



Karşılaştırmalı Bir Çalışma: Sudaki Nitratın Farklı Nanomalzemelerle Adsorpsiyonu

Hamdi Ekizoğlu¹ Erdal Yılmaz² İsmail Öçsoy³

¹ Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Zootehni ABD, Kayseri/Türkiye

² Erciyes Üniversitesi, Veteriner Fakültesi, Su Ürünleri ve Hayvanları Hastalıkları Bölümü, Kayseri/Türkiye

³ Erciyes Üniversitesi, Analitik Kimya Bölümü, Kayseri/Türkiye

◆ **Geliş Tarihi/Received:** 21.06.2026

◆ **Kabul Tarihi/Accepted:** 17.09.2026

◆ **Yayın Tarihi/Published:** 28.10.2026

Bu makaleye atıfta bulunmak için/To cite this article:

Ekizoğlu H., Yılmaz E., Öçsoy İ. Karşılaştırmalı Bir Çalışma: Sudaki Nitratın Farklı Nanomalzemelerle Adsorpsiyonu. Bozok Vet Sci (2026) 7, (2) :60-68.

Özet: Bu çalışmada, demir oksit nanopartiküllerin ($\text{Fe}_3\text{O}_4\text{NPs}$), demir oksit grafen oksit nanokompozitlerin ($\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-GONCs}$), etilen diammin tetraklorür içeren demir oksit grafen oksit nanokompozitlerin ($\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-GO EDTANCs}$) ve glutatyon içeren demir oksit grafen oksit nanokompozitlerin ($\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-GO GluNCs}$) nitrat adsorpsiyon kapasiteleri araştırılmıştır. Adsorpsiyon deneyleri 25 ppm standart nitrat solüsyonu içeren musluk suyuna $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{ NPs}$, $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-GO}$, $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-GOEDTA}$ ve $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-GOG}$ 'lu nanokompozitler ilave edilerek gerçekleştirilmiştir. En iyi nitrat adsorpsiyon kapasitesi (%86.12) sadece $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{ NP}$ kullanılan deney grubundan elde edildi. Çalışmanın ikinci aşamasında, $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{ NP}$ 'lerin deney hayvanı olarak seçilen tıbbi sülükler (*Hirudo verbana*) üzerindeki etkileri değerlendirildi. Bu aşamada, $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{ NP}$ 'lerin farklı konsantrasyonlarının (0, 0.25, 0.75 ve 1.00 mg/L) *H. verbana* türü sülüklerinin yaşama oranları üzerindeki etkileri 96 saat sonunda belirlendi. Araştırmada musluk suyundaki nitratın adsorpsiyonunda en iyi performansın $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{ NP}$ 'lere ait olduğu sonucuna varıldı. Ayrıca; $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{ NP}$ 'lerin farklı dozlarının tıbbi sülüklerin yaşamları üzerine olumsuz bir etki göstermediği belirlendi.

Anahtar Kelimeler: demir oksit nanopartiküller, grafen oksit, nitrat, *Hirudo verbana*, adsorpsiyon

Aqueous Adsorption of Nitrate by Different Nanomaterials: A Comparative Study

Abstract: In this research, the nitrate adsorptive capacities of iron oxide nanoparticles ($\text{Fe}_3\text{O}_4\text{NPs}$), iron oxide graphene oxide nanocomposites ($\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-GONCs}$), iron oxide graphene oxide nanocomposites with ethylene diamine tetrachloride ($\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-GO EDTANCs}$) and iron oxide graphene oxide nanocomposites with glutathione nanocomposites ($\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-GO GluNCs}$) were investigated. Batch experiments were performed by adding $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{ NPs}$, and $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-GO}$, $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-GO EDTA}$ and $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-GO Glu NCs}$ to the tap water containing 25 ppm standard nitrate solution. The best nitrate adsorption capacity (86.12 %) was obtained from the bare $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{ NP}$'s group. In the second stage, the effects of $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{ NPs}$ on medicinal leeches (*Hirudo verbana*) as experimental animal were evaluated. In this stage, the effect of the different concentrations (0, 0.25, 0.75 and 1.00 mg/L) of $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{ NPs}$ on the survival rate of leeches *H. verbana* were determined at the end of 96 hours. It was concluded that $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{ NPs}$ showed the best performance with respect to nitrate removal from tap water and also, different doses of $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{ NPs}$ had no adverse effects on survival of the medicinal leeches.

Keywords: iron oxide nanoparticles, graphene oxide, nitrate, *Hirudo verbana*, adsorption

1. Giriş

Dünyanın bazı bölgelerindeki en önemli çevresel sorunlardan biri, suların nitratla kirlenmesidir. Nitratın jeolojik kaynaklarının yanı sıra, tarımsal, endüstriyel ve kentsel deşarjlar, pestisit kullanımı, organik ve inorganik bileşikler, gübre havuzları, kanalizasyon atıkları, tarımsal gübreler ve savaş bölgeleri sulardaki nitrat konsantrasyonlarının artmasına yol açmıştır (Lazaratou ve ark., 2020; Su ve ark., 2014; Gaur ve ark., 2024). Amerika Birleşik Devletleri, Avrupa, Afrika, Hindistan, Çin, Meksika Körfezi ve Japonya dahil olmak üzere birçok ülke nitratı ciddi şekilde etkilenirken, Hindistan'da Haryana, Pencap, Uttar Pradesh, Maharashtra ve Rajasthan özellikle ağır etkilenen bölgeler arasında yer almaktadır (Singh ve ark., 2022; Nodeh ve ark., 2017). Daha önceki raporlara

göre, yeraltı sularındaki nitrat kirliliği 26 ülkede 80 milyondan fazla insanı etkilemektedir (Tyagi ve ark., 2023). ABD Çevre Koruma Ajansı (EPA) ve Dünya Sağlık Örgütü (WHO) yönergelerine göre, içme suyundaki nitratın izin verilen maksimum konsantrasyonu azot olarak 10 mgL⁻¹ ve yer altı suyundaki nitrat konsantrasyonu ise belediye su temin sistemleri için nitrat olarak 50 mgL⁻¹'dir (WHO/UNICEF, 2015).

İçme suyundaki aşırı nitrat konsantrasyonları, çocuklarda dokulara oksijen taşınmaması sonucu kanın mavi rengine neden olan methemoglobin (Lorna, 2014; Chatterjee ve ark., 2009), mide kanseri, hipertansiyon, tiroid bozuklukları, diyabet, bulaşıcı hastalık salgınları, fiziksel ağrı, diyabet, kendiliğinden düşüklükler, solunum yolu enfeksiyonları, immunsupresyon gibi problemlere yol

açabilmektedir (Ward ve ark., 2005; Fan & Steinberg, 1996; Majumdar & Gupta, 2000; Burgin & Hamilton, 2007; Xiong ve ark., 2009; Islam & Patel, 2010; Demiral & Gündüzoğlu, 2010; Xu ve ark., 2013). Ayrıca, nitratın aşırı artması yüzey ve yeraltı sularını kirletebilir; bu da ötrofikasyon artışı, su bulanıklığının ve fitoplankton yoğunluğunun artması, çözünmüş oksijenin azalması, biyoçeşitliliğin azalması ve sonuç olarak ekosistem sağlığının bozulmasının bir sonucudur (Hwang ve ark., 2010; Mahmud ve ark., 2020). Bu bakımlardan; nitrat, sucul toksisitenin ana unsurlarından biri olması nedeniyle sıklıkla önemli bir su kalitesi parametresi olarak kullanılır (Banerjee ve ark., 2023).

Yeraltı suyu, atık su ve yüzey sularındaki nitrat kirliliğini azaltmak için adsorpsiyon, iyon değişimi, ters ozmoz, elektrokoagülasyon, membran bazlı yöntemler (Lakshmi ve ark., 2012; Sharma & Bhattacharya, 2016; Gan ve ark., 2019; Epsztein ve ark., 2015; Talalaj, 2015; Goncharuk ve ark., 2013), biyolojik yöntemler (Costa ve ark., 2018; Koder ve ark., 2017; Rossi ve ark., 2015), nanoteknoloji bazlı malzemeler (Tyagi ve ark., 2023), kimyasal ve elektrokimyasal yöntemler (Zhang ve ark., 2016; Midaoui ve ark., 2002) ve indirgeme teknikleri (Huno ve ark., 2018) gibi farklı teknikler denenmiştir. Bu teknikler arasında, daha hızlı uzaklaştırma oranı, maliyet etkinliği ve yüksek verimliliği nedeniyle adsorpsiyon bazlı teknikler daha fazla ilgi görmüştür. Şimdiye kadar, NO_3^- 'ü adsorbe etmek için çok farklı malzemeler ve bileşikler kullanılmıştır. Bu malzemeler arasında, aktif sentetik adsorbanlar ve aktif alümina ve karbon, talaş, şeker kamışı posası, kitosan, aktif biyokömür, karbon nanotüpler, demir oksit kaplı nanopartiküller, bakır oksit nanopartiküller, aktif kömür, sentetik reçine ve zeolit sayılabilir (Herath ve ark., 2021; Li ve ark., 2021; Hyun ve ark., 2021; Rahdar ve ark., 2020; Srivastav ve ark., 2021; Adeleye ve ark., 2016; Loganathan ve ark., 2013; Bhatnagar & Sillanpaa, 2011).

Demir oksit (hidroksit) nanopartikülleri, kirleticileri gidermedeki yüksek verimlilikleri ve diğer metal nanomalzemelere kıyasla çevre dostu olmaları nedeniyle çevresel uygulamalar için tercih edilmektedir (Litter, 2022; Mondal ve ark., 2020). Demir oksit nanopartiküllerinin kullanımı, diğer alternatif yöntemlere kıyasla yüksek arıtım verimliliği, düşük maliyet, süperparamanyetik yapı, geniş yüzey alanı, biyolojik olarak parçalanabilirlik, düşük toksisite gibi özellikler sergilemiştir (Maksoud ve ark., 2020; Gautam ve ark., 2015). Su kaynaklarından nitratı uzaklaştırmak için NP kullanımı etkili bir teknik olsa da (Bishayee ve ark., 2022), bu NP uygulamalarından sonra su ortamlarında birikebilir ve yaşayan organizmaları olumsuz etkileyebilir. Bu nedenle, NP'lerin canlı organizmalar üzerindeki potansiyel tehlikeli etkilerinin de değerlendirilmesi kritik önem taşımaktadır.

Bu araştırmada, musluk suyundan nitrat adsorpsiyonunu test etmek amacıyla farklı boyutlarda demir oksit nanomalzemelerin sentezlenmesi amaçlanmıştır. Bu bağlamda, Fe_3O_4 NPs, Fe_3O_4 -GO NCs, Fe_3O_4 -GO-EDTA NCs ve Fe_3O_4 -GO-GLU NCs'nin nitrat adsorpsiyon kapasiteleri belirlenmiştir. Ayrıca, en yüksek nitrat adsorpsiyon kapasitesine sahip demir nanopartiküllerin, sucul bir canlı olan tıbbi sülüklerin (*Hirudo verbana*) yaşama oranları üzerindeki etkileri araştırılmıştır.

2. Gereç ve Yöntemler

2.1. Manyetit Fe_3O_4 Nanoparçacıklarının Sentezi

Nano boyutlu Fe_3O_4 parçacıkları, mikrodalga ışıını yardımcıyla etilen, dietilen veya tetraetilen glikol çözeltilerinde basit bir solvotermal yöntemle hazırlandı. 50 mg $\text{Fe}(\text{acac})_3$ 10 mL etilen glikol, dietilen veya tetraetilen glikol içinde homojen hale gelene kadar ultrasonik işlemle geçirildi, ardından 200 mg sodyum asetat ve 1 g 1,6-hexadamine hamedan eklendi. Bu karışımlar ayrı bir 100 mL Teflon reaksiyon kabına (XP-1500 Plus) konuldu, CEM Mars 5 mikrodalga fırında gerekli sıcaklığa (etilen, dietilen ve tetraetilen yöntemleri için sırasıyla 200 ve 240 °C) ısıtıldı ve bu sıcaklıkta 6 saat bekletilmiş olup, basınç kullanılmamıştır. Reaksiyonun ardından kap oda sıcaklığına soğutuldu ve bir miknatıs yardımıyla siyah bir çökelti toplandı. Daha sonra, elde edilen nanopartiküller birkaç kez saf su ve etanol ile yıkandı, son olarak 70 °C'de fırında kurutuldu.

2.2. EDTA ve Glutasyon Ortamında Manyetit Fe_3O_4 -GO NC'lerinin Sentezi

EDTA ve/veya glutasyon kullanılarak fonksiyonel manyetit nanokompozit hazırlamak için PBS çözeltisine (10 mM pH 7.4) 50 mikrolitre 0.1 M 1-ethyl-3-[3-dimethylaminopropyl] carbodiimide hydrochloride (EDC) eklendi. Bu karışım, karboksil gruplarını yavaşça aktive etmek için 30 dakika boyunca çalkalandı. Daha sonra, sırasıyla 20 mikrolitre *N*-hydroxysuccinimide (NHS) ve önceden hazırlanmış nanopartiküller eklendi. Son karışımı oluşturmak için çalkalama 4 saat boyunca devam ettirildi. Siyah çökelti bir miknatıs yardımıyla toplandı ve üstteki sıvı uzaklaştırıldı.

2.3. Nanomalzemelerin Karakterizasyonu

Sentezlenen manyetit nanopartiküller (NP) ve nanokompozitler (NC), boyut/boyut dağılımları, yüzey yükü ve zeta potansiyellerinin belirlenmesi için sırasıyla taramalı elektron mikroskobu/enerji dağılımlı spektroskopi (SEM/EDS) ve lazer doppler anemometresi (Zetasizer Nano-ZS, Malvern Instruments) ve dinamik ışık saçılımı (DLS) teknikleri kullanılarak karakterize edildi.

2.4. Adsorpsiyon Deneyleri

Üretilen nanopartiküllerin ve nanokompozitlerin nitrat adsorpsiyon kapasitelerini belirlemek için adsorpsiyon deneyleri yapılmıştır. Bu deneyler oda sıcaklığında (20±2°C) ve pH 7'de gerçekleştirildi. Tüm reaktifler Merck KGaA 64271 Darmstadt Almanya'dan satın alındı. 1 mg

Fe_3O_4 NP, Fe_3O_4 GO NC'ler ve Fe_3O_4 GO-EDTA NC'ler ve Fe_3O_4 GO-GLU NC'ler içeren Manyetit NP'ler ve/veya NC'ler, 25 ppm standart nitrat çözeltisi (1000 mg/L NO_3) içeren 1 L musluk suyuna eklendi. Tüm nanopartikül/kompozit-nitrat süspansiyonları, bir prob sonikatör ile 15 dakika boyunca sonikasyona tabi tutuldu. 24 saat sonra, nitrat ve nanopartikül ve/veya nanokompozit karışımları, Kayseri Su ve Kanalizasyon İdaresi Laboratuvarı ICF-1100 Dyonex cihazı kullanılarak artık nitrat açısından analiz edildi. Nitratın adsorpsiyon yüzdesi aşağıdaki formülle hesaplanmıştır:

$$\% \text{giderme} = \frac{C_i - C_f}{C_i} \times 100$$

C_i : nitratın başlangıç konsantrasyonu,

C_f : nitratın final konsantrasyonu

2.5. Biyouyumluluk Testleri

Hayatta kalma testleri için ortalama 2-4 g ağırlığında 120 adet tıbbi sülük (*Hirudo verbana*) kullanılmıştır. Tıbbi sülükler (*H. verbana*), yerel bir sülük çiftliğinden (Cansuyu Tıbbi Sülük, Kayseri, Türkiye) temin edilmiş ve laboratuvar koşullarına adapte edilmiştir. Hayatta kalma testleri, her biri 1 litre hacimli sekiz plastik kapta, dört muamele grubu ve iki tekrar ile 15 sülük yerleştirilerek gerçekleştirilmiştir. 96 saat sonunda tıbbi sülükler üzerindeki etkilerini belirlemek için plastik kaplara farklı miktarlarda nanopartikül (0.25, 0.75 ve 1 mg) eklenmiştir.

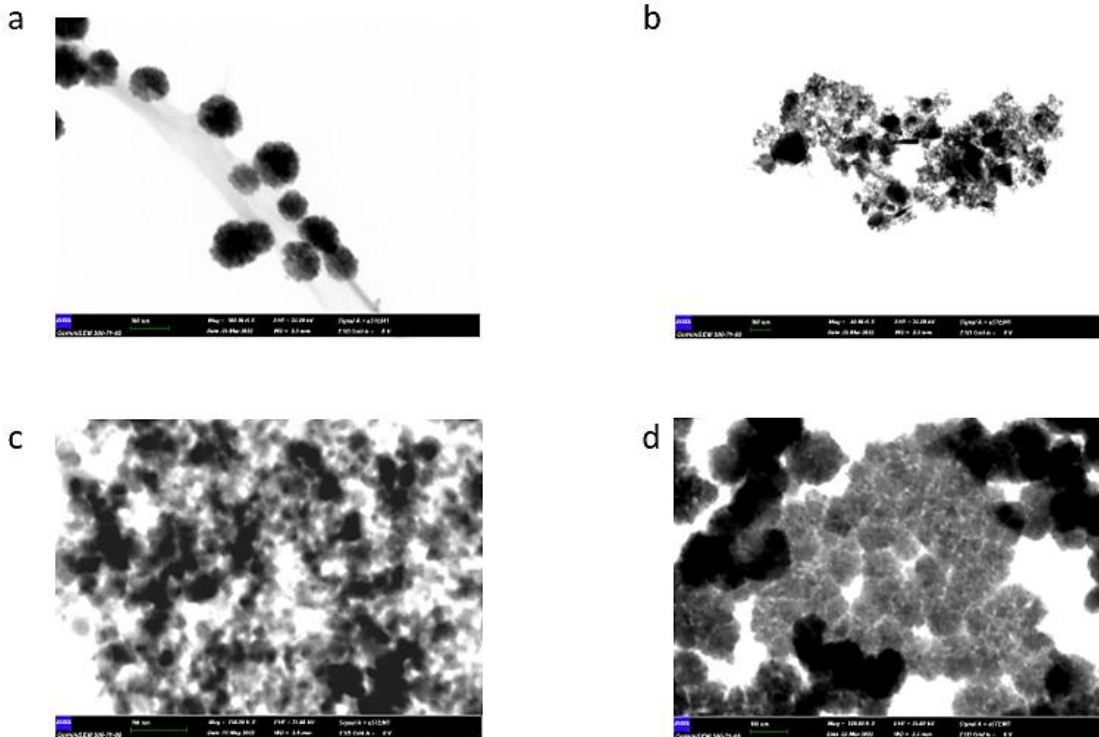
2.6. İstatistiksel Analizler

İstatistiksel analizler için IBM-SPSS for Windows Release 25.0 programı (SPSS Inc, Chicago, IL, ABD) kullanıldı. Verilerin normal dağılıma uygunluğu histogram, q-q grafikleri ve Shapiro-Wilk testi ile değerlendirildi. Muamele grupları arasındaki farklılıkları tespit etmek için Tek Yönlü ANOVA (alternatif olarak; Kruskal Wallis Testi) de kullanıldı. Post-hoc test olarak Tukey ve Bonferroni testleri kullanıldı. P değeri 0.05 olarak kabul edilmiş olup, gruplar arasındaki farklılıklar bu değere göre belirlenmiştir.

3. Sonuçlar

3.1. Nanomalzemelerin Karakterizasyonu ve Adsorpsiyon Performansı

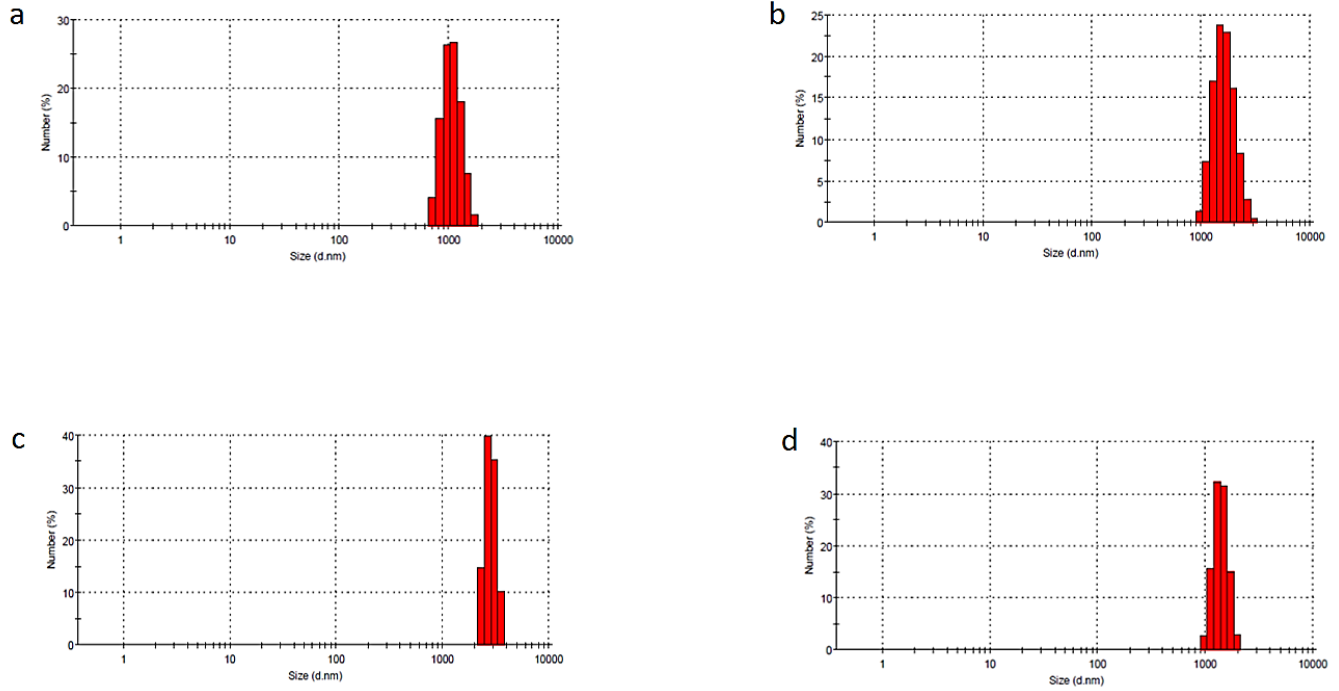
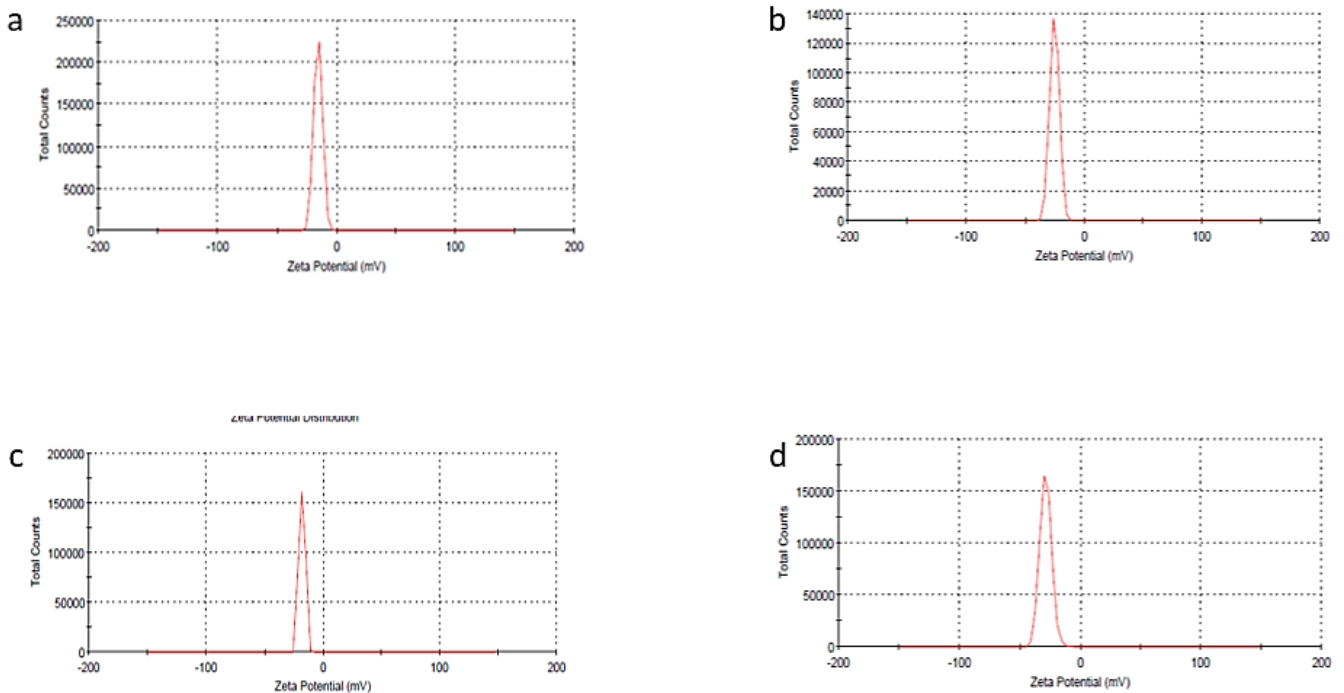
Etilen glikol (EG), dietilen glikol (DEG) ve tetraetilen glikol (TEG) ile sentezlenen manyetit nanopartiküllerinin SEM görüntüleri, nanopartiküllerin yuvarlak bir yapıya sahip olduğunu (Şekil 1a, b, c) ve ayrıca EG ile sentezlenen Fe_3O_4 -GO nano kompozitlerinin de küresel bir yapıya sahip olduğunu göstermiştir (Şekil 1d). Musluk suyunda, EG, DEG ve TEG ile sentezlenen nanopartiküllerin agregasyonları, dinamik ışık saçılımı (DLS) teknikleri ile 1100-1200 arasında ortalama değerlerde tespit edilmiştir (Şekil 2a, b, c ve d). Manyetit nanopartiküllerinin ve nano kompozitlerinin zeta potansiyelleri -10,4 mV ile (-23,1 mV) arasında değişmiştir (Şekil 3a, b, c ve d). Musluk suyundan en iyi nitrat giderme performansı, EG ile sentezlenen manyetit Fe_3O_4 NP'lerinden elde edilmiştir (Tablo 1).



Şekil 1. EG (a), DEG (b) ve TEG (c) ile sentezlenen farklı manyetit Fe_3O_4 nanopartiküllerinin ve EG ile sentezlenen Fe_3O_4 nanokompozitlerinin (d) SEM görüntüleri.

Tablo 1. Nitrat giderimi için farklı NP ve NC'lerin adsorpsiyon deneyi sonuçları

Muamele grupları	Nitrat giderme (%)	Nitrat adsorpsiyon kapasitesi (mg nitrat/g NP başına)	Kalan nitrat miktarı (ppm)
Fe ₃ O ₄ NPs	86.12	1172	3.86
Fe ₃ O ₄ -GO NCs	9.16	125	24.80
Fe ₃ O ₄ -GO-EDTA NCs	15.02	205	23.20
Fe ₃ O ₄ -GO-GLU NCs	16.12	220	22.90

**Şekil 2.** Farklı Fe₃O₄ nanopartiküllerinin (a- EG@Fe₃O₄, b- DEG@Fe₃O₄ ve c- TEG@Fe₃O₄ nanopartikülleri) ve NC'nin (d- EG@Fe₃O₄@GO NC) DLS spektrumları.**Şekil 3.** Farklı Fe₃O₄ nanopartiküllerinin (a- EG@Fe₃O₄, b- DEG@Fe₃O₄ ve c-TEG@Fe₃O₄ nanopartikülleri) ve NC'nin (d- EG@Fe₃O₄@GO NC) zeta potansiyelleri.

4. Tartışma

Manyetik nanoadsorbentler, sudan kirleticileri uzaklaştırmada gelişmiş adsorpsiyon kapasitesi özelliklerini taşıyan nanoyapılardan biridir. Genel olarak, manyetik nanopartiküller demir, nikel ve kobalt gibi elementleri ve bunların oksitlerini içerir. Bunlar arasında nano boyutlu manyetik demir oksit nanopartikülleri (FeONP'ler) manyetik nanoadsorbentlerin önemli üyeleridir. Demir bazlı nanopartiküller, manyetit (Fe_3O_4), maghemit ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$), hematit ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$), demir oksihidroksit (FeOOH) ve metalik sıfır değerlikli demir gibi farklı formlarda üretilebilir.

Son yıllarda sudan nitrati uzaklaştırmak için çok sayıda demir bazlı nano adsorban ve işlem geliştirilmiştir. Son zamanlarda, nano aralığındaki boyutları, yüksek yüzey alanı/hacim oranları, kimyasal kararlılıkları, reaktif bölgelerin yeterli yüzey dağılımı, seçicilikleri, biyouyumlulukları, süperparamanyetizmaları (Ali ve ark., 2016; Hashemian ve ark., 2015; Mohan ve ark., 2011; Arbabi ve ark., 2017) ve dış manyetik alan koşulları altında sudan kolayca ayrılmalari (Baig ve ark., 2021; Wang ve ark., 2019) nedeniyle yeni özelliklere ve işlevlere sahip IONP'lerin sentezi ve kullanımı yaygın olarak incelenmiştir. Ayrıca, nitrat uzaklaştırmada kullanılan demir ve demir oksit nanoadsorbanlar, ekonomik, toksik olmayan, doğada yaygın olarak bulunan ve çevre dostu olmaları gibi nedenlerle büyük ilgi görmüştür (Hassan, 2023; Wadhavan ve ark., 2020).

Çeşitli saha uygulamaları için nano adsorbanlara olan ihtiyacın artması nedeniyle, çevresel kararlılığı ve toksikolojik etkisiyle ilgili konular büyük ilgi görmüştür (Liu ve ark., 2014). Bu nedenle, etkili sentez yöntemleri geliştirmek ve sentezlenen nano malzemeleri biyolojik olarak uyumlu nano adsorbanlar haline getirmek için birçok deney yapılmıştır (Dinali ve ark., 2017). Bu çalışmalardan birinde, sudaki nitratin giderilmesi için sıfır değerlikli demir nanopartikülleri (ZVI) kullanılmıştır. Ahmadi ve ark. (2011), fiziksel bir yöntemle üretilen ZVI nanopartikülleri ile nitrat konsantrasyonunu azaltmayı amaçlamıştır. Geniş özgül yüzey alanı ($40\text{--}60\text{ m}^2\text{g}^{-1}$) ile karakterize edilen ortalama 25 nm çaplı ZVI, 2.0 ile 4.0 arasında kontrol edilen pH'ta 3 saatlik bir süre içinde nitratin yaklaşık %95'i adsorbe edilmiştir.

Ghosh ve ark. (2017), herhangi bir katkı maddesi kullanmadan homojen dağılmış tek fazlı çiçek benzeri sıfır değerlikli demir (ZVI) nanopartikülleri üreterek, farklı çözücülerde sentezlenen demir nanopartiküllerinin nitrat arıtma verimliliği test edilmiştir. Çiçek benzeri demir nanopartiküllerinin nitrat gidermede en etkili olduğu gözlemlenmiştir. Sonuçlar, nanopartikül dozu 2.88 g L^{-1} olduğunda, 400 mg L^{-1} kadar yüksek nitrat konsantrasyonlarında bile en yüksek giderme verimliliğinin (%100) elde edildiğini gösterdi. Çiçek şeklindeki Fe nanopartiküllerinin başarısı, nZVI parçacıklarının geniş yüzey alanlı taç yaprağı benzeri morfolojisine atfedilmiştir. Başka bir deneyde ise, Cho ve ark. (2015), sıfır değerlikli demir ile yeraltı suyundan nitratin indirgenmesinde manyetik nanopartiküllerin rolünü inceledi. Manyetik nanopartiküllerin, pH 6.5 'te, 5 g L^{-1} dozunda ve 10 mg L^{-1} konsantrasyonunda makro boyutlu demir ile nitrat

indirgenmesini artırdığını ve nitrat arıtım verimliliğinin yaklaşık %92 olduğunu bulmuşlardır.

Abdel-Lateef ve ark. (2022), adsorpsiyon kapasitesini değerlendirmek için sodyum borhidrit kullanarak demir (III) veya demir (II) iyonlarını indirgeyerek sıfır değerlikli demir (ZVI) nanopartikülleri ürettir. 100 mg/litre başlangıç nitrat konsantrasyonunda yaklaşık 30 dakikalık temas süresinde yaklaşık %94.77'lik bir uzaklaştırma verimliliği ile ZVI nanopartikülleri kullanılarak nitrat arıtımında iyi bir değere ulaşıldı.

Demir oksit nanopartikülleri farklı fonksiyonel gruplarla modifiye edilebilmekte, diğer elementlerle de hibrit yapılar oluşturabilmektedir. Yapılan çalışmalarda da araştırmacıların çeşitli organik ve inorganik substratlarla kullanıldığı görülmektedir (Shah ve ark., 2020; Khalid ve ark., 2020). Bu bağlamda, Khoshkalam ve ark. (2023), *Eucalyptus globulus* yaprak özütü kullanarak yeşil Fe_3O_4 ve $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ (EL-Fe NPs) nanopartikülleri üretmiş ve sudaki nitrat adsorpsiyonu için kullanmıştır. 30 dakikalık adsorpsiyon deneyinden sonra, maksimum nitrat adsorpsiyon kapasitesi, pH 3.7 'de $50\text{ mg L}^{-1}\text{ NO}_3^-$ çözeltisinde 12.91 mg g^{-1} olmuştur. Deneylerde, EL-FeNPs üzerindeki NO_3^- adsorpsiyonunun pH'ya oldukça bağımlı olduğu ve pH > 6.6 'da etkili bir adsorpsiyon gerçekleşmediği gözlenmiştir. Bu çalışmada asidik pH ortamında, iyon değişimi ve elektrostatik etkileşimin NO_3^- adsorpsiyonunun ana mekanizmaları olabileceği ortaya konulmuştur. Bu durumun aksine, EL-FeNPs, KCl tuzu varlığında kümelenedikleri ve EL-Fe NPs'nin özgül yüzey alanının azalması nedeniyle NO_3^- adsorpsiyonunun yaklaşık %98 oranında azaldığı belirtilmiştir. Mevcut çalışmada ise, önemli bir Fe_3O_4 NP kümelenmesi gözlemlenmemiştir. Bu alanda yapılan başka bir çalışmada, su sistemlerinde nitrati gidermedeki verimliliklerini test etmek için karanfil (*Syzygium aromaticum*, SA) özütünden demir nanopartikülleri (FeNPs) üretti. Adsorpsiyon deneyleri, karanfil özütü kullanılarak yeşil sentezlenen sıfır değerlikli demir parçacıklarının (SA-FeNPs) ve manyetit parçacıklarının (SA-MNPs) sırasıyla %43 ve %36 oranında nitrati giderdiğini gösterdi. Bu araştırmacılar, sentezlenen nanopartiküllerin nitrat arıtım süreçlerinde kullanılmasını önerdi. Arbabi ve ark. (2017), sulu çözeltiden nitrati adsorbe etmek için badem kabuğu ile aktive edilmiş manyetik nanopartiküller kullandı. Bu çalışmada, 25 mg L^{-1} başlangıç konsantrasyonunda, 0.5 g L^{-1} emilen dozda, 20 dakikalık denge süresinde ve pH 4 'te nitrat için maksimum adsorpsiyon oranı %79.73 olarak bulunmuştur. Yapılan mevcut deneyde ise, bu çalışmaya kıyasla pH 7.8 'de daha yüksek bir nitrat adsorpsiyon oranı (%86.12) elde edilmiştir.

Rahimi ve ark. (2022), yeraltı suyundan nitratin uzaklaştırılması için demir oksit-alümina nanopartikülleri üzerine desteklenmiş bir paladyum katalizörü kullanmıştır. Maksimum arıtım verimliliği (%96), 150 mg L^{-1} nitrat konsantrasyonunda, 2 g L^{-1} katalizör dozunda ve 90 dakikalık adsorpsiyon süresinde elde edilmiştir. Kalantary ve ark. (2016), farklı pH ve sürelerde sulu çözeltilerden nitrati uzaklaştırmak için toz aktif karbon (AC) üzerine kaplanmış Fe_3O_4 manyetit nanopartikülü üretmiştir. 60 dakikalık sürede 57.1 mg g^{-1} adsorpsiyon belirlenmesine

rağmen, pH 11.0'a yükseltildiğinde adsorpsiyon verimliliği hızla %8.2'ye düşmüştür. AC-Fe₃O₄ MNPs 1 g L⁻¹, 1 g L⁻¹ of AC-Fe₃O₄ MNPs kullanılarak %56.7'lik nitrat adsorpsiyon yüzdesi elde edildiğinden, iyileştirme işlemi için adsorbanın optimum dozu olarak 1 g L⁻¹ AC-Fe₃O₄ MNPs seçilmiştir. Bu çalışmada, maksimum adsorpsiyon pH 3'te elde edilmiştir, ancak doğal su kaynaklarının çoğunluğu bu pH değerinde değildir. Çalışmamızda, adsorpsiyon deneyleri yaklaşık 7.8 pH değerine sahip musluk suyunda yapılmıştır ve sonuçlarımız Rahimi ve ark. tarafından elde edilen sonuçlara kıyasla daha uygulanabilir görünmektedir.

Deeksha ve Vishalakshi (2024), mikrodalga ışınlaması ile N-(2-hidroksietil) akrilamid, N, N'-metilenbis (akrilamid), kitosan ve polianilinden oluşan bir jel ürettir ve bu jeli nitratin etkili adsorpsiyonu için kullandı. Malzeme, daha sonra manyetit (Fe₃O₄) nanopartiküllerinin yerleştirilmesiyle bir nanokompozit dönüştürüldü. Nanokompozitin nitrat giderme kapasitesi de Fe₃O₄'ün varlığının jelin adsorpsiyon mekanizmaları üzerindeki etkisini anlamak için değerlendirildi. Nanokompozit, nanopartikül içermeyen saf jelin 44.5 mg g⁻¹ değerine kıyasla nitrata karşı 55.24 mg g⁻¹'lik gelişmiş bir adsorpsiyon kapasitesi gösterdi. Bu bulgular, Fe₃O₄ nanopartiküllerinin sudan nitrat giderme üzerindeki olumlu etkilerini doğrulayarak bulgularımızı destekledi.

Manhooei ve ark. (2019), sudan nitratin uzaklaştırılması için kimyasal olarak modifiye edilmiş selüloz nanokristalinin (CNC) adsorpsiyon verimliliğini araştırmıştır. Bu çalışmanın sonunda, pH 7'de, 20 mg L⁻¹ başlangıç nitrat konsantrasyonunda, oda sıcaklığında ve 10 dakika içinde 3 g L⁻¹ dozunda %86.5'lik optimum nitrat arıtım verimliliği elde edilmiştir. Mevcut çalışmadan elde edilen sonuçlar adsorpsiyon oranı (%86.12) açısından da bu sonuçlara yakınlık göstermektedir. Ayrıca, benzer deneysel koşullarda daha küçük miktarda (1 mg) Fe₃O₄ NPs kullanarak benzer bir nitrat adsorpsiyon oranı elde edilmiştir.

Khatamian ve ark. (2023), nitrat adsorpsiyon kapasitelerini test etmek için amorf ve kristal yapılı iki farklı Fe (OH)₃ nanopartikülü üretti. Klinoptilolit (Clin) ve analcim (Anc) asitle yıkandı ve sentezlenen Am- Fe (OH)₃ nanopartikülleri için destek olarak kullanıldı. Üretilen Fe (OH)₃/Clin ve Fe (OH)₃/Anc granülleri, 50 mg L⁻¹ başlangıç konsantrasyonuna sahip sulu çözeltiden nitratin sırasıyla %96.82 ve %34.02'sini uzaklaştırdı. Genel olarak, Fe (OH)₃/Clin granülü, Fe (OH)₃/Anc nanokompozitinden daha etkilidir. Bu çalışmanın sonunda, Fe (OH)₃/Anc ve Fe (OH)₃/Clin'in maksimum adsorpsiyon kapasiteleri, her bir adsorbanın 0.2 g'ı için sırasıyla 0,4443 mg g⁻¹ ve 5.6211 mg g⁻¹ idi. Deneyimizde, amorf bir yapıya sahip olmayan Fe₃O₄ nanopartikülleri daha iyi adsorpsiyon kapasitesi (%86.12) göstermiştir.

Rahdar ve ark. (2021), atık sulardan nitrat iyonlarını uzaklaştırmak için adsorban olarak bakır oksit nanopartikülleri (CuONP'ler) sentezledi. Nitrat iyonlarının uzaklaştırılmasının optimizasyonu, şu parametrelerle yanıt yüzey modellemesi (RSM) kullanılarak belirlendi: Başlangıç nitrat konsantrasyonu (20, 45, 70 g L⁻¹), CuONP

konsantrasyonu (0.03, 0.06, 0.08 g L⁻¹), pH (3, 7, 11) ve reaksiyon süresi (40, 80, 120 dk). Optimum koşullar 70 mg L⁻¹ nanopartikül dozu, 0.08 g L⁻¹ NO₃⁻ konsantrasyonu, pH 3 ve 120 dk temas süresi olarak belirlendi. pH 3'te, nanopartikül dozunun 0,03'ten 0.08 g L⁻¹'e yükselmesiyle adsorpsiyon verimliliğinin %66.9'dan %71.56'ya yükseldiği tespit edildi. Ayrıca, pH 3'te ve 0.08 g L⁻¹ nanopartikül dozlarında %71'in üzerinde maksimum nitrat giderme verimliliği gözlemlenmiştir.

Li ve ark. (2017), sudaki nitrat kirliliğini gidermek için biyokömür üzerine desteklenmiş bimetalik demir/nikel nanopartiküller (BC@Fe/Ni) ürettir. Bu çalışmada, pH kontrolü yapılmadan %93'ün üzerinde yüksek nitrat giderme oranları elde edildi. Ayrıca, nanokompozitin daha yüksek dozlarının, daha düşük başlangıç nitrat konsantrasyonlarının ve asidik ortamın nitrat bozunmasını kolaylaştırdığı belirlendi. Çalışmanın sonunda, biyokömür üzerine desteklenmiş bimetalik demir/nikel nanopartiküllerin, demir ve nikel kirliliğini önleyerek nitrati verimli bir şekilde bozma açısından bimetalik demir/nikel nanopartiküllere ve nano ölçekli sıfır değerlikli demire göre belirgin avantajlar sergilediği ortaya çıktı. Mevcut sonuçlardan yola çıkarak, nitrat adsorpsiyon kapasitesi üzerindeki etkilerini karşılaştırmak için BC@Fe, BC@Ni ve BC@Fe/Ni üretilmesi önerildi. Ek olarak, elde edilen bu daha yüksek nitrat adsorpsiyon kapasitesi, manyetit NP'lerin bimetalik doğasına atfedilebilir. Dolayısıyla, bu çalışmada, üretilen Fe₃O₄NPs'nin nitrat adsorpsiyon kapasitesini artırmak için daha aktif bir yüzeye sahip bimetalik manyetit nanopartiküllerin kullanılması önerilebilir.

Grafen oksit (GO), yüzeyinde epoksi, laktol, karboksil, fenol ve hidroksil grupları ile birlikte geniş π - π çekimleri içeren farklı fonksiyonel gruplarla karakterize edilir. Bu özellikler, GO'nun hidrojen bağı, elektrostatik kuvvetler ve π - π etkileşimleri gibi güçlü etkileşimler yoluyla yüksek adsorpsiyon kapasitesine sahip olmasını sağlar (70). Ancak çalışmamızda, tüm GO NC'ler (Fe₃O₄ GONCs, Fe₃O₄GO-EDTA NCs, ve Fe₃O₄GO-GLU NCs), Fe₃O₄NP'lere kıyasla daha düşük nitrat adsorpsiyon performansı göstermiştir. Bu beklenmedik sonuçlar, düzensiz yüzey kompleksleşmesi ve elektrostatik çekimden, GO NC'lerin daha düşük DLS ve zeta potansiyellerinden kaynaklanabilir. Mevcut araştırmada, manyetit demir oksit NP'lerle nitrat giderme mekanizması hem elektrostatik adsorpsiyon hem de kompleksleşme tarafından yönetilmiştir. Bu araştırmanın adsorpsiyon deneylerinde, biyosorbent yüzeyindeki pozitif yüklü Fe³⁺ iyonu, elektrostatik çekim yoluyla negatif yüklü NO₃⁻ iyonunu kendine çekti.

Bu nedenle, GO NC'lerin hem elektrostatik adsorpsiyon hem de yüzey kompleksleşmesi yoluyla nitrat giderme mekanizmasında Fe⁺ iyonlarına kıyasla daha düşük kapasiteye sahip olduğu söylenebilir. Sereshti ve ark. (2019), nehir ve kanalizasyon suyu örneklerinden nitrat iyonlarının adsorpsiyonu için manyetik Fe₃O₄ nanopartikülü ürettir ve grafen oksit (GO) ile tasarlayıp stronsiyum nanopartikülleri (MGO-Sr) ile modifiye ettiler. Nitratin başlangıç konsantrasyonları, pH, sıcaklık ve birlikte bulunan iyonlar gibi farklı faktörleri adsorpsiyon kapasitesi üzerindeki etkileri bakımından test edilmiş olup,

pH~6'da 357.17 mg nitrat için 1g adsorbanın kullanılması gerektiği sonucuna ulaşılmıştır. Mevcut çalışmada ise daha az miktarda adsorban (1 mg) kullanılmasına rağmen, önceki çalışmalara kıyasla daha yüksek adsorpsiyon kapasitesi elde edilmiştir.

Nodeh ve ark. (2017), nano boyutlu lantan hidroksitin manyetik indirgenmiş grafen oksit (MG@La) üzerine ilave edilmesiyle elde edilen nanokompozit adsorbanı üretti. Nehir ve kanalizasyon ortamlarından fosfat ve nitrat iyonlarının uzaklaştırılması için kullandı. Geliştirilen adsorban, fosfat ve nitrat iyonları için sırasıyla 116.28 mg g⁻¹ ve 138.88 mg g⁻¹ yüksek adsorpsiyon kapasiteleri gösterdi. Son olarak, MG@La'nın saha uygulaması, nehir ve kanalizasyon suyu örneklerinde fosfat ve nitrat iyonları için yüksek adsorpsiyon (%74-%90) sağladı. Mevcut araştırmada, nitrat örnekleri için daha yüksek bir adsorpsiyon oranı (%86.12) elde edilmiştir.

Salam ve ark. (2015), sıfır değerlikli demir nanopartikülleri (ZVINP'ler) sentezlediler ve daha sonra kararlı bir ZVINP/NC nanokompoziti üretmek için yüksek yüzey alanlı nanografenler (NC'ler) ile güçlendirdiler. ZVINP/NC nanokompozitinde ZVINP içeriğinin daha da artırılmasının dengeye yol açtığı bildirilmiştir. 10: 20, 15:15 ve 20:10 (mg olarak) kütle oranları sırasıyla %83.5, %90.5 ve %93.2 adsorpsiyon değerleri gösterdi. Negatif yüklü nitrat iyonları ile esas olarak negatif yüklü π elektronlarıyla kaplı NC yüzeyi arasındaki elektrostatik itme nedeniyle NC'lerin tek başına çözeltiden nitrat iyonlarının hiçbirini uzaklaştıramadığı değerlendirilmektedir. Bu durum, nitrat arıtımında, çoğunlukla ZVINP yüzeyi tarafından nitrat iyonlarının adsorpsiyonunu içerdiği için NC'lerin nitrat uzaklaştırma üzerindeki etkisinin daha düşük olduğunu doğruladı. Bu sonuçlar, saf Fe₃O₄ nanopartiküllerinin nitrat adsorpsiyonu açısından GO, GO-EDTA ve GO-GLU nanokristallerine kıyasla daha iyi performans gösterdiği yönündeki bulgularımızı desteklemektedir. Fe₃O₄ NPs'nin tıbbi sülükler *H. verbana* üzerindeki etkilerini ortaya koyan bir literatür tespit edilmemiş olup, hayatta kalma açısından toksik bir etkisi gözlenmemiştir.

5. Sonuç ve Öneriler

Mevcut araştırmada, sadece 1 mg nanoadsorbent (Fe₃O₄NPs, Fe₃O₄ GO NCs, Fe₃O₄ GO-EDTA NCs, and Fe₃O₄ GO-GLU NCs) kullanılarak tatmin edici bir nitrat arıtımı (86.12%) elde edilmiştir. Bu bulgular, çevresel ve halk sağlığı endişeleri nedeniyle daha yüksek hacimli suda daha düşük miktarda nanoadsorbent tercih eden arıtma süreçleri için önemli olacaktır. Ayrıca, deneylerimizde adsorpsiyon denemeleri normal musluk suyu kullanılarak yapılmış olup, pH seviyeleri pratik iyileştirme programlarını yansıtacak şekilde değiştirilmemiştir. Bulgularımıza göre, adsorpsiyon çoğunlukla demir nanopartiküllerinin yüzeyleri tarafından sağlandığından, GO'nun nitrat gideriminde daha düşük bir rolünün olduğu görülmüştür. Ayrıca, Fe₃O₄ NPs'nin tıbbi sülükler *H. verbana* üzerinde hayatta kalma açısından toksik bir etkisi bulunmamıştır (tüm gruplarda hayatta kalma oranları %100 idi). Sonuç olarak, adsorpsiyon deneylerinde Fe₃O₄ NPs nanopartiküllerinin GO, GO-EDTA ve GO-GLU nanokompozitlerine kıyasla daha yüksek nitrat adsorpsiyon kapasitesine sahip olduğu sonucuna varılmıştır. Bu nedenle,

nitratla yüksek oranda kirlenmiş sularda Fe₃O₄ nanopartiküllerinin kullanılması ve bu nanopartiküller kullanılarak yeni arıtma süreçlerinin geliştirilmesi önerilebilir.

Yazar Katkıları

Birinci yazar: Kavramsallaştırma, veri derleme, orijinal taslak yazımı, proje yönetimi; İkinci yazar: Biçimsel analiz, metodoloji; Üçüncü yazar: Görselleştirme, denetim, inceleme ve düzenleme.

Teşekkür

Yazarlar, çalışmamıza FDK-2021-11463 proje numarasıyla sağladığı finansman için Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Ofisi'ne teşekkür eder. Ayrıca, bu çalışmada kullanılan tıbbi sülükleri temin eden Ahmet Ekren'e de teşekkür ederiz.

Çıkar Çatışması

Yazarlar, bu makalede bildirilen çalışmayı etkilemiş olabilecek bilinen herhangi bir mali veya mali olmayan, mesleki veya kişisel çıkar çatışmasının olmadığını beyan ederler.

Etik Beyan

Bu çalışma için etik onay ve katılım izni gerekmemektedir.

Finansman Bilgileri

Bu çalışma, Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Ofisi tarafından FDK-2021-11463 proje numarasıyla finanse edilmiştir.

Kaynaklar

- Abdel-Lateef HM, Khalaf MM, Al-Fengary AED, Elrouby M. Enhanced Nitrate Ions Remediation Using FeO Nanoparticles from Underground Water: Synthesis, Characterizations, and Performance under Optimizing Conditions. *Materials* 2022; 15: 5040. doi:10.3390/ma15145040.
- Adeleye AS, Conway JR, Garner K, Huang Y. Su Y, et al. Engineered nanomaterials for water treatment and remediation: costs, benefits, and applicability. *Chemical Engineering Journal* 2016; 286: 640–662. doi:10.1016/j.cej.2015.10.105.
- Ahmadi M, Mashhoon F, Kaveh R, Tarkian F. Use of mechanically prepared iron nano particles for nitrate removal from water, *Asian Journal of Chemistry* 2011; 23: 1205–1208.
- Ali A, Zafar H, Zia M, Haq I, Phull AR, et al. Synthesis, characterization, applications, and challenges of iron oxide nanoparticles. *Nanotechnology Science and Applications* 2016; 9: 49–67. doi:10.2147/NSA.S99986.
- Arbabi M, Hemati S, Shamsizadeh Z, Arbabi A. Nitrate removal from aqueous solution by almond shells activated with magnetic nanoparticles. *Desalination and Water Treatment* 2017; 80: 344–351. doi:10.5004/dwt.2017.20999.
- Baig N, Kammakam I, Falath W. Nanomaterials: a review of synthesis methods, properties, recent progress, and challenges. *Materials Advances* 2021; 2: 1821-1871. doi: 10.1039/D0MA00807A.
- Banerjee P, Garai P, Saha NC, Saha S, Sharma P, et al. Critical Review on the Effect of Nitrate Pollution in Aquatic Invertebrates and Fish.

- Water Air Soil Pollution 2023; 234: 1–14. doi:10.1007/s11270-023-06260-5.
- Bishayee B, Chatterjee RP, Ruj B, Chakraborty S, Nayak J. Strategic management of nitrate pollution from contaminated water using viable adsorbents: An economic assessment-based review with possible policy suggestions. *Journal of Environmental Management* 2022; 303: 114081. doi:10.1016/j.jenvman.2021.114081.
- Bhatnagar A, Sillanpaa M. A review of emerging adsorbents for nitrate removal from water. *Chemical Engineering Journal* 2011; 168: 493–504. doi:10.1016/j.cej.2011.01.103.
- Burgin AJ, Hamilton SK. Have we overemphasized the role of denitrification in aquatic ecosystems? A review of nitrate removal pathways. *Frontiers in Ecology and Environment* 2007; 5: 89. doi: 10.1890/1540-9295(2007)5[89:HWOTRO]2.0.CO;2.
- Chatterjee S, Lee D, Lee MW, Woo S. Nitrate removal from aqueous solutions by cross-linked chitosan beads conditioned with sodium bisulfate. *Journal of Hazardous Materials* 2009; 166: 508–513. doi: 10.1016/j.jhazmat.2008.11.045.
- Cho DW, Song H, Schwartz FW, Kim B, Jeon BH. The role of magnetite nanoparticles in the reduction of nitrate in groundwater by zero-valent iron. *Chemosphere* 2015; 125: 41–49. doi: 10.1016/j.chemosphere.2015.01.019.
- Costa DD, Gomes AA, Fernandes M, de Costa RL, Magalhaes MDLB, et al. Using natural biomass microorganisms for drinking water denitrification. *Journal of Environmental Management* 2018; 217: 520–530. doi: 10.1016/j.jenvman.2018.03.120.
- Deeksha KJ, Vishalakshi B. Preparation of magnetic chitosan/polyaniline nanocomposite for efficient remediation of nitrate and phosphate from water. *Journal of Environmental Chemical Engineering* 2024; 12: 114300. doi:10.1016/j.jece.2024.114300.
- Demiral H, Gündüzoğlu G. Removal of nitrate from aqueous solutions by activated carbon prepared from sugar beet bagasse. *Bioresource Technology* 2010; 101: 1675–1680. doi: 10.1016/j.biortech.2009.09.087.
- Dinali R, Ebrahiminezhad A, Manley-Harris M, Ghasemi Y, Berenjian A. Iron oxide nanoparticles in modern microbiology and biotechnology. *Critical Reviews in Microbiology* 2017; 43: 493–507. doi:10.1080/1040841X.2016.1267708.
- Epsztein R, Nir O, Lahav O, Green M. Selective nitrate removal from groundwater using a hybrid nano-filtration-reverse osmosis filtration scheme. *Chemical Engineering Journal* 2015; 279: 372–378. doi:10.1016/j.cej.2015.05.010.
- Fan AM, Steinberg VE. 1996. Health Implications of Nitrate and Nitrite in Drinking Water: An Update on Methemoglobinemia Occurrence and Reproductive and Developmental Toxicity. *Regulatory Toxicology and Pharmacology* 1996; 23: 35–43. doi: 10.1006/rtp.1996.0006.
- Gabris MA, Rezaianab S, Rafieizonooz M, Khankhaje E, Devanesane S, et al. Chitosan magnetic graphene grafted polyaniline doped with cobalt oxide for removal of Arsenic(V) from water. *Environmental Research* 2022; 207: 112209. doi:10.1016/j.envres.2021.112209.
- Gan Y, Zhao Q, Ye Z. Denitrification performance and microbial diversity of immobilized bacterial consortium treating nitrate micro-polluted water. *Bioresource Technology* 2019; 281: 351–358. doi: 10.1016/j.biortech.2019.02.111.
- Gaur K, Kaur K, Bhardwaj G, Kaur N, Singh N. Benzimidazolium Salt Modified Microporous Silica-Coupled Iron Oxide Nanoparticles: Material Engineered for Nitrate Removal. *ACS Applied Materials and Interfaces* 2024; 16: 49790–49800. doi:10.1021/acsami.4c10294.
- Gautam RK, Gautam PK, Banerjee S, Soni S, Singh SK, et al. Removal of Ni(II) by magnetic nanoparticles. *Journal of Molecular Liquids* 2015; 204: 60–69. doi:10.1016/j.molliq.2015.01.038.
- Ghosh A, Dutta S, Mukherjee I, Biswas S, Chatterjee S, et al. Template-free synthesis of flower-shaped zero-valent iron nanoparticle: Role of hydroxyl group in controlling morphology and nitrate reduction. *Advanced Powder Technology* 2017; 28: 2256–2264. doi:10.1016/j.apt.2017.06.006.
- Goncharuk VV, Osipenko VO, Balakina MN, Kucheruk DD. Water purification of nitrates by low-pressure reverse osmosis method. *Journal of Water Chemistry and Technology* 2013; 35 (2): 71–75. doi:10.3103/S1063455X13020045.
- Hashemian S, Saffari H, Ragabion S. Adsorption of cobalt (II) from aqueous solutions by Fe₃O₄/bentonite nanocomposite. *Water Air Soil Pollution* 2015; 226: 2212. doi: 10.1007/s11270-014-2212-6.
- Hassan HR. A review on different arsenic removal techniques used for decontamination of drinking water. *Environmental Pollutants and Bioavailability* 2023; 35(1): 2165964. doi: 10.1080/26395940.2023.2165964.
- Herath A, Reid C, Perez F, Pittman JrCU, Mlsna TE. Bio-char-supported polyaniline hybrid for aqueous chromium and nitrate adsorption. *Journal of Environmental Management* 2021; 296: (1–10): 113186. doi:10.1016/j.jenvman.2021.113186.
- Huno SKM, Rene ER, Hullebusch EDV, Annachatre AP. Nitrate removal from groundwater: a review of natural and engineered process. *Journal of Water Supply Research and Technology- Aqua* 2018; 67 (8): 885–902. doi: 10.2166/aqua.2018.194.
- Hwang YH, Kim DG, Shin, HS. Mechanism study of nitrate reduction by nano zero valent iron. *Journal of Hazardous Materials* 2011; 185: 1513–1521. doi:10.1016/j.jhazmat.2010.10.078.
- Hyun L, Dong Y, Sang J, Sang C. Removal of nitrate from radioactive wastewater using magnetic multi-walled carbon nanotubes. *Progress in Nuclear Energy* 2021; 140 (1–7): 103893. doi: 10.1016/j.pnucene.2021.103893.
- Islam M, Patel R. Synthesis and physicochemical characterization of Zn/Al chloride layered double hydroxide and evaluation of its nitrate removal efficiency. *Desalination* 2010; 256: 120–128. doi:10.1016/j.desal.2010.02.003.
- Kalantary RZ, Dehghanifard E, Mohseni-Bandpic A, Rezaei L, Esrafilia A, et al. Nitrate adsorption by synthetic activated carbon magnetic nanoparticles: kinetics, isotherms and thermodynamic studies. *Desalination and Water Treatment* 2016; 57: 16445–16455. doi:10.1080/19443994.2015.1079251.
- Khalid K, Tan X, Mohd Zaid HF, Tao Y, Chew CL, et al. Advanced in developmental organic and inorganic nanomaterial: a review. *Bioengineered* 2020; 11 (1): 328–355. doi: 10.1080/21655979.2020.1736240.
- Khatamian M, Nami SH, Mosayeb SGH, Divband B. Preparation and characterization of nano- Fe(OH)₃, its composites with two natural zeolites, and granulation of them for nitrate removal from polluted water. *Physica Scripta* 2023; 98(3): 035024. doi:10.1088/1402-4896/acbbf2.
- Khoshkalam E, Fotovat A, Halajnia A, Kazemian H, Eshghi H. Nitrate adsorption using green iron oxide nanoparticles synthesized by Eucalyptus leaf extracts: Kinetics and effects of pH, KCl salt, and anions competition. *Journal of Molecular Liquids* 2023; 375: 121366. doi:10.1016/j.molliq.2023.121366.
- Kodera T, Akizuki S, Toda T. Formation of simultaneous denitrification and methanogenesis granules in biological wastewater treatment. *Process Biochemistry* 2017; 58: 252–257. doi: 10.1016/J.PROCBIO.2017.04.038.
- Lakshmi J, Sozhan G, Vasudevan S. Recovery of hydrogen and removal of nitrate from water by electrocoagulation process. *Environmental Science and Pollution Research* 2012; 20 (4): 2184–2192. doi:10.1007/s11356-012-1028-4.
- Lazaratou CV, Vayenas DV, Papoulis D. The role of clay, clay minerals and clay-based materials for nitrate removal from water systems: a review. *Applied Clay Science* 2020; 185 (1–18): 105377. doi:10.1016/j.clay.2019.105377.
- Li P, Lin K, Fang Z, Wang K. Enhanced nitrate removal by novel bimetallic Fe/Ni nanoparticles supported on biochar. *Journal of Cleaner Production* 2017; 151: 21–33. doi:10.1016/j.jclepro.2017.03.042.
- Li X, Gu Y, Wu S, Chen S, Quan X, et al. Selective reduction of nitrate to ammonium over charcoal electrode derived from natural wood.

- Chemosphere 2021; 285 (1–6): 131501. doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.131501.
- Loganathan P, Vigneswaran S, Kandasamy J. Enhanced removal of nitrate from water using surface modification of adsorbents-a review. *Journal of Environmental Management* 2013; 131: 363–374. doi:10.1016/j.jenvman.2013.09.034.
- Litter MI. A short review on the preparation and use of iron nanomaterials for the treatment of pollutants in water and soil. *Emergent Materials* 2022; 5(2): 391–400. doi:10.1007/s42247-022-00355-1.
- Liu A, Liu J, Pan B, Zhang WX. Formation of lepidocrocite (c-FeOOH) from oxidation of nanoscale zero-valent iron (nZVI) in oxygenated water. *RSC Advances* 2014; 4: 57377–57382. doi:10.1039/c4ra08988j.
- Manhooei L, Mehdinejadi B, Amininasab SM. Cellulose nanocrystal modified with 3-chloro propyl trimethoxysilane: a new bio-adsorbent for nitrate removal from water. *Water and Environment Journal* 2019; 34: 50–60. doi: 10.1111/wej.12503.
- Midaoui AE, Elhannouni F, Taky M, Chay L, Sahli MAM, et al. Optimisation of nitrate removal operation from ground water by electro-dialysis. *Separation and Purification Technology* 2002; 29: 235–244. doi: 10.1016/S1383-5866(02)00092-8.
- Mohan D, Sarswat A, Singh V, Alexandre-Franco M, Pittman C. Development of magnetic activated carbon from almond shells for trinitrophenol removal from water. *Chemical Engineering Journal* 2011; 172: 1111–1125. doi:10.1016/j.cej.2011.06.054.
- Mondal P, Anweshan A, Purkait MK. Green synthesis and environmental application of iron-based nanomaterials and nanocomposite: A review. *Chemosphere* 2020; 259: 127509. doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.127509.
- Maksoud MIA, Elgarayh AM, Farrell C. Insight on water remediation application using magnetic nanomaterials and biosorbents. *Coordination Chemistry Reviews* 2020; 403: 213096. doi:10.1016/j.ccr.2019.213096.
- Lorna F. Drinking-water nitrate, methemoglobinemia, and global burden of disease: a discussion. *Environmental Health Perspectives* 2014; 122 (14): 1371–1374. doi:10.1289/ehp.7216.
- Mahmud MAP, Ejeian F, Azadi S, Myers M, Pejic B, et al.. Recent progress in sensing nitrate, nitrite, phosphate, and ammonium in aquatic environment. *Chemosphere* 2020; 259: 127492. doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.127492.
- Majumdar D, Gupta N. Nitrate pollution of groundwater and associated human health disorders. *Indian Journal of Environmental Health* 2000; 42: 28–39. <https://www.researchgate.net/publication/260488081>.
- Nodeh HR, Sereshti H, Afsharian EZ, Nouri N. Enhanced removal of phosphate and nitrate ions from aqueous media using nano-sized lanthanum hydrous doped on magnetic graphene nanocomposite. *Journal of Environmental Management* 2017; 197: 265–274. doi:10.1016/j.jenvman.2017.04.004.
- Palko JW, Oyarzun DI, Ha B, Stadermann M, Santiago JG. Nitrate removal from water using electrostatic regeneration of functionalized adsorbent. *Chemical Engineering Journal* 2018; 334: 1289–1296. doi: 10.1016/j.cej.2017.10.161.
- Rahdar S, Pal K, Mohammadi L, Rahdar A, Goharniya Y, et al. Response surface methodology for the removal of nitrate ions by adsorption onto copper oxide nanoparticles. *Journal of Molecular Structure* 2021; 1231 (1–28): 129686. doi: 10.1016/j.molstruc.2020.129686.
- Rahimi NK, Hashemi MM, Asadi T, Abyadeh M, Yarizadeh H, et al. Association of maternal intake of nitrate and risk of birth defects and preterm birth: a systematic review and dose-response meta-analysis. *Archives Environmental and Occupational Health* 2022; 77(6): 514–523. doi:10.1080/19338244.2021.1953955.
- Rossi F, Motta O, Matrella S, Proto A, Vigliotta G. Nitrate removal from wastewater through biological denitrification with OGA 24 in a batch reactor. *Water* 2015; 7: 51–62. doi:10.3390/w7010051.
- Salam MA, Fageeh O, Al-Thabaiti SA, Obaid AY. Removal of nitrate ions from aqueous solution using zero-valent iron nanoparticles supported on high surface area nanographenes. *Journal of Molecular Liquids* 2015; 212: 708–715. doi:10.1016/j.molliq.2015.09.029.
- Sereshti H, Afsharian AZ, Bidhendi ME, Nodeh HR, Kamboh MA, et al. Removal of phosphate and nitrate ions aqueous using strontium magnetic graphene oxide nanocomposite: Isotherms, kinetics, and thermodynamics studies. *Environmental Progress and Sustainable Energy* 2019; 39: 13332. doi:10.1002/ep.13332.
- Shah M, Nawaz S, Jan H, Uddin N, Ali A, et al. Synthesis of bio-mediated silver nanoparticles from *Silybum marianum* and their biological and clinical activities. *Materials Science and Engineering: C* 2020; 112: 110889. doi: 10.1016/j.msec.2020.110889.
- Sharma S, Bhattacharya A. Drinking water contamination and treatment techniques. *Applied Water Science* 2016; 7: 1043–1067. doi:10.1007/s13201-016-0455-7.
- Singh S, Anil AG, Kumar V, Kapoor D, Subramanian S, et al. Nitrates in the Environment: A Critical Review of Their Distribution, Sensing Techniques, Ecological Effects and Remediation. *Chemosphere* 2022; 287: 131996. doi:10.1016/j.chemosphere.2021.131996.
- Srivastav AL, Patel N, Prajapati UB, Chaudhary VK. Nitrate pollution in groundwater and their possible remediation through adsorption. Chapter 6. pp- 105-119. In: *Groundwater Geochemistry: Pollution and Remediation Methods*, first ed. Sughosh Madhav and Pardeep Singh, John Wiley & Sons Ltd, 2021. ISBN 9781119709732.
- Su Y, Adeleye A, Huang Y, Sun X, Dai C, et al. Simultaneous removal of cadmium and nitrate in aqueous media by nanoscale zerovalent iron (nZVI) and Au doped nZVI particles. *Water Resources* 2014; 63: 102–111. doi:10.1016/j.watres.2014.06.008.
- Talalaj IA. Removal of organic and inorganic compounds from landfill leachate using reverse osmosis. *International Journal of Environmental Science and Technology* 2015; 12: 2791–2800. doi:10.1007/s13762-014-0661-5.
- Tyagi A, Raghavendra Rao Dr NG, Yadav D, Kanojia K. An Investigation Of Silver Nanoparticles With Its Toxicological Effects and Applications. *Journal of Survey in Fisheries Sciences* 2023; 10(4S): 718–727. doi:10.53555/sfs.v10i4S.898.
- Wadhavan S, Jain A, Nayyar J, Mehta SK. Role of nanomaterials as adsorbents in heavy metal ion removal from waste water: A review. *Journal of Water Process Engineering* 2020; 33: 101038. doi:10.1016/j.jwpe.2019.101038.
- Wang Z, Chunting L, Weizhong W. Industry applications of magnetic separation based on nanoparticles: A review. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics* 2019; 60 (2): 281–297. doi:10.3233/JAE-180087.
- Ward MH, Dekok TM, Levallois P, Brender J, Gulis G, et al. Workgroup report: drinking-water nitrate and health – recent findings and research needs. *Environmental Health Perspectives* 2005; 113: 1607–1614. doi: 10.1289/ehp.8043.
- WHO/UNICEF. Progress on Sanitation and Drinking Water, Update and The Millennium Development Goals Assessment, World Health Organization 2015; 90. 10.1007/s13398-014-0173-7.2 ISBN 9789241509145.
- Xiong Z, Zhao D, Pan G. Rapid and controlled transformation of nitrate in water and brine by stabilized iron nanoparticles. *Journal of Nanoparticle Research* 2009; 11: 807–819. doi:10.1007/s11051-008-9433-9.
- Xu X, Gao B, Tan X, Zhang X, Yue Q, et al. Nitrate adsorption by stratified wheat straw resin in lab-scale columns. *Chemical Engineering Journal* 2013; 226: 1–6. doi: 10.1016/j.cej.2013.04.033.
- Zhang Z, Xu Y, Shi W, Wang W, Zhang R, et al. Electrochemical-catalytic reduction of nitrate over Pd–Cu/cAl₂O₃ catalyst in cathode chamber: enhanced removal efficiency and N₂ selectivity. *Chemical Engineering Journal* 2016; 290: 201–208. doi: 10.1016/j.cej.2016.01.063.