Original Article

Journal of Aquifer and Qanat

Autumn And Winter 2024, Vol. 4, No. 2, pp 1-34

10.22077/jaaq.2024.7075.1059

A Review of Technologies For Purification of Groundwater Including Heavy Metals Based on Nanotechnology

Raziyeh Shamshirgaran [1] | Reihaneh Malakooti [2]✉ Abolfazl Akbarpour [3]

1. Ph.D. student, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran.
2. Associate Professor, Department of Chemistry, Faculty of Sciences, University of Birjand, Birjand, Iran.
3. Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran.

✉Corresponding Author: Rmalakooti@birjand.ac.ir

Received:
22 December 2023

Accepted:
17 February 2024

Published:
19 March 2024

Keywords:

Groundwater, Pollution, Purification, Nanotechnology, Climate Change

Extended abstract

Introduction

Millions of people worldwide depend on groundwater as a source of drinking water (Senanu et al., 2023). On the other hand, freshwater resources have been gradually polluted by climate changes, the increasing development of modern industry, economic developments, population growth, and the abundance of human activities, (Sholl and Lively, 2016; Amen et al., 2020). Meanwhile, groundwater pollution has become a serious environmental problem and can prevent achieving sustainable development goals (Kurniawan et al., 2023). In recent decades, heavy metal pollution has caused many concerns worldwide due to its impact on water systems and human health (Frisbie and Mitchell et al., 2023). Arsenic (Farsad et al., 2023), mercury (Sun et al., 2023), chromium (Shamshirgaran et al., 2023), etc. in groundwater have affected the quality of water resources. In addition, the emergence of fluoride (Tang et al., 2023) and nitrate (Richa et al., 2022) have also become problematic in groundwater. There are different methods to reduce and remove pollutants from the aquifer. Traditional techniques such as using available materials and low-cost treatment technologies were used to reduce water pollutants. Agricultural waste, natural clays, mineral deposits, on-site treatment technologies, etc., were also effective for access to safe and sanitary water (Ahmad et al., 2017).

Cite this article: Shamshirgaran, R., Malakooti, R. & Akbarpour, A. (2024). A Review Of Technologies For Purification Of Groundwater Including Heavy Metals Based On Nanotechnology. *Journal of Aquifer and Qanat Title*, 4 (2), 1-34. DOI: http//doi.org/10.22077/jaaq.2024.7075.1059

Copyright: © 2024 by the authors. Licensee Journal of Aquifer and Qanat. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Usually, physical-chemical methods such as chemical precipitation methods were applied to treat polluted groundwater, due to the simplicity of the process and required equipment (Kurniawan et al., 2022). The addition of coagulants also destabilizes colloids and facilitates the pollutant removal process (Kurniawan et al., 2023). Membrane technologies were also widely recognized as a robust separation process for water treatment with high pollutant removal efficiency (Adam et al., 2022). Today, nanotechnology using advanced materials and technologies ensures water purification, protection, and reuse as well as long-term access to healthy drinking water (Dhass et al., 2023; Bhardwaj et al., 2022). Moreover, nanomaterials have excellent catalytic activity, reactivity, and high absorption properties (Saravanan et al., 2022)). In a study, Chandrakant Bhardwaj et al. found that nano remediation has a high potential to remove large amounts of in situ pollutants, reducing the cleaning time and the concentration of pollution (close to zero) (Bhardwaj et al., 2022). In 2021, Abhijit Saha et al. investigated the rapid and selective magnetic separation of hexavalent uranium in groundwater using citrate-ferrite nanoparticles supported on silver. They functionalized the nanoparticles with phosphoramidite and found that these functionalized nanoparticles have high flexibility against a large number of metal ions (Saha et al., 2021). In a review study, Adriana Robledo-Peralta and her colleagues showed that cobalt and manganese metal oxide magnetic nanoparticles effectively removed arsenic, with more than 95% efficiency. (Robledo-Peralta et al., 2021). In 2022, Ravindran and his coworkers investigated silica nanoparticles to reduce bacterial contamination of groundwater. Their studies showed that silica nanoparticles were cost-effective and had high antibacterial efficiency (Ravindran et al., 2022). Also, in 2022, Shuang Tao and his colleagues determined that bismuth (III) sulfide nanoparticles effectively remove chromium (VI) from aqueous solutions in the simultaneous presence of different ions, for the first time (Tao et al., 2022). In the present study, we have been concerned about some factors causing polluted aquifers and, also various methods of purifying them, including low-cost and traditional, physio-chemical and biological methods, relying on using metal nanoparticles. The innovation of this review study is to survey the advantages and disadvantages of different treatment techniques to remove pollution from underground water.

Results and Discussion

The investigation results of some common and dangerous pollutants in aquifers confirm that, according to the WHO standard, the presence of these metals in drinking water is necessary in a balanced amount. However, the excessive increase of these elements causes pollution, toxicity, and danger to human health. Consequently, it is essential to implement techniques to mitigate the pollution of underground water. There are different methods for cleaning underground water. Groundwater treatment is usually based on a separate location and includes on-site treatment and ex-situ pollution reduction. Ex-situ treatment involves reducing pollution by moving groundwater to another location for treatment. In contrast, in situ treatment techniques directly clean soil from contaminated aquifers, in-situ treatment is often superior to ex-situ treatment due to low cost and reduced monitoring time (Decesaro et al., 2017; Tabatabai and Akbarpour, 2018). Some studies have shown that nanomaterials are successful in decontamination of groundwater. However, the rapid development of nanotechnology reminds us of a few challenges, such as danger to human health, environmental hazards, high costs, etc., that modern society may face in the future. However, the use of green, water-friendly, and cheap nanoparticles to reduce groundwater pollutants in the form of ex-situ treatment methods, meets organizations and institutions' needs in charge of the decontamination of aquifers in the future. There are also several suggestions for the decontamination of underground water tables with metal nanoparticles in the future, including the development of new and efficient synthesis methods of metal nanoparticles by optimizing the properties, investigating how nanoparticles behave in the environment of aquifers (such as transport, sedimentation, and their toxicity potential) and, investigating the incorporation of these particles with other cleaning technologies. These items can be evaluated in future studies.

مقاله پژوهشی

مجله
آبخوان و قنات

دوره چهارم، شماره دوم، پاییز و زمستان ۱۴۰۲، صفحات ۳۴ - ۱

10.22077/jaaq.2024.7075.1059

مروری بر فناوری‌های تصفیه آب‌های زیرزمینی آلوده به فلزات سنگین با تکیه بر نانوفناوری

راضیه شمشیرگران [۱] | ریحانه ملکوتی [۲]✉ | ابوالفضل اکبرپور [۳]

۱. دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران.
۲. دانشیار، گروه شیمی، دانشکده علوم، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران.
۳. استاد، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران.
✉نویسنده مسئول: Rmalakooti@birjand.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۰/۰۱
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۱/۲۸
تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۱۲/۲۹

کلیدواژه‌ها:
آب زیرزمینی،
آلودگی،
تصفیه،
نانوفناوری،
تغییر اقلیم.

چکیده

امروزه آلودگی آب‌های زیرزمینی به یک مشکل جدی زیست‌محیطی تبدیل گردیده‌است. از طرفی تغییرات اقلیم، کیفیت آبخوان‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهد. نتایج نشان دادند که کیفیت منابع آب زیرزمینی در طول زمان دچار تغییر شده و کاتیون‌هایی مانند آرسنیک و کروم و آنیون‌هایی چون جیوه، فلوراید و نیترات و غیره در منابع آب نفوذ پیدا کردند. تحقیقات نشان می‌دهد روش‌های مختلفی برای از بین بردن آلودگی‌های موجود در آب‌زیرزمینی ازجمله تکنیک‌های سنتی و ارزان قیمت، روش رسوب شیمیایی، تبادل یونی، جذب، فیلتراسیون غشایی و غیره وجود دارد که در این میان کاربردهای گسترده‌ی نانوتکنولوژی در کاهش آلاینده‌ها در منابع آب شناخته شده‌است. از این‌رو در مطالعه‌ی حاضر، با بررسی تحلیلی و توصیفی، برخی از آلاینده‌های رایج موجود در آبخوان‌های آلوده و روش‌های مختلف در کاهش آلاینده‌ها از آب بیان شد. همچنین از آن‌جایی که نانوتکنولوژی، دسترسی طولانی مدت به آب آشامیدنی سالم را تضمین می‌کند، بعضی از روش‌های سنتز نانوذرات و کاربردهای گسترده آن‌ها در کاهش آلودگی آبخوان بررسی شدند. نتایج این مطالعات نشان داد، نانومواد قابلیت افزایش سرعت واکنش شیمیایی، سازگاری با محیط‌زیست و گزینش‌پذیری در کاهش آلاینده‌ها از آب را دارند.

مقدمه

آب میلیون‌ها نفر در سراسر جهان به آب‌های زیرزمینی (چاه‌های عمیق) به‌عنوان منابع آب آشامیدنی وابسته هستند (Senanu et al., 2023). با تغییرات آب وهوایی، توسعه روزافزون صنعت مدرن، پیشرفت‌های اقتصادی، افزایش جمعیت و وفور فعالیت‌های انسانی، منابع آب شیرین به‌تدریج آلوده شده‌اند (Sholl and Lively, 2016; Amen et al., 2020).

در این میان، آلودگی آب‌های زیرزمینی به یک مشکل جدی زیست‌محیطی تبدیل گردیده‌است و می‌تواند جهان را از مشارکت در اهداف توسعه پایدار باز دارد (Kurniawan et al., 2023). در چند دهه اخیر، آلودگی فلزات سنگین به‌دلیل تأثیر آن بر سیستم‌های آبی و سلامت انسان نگرانی‌های زیادی را در سطح جهان به وجود آورده‌است (Frisbie and Mitchell et al., 2023). آرسنیک (Farsad et al., 2023)، جیوه (Sun et al., 2023) و کروم (Shamshirgaran et al., 2023) و غیره در آب زیرزمینی، کیفیت منابع آب را تحت تأثیر قرارداده‌است. علاوه‌بر این، ظهور فلوراید (Tang et al., 2023) و نیترات (Richa et al., 2022) نیز در آب‌های زیرزمینی مشکل‌ساز شده‌اند.

روش‌های مختلفی جهت کاهش و حذف آلاینده‌ها از آبخوان وجود دارد. تکنیک‌های سنتی مانند استفاده از مواد در دسترس و فناوری‌های تصفیه کم‌هزینه، در کاهش آلاینده‌های آب استفاده می‌شوند. استفاده از ضایعات کشاورزی، رس‌های طبیعی، ذخایر معدنی و فناوری‌های تصفیه در محل و غیره نیز جهت دسترسی به آب سالم و بهداشتی مؤثر هستند (Ahmad et al., 2017).

معمولاً برای تصفیه آب‌های زیرزمینی آلوده، روش‌های فیزیکی- شیمیایی مانند ته‌نشینی، به‌دلیل سادگی در فرآیند و تجهیزات موردنیاز استفاده می‌گردد (Kurniawan et al., 2022). افزودن منعقدکننده‌ها نیز سبب بی‌ثبات شدن کلوئیدها و تسهیل فرآیند حذف آلاینده‌ها می‌شود (Kurniawan et al., 2023). فناوری‌های غشایی نیز به‌طور گسترده‌ای به‌عنوان یک فرآیند جداسازی قدرتمند برای تصفیه آب آشامیدنی با راندمان بالای دفع آلاینده‌ها شناخته‌شده‌است (Adam et al., 2022). روش اسمزمعکوس به‌عنوان مؤثرترین فناوری برای اصلاح زیست‌محیطی آب‌های زیرزمینی آلوده شناخته‌شده‌است. با اعمال فشار بیشتر غشاهای اسمزمعکوس، بار آلودگی و کدورت در آب کاهش می‌یابد (Pezeshki et al., 2023). تصفیه ازطریق جذب نیز برای حذف آلاینده‌ها از محلول‌های آبی محبوبیت پیدا کرده‌است. مواد جاذب با ویژگی‌های شیمیایی منحصربه‌فرد می‌توانند ظرفیت جذب، سینتیک و قابلیت حذف انتخابی را بهبود ببخشند (Chakraborty et al., 2022).

کاهش-اکسیداسیون یکی از واکنش‌های شیمیایی جهت تخریب پیکربندی مولکولی مواد مقاوم است. در یک سیستم الکتروشیمیایی، اکسیداسیون در آند (سمت مثبت) اتفاق می‌افتد، جایی که الکترون‌ها به کاتد (سمت منفی) منتقل می‌شوند و کاهش اتفاق می‌افتد. این دو واکنش شیمیایی که واکنش‌های ردوکس نامیده می‌شوند و ازطریق حذف فلزات سنگین آب را تصفیه می‌کنند (Qasem et al., 2021; Zhang et al., 2023).

علاوه‌بر تصفیه به روش‌های فیزیکی-شیمیایی و کاهش-اکسیداسیون، مطالعاتی درباره فرآیندهای بیولوژیکی جهت تصفیه آب‌های زیرزمینی انجام شده‌است. میکروارگانیسم‌ها و گیاهان متنوعی برای کاهش بیولوژیکی در آب‌های زیرزمینی آلوده استفاده می‌شوند. به‌عنوان مثال، جلبک سبز یک نوع میکروارگانیسم فراوان، مقرون‌به‌صرفه، سازگار با محیط‌زیست و با کیفیت بالا جهت پاک‌سازی زیستی آب‌های آلوده می باشد (Juda et al., 2023). هورتادو مارتینز و همکاران وی در سال ۲۰۲۱ تصفیه بیولوژیکی آب‌های زیرزمینی را به‌منظور کاهش نیترات بررسی کردند (Hurtado-Martinez et al., 2021).

در عصر امروز نانوتکنولوژی با استفاده از مواد و فناوری های پیشرفته، تصفیه، حفاظت و استفاده مجدد از آب و همچنین دسترسی طولانی‌مدت به آب آشامیدنی سالم را تضمین می‌کند (Dhass et al., 2023; Bhardwaj et al., 2022). علاوه‌بر این، نانومواد دارای فعالیت کاتالیزوری عالی، واکنش‌پذیری و ویژگی‌های جذب بالا هستند (Saravanan et al., 2022). بهاردواج و همکارانش در مطالعه‌ای دریافتند که نانو پالایش

پتانسیل بالایی برای اصلاح مقادیر عظیمی از آلاینده‌ها در محل، کاهش زمان پاک‌سازی و کاستن غلظت آلودگی (نزدیک به صفر) را دارد (Bhardwaj et al., 2022).

نانومواد با روش‌های مختلفی چون سولوترمال (Ngoc et al., 2023)، میکروامولسیون (Salabat and Mirhoseini et al., 2022)، هم‌رسوبی (Lou et al., 2022)، پلیمریزاسیون شیمیایی و اتصال متقابل (Heybet et al., 2021)، هم‌رسوبی، اکسیداسیون شیمیایی و اتصال متقابل (Ding et al., 2021)، ته نشینی هم‌زمان یون و برهم‌کنش الکترواستاتیک (Wang et al., 2021)، روش هیدروترمال (Munisha et al., 2023)، رسوب الکتروشیمیایی (Mah et al., 2016)، روش شیمیایی مرطوب (Ansari et al., 2016) و کاهش زیستی (LSd et al., 2023) و غیره سنتز می‌شوند.

ساها و همکارانش در سال ۲۰۲۱ جداسازی مغناطیسی، سریع و انتخابی اورانیوم شش ظرفیتی را در آب زیرزمینی با استفاده از نانوذرات سیترات-فریت پشتیبانی‌شده بر روی نقره و عامل‌دار شده با فسفورامیدات بررسی کردند و دریافتند که این نانوذرات عامل‌دار، انعطاف‌پذیری بالایی در برابر تعداد زیادی از یون‌های فلزی نشان می‌دهند (Saha et al., 2021). روبلدو-پرالتا و همکارانش در مطالعه‌ای مروری نشان دادند که نانوذرات مغناطیسی اکسید فلزی کبالت و منگنز برای حذف آرسنیک با راندمان بیش از ۹۵ درصد کارا بوده‌اند (Robledo-Peralta et al., 2021). راویندران و همکاران او در سال ۲۰۲۲ نانوذرات سیلیس را جهت کاهش آلودگی باکتریایی آب‌های زیرزمینی بررسی کردند. نتایج مطالعات آن‌ها نشان داد که نانوذرات سیلیس، مقرون به‌صرفه بوده و راندمان ضدباکتریایی بالایی دارند (Ravindran et al., 2022). در سال ۲۰۲۲، تائو و همکاران او برای اولین بار مشخص کردند که نانوذرات بیسموت (III) سولفید به طور مؤثر حذف کروم شش‌ظرفیتی را از محلول‌های آبی در حضور هم‌زمان یون‌های مختلف ارائه می‌دهد (Tao et al., 2022).

مطالعه‌ای توسط عبداللطیف و همکاران وی جهت کاهش نیترات از آب زیرزمینی صورت پذیرفت و نانوذرات آهن صفر ظرفیتی، در شرایط بهینه راندمان حذف حدود ۹۱ درصد را نشان دادند (Abdel-Lateef et al., 2022). حمزه و همکاران او سنتز و توسعه نانوذرات کیتوزان مغناطیسی را برای حذف یون‌های کادمیوم دو ظرفیتی از آب زیرزمینی با راندمان بالا بررسی کردند. این نانوذرات توانایی حذف ۹۸ درصدی کادمیوم را از آب‌های زیرزمینی آلوده چند فلزی نشان دادند (Hamza et al., 2022). در سال ۲۰۲۳ نیز مامون و همکارانش در کار تحقیقاتی خود، تزریق نانوذرات آهن کپسوله‌شده با هیدروکسید منیزیم (nFe0@Mg (OH)2) را در یک سیستم تصفیه آب زیرزمینی انجام دادند و به نتایج عالی دست‌یافتند (راندمان حذف حدود ۱۰۰ درصد کروم شش‌ظرفیتی) (Maamoun et al., 2023). سلیمان و همکاران وی طی مطالعه‌ای دریافتند که نانوذرات فوتو کاتالیزوری پالادیم-نقره ساپورت‌شده بر روی کربن فعال، در تصفیه نیترات در آب زیرزمینی موفقیت‌آمیز هستند (Soliman et al., 2022).

در مطالعه حاضر، ضمن بررسی تحلیلی پاره‌ای از عوامل ایجاد آلودگی در آبخوان‌ها، انواع روش‌های گوناگون تصفیه آبخوان‌های آلوده (شامل روش‌های کم‌هزینه و سنتی، فیزیکی-شیمیایی، بیولوژیکی و غیره) از دیرباز تاکنون با تکیه بر نانوذرات فلزی شرح داده‌شده‌است. نوآوری این مطالعه مروری نیز بررسی مزایا و معایب تکنیک‌های مختلف تصفیه جهت حذف آلودگی از آب های زیرزمینی می‌باشد.

برخی از آلاینده‌های آب زیرزمینی

از آن‌جایی که جهان با خطر کمبود آب مواجه است، پایش کیفی منابع آب شیرین مانند آب‌های زیرزمینی از اهمیت زیادی برخوردار می‌باشد (Kurniawan et al., 2023). تخلیه صنعتی، فعالیت‌شهری و کشاورزی، فعالیت‌های انسانی و دفع زباله نیز بر کیفیت آب‌های زیرزمینی تأثیر می‌گذارند (Abanyie et al., 2023). در ادامه پاره‌ای از این آلاینده‌ها شرح داده شده‌است.

۱،۲. آرسنیک

آرسنیک یکی از سمی‌ترین عناصر شیمیایی در طبیعت است. سطح بالای آرسنیک در آب‌های زیرزمینی به

کیفیت آب آشامیدنی آسیب می‌رساند و برای انسان و حیوانات بسیار خطرناک است (شکل ۱) (Algieri et al., 2022).

در آبخوان‌ها، As (III) و As (V) گونه‌های غالبی هستند که به شکل‌های آنیونی وجود دارند (Sarkar et al., 2022). همچنین در شرایط بدون اکسیژن، آرسنیک به‌شکل گونه‌های غیر یونی ($H3AsO3$) و آنیونی ($H2AsO3^-$) وجود دارد، درحالی‌که در شرایط اکسیداسیون $HAsO42^-$، $H2AsO4^-$ و $H3AsO4$ اشکال غالب آرسنات هستند (Kurniawan et al., 2023). مطالعات نشان داده‌اند در آب‌های زیرزمینی، As (III) در مقایسه با As (V) بسیار سمی می‌باشد (Rahman and Singh, 2019).

انتشار آرسنیک معمولاً ازطریق جریان‌های آبی می‌باشد که توسط منابع بیولوژیکی و مصنوعی به محیط تخلیه می‌شوند. همچنین ذوب فلزات، تخلیه سوخت‌ها (عمدتاً زغال‌سنگ قهوه‌ای) و آفت‌کش‌ها و... از منابع انتشار مصنوعی آرسنیک هستند (Alka et al., 2023). بیشتر مناطق آلوده به آرسنیک در نزدیکی معادن، کمربندهای کوهستانی و مناطق دلتای رودخانه واقع شده‌اند (Bundschuh et al., 2022).

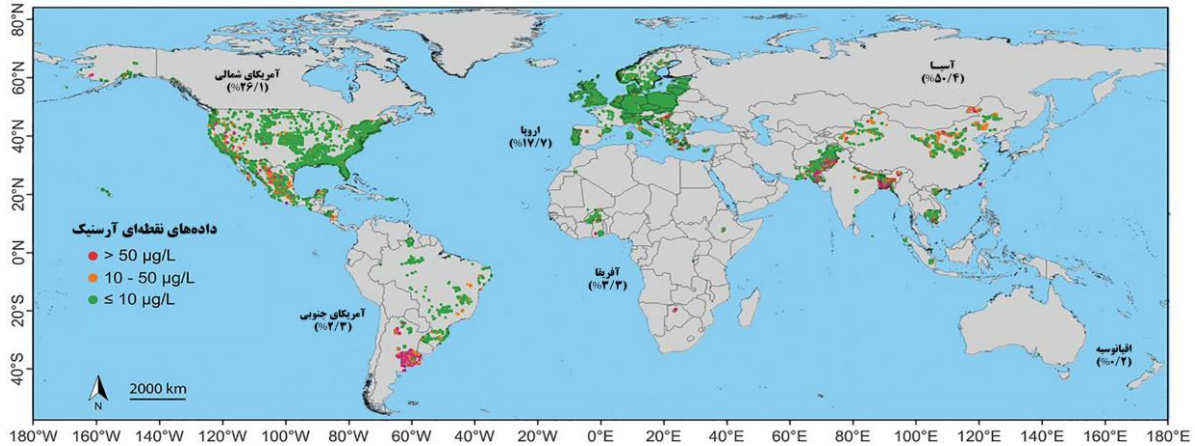
طبق استاندارد آژانس حفاظت محیط‌زیست ایالات متحده آمریکا، آستانه غلظت آرسنیک در آب‌آشامیدنی ۰/۰۱ میلی‌گرم بر لیتر می‌باشد. میزان مجاز آرسنیک در آب آشامیدنی، براساس اعلام سازمان جهانی بهداشت نیز ۰/۰۵ میلی‌گرم بر لیتر بیان شده‌است (Herath et al., 2016; Kamble et al., 2024).

از این‌رو روش‌های حذف آرسنیک از آب‌های زیرزمینی شامل روش‌های سنتی از قبیل ته‌نشینی-فیلتراسیون، انعقاد، تبادل‌یونی، کاهش-اکسیداسیون و جذب و تکنولوژی‌های جدیدی چون میکروفیلتراسیون، اولترافیلتراسیون، نانوفیلتراسیون، اسمزمعکوس و نانوکاتالیست‌ها هستند (Kapahi and Sachdeva, 2019; Chiavola et al., 2019 and Islam et al., 2023).

۲،۲. جیوه

جیوه یک فلز سنگین، بسیار سمی و با تحرک بالا است و نسبت به سایر فلزات سنگین سمیت بیشتری دارد. علاوه‌بر این، به تجمع و بزرگ‌نمایی زیستی در اکوسیستم تمایل بالایی نشان می‌دهد (Rashid et al., 2022). Hg0 با اکسیداسیون فتوشیمیایی، به Hg (II) تبدیل می‌شود. جیوه صفر ظرفیتی نیز در شرایط بی هوازی، به متیل جیوه (MeHg) تبدیل می‌گردد (Singh et al., 2023).

جیوه، به‌طور طبیعی در آتش‌سوزی جنگل‌ها و آتشفشان‌ها دیده می‌شود. فلز جیوه، هوا، آب و خاک را آلوده کرده و اثرات مضری بر روی گیاهان و حیوانات حتی در غلظت‌های کم دارد. این آلاینده از طریق فعالیت‌های صنعتی مانند تولید سود سوزآور، گاز کلر، استخراج نقره و طلا (از سنگ معدن آن‌ها)، اجزای باتری، کلیدهای برق، فشارسنج‌ها، دماسنج‌ها و... وارد محیط زیست می‌شود (شکل ۲) (Pavithra et al., 2023; Singh et al., 2023).



شکل ۱. پراکنش آرسنیک (برحسب غلظت) در اعماق کم‌تر از ۱۰۰ متر (Podgorski and Berg, 2020).

Fig 1. Arsenic Distribution (In Terms Of Concentration) At Depths Less Than 100 Meters (Podgorski and Berg, 2020).

براساس آمار سازمان جهانی بهداشت، جیوه یکی از ده ماده شیمیایی مورد توجه بوده و حد مجاز آن ۰/۰۰۲ میلی‌گرم در لیتر مشاهده شده‌است. Hg توسط برنامه محیط‌زیست سازمان ملل متحد (UNEP) نیز به‌عنوان یک آلاینده خطرناک در جهان شناخته می‌شود (Pavithra et al., 2023; Ahmad et al., 2020).

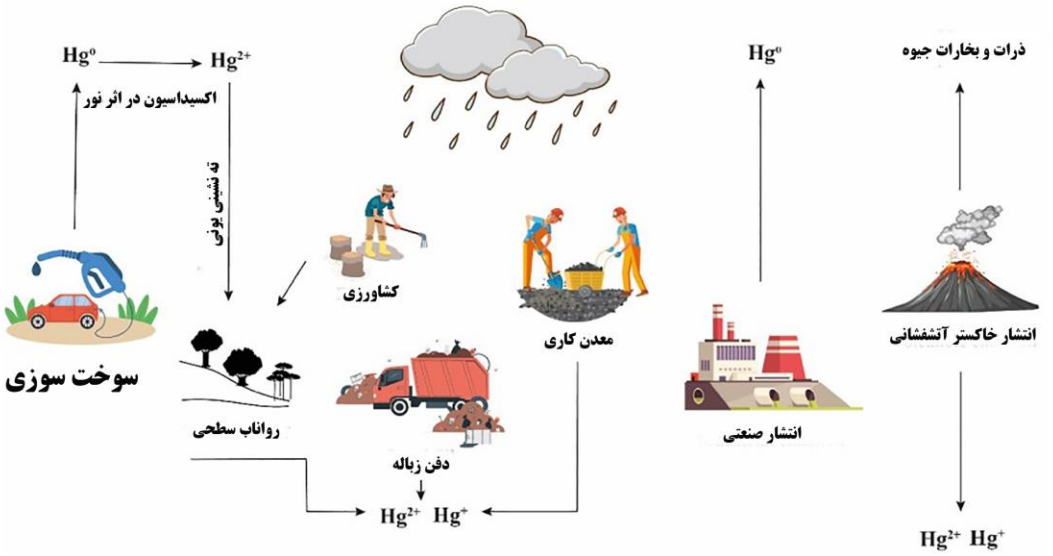
در مقایسه با سایر فلزات، تخریب جیوه در اکوسیستم آسان نیست و روش‌هایی مانند اکسیداسیون، کاهش و جذب، جیوه را از مکان‌های آلوده جدا می‌کند. فتوکاتالیست، نانوفناوری و روش‌های اکسیداسیون پیشرفته و غیره نیز جیوه مضر را به گونه‌های با ضرر کمتر تبدیل می‌نمایند (Cui et al., 2021; Ghosh et al., 2022 and Emenike et al., 2023).

۳،۲. کروم

کروم یک آلاینده سرطان‌زا در آب‌های زیرزمینی شناخته شده‌است که منشأ زمین‌زایی (هوازدگی شیمیایی مواد معدنی حاوی کروم) و انسانی (آبکاری، رنگ، صنایع چرم و غیره) دارد (Vijayakumar et al., 2022; Acharya et al., 2023). کروم عمدتاً در حالت‌های اکسیداسیون شش ظرفیتی [Cr (VI)] و سه‌ظرفیتی [Cr (III)] وجود دارد. از نظر سمیت نیز کروم شش‌ظرفیتی سرطان‌زا است، درحالی که کروم سه‌ظرفیتی یک ریزمغذی اساسی می‌باشد. بنابراین در آب‌های زیرزمینی آلوده به کروم، معمولاً شکل غالب، پایدار و سمی آن (کروم شش‌ظرفیتی) ازطریق مصرف آب وارد زنجیره غذایی انسان می‌شود (Hausladen et al., 2018).

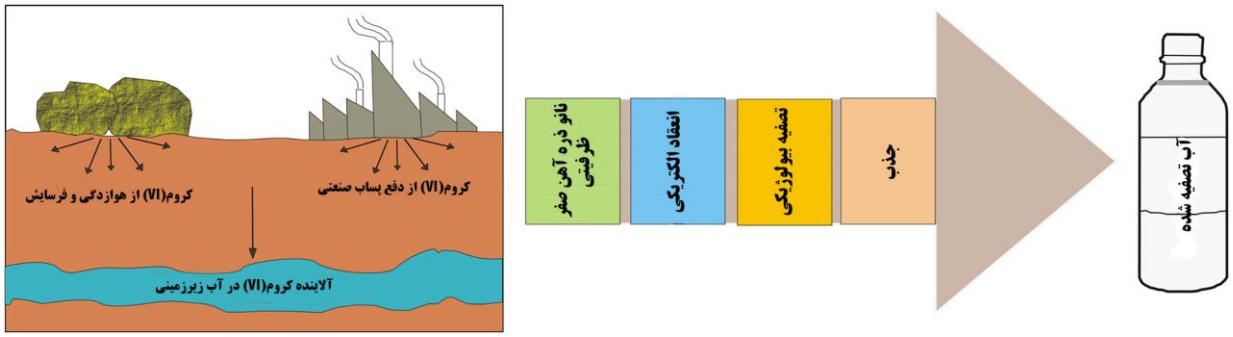
علاوه بر معدن کرومیت، صنعت چرم، آبکاری فلزات، باتری و صنایع رنگرزی و غیره از ترکیبات کروم برای مقاصد مختلف استفاده می‌کنند و پساب‌های این صنایع نیز آلودگی ناشی از کروم را ایجاد می‌کنند (Das et al., 2021; Karunanidhi et al., 2021). طبق اعلام سازمان جهانی بهداشت، حد مجاز کل کروم در آب آشامیدنی ۵۰ میکروگرم در لیتر است.

رویکردهای مختلفی مانند جداسازی، تصفیه شیمیایی، الکتروکینتیک، فرآیندهای بیوشیمیایی، گیاه‌پالایی، جذب، انعقاد، تبادل یونی، الکترودیالیز و حذف بیولوژیکی جهت حذف کروم شش‌ظرفیتی از آب ارائه شده‌است (شکل ۳) (Kerur et al., 2021; Acharya et al., 2023). امروزه روش‌های جدیدی چون استفاده از انواع نانوکاتالیست‌ها جهت کاهش کروم (VI) در آب نیز مطرح شده‌اند (Biswas et al., 2023).



شکل ۲. چرخه ژئوشیمیایی جیوه (Pavithra et al., 2023).

Fig 2. Geochemical Cycle of Mercury (Pavithra et al., 2023).



شکل ۳. برخی از فرآیندهای تصفیه کروم شش ظرفیتی در آب زیرزمینی (Acharya et al., 2023).

Fig 3. Some Hexavalent Chromium Treatment Processes In Groundwater (Acharya et al., 2023).

۴،۲. فلوراید

سلامت میلیون‌ها نفر در سراسر جهان، تحت تأثیر قرارگرفتن در معرض غلظت‌های بالای فلوراید زمین‌زا در آب های زیرزمینی می‌باشد (Podgorski and Berg, 2022). عنصر فلوئور که در پوسته زمین فراوان است، مواد معدنی فلوراید (F-) را تشکیل می‌دهد که به‌طور طبیعی در خاک و رسوبات سفره‌های آب زیرزمینی یافت می‌شود و منجر به تجمع فلوراید در منابع آب شیرین می‌گردد (Schlesinger et al., 2020).

غلظت‌های بالای فلوراید اغلب در سفره‌های آب زیرزمینی، سنگ‌های آذرین اسیدی، سنگ‌های آتشفشانی و مناطق زمین‌گرمایی و همچنین رسوبات و سنگ‌های دگرگونی و غیره یافت می‌شوند. علاوه بر این، فعالیت‌های انسانی از قبیل استفاده از کود، احتراق زغال‌سنگ و تغذیه مدیریت نشده آبخوان و غیره می‌تواند منجر به ورود بیشتر فلوراید به آب‌های زیرزمینی گردد (He et al., 2020; Schafer et al., 2020).

حد فلوراید براساس استاندارد WHO برای آب آشامیدنی ۱/۵ میلی‌گرم در لیتر است (WHO, 2021). شکل ۴ نشان داده که تکنیک‌های مختلف فلوئورزدایی ازجمله انعقاد، جداسازی غشایی (اسمز معکوس، الکترودیالیز و نانوفیلتراسیون)، تبادل یونی و جذب و غیره جهت تصفیه آب‌های زیرزمینی آلوده وجود دارند (Kashyap et al., 2023; Yadav et al., 2021).

۵،۲. نیترات

نیترات یک آلاینده در محیط زیرسطحی و شکل پایدار نیتروژن است که در سیستم‌های زیرزمینی انباشته‌شده‌است. غلظت بالای نیترات می‌تواند نشان‌دهنده حضور منابع انسانی باشد (Rahman et al., 2021). یون‌هایNO_3^- نیز پایدارترین و متحرک‌ترین گونه‌های نیتروژن در آب هستند (Cellone et al., 2020).

ترکیبات نیتروژن‌دار به‌طور طبیعی در محیط‌های مختلفی مانند روابط هم‌زیستی گیاهان و میکروب‌ها، جو و سنگ‌های آذرین در دسترس هستند. بااین‌حال، فعالیت‌های انسانی مانند افزایش استفاده از کودهای نیتروژن‌دار، دفع نامناسب فضولات حیوانی و نشت فاضلاب از سیستم‌های فاضلاب و سپتیک، آلودگی نیترات در آب‌های زیرزمینی را در سال‌های اخیر افزایش داده‌است. به‌عنوان مثال، در شکل ۵ عوامل اصلی افزایش آلودگی نیترات در جلگه سند و گنگ ارائه شده‌است. (Ren et al., 2022; Gutiérrez et al., 2018).

آستانه غلظت نیترات نیز توسط شورای اتحادیه اروپا، سازمان بهداشت جهانی و آژانس حفاظت از محیط‌زیست ایالات متحده کمتر از ۵۰ میلی‌گرم در لیتر تعیین شده‌است (Cellone et al., 2020). نیترات در آب‌های زیرزمینی با روش‌های مختلفی کاهش می‌یابد. انعقاد الکتریکی، تکنیک های اصلاح نیترات مبتنی بر غشاء، دییونیزاسیون خازنی، جذب و فرآیند نیترات‌زدایی بیولوژیکی و غیره از این جمله اند (Richa et al., 2022).

نتایج بررسی پاره‌ای از آلاینده‌های رایج و خطرناک موجود در آبخوان‌ها نشان می‌دهد که طبق استاندارد WHO حضور این فلزات در آب آشامیدنی به میزان متعادل ضرورت دارد ولی افزایش بیش‌از حد این عناصر سبب ایجاد آلودگی،

سمیت و خطر برای سلامت بشر می‌گردد. از این‌رو استفاده از تکنیک‌هایی جهت رفع آلودگی آب‌های زیرزمینی اهمیت پیدا می‌کنند.

۳. روش‌های تصفیه آبخوان‌های آلوده

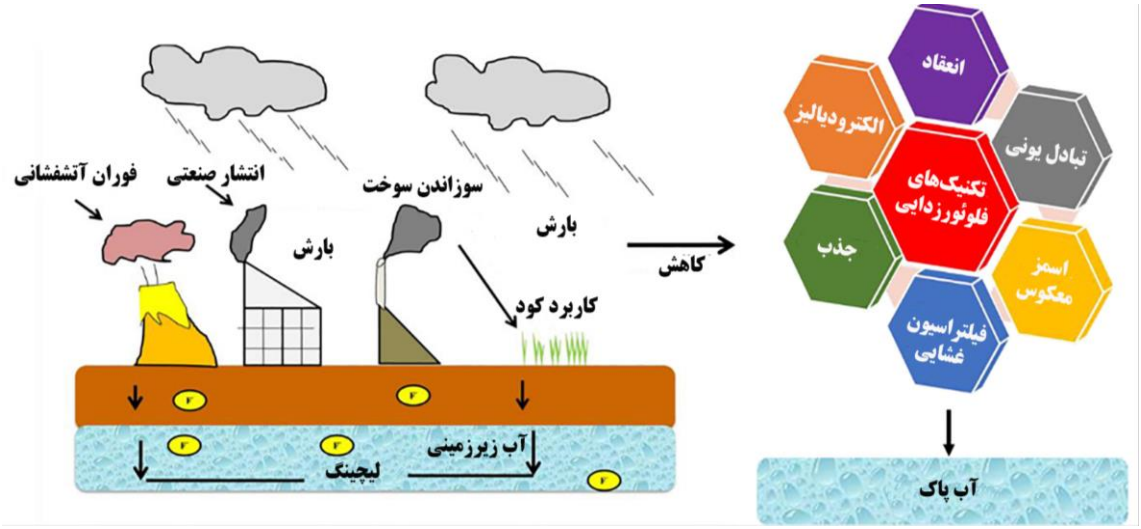
روش‌های مختلفی جهت پاک‌سازی آب‌های زیرزمینی وجود دارد. تصفیه آب‌های زیرزمینی معمولاً براساس مکان مجزا شده و به‌صورت تصفیه درجا و کاهش آلودگی خارج از محل می‌باشند. تصفیه خارج از محل شامل کاهش آلودگی از طریق انتقال آب‌های زیرزمینی به مکان دیگری جهت پاک سازی است. در مقابل، تکنیک‌های تصفیه درجا فرآیندهایی هستند که مستقیماً خاک آبخوان‌های آلوده را پاک‌سازی می‌کنند. تصفیه درجا اغلب به‌دلیل هزینه پایین و کاهش زمان نظارت بر تصفیه خارج از محل برتری دارد (Decesaro et al., 2017; Tabatabai and Akbarpour, 2018).

۱,۳. مواد و فناوری‌های کم‌هزینه در تصفیه آب

دسترسی به آب آشامیدنی سالم و بهداشتی مستلزم استفاده از مواد و فناوری‌های تصفیه محلی و مقرون‌به‌صرفه می‌باشد. ضایعات‌کشاورزی، مواد طبیعی و معدنی و همچنین فناوری های ارزان‌قیمت تصفیه در حذف آلاینده‌ها از آب زیرزمینی کارآمد هستند (Senanu et al., 2023).

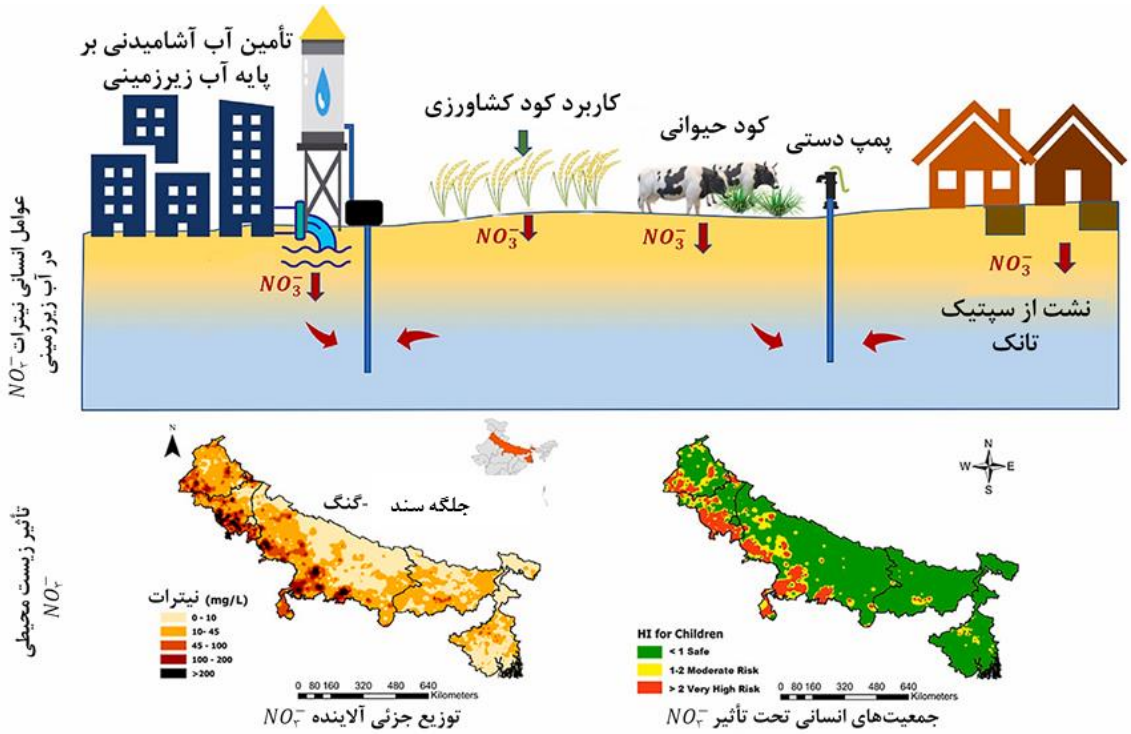
۱,۱,۳. ضایعات‌کشاورزی

ضایعات‌کشاورزی که جاذب‌زیستی نیز نامیده می‌شوند، فراوان و مقرون به‌صرفه بوده و جز فرآیندهای سبز سازگار با محیط‌زیست هستند. این جاذب‌ها، در حالت طبیعی و به صورت اصلاح‌شده، برای حذف فلزات‌سنگین بسیار عالی عمل می‌کنند (Tsade et al., 2020; Yoon et al., 2017).



شکل ۴. تکنیک‌های مختلف فلوئورزدایی (Kashyap et al., 2021).

Fig 4. Different Defluoridation Techniques (Kashyap et al., 2021).



شکل ۵. منابع آلودگی نیترات در آب‌های زیرزمینی جلگه سند و گنگ (Verma et al., 2023).

Fig 5. Sources Of Nitrate Pollution In The Groundwater Of The Indus And Ganges Plains (Verma et al., 2023).

شمس‌الهی و پرتوی نیا در مطالعه‌ای مروری (۲۰۱۹) به بررسی پیشرفت‌های اخیر در حذف آلاینده‌ها توسط پوسته برنج به‌عنوان یک جاذب‌زیستی پرداختند. ایشان استفاده از مواد زائد مانند پوسته برنج را روشی مؤثر و اقتصادی نامیدند (Shamsollahi and Partovinia, 2019). در سال ۲۰۲۱ هربرت و همکاران وی با استفاده از پوسته بادام زمینی به عنوان جاذب، حذف ساده، کم‌هزینه و کارآمد رنگ اورامین را در آب انجام دادند و نتایج عالی را گزارش کردند (Herbert et al., 2021). بوحجره و همکاران او نیز در پژوهشی، ضایعات پوست سیب زمینی را برای حذف رنگ آنیونی سیباکرون بلو از محلول آبی بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که بایوچار پوست سیب‌زمینی کلسینه‌شده می تواند یک جاذب امیدوارکننده برای حذف رنگ‌های پایدار از آب تلقی شود (Bouhadjra et al., 2021).

در مطالعه‌ای توسط تجادا-توار و همکارانش (۲۰۲۲) جذب مداوم نیکل، کادمیوم و سرب با استفاده از یک ستون بستر مملو از پوسته غلاف کاکائو که به‌طور گسترده در منطقه شمالی کلمبیا موجود است، ارزیابی شد. نتایج این مطالعه نشان داد عملکرد حذف سرب نسبت به نیکل و کادمیوم امیدوارکننده‌تر بوده‌است. همچنین مکانیسم جذب فلزات بر روی پوسته غلاف کاکائو به‌دلیل وجود کلسیم، پتاسیم و سیلیسیم در ساختار جاذب زیستی می‌باشد (Tejada-Tovar et al., 2022). شاهاجی و همکارانش در سال ۲۰۲۳، به بررسی کارایی جاذب پوست‌پرتقال و کاه‌گندم در حذف نیترات از محلول‌های آبی پرداختند. نتایج مطالعات ایشان نشان داد که این مواد در کاهش آلودگی نیترات کارآمد و مقرون‌به‌صرفه هستند (Shahaji et al., 2023).

هماگای و همکارانش نیز، ساقه ذرت توسعه‌یافته را توسط یک فرآیند شیمیایی با استفاده از ساقه ذرت زغالی تهیه کردند. این جاذب توانایی بالایی را جهت حذف یون‌های نیترات و نیتریت از محیط‌های آبی نشان داد (Homagai et al., 2023).

به نظر می‌رسد استفاده از ضایعات‌کشاورزی به‌دلیل مقرون به‌صرفه بودن، فراوانی، دسترسی آسان، سازگاری با محیط

زیست، نسبت به روش‌های تصفیه شیمیایی و غیره می‌تواند مانند یک فیلتر طبیعی در تصفیه درجا و خارج از محل عمل کرده و ناخالصی‌ها و آلاینده‌ها را از آب‌های زیرزمینی حذف نماید. معایب استفاده از پسماندهای کشاورزی نیز عدم دسترسی ثابت در همه مناطق، اثربخشی محدود باتوجه به نوع آلاینده و کیفیت متفاوت براساس نوع منبع ضایعات و منطقه کشت محصول می‌باشد.

۲،۱،۳. رس‌های طبیعی و ذخایر معدنی

رس‌ها دارای ساختاری حاوی یون‌های سیلیس، آلومینا و سایر اکسیدهای فلزی هستند. خاک رس براساس ترکیب شیمیایی‌اش در اشکال مختلف مانند بنتونیت، کائولینیت و غیره وجود دارد (Dassanayake et al., 2023).

یی و همکارانش در تحقیقی (۲۰۱۹)، تصفیه آب‌های زیرزمینی آلوده را ازطریق جذب As (V) با غلظت اولیه ۵۰/۹۹ میکروگرم در لیتر و با استفاده از بنتونیت پوشش داده‌شده با کیتوزان موردبررسی قرار دادند. آن‌ها دریافتند که جاذب مدنظر یک ماده ایمن از نظر محیط‌زیست و مقرون‌به‌صرفه است و می‌تواند برای اصلاح As (V) از آب های زیرزمینی آلوده استفاده گردد (Yee et al., 2019). زئولیت طبیعی و مصنوعی فعال‌شده جهت حذف کارآمد سختی کل ناشی از کلسیم و منیزیم از محلول‌های آبی و آب‌های زیرزمینی آزمایش شدند و ظرفیت جذب بسیار بالایی را نشان دادند (Nasief et al., 2021). در سال ۲۰۲۲، حذف لیتیم (Li) و مولیبدن (Mo) از آب‌های زیرزمینی با استفاده از بنتونیت و کربن فعال و غیره به‌عنوان جاذب تحت پارامترهای آزمایشی مختلف ازجمله pH، غلظت اولیه و دما بررسی شد. بررسی‌های احمد و همکارانش نشان داد در دمای ۳۵ درجه سانتی‌گراد، راندمان جذب لیتیم و مولیبدن با استفاده از بنتونیت به‌ترتیب ۶۳ و ۳۲ درصد می‌باشد (Ahmad et al., 2022).

پتروویچ و همکاران او در سال ۲۰۲۳ خاک‌های رس کائولینیت-ایلیت و سپیولیت را جهت حذف کروم (III) از محلول‌های آبی مورداستفاده قرار دادند. نتایج مطالعات ایشان نشان داد با افزایش pH و غلظت کروم (III)، احتمال ته‌نشینی $Cr(OH)_3$ بیشتر شده و ظرفیت حذف بالاتر می رود (Petrovic et al., 2023).

براساس مطالعات ذکرشده، استفاده از ذخایر معدنی برای تصفیه در جای آب‌های زیرزمینی هزینه بسیار کمتری نسبت به مواد شیمیایی دارد. این مواد دوستدار محیط‌زیست بوده‌اند و سبب حذف مؤثر آلاینده‌ها می‌گردند. اما فرآیند آهسته تصفیه و عدم دسترسی یکسان به این مواد در مناطق مختلف از معایب این روش تصفیه می‌باشد.

۳،۱،۳. فناوری‌های تصفیه در محل

امکانات تصفیه آب خانگی که برای تصفیه آب‌آشامیدنی در اختیار افراد قرار می‌گیرد، همان فناوری‌های تصفیه در محل یا در نقطه‌استفاده هستند. این فناوری‌ها شامل گندزدایی، کلرزنی و فیلترهای آب سرامیکی است (Wu et al., 2021).

سیستم‌های تصفیه در محل معمولی شامل فناوری‌های تصفیه آب مانند فیلتراسیون، غشاهای اسمز معکوس (RO)، ضد عفونی UV و معدنی‌سازی مجدد (به‌ویژه پس از RO) هستند (Hoek et al., 2022).

فیلترهای آب سرامیکی (CWF) که از مواد محلی ساخته شده و توسط نیروی کار محلی تولید می‌شوند، نظر به کارایی، هزینه کم و سهولت استفاده، یکی از قابل قبول‌ترین فناوری‌های تصفیه آب در نقطه‌استفاده از نظر اجتماعی هستند (شکل ۶) (Yang et al., 2020).

در سال ۲۰۱۶، نور مرادی و همکاران وی، در تحقیقی تأثیر دستگاه‌های تصفیه آب‌خانگی بر کیفیت میکروبی و شیمیایی آب آشامیدنی شهر ایلام را بررسی کردند. نتایج مطالعات ایشان نشان داد که دستگاه تصفیه آب‌خانگی در حذف آلودگی‌های میکروبی راندمان قابل قبولی ندارند زیرا این سیستم‌ها سبب حذف کامل کلر آزاد باقی‌مانده در آب شده که می‌تواند زمینه آلودگی میکروبی ثانویه آب را فراهم سازد (NoorMoradi et al., 2016). نتایج مطالعات ولایت زاده و پاینده در سال ۲۰۱۸ نشان داد که مقادیر فلزاتی چون کلسیم، پتاسیم، منیزیم، سدیم، روی، آهن، منگنز، مس، کبالت و کروم در آب خروجی دستگاه‌های تصفیه‌آب خانگی شهر اهواز کمتر از مقادیر به دست‌آمده در آب

ورودی می‌باشد. بنابراین این دستگاه‌ها به‌طور موفقیت‌آمیزی سبب کاهش فلزات‌سنگین شدند (Velayatzadeh and Payandeh, 2018).

مزایای فناوری‌های تصفیه در محل، رفع آلودگی خارج از محل آب‌های زیرزمینی، نصب آسان، مقرون به‌صرفه بودن نسبت به سیستم‌های تصفیه متمرکز، بهبود کیفیت آب و استفاده راحت از این تکنولوژی‌ها می‌باشد. البته ظرفیت محدود، تعمیر و نگهداری مستمر، محدودیت در حذف انواع آلاینده‌ها و انرژی مورد نیاز و غیره می‌تواند از محدودیت‌های این فناوری باشد.

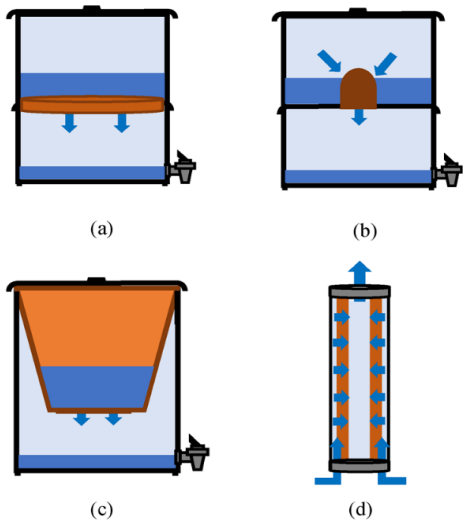
۲،۳. روش‌های فیزیکی- شیمیایی

۱،۲،۳. ته‌نشینی

به‌دلیل سادگی در فرآیند و تجهیزات موردنیاز، ته‌نشینی معمولاً برای تصفیه آب‌های زیرزمینی آلوده استفاده می‌شود (Kurniawan et al., 2022). آلینا پول در سال ۲۰۲۰ دریافت که ته‌نشینی شیمیایی بااستفاده از هیدروکسیدها یا سولفیدها یکی از متداول‌ترین روش‌های مورداستفاده برای حذف فلزات از آب و فاضلاب است. در واقع این روش فرآیندی ساده و کم‌هزینه به نظر می‌رسد (Pohl, 2020).

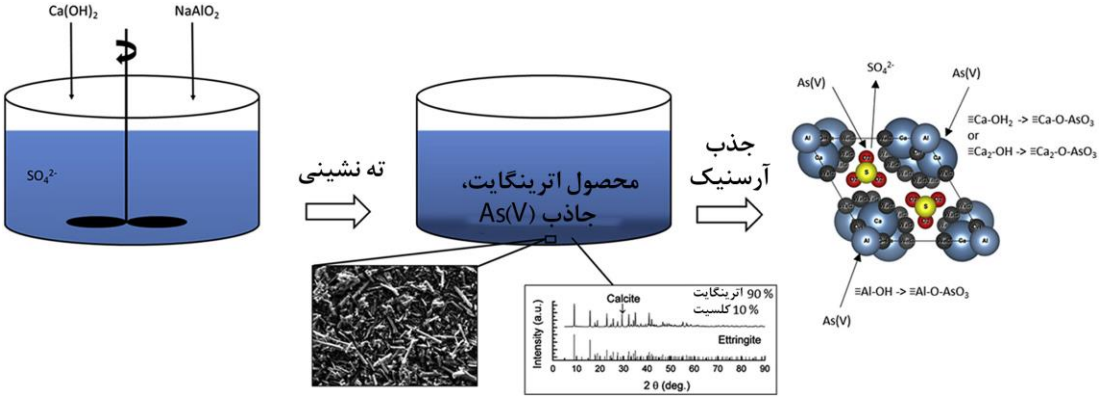
در سال ۲۰۲۲ نیز، رویکردی مبتنی بر استفاده از کلسیم برای ته‌نشینی آرسنیک در محلول و افزودن بایوچار اصلاح نشده برای بهبود فرآیند ته‌نشینی استفاده‌شد. بااستفاده از این روش، غلظت As (III) در محلول‌های آبی با افزودن بایوچار ۵۸/۱ درصد در مقایسه با غیاب بایوچار کاهش یافت (Zama et al., 2022). مکانیسم‌های جذب هیدروکسیدهای دو لایه‌ای نیز برای فرآیند ته‌نشینی فلزات سنگینی مانند مس (II)، سرب (II) و کادمیم (II) موفقیت آمیز بود. نتایج این پژوهش در سال ۲۰۲۳ نشان داد که با افزودن پلی‌اتیلن‌گلیکول، سهم رسوب فلزات سنگین افزایش یافته و میزان استفاده از کمپلکس کاهش پیدا می‌کند (Song et al., 2023).

طبق مطالعات ذکرشده، روش ته‌نشینی، روش تصفیه‌ای است که با افزودن یک ماده شیمیایی به آبخوان آلوده و تشکیل یک رسوب نامحلول، آب زیرزمینی را تصفیه می‌کند. این روش برای حذف فلزات سنگین مؤثر می‌باشد. نسبت به سایر روش‌ها به تجهیزات کمتری نیاز دارد. نسبتاً ساده بوده و امکان حذف هم‌زمان چند آلاینده را فراهم می‌آورد. هرچند که دفع لجن و ایجاد آلودگی ثانویه ممکن است استفاده از این روش را با محدودیت روبه‌رو سازد.



شکل ۶. شماتیک اشکال مختلف فیلترهای آب سرامیکی: (a) فیلتر دیسکی سرامیکی، (b) فیلتر شمع سرامیکی، (c) فیلتر قابلمه سرامیکی، (d) فیلتر سرامیکی لوله‌ای (Yang et al., 2020).

Fig 6. Schematic Of Different Forms Of Ceramic Water Filters: (a) Ceramic Disc Filter, (b) Ceramic Pile Filter, (c) Ceramic Pot Filter, (d) Ceramic Tube Filter (Yang et al., 2020).



شکل ۷. بررسی حذف سولفات از آب معدن با روش ته‌نشینی (Tolonen et al., 2016).

Fig 7. Investigation Of Sulfate Removal From Mine Water By Sedimentation Method (Tolonen et al., 2016).

۲،۲،۳. انعقاد

استفاده از مواد منعقدکننده، باعث کاهش هزینه‌های آب آشامیدنی می‌شود. این مواد شیمیایی با حذف ذرات موجود در محلول‌ها و با اصلاح بارالکتریکی آن‌ها، کیفیت آب آشامیدنی را بهبود می‌بخشند (Ng et al., 2021; Cui et al., 2020). مطالعه‌ای در سال ۲۰۲۱ نشان داد که منعقدکننده‌های طبیعی و گیاهی پتانسیل جایگزینی با منعقدکننده‌های شیمیایی در فرآیند تصفیه آب را دارند. در این مطالعه، پتانسیل مواد منعقدکننده طبیعی و گیاهی در حذف کدورت از آب شناسایی شد (Ng et al., 2021).

درسال‌های اخیر، میکروپلاستیک‌ها، به‌عنوان آلاینده‌ای نوظهور با توزیع گسترده در آب و تأثیر پایدار زیست‌محیطی، نگرانی‌های زیادی را ایجاد کرده‌اند. هه و همکارانش دریافتند سیستم‌ترکیبی انعقاد پلی‌آلومینیوم کلرید و پلی آکریل‌آمید آنیونی می‌توانند راندمان‌حذف MP را به‌طور قابل‌توجهی (بیش از ۹۹ درصد) بهبود بخشند (He et al., 2022). در سال ۲۰۲۳، ساهو و همکاران وی دریافتند که در سرباره‌های آهن اجزای زیادی مانند آهن، سدیم، کلسیم، منیزیم و سیلیکون وجود دارد که آن را به یک ماده ایده‌آل برای تصفیه آب و فاضلاب تبدیل می‌نماید. در این تحقیق پتانسیل سرباره آهنی به‌عنوان منعقدکننده و جاذب در سفره‌های خاکی و محیط‌های بستر تالاب، مورد بررسی قرارگرفت (Sahu et al., 2023).

از معایب روش انعقاد می‌توان به هزینه بالای مواد منعقدکننده، تولید لجن و محصولات جانبی مخل سلامتی، زمان‌بر بودن و اثربخشی محدود در کاهش آلاینده‌های آب و غیره اشاره کرد (Zeng et al., 2023).

منعقدکننده‌ها برای تصفیه آبخوان‌های آلوده مؤثر عمل کرده و می‌توانند با حذف بیشتر ذرات معلق از آب، کارایی فرآیند تصفیه را افزایش دهند. استفاده از منعقدکننده‌ها عموماً بی‌خطر هستند و خطر قابل‌توجهی برای سلامت انسان یا محیط‌زیست ندارند. این مواد می‌توانند برای تصفیه طیف وسیعی از آلاینده‌ها ازجمله فلزات سنگین، ترکیبات آلی و باکتری‌ها استفاده شوند.

۳،۲،۳. فیلتراسیون غشایی

فناوری‌های غشایی به‌عنوان یک فرآیند جداسازی قدرتمند در تصفیه آب آشامیدنی به‌دلیل راندمان بالای دفع آلاینده‌ها شناخته شده‌اند (Kurniawan et al., 2022). فیلتراسیون غشایی عملیات جداسازی جامدات از یک سوسپانسیون است و از نظر محیطی پایدار می‌باشد. این‌روش فرایندی مبتنی بر فشار بوده و جهت جداسازی آلاینده‌ها از محلول‌های آبی براساس اندازه‌منافذ و اندازه‌ذرات آلاینده‌ها، به دسته‌های مختلف تقسیم می‌گردد (Razali et al.,2023; Barhoum et al., 2023).

اولترافیلتراسیون معمولاً برای جداسازی مواد آلی طبیعی و نانوفیلتراسیون عمدتاً برای دفع یون‌های دو ظرفیتی استفاده می‌شود، در صورتی که مواد آلی طبیعی و فلزات سنگین به

طور هم‌زمان ازطریق فرآیند تصفیه آب مبتنی بر UF حذف شوند، نرخ تولید بالای آب و مصرف انرژی کم حاصل خواهد شد (Ma et al., 2023).

مصلحیانی و همکاران وی در سال ۲۰۱۹ بیان کردند غشاهای اولترافیلتراسیون با هدف بهبود عملکرد و تثبیت آلاینده‌ها در کاربردهای تصفیه آب و فاضلاب طراحی شده اند. نتایج مطالعات ایشان نشان‌داد که فرآیندهای غشایی پتانسیل بالایی در حذف ذرات، ازجمله میکروارگانیسم‌ها، آلاینده‌های آلی و نمک‌های معدنی و غیره دارند (Moslehyani et al., 2019). در سال ۲۰۲۰، پژوهشی توسط یو و همکارانش صورت گرفت. نتایج مطالعات ایشان نشان داد که سیستم UF حذف مواد آلی را ۹ تا ۱۴/۷ درصد بهبود می‌بخشد (Yu et al., 2020). ما و همکاران وی (۲۰۲۳)، غشای UF مبتنی بر پلی اتر سولفون اصلاح شده با پلی اتیلن ایمین را جهت حذف هم‌زمان اسید هیومیک (HA) و مس (Cu) در آب استفاده کردند. در این مطالعه، عملکرد غشاء در راندمان حذف آلاینده‌ها بسیارعالی گزارش شد (شکل ۹) (Ma et al., 2023).

در نانوفیلتراسیون، فرآیند جداسازی ذرات با اندازه منافذ از ۱ تا ۳ نانومتر صورت می‌گیرد. غشاهای NF را می‌توان به روشی انعطاف‌پذیر طراحی و بهینه کرد تا کارایی خود را در تولید آب آشامیدنی با مصرف انرژی کمتر به حداکثر برسانند (Guo et al., 2022). فیگولی و همکاران او در سال ۲۰۲۰ دریافتند نانوفیلتراسیون جهت اصلاح آب‌های زیرزمینی آلوده به As (V) به‌طور موفقیت‌آمیز عمل نموده و غلظت آرسنیک پنج‌ظرفیتی را به کمتر ۱۰pbb رسانده است (Figoli et al., 2020). غلامی و همکاران وی در سال ۲۰۲۰ در مطالعه‌ای، غشای نانوفیلتراسیون نانو کامپوزیتی لایه نازک را سنتز کردند. ایشان دریافتند که خواص غشاء های نانویی در کاهش HAsO4-2، NO3- و NH4 از آب های زیرزمینی آلوده قابل‌توجه می‌باشد. همچنین دفع آرسنیک توسط این غشای NF به‌دلیل لایه‌های فعال با گروه‌های فراوان آمینی در مقایسه با سایر غشاءها ۱۵ درصد افزایش می‌یابد (Gholami et al., 2020). سریواستاوا و همکارانش (۲۰۲۲) سیستم ترکیبی NF و RO را جهت اصلاح آب‌های زیرزمینی شور موردبررسی قراردادند. نتایج مطالعات ایشان نشان داد با وجود این‌که غشای RO بیش از ۹۹ درصد TDS را در آب‌های زیرزمینی کاهش می‌دهد، نرخ بازیابی سیستم هیبریدی (ترکیب نانوفیلتراسیون و اسمز معکوس) (۴۰/۳۵ درصد) بیشتر از RO به‌تنهایی (۱۸/۷۹۶ درصد) خواهد بود (Srivastava et al., 2022).

در سال ۲۰۲۳ نیز معروفی و حاجیلری در یک بررسی مروری، با بررسی غشاهای نانوفیلتراسیون، دریافتند که این سیستم‌ها در تصفیه آب، کشاورزی، داروسازی و بیوتکنولوژی و غیره کاربرد دارند. این روش‌ها به‌دلیل توانایی خود در از بین‌بردن مؤثر ناخالصی‌ها، رسوبات، پساب‌های شیمیایی و حتی مواد خطرناک مانند آرسنیک متمایز هستند. همچنین انتخاب غشاهای با گزینش‌پذیری مناسب براساس کاربردهای موردعلاقه برای دستیابی به بالاترین راندمان جداسازی حیاتی است (شکل ۱۰) (Maroufi and Hajilary, 2023).

در میان فناوری‌های غشایی، اسمزمعکوس به‌عنوان مؤثرترین فناوری تصفیه آب‌های زیرزمینی آلوده شناخته شده‌است. غشاهای آن معمولاً دارای اندازه منافذ کوچک‌تر از ۱ نانومتر هستند. همچنین در مقایسه با غشاهای UF یا NF، فشار اسمزی غشاهای RO بیشتر و سرعت انتشار آب در آن پایین است. این سیستم‌ها کاهش غلظت یون‌های کل و میزان کدورت را در آب‌های زیرزمینی تسهیل می‌نمایند (Kurniawan et al., 2023).

در سال ۲۰۲۰ حذف استرانسیوم (Sr) از آب‌های زیرزمینی با سیستم اسمزمعکوس / نانوفیلتراسیون موردبررسی قرار گرفت. کای و همکارانش نشان دادند که فشار اعمالی مناسب و شرایط pH اسیدی به بهبود عملکرد سیستم غشایی NF/RO کمک می‌کند(Cai et al., 2023). منصور و همکاران وی نیز در سال ۲۰۲۳ غشای اسمزمعکوس نانو ورق‌های نیترید کربن گرافیتی بسیار کارآمد را با موفقیت در یک فرآیند تصفیه آب زیرزمینی استفاده کردند و به راندمان حدود ۹۷ درصد رسیدند (Mansor et al., 2023). البته بررسی فرآیندهای غشایی مختلف ازجمله اولترافیلتراسیون، نانوفیلتراسیون و اسمز معکوس نشان می‌دهد که این غشاءها مستعد رسوب‌گیری بوده و گران و انرژی‌بر هستند. در تشکیل آلاینده‌های ثانویه نیز نقش دارند (Bera et al.,

2022). روش فیلتراسیون غشایی یک روش تصفیه خارج از محل است که برای کاهش آلودگی آب‌های زیرزمینی استفاده می‌گردد. در این روش، آب‌های زیرزمینی آلوده به سطح پمپاژ شده و فیلتراسیون غشایی آلاینده‌ها را از آب جدا می‌نماید. سپس آب تصفیه‌شده، در محیط تخلیه می شود.

۴،۲،۳. جذب

اخیراً روش جذب برای حذف آلاینده‌ها از محلول‌های آبی محبوبیت پیدا کرده‌است (Duan et al., 2020). نتایج تحقیقی در سال ۲۰۱۹ نشان داد که خاک رس محلی مواد مفیدی جهت حذف نیترات از محلول‌های آبی ارائه می‌دهد و بدون هیچ‌گونه تغییر شیمیایی در تصفیه آب مورد استفاده قرار می‌گیرد (Battas et al., 2019). خلیل‌زاده شیرازی و همکاران وی در پژوهشی، به طراحی و تحلیل هزینه سیستم های جاذب طبیعی و ارزان‌قیمت برای حذف رنگ بنفش اولیه ۱۶ و قرمز واکنش‌پذیر ۱۹۵ از آب‌های زیرزمینی آلوده پرداختند. ایشان نشان دادند که در مقایسه با جاذب بنتونیت، کربن‌فعال و سایر جاذب‌های طبیعی مورداستفاده در این‌مطالعه، هزینه کمتری دارند و نیازی به مرحله فعال سازی یا پیش‌تصفیه جداگانه نخواهند داشت (Khalilzadeh Shirazi et al., 2020).

در سال ۲۰۲۲ نیز، ظرفیت جذب بالای فنل و متیلن‌بلو با استفاده از کربن فعال حاصل از ضایعات کشاورزی موردبررسی قرار گرفت. نتایج این بررسی گویای توسعه یک جاذب کم‌هزینه، بسیار کارآمد و قابل بازیافت برای ارتقا کیفیت آب را نشان می‌داد (Bery et al., 2022). در همین سال یانگ و همکارانش در مطالعه‌ای از سه نوع جاذب چارچوب فلزی-آلی برای حذف فلوراید در آب استفاده کردند. آزمایشات نشان داد که در pH اولیه ۳ و دوز جاذب ۰/۸ گرم در لیتر، راندمان حذف فلوئور ۹۶/۸ درصد می‌باشد (غلظت اولیه فلوئور ۴۰ میلی‌گرم در لیتر است) (Yang et al., 2022). قنبری‌زاده و همکاران وی در مطالعه‌ای (۲۰۲۲)، استفاده از جاذب‌های ارزان‌قیمت از قبیل زئولیت طبیعی، کربن فعال و آلومینای فعال را جهت کاهش سختی آب مورد ارزیابی قراردادند. نتایج نشان داد که بهترین زمان تماس برای کاهش سختی، ۹۰ دقیقه و بهترین غلظت جاذب برای زئولیت، کربن فعال و آلومینای فعال در آب به ترتیب ۶۰، ۴۰ و ۴۰ گرم در لیتر می‌باشد. بالاترین درصد کاهش سختی‌کل نیز توسط جاذب زئولیت طبیعی، کربن فعال و آلومینای فعال به‌ترتیب ۵۹/۲۳، ۱۵/۶۷ و ۳۹/۷۲ درصد بوده‌است (Ghanbarzadeh et al., 2022).

در سال ۲۰۲۳ نیز کارایی زئولیت طبیعی در حذف فلزات سنگین سرب، کادمیوم و کبالت با استفاده از ستون جذب بستر ثابت در آبخوان ورامین استان تهران موردبررسی قرارگرفت. نتایج مطالعات نخعی و همکاران او نشان داد که در آزمایش‌های ناپیوسته، حداکثر ظرفیت جذب تعادلی برای فلز سرب ۱۰/۲۵، کادمیوم ۸/۷۷ و کبالت ۶/۹۶ میلی گرم بر گرم درpH معادل ۶ می‌باشد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که کلینوپتیلولیت طبیعی جاذبی مقرون‌به‌صرفه و مناسب جهت کاهش آلاینده‌های فلزی است (Nakhaei et al., 2023). فرآیند جذب با وجود کاهش آلاینده‌های محیط های آبی، معایبی چون ظرفیت جذب محدود، عدم حذف طیف وسیعی از آلاینده‌ها، هزینه بالا، اثرات زیست‌محیطی و دشواری در استفاده مجدد و غیره را به‌همراه دارد (Zhang et al., 2020).

از این‌رو به نظر می‌رسد که روش جذب برای کاهش آلودگی آب‌های زیرزمینی مؤثر می‌باشد. این تکنیک، یک روش تصفیه خارج از محل بوده که با جذب آلاینده‌ها بر روی سطح جاذب همراه است. جاذب می‌تواند کربن فعال، زئولیت یا سایر موادی باشد که میل‌ترکیبی بالایی برای جذب آلاینده‌های هدف دارند. هرچند که عدم حذف طیف وسیعی از آلاینده‌ها و ظرفیت پایین در استفاده مجدد، محققان را در استفاده از جاذب‌ها دچار تردید کرده‌است.

۳،۳. روش کاهش- اکسیداسیون

فرآیند کاهش-اکسیداسیون یکی از واکنش‌های شیمیایی جهت کاهش آلاینده‌ها در آب است. با همین روش، کروم شش ظرفیتی، آرسنیک پنج ظرفیتی و غیره در آب به مواد کم‌خطرتر کاهش می‌یابند (Yi et al., 2023). در سال‌های اخیر، فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته اعتبار بالایی جهت تصفیه آب‌های آلوده به ترکیبات آلی پیدا کرده‌اند. این

فرآیندها قادر به تصفیه آلاینده‌های معدنی نیز هستند (عمدتاً با تغییر حالت اکسیداسیون فلز- شبه‌فلز و تبدیل آن ها به ترکیبات با سمیت کمتر یا محلول) AOPs (Marinho et al., 2019). براساس تولید رادیکال‌های بسیار واکنش‌پذیر (عمدتاً رادیکال هیدروکسیل (OH)) برای اکسیداسیون آلاینده‌های آلی در محلول طراحی شده‌اند و با استفاده از فرآیندهای فعال‌سازی مختلف (فتولیزر اشعه ماوراء بنفش، فرآیندهای فنتون، اکسیداسیون الکتروشیمیایی، فرآیندهای سونوشیمیایی، مایکروویو، اکسیداسیون هوای مرطوب و آب فوق بحرانی و غیره) تصفیه آب را انجام می‌دهند (Giannakis et al., 2021; Marinho et al., 2019).

در سال ۲۰۲۱ کائو و همکاران وی در مطالعه‌ای نشان دادند که فرآیند UV/سولفیت به‌عنوان یک فرآیند کاهش پیشرفته (ARP) استفاده می‌گردد زیرا الکترون و هیدروژن، با پتانسیل کاهش قوی، می‌توانند به‌طور قابل‌توجهی تولید شوند. علاوه بر این، ترکیب UV و سولفیت به‌صورت یک فرآیند اکسیداسیون پیشرفته نیز با تولید OH توجه فزاینده ای را به خود جلب کرده‌است(Cao et al., 2021). با این حال، فرآیند پیچیده واکنش‌های کاهش / اکسیداسیون، هزینه‌های بالا، اثرات زیست‌محیطی و کاربرد محدود آن در کاهش بار آلودگی طیف وسیعی از آلاینده‌ها و غیره موردبحث محققان قرار گرفته‌است (Capodaglio, 2019).

پس فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته جهت کاهش آلودگی آبخوان‌ها به‌صورت تصفیه خارج از محل عمل کرده و حذف آلاینده‌ها از آب را با استفاده از اکسیدان‌های قوی فراهم می آورد. AOPها را می‌توان جهت تصفیه طیف گسترده‌ای از آلاینده‌ها ازجمله ترکیبات آلی، آفت‌کش‌ها و داروها به کار برد.

۴،۳. فرآیندهای بیولوژیکی

روش تصفیه بیولوژیکی یک گزینه کارآمد، مقرون به‌صرفه و سازگار با محیط‌زیست جهت کاهش بار آلودگی در آب است. به‌عنوان مثال با وجود روش‌های فیزیکوشیمیایی جهت حذف کروم (VI) از آب، تصفیه بیولوژیکی آب‌های زیرزمینی برای حذف کروم (VI) در غلظت‌های پایین (تا ۲۰۰ میکروگرم در لیتر) به‌طور محدود مطالعه شده‌است (Mamais et al., 2016). مطالعه‌ای مروری در سال ۲۰۱۸ نشان داد که حذف نیترات از آب‌های زیرزمینی توسط فرآیندهای بیولوژیکی به‌طور گسترده‌ای موردمطالعه قرار گرفته‌است. در واقع باکتری‌های اتوتروف از منابع کربن‌آلی و اهداکنندگان الکترون مانند بی‌کربنات‌ها، دی‌اکسید کربن و ترکیبات گوگردی تولید انرژی و سنتز سلولی استفاده می کنند (Pous et al., 2018; Huno et al., 2018).

در سال ۲۰۲۰ نیز پژوهشی در خصوص تصفیه بیولوژیکی آب آشامیدنی صورت گرفت. نتایج نشان داد که فناوری‌های تصفیه بیولوژیکی قابلیت تصفیه آلاینده‌های موجود در منابع آب آشامیدنی آلوده مانند فلزات سنگین، مواد آلی طبیعی، مواد غیرفلزی و غیر آلی، محصولات جانبی ضدعفونی، مواد شیمیایی مختل‌کننده غدد درون‌ریز و آلاینده‌های میکروبی را دارند (Hasan et al., 2018). با این حال ابهاماتی درباره روش‌های تصفیه بیولوژیکی در آب‌های زیرزمینی وجود دارد. عدم وجود الکترون‌دهنده (بستر آلی) در آب‌های زیرزمینی برای کاهش بیوشیمیایی، هزینه عملیاتی نسبتاً بالا به‌دلیل الزامات هوادهی درمورد سیستم‌های تصفیه هوازی، اثربخشی مشکوک سیستم‌های تصفیه بی‌هوازی در دمای پایین آب و مشکلات بهداشتی ازطریق رشد کنترل‌نشده میکروارگانیسم‌ها و غیره ازجمله این موارد هستند (Mamais et al., 2016; Hasan et al., 2018).

روش بیولوژیکی یک روش تصفیه درجا است که شامل استفاده از میکروارگانیسم‌ها برای تجزیه یا تبدیل آلاینده های موجود در آب‌های زیرزمینی به موادی با خطر کمتر می‌باشد. در این‌روش میکروارگانیسم‌ها ازطریق چاه‌های تزریقی یا سایر روش‌های انتقال به آب‌های زیرزمینی آلوده وارد شده و از آلاینده‌ها به‌عنوان منبع غذایی استفاده می کنند. سپس کربن دی اکسید، آب و سایر محصولات جانبی بی‌ضرر را تولید می‌نمایند. با این حال، ممکن است در مقایسه با سایر روش‌ها، دستیابی به تصفیه کامل مستلزم زمان بیشتر باشد و برای انواع آلاینده‌ها مؤثر عمل نکند.

۵،۳. نانوفناوری

اخیراً نانومواد به‌دلیل خواص سطحی عالی به‌عنوان جاذب مؤثر آلاینده‌ها در تصفیه آب و فاضلاب مورداستفاده قرار گرفته‌اند. انواع مختلف نانومواد مانند نانوذرات، نانولوله‌ها، نانو ورق‌ها، نانومیله‌ها، نانو کره‌ها، نقاط کوانتومی و غیره وجود دارند که با روش‌های مختلف سنتز شیمیایی و سبز ازطریق گیاهان، میکروارگانیسم‌ها، بیومولکول‌ها، مشتقات کربن، فلزات، اکسیدهای فلزی و پلیمرها و غیره سنتز می‌شوند (Saravanan et al., 2022).

در سال ۲۰۲۱، نانوذرات TiO2 برای حذف آرسنیک از آب در شرایط طبیعی آب‌های زیرزمینی و در آزمایش‌های ستونی استفاده شدند. نتایج مطالعات نظری و همکاران وی نشان داد که آناتاز و روتیل به‌ترتیب می‌توانند ۹۵/۵ و ۶۳/۵ درصد آرسنیک را پس از ۶۰ دقیقه در محلول جذب کنند و در هر دو جاذب، با افزایش غلظت جاذب، جذب آرسنیک افزایش یافت (Nazari et al., 2021). ایزدی و همکارانش در سال ۲۰۲۲، حذف در جای آلاینده‌ها توسط نانوذرات آهن صفر را بررسی کردند. ایشان در این مطالعه، nZVI را با استفاده از لعاب بذر کتان به‌عنوان یک پوشش سبز، غیر سمی و ارزان‌قیمت سنتز کردند. نتایج نشان داد که استفاده از این کاتالیزور می‌تواند برای تصفیه عملی آب‌های زیرزمینی مؤثر باشد (Izadi et al., 2022).

در مطالعه‌ای در سال ۲۰۲۳، حذف یون‌های نیترات از محیط‌های آبی با استفاده از کاتالیزورهای دو فلزی بارگذاری شده بر روی چندین بستر مورد مطالعه قرارگرفت. نتایج به دست‌آمده نشان داد که SBA-15 یک کاتالیزور دو فلزی مناسب برای کاهش نیترات می‌باشد (Rachini et al., 2023). در همین سال سنتز نانولوله‌های کربنی بااستفاده از کاربید آهن (Fe3C) اجرا شد. نانولوله‌های کربنی، جذب انتخابی کروم (VI) را در آب‌های زیرزمینی نشان داد (Liu et al., 2023).

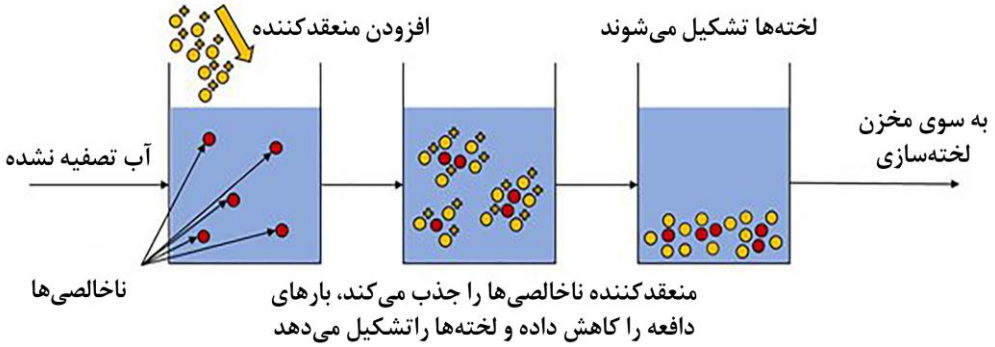
انواع نانوذرات، مزایا و معایب آن‌ها در جدول ۱، گزارش شده است. مطالعات نشان می‌دهد که پاک‌سازی آب‌های زیرزمینی به‌کمک نانوتکنولوژی باعث به حداقل رساندن زمان و کاهش غلظت آلاینده‌ها تا نزدیک به صفر خواهد شد. نانوذرات سبز نیز موادی هستند که با روش‌ها و مواد سازگار با محیط‌زیست سنتز شده و در نتیجه آلاینده‌های ثانویه کمتری تولید می‌کنند (Bhardwaj et al., 2022). ظرفیت تولید نانومواد دقیق با ساختاری کنترل‌شده منجرشده که فناوری نانو، پتانسیل استثنائی را در کاربردهای فیلترها ارائه دهد. از این‌رو غشای نانوفیلتراسیون، یک روش مدرن، توسعه‌یافته و بی‌خطر برای تصفیه آب به‌شمار می‌رود (Agarwal et al., 2023). علاوه بر این، غشاهای NF می توانند به‌سرعت TDS و همچنین مواد معدنی، نمک‌ها، میکروب‌ها (قارچ، کپک، ویروس و باکتری)، کاتیون‌های تک ظرفیتی، آنیون و سایر ذرات معلق را در آب‌های سطحی و زیرزمینی حذف کنند (Agaie et al., 2018).

جدول ۱. خلاصه‌ای در مورد نانوذرات استفاده شده در پاک‌سازی آبخوان‌ها (Mansoori et al, 2008).

Table 1. Summary Of Nanoparticles Used In Aquifer Cleanup (Mansoori et al, 2008).

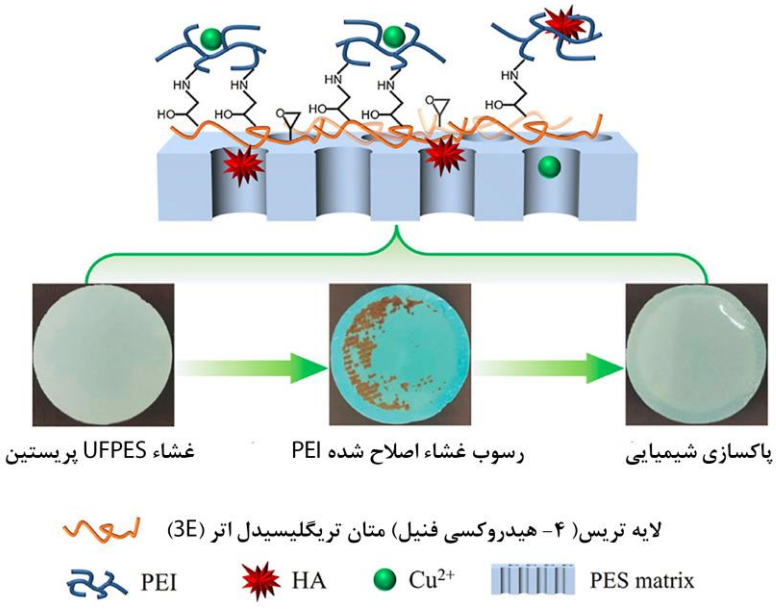
نوع نانو ذره	فرآیند تصفیه	قابلیت حذف آلاینده	مزایا	معایب
نانوذرات TiO_2	فتوکاتالیزور، اکسیداسیون	آلاینده‌های آلی	غیر سمی، نامحلول در آب تحت اکثر شرایط، پایدار در برابر نور	هزینه اجرایی بالا، بازیافت مشکل، تولید لجن
نانوذرات آهن	کاهش، جذب سطحی	فلزات سنگین، آنیون ها، آلاینده‌های آلی (دی‌کلرینه کردن)	تصفیه آب و خاک، کم‌هزینه، کاربرد مطمئن	بازیافت مشکل، تولید لجن، صرف هزینه برای از بین بردن لجن، احتمال زیان برای سلامتی
نانوذرات دو فلزی	کاهش، جذب سطحی	دی‌کلرینه کردن، دی‌نیتریفیکاسیون	دارای واکنش‌پذیری بالاتر نسبت به نانوذرات آهن	بازیافت مشکل، تولید لجن
نانورس‌ها	جذب سطحی	فلزات سنگین، آلاینده‌های آلی	هزینه پایین، ساختارهای واحد، پایداری طولانی‌مدت، قابلیت استفاده دوباره، ظرفیت	تولید لجن

			جذب بالا، بازیافت آسان، سطح ویژه و حجم منفذی زیاد	
نانولوله‌ها و فلورین	جذب سطحی	فلزات سنگین، آنیون ها، آلاینده‌های آلی	حذف آلودگی از هوا و آب، ویژگی‌های مکانیکی استثنائی، ویژگی‌های الکتریکی منحصربه‌فرد، پایداری شیمیایی بالا	هزینه بالا، ظرفیت جذب سطحی پایین، بازیافت مشکل، تولید لجن، احتمال زیان برای سلامتی
نانوذرات مغناطیسی	جذب سطحی	فلزات سنگین، آلاینده‌های آلی	جداسازی ساده، عدم تولید لجن	هزینه بالا، نیاز به یک میدان مغناطیسی درونی برای جداسازی
میسل‌ها	جذب سطحی	آلاینده‌های آلی خاک	میل ترکیبی بالا با آلاینده‌های آلی آب‌گریز	هزینه بالا



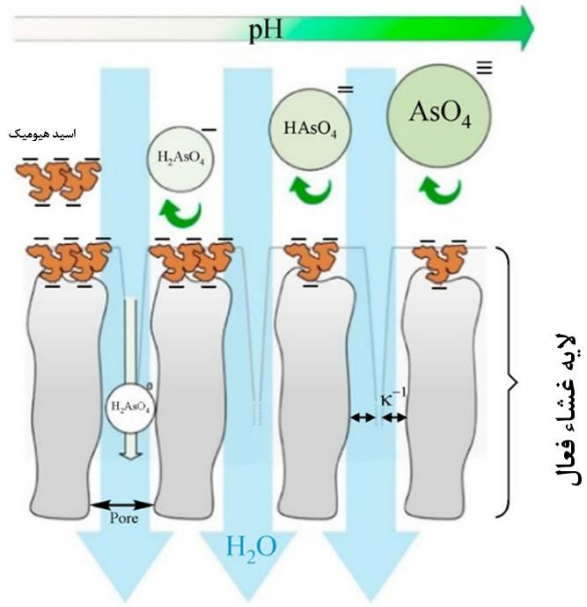
شکل ۸. فرآیند انعقاد در تصفیه آب آشامیدنی (Turner et al., 2019).

Fig 8. Coagulation Process In Drinking Water Treatment (Turner et al., 2019).



شکل ۹. حذف هم‌زمان مواد آلی طبیعی و مس (II) در آب با روش اولترافیلتراسیون (Ma et al., 2023).

Fig 9. Simultaneous Removal Of Natural Organic Matter And Copper (II) In Water By Ultrafiltration Method (Ma et al., 2023).



شکل ۱۰. شماتیک حذف As (V) در pHهای مختلف توسط غشاهای نانوفیلتراسیون (Boussouga et al., 2021).

Fig 10. Schematic Of As (V) Removal At Different Phs By Nanofiltration Membranes (Boussouga et al., 2021).

۴. روش‌های سنتز نانوذرات

سنتز نانوذرات ازطریق رویکردهای بالا به پایین و پایین به بالا صورت می‌پذیرد. ویژگی‌های نانوذرات تولیدشده از مواد توده نشان‌می‌دهد خواص لایه سطحی آن‌ها ممکن است بر خواص مواد اصلی نیز غالب باشد (Ronavari et al., 2021). روش بالا به پایین شامل از بین‌بردن نیروهای واندروال است درحالی‌که سنتز پایین به بالا به تشکیل پیوندهای یونی یا کووالانسی اشاره دارد (Saravanan et al., 2021).

رویکرد بالا به پایین مواد حجیم را به ذرات کوچک‌تر تبدیل می‌کند. در روش پایین به بالا با استفاده از ذرات خاص کوچک، نانومواد تولید می‌گردد. مسیر شیمیایی آلی-فلزی، روش مایسل معکوس، سنتز سل-ژل و رویکرد هیدروترمال و غیره چندین استراتژی از پایین به بالا برای تولید نانوذرات هستند (Yadav et al., 2023).

۱،۴. فرآیند آسیاب گلوله‌ای

فرآیند آسیاب گلوله‌ای از تکنیک‌های بالا به پایین می‌باشد. ساده‌ترین و کارآمدترین فرآیند مکانیکی است که نانوذرات را با سایبدگی تولید می‌کند. نمونه‌های پودری آسیاب‌گلوله‌ای بر اندازه بلوریت، کاهش‌ذرات و همچنین جابه‌جایی مکانیکی، اصلاح سطح و توسعه احتمالی فازهای فراپایدار تأثیر برجسته‌ای می‌گذارند (Wei et al., 2023). فرآیند آسیاب‌گلوله‌ای برای بسیاری از اهداف ازجمله فشرده‌سازی در اندازه ذرات، تغییر در ساختار، تراکم، آلیاژسازی مکانیکی و اصلاح یک مشخصه از ماده و غیره استفاده می‌گردد (Ahmad et al., 2020). در سال ۲۰۱۷، در تحقیقی نانوذرات هماتیت با شکل کروی به‌روش آسیاب گلوله‌ای برای زمان‌های مختلف آسیاب و در محیط خشک سنتز شدند. بررسی‌ها به‌وضوح نشان دادند که کوچک‌ترین میانگین اندازه ذرات و بیش‌ترین مقدار اثر کاتالیزوری توسط نانوذرات مذکور حاصل شدند (Hosseini and Ayoman , 2017).

فرآیند آسیاب در تولید نانوذرات مزایا و معایبی دارد. مطالعات نشان دادند، ظرفیت بالا، سادگی، قابلیت اطمینان و ایمنی و غیره از مزایای این روش سنتز نانوذرات هستند. برخی از معایب فرآیند آسیاب نیز اختلال در ساختار بلوری، وزن بالا، مصرف انرژی زیاد و ایجاد آلودگی و سروصدای مزاحم و غیره می‌باشند (Kumar et al., 2020; Thambiliyagodage and Wijesekera, 2022).

۲،۴. روش تبخیر حرارتی

این روش یک فرآیند گرماگیر است که در آن گرما باعث تجزیه شیمیایی می‌شود. تبخیر حرارتی یکی از محبوب ترین روش‌ها جهت تولید سوسپانسیون‌های پایدار با قابلیت خودآرایی در میان روش‌های متعدد برای تولید نانوذرات معدنی می‌باشد (Jamkhande et al., 2019; Zhou et al., 2023). سنتز نانوذرات با روش تبخیر حرارتی، نیاز به حلال ندارد و مواد به‌طور یکنواخت بر روی بستر رسوب می‌دهند. نظارت و کنترل مواد ته‌نشین‌شده بسیار آسان است و در طول رسوب‌گذاری، سیستم رسوب دهی را می‌توان باسرعت پمپاژ کرد. از معایب این سیستم نیز می‌توان به دشواری در ایجاد رسوب برخی از ترکیبات آلیاژی اشاره نمود (Wang et al., 2018).

۳،۴. کندوپاش لیزری

تولید نانوذرات از حلال‌های متنوع بااستفاده از سنتز لیزری در محلول یک فرآیند ساده است. این روش براساس پردازش لیزری یک هدف جامد در محیطی مایع جهت تولید یک کلوئید استوار است (Nyabadza et al., 2023). نانوذرات در طیف وسیعی از زمینه‌ها، ازجمله در طول تولید افزودنی‌های پلیمر، تولید الکترونیک انعطاف پذیر و ساخت انواع مختلف نانوذرات ازجمله تیتانیوم و نقره و غیره با روش لیزری تولید می‌شوند (شکل ۱۱) (Amans et al., 2019; Kanitz et al., 2019; McCarthy et al., 2022). روش لیزری، نانوذرات جدید و بدون لیگاند را در طیف وسیعی از حلال‌ها با اتلاف کم انرژی تولید می‌کند. البته راندمان بالای فرسایش نیازمند مصرف انرژی زیادی است که استفاده از این روش را جهت سنتز نانوذرات در مقیاس‌صنعتی محدود می‌نماید (Sportelli et al., 2018; Khairani et al., 2023).

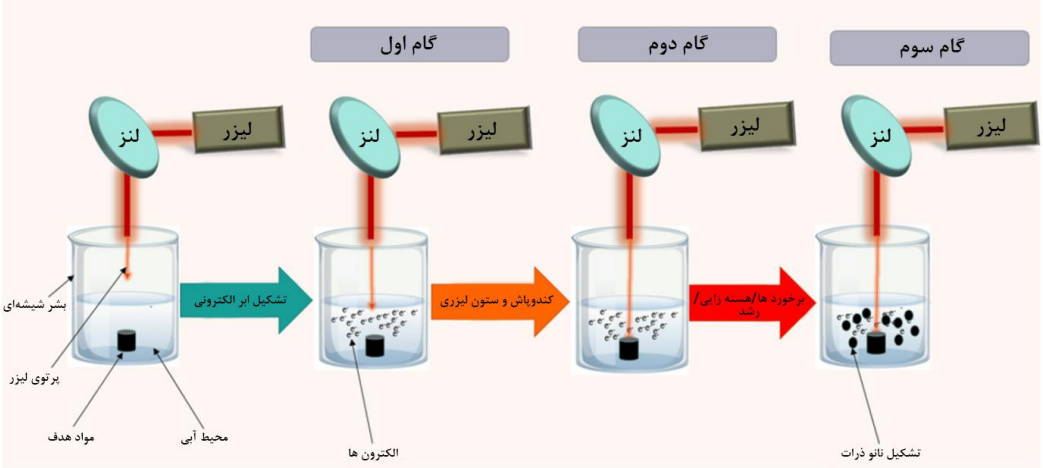
۴،۴. روش رسوب‌دهی شیمیایی فاز بخار

فرآیند رسوب‌دهی شیمیایی بخار روشی متنوع و موفق برای ایجاد نانوساختارها است. CVD در صنعت میکروالکترونیک، یک تکنیک اصلی و یکی از جذاب‌ترین روش‌های امروزی جهت سنتز نانومواد می‌باشد (Sayago et al., 2020). روش رسوب‌دهی شیمیایی فاز بخار به عنوان یکی از روش‌های سنتز پایین به بالا دارای مزایایی به شرح ذیل است: بهترین درجه کنترل را دارد. امکان ساخت نانوذرات دوبعدی را در مقیاس بزرگ با خلوص عالی، کیفیت بلوری خوب و ایرادات اندک فراهم می‌نماید. تنظیم ساختار بلوری، ریخت‌شناسی سطح و جهت‌گیری نانوساختارها مهیا است. روش سنتز قابل تکرار بوده و چسبندگی و همگنی مواد روی بستر عالی می‌باشد (Pottathara et al., 2019; Ansari et al., 2022). با این‌حال، روش CVD ممکن است هزینه‌های تولید و استفاده از پیشتازها را افزایش داده و محصولات جانبی سمی تولید نماید (Sayago et al., 2020).

۵،۴. روش هیدروترمال

سنتز هیدروترمال براساس واکنش ماده جامد با محلول آبی در دما و فشار بالا تعریف می‌شود و منجر به رسوب ذرات ریز می‌گردد. هیدروترمال یک رویکرد مبتنی بر واکنش محلول است. در این روش از آب به‌عنوان حلال استفاده می‌کنند (Wang et al., 2020; Li et al., 2021).

عوامل مختلفی مانند دما و فشار، زمان پاسخ و نوع حلال می‌توانند بر سنتز نانومواد با استفاده از تکنیک هیدروترمال تأثیر بگذارند (Denkbas et al., 2016). روش هیدروترمال به‌دلیل رسوب همگن، هزینه کم، محیط دوستانه، مقیاس‌پذیری آسان و محصول نهایی خالص سهم زیادی در علم و فناوری مدرن دارد. علاوه بر این، روش هیدروترمال را می‌توان به سنتز هیدروترمال، تصفیه و رشد کریستال، تصفیه ضایعات آلی و تهیه پودر سرامیکی کاربردی تقسیم کرد (Yang and Park, 2019; Gupta et al., 2021).



شکل ۱۱. شماتیک مراحل سنتز به روش کندوپاش لیزری (Nyabadza et al., 2022).

Fig 11. Schematic Of Synthesis Steps By Laser Sputtering Method (Nyabadza et al., 2022).

۶،۴. روش هم‌رسوبی

یکی از اولین فرآیندهای شیمیایی سنتز مرطوب نانوذرات، روش هم‌رسوبی است. روش هم‌رسوبی بااستفاده از یک واکنش رسوبی، ترکیبی ثابت از دو یا چند کاتیون در یک محلول همگن را فراهم می‌آورد. این رویکرد مزیت تولید مستقیم نانو ساختارهای همگن با توزیع اندازه کوچک را دارد (Al-Madhagi et al., 2023). نانوذرات به‌روش هم رسوبی باسرعت بیشتری سنتز می‌شوند. نیاز به دمای پایین جهت سنتز و امکان اصلاح وضعیت سطح ذرات در این روش مهیا می‌باشد. استفاده از مواد شیمیایی متعدد، تولید آلاینده‌های ثانویه خطرناک، لزوم خالص‌سازی نهایی نانوذرات با استفاده از تثبیت‌کننده‌ها و غیره از معایب این روش سنتز هستند (Rane et al., 2018; Vaseghi et al., 2020).

در سنتز نانوذرات به‌روش هم‌رسوبی کنترل همگنی شیمیایی و اندازه ذرات مشکل است. علاوه‌بر این، کنترل مناسب پارامترهای تجربی مانند pH، غلظت واکنش‌دهنده و و دما بسیار مهم هستند زیرا این عوامل بر فرآیند رسوب تأثیر می‌گذارند (Abid et al., 2022).

۷،۴. روش سل-ژل

متداول‌ترین رویکرد از پایین به بالای سنتز نانوذرات، روش سل-ژل است. این رویکرد ترکیبی از دو عبارت سل و ژل می‌باشد. سل نوعی محلول کلوئیدی است که از ذرات جامد معلق در مایع تشکیل شده‌است. ژل نیز یک ماکرو مولکول جامد است که در مایع حل می‌گردد. این روش شامل مراحلی چون هیدرولیز، پلیمریزاسیون تراکمی، پیری، خشک کردن و کلسینه‌شدن است (Wong et al., 2022; Borhan et al., 2023; Bokov et al., 2021).

شفیعی و همکاران وی در سال ۲۰۲۱، دریافتند که روش سل-ژل یک تکنیک اقتصادی و کارآمد برای تشکیل نانوذرات می‌باشد و قابلیت تنظیم ویژگی‌های ساختاری و نوری نانوذرات را دارد. در این بررسی، ایشان با تحقیقاتی، سنتز نانوذرات اکسید روی را ازطریق تکنیک سل-ژل را بررسی کردند و کاربرد این ذرات را در بیو پزشکی، دارورسانی، نیمه‌رساناها، حسگرهای‌زیستی، کاتالیزورها، دستگاه‌های فوتو الکترون و منسوجات موردمطالعه قرار دادند (Shafiee et al., 2021). مقرون به‌صرفه بودن، تولید همگن نانوذرات، دمای پایین پردازش، رویکرد ساده برای ساخت کامپوزیت‌ها و نانو ساختارهای پیچیده و خلوص بالای محصولات نهایی و غیره از مزایای روش سل-ژل در سنتز نانومواد هستند (Parashar et al., 2020; Baig et al., 2021).

بنابراین رابطه‌ای بالقوه میان نوع سنتز نانوذرات و تصفیه آب‌های زیرزمینی وجود دارد. سنتز نانوذرات با خواص خاص می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی بر کارایی آن‌ها در تصفیه آب‌های زیرزمینی تأثیر بگذارند. روش سنتز نانوذرات، نقش مهمی در تعیین خواص آن‌ها ازجمله اندازه، شکل، مساحت‌سطح، شیمی‌سطح و واکنش‌پذیری دارد (Saleh et al., 2020). این ویژگی‌ها می‌توانند جهت افزایش اثربخشی نانوذرات برای کاربردهای تصفیه آب طراحی شوند. برخی از روش‌های سنتز نیز نانو ذراتی با

عملکردهای خاص مانند خواص کاتالیزوری، جذبی یا فوتو کاتالیستی تولید می‌کنند که برای حذف آلاینده‌های مختلف موجود در آب‌های زیرزمینی، ازجمله فلزات سنگین، آلاینده‌های آلی و عوامل بیماری‌زا مناسب هستند (Singh et al., 2022).

همچنین انتخاب روش سنتز ممکن است بر سهولت تغییرات سطحی، مانند پوشش‌دهی و اصلاح سطح تأثیر بگذارند. در نتیجه گزینش‌پذیری و میل‌ترکیبی نانوذرات را برای آلاینده‌های خاص در آب‌های زیرزمینی افزایش دهد (Manyangadze et al., 2020). از طرفی روش‌های سنتز سبز که از معرف‌ها و شرایط سازگار با محیط‌زیست استفاده می‌کنند جهت کاربردهای محیطی مطلوب می باشند، بنابراین روش سنتز و انتخاب مواد تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر شرایط زیست محیطی نانوذرات در حذف آلاینده‌های آب دارد (Gupta et al., 2020).

۵. کاربرد برخی از نانوذرات در تصفیه آب زیرزمینی

امروزه فناوری نانو نقش قابل‌توجهی در تصفیه آب‌های زیرزمینی پیدا کرده‌است. مثمری و همکاران او در سال ۲۰۱۸ به پاک‌سازی آب‌های زیرزمینی آلوده به بنزن با روش فنتون اصلاح‌شده پرداختند. در این روش نخست نانوذرات کلسیم پراکسید را سنتز کرده و سپس توسط سدیم آلژینات مورد کپسول‌سازی قرار دادند. نتایج این بررسی، بازدهی بالا و قابلیت مناسب نانوذرات کلسیم پراکسید اصلاح شده را در حذف آلاینده بنزن از آبخوان آلوده نشان داد (Mosmeri et al., 2018).

در سال ۲۰۲۱، مطالعات ساها و همکارانش نشان داد که کاهش اورانیوم در نمونه‌های آب دریا و آب‌های زیرزمینی با سنتز نانوذرات سیترات-فریت پشتیبانی‌شده بر روی نقره و عامل‌دار شده با فسفورامیدات امکان‌پذیر می‌باشد. سینتیک جذب این واکنش از یک مدل شبه مرتبه دوم پیروی کرده و ایزوترم جذب با موفقیت با مدل جذب لانگمیر مطابقت دارد. بازیابی نانوذرات مذکور را می‌توان تا حدود ۶ بار انجام داد. همچنین این نانوذرات عامل‌دار، می توانند انعطاف‌پذیری بالایی را در برابر تعداد زیادی از یون های فلزی نشان دهند (Saha et al., 2021). در سال ۲۰۲۲، محمدیان و همکاران وی، تصفیه در جای منابع آب زیرزمینی آلوده به آرسنیک را با استفاده از دیوار واکنش‌پذیر و نفوذپذیر ساخته‌شده از نانوذرات اکسید آهن کلوئیدی اجرا کردند و در مقیاس میدانی ارزیابی و اعتبارسنجی نمودند. نتایج مطالعات ایشان نشان داد که دیوار نفوذپذیر فعال (نانوذرات تزریق‌شده) غلظت آرسنیک را نزدیک به آستانه آب آشامیدنی کاهش می‌دهند (Mohammadian et al., 2022).

فوتو کاتالیز نیز برای تصفیه نیترات در آب‌زیرزمینی بااستفاده از نانوذرات فلزی تهیه‌شده با کربن‌فعال مورد آزمایش قرارگرفته‌شد. نانوذرات دو فلزی پالادیم-نقره اصلاح‌شده با کربن‌فعال، فعالیت فوتو کاتالیستی قابل توجهی را از خود نشان دادند. نتایج اثبات کردند که کاهش نیترات توسط اسید فرمیک نیز به‌شدت افزایش می یابد (Soliman et al., 2022). در مطالعه‌ای در سال ۲۰۲۲، نانوذرات سیلیس سنتزشده از پوسته برنج با دانه های آلژینات سدیم کپسوله شدند و کارایی آن‌ها جهت حذف باکتری‌ها از آب زیرزمینی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج تجزیه و تحلیل‌های آنتی باکتریال ثابت کرد که این ذرات زیست تخریب‌پذیر و مقرون‌به‌صرفه هستند (Ravindran et al., 2022). راندمان حذف بالای سرب (II) و کبالت (II) توسط نانوذرات نقره سنتز شده با روش کاهش شیمیایی نشان داد که حذف یون‌های فلزی از محیط‌های آبی با موفقیت امکان‌پذیر است. این مطالعه، راندمان جذب ۲۴ درصدی برای کبالت و ۷۷ درصدی برای سرب را آشکار ساخت. از این‌رو انتخاب نانو ذره نقره به‌دلیل سهولت سنتز، عدم تولید لجن در هنگام استفاده در تصفیه آب و ظرفیت جذب بالای فلز موردتوجه است (Attatsi and Nsiah, 2020).

نتایج مطالعه‌ی اکبری‌زاده و همکارانش در سال ۲۰۲۲ نشان داد که جذب یون‌های آهن و منگنز در آب‌های زیرزمینی با کاهش اندازه ذرات جاذب، به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌یابد. علاوه بر این، ترکیب نانوجاذب‌های زیستی با نانو سیلیس، عمل جذب را بهبود می‌بخشد (نانوجاذب های زیستی می‌توانند به‌ترتیب ۹۸/۰۵ و ۹۷/۹۲ درصد از یون‌های آهن و منگنز را حذف کنند) (Akbari Zadeh et al., 2022). سنتز نانوذرات آهن صفر ظرفیتی تثبیت شده با پلی وینیل پیرولیدون (PVP) و پشتیبانی‌شده توسط بایوچار آب‌دوست در سال ۲۰۲۲ موردمطالعه واقع شد. مواد هیبریدی مذکور راندمان چشم‌گیری را در

کاهش کروم شش‌ظرفیتی نشان دادند (۹۹٪/۶۳ تنها در ۵ دقیقه). نتایج XPS نیز نشان داد که پلیمر PVP با افزایش تعداد مکان‌های جذب، فرآیند جذب سطحی را تسهیل کرده و نقش تأثیرگذار پلیمر در کاهش کروم شش ظرفیتی آشکار می‌گردد (Shamshirgaran et al., 2022).

فنل‌ها محصولات سمی هستند که از طیف وسیعی از فعالیت‌های صنعتی به‌دست می‌آیند و ورود این آلاینده‌ها به محیط‌زیست برای اکوسیستم‌های انسانی و آبی به‌طور جدی خطرناک هستند. در این مطالعه، یاوری بافقی و همکاران او (سال ۲۰۲۲) استفاده از نانوذرات پراکسید کلسیم (CaO_2) را برای تصفیه‌زیستی فنل از آب‌های زیرزمینی آلوده ارائه‌کردند. نتایج این بررسی، کاربرد موفقیت‌آمیز فرآیندهای تحریک زیستی و تقویت زیستی را برای تصفیه آبخوان‌های آلوده نشان داد. نتایج تجربی نشان دادند که نزدیک به ۱۰۰ درصد از آلاینده‌ها با موفقیت از آب‌های زیرزمینی با استفاده از CaO_2 محصور شده در ۶۰ روز حذف شدند (Yavari-Bafghi et al., 2022). مادوشا و همکاران وی در سال ۲۰۲۳ نانوذرات مس ساپورت‌شده با کربن فعال (بر گفته از نارگیل) را به روش کاهش سنتز نمودند. ایشان مشاهده کردند که نانو ماده هیبریدی مذکور می‌تواند فلوراید و سختی را در آب کاهش دهد. از طرفی فعالیت ضدمیکروبی عالی را در برابر سه پاتوژن رایج آب نشان داده‌است (Madhusha et al., 2023). از طرفی آلودگی کروم (VI) در آب‌های زیرزمینی یک تهدید قابل‌توجه برای منابع آب فعلی و آینده است. از این‌رو پژوهشی در سال ۲۰۲۳ جهت حذف کروم (VI) ازطریق تزریق نانوذرات‌آهن کپسوله‌شده با هیدروکسید منیزیم به یک سیستم تصفیه آب‌زیرزمینی در مقیاس سه بعدی صورت پذیرفت. نتایج نشان داد که nFe0@Mg(OH)2 تزریق‌شده راندمان حذف بالایی از کروم (VI) را پس از تزریق حفظ کرده‌است. لذا نانو ذره مذکور به‌عنوان یک ماده واکنش‌پذیر با ویژگی‌های پیشرفته و نامزدی عالی برای تصفیه آب پیشنهاد می‌گردد (Maamoun et al., 2023).

در سال ۲۰۲۳ مرادی و همکاران او، یک جاذب بنتونیت اصلاح‌شده با نانوذرات نقره را برای حذف بسیار کارآمد یون کلرید از آب آشامیدنی ارائه کردند. کاهش ۹۰ درصدی یون کلرید در شرایط بهینه (دوز جاذب: ۷ گرم در لیتر، غلظت یون کلرید: ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر و زمان واکنش: ۲۰ ساعت) در این مطالعه اثبات شد. نتایج ایزوترم و سینتیک جذب نیز نشان داد که مدل ایزوترم لانگمیر و سینتیک شبه مرتبه دوم برای حذف یون کلرید مناسب هستند (Moradi et al., 2023). سپهری و همکارانش در مطالعه‌ای یک رویکرد سبز برای سنتز نانوذرات آهن‌صفر تثبیت‌شده با استفاده از زیست‌توده به عنوان یک ماده پشتیبان متخلخل را ارائه کردند. جاذب نانوذرات آهن‌صفر اصلاح‌شده با کاه‌برنج جهت کاهش Pb (II) از محلول‌های آبی استفاده شد. نتایج آزمایشات نشان داد که این نانو کامپوزیت می‌تواند به‌طور مؤثر حدود ۹۷ درصد از یون‌های سرب دو ظرفیتی را در pH = 6 از آب حذف کند. باتوجه به نتایج این مطالعه، حتی پس از پنج دوره، این نانو کامپوزیت بیش از ۶۰ درصد از راندمان حذف اولیه خود را حفظ کرده‌است. از این‌رو برای کاهش سرب دو ظرفیتی در آبخوان امیدوارکننده می‌باشد (Sepehri et al., 2023).

در همین سال، پان و همکارانش، نانوذرات Fe/Cu بیوسنتز شده را برای حذف هم‌زمان As(III) و As (V) از محلول‌های آبی استفاده کردند. شناسایی این نانوذرات نشان داد که جزء آهن به‌عنوان یک جاذب و کاتالیزور عمل می‌کند، درحالی‌که جزء مس پردازش کاتالیزوری Fe را تسهیل می‌نماید. ایزوترم‌های جذب و سینتیک نیز نشان دادند که حذف As(III)، جذب فیزیکی/شیمیایی و اکسیداسیون بوده‌است، درحالی‌که حذف As (V) ازطریق نانوذرات مذکور و براساس رسوب و جذب شیمیایی می باشد(Pan et al., 2023).

نتیجه‌گیری

آب به‌دلیل نقش حیاتی خود از آغاز تمدن بشر، در مرکز توسعه اقتصادی و اجتماعی قرار گرفته است. با رشد سریع جمعیت و افزایش توسعه صنعت، نیاز به منابع آب شیرین در سراسر جهان، افزایش یافته‌است. حذف آلاینده‌های سمی و خطرناکی چون آرسنیک، جیوه، فلوئور، نیترات و کروم و غیره نیز از آب‌های زیرزمینی آلوده، نظر محققان را به خود جلب کرده‌است. فناوری‌های تصفیه سنتی و کم هزینه چون استفاده از ضایعات‌کشاورزی، انواع خاک‌های

رسی، مواد معدنی و فیلترهای آب سرامیکی، فرصت را برای رفع آلودگی فلزات سنگین موجود در آب آشامیدنی فراهم کرده‌اند. از مزایای استفاده از مواد بومی و فناوری های تصفیه در محل، سهولت دسترسی به این مواد، هزینه کم و انتقال فناوری آسان می‌باشد. برخی از معایب این تکنیک‌ها، محدودیت در کاهش آلاینده‌ها و مراکز فعال ناکافی (نظر به غلظت بالای فلزات سنگین) هستند. همچنین با کاهش کمیت و کیفیت آب آشامیدنی، فناوری هایی چون ته‌نشینی، انعقاد، جذب، اکسیداسیون و فرآیندهای بیولوژیکی و غیره موردتوجه واقع شده‌اند. البته این روش‌ها اغلب شامل مواد شیمیایی می‌شوند، انرژی‌بر و گران بوده و دانش فنی و امکانات خاصی را می‌طلبند. از این‌رو رویکردهای مبتنی بر فناوری نانو جهت تصفیه آب و فاضلاب توسعه یافته‌است. سنتز نانومواد با روش‌های مختلف از بالا به پایین (تبخیر حرارتی، کندوپاش لیزری و غیره) و از پایین به بالا (رسوب‌دهی شیمیایی فاز بخار، هیدروترمال، هم‌رسوبی، سل-ژل و غیره) انجام می‌شود که هر کدام مزایا و محدودیت‌هایی دارند. مطالعات نشان دادند که نانومواد در رفع آلودگی آب‌های زیرزمینی موفقیت‌آمیز عمل می‌کنند. با این‌حال، توسعه سریع فناوری نانو، چالش‌هایی ازجمله خطر برای سلامت بشر، خطرات زیست‌محیطی، هزینه‌های بالا و غیره را یادآور می شود، که جامعه مدرن در آینده ممکن است با آن مواجه گردد. اما به هرحال استفاده از نانوذرات سبز، آب‌دوست و ارزان قیمت جهت کاهش آلاینده‌های آب زیرزمینی در قالب روش‌های تصفیه خارج از محل، می‌تواند در آینده پاسخ‌گوی نیاز سازمان‌ها و نهادهای متولی در رفع آلودگی آبخوان‌ها باشد. پیشنهادهای متعددی نیز برای رفع آلودگی سفره‌های آب زیرزمینی با نانوذرات فلزی در آینده وجود دارد ازجمله توسعه روش‌های سنتز جدید و کارآمد نانوذرات فلزی با خواص بهبود یافته، بهینه‌سازی خواص نانوذرات، بررسی چگونگی رفتار نانوذرات در محیط آبخوان ها (از قبیل انتقال، رسوب و سمیت بالقوه آن‌ها) و بررسی ادغام این ذرات با سایر فناوری‌های پاک‌سازی و غیره. این موارد را می‌توان در مطالعات آینده مورد تجزیه و تحلیل قرار داد.

قدردانی

نویسندگان این تحقیق، از مهندس فرزانه سروری و مهندس علی عرب جهت همکاری در طراحی اشکال این مطالعه قدردانی می‌کنند.

منابع

Abanyie, S. K., Apea, O. B., Abagale, S. A., Amuah, E. E. Y. & Sunkari, E. D. (2023). Sources and factors influencing groundwater quality and associated health implications: A review. *Emerging Contaminants*, 100207.

Abdel-Lateef, H. M., Khalaf, M. M., Al-Fengary, A. E. D.& Elrouby, M. (2022). Enhanced Nitrate Ions Remediation Using Fe0 Nanoparticles from Underground Water: Synthesis, Characterizations and Performance under Optimizing Conditions. *Materials*, 15, 5040.

Abid, N., Khan, A. M., Shujait, S., Chaudhary, K., Ikram, M., Imran, M.,... & Maqbool, M. (2022). Synthesis of nanomaterials using various top-down and bottom-up approaches, influencing factors, advantages& disadvantages: A review. *Advances in Colloid and Interface Science*, 300, 102597.

Acharya, S., Das, A. & Thaker, T. P. (2023). Remediation processes of hexavalent chromium from groundwater: a short review. AQUA-Water Infrastructure, *Ecosystems and Society*, 72, 648-662.

Adam, M. R., Othman, M. H. D., Kurniawan, T. A., Puteh, M. H., Ismail, A. F., Khongnakorn, W.,... & Jaafar, J. (2022). Advances in adsorptive membrane technology for water treatment and resource recovery applications: A critical review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10, 107633.

Agaie, B. G., Khan, I., Yacoob, Z.& Tlili, I. (2018). A novel technique of reduce order modeling without static correction for transient flow of non-isothermal hydrogen-natural gas mixture. *Results in Physics*, 10, 532-540.

Agarwal, A., Goyal, A., Paliwal, P., Mishra, A.& Singh, S. (2023). Purification of Water Using Nanotechnology. Journal of Mechanical and Construction Engineering (JMCE), 3, 1-14.

Ahmad, A. Y., Al-Ghouti, M. A., Khraisheh, M. & Zouari, N. (2022). Insights into the removal of lithium and molybdenum from groundwater by adsorption onto activated carbon, bentonite, roasted date pits& modified-roasted date pits. *Bioresource Technology Reports*, 18, 101045.

Ahmad, A., Ghazi, Z. A., Saeed, M., Ilyas, M., Ahmad, R., Khattak, A. M.& Iqbal, A. (2017). A comparative study of the removal of Cr (VI) from synthetic solution using natural biosorbents. *New Journal of Chemistry*, 41, 10799-10807.

Ahmad, M., Gani, A., Masoodi, F. A.& Rizvi, S. H. (2020). Influence of ball milling on the production of starch nanoparticles and its effect on structural,

Barhoum, A., Deshmukh, K., Garcia-Betancourt, M. L., Alibakhshi, S., Mousavi, S. M., Meftahi, A.,... & Samyn, P. (2023). Nanocelluloses as sustainable membrane materials for separation and filtration technologies: Principles, opportunities& challenges. *Carbohydrate Polymers*, 317, 121057.

Battas, A., Gaidoumi, A. E., Ksakas, A.& Kherbeche, A. (2019). Adsorption study for the removal of nitrate from water using local clay. *The Scientific World Journal*.

Bera, S. P., Godhaniya, M.& Kothari, C. (2022). Emerging and advanced membrane technology for wastewater treatment: A review. *Journal of Basic Microbiology*, 62, 245-259.

Bhardwaj, C. K., Chandra, U., Rafi, S.& Dubey, O. P. (2022). An analytical survey on the role of nanotechnology in groundwater remediation. *Water Supply*, 22, 8092-8103.

Biswas, S., Danish, M. & Pal, A. (2023). A Review of the Latest Advances in Nanoparticle-Mediated Processes for Hexavalent Chromium Remediation from Water Bodies. *Recent Patents on Nanotechnology*, 17, 327-339.

Bokov, D., Turki Jalil, A., Chupradit, S., Suksatan, W., Javed Ansari, M., Shewael, I. H.,... & Kianfar, E. (2021). Nanomaterial by sol-gel method: synthesis and application. *Advances in Materials Science and Engineering*, 1-21.

Borhan, A. I., Iordan, A. R., Ghercă, D.& Palamaru, M. N. (2023). Ferrite nanoparticles by sol–gel method. *Nanostructured Magnetic Materials*, 103-119.

Bouhadjra, K., Lemlikchi, W., Ferhati, A.& Mignard, S. (2021). Enhancing removal efficiency of anionic dye (Cibacron blue) using waste potato peels powder. *Scientific reports*, 11, 2090.

Boussouga, Y. A., Frey, H.& Schäfer, A. I. (2021). Removal of arsenic (V) by nanofiltration: Impact of water salinity, pH and organic matter. Journal of Membrane Science, 618, 118631.

Bundschuh, J., Niazi, N. K., Alam, M. A., Berg, M., Herath, I., Tomaszewska, B.,... & Ok, Y. S. (2022). Global arsenic dilemma and sustainability. *Journal of hazardous materials*, 436, 129197.

Cai, Y. H., Yang, X. J.& Schafer, A. I. (2020). Removal of naturally occurring strontium by nanofiltration/reverse osmosis from groundwater. *Membranes*, 10, 321.

Cao, Y., Qiu, W., Li, J., Jiang, J.& Pang, S. (2021). Review on UV/sulfite process for water and wastewater treatments in the presence or absence of O_2. *Science of The Total Environment*, 765, 142762.

Capodaglio, A. G. (2019). Contaminants of emerging concern removal by high-energy oxidation-reduction processes: State of the art. *Applied Sciences*, 9, 4562.

thermal, and functional properties. *International Journal of biological macromolecules*, 151, 85-91

Ahmad, M., Wang, J., Xu, J., Yang, Z., Zhang, Q.& Zhang, B. (2020). Novel synthetic method for magnetic sulfonated tubular trap for efficient mercury removal from wastewater. *Journal of colloid and interface science*, 565, 523-535.

Akbari Zadeh, M., Daghbandan, A.& Abbasi Souraki, B. (2022). Removal of iron and manganese from groundwater sources using nano-biosorbents. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 9, 1-14.

Algieri, C., Pugliese, V., Coppola, G., Curcio, S., Calabro, V.& Chakraborty, S. (2022). Arsenic removal from groundwater by membrane technology: advantages, disadvantages, and effect on human health. *Groundwater for Sustainable Development*, 100815.

Ali Mansoori, G., Bastami, T. R., Ahmadpour, A.& Eshaghi, Z. (2008). Environmental application of nanotechnology. *Annual review of nano research*, 439-493.

Alka, S., Shahir, S., Ibrahim, N., Ndejiko, M. J., Vo, D. V. N.& Abd Manan, F. (2021). Arsenic removal technologies and future trends: A mini-review. *Journal of cleaner production*, 278, 123805.

Al-Madhagi, H., Yazbik, V., Abdelwahed, W.& Alchab, L. (2023). Magnetite Nanoparticle Co-precipitation Synthesis, Characterization& Applications: Mini Review. *BioNanoScience*, 1-7.

Amans, D., Cai, W.& Barcikowski, S. (2019). Status and demand of research to bring laser generation of nanoparticles in liquids to maturity. *Applied Surface Science*, 488, 445-454.

Amen, R., Bashir, H., Bibi, I., Shaheen, S. M., Niazi, N. K., Shahid, M.,... & Rinklebe, J. (2020). A critical review on arsenic removal from water using biochar-based sorbents: the significance of modification and redox reactions. *Chemical Engineering Journal*, 396, 125195.

Ansari, F., Ghaedi, M., Taghdiri, M. & Asfaram, (2016). Application of ZnO nanorods loaded on activated carbon for ultrasonic assisted dyes removal: experimental design and derivative spectrophotometry method. *Ultrason. Sonochem.* 33, 197–209.

Ansari, M. J., Kadhim, M. M., Hussein, B. A., Lafta, H. A.& Kianfar, E. (2022). Synthesis and stability of magnetic nanoparticles. *Bio Nanoscience*, 12, 627-638.

Attatsi, I. K.& Nsiah, F. (2020). Application of silver nanoparticles toward Co (II) and Pb (II) ions contaminant removal in groundwater. *Applied Water Science*, 10, 1-13.

Baig, N., Kammakakam, I.& Falath, W. (2021). Nanomaterials: A review of synthesis methods, properties, recent progress& challenges. *Materials Advances*, 2, 1821-1871.

using carbon-based adsorbents: A review. *Journal of Water Process Engineering*, 37, 101339.

El-Bery, H. M., Saleh, M., El-Gendy, R. A., Saleh, M. R.& Thabet, S. M. (2022). High adsorption capacity of phenol and methylene blue using activated carbon derived from lignocellulosic agriculture wastes. *Scientific reports*, 12, 5499.

Emenike, E. C., Adeniyi, A. G., Iwuozor, K. O., Okorie, C. J., Egbemhenghe, A. U., Omuku, P. E.,... & Saliu, O. D. (2023). A critical review on the removal of mercury (Hg^{2+}) from aqueous solution using nano adsorbents. *Environmental Nanotechnology, Monitoring, and Management*, 20, 100816.

Farsad, A., Marcos-Hernandez, M., Sinha, S.& Westerhoff, P. (2023). Sous Vide-Inspired Impregnation of Amorphous Titanium (Hydr) Oxide into Carbon Block Point-of-Use Filters for Arsenic Removal from Water. *Environmental Science and Technology*, 57, 20410–20420.

Figoli, A., Fuoco, I., Apollaro, C., Chabane, M., Mancuso, R., Gabriele, B.,... & Criscuoli, A. (2020). Arsenic-contaminated groundwater remediation by nanofiltration. *Separation and Purification Technology*, 238, 116461.

Frisbie, S. H. & Mitchell, E. J. (2022). Arsenic in drinking water: An analysis of global drinking water regulations and recommendations for updates to protect public health. *PLoS One*, 17.

Ghanbarzadeh, P., Parivazh, M. M., Abbasi, M., Osfouri, S., Dianat, M. J., Rostami, A.,... & Akrami, M. (2022). Performance Enhancement of Specific Adsorbents for Hardness Reduction of Drinking Water and Groundwater. *Water*, 14, 2749.

Gholami, S., Lopez, J., Rezvani, A., Vatan pour, V.& Cortina, J. L. (2020). Fabrication of thin-film nanocomposite nanofiltration membranes incorporated with aromatic amine-functionalized multiwalled carbon nanotubes. Rejection performance of inorganic pollutants from groundwater with improved acid and chlorine resistance. *Chemical Engineering Journal*, 384, 123348.

Ghosh, S., Othmani, A., Malloum, A., Christ, O. K., Onyeaka, H., AlKafaas, S. S.,... & Koduru, J. R. (2022). Removal of mercury from industrial effluents by adsorption and advanced oxidation processes: A comprehensive review. *Journal of Molecular Liquids*, 367, 120491.

Giannakis, S., Lin, K. Y. A.& Ghanbari, F. (2021). A review of the recent advances on the treatment of industrial wastewater by Sulfate Radical-based Advanced Oxidation Processes (SR-AOPs). *Chemical Engineering Journal*, 406, 127083.

Guo, H., Li, X., Yang, W., Yao, Z., Mei, Y., Peng, L. E.,... & Tang, C. Y. (2022). Nanofiltration for drinking water treatment: a review. *Frontiers of Chemical Science and Engineering*, 16,681-698.

Cellone, F., Carol, E., Pugliese, I., Cordoba, J., Butler, L. & Lamarche, L., (2020). Nitrate pollution in dairy farms and its impact on groundwater quality in a sector of the Pampas plain, *Argentina. Environ. Earth Sci.* 79, 1–7

Chakraborty, R., Asthana, A., Singh, A. K., Jain, B.& Susan, A. B. H. (2022). Adsorption of heavy metal ions by various low-cost adsorbents: a review. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 102, 342-379.

Chiavola, A., D'Amato, E., Sirini, P., Caretti, C.& Gori, R. (2019). Arsenic removal from a highly contaminated groundwater by a combined coagulation-filtration-adsorption process. *Water, Air and Soil Pollution*, 230, 1-12.

Cui, H., Huang, X., Yu, Z., Chen, P.& Cao, X. (2020). Application progress of enhanced coagulation in water treatment. *RSC advances*, 10, 20231-20244.

Cui, W., Xu, Y., Luo, G., Zhang, Q., Li, Z.& Zhang, S. (2021). Enhanced mercury removal performance of Cu-Fe binary oxide sorbents modified by non-thermal plasma. *Chemical Engineering Journal*, 425, 131851.

Das, P. K., Das, B. P. & Dash, P. (2021) Chromite mining pollution, environmental impact, toxicity and phytoremediation: a review .*Environmental Chemistry Letters* 19, 1369–1381.

Dassanayake, S. M. (2023). Clay Mineral Composites as Environmental Catalysts SM Dassanayake, Udari Prasadini Perera, CL Jayawardena and Endene Emmanuel. Clay Composites: *Environmental Applications*, 343.

Decesaro, A., Machado, T.S., Cappellaro, A.C., Reinehr, C.O., Thome, A. & Colla, L.M. (2017). Biosurfactants during in situ bioremediation: factors that influence the production and challenges in evaluation. *Environmental Science and Pollution Research*, 24, 20831–20843.

Denkbaş, E. B., Celik, E., Erdal, E., Kavaz, D., Akbal, O., Kara, G.& Bayram, C. (2016). *Magnetically based nanocarriers in drug delivery. In Nano biomaterials in Drug Delivery*, William Andrew Publishing, pp. 285-331.

Dhass, A. D., Beemkumar, N., Venkadeshwaran, K. & Aravindan, M. K. (2023). *An Impact of Nanotechnology for Water Treatment Process. In Nanomaterials and Nano liquids: Applications in Energy and Environment, Singapore*: Springer Nature Singapore. pp. 31-45.

Ding, F., Ren, P., Wang, G., Wu, S., Du, Y. & Zou, X. (2021). Hollow cellulose-carbon nanotubes composite beads with aligned porous structure for fast methylene blue adsorption, *International Journal of Biological Macromolecules*, 182, 750-759.

Duan, C., Ma, T., Wang, J.& Zhou, Y. (2020). Removal of heavy metals from aqueous solution

desalination and water reuse. Morgan and Claypool Publishers.
Homagai, P. L., Poudel, R., Paudyal, H., Ghimire, K. N.& Bhattarai, A. (2023). Adsorption of nitrate and nitrite anion by modified maize stalks from aqueous solutions. *Environmental Science and Pollution Research*, 30, 54682-54693.
Hosseini, S. G.& Ayoman, E. (2017). Synthesis of α-Fe2O3 nanoparticles by dry high-energy ball-milling method and investigation of their catalytic activity. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 128, 915-924.
Huno, S. K., Rene, E. R., van Hullebusch, E. D.& Annachhatre, A. P. (2018). Nitrate removal from groundwater: a review of natural and engineered processes. *Journal of Water Supply: Research and Technology—AQUA*, 67, 885-902.
Hurtado-Martinez, M., Munoz-Palazon, B., Robles-Arenas, V. M., Gonzalez-Martinez, A. & Gonzalez-Lopez, J. (2021). Biological nitrate removal from groundwater by an aerobic granular technology to supply drinking water at pilot-scale. *Journal of Water Process Engineering*, 40, 101786.
Islam, M. S., Maamoun, I., Falyouna, O., Eljamal, O.& Saha, B. B. (2023). Arsenic removal from contaminated water utilizing novel green composite Chlorella vulgaris and nano zero-valent iron. *Journal of Molecular Liquids*, 370, 121005.
Izadi, N., Ali, B. H., Shahin, M. S.& Baghdadi, M. (2022). The removal of Cr (VI) from aqueous and saturated porous media by nanoscale zero-valent iron stabilized with flaxseed gum extract: Synthesis by continuous flow injection method. Korean *Journal of Chemical Engineering*, 39, 2217-2228.
Jamkhande, P. G., Ghule, N. W., Bamer, A. H.& Kalaskar, M. G. (2019). Metal nanoparticles synthesis: An overview on methods of preparation, advantages and disadvantages and applications. *Journal of drug delivery science and technology*, 53, 101174.
Juda, S. A., Ali, A. M., Omarin, A., Obaid, Z. H. & Salman, J. M. (2023). Removal Efficiency of Synthetic Toxic Dye from Water and Waste Water Using Immobilized Green Algae: Bioremediation with Multi Environment Conditions. *Ecological Engineering and Environmental Technology*, 24, 237-248.
Kamble, R. (2024). Groundwater arsenic in Chandrapur District, Central India. *Sustainability, Agri, Food and Environmental Research*, 12.
Kanitz, A., Kalus, M. R., Gurevich, E. L., Ostendorf, A., Barcikowski, S.& Amans, D. (2019). Review on experimental and theoretical investigations of the early stage, femtoseconds to microseconds processes during laser ablation in liquid-phase for the synthesis of colloidal nanoparticles. *Plasma Sources Science and Technology*, 28, 103001.
Gupta, A., Tandon, M.& Kaur, A. (2020). Role of metallic nanoparticles in water remediation with special emphasis on sustainable synthesis: a review. *Nanotechnology for Environmental Engineering*, 5, 1-13.
Gupta, T., Cho, J.& Prakash, J. (2021). Hydrothermal synthesis of TiO_2 nanorods: formation chemistry, growth mechanism& tailoring of surface properties for photocatalytic activities. *Materials Today Chemistry*, 20, 100428.
Gutierrez, M., Biagioni, R.N., Alarcon-Herrera, M.T. & Rivas-Lucero, B.A. (2018). An overview of nitrate sources and operating processes in arid and semiarid aquifer systems. *Sci. Total Environ.* 624, 1513–1522.
Hamza, M. F., Abdel-Rahman, A. A. H., Negm, A. S., Hamad, D. M., Khalafalla, M. S., Fouda, A.,... & Goda, A. E. S. (2022). Grafting of Thiazole Derivative on Chitosan Magnetite Nanoparticles for Cadmium Removal—Application for Groundwater Treatment. *Polymers*, 14, 1240.
Hasan, H. A.& Muhammad, M. H. (2020). A review of biological drinking water treatment technologies for contaminants removal from polluted water resources. *Journal of Water Process Engineering*, 33, 101035.
Hausladen, D. M., Alexander-Ozinskas, A., McClain, C. & Fendorf, S. (2018). Hexavalent chromium sources and distribution in California groundwater. *Environmental Science and Technology*, 52, 8242–8251.
He, J., Zhang, Y., Ni, F., Tian, D., Zhang, Y., Long, L.,... & Zou, J. (2022). Understanding and characteristics of coagulation removal of composite pollution of microplastic and norfloxacin during water treatment. *Science of The Total Environment*, 831, 154826.
He, X., Li, P., Ji, Y., Wang, Y., Su, Z. & Elumalai, V. (2020). Groundwater arsenic and fluoride and associated arsenicosis and fluorosis in China: occurrence, distribution, and management. *Exposure and health*, 12, 355-368.
Herath, I., Vithanage, M., Bundschuh, J., Maity, J. P. & Bhattacharya, P. (2016). Natural arsenic in global groundwaters: distribution and geochemical triggers for mobilization. *Current Pollution Reports*, 2, 68-89.
Herbert, A., Kumar, U.& Janardhan, P. (2021). Removal of hazardous dye from aqueous media using low- cost peanut (Arachis hypogaea) shells as adsorbents. *Water Environment Researc*h, 93, 1032-1043.
Heybet, E.N., Ugraskan, V., Isik, B. & Yazici, O., (2021). Adsorption of methylene blue dye on sodium alginate/polypyrrole nanotube composites. *Journal of Biological Macromolecules*, 193, 88-99.
Hoek, E. M., Jassby, D., Kaner, R. B., Wu, J., Wang, J., Liu, Y.& Rao, U. (2021). *Sustainable*

Kurniawan, T. A., Othman, M. H. D., Adam, M. R., Goh, H. H., Mohyudin, A., Avtar, R.& Kusworo, T. D. (2022). Treatment of whitewater from pulp and paper industry using membrane filtrations. *Chemical Papers*, 76, 5001-5010.

Kurniawan, T. A., Othman, M. H. D., Hwang, G. H.& Gikas, P. (2022). Unlocking digital technologies for waste recycling in Industry 4.0 era: A transformation towards a digitalization-based circular economy in Indonesia. *Journal of Cleaner Production*, 357, 131911.

Kurniawan, T.A., Meidiana, C., Othman, M.H.D., Goh, H.H., Chhong, K.K.; Kerm, A.O. & Kusworo, T.D. (2023). Strengthening waste recycling industry in Malang (Indonesia): Lessons from waste management in the era of Industry 4.0. *Cleaner Production*. 382, 13529.

Li, H., Huang, Y., Liu, J.& Duan, H. (2021). Hydrothermally synthesized titanate nanomaterials for the removal of heavy metals and radionuclides from water: a review. *Chemosphere*, 282, 131046.

Liu, K., Zhao, D., Hu, Z., Xiao, Y., He, C., Jiang, F.,... & Qiu, R. (2023). The adsorption and reduction of anionic Cr (VI) in groundwater by novel iron carbide loaded on N-doped carbon nanotubes: Effects of Fe-confinement. *Chemical Engineering Journal*, 452, 139357.

Lou, X. Y., Boada, R., Simonelli, L. & Valiente, M. (2022). Enhanced arsenite removal by superparamagnetic iron oxide nanoparticles in-situ synthesized on a commercial cube-shape sponge: adsorption-oxidation mechanism. *Journal of colloid and interface science*, 614, 460-467.

Oliveira, L.S., Furtado, L.L., Diniz, F.A.S., Mendes, B.L., Araújo, T.R., Silva, L.P. & Santiago, T.R. (2024) Eco-Friendly Silver Nanoparticles Synthesized from a Soybean By-Product with Nematicidal Efficacy against Pratylenchus brachyurus. *Nanomaterials*, 14, 101.

Ma, B., Ke, Q. & Ulbricht, M. (2023). Simultaneous removal of natural organic matters and copper (II) with ultrafiltration for drinking water treatment. *Journal of Membrane Science*, 671, 121408.

Maamoun, I., Falyouna, O., Eljamal, R., Idham, M. F., Tanaka, K. & Eljamal, O. (2023). Bench-scale injection of magnesium hydroxide encapsulated iron nanoparticles (nFe0@ Mg $(OH)_2$) into porous media for Cr (VI) removal from groundwater. *Chemical Engineering Journal*, 451, 138718.

Madhusha, C., Jayasundara, T., Munaweera, I., Perera, C., Wijesinghe, G., Weerasekera, M.,... & Kottegoda, N. (2023). Synthesis and structural characterization of copper nanoparticles doped activated carbon derived from coconut coir for drinking water purification. *Materials Today Chemistry*, 27, 101312.

Mah, C. F., Yam, F. K. & Hassan, Z. (2016). Investigation and characterization of ZnO

Kapahi, M. & Sachdeva, S. (2019). Bioremediation options for heavy metal pollution. *Journal of health and pollution*, 9, 191203.

Karunanidhi, D., Aravinthasamy, P., Subramani, T., Kumar, D. & Venkatesan, G. (2021). Chromium contamination in groundwater and Sobol sensitivity model-based human health risk evaluation from leather tanning industrial region of South India. *Environmental Research*, 199, 111238.

Kashyap, P., Kaushal, J. & Rani, L. (2023). Remediation Techniques Used for Removal of Fluoride from Groundwater: A Concise Review. *In Journal of Physics: Conference Series*, 2603, 012053.

Kashyap, S. J., Sankannavar, R. & Madhu, G. M. (2021). Fluoride sources, toxicity and fluorosis management techniques–A brief review. *Journal of Hazardous Materials Letters*, 2, 100033.

Kerur, S. S., Bandekar, S., Hanagadakar, M. S., Nandi, S. S., Ratnamala, G. M. & Hegde, P. G. (2021). Removal of hexavalent Chromium-Industry treated water and Wastewater: A review. *Materials Today: Proceedings*, 42, 1112-1121.

Khairani, I. Y., Mínguez-Vega, G., Doñate-Buendía, C.& Gökce, B. (2023). Green nanoparticle synthesis at scale: a perspective on overcoming the limits of pulsed laser ablation in liquids for high-throughput production. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 25, 19380-19408.

Khalilzadeh Shirazi, E., Metzger, J. W., Fischer, K.& Hassani, A. H. (2020). Design and cost analysis of batch adsorber systems for removal of dyes from contaminated groundwater using natural low-cost adsorbents. *International Journal of Industrial Chemistry*, 11, 101-110.

Khan, F., Momtaz, S. & Abdollahi, M. (2019). The relationship between mercury exposure and epigenetic alterations regarding human health, risk assessment, and diagnostic strategies. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 52, 37-47.

Kumar, M., Xiong, X., Wan, Z., Sun, Y., Tsang, D. C., Gupta, J.,... & Ok, Y. S. (20200. Ball milling as a mechanochemical technology for fabrication of novel biochar nanomaterials. *Bioresource Technology*, 312, 123613.

Kurniawan, T. A., Lo, W., Liang, X., Goh, H. H., Othman, M. H. D., Chong, K. K.& Chew, K. W. (2023). Remediation technologies for contaminated groundwater due to arsenic (As), mercury (Hg), and/or fluoride (F): a critical review and way forward to contribute to carbon neutrality. *Separation and Purification Technology*, 314, 123474.

Kurniawan, T. A., Othman, M. H. D., Adam, M. R., Goh, H. H., Mohyudin, A., Avtar, R.& Kusworo, T. D. (2022). Treatment of whitewater from pulp and paper industry using membrane filtrations. *Chemical Papers*, 76, 5001-5010.

modified Fenton method. *Iranian Chemistry and Chemical Engineering*, 37, 149-159. [In Persian].
Munisha, B., Patra, L., Nanda, J., Pandey, R. & Brahma, S. S. (2023). CeMnO3 Nanoparticle-Decorated g-C_3N_4 Nanosheets as Z-Scheme Heterostructures for Efficient Photocatalytic Degradation of Dyes. *ACS Applied Nano Materials*, 6, 20539–20555.
Nakhaei, M., Mokhtari, H., Vatanpour Serghin, V.& Rezaei, K. (2023). Efficiency of natural zeolite in the removal of heavy metals lead, cadmium& cobalt using a fixed-bed adsorption column in Varamin aquifer (Iran, Tehran Province). *Hydrogeology*, 8, 93-113.
Nasief, F. M., Shaban, M., Alamry, K. A., Khadra, M. R. A., Khan, A. A. P., Asiri, A. M.& Abd El-Salam, H. M. (2021). Hydrothermal synthesis and mechanically activated zeolite material for utilizing the removal of Ca/Mg from aqueous and raw groundwater. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9, 105834.
Nazari, A., Nakhaei, M.& Yari, A. R. (2021). Arsenic adsorption by TiO2 nanoparticles under conditions similar to groundwater: batch and column studies. *International Journal of Environmental Research*, 15, 79-91.
Ng, M. H.& Elshikh, M. S. (2021). Utilization of Moringa oleifera as natural coagulant for water purification. *Industrial and Domestic Waste Management*, 1, 1-11.
Ngoc, P.K., Mac, T.K., Nguyen, H.T., Viet, D.T., Thanh, T.D., Vinh, P.V., Phan, B.T,. Duong, A.T. & Das, R. (2022). Superior organic dye removal by $CoCr_2O_4$ nanoparticles adsorption kinetics and isotherm. *Journal of Science: Advanced Materials and Devices*, 7,100438.
Noor Moradi, H., Karami, N. & Mazloomi, S. (2016). Investigating the effect of household water purifiers on the quality of drinking water in Ilam city. *Environmental Health Engineering*, 5, 57-64.
Nyabadza, A., Vazquez, M.& Brabazon, D. (2023). A review of bimetallic and monometallic nanoparticle synthesis via laser ablation in liquid. *Crystals*, 13, 253.
Nyabadza, A., Vázquez, M. & Brabazon, D. (2022). Modeling of Pulsed Laser Ablation in Liquid via Monte Carlo techniques: The effect of laser parameters and liquid medium on the electron cloud. *Solid State Sci*, 133, 107003.
Parashar, M., Shukla, V. K.& Singh, R. (2020). Metal oxides nanoparticles via sol–gel method: a review on synthesis, characterization, and applications. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 31, 3729-3749.
Pavithra, K. G., SundarRajan, P., Kumar, P. S.& Rangasamy, G. (2023). Mercury sources, contaminations, mercury cycle, detection and treatment techniques: A review. *Chemosphere*, 312, 137314.
Nanostructures synthesized by electrochemical deposition. *Procedia Chemistry*, 19, 83-90.
Mamais, D., Noutsopoulos, C., Kavallari, I., Nyktari, E., Kaldis, A., Panousi, E.,... & Nasioka, M. (2016). Biological groundwater treatment for chromium removal at low hexavalent chromium concentrations. *Chemosphere*, 152, 238-244.
Mansor, E. S., Abdallah, H., Shalaby, M. S.& Shaban, A. M. (2023). Enhancement of reverse osmosis membranes for groundwater purification using cellulose acetate incorporated with ultrathin graphitic carbon nitride nanosheets. *Environmental Nanotechnology, Monitoring and Management*, 19, 100760.
Manyangadze, M., Chikuruwo, N. H. M., Chakra, C. S., Narsaiah, T. B., Radhakumari, M.& Danha, G. (2020). Enhancing adsorption capacity of nano-adsorbents via surface modification: A review. *South African Journal of Chemical Engineering*, 31, 25-32.
Marinho, B. A., Cristóvão, R. O., Boaventura, R. A.& Vilar, V. J. (2019). As (III) and Cr (VI) oxyanion removal from water by advanced oxidation/reduction processes—a review. *Environmental Science and Pollution Research*, 26, 2203-2227.
Maroufi, N.& Hajilary, N. (2023). Nanofiltration membranes types and application in water treatment: a review. *Sustainable Water Resources Management*, 9, 142.
McCarthy, É., Sreenilayam, S. P., Ronan, O., Ayub, H., McCann, R., McKeon, L.,... & Brabazon, D. (2022). Silver nano colloid generation using dynamic Laser Ablation Synthesis in Solution system and drop-casting. *Nano-Structures and Nano-Objects*, 29, 100841.
Mohammadian, S., Tabani, H., Boosalik, Z., Asadi Rad, A., Krok, B., Fritzsche, A.,... & Meckenstock, R. U. (2022). In Situ Remediation of Arsenic-Contaminated Groundwater by Injecting an Iron Oxide Nanoparticle-Based Adsorption Barrier. *Water*, 14, 1998.
Moradi, H., Sabbaghi, S., Mirbagheri, N. S., Chen, P., Rasouli, K., Kamyab, H.& Chelliapan, S. (2023). Removal of chloride ion from drinking water using Ag NPs-Modified bentonite: Characterization and optimization of effective parameters by response surface methodology-central composite design. *Environmental Research*, 223, 115484.
Moslehyani, A., Ismail, A. F., Matsuura, T., Rahman, M. A.& Goh, P. S. (2019). Recent progresses of ultrafiltration (UF) membranes and processes in water treatment. *In Membrane Separation Principles and Applications*, 85-110.
Mosmeri, H., Alaei, E., Shundi, M., Dastghib, S. M. M. & Tashrafi, S. (2017). Purification of underground water contaminated with benzene by

Pakistan: A review. *Environmental Pollution*, 301, 118995.

Ravindran, L., Jesitha, K., Megha, P. U., Anilkumar, S., Sreekala, M. S.& Harikumar, P. S. (2022). Nano silica Entrapped Alginate Beads for the Purification of Groundwater Contaminated with Bacteria. *Silicon*, 14, 8707–8720.

Razali, M. C., Wahab, N. A., Sunar, N.& Shamsudin, N. H. (2023). Existing Filtration Treatment on Drinking Water Process and Concerns Issues. *Membranes*, 13, 285.

Ren, K., Pan, X., Yuan, D., Zeng, J., Liang, J.& Peng, C. (2022). Nitrate sources and nitrogen dynamics in a karst aquifer with mixed nitrogen inputs (Southwest China): Revealed by multiple stable isotopic and hydro-chemical proxies. *Water Research*, 210, 118000.

Richa, A., Touil, S.& Fizir, M. (2022). Recent advances in the source identification and remediation techniques of nitrate contaminated groundwater: A review. *Journal of Environmental Management*, 316, 115265.

Robledo-Peralta, A., López-Guzmán, M., Morales-Amaya, C. G.& Reynoso-Cuevas, L. (2021). Arsenic and fluoride in groundwater, prevalence, and alternative removal approach. *Processes*, 9,1191.

Ronavari, A., Igaz, N., Adamecz, D.I., Szerencses, B., Molnar, C., Konya, Z., Pfeiffer, I. & Kiricsi, M. (2021). Green Silver and Gold Nanoparticles: Biological Synthesis Approaches and Potentials for Biomedical Applications, *Molecules*, 26, 844.

Saha, A., Neogy, S., PP, M. S., Prajapat, C. L., Deb, S. B.& Saxena, M. K. (2021). Rapid and selective magnetic separation of uranium in seawater and groundwater using novel phosphoramidite functionalized citrate-Fe_3O_4@Ag nanoparticles. *Talanta*, 231, 122372.

Sahu, J. N., Kapelyushin, Y., Mishra, D. P., Ghosh, P., Sahoo, B. K., Trofimov, E.& Meikap, B. C. (2023). Utilization of ferrous slags as coagulants, filters, adsorbents, neutralizers/stabilizers, catalysts, additives& bed materials for water and wastewater treatment: A review. *Chemosphere*, 325, 138201.

Salabat, A.& Mirhoseini, F. (2022). Polymer- based nanocomposites fabricated by microemulsion method. *Polymer Composites*, 43, 1282-1294.

Saleh, T. A. (2020). Nanomaterials: Classification, properties& environmental toxicities. *Environmental Technology and Innovation*, 20, 101067.

Saravanan, A., Kumar, P. S., Hemavathy, R. V., Jeevanantham, S., Jawahar, M. J., Neshaanthini, J. P.& Saravanan, R. (2022). A review on synthesis methods and recent applications of nanomaterial in wastewater treatment: Challenges and future perspectives. *Chemosphere*, 307, 135713.

Petrovic, R., Lazarevic, S., Jankovic-Castvan, I., Matic, T., Milivojevic, M., Milosevic, D.& Veljovic, D. (2023). Removal of trivalent chromium from aqueous solutions by natural clays: Valorization of saturated adsorbents as raw materials in ceramic manufacturing. *Applied Clay Science*, 231, 106747.

Pezeshki, H., Hashemi, M.& Rajabi, S. (2023). Removal of arsenic as a potentially toxic element from drinking water by filtration: A mini-review of nanofiltration and reverse osmosis techniques. *Heliyon*, 9, 1-10.

Podgorski, J.& Berg, M. (2020). The global threat of arsenic in groundwater. *Science*, 368, 845-850.

Podgorski, J.& Berg, M. (2022). Global analysis and prediction of fluoride in groundwater. *Nature Communications*, 13, 4232.

Pohl, A. (2020). Removal of heavy metal ions from water and wastewaters by sulfur-containing precipitation agents. *Water, Air and Soil Pollution*, 231, 503.

Pottathara, YB., Grohens, Y., Kokol, V., Kalarikkal, N. & Thomas, S. (2019). *Synthesis and processing of emerging two-dimensional nanomaterials. In: Nanomaterials synthesis: design, fabrication, and applications*. Elsevier, pp. 1–25.

Pous, N., Balaguer, M. D., Colprim, J. & Puig, S. (2018). Opportunities for groundwater microbial electro-remediation. *Microbial Biotechnol*, 11, 119–135

Qasem, N. A., Mohammed, R. H.& Lawal, D. U. (2021). Removal of heavy metal ions from wastewater: A comprehensive and critical review. *Npj Clean Water*, 4, 1-15.

Rachini, M., Jaafar, M., Tabaja, N., Tlais, S., Hamdan, R., Al Ali, F.,... & Toufaily, J. (2023). Comparative study between supported bimetallic catalysts for nitrate remediation in water. *Open Chemistry*, 21.

Rahman, A., Mondal, N. C.& Tiwari, K. K. (2021). Anthropogenic nitrate in groundwater and its health risks in the view of background concentration in a semi-arid area of Rajasthan, India. *Scientific reports*, 11, 9279.

Rahman, Z.& Singh, V. P. (2019). The relative impact of toxic heavy metals (THMs) (arsenic (As), cadmium (Cd), chromium (Cr) (VI), mercury (Hg), and lead (Pb)) on the total environment: an overview. *Environmental monitoring and assessment*, 191, 1-21.

Rane, A. V., Kanny, K., Abitha, V. K.& Thomas, S. (2018). *Methods for synthesis of nanoparticles and fabrication of nanocomposites. In Synthesis of inorganic nanomaterials*, Woodhead Publishing, pp. 121-139.

Rashid, S., Shah, I. A., Tulcan, R. X. S., Rashid, W.& Sillanpaa, M. (2022). Contamination, exposure& health risk assessment of Hg in

Singh, K. K., Singh, A.& Rai, S. (2022). A study on nanomaterials for water purification. *Materials Today: Proceedings*, 51, 1157-1163.

Soliman, A. M., Alshamsi, D., Murad, A. A., Aldahan, A., Ali, I. M., Ayesh, A. I.& Elhaty, I. A. (2022). Photocatalytic removal of nitrate from water using activated carbon loaded with bimetallic Pd-Ag nanoparticles under natural solar radiation. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 433, 114175.

Song, W., Zhang, X., Zhang, L., Yu, Z., Li, X., Li, Y.,... & Yan, L. (2023). Removal of various aqueous heavy metals by polyethylene glycol-modified MgAl-LDH: Adsorption mechanisms and vital role of precipitation. *Journal of Molecular Liquids*, 375, 121386.

Sportelli, M. C., Izzi, M., Volpe, A., Clemente, M., Picca, R. A., Ancona, A.,... & Cioffi, N. (2018). The pros and cons of the use of laser ablation synthesis for the production of silver nano-antimicrobials. *Antibiotics*, 7, 67.

Srivastava, A., Singh, R., Rajput, V. D., Minkina, T., Agarwal, S.& Garg, M. C. (2022). A systematic approach towards optimization of brackish groundwater treatment using nanofiltration (NF) and reverse osmosis (RO) hybrid membrane filtration system. *Chemosphere*, 303, 135230.

Sun, L., Yin, J., Liang, Q.& Gong, Y. (2023). Physical Stability of Carboxymethyl Cellulose Stabilized Ferrous Sulfide Nanoparticles in Simulated Groundwater Under Anaerobic Conditions and the Corresponding Effect on Mercury Removal. *Water, Air& Soil Pollution*, 234, 714.

Tabatabai, M and Akbarpour, A. (2018). A review of global experiences of pumping and purification methods in purifying polluted aquifers. *Water and Wastewater Science and Engineering*, 3, 33-48.

Tang, X., Xia, W., Qu, X., Wang, C., Wang, W., Liang, Y.,... & Zhao, X. (2023). Structure–performance correlation guided cerium-based metal–organic frameworks: Superior adsorbents for fluoride removal in water. *Chemosphere*, 312, 137335.

Tao, X., Chen, F., Li, J., Liu, Y., Hu, X.& Chen, R. (2022). Efficient promotion of Cr (VI) removal over Bi_2S_3 nanoparticles with cupric ions: Potential applications in electroplating wastewater and contaminated groundwater. *Separation and Purification Technology*, 303, 122114.

Tejada-Tovar, C., Villabona-Ortiz, A.& Gonzalez-Delgado, A. (2022). Adsorption study of continuous heavy metal ions (Pb2+, Cd2+, Ni2+) removal using cocoa (Theobroma cacao L.) pod husks. *Materials*, 15, 6937.

Thambiliyagodage, C.& Wijesekera, R. (2022). Ball milling–A green and sustainable technique for the preparation of titanium-based materials from

Saravanan, A., Kumar, P. S., Karishma, S., Vo, D. V. N., Jeevanantham, S., Yaashikaa, P. R.& George, C. S. (2021). A review on biosynthesis of metal nanoparticles and its environmental applications. *Chemosphere*, 264, 128580.

Sarkar, A., Paul, B.& Darbha, G. K. (2022). The groundwater arsenic contamination in the Bengal Basin-A review in brief. *Chemosphere*, 299, 134369.

Sayago, I., Hontañón, E.& Aleixandre, M. (2020). Preparation of tin oxide nanostructures by chemical vapor deposition. *Tin Oxide Materials*, 247-280.

Schafer, D., Sun, J., Jamieson, J., Siade, A. J., Atteia, O., & Prommer, H. (2020). Model-based analysis of reactive transport processes governing fluoride and phosphate release and attenuation during managed aquifer recharge. *Environmental Science & Technology*, 54, 2800-2811.

Schlesinger, W. H., Klein, E. M.& Vengosh, A. (2020). Global biogeochemical cycle of fluorine. *Global Biogeochemical Cycles*, 34.

Senanu, L. D., Kranjac-Berisavljevic, G.& Cobbina, S. J. (2023). The use of local materials to remove heavy metals for household-scale drinking water treatment: A review. *Environmental Technology and Innovation*, 29, 103005.

Sepehri, S., Kanani, E., Abdoli, S., Rajput, V. D., Minkina, T., & Asgari Lajayer, B. (2023). Pb (II) Removal from aqueous solutions by adsorption on stabilized zero-valent iron nanoparticles—a green approach. *Water*, 15, 222.

Shafiee, P., Nafchi, M. R., Eskandarinezhad, S., Mahmoudi, S.& Ahmadi, E. (2021). Sol-gel zinc oxide nanoparticles: advances in synthesis and applications. *Synthesis and Sintering*, 1, 242-254.

Shahaji, S. P., Tanaji, C. S.& Suhas, J. A. (2023). Removal of nitrate from aqueous solution by using orange peel and wheat straw. *Materials Today: Proceedings*, 73, 468-473.

Shamshirgaran, R., Malakooti, R., Akbarpour, A.& Moghaddam, A. Z. (2022). Fabrication of Polyvinylpyrrolidone- Stabilized Nano Zero- Valent Iron Supported by Hydrophilic Biochar for Efficient Cr (VI) Removal from Groundwater. *ChemistrySelect*, 7.

Shamsollahi, Z.& Partovinia, A. (2019). Recent advances on pollutants removal by rice husk as a bio-based adsorbent: A critical review. *Journal of Environmental Management*, 246, 314-323.

Sholl, D. S.& Lively, R. P. (2016). Seven chemical separations to change the world. *Nature*, 532, 435-437

Singh, A. D., Khanna, K., Kour, J., Dhiman, S., Bhardwaj, T., Devi, K.,... & Bhardwaj, R. (2023). Critical review on biogeochemical dynamics of mercury (Hg) and its abatement strategies. *Chemosphere*, 319, 137917.

Powder from Machining Chips Using Ball Milling Process: A Review. *Materials*, 16, 4635.
Wong, C. D. S., Yeoh, J. X., Wu, T., Manickam, S.& Pang, C. H. (2022). Biomass to nanoparticles: recent advances in the process and processing towards sustainability. *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*, 175, 108908.
World Health Organization. (2021). Manganese in drinking water: background document for development of WHO guidelines for drinking-water quality (No. WHO/HEP/ECH/WSH/2021.5). World Health Organization.
Wu, J., Cao, M., Tong, D., Finkelstein, Z.& Hoek, E. M. (2021). A critical review of point-of-use drinking water treatment in the United States. *NPJ Clean Water*, 4, 40.
Yadav, A., Kumar, H., Sharma, R.& Kumari, R. (2023). Synthesis, processing& applications of 2D (nano) materials: A sustainable approach. *Surfaces and Interfaces*, 39, 102925.
Yadav, M., Singh, G.& Jadeja, R. N. (2021). Fluoride contamination in groundwater, impacts& their potential remediation techniques. *Groundwater Geochemistry: Pollution and Remediation Methods*, 22-41.
Yang, G., & Park, S. J. (2019). Conventional and microwave hydrothermal synthesis and application of functional materials: A review. *Materials*, 12, 1177.
Yang, H., Xu, S., Chitwood, D. E.& Wang, Y. (2020). Ceramic water filter for point-of-use water treatment in developing countries: Principles, challenges, and opportunities. *Frontiers of Environmental Science and Engineering*, 14, 1-10.
Yang, Y., Li, X., Gu, Y., Lin, H., Jie, B., Zhang, Q.& Zhang, X. (2022). Adsorption property of fluoride in water by metal-organic framework: optimization of the process by response surface methodology technique. *Surfaces and Interfaces*, 28, 101649.
Yavari-Bafghi, M., Shavandi, M., Dastgheib, S. M. M.& Amoozegar, M. A. (2022). Simultaneous application of CaO2 nanoparticles and microbial consortium in Small Bioreactor Chambers (SBCs) for phenol removal from groundwater. *Process Safety and Environmental Protection*, 160, 465-477.
Yee, J. J., Arida, C. V. J., Futalan, C. M., de Luna, M. D. G.& Wan, M. W. (2019). Treatment of contaminated groundwater via arsenate removal using chitosan-coated bentonite. *Molecules*, 24, 2464.
Yi, X. H., Gao, Y., Wang, C. C., Li, Y. H., Chu, H. Y.& Wang, P. (2023). Photocatalytic Cr (VI) reduction over MIL-88A (Fe) on polyurethane sponge: From batch to continuous-flow operation. *Chinese Chemical Letters*, 34, 108029.
Yoon, K., Cho, D. W., Tsang, D. C., Bolan, N., Rinklebe, J.& Song, H. (2017). Fabrication of ilmenite. *Current Research in Green and Sustainable Chemistry*, 5, 100236.
Tolonen, E. T., Hu, T., Rämö, J.& Lassi, U. (2016). The removal of sulphate from mine water by precipitation as ettringite and the utilization of the precipitate as a sorbent for arsenate removal. *Journal of Environmental Management*, 181, 856-862.
Tsade, H., Murthy, H. A.& Muniswamy, D. (2020). Bio-sorbents from agricultural wastes for eradication of heavy metals: a review. *J Mater Environ Sci*, 11, 1719-1735.
Turner, T., Wheeler, R., Stone, A.& Oliver, I. (2019). Potential alternative reuse pathways for water treatment residuals: Remaining barriers and questions—A review. *Water, Air and Soil Pollution*, 230, 227.
Vaseghi, Z., & Nematollahzadeh, A. (2020). Nanomaterials: types, synthesis, and characterization. *Green synthesis of nanomaterials for bioenergy applications*, 23-82.
Velayatzadeh, M., & Payandeh, Kh. (2018). Investigating the effect of household water purification devices on the concentration of metals in the drinking water of Ahvaz city. *Southern Medicine*, 22, 402-414.
Verma, A., Sharma, A., Kumar, R.& Sharma, P. (2023). Nitrate contamination in groundwater and associated health risk assessment for Indo-Gangetic Plain, India. *Groundwater for Sustainable Development*, 100978.
Vijayakumar, C. R., Balasubramani, D. P.& Azamathulla, H. M. (2022). Assessment of groundwater quality and human health risk associated with chromium exposure in the industrial area of Ranipet, Tamil Nadu, India. *Journal of Water, Sanitation and Hygiene for Development*, 12, 58-67.
Wang, J., Guo, M., Luo, Y., Shao, D., Ge, S., Cai, L., Xia, C., Lam, S.S., (2021). Production of magnetic sodium alginate polyelectrolyte nanospheres for lead ions removal from wastewater. *Journal of environmental management*, 289, 112506.
Wang, S., Li, X., Wu, J., Wen, W.& Qi, Y. (2018). Fabrication of efficient metal halide perovskite solar cells by vacuum thermal evaporation: A progress review. *Current opinion in Electrochemistry*, 11, 130-140.
Wang, Y., Hu, Y. J., Hao, X., Peng, P., Shi, J. Y., Peng, F.& Sun, R. C. (2020). Hydrothermal synthesis and applications of advanced carbonaceous materials from biomass: a review. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 3, 267-284.
Wei, L. K., Abd Rahim, S. Z., Al Bakri Abdullah, M. M., Yin, A. T. M., Ghazali, M. F., Omar, M. F.,... & Abdellah, A. E. H. (2023). Producing Metal

engineered biochar from paper mill sludge and its application into removal of arsenic and cadmium in acidic water. *Bioresource Technology*, 246, 69-75.

Yu, H., Li, X., Chang, H., Zhou, Z., Zhang, T., Yang, Y.,... & Liang, H. (2020). Performance of hollow fiber ultrafiltration membrane in a full-scale drinking water treatment plant in China: A systematic evaluation during 7-year operation. *Journal of Membrane Science*, 613, 118469.

Zama, E. F., Li, G., Tang, Y. T., Reid, B. J., Ngwabie, N. M.& Sun, G. X. (2022). The removal of arsenic from solution through biochar-enhanced precipitation of calcium-arsenic derivatives. *Environmental Pollution*, 292, 118241.

Zeng, G., Zhang, R., Liang, D., Wang, F., Han, Y., Luo, Y.,... & Sun, D. (2023). Comparison of the Advantages and Disadvantages of Algae Removal Technology and Its Development Status. *Water*, 15, 1104.

Zhang, S., Zheng, H. & Tratnyek, P. G. (2023). Advanced redox processes for sustainable water treatment. *Nature Water*, 1, 666-681.

Zhang, Y., Wang, Y., Zhang, H., Li, Y., Zhang, Z.& Zhang, W. (2020). Recycling spent lithium-ion battery as adsorbents to remove aqueous heavy metals: Adsorption kinetics, isotherms, and regeneration assessment. *Resources, Conservation and Recycling*, 156, 104688.

Zhou, Z., Xie, A., Tan, Y., Zhang, J.& Xue, C. (2023). Vacuum-assisted thermal evaporation deposition for the preparation of AgNPs/NF 3D SERS substrates and their applications. *New Journal of Chemistry*. 47, 21225-21231.