

## Heavy Metal Removal Methods from Water and Wastewater: A Review Study

### Gity Behbudi

M.Sc. of Chemical Engineering, Technical and Engineering Faculty, Mohaghegh Ardabili University, Ardabil, Iran

### Keivan Shayesteh

\* Assistant Professor, Department of Chemical Engineering, Technical and Engineering Faculty, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran. (Corresponding Author):  
Email: k.shayesteh@uma.ac.ir

Received: 2020/02/18

Accepted: 2020/08/05

**Document Type:** Research article

### ABSTRACT

**Background and Aim:** Heavy metals are refractory pollutants that do not decompose in nature and can be released into the environment by sewage or wastewater from various industries. Usually, trace amounts of these metals are required for the normal functioning of the body. However, their excessive intake can cause poisoning in the body. The purpose of this research was to review various physical, chemical, and biological methods for the removal of heavy metals.

**Materials and Methods:** In this paper, the relevant articles between 2014 and 2019 were searched in databases such as Springer, Science Direct, Scopus, Freepaper, and John Wiley to obtain the latest findings on heavy metal removal methods.

**Results:** Studies show that heavy metals can affect human health, so their removal is essential. Various physical, chemical, and biological methods for the removal of heavy metals include membrane filtration, chemical precipitation, electrochemical purification, ion exchange, adsorption, and bioremediation.

**Conclusion:** The results of studies showed that heavy metals have destructive effects and they are necessary to be removed from water and soil. The advantages and disadvantages of heavy metal removal methods make it possible to choose the right method in terms of costs and availability of technical knowledge.

Type of paper: Review paper

**Keywords:** Heavy Metal Removal; Electrochemical Treatment; Bioremediation; Chemical Precipitation; Photocatalytic Method

► **Citation:** Behbudi G, Shayesteh K. Heavy Metal Removal Methods from Water and Wastewater: A Review Study. *Iranian Journal of Research in Environmental Health*. Summer 2020; 6(2): 145-160.

## روش‌های حذف فلزات سنگین از محیط آب و فاضلاب: یک مطالعه مروری

### چکیده

**زمینه و هدف:** فلزات سنگین یکی از آلاینده‌های پایداری هستند که در طبیعت تجزیه نمی‌شوند و می‌توانند همراه پساب یا فاضلاب صنایع مختلف به محیط‌زیست وارد شوند. معمولاً این فلزات به مقدار کمی برای عملکرد طبیعی بدن مورد نیاز هستند؛ اما ورود بیش از حد مجاز آن‌ها به بدن، مسمومیت ایجاد خواهد کرد. مطالعه حاضر با هدف مروری بر روش‌های مختلف حذف فلزات سنگین در قالب روش‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی انجام شد.

**مواد و روش‌ها:** در مقاله حاضر، مقالات مرتبط منتشر شده در سال‌های ۲۰۱۴-۲۰۱۹ در بانک‌های اطلاعاتی *John Wiley* و *Springer*، *Science direct*، *Scopus*، *Freepaper* جهت به‌دست آوردن آخرین یافته‌ها در زمینه روش‌های حذف فلزات سنگین انتخاب و مورد بررسی قرار گرفتند.

**یافته‌ها:** مطالعات نشان می‌دهد فلزات سنگین می‌توانند سلامتی انسان‌ها را تحت تأثیر قرار دهند. به همین دلیل حذف فلزات سنگین امری ضروری می‌باشد و روش‌های مختلفی برای حذف فلزات سنگین در قالب روش‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی از قبیل روش‌های غشایی، ته‌نشینی شیمیایی، تصفیه الکتروشیمیایی، تبادل یونی، جذب سطحی و زیست‌پالایی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

**نتیجه‌گیری:** نتایج مطالعات نشان داد، فلزات سنگین اثرات مخربی بر جای می‌گذارند و حذف و تصفیه این فلزات از آب و خاک ضرورت دارد. ارائه مزایا و معایب روش‌های حذف فلزات سنگین، امکان انتخاب روش مناسب از نظر هزینه و دسترسی به دانش فنی را به‌سادگی امکان‌پذیر می‌کند.

**کلید واژه‌ها:** تصفیه الکتروشیمیایی، ته‌نشینی شیمیایی، حذف فلزات سنگین، روش فتوکاتالیستی، زیست‌پالایی

### گیتی بهبودی

کارشناس ارشد مهندسی شیمی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

### کیوان شایسته

\* استادیار، گروه مهندسی شیمی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.  
(نویسنده مسئول):

پست الکترونیک:

k.shayesteh@uma.ac.ir.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۱/۲۹

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۵/۱۵

نوع مقاله: مقاله مروری

◀ **استناد:** بهبودی گ، شایسته ک. روش‌های حذف فلزات سنگین از محیط آب و فاضلاب: یک مطالعه مروری. *فصلنامه پژوهش در بهداشت محیط*. تابستان ۱۳۹۹؛ ۶(۲): ۱۴۵-۱۶۰.

## مقدمه

فلزات سنگین، عناصری هستند که دارای وزن اتمی بین ۶۳/۵ تا ۲۰۰/۶ گرم و وزن مخصوص بزرگ‌تر از ۵/۰ گرم بر سانتی‌متر مکعب می‌باشند (۱). کبالت (Co)، مس (Cu)، کروم (Cr)، آهن (Fe)، منگنز (Mn)، مولیبدن (Mo)، نیکل (Ni)، سلنیوم (Se) و روی (Zn) از جمله فلزات سنگین می‌باشند که برای عملکرد طبیعی بدن نیز مورد نیاز هستند (۲)؛ اما ورود بیش از حد مجاز فلزات سنگین به بدن، مسمومیت ایجاد خواهد کرد. مقادیر بیش از حد فلزات سنگین در خاک و آب، مسئله مهمی است که می‌تواند تهدید کننده اکوسیستم‌های آبی، کشاورزی و سلامت عمومی جامعه باشد (۳). بسیاری از چشمه‌های آب‌های معدنی خصوصاً چشمه‌های آب گرم، به‌طور طبیعی حاوی آرسنیک و فلزات سنگین می‌باشند. این چشمه‌ها در حین عبور از اعماق زمین، در تماس با بستریهای مختلف و با ترکیبات متفاوت قرار می‌گیرند؛ لذا حاوی ترکیبات متفاوتی می‌شوند که وجود دمای بالای اعماق زمین، باعث تشدید غلظت این اجزا می‌گردد؛ بنابراین به‌صورت طبیعی آب‌های سطحی متأثر از این چشمه‌ها، می‌توانند به فلزات سنگین آلوده شوند. همچنین محیط‌زیست از طریق فعالیت‌های انسانی مانند استخراج معادن، تولید شمش فلزاتی نظیر سرب، روی، مس، کادمیم و...، تولید سوخت و انرژی، استفاده از سموم کشاورزی، صنایع باتری‌سازی و رنگ‌سازی به فلزات سنگین آلوده می‌شود (۴). این فلزات می‌توانند از طریق آب، هوا و خاک به‌طور مستقیم (نوشیدن آب و استنشاق هوای آلوده به فلز سنگین) و یا غیر مستقیم (خوردن محصولات، میوه‌ها و گوشت حیوانات آلوده به فلز سنگین) وارد بدن انسان شوند. این فلزات به‌علت عدم دفع و تجزیه، در بدن انباشته شده و مشکلات زیادی در بدن ایجاد می‌کنند (۵). از مهم‌ترین ویژگی‌های سمیت فلزات سنگین می‌توان به موارد زیر اشاره کرد (۶):

- این عناصر سمی در طبیعت و بدن پایداری زیادی دارند.
- میزان سمیت برخی از فلزات سنگین از قبیل جیوه در یک محیط خاص به مرور زمان افزایش پیدا می‌کند.

- تجمع فلزات سنگین و افزایش غلظت فلزات سنگین در بدن، سبب افزایش سمیت آن‌ها شده و به فعالیت‌های فیزیولوژیکی بدن آسیب می‌رساند.
  - میزان غلظت و سمیت فلزات سنگین با هم متفاوت هستند؛ اما آرسنیک، کادمیم و جیوه حتی در مقادیر بسیار پایین نیز می‌توانند ایجاد سمیت کنند.
- تماس با فلزات سنگین می‌تواند سبب مشکلات پوستی، گوارشی، تنفسی، کلیوی، کبدی و سرطان شود (۷). فلزات سنگین نظیر کروم، آرسنیک، کادمیم، جیوه و سرب پتانسیل بیشتری برای آسیب رساندن به سلامتی دارند (۸). مطابق جدول ۱، حدود مجاز و تأثیرات مخرب برخی از فلزات سنگین در آب شرب، بر اساس رهنمودهای سازمان حفاظت محیط زیست ایالات متحده USEPA<sup>۱</sup> ارائه شده است. با توجه به اثرات مخرب و مشکلات جدی حضور فلزات سنگین در آب شرب و کشاورزی برای سلامتی انسان، لذا باید نسبت به حذف و کاهش فلزات سنگین اقدام نمود؛ روش‌های متعددی جهت حذف فلزات سنگین در دنیا مورد استفاده قرار می‌گیرد. هدف اصلی این مقاله، کمک به انتخاب راحت و سریع بهترین روش با توجه به بررسی معایب و مزایای روش‌ها می‌باشد. در این مطالعه ابتدا روش‌های متداول حذف و مکانیزم جداسازی نظیر روش غشایی، ته‌نشینی شیمیایی، تصفیه الکتروشیمیایی، تبادل یونی، جذب سطحی، زیست‌پالایی و فتوکاتالیستی به اجمال مورد بررسی قرار گرفت و سعی شد تا با ارائه مزایا و معایب روش‌ها، امکان انتخاب روش مناسب به‌راحتی وجود داشته باشد. منظور از روش مناسب، روشی است که در عین دسترسی به دانش فنی، در فرآیند تصفیه از کارایی بالایی برخوردار بوده و از منظر هزینه نیز اقتصادی باشد.

1. United States Environmental Protection Agency

جدول ۱. حد مجاز فلزات سنگین در آب شرب و تأثیرات مخرب آن بر سلامت انسان بر اساس USEPA (۹)

نام فلز	حداکثر غلظت مجاز مورد نظر <sup>۱</sup> (میلی گرم بر لیتر)	حداکثر غلظت مجاز <sup>۲</sup> (میلی گرم بر لیتر)	عوارض
آرسنیک	۰	۰/۰۱	ضایعات پوستی، هیپوپیگمانتاسیون، سرطان پوست (۱۰)
کادمیوم	۰/۰۰۵	۰/۰۰۵	آسیب کلیه، کبدی، ناراحتی پانکراس (۱۱)
کروم	۰/۱	۰/۱	مشکلات تنفسی، ناراحتی ریه، آسم (۱۲)
مس	۱/۳	۱/۳	سوزش چشم، سردرد، حالت تهوع (۱۳)
جیوه	۰/۰۰۲	۰/۰۰۲	از دست دادن حافظه، آسیب کلیه، زودرنجی (۱۴)
سرب	۰	۰/۰۱۵	سرطان‌زا، کاهش عملکرد سیستم عصبی، ضعف در انگشتان (۱۵)

## روش کار

در مقاله حاضر، پس از جستجوی مقالات مرتبط منتشر شده در بانک‌های اطلاعاتی مانند Springer، Science direct، Scopus، Freepaper و John Wiley مراجع حاضر در متن جهت به دست آوردن آخرین یافته‌ها در زمینه روش‌های حذف فلزات سنگین انتخاب و مورد بررسی قرار گرفت. در این تحقیق کلیدواژه‌هایی مانند فلزات سنگین، روش‌های حذف فلزات سنگین و مزایا و معایب روش‌های حذف فلزات سنگین جهت جستجو در بانک‌های اطلاعاتی مورد استفاده قرار گرفت.

## یافته‌ها

روش‌های حذف فلزات سنگین از محلول‌های آبی شامل فرآیندهای فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی می‌باشند (۱۶). در این بخش متداول‌ترین روش‌های حذف فلزات سنگین از محیط‌های آبی به‌طور مختصر مورد بررسی قرار می‌گیرد.

## فرآیندهای غشایی

برای حذف فلزات سنگین، از روش غشایی می‌توان استفاده نمود که به دلیل اجرای راحت، انتخاب پذیری در حذف فلزات و بازده بالا مورد توجه می‌باشد. در این روش آب آلوده به فلز سنگین در معرض غشاء قرار گرفته و جداسازی اتفاق می‌افتد. فرآیند غشایی با توجه به اندازه حفراتشان به صورت میکروفیلتراسیون، اولترافیلتراسیون، نانوفیلتراسیون و اسمز معکوس طبقه‌بندی می‌شوند. میانگین

اندازه حفرات برای غشای میکروفیلتراسیون ۵۰-۱۰۰۰۰ نانومتر است. این غشاء می‌تواند ماکرومولکول‌هایی با وزن مولکولی کمتر از ۱۰۰۰۰۰ گرم بر مول را جدا کند. معمولاً ذراتی از قبیل رسوب، جلبک و باکتری از این غشاء عبور نمی‌کنند. بیشتر مواد میکروسکوپی نظیر یون‌ها، مواد آلی محلول، کلونیدهای کوچک و ویروس‌ها قادر به عبور از غشاهای میکرو می‌باشند. فشار اعمالی برای انجام فرآیند میکروفیلتراسیون در محدوده ۵-۵۰ کیلوپاسکال می‌باشد. اولترافیلتراسیون، یکی دیگر از فرآیندهای مهم غشایی است که در آن میانگین اندازه حفرات غشاء در آن ۵-۱۰۰ نانومتر است. غشای اولترافیلتراسیون مواد با وزن مولکولی بالا، مواد کلونیدی، مولکول‌های پلیمری آلی و معدنی را حذف می‌کند. مواد آلی با وزن مولکولی پایین و یون‌هایی از قبیل سدیم، کلسیم، منیزیم، کلراید و بروماید نمی‌توانند توسط غشای اولترافیلتراسیون حذف شوند. از آنجایی که مواد با وزن مولکولی بالا توسط غشای اولترافیلتراسیون حذف می‌شوند؛ لذا فشار اعمالی برای انجام این فرآیند بیشتر از فرآیند موجود در میکروفیلتراسیون و در حدود ۱ مگاپاسکال است. نانوفیلتراسیون نیز یکی دیگر از فرآیندهای غشایی مهم می‌باشد. میانگین اندازه حفرات نانوفیلترها ۱-۱۰ نانومتر است. همچنین فشار عملیاتی فرآیند جداسازی نانوفیلتراسیون حدوداً ۴ مگاپاسکال می‌باشد که از فرآیندهای میکرو و اولترافیلتراسیون بالاتر است (۱۷، ۱۸). از پرکاربردترین فرآیندهای جداسازی غشایی، اسمز معکوس است. در

1. Maximum Contaminant Level goal (MCLG)  
2. Maximum Contaminant Level (MCL)

مثال می‌توان به تقطیر غشایی اشاره نمود. برخی دیگر از غشاها بر اساس اختلاف غلظت کار می‌کنند. اساس جداسازی در دیالیز و استخراج غشایی، اختلاف غلظت می‌باشد. در فرآیند الکترودیالیز نیز اساس فرآیند جداسازی غشایی، اختلاف پتانسیل الکتریکی است. الکترودیالیز نیز یک روش غشایی می‌باشد که مواد یونی محلول از طریق غشای تبادل یون با اعمال پتانسیل الکتریکی عبور می‌کنند. در حین عبور مواد یونی از غشاء، آنیون‌ها به سمت کاتد و کاتیون‌ها به سمت آند مهاجرت می‌کنند (۲۰). مطابق جدول ۲، فرآیندهای جداسازی غشایی متداول و دامنه استفاده از آن ارائه شده است.

این روش فشاری بیش‌تر از فشار اسمزی آب برای معکوس نمودن حرکت محلول دارای فلز سنگین به کار می‌رود که باعث می‌شود مولکول‌های آب به صورت انتخابی درون غشاء نفوذ کنند و فلز سنگین از آب جدا شود (۱۹). نکته مهم در فرآیندهای غشایی، مکانیسم جداسازی آن است. فرآیندهای غشایی بر اساس اختلاف فشار، دما، غلظت و پتانسیل الکتریکی کار می‌کنند. غشاهایی که بر اساس اختلاف فشار کار می‌کنند شامل: میکروفیلتراسیون، اولترافیلتراسیون، نانوفیلتراسیون، اسمز معکوس، انتقال گاز و تبخیر تراوشی می‌باشند. معمولاً این دسته از فرآیندهای غشایی، جزء فرآیندهای متداول‌تر جداسازی غشایی می‌باشند. دسته دیگری از غشاها، بر اساس اختلاف دما کار می‌کنند که به‌عنوان

جدول ۲. فرآیندهای غشایی (۲۱)

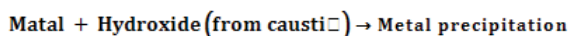
فرآیند	هدف
میکروفیلتراسیون	حذف فلز سنگین آرسنیک، حذف مواد معلق جامد، حذف مواد آلی محلول، حذف میکروارگانیزم‌های پاتوژن، کیست، جلبک و باکتری، حذف مواد معلق کلوئیدی و مواد پلیمری
اولترافیلتراسیون	حذف فلز سنگین کروم، حذف مواد معلق جامد، حذف مواد آلی محلول، حذف مواد غیر آلی محلول، حذف میکروارگانیزم‌های پاتوژن، کیست، جلبک، باکتری و ویروس، حذف کلوئیدها و پروتئین‌ها
نانوفیلتراسیون	حذف فلز سنگین مس، حذف مواد معلق جامد، حذف مواد آلی محلول، حذف مواد غیر آلی محلول و حذف تمامی میکروارگانیزم‌ها
اسمز معکوس	حذف فلزات سنگین کبالت و منگنز، حذف مواد معلق جامد، حذف مواد آلی محلول، حذف مواد غیر آلی محلول و حذف تمامی میکروارگانیزم‌ها
الکترودیالیز و دیالیز	حذف فلز سنگین کادمیم، جداسازی انتخابی یون‌ها از آب
تبخیر تراوشی	جداسازی انتخابی گاز مولکولی و یا املاح فرار
انتقال گاز	حذف گازهای حل‌شده در صنایع

فیلتریت، عدم کار در دمای محیط، تولید رسوب و پلاریزاسیون غلظتی می‌باشد (۲۲). لازم به ذکر است که بعد از گرفتگی غشاء، لازم است تا فیلتر احیاء شود تا بتوان مجدداً از غشاء استفاده نمود. شست‌وشوی معکوس غشاء برای استفاده مجدد به میزان املاح موجود در آب آلوده به فلز سنگین به‌طور جدی وابسته است. معمولاً پساب‌های صنعتی ابتدا باید تصفیه مقدماتی شود، سپس به کمک فرآیند غشایی نسبت به حذف فلز سنگین اقدام گردد؛ لذا فرآیند غشایی پرهزینه می‌باشد. در صورتی که پساب به‌طور مستقیم در معرض غشاء قرار گیرد، پدیده گرفتگی غشاء به

مزایای روش غشایی شامل امکان‌پذیری توسعه فرآیند، کنترل راحت، کنترل وزن مولکولی هیدرولیزات، غنی‌سازی و تغلیظ محصولات در جریان فرآیند، بازده بالا، امکان انجام واکنش‌های چندفازی، تغییر تعادل شیمیایی، عدم نیاز به تغییر فاز برای عمل جداسازی، انرژی حرارتی پایین، طراحی راحت، قدرت انتخاب‌پذیری بالا و دوست‌دار بودن محیط‌زیست است. معایب این روش شامل: عدم تولید دو محصول خالص، امکان ناسازگاری شیمیایی با محلول فرآیند، فشار عملیاتی بالا، گرفتگی غشاء، افزایش فشار عملیاتی با زمان در صورت ثابت بودن دبی مشخص

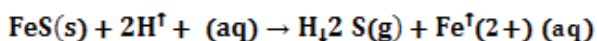
ذره در حوضچه‌های ته‌نشینی تعیین می‌شود (۲۷). فرآیندهایی که در ته‌نشینی شیمیایی مورد استفاده قرار می‌گیرند شامل تشکیل رسوب هیدروکسیدی و سولفیدی می‌باشند. از بین این فرآیندها، فرآیند تشکیل رسوب هیدروکسید به دلیل هزینه پایین و کنترل راحت pH در این روش، به‌طور گسترده‌ای در حذف فلزات سنگین به‌کار برده می‌شود (۲۵). در رسوب‌دهی هیدروکسیدی، مواد قلیایی موجب افزایش pH می‌شوند و در نتیجه حلالیت یون‌های فلزی در آب کاهش پیدا می‌کند. اگر افزایش pH محلول کمتر از مقدار بهینه لازم باشد، یون‌های فلزات سنگین با هیدروکسید تشکیل کمپلکس محلول می‌دهند؛ لذا تشکیل رسوب به‌شدت تابع pH می‌باشد. در ادامه مکانیزم روش هیدروکسیدی جهت تشکیل رسوب ارائه شده است.

(۱)

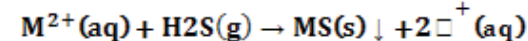


در این شرایط برای بهبود رسوب‌دهی می‌توان از مواد منعقد کننده مانند نمک‌های آهن، سولفات آلومینیم و یا اخیراً از منعقدکننده‌های پلیمری نظیر پلی آلومینیم کلراید و پلی آلومینیم فریک کلراید استفاده نمود. در آزمایشگاه به کمک جارتست فرآیند حوضچه‌های ته‌نشینی و کارایی منعقدکننده‌ها از جمله منعقدکننده‌های پلیمری در حذف فلزات سنگین به‌خوبی قابل مطالعه می‌باشد. به دلیل بزرگی منعقدکننده‌های پلیمری، امکان ته‌نشینی کاتیون‌های جذب شده افزایش می‌یابد (۴، ۲۸-۳۰). در روش سولفیدی، سولفید آهن سبب رسوب یون‌های فلزی می‌شود. لجن سولفید فلزات نیز توسط حوضچه‌های ته‌نشینی و سپس فیلتراسیون از آب جدا می‌گردد (۳۱). مکانیسم فرآیند سولفیدی جهت تولید رسوب فلز سنگین به شرح زیر می‌باشد (۳۲، ۳۳):

(۲)

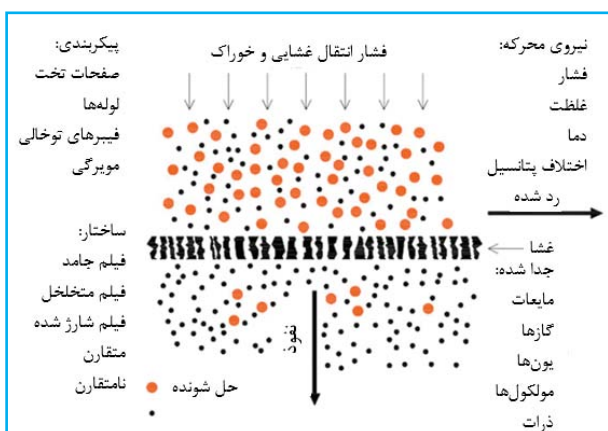


(۳)



به‌عنوان نمونه می‌توان به حذف عنصر بور توسط رسوب

سرعت به وقوع می‌پیوندد که هزینه شست‌وشوی معکوس افزایش می‌یابد. معمولاً فرآیندهای غشایی برای دبی‌های پایین آب مورد استفاده قرار می‌گیرند (۲۳). شکل ۱، شماتیک از فرآیند غشایی را نشان می‌دهد که با نیروی محرکه فشار کار می‌کند و برای جداسازی ماده حل‌شونده از حلال مورد استفاده قرار گرفته است. هم‌چنین در شکل ویژگی‌هایی که به همراه غشاء می‌تواند وجود داشته باشد از قبیل پیکربندی، ساختار، نیروی محرکه و مواد عبوری از غشاء ارائه شده است.

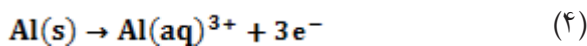


شکل ۱. شماتیک روش غشایی (۲۴)

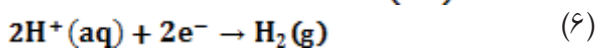
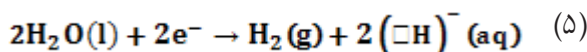
### ته‌نشینی شیمیایی

ته‌نشینی شیمیایی، روشی انتخابی برای حذف فلزات سنگین محلول می‌باشد. امروزه در صنایع از این روش به‌دلیل راحتی اجرای عملیات و هزینه پایین به‌طور گسترده‌ای استفاده می‌شود (۲۵). عوامل مؤثر در سرعت ته‌نشینی رسوب، اندازه و پراکندگی ذرات، شکل و دانسیته ذرات، دمای آب، بار الکتریکی ذرات، اجزای حل شده در آب، شرایط محیطی و ویژگی‌های طراحی و هیدرولیکی حوضچه‌های ته‌نشینی می‌باشد (۲۶). رسوب‌های تشکیل شده توسط فرآیندهای انعقاد و لخته‌سازی را می‌توان به کمک فرآیندهای ته‌نشینی و نهایتاً فیلتراسیون از آب جداسازی نمود. فرآیند انعقاد، لخته‌سازی و ته‌نشینی در محیطی نسبتاً ساکن و در حوضچه‌های ته‌نشینی انجام می‌شود. از موازنه نیروهای دراگ، ارشمیدس و وزن ذره قابل ته‌نشین، زمان لازم برای ته‌نشین شدن

فلزی با یون‌های هیدروکسیل تولید شده ناشی از الکترولیز آب در الکتروود کاتد، گروه‌های هیدروکسیل فلزی از قبیل هیدروکسید آهن یا آلومینیم تشکیل می‌دهند. این ذرات به‌علت خاصیت جذب بالا با ذرات ناپایدار آلاینده فلزات سنگین نیز برای تشکیل فلوک ترکیب می‌شوند و آن‌ها را به‌راحتی ته‌نشین یا شناور می‌کنند (۳۶). در فرآیند شناورسازی الکتریکی هنگامی که جریان آلوده فلزات سنگین در میان دو الکتروود قرار می‌گیرد، به‌دلیل برقراری جریان الکتریکی بین الکتروودها، یک میدان الکتریکی بین آند و کاتد تشکیل می‌گردد. با الکترولیز شدن آب به‌دلیل وجود میدان الکتریکی، حباب‌های کوچکی از گازهای هیدروژن و اکسیژن ایجاد می‌شوند. بدون افزودن ماده شیمیایی، انعقاد جزئی بین مواد معلق روی می‌دهد و ذرات مثبت و منفی لخته‌هایی را تشکیل می‌دهند. در این فرآیند آلاینده‌های فلز سنگین از طریق حباب‌های اکسیژن و هیدروژن تولید شده از الکترولیز آب بر روی سطح آب شناور می‌مانند (۳۷). در رسوب‌دهی الکتریکی، بر اساس فلزی که می‌خواهیم پوشش دهیم به آند یا کاتد بچسبند، فرآیند را به‌ترتیب آندی یا کاتدی می‌گویند. در رسوب‌دهی الکتریکی آندی، ذرات ماده پوششی، ذراتی از فلز سنگین هستند که دارای بار منفی بوده و در اثر اختلاف پتانسیل به سمت آند مهاجرت می‌کنند که نتیجه آن رسوب کردن پوشش در آند می‌باشد. در رسوب‌دهی کاتدی نیز فلزات سنگین دارای بار مثبت بوده و در اثر اختلاف پتانسیل الکتریکی به سمت کاتد مهاجرت می‌کنند که نتیجه آن، رسوب کردن در کاتد می‌باشد (۳۸). مکانیسم تصفیه الکتروشیمیایی به این صورت است که زمانی که پتانسیل از منبع خارجی اعمال می‌شود، آند اکسید می‌شود، درحالی‌که کاتد احیا می‌یابد. اگر الکترودهای آلومینیم یا آهن استفاده شوند، یا تشکیل می‌شوند.

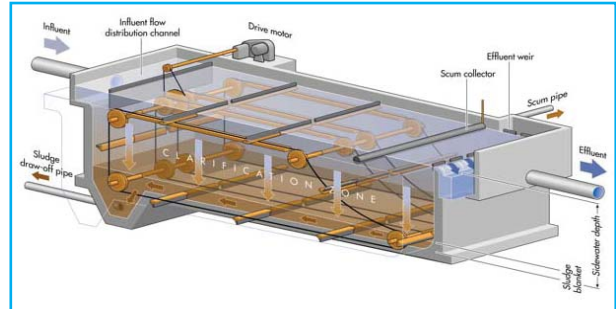


در کاتد نیز واکنش ۵ اتفاق می‌افتد:



یون‌های فلزی تولید شده آلومینیوم (III) در محیط آبی تحت

هیدروکسیدی و حذف عناصر مس، کلسیم و روی توسط رسوب سولفیدی اشاره نمود. شکل ۲، شماتیک از حوضچه ته‌نشینی مستطیلی را ارائه می‌دهد. مطابق شکل ۲، رسوباتی که به ته حوضچه رسوب کرده‌اند، از یک سمت و آب تصفیه شده از طرف دیگر جمع‌آوری می‌شوند.



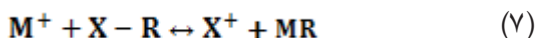
شکل ۲. شماتیک ته‌نشینی رسوب در حوضچه ته‌نشینی (۳۴)

### تصفیه الکتروشیمیایی

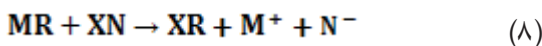
اساس حذف فلزات سنگین موجود در آب به روش الکتروشیمیایی، اعمال جریان الکتریسیته مستقیم، از طریق آند به درون محلول حاوی فلزات سنگین و انجام واکنش‌های اکسیداسیون و کاهش در الکتروودها می‌باشد (۳۱، ۳۵). مهم‌ترین روش‌هایی که بر اساس این مکانیزم فلزات سنگین را از آب حذف می‌کنند می‌توان به انعقاد الکتریکی<sup>۱</sup>، شناورسازی الکتریکی<sup>۲</sup> و رسوب‌دهی الکتریکی<sup>۳</sup> اشاره نمود (۳۲). در فرآیند انعقاد الکتریکی، از فلزاتی مانند آلومینیم و آهن به‌عنوان الکتروود استفاده می‌شود. زمانی که جریان مستقیم برق از سیستم عبور می‌کند، این فلزات در اثر عبور جریان و قرار گرفتن در داخل آب، هیدرولیز شده و در الکتروود آند یون‌های فلزی آلومینیوم (III) و آهن (II) درون الکترولیت آزاد می‌شوند. آهن و آلومینیم نقش عوامل ناپایدار کننده‌ای را دارند که موجب می‌شوند ذرات فلزات سنگین همانند آهن‌ریاهای کوچکی شوند که هم‌دیگر را جذب کنند و در نتیجه سنگین شده و ته‌نشین شوند. در ادامه فرآیند یون‌های

1. Electrocoagulation
2. Electroflotation
3. Electrodeposition

می‌افتند و از محلول آلوده حذف می‌شوند و یون‌های بی‌اثر فعال‌تر نیز به محلول وارد می‌شوند، به دلیل این عمل، این فرآیند معروف به معاوضه یونی می‌باشد. هنگامی که رزین‌های تبادل یون اشباع می‌شوند، به عبارتی هنگامی که اکثر فلزات فعال‌تر بی‌اثر وارد محلول شدند و فلزات سنگین روی سطح رزین قرار گرفتند، باید عمل احیاء روی آن‌ها انجام گیرد تا یون‌های فلزات سنگین از بستر رزین جداسازی گردند. فلزاتی از قبیل نیکل، مس و روی را می‌توان به روش تبادل یونی حذف نمود (۱۶، ۳۱). مکانیزم واکنش تبادل یونی به صورت زیر می‌باشد (۴۲):



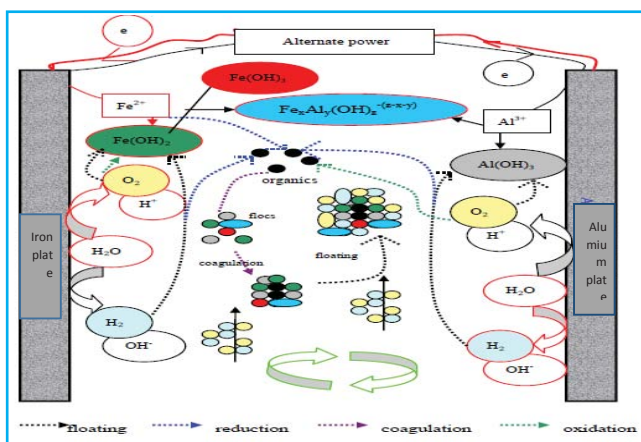
در واکنش شیمیایی ۷، رزین و X کاتیون فعال‌تر از فلز سنگین M می‌باشد که روی رزین نشانده شده است. وقتی تماس بین محلول آلوده به فلزات سنگین و رزین برقرار شد، به دلیل تمایل بالاتر X نشانده شده روی رزین، فلز X الکترون را به فلز سنگین داده و وارد محلول می‌شود. فلز سنگین نیز با گرفتن الکترون روی رزین می‌نشیند. اگر این عمل تا آنجا ادامه پیدا کند تا تمامی معاوضه‌ها انجام شود، در این حالت رزین اشباع می‌شود؛ بنابراین در عمل با احیای رزین، مجدداً از آن برای حذف فلز سنگین استفاده شود. در این حالت، رزین اشباع MR را در مجاورت محلول اشباع NX قرار داده و با اعمال شرایط عملیاتی مناسب، رزین XR مجدداً احیا می‌شود. واکنش احیای رزین به صورت زیر اتفاق می‌افتد:



از مزایای روش تبادل یونی می‌توان به انرژی پایین جهت انجام فرآیند، بالا بودن عمر رزین و دوست‌دار محیط‌زیست بودن اشاره کرد. معایب این روش شامل رسوب‌گیری و آلودگی رزین‌ها و عدم قابلیت تبادل یونی برای اجسام غیر یونیزه می‌باشد (۴۳).

شکل ۴ به‌طور شماتیک، رزین تبادل یونی آنیونی و کاتیونی را نشان می‌دهد. خطوط سیاه ماتریس پلیمری رزین را نشان می‌دهد که متخلخل می‌باشد. یون‌های ثابت رزین تبادل کاتیونی، سولفات است که به ماتریس می‌چسبند، یون‌های متحرک نیز سدیم می‌باشد. رزین آنیونی نیز ساختار مشابهی دارد. گروه‌های عاملی،

واکنش‌های خودبه‌خودی، هیدروکسید تولید می‌کنند. یون‌های هیدروکسید در الکترودهایی تولید می‌شوند که می‌توانند در نهایت به آلومینیوم هیدروکسید تبدیل شوند. سطح ویژه بزرگ  $Al(OH)_3$  می‌تواند مواد و کلئیدها را به دام اندازد (۳۹). مزایای این روش شامل تصفیه آب آشامیدنی و فاضلاب، کاهش استفاده از مواد شیمیایی، کاهش ایجاد آلودگی ثانویه، تولید زیاده کمتر و احتیاج به انرژی پایین می‌باشد. معایب این روش شامل احتیاج به تعمیر و نگهداری منظم و شکستن الکترودها می‌باشد؛ هم‌چنین فاضلاب باید رسانایی بالایی داشته باشد (۴۰). شکل ۳، شماتیکی از فرآیند انعقاد الکتریکی را نشان می‌دهد که آلاینده مانند  $Fe^+$  و  $OH^-$  می‌تواند به‌طور مستقیم در سطح آند و کاتد اکسید شود و کاهش پیدا کند.



شکل ۳. فرآیند تصفیه الکتروشیمیایی (۴۱)

### تبادل یونی

در فرآیند تبادل یونی، فازهای مایع و جامد در تماس با همدیگر قرار می‌گیرند. در این فرآیند ابتدا محلول با فاز جامد تماس داده می‌شود، سپس تبادل یونی بین فلز سنگین موجود در محلول و فلزی که روی جامد نشانده شده است اتفاق می‌افتد. در این تبادل همواره بار الکتریکی محلول خنثی می‌باشد. در عمل، معمولاً محلول آلوده به فلزات سنگین را از یک ستون حاوی بستر رزینی عبور می‌دهند. در حین عبور محلول، یون‌های فلزی به دام

1.  $Al(OH)_3$



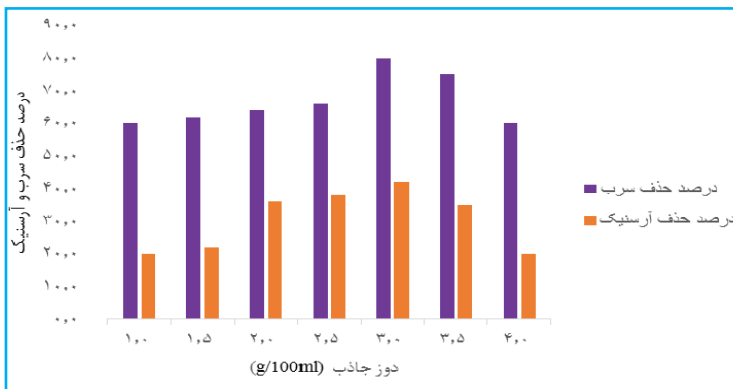
در مقیاس نانو، افزایش قابل توجهی دارد (۴۸). از جمله جاذب‌های مهم ارزان قیمت می‌توان به کربن فعال پودری، آهن صفر ظرفیتی، پسماندهای گیاهی، خاک اره، نشاسته و ... اشاره کرد.

جدول ۳، ظرفیت جذب برخی از فلزات سنگین توسط جاذب‌های مختلف را نشان می‌دهد. مطابق جدول ۳، زغال استخوان به خوبی قادر است تا یون‌های فلزی نظیر روی و مس را روی سطحش جذب کند. همچنین پوست فندق و موز به عنوان جاذب‌های طبیعی، قادرند یون‌های فلزی کروم را به خوبی جذب نمایند.

جدول ۳. ظرفیت جذب فلزات سنگین توسط جاذب‌های طبیعی (۴۹)

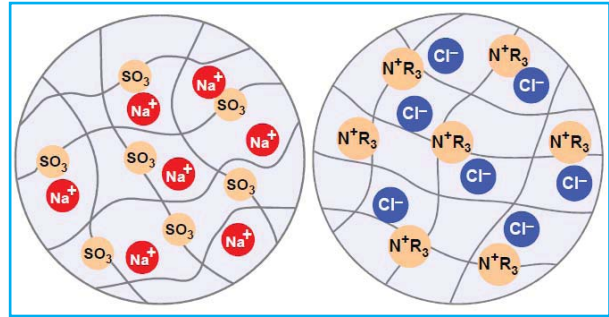
جاذب	ظرفیت جذب (میلی گرم بر گرم)
پوست فندق	۱۷۷
پوست موز	۸۵
پوست نارگیل	۶
پوست تخم‌مرغ	۱/۴۵۷
زغال استخوان	۲۷±۱/۳ ۲۴/۵±۳
خاک اره	۱/۹
کربن فعال	۱/۳۸۵

مطابق نمودار ۱، جذب فلزات سنگین سرب و آرسنیک بر روی جاذب سویا نشان داده شده است. مطابق نمودار ۱، با افزایش غلظت جاذب، میزان درصد حذف عناصر سنگین افزایش می‌یابد؛ اما توجه به این نکته ضروری است که افزایش دوز جاذب به میزان بیشتر از مقدار بهینه کارایی حذف را کاهش می‌دهد.



نمودار ۱. تأثیر دوز جاذب بر روی جذب آرسنیک (۵۰)

کاتیون‌های آمونیوم هستند که با  $N^+R_3$  نشان داده شده است که به ماتریس پلیمری رزین می‌چسبند. یون‌های متحرک در رزین آنیونی زیر، یون‌های کلرید هستند.



شکل ۴. شمایی از دو رزین آنیونی و کاتیونی (۴۴)

### جذب سطحی

جذب سطحی، فرآیند جذب اتم‌ها و مولکول‌های موجود در یک سیال توسط سطح جامد دور از تعادل است که جامد جهت رسیدن به حالت تعادل تمایل به گرفتن برخی از این یون‌ها را دارد. معمولاً فرآیند جذب سطحی با نیروی بلندبرد و اندروالسی آغاز و با نیروی کوتاه‌برد نظیر پیوندهای فلزی و یونی پایان می‌یابد. روش جذب سطحی با توجه به بازده بالا و راحتی اجرا، از پرکاربردترین روش‌ها جهت حذف فلزات سنگین، مورد توجه می‌باشد. در این فرآیند آب آلوده، از میان یک بستر یا فیلترمدیا رد می‌شود و آرسنیک و فلز سنگین به وسیله پیوندهایی که با جاذب برقرار می‌کنند، از آب جدا می‌شوند. آلومینای فعال، کربن فعال و اکسید آهن، از جمله جامداتی هستند که به عنوان جاذب، استفاده فراوانی دارند (۴، ۳۱). هرچه اختلاف دمای بین سطح جامد و مواد جذبی بیشتر باشد، جذب زودتر اتفاق می‌افتد، زیرا انرژی گرمایی مواد، نیروی محرکه جذب روی سطح می‌باشد. به طور کلی پدیده جذب سطحی به خاطر خواص موجود بر روی سطح جامد، اتفاق می‌افتد (۴۵). اخیراً استفاده از آهن و نانوکامپوزیت آهن صفر ظرفیتی به دلیل فراوانی، ارزانی، غیرسمی بودن، در دسترس بودن، توانایی و بازده بالا در تجزیه آلاینده‌ها و حذف آرسنیک و فلزات سنگین از آب، مورد توجه قرار گرفته است (۴، ۴۶، ۴۷). مطالعات نشان می‌دهد که واکنش‌پذیری نانوذرات آهن صفر ظرفیتی با کاهش اندازه‌اش

جهت زنده ماندن در محیط‌های آلوده به فلزات استفاده می‌برند. میکروارگانیسم‌ها، فلزات سنگین را به صورت جذب زیستی و یا به صورت جذب سطحی جذب می‌نمایند. دیواره سلول‌های میکروبی عمدتاً از پلی‌ساکاریدها، لیپیدها و پروتئین‌ها تشکیل شده‌اند که حاوی گروه‌های عاملی کربوکسیلات، هیدروکسیل، آمینه و گروه‌های فسفات می‌باشند که می‌توانند به بسیاری از یون‌های فلزات سنگین متصل گردند. هم‌چنین بسیاری از جلبک‌ها و باکتری‌ها می‌توانند ترشحاتی را تولید کنند که فلزاتی که بسیار سمی هستند را جذب کنند (۵۳). در جدول ۴، خلاصه‌ای از مهم‌ترین مطالعات صورت گرفته در زمینه زیست‌پالایی فلزات سنگین توسط میکروارگانیسم‌ها آورده شده است.

از مزایای روش جذب سطحی، می‌توان به دست‌یابی فلز حذف شده در صورت بازیابی از سطح جاذب، روشی مناسب برای حذف فلزات سنگین در محلول‌های رقیق، هزینه پایین و طراحی ساده فرآیند اشاره کرد. همچنین از معایب این روش می‌توان به از دست دادن کارایی جاذب به مرور زمان و عدم امکان دفع آلاینده‌ها از جاذب در بسیاری از مواقع اشاره کرد (۵۱).

#### فرآیند زیست‌پالایی

در فرآیند زیست‌پالایی، از میکروب‌ها جهت سم‌زدایی و تجزیه آلاینده‌های زیست‌محیطی استفاده می‌شود (۵۲). از این روش می‌توان در حذف فلزات سنگین از آب‌های آلوده استفاده کرد. در این فرآیند میکروارگانیسم‌ها از مکانیسم‌های مختلفی

جدول ۴. زیست‌پالایی فلزات سنگین توسط برخی میکروارگانیسم‌ها (۵۴)

میکروارگانیسم مورد استفاده	گونه میکروارگانیسم مورد استفاده	نوع فلز سنگین	مهم‌ترین نتایج به دست آمده
لیمنوسریکس پلنکتونیکا <sup>۱</sup> ، سینکوکوکوز لوبلینسیس <sup>۲</sup> ، فورمیدیوم لیمنیتیکا <sup>۳</sup>	سیانوباکتری	Hg(II)	این سیانوباکتری می‌تواند تحت شرایط هوایی و غلظت زیر ۲۰۰ ppb جیوه (II) محلول را به جیوه (۰) و جیوه سولفید <sup>۴</sup> نامحلول تبدیل نماید.
اندوفیتیک باکتری ال ۱۴۷	باکتری اندوفیت	Cd(II), Pb(II), Cu(II), Cr(VI)	از بین ۹۶ نوع اندوفیت جدا شده، نوع EBL۱۴ راندمان بالاتری در حذف فلزات سنگین از خود نشان می‌دهد. غلظت حداقلی ممانعت‌کننده فلزات سنگین کادمیوم، سرب، روی، مس و کروم برای رشد این باکتری در محیط مایع به ترتیب ۰.۲، ۰.۴، ۰.۵، ۱۰ و ۱۲ میلی‌مول گزارش گردید. طی ۲۴ ساعت این باکتری سرب، کادمیوم، مس و کروم را به ترتیب ۸۴، ۷۶، ۲۱ و ۳ درصد حذف کرد.
گالدیریا سولفوراریا <sup>۸</sup>	جلبک اسیددوست و گرمادوست	Hg(II)	این جلبک در مواجهه با ۱۰۰ ppb جیوه، ۹۰٪ آن را طی ۲۰ دقیقه به سولفید جیوه تبدیل نمود.

سنگین موجود در آب و خاک استفاده می‌شود. انتخاب گیاهان با توان بیش‌اندوزی بالای فلزات سنگین، می‌تواند در این فرآیند مؤثر واقع شود (۵۵). در واقع تکنیک گیاه‌پالایی شامل استفاده از گیاهان در رفع آلودگی‌ها از محیط می‌باشد که منجر به تجمع فلزات سنگین در بافت‌ها و اندام‌های مختلف گیاه می‌شود (۵۶). مکانیسم‌های مختلف فرآیند گیاه‌پالایی شامل تثبیت گیاهی، تصفیه گیاهی، تبخیر گیاهی و استخراج گیاهی می‌باشد (۵۷). به‌عنوان مثال گیاه وتیور قادر است عنصر سرب را به خود جذب

از جمله روش‌های مهم زیست‌پالایی می‌توان به روش گیاه‌پالایی اشاره نمود. گیاه‌پالایی روشی مقرون به صرفه و دوست‌دار محیط زیست است که در آن از گیاهان مقاوم، جهت حذف فلزات

1. *Limnithrix planctonica*
2. *Synechococcus leopldiensis*
3. *Phormidium limnetica*
4. Hg(II)
5. Hg(0)
6. HgS
7. Endophytic bacteria L 14
8. *Galdieria sulphuraria*

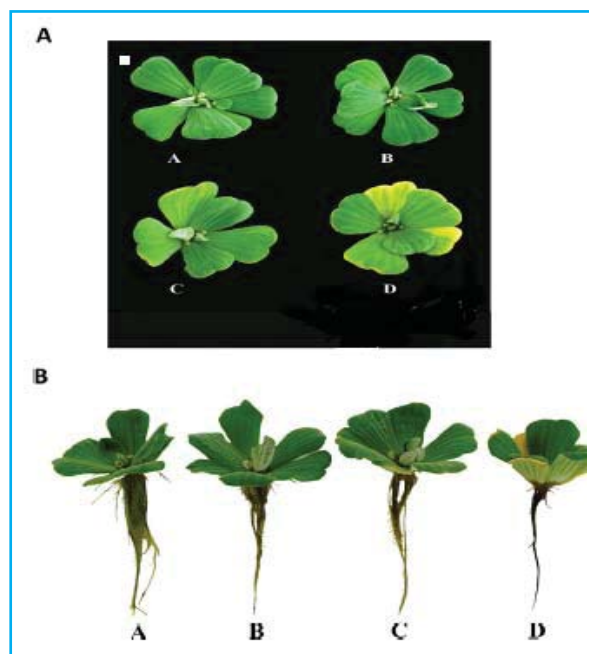
می‌شود و باعث ایجاد یک واکنش شیمیایی در محیط می‌شود. فتوکاتالیست‌ها معمولاً اکسیدهای جامد نیمه‌رسانا هستند که جذب فوتون‌های با انرژی بالاتر از باند گپ، موجب برانگیخته شدن کاتالیست شده و الکترون و حفره تولید می‌شود. این جفت الکترون-حفره می‌تواند با مولکول‌های موجود در سطح ذرات واکنش دهد (۶۱). الکترون‌های برانگیخته شده به‌همراه حفره‌های مثبت ایجاد شده، به‌منظور تولید رادیکال‌های هیدروکسیل مورد استفاده قرار می‌گیرند. به سیستمی که در آن یون هیدروکسیل جهت اکسایش آلودگی‌ها ایجاد شود، اکسایش پیشرفته می‌گویند. تولید یون هیدروکسیل در اکسایش پیشرفته، منجر به اکسید شدن و حذف ترکیبات مقاوم در برابر اکسنداده‌های رایج می‌گردد. رادیکال هیدروکسیل که اولین اکسیدان تولیدی در سیستم فتوکاتالیستی می‌باشد، یک حمله‌کننده و سم‌زدای قوی است (۶۲).

در این فرآیند تیتانیوم دی‌اکسید<sup>۱۰</sup> می‌تواند به‌عنوان کاتالیست به‌دلیل ساختار نیمه‌هادیش برای برانگیختگی نوری الکترون‌های مدار ظرفیت به مدار هدایت با تابش اشعه نور فرابنفش عمل کند. وقتی نور فرابنفش به یک نیمه‌هادی برخورد می‌کند، فوتون‌های با انرژی بالاتر از باند گپ نیمه‌هادی، می‌تواند یک الکترون را از باند ظرفیت برانگیخته کرده و به باند هدایت برساند که به علت برانگیختن الکترون، یک فضای خالی برای الکترون ایجاد می‌شود که دارای بار مثبت بوده و حفره ( $h^+$ ) نامیده می‌شود. زمانی که حفره با آب و سطح کاتالیست  $TiO_2$  تماس پیدا می‌کند، حفره آب را اکسید کرده و رادیکال OH تشکیل می‌شود. رادیکال‌ها و الکترون‌های موجود در آب سبب کاهش اکسیژن می‌شوند و تولید آنیون رادیکال‌های سوپراکسید  $O_2^-$  می‌کنند. در واقع با برانگیخته کردن  $TiO_2$  توسط تابش نور، حفره‌ها برای اکسید کردن آلاینده‌های آلی و تبدیل آن‌ها به نوع ساده‌تر و الکترون‌ها برای احیای فلزات سنگین به کار می‌روند (۶۳).

نحوه انجام فرآیند فتوکاتالیستی در روابط ۹ تا ۱۳ شرح داده شده است.

10.  $TiO_2$

کند (۵۸). شماری از گونه‌های بیش‌اندوز طبیعی شامل آلیسوم برتولونی<sup>۱</sup>، کورریقیولا تلفیفولیا<sup>۲</sup>، ایفورویا چیرادنیات<sup>۳</sup>، لمانا گیبا<sup>۴</sup>، آلیسوم<sup>۵</sup>، سولانوم نیگروم<sup>۶</sup> و تالسی کارلسن<sup>۷</sup> می‌باشند که به ترتیب قادر به جذب عناصر نیکل، آرسنیک، سرب، آرسنیک، نیکل و کادمیوم می‌باشند (۵۹). در شکل ۵ نشانه‌های جذب آرسنیک در برگ و ریشه گیاه پیستیا استراتیوتس<sup>۸</sup> که در معرض سه غلظت آرسنیک بعد از ۴ روز بوده، نشان داده شده است. A نشان‌دهنده حالت شاهد، B، C و D به ترتیب حاوی ۵ میکرومول از آرسنیک (III)<sup>۹</sup>، ۱۰ میکرومول از AS(III) و ۲۰ میکرومول از AS(III) می‌باشد (۶۰).



شکل ۵. جذب آرسنیک در برگ و ریشه (۶۰)

#### روش فتوکاتالیستی

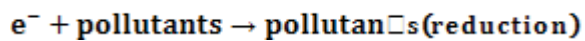
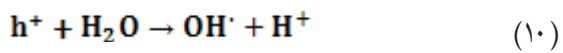
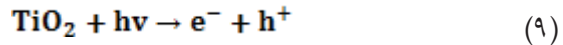
فتوکاتالیست به کاتالیزوری گفته می‌شود که در حضور نور فعال

1. Alyssum bertolonii
2. Corrigiola telephiifolia
3. Euphorbia cheiradeniat
4. Lemna gibba
5. Alyssum
6. Solanum nigrum
7. Thlaspi caerulescens
8. Pistia stratiotes
9. AS(III)

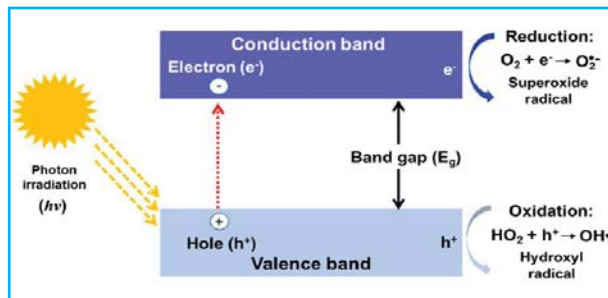
سنگین است و همچنین دوست‌دار محیط‌زیست می‌باشد. از معایب این روش، قابلیت استفاده این روش تنها برای دبی‌های عملیاتی پایین می‌باشد. در این روش، انتظار تولید محصول خالص ممکن نیست؛ زیرا بسیاری از اجزای موجود در محلول که اندازه آن‌ها از اندازه غشاء بزرگ‌تر می‌باشد، سمت کیک تجمع می‌کنند. همچنین لازم است تا سازگاری غشاء با محلولی که قرار است جداسازی روی آن صورت گیرد، توسط طراح مورد توجه قرار گیرد. یکی از معایب اساسی فرآیندهای غشایی، فشار عملیاتی بالای روش است. غشاء به مرور زمان دچار گرفتگی می‌شود و در این شرایط احیای فیلتر یا شست‌وشوی معکوس غشاء جهت استفاده مجدد از غشاء امری ضروری است. در صورت استفاده از فرآیند غشایی در تصفیه پساب، لازم است تا جهت افزایش بازه زمانی گرفتگی غشاء و یا شست‌وشوی معکوس، فرآیند تصفیه مقدماتی صورت گیرد. تولید رسوب و هزینه بالای عملیاتی فرآیند از معایب اصلی این روش می‌باشد. رسوب تولیدی در روش غشایی، غنی از فلز سنگین می‌باشد و سؤال اساسی جداسازی فلز سنگین از رسوب تولیدی در این روش است؛ البته این مسأله، مشکل اکثر روش‌هاست.

در فرآیند تصفیه به روش ته‌نشینی شیمیایی، غلظت آلاینده‌ها به حد چشم‌گیری کاهش پیدا می‌کند. فلزات سنگین در این روش رسوب می‌کنند و قابل دست‌یابی هستند. ایراد این روش، هزینه‌بر بودن دفع رسوب و یا نیاز به مواد شیمیایی ثانویه برای تصفیه می‌باشد.

فرآیند تصفیه به روش الکتروشیمیایی دارای مزیت‌هایی از قبیل انتخاب‌پذیری حذف فلز می‌باشد. این روش وقتی از کارایی بالایی برخوردار است که غلظت یون‌های فلزی در محلول آلوده، بالا باشد؛ وگرنه این روش کاربرد چندانی ندارد. هزینه تعمیر و نگهداری آن بالاست. همچنین این روش به دلیل استفاده از پتانسیل الکتریکی، نیاز به کنترل دقیق دارد. در صورتی که فلز سنگین به آند و یا کاتد بچسبند، هزینه‌های جداسازی و تمیز کردن الکتروود جهت استفاده مجدد نیز به روش تحمیل می‌گردد. از معایب دیگر این روش، امکان



مکانیزم انجام واکنش فتوکاتالیستی در شکل ۶ ارائه شده است.



شکل ۶. مکانیزم واکنش فتوکاتالیستی (۶۴)

واکنش‌های فتوکاتالیستی دارای مزایایی از قبیل کارایی بالا، عدم آلودگی ثانویه و سرعت بالای انجام واکنش می‌باشند. استفاده از نانوذره اکسید سیلیکون مزوپور در حذف نیکل، سرب و کادمیوم و حذف رنگ متیل رد نتایج قابل قبولی را ارائه داده است (۶۳). در عین حال واکنش‌های جانبی فتوشیمیایی، فرآیند بازگشت سریع انتقال الکترون و واکنش‌های بازترکیبی از معایب این روش می‌باشد (۶۵).

### بحث

از روش‌های مهم در حذف فلزات سنگین، روش غشایی می‌باشد. معمولاً در روش غشایی برای عمل جداسازی، نیاز به تغییر فاز مواد نیست؛ لذا انرژی حرارتی زیادی برای انجام فرآیند مورد نیاز نمی‌باشد. همچنین طراحی فرآیند غشایی، به سادگی امکان‌پذیر است. این روش، دارای قدرت انتخاب‌پذیری بالا در حذف فلز

نیاز به مخازن بزرگ نظیر تالاب‌ها می‌باشد. همچنین اگر مسیر عبور پساب کانال طولانی و خاکی باشد و یا دسترسی به تالاب‌ها امکان‌پذیر باشد، این روش قابل پیشنهاد است. در این روش بعد از اینکه گیاه از فلز سنگین اشباع شد، درست است که فلز سنگین از محلول آبی حذف شده است، ولی یک منبع متمرکز با حجم بالا فلز سنگین در گیاه حاصل شده است که برای ایجاد عدم آلودگی ثانویه، گیاهان باید از محل دفع شوند. روش فتوکاتالیستی نیز جایگزین مناسبی برای استفاده از انرژی‌های معمولی است و به دلیل عدم تولید زباله و در نتیجه عدم نیاز به دفن آن، دوستدار محیط‌زیست می‌باشد. همچنین در این روش، سرعت انجام واکنش بالاست. از مزایای مهم این روش، هزینه پایین و بازده بالای روش است. در این روش واکنش‌های جانبی فتوشیمیایی تولید می‌گردد، فرآیند بازگشت سریع انتقال الکترون و واکنش‌های بازترکیبی رخ می‌دهد که از معایب این روش می‌باشند. نکته مهم در مورد این روش همانند روش بیولوژیکی، جدید بودن روش است.

### نتیجه‌گیری

فلزات سنگین اثرات مخربی بر جای می‌گذارند و حذف و تصفیه این فلزات از آب و خاک ضرورت دارد. ارائه مزایا و معایب روش‌های حذف فلزات سنگین، امکان انتخاب روش مناسب از نظر هزینه و دسترسی به دانش فنی را به‌سادگی امکان‌پذیر می‌کند.

### ملاحظات اخلاقی

نویسندگان کلیه نکات اخلاقی شامل عدم سرقت ادبی، انتشار دوگانه، تحریف داده‌ها و داده‌سازی را در این مقاله رعایت کرده‌اند. همچنین هرگونه تضاد منافع حقیقی یا مادی که ممکن است بر نتایج یا تفسیر مقاله تأثیر بگذارد را رد می‌کنند.

### تشکر و قدردانی

این مقاله بخشی از پایان‌نامه‌های کارشناسی ارشد بوده که با حمایت معاونت پژوهشی دانشگاه محقق اردبیلی در قالب پایان‌نامه تحقیقاتی اجرا شده است. بدین‌وسیله از پشتیبانی و کمک معاونت پژوهشی دانشگاه محقق اردبیلی تشکر و قدردانی می‌شود.

شکستن الکتروود و نیاز به تعمیر و نگهداری آن‌ها می‌باشد. در روش تبادل یونی، امکان بازیابی فلزات وجود دارد و زباله ثانویه تولید نمی‌شود. این روش دوست‌دار محیط‌زیست است و معمولاً عمر رزین‌ها بالا می‌باشد؛ معایب این روش شامل رسوب‌گیری و آلودگی رزین‌ها و عدم استفاده برای مواد غیریونی می‌باشد.

در این روش معمولاً سعی بر آن است تا کاتیون و آنیون وارد شده به محلول تصفیه شده کمترین مشکل را ایجاد نماید، ولی طبیعی است که همواره این اتفاق نیفتد.

در روش جذب سطحی، می‌توان فلز حذف شده را در صورت امکان از سطح جاذب بازیابی کرد. این روش، روشی مناسب برای حذف فلزات سنگین در محلول‌های رقیق می‌باشد و دارای هزینه پایین و طراحی فرآیند ساده می‌باشد. هم‌چنین ضایعاتی در این روش تولید نمی‌شود. در روش جذب سطحی، جاذب‌ها به مرور زمان کارایی خود را از دست می‌دهند و عدم امکان دفع آلاینده‌ها از جاذب در بسیاری از مواقع وجود دارد. هم‌چنین این روش به pH حساس می‌باشد؛ لذا کنترل pH در روش جذب سطحی از اهمیت بالایی برخوردار است.

در روش تصفیه بیولوژیکی از مواد شیمیایی جهت حذف فلز سنگین استفاده نمی‌شود، روشی ارزان است و مواد شیمیایی ثانویه تولید نمی‌گردد. معمولاً جداسازی فلزات سنگین با روش‌های بیولوژیکی با تنظیم دما، pH و زمان فرآیند، از راندمان بالایی برخوردار است؛ اما نقطه ضعف روش بیولوژیکی، جدید بودن این روش است که هنوز به‌طور کامل شناخته‌شده نیست و در مراحل ابتدایی توسعه قرار دارد. ایراد اصلی این روش، حساسیت بالای فرآیند جداسازی به پارامترهای عملیاتی می‌باشد؛ لذا برای به‌دست آوردن بازده بالا، کنترل پارامترهای عملیاتی بسیار مهم می‌باشد. هم‌چنین فرآیند تصفیه نیز زمان‌بر می‌باشد. معمولاً زمان حذف فلز سنگین از چندین ساعت تا چندین روز باید باشد تا امکان حذف بالای فلز سنگین امکان‌پذیر شود. در صورتی که دبی پساب محتوی فلز سنگین خیلی بالا نباشد، به دلیل بالا بودن زمان حذف،

## References

1. Fan M, Li T, Hu J, et al. Artificial neural network modeling and genetic algorithm optimization for cadmium removal from aqueous solutions by reduced graphene oxide-supported nanoscale zero-valent iron (nZVI/rGO) composites. *Materials*. 2017;10(5): 544.
2. Bhattacharya PT, Misra SR, Hussain M. Nutritional aspects of essential trace elements in oral health and disease: an extensive review. *Scientifica*. 2016;2016.
3. Singh Sankhla M, Kumari M, Nandan M, et al. Heavy metal contamination in soil and their toxic effect on human health: A review study. *International Journal of All Research Education and Scientific Methods(IJARESM)*. 2016;4(10): 13-19.
4. Shayesteh K, Salehzadeh J, Kouhi B. Investigation of hot spring mineral water and effluent output effects on the acceptor river quality especially drinking water and present of strategy (Case study: Isti Su hot spring), Research Project approved by Iran Water Resource Management Company. 2018.
5. Tadesse M, Tsegaye D, Girma G. Assessment of the level of some physico-chemical parameters and heavy metals of Rebu river in oromia region, Ethiopia. *MOJ Biology and Medicine*. 2018;3(4): 99-118.
6. Fomina M, Gadd GM. Biosorption: current perspectives on concept, definition and application. *Bioresource technology*. 2014;160: 3-14.
7. Jan AT, Azam M, Siddiqui K, et al. Heavy metals and human health: mechanistic insight into toxicity and counter defense system of antioxidants. *International journal of molecular sciences*. 2015;16(12): 29592-29630.
8. Matta G, Gjyli L. Mercury, lead and arsenic: impact on environment and human health. *Journal of Chemical and Pharmaceutical Sciences*. 2016;9(2): 718-725.
9. Water USEPA. Edition of the Drinking Water Standards and Health Advisories Tables: United States Environmental Protection Agency, Office of Water. 2018.
10. Abdul KS, Jayasinghe SS, Chandana EP, et al. Arsenic and human health effects: A review. *Environmental Toxicology and Pharmacology*. 2015;40(3): 828-846.
11. Nordberg GF, Bernard A, Diamond GL, et al. Risk assessment of effects of cadmium on human health (IUPAC Technical Report). *Pure and Applied Chemistry*. 2018;90(4): 755-808.
12. Achmad RT, Ibrahim E. Effects of chromium on human body. *Annual Research and Review in Biology*. 2017;13(2): 1-8.
13. Bost M, Houdart S, Oberli M, et al. Dietary copper and human health: Current evidence and unresolved issues. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*. 2016;35: 107-115.
14. Ha E, Basu N, Bose-O'Reilly S, et al. Current progress on understanding the impact of mercury on human health. *Environmental Research*. 2017;152: 419-433.
15. Latif Wani AB, Ara A, Usmani JA. Lead toxicity: A review. *Interdisciplinary Toxicology*. 2015;8(2): 55-64.
16. Gunatilake SK. Methods of removing heavy metals from industrial wastewater. *Journal of Multidisciplinary Engineering Science Studies*. 2015;1(1): 12-18.
17. El-Ghaffar MA, Tieama HA. A review of membranes classifications, configurations, surface modifications, characteristics and Its applications in water purification. *Chemical and Biomolecular Engineering*. 2017;2(2): 57-82.
18. Ghosh P, Rana SS, Shaci Kumar C, et al. Membrane filtration of fruit juice-an emerging technology. *International Journal of Food Sciences and Nutritional Sciences*. 2015;4(4): 47-57.
19. Park HG, Kwon YN. Long-term stability of low-pressure reverse osmosis (RO) membrane operation—A pilot scale study. *Water*. 2018;10(2): 93.
20. Nath K. Membrane separation processes. 2th ed. PHI Learning Pvt. Ltd. 2017.
21. Charcosset C. Ultrafiltration, microfiltration, nanofiltration and reverse osmosis in integrated membrane processes. In: Basile A, Charcosset C. *Integrated membrane systems and processes*. 1th ed. John Wiley & Sons, Ltd. 2016;1-22.
22. Chakraborty S, Rusli H, Nath A, et al. Immobilized biocatalytic process development and potential application in membrane separation: a review. *Critical reviews in biotechnology*. 2016;36(1): 43-58.
23. Beyer F, Laurinonyte J, Zwijnenburg A, et al. Membrane fouling and chemical cleaning in three full-scale reverse osmosis plants producing demineralized water. *Journal of Engineering*. 2017;2017.
24. Biron DD, Dos Santos V, Zeni M. Ceramic membranes applied in separation processes (Topics in mining, metallurgy and materials engineering). 1th ed. Springer. 2017.
25. Dahman Y. Nanotechnology and functional materials for engineers. 1th ed. Elsevier. 2017.
26. Tsavdaris A. An evaluation of vegetated SuDS ponds using experimental and numerical methods. [Doctorat thesis]. England. School of civil engineering and surveying of University of Portsmouth. 2015.
27. Fornari W, Picano F, Brandt L. Sedimentation of finite-size spheres in quiescent and turbulent environments. *Journal of Fluid Mechanics*. 2016;788: 640-669.
28. Abdollahpour M. Investigation of removal of bromide ion of drinking water by inorganic polymer coagulant. [Thesis M. Sc.]. Iran. School of chemical engineering of University of Mohaghegh Ardabili. 2014 .(Persian)

29. Abdollahpour M, Shayesteh K. Application of response surface methodology (RSM) for modeling and optimizing coagulation process for the removal of bromide ions. *Journal of Water and Wastewater*. 2016; 27(5): 64-72.
30. Shayesteh K, Kouhi B, Deilam salehi M. Study of Control of natural pollutants in the Nir hot springs and economic exploitation of pollutants, Reseach Project approved by Iran water resource management company. 2019.
31. Azimi A, Azari A, Rezakazemi M, et al. Removal of heavy metals from industrial wastewaters: a review. *ChemBioEng Reviews*. 2017;4(1): 37-59.
32. Najib T, Solgi M, Farazmand A, et al. Optimization of sulfate removal by sulfate reducing bacteria using response surface methodology and heavy metal removal in a sulfidogenic UASB reactor. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2017;5(4): 3256-3265.
33. Sánchez-Andrea I, Sanz JL, Bijmans MF, et al. Sulfate reduction at low pH to remediate acid mine drainage. *Journal of Hazardous Materials*. 2014; 269: 98-109.
34. Voutchkov N. Fundamentals of clarifier performance monitoring and control. A SubCam online continuing education course. 2017;41.
35. Chakravarty R, Chakraborty S, Khan MS, et al. An electrochemical approach for removal of radionuclidic contaminants of Eu from <sup>153</sup>Sm for effective use in metastatic bone pain palliation. *Nuclear medicine and biology*. 2018;58: 8-19.
36. Hakizimana JN, Gourich B, Chafi M, et al. Electrocoagulation process in water treatment: A review of electrocoagulation modeling approaches. *Desalination*. 2017;404: 1-21.
37. Mota IdOd, Castro JAd, Casqueira RdG, et al. Study of electroflotation method for treatment of wastewater from washing soil contaminated by heavy metals. *Journal of Materials Research and Technology*. 2015;4(2): 109-113.
38. Zangari G. Electrodeposition of alloys and compounds in the era of microelectronics and energy conversion technology. *Coatings*. 2015;5(2): 195-218.
39. Mirji G, Kalburgi P.B. Application of electrocoagulation mechanism for COD removal of dairy wastewater. *International Journal of Mechanical and Production Engineering*. 2015;3(11): 86-88
40. Tien TT, Linh DH, Vu LT, et al. Electrochemical Water Treatment Technology in Viet Nam: Achievement & Future Development. *Science Journal of Chemistry*. 2017;5(6): 87.
41. Sun Z, Liu Z, Hu X, editors. Mechanism of electrocoagulation with Al/Fe periodically reversing treating berberine pharmaceutical wastewater. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2017;63(1): 012026.
42. Yunnen C, Xiaoyan L, Changshi X, et al. The mechanism of ion exchange and adsorption coexist on medium–low concentration ammonium–nitrogen removal by ion-exchange resin. *Environmental Technology*. 2015;36(18): 2349-2356.
43. Crini G, Lichtfouse E. Advantages and disadvantages of techniques used for wastewater treatment. *Environmental Chemistry Letters*. 2019;17(1): 145-155.
44. Vorotyntsev AV, Petukhov AN, Makarov DA, et al. Synthesis, properties and mechanism of the ion exchange resins based on 2-methyl-5-vinylpyridine and divinylbenzene in the catalytic disproportionation of trichlorosilane. *Applied Catalysis B: Environmental*. 2018;224: 621-633.
45. Marczewski AW, Seczkowska M, Deryło-Marczewska A, et al. Adsorption equilibrium and kinetics of selected phenoxyacid pesticides on activated carbon: effect of temperature. *Adsorption*. 2016;22(4-6): 777-790.
46. DeylamSalehi M. Synthesis of Iron nanoparticles based on granular activated Carbon and its effects on the removal of Arsenic species in aqueous solution. [Thesis M.Sc.]. Iran. School of chemical engineering of University of Mohaghegh Ardabili. 2014. (Persian)
47. DeilamSalehi M, Shayesteh K. Synthesis of novel adsorbent, nano zero valent iron based on granular activated carbon by pomegranate leaf extract for arsenate removal aqueous solutions. *National Congress on Chemistry and Nano-Chemistry, From research to national development, Tehran University*. 2017;10-18.
48. Turabik M, Simsek UB. Effect of synthesis parameters on the particle size of the zero valent iron particles. *Inorganic and Nano-Metal Chemistry*. 2017;47(7): 1033-1043.
49. Lim AP, Aris AZ. A review on economically adsorbents on heavy metals removal in water and wastewater. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*. 2014;13(2): 163-181.
50. Gaur N, Kukreja A, Yadav M, et al. Adsorptive removal of lead and arsenic from aqueous solution using soya bean as a novel biosorbent: equilibrium isotherm and thermal stability studies. *Applied Water Science*. 2018;8(4): 98.
51. Rahel C, Bhatnagar M. Adsorption of heavy metals and phenol from aqueous solution onto fly ash as low cost adsorbent: A review. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*. 2017;6(2): 2479-2497.
52. Delvigne F, Takors R, Mudde R, et al. Bioprocess scale-up/down as integrative enabling technology: from fluid mechanics to systems biology and beyond. *Microbial biotechnology*. 2017;10(5): 1267-1274.
53. Tanzadeh J, Shareghifar M, Panahandeh M. The use of microorganisms in bioremediation of heavy methals in soils. *Journal of Environmetal Research and Technology*. 2016;1(1): 1-6. (Persian)
54. Eslami A, Nemati R. Removal of heavy metal from aqueous environments using bioremediation technology–review.

- Journal of Health in the Field 2015;3(2): 43-51. (Persian)
55. Cristaldi A, Conti GO, Jho EH, et al. Phytoremediation of contaminated soils by heavy metals and PAHs. A brief review. *Environmental Technology & Innovation*. 2017;8: 309-326.
56. Hasan M, Uddin M, Ara-Sharmeen I, et al. Assisting Phytoremediation of Heavy Metals Using Chemical Amendments. *Plants*. 2019;8(9): 295.
57. Muthusarayanan S, Sivarajasekar N, Vivek JS, et al. Phytoremediation of heavy metals: mechanisms, methods and enhancements. *Environmental Chemistry Letters*. 2018;16(4): 1339-1359.
58. Gnansounou E, Alves CM, Raman JK. Multiple applications of vetiver grass—a review. *International Journal of Environmental Science* 2017;2: 125-141.
59. Deng THB, Ent A, Tang YT, et al. Nickel hyperaccumulation mechanisms: a review on the current state of knowledge. *Plant Soil*. 2018;423(1-2): 1-11.
60. Campos FV, Oliveira JA, Silva AA, et al. Phytoremediation of arsenite-contaminated environments: is *Pistia stratiotes* L. a useful tool?. *Ecological Indicators*. 2019;104: 794-801.
61. Gurushantha K, Anantharaju K, Nagabhushana H, et al. Facile green fabrication of iron-doped cubic ZrO<sub>2</sub> nanoparticles by *Phyllanthus acidus*: structural, photocatalytic and photoluminescent properties. *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*. 2015;397: 36-47.
62. Rojas-Cervantes ML, Castillejos E. Perovskites as catalysts in advanced oxidation processes for wastewater treatment. *Catalysts*. 2019;9(3): 230.
63. Saravanan R, Gracia F, Stephen A. Basic principles, mechanism, and challenges of photocatalysis. In: Khan MM, Pradhan D, Sohn Y. *Nanocomposites for Visible Light-induced Photocatalysis*: Springer, Cham. 2017;19-40.
64. Regmi C, Joshi B, Ray SK, et al. Understanding mechanism of photocatalytic microbial decontamination of environmental wastewater. *frontiers in Chemistry*. 2018;6: 33.
65. Ge J, Zhang Y, Heo YJ, et al. Advanced design and synthesis of composite photocatalysts for the remediation of wastewater: A review. *Catalysts*. 2019;9(2): 122.