmaktadır (Brodin vd. 2014).



Şekil 6. Nanoselüloz esaslı kaplamalar için uygulanan farklı kaplama yöntemleri (Cherian vd. (2022)’den alınarak yeniden üretilmiştir)

SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Artan dünya nüfusu ve buna bağlı olarak yükselen tüketim ihtiyaçları, uzun yıllardır endüstriyel üretimde yaygın olarak kullanılan petrol esaslı malzemelere olan talebi önemli ölçüde artırmıştır. Bununla birlikte, fosil kaynakların sınırlı olması, ekonomik açıdan dalgalı bir piyasa yapısına sahip olmaları ve çevresel açıdan çeşitli olumsuz etkiler ortaya çıkarmaları, bu malzemelerin kullanımına yönelik sürdürülebilir alternatiflerin geliştirilmesini zorunlu hale getirmiştir. Bu doğrultuda, yenilenebilir kaynaklara dayalı biyo-esaslı malzemelerin geliştirilmesi ve kullanımının yaygınlaştırılması, günümüz bilimsel araştırmalarının ve endüstriyel uygulamalarının önemli odak noktalarından biri haline gelmiştir.

Doğal kaynakların hızla tükenmesi ve buna bağlı olarak ortaya çıkan çevresel sorunların küresel boyutlara ulaşması, çevre dostu ve sürdürülebilir üretim yaklaşımlarının önemini daha da artırmıştır. Günümüzde teknoloji, biyokimya ve mühendislik alanlarında yaşanan gelişmeler sayesinde tarımsal atıklar, biyolojik atıklar ve geri dönüştürülebilir materyaller gibi yenilenebilir kaynaklardan çevreye duyarlı yeni malzemelerin geliştirilmesi

mümkün hale gelmiştir. Bu kapsamda, biyolojik kökenli atıkların değerlendirilmesi hem atık yönetimi açısından hem de yüksek katma değerli yeni malzemelerin üretimi bakımından önemli fırsatlar sunmaktadır.

Farklı biyolojik atıklardan elde edilen yeni nesil biyo-esaslı nanomalzemeler, bu atıkların teknolojik açıdan değerlendirilmesine olanak sağlamalarının yanı sıra çevresel etkileri bilinen geleneksel petrol esaslı malzemelere alternatif oluşturmaları bakımından büyük bir potansiyele sahiptir. Bu nedenle yıllık bitkiler, tarımsal ve hayvansal atıklar ile evsel biyolojik atıklar gibi doğal kaynakların farklı polimerik sistemlerle birlikte değerlendirilerek; çevre dostu, ekonomik ve üstün mekanik, fiziksel ve termal özelliklere sahip biyo-esaslı nanomalzemelerin geliştirilmesi ve kullanımının teşvik edilmesi büyük önem taşımaktadır. Bu yaklaşım, sürdürülebilir malzeme teknolojilerinin geliştirilmesine katkı sağlayarak hem çevresel etkilerin azaltılmasına hem de doğal kaynakların daha verimli bir şekilde değerlendirilmesine olanak sağlayacaktır.

Nanoselüloz, yüksek yüzey alanı, üstün mekanik dayanımı, biyobozunur yapısı ve yenilenebilir kaynaklardan elde edilebilmesi gibi özellikleri sayesinde kağıt kaplama uygulamalarında önemli bir potansiyele sahiptir. Özellikle selüloz nanofibrilleri (CNF) ve selüloz nanokristalleri (CNC), kağıt yüzeyinin fiziksel ve mekanik özelliklerini iyileştirmede etkili kaplama materyalleri olarak öne çıkmaktadır. Nanoselüloz esaslı kaplamalar, kağıdın yüzey pürüzlülüğünü azaltarak daha düzgün bir yapı oluşturmakta ve baskı kalitesini artırmaktadır. Ayrıca bu kaplamalar, gaz ve yağ bariyer özelliklerini geliştirerek gıda ambalajı gibi uygulamalar için önemli avantajlar sağlamaktadır.

Nanoselüloz kaplamalarının bir diğer önemli avantajı ise çevre dostu olmalarıdır. Geleneksel petrol esaslı kaplama malzemelerine alternatif olarak kullanılabilmeleri, sürdürülebilir üretim süreçlerinin geliştirilmesine katkı sağlamaktadır. Bununla birlikte, nanoselülozların yüksek su tutma kapasitesi ve kurutma sürecinde karşılaşılan enerji gereksinimleri gibi bazı teknik ve ekonomik zorluklar da bulunmaktadır. Bu nedenle endüstriyel ölçekte uygulamalarda proses optimizasyonu ve maliyet etkin üretim yöntemlerinin geliştirilmesi büyük önem taşımaktadır.

Sonuç olarak, nanoselülozların kağıt kaplama uygulamalarında kullanımı, hem performans iyileştirmeleri hem de sürdürülebilirlik açısından umut verici bir yaklaşım sunmaktadır. Gelecekte yapılacak çalışmaların, nanoselüloz kaplamaların formülasyonu, kaplama teknikleri ve endüstriyel ölçekli üretim süreçlerinin geliştirilmesine odaklanması beklenmektedir. Ayrıca nanoselülozun diğer biyopolimerler veya fonksiyonel katkı maddeleri ile kombinasyonu, çok fonksiyonlu ve yüksek performanslı kaplama sistemlerinin

geliştirilmesine olanak sağlayacaktır. Bu doğrultuda nanoselüloz esaslı kaplama teknolojilerinin, kağıt ve ambalaj endüstrisinde giderek daha geniş uygulama alanı bulacağı öngörülmektedir.

KAYNAKÇA

- Abol-Fotouh, D., Hassan, M. A., Shokry, H., Roig, A., Azab, M. S., Kashyout A. E. H. B. (2020). Bacterial nanocellulose from agro-industrial wastes: Low-cost and enhanced production by *Komagataeibacter saccharivorans* MD1. *Scientific Reports*, 10, 1-14.
- Abraham, E., Deepa, B., Pothen, L. A., Cintil, J., Thomas, S., John, M. J., Anandjiwala, R., Narine, S. S. (2013). Environmental friendly method for the extraction of coir fibre and isolation of nanofiber. *Carbohydrate Polymers*, 92, 1477-1483.
- Aulin, C., Gällstedt, M., Lindström T. (2010). Oxygen and oil barrier properties of microfibrillated cellulose films and coatings. *Cellulose*, 17, 559-574.
- Aulin, C., Ström G. (2013). Multilayered alkyd resin/nanocellulose coatings for use in renewable packaging solutions with a high level of moisture resistance. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 52(7), 2582-2589.
- Baati, R., Magnin, A., Boufi, S. (2017). High solid content production of nanofibrillar cellulose via continuous extrusion. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 5, 2350-2359.
- Boufi, S., González, I., Delgado-Aguilar, M., Tarrès, Q., Pèlach, M. À., Mutjé P. (2016). Nanofibrillated cellulose as an additive in papermaking process: a review. *Carbohydrate Polymers*, 154, 151-166.
- Brodin, F. W., Gregersen, Ø. W., Syverud K. (2014). Cellulose nanofibrils: challenges and possibilities as a paper additive or coating material — a review. *Nordic Pulp & Paper Research Journal*, 29, 156-166.
- Brodin, F. W., Eriksen Ø. (2015). Preparation of individualised lignocellulose microfibrils based on thermomechanical pulp and their effect on paper properties. *Nordic Pulp & Paper Research Journal*, 30, 443-451.
- Cherian, R. M., Tharayil, A., Varghese, R. T., Antony, T., Kargarzadeh, H., Chirayil, C. J., Thomas S. (2022). A review on the emerging applications of nano-cellulose as advanced coatings. *Carbohydrate Polymers*, 282, 1-19.
- Dhali, K., Ghasemlou, M., Daver, F., Cass, P., Adhikari, B. (2021). A review of nanocellulose as a new material towards environmental sustainability. *Science of The Total Environment*, 775, 1-24.
- Du, H., Liu, W., Zhang, M., Si, C., Zhang, X., Li, B. (2019). Cellulose nanocrystals and cellulose nanofibrils based hydrogels for biomedical applications. *Carbohydrate Polymers*, 209, 130-144.

- Durmaz, E. (2021). Ayçiçeği Saplarından Bazı Nanoselüloz Türevlerinin Üretimi, Karakterizasyonu ve Farklı Uygulama Alanlarında Değerlendirilmesi. Doktora Tezi, Kastamonu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kastamonu, Türkiye.
- Fekry, A. M., Azab S. M. (2020). The development of an innovative nano-coating on the surgical 316 L SS implant and studying the enhancement of corrosion resistance by electrochemical methods using Ibandronate drug. *Nano-Structures & Nano-Objects*, 21, 1-8.
- Fengel, D., Wegener, G. (1989). Walter de Gruyter. *Cellulose*, 4, 66-69, Berlin, New York.
- Tayeb, A. H., Amini, E., Ghasemi, S., Tajvidi, M. (2018). Cellulose Nanomaterials—Binding Properties and Applications: A Review. *Molecules*, 23, 2684.
- Fukuzumi, H., Saito, T., Iwata, T., Kumamoto, Y., Isogai A. (2009). Transparent and high gas barrier films of cellulose nanofibers prepared by TEMPO-mediated oxidation. *Biomacromolecules*, 10(1), 162-165.
- García, A., Gandini, A., Labidi, J., Belgacem, N., Bras J. (2016). Industrial and crop wastes: A new source for nanocellulose biorefinery. *Industrial Crops and Products*, 93, 26-38.
- Granström, M. (2009). *Cellulose Derivatives: Synthesis, Properties and Applications*. Master Thesis, University Of Helsinki, Finland.
- Han, S. (2019). *Materials*, eds. Thermoelectric polymer-cellulose composite aerogels. Department of Science and Technology Linköping University, Sweden, Norrköping.
- Hernandez, C. C., dos Santos Rosa D. (2016). Extraction of cellulose nanowhiskers: natural fibers source, methodology and application. *Polymer science: research advances, practical applications and educational aspects*, 232-242.
- Herrera, M. A., Sirviö, J. A., Mathew, A. P., Oksman K. (2016). Environmental friendly and sustainable gas barrier on porous materials: Nanocellulose coatings prepared using spin- and dip-coating. *Materials and Design*, 93, 19-25.
- Herrera, M. A., Mathew, A. P., Oksman K. (2017). Barrier and mechanical properties of plasticized and cross-linked nanocellulose coatings for paper packaging applications. *Cellulose*, 24(9), 3969-3980.
- Huang, J., Ma, X., Yang, G., Dufresne A. (2019). *Introduction to Nanocellulose*, Nanocellulose: From Fundamentals to Advanced Materials. Huang, J., Dufresne, A., Lin, N. Wiley-WCH, Weinheim, Germany, 1-15.
- Ilyas, R. A., Sapuan, S. M., Ishak, M. R. (2018). Isolation and characterization of nanocrystalline cellulose from sugar palm fibres (*Arenga pinnata*). *Carbohydrate Polymers*, 181, 1038-1051.

- Ilyas, R. A., Sapuan, S. M., Ishak, M. R., & Zainudin, E. S. (2019). Sugar palm nanofibrillated cellulose (*Arenga pinnata* (Wurmb.) Merr): Effect of cycles on their yield, physico-chemical, morphological and thermal behavior. *International Journal of Biological Macromolecules*, 123, 379-388.
- Islam, M. T., Alam, M. M., Patrucco, A., Montarsolo, A., Zoccola, M. (2014). Preparation of nanocellulose: a review. *AATCC Journal of Research*, 1, 17-23.
- Jonoobi, M., Oladi, R., Davoudpour, Y., Oksman, K., Dufresne, A., Hamzeh, Y., Davoodi, R. (2015). Different preparation methods and properties of nanostructured cellulose from various natural resources and residues: A review. *Cellulose*, 22, 935-969.
- Jozala, A. F., de Lencastre-Novaes, L. C., Lopes, A. M., de Carvalho Santos-Ebinuma, V., Mazzola, P. G., Pessoa, A. Jr., Chaud, M. V. (2016). Bacterial nanocellulose production and application: a 10-year overview. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 100, 2063-2072.
- Kallel, F., Bettaieb, F., Khiari, R., García, A., Bras, J., Chaabouni, S. E. (2016). Isolation and structural characterization of cellulose nanocrystals extracted from garlic straw residues. *Industrial Crops and Products*, 87, 287-296.
- Kargarzadeh, H., Ioelovich, M., Ahmad, I., Thomas, S., Dufresne, A. (2017). *Methods for extraction of nanocellulose from various sources*. Handbook of Nanocellulose and Cellulose Nanocomposites. Kargarzadeh, H., Ahmad, I., Thomas, S., Dufresne, A. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- Kargarzadeh, H., Mariano, M., Gopakumar, D., Ahmad, I., Thomas, S., Dufresne, A., Huang, J., Lin, N. (2018). Advances in cellulose nanomaterials. *Cellulose*, 25, 2151-2189.
- Khelifa, F., Habibi, Y., Dubois P. (2016). *Nanocellulose-based polymeric blends for coating applications*. Multifunctional polymeric nanocomposites based on cellulosic reinforcements. Puglia, D., Fortunati, E., Kenny, J. M. Elsevier Inc.
- Khiari, R., Mauret, E., Belgacem, M. N., Mhemmi, F. (2011). Tunisian date palm rachis used as an alternative source of fibres for papermaking applications Palmrachis fibers for paper. *BioResources*, 6, 265-281.
- Kinnunen-Raudaskosko, K., Hjelt, T., Kenttä, E., Forsström U. (2014). Thin coatings for paper by foam coating. *Tappi Journal*, 13(7), 9-19.
- Koshani, R., Zhang, J., Van De Ven, T. G. M., Lu, X., Wang, Y. (2021). Modified hairy nanocrystalline cellulose as photobactericidal nanofillers for food packaging application. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 9, 10513-10523.

- Kumar, V., Elfving, A., Koivula, H., Bousfield, D., Toivakka M. (2016). Roll-to-roll processed cellulose nanofiber coatings. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 55(12), 3603-3613.
- Kumar, V., Koppolu, V. R., Bousfield, D., Toivakka M. (2017). Substrate role in coating of microfibrillated cellulose suspensions. *Cellulose*, 24(3), 1247-1260.
- Lenfant, G., Heuzey, M., van de Ven, T. G. M., Carreau, P. J. (2017). Gelation of crystalline nanocellulose in the presence of hydroxyethyl cellulose. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 95, 1891-1900.
- Lengowski, E. C., Júnior, E. A. B., Kumode, M. M. N., Carneiro, M. E., Satyanarayana K. G. (2019). *Nanocellulose in the paper making*. Sustainable polymer composites and nanocomposites. Inamuddin, K., Thomas, S., Mishra, R. K., Asiri, A. M., Springer Nature, Switzerland.
- Mansouri, S., Khiari, R., Bettaieb, F., El-Gendy, A. A., Mhenni, F. (2015). Synthesis and characterization of carboxymethyl cellulose from Tunisian vine stem Study of water absorption and retention capacities. *Journal of Polymers and the Environment*, 23, 190-198.
- Menon, M. P., Selvakumar, R., Kumar, P. S., Ramakrishna, S. (2017). Extraction and modification of cellulose nanofibers derived from biomass for environmental application. *RSC Advances*, 7, 42750-42773.
- Motta Neves, R., Silveira Lopes, K., Zimmermann, M. G. V., Poletto, M., Zattera, A. J. (2020). Cellulose nanowhiskers extracted from TEMPO-oxidized curaua fibers. *Journal of Natural Fibers*, 17, 1355-1365.
- Nechporchuk, O., Belgacem, M. N., Bras, J. (2016). Production of cellulose nanofibrils: A review of recent advances. *Industrial Crops and Products*, 93, 2-25.
- Negro, C., Balea, A., Sanchez-Salvador, J. L., Campano, C., Fuente, E., Monte, M. C., Blanco, A. (2020). Nanocellulose and Its Potential Use For Sustainable Industrial Applications. *Latin American Applied Research*, 50, 59-64.
- Norfarhana, A. S., Ilyas, R. A., Ngadi N. (2022). A review of nanocellulose adsorptive membrane as multifunctional wastewater treatment. *Carbohydrate Polymers*, 291, 1-19.
- Olaru, N., Olaru, L., Stoleriu, A., Timpu, D. (1998). Carboxymethylcellulose synthesis in organic media containing ethanol and/or acetone. *Journal of Applied Polymer Science*, 67, 481-486.

- Patil, T. V., Patel, D. K., Dutta, S. D., Ganguly, K., Santra, T. S., Lim, K. T. (2022). Nanocellulose, a versatile platform: From the delivery of active molecules to tissue engineering applications. *Bioactive Materials*, 9, 566-589.
- Paul, R. (2017). Uniformly dispersed nanocrystalline silver reduces the residual stress within diamond-like carbon hard coatings. *Nano-Structures & Nano-Objects*, 10, 69-79.
- Perumal, A. B., Nambiar, R. B., Moses, J. A., Anandharamakrishnan, C. (2022). Nanocellulose: Recent trends and applications in the food industry. *Food Hydrocolloids*, 127, 1-23.
- Phanthong, P., Reubroycharoen, P., Hao, X., Xu, G., Abudula, A., Guan, G. (2018). Nanocellulose: Extraction and application. *Carbon Resources Conversion*, 1, 32-43.
- Prevo, B. G., Velev O. D. (2004). Controlled, rapid deposition of structured coatings from micro- and nanoparticle suspensions. *Langmuir*, 20(6), 2099-2107.
- Pulikkalparambil, H., Siengchin, S., Parameswaranpillai J. (2018). Corrosion protective self-healing epoxy resin coatings based on inhibitor and polymeric healing agents encapsulated in organic and inorganic micro and nanocontainers. *Nano-Structures & Nano-Objects*, 16, 381-395.
- Rawat, A., Soni, U., Malik, R. S., Pandey S. C. (2018.) Facile synthesis of UV blocking nano-sized zinc oxide and polymethyl-methacrylate polymer nanocomposite coating material. *Nano-Structures & Nano-Objects*, 16, 371-380.
- Ridgway, C., Gane P. (2012). Constructing NFC-pigment composite surface treatment for enhanced paper stiffness and surface properties. *Cellulose*, 19, 547-560.
- Rovera, C., Ghaani, M., Farris S. (2020). Nano-inspired oxygen barrier coatings for food packaging applications: An overview. *Trends in Food Science and Technology*, 97, 210-220.
- Shanmugam, K., Varanasi, S., Garnier, G., Batchelor W. (2017). Rapid preparation of smooth nanocellulose films using spray coating. *Cellulose*, 24(7), 2669-2676.
- Sharma, M., Aguado, R., Murtinho, D., Valente, A. J. M., Mendes De Sousa, A. P., Ferreira P. J. T. (2020). A review on cationic starch and nanocellulose as paper coating components. *International Journal of Biological Macromolecules*, 162, 578-598.
- TAPPI (2022). Cellulose Nanomaterials Production Update.
- Tavakolian, M., Wiebe, H., Sadeghi, M. A., Van De Ven, T. G. M. (2020). Dye removal using hairy nanocellulose: Experimental and theoretical investigations. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 12, 5040-5049.

- Tharayil, A., Rajakumari, R., Chirayil, C. J., Thomas, S., Kalarikkal N. (2021). A short review on nanotechnology interventions against COVID-19. *Emergent Materials*, 4(1), 131-141.
- Thomas, P., Duolikun, T., Rumjit, N. P., Moosavi, S., Lai, C. W., Bin Johan, M. R., Fen, L. B. (2020). Comprehensive review on nanocellulose: Recent developments, challenges and future prospects. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 110, 103884.
- Trache, D., Tarchoun, A. F., Derradji, M., Hamidon, T. S., Masruchin, N., Brosse, N., Hussin, M. H. (2020). Nanocellulose: From fundamentals to advanced applications. *Frontiers in Chemistry*, 8, 1-33.
- Tyagi, P., Salem, K. S., Hubbe, M. A., Pal L. (2021). Advances in barrier coatings and film technologies for achieving sustainable packaging of food products — A review. *Trends in Food Science and Technology*, 115, 461-485.
- Van De Ven, T. G. M., Sheikhi, A. (2016). Hairy cellulose nanocrystalloids: A novel class of nanocellulose. *Nanoscale*, 8, 15101-15114.
- Vanderfleet, O. M., Cranston E. D. (2021). Production routes to tailor the performance of cellulose nanocrystals. *Nature Reviews Materials*, 6, 124-144.
- Wei, H., Rodriguez, K., Renneckar, S., Vikesland P. J. (2014). Environmental science and engineering applications of nanocellulose-based nanocomposites. *Environmental Science: Nano*, 1(4), 302-316.
- Xie, H., Du, H., Yang, X., Si, C. (2018). Recent strategies in preparation of cellulose nanocrystals and cellulose nanofibrils derived from raw cellulose materials. *International Journal of Polymer Science*, 2018, 1-25.
- Zhu, G., Lin, N. (2019). *Surface Chemistry of Nanocellulose*. In *Nanocellulose: From Fundamentals to Advanced Materials*, 115-153.