

Radiation-Based Methods for Industrial Wastewater Treatment: A Review Study

Samaneh Dehghan¹, Mohammad Roshani-Sefidkouhi², Fatemeh Barzegar³,
Fatemeh Mortezaazadeh^{*4}

1. Assistant Professor, Department of Environmental Health Engineering, Faculty of Health, Mazandaran University of Medical Sciences, Sari, Iran

2. MSc Student of Environmental Health Engineering, Faculty of Health, Mazandaran University of Medical Sciences, Sari, Iran

3. Student Research Committee, Faculty of Health, Mazandaran University of Medical Sciences, Sari, Iran;

4. PhD Student of Environmental Health Engineering, School of Public Health, Tehran University of Medical Sciences, Tehran, Iran

** Corresponding author.* Tel: +989118961086, Fax: +982142933261, E-mail: fmortezaazade0098@gmail.com

Received: Aug 25, 2024

Accepted: Jan 26, 2025

ABSTRACT

Background & objectives: As environmental pollution continues to rise, there is a growing need for innovative industrial wastewater treatment methods. Electromagnetic radiation has become a promising solution for reducing microbial contamination and producing no harmful by-products. This review study aimed to explore radiation-based methods for treating industrial wastewater and evaluates their effectiveness in improving wastewater quality.

Methods: This review analyzed English and Persian articles published from 2000 to March 2023. Databases such as ScienceDirect, Google Scholar, Web of Science, Scopus, PubMed, and the Islamic World Citation Database (ISC) were searched using keywords like "industrial wastewater," "treatment methods," "treatment," and "radiation." The collected data were categorized and summarized for comprehensive analysis.

Results: Radiation technology has proven to be an effective method for removing pollutants from industrial wastewater, offering a lower environmental impact compared to traditional methods. Combining this techniques with other treatment methods, can reduce costs and optimize the process. Ionizing radiation disinfects wastewater by generating free radicals, while non-ionizing radiation damages the DNA of microorganisms. Technologies such as electron beams (EB) and microwaves are particularly effective in sludge disinfection, industrial wastewater treatment, and pollutant removal. Currently, gamma rays are widely used for sludge disinfection, and EB is employed for wastewater treatment.

Conclusion: Radiation technology is an efficient and environmentally friendly method for treating industrial wastewater, capable of removing a wide range of pollutants. While the initial costs are high, integrating this technology with other methods can lead to save cost. However, further research is needed to optimize the process and reduce expenses, enabling broader adoption of this technology in industrial wastewater treatment.

Keywords: Wastewater Treatment; Industrial Wastewater; Radiation; Electromagnetic Radiation

روش‌های تصفیه فاضلاب‌های صنعتی با پرتوتابی: یک مطالعه مروری

سمانه دهقان^۱، محمد روشنی سفیدکوهی^۲، فاطمه برزگر^۳، فاطمه مرتضی‌زاده^{۴*}

۱. استادیار، گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی مازندران، ساری، ایران

۲. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی مازندران، ساری، ایران

۳. کمیته تحقیقات دانشجویی، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی مازندران، ساری، ایران

۴. دانشجوی دکتری تخصصی مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی تهران، تهران، ایران

* نویسنده مسئول. تلفن: ۰۹۱۱۸۹۶۱۰۸۶ فکس: ۰۲۱۴۲۹۳۳۲۶۱ ایمیل: fmorteazade0098@gmail.com

چکیده

زمینه و هدف: با افزایش آلودگی‌های زیست‌محیطی، نیاز به روش‌های تصفیه فاضلاب‌های صنعتی با استفاده از فناوری‌های جدیدی چون پرتوهای الکترومغناطیس به دلیل کاهش آلودگی میکروبی و عدم تشکیل مواد جانبی مضر احساس می‌شود. از این رو هدف از این مطالعه بررسی روش‌های تصفیه فاضلاب‌های صنعتی بوسیله پرتوها و نقش آن‌ها در بهبود کیفیت فاضلاب‌های صنعتی بوده است.

روش کار: در این مطالعه مروری، مقالات چاپ شده از سال ۲۰۰۰ میلادی تا مارس ۲۰۲۳ میلادی به زبان انگلیسی و فارسی مورد بررسی قرار گرفتند. این مقالات با جستجو در پایگاه‌های اطلاعاتی Google Scholar، ScienceDirect، PubMed، Scopus، Web of Science و پایگاه استنادی علوم جهان اسلام (ISC) با استفاده از کلیدواژه‌های انگلیسی «industrial wastewater»، «treatment methods»، «treatment»، «irradiation» و کلیدواژه‌های فارسی «فاضلاب صنعتی»، «روش‌های تصفیه»، «تصفیه»، «پرتوتابی» به دست آمدند. طی بررسی نهایی، مطالب جمع‌آوری شده، دسته‌بندی و خلاصه‌سازی شدند.

یافته‌ها: فناوری پرتوتابی روشی مؤثر برای حذف آلاینده‌ها از فاضلاب‌های صنعتی است که اثرات زیست‌محیطی کمتری نسبت به روش‌های سنتی دارد. ترکیب این فناوری با سایر روش‌ها می‌تواند به کاهش هزینه‌ها و بهینه‌سازی فرآیند کمک کند. پرتوهای یون‌ساز با تشکیل رادیکال‌های آزاد و پرتوهای غیر یون‌ساز از طریق آسیب به DNA میکروارگانیسم‌ها در گندزدایی فاضلاب استفاده می‌شوند. استفاده از پرتوهای یون‌ساز، پرتو الکترونی (Electron Beam (EB)) و ماکروویو می‌توانند در گندزدایی لجن، تصفیه فاضلاب‌های صنعتی و حذف آلاینده‌ها مؤثر باشد. در حال حاضر، پرتو گاما برای گندزدایی لجن و EB برای تصفیه فاضلاب مورد استفاده قرار می‌گیرند.

نتیجه‌گیری: این مطالعه نشان داد که فناوری پرتوتابی، روشی کارآمد برای تصفیه فاضلاب‌های صنعتی است و می‌تواند بسیاری از آلاینده‌ها را حذف کند. اگرچه هزینه اولیه این روش بالاست، اما ترکیب آن با روش‌های دیگر می‌تواند به صرفه‌جویی در هزینه‌ها کمک کند. با این حال، برای استفاده گسترده‌تر از این فناوری، نیاز به تحقیقات بیشتری در زمینه بهینه‌سازی و کاهش هزینه‌ها است.

واژه‌های کلیدی: تصفیه فاضلاب، فاضلاب صنعتی، پرتو، پرتو الکترومغناطیس

دریافت: ۱۴۰۳/۶/۴ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۷

مقدمه

افزایش جمعیت جهان و صنعتی‌شدن، ورود پساب‌های صنعتی و کشاورزی به منابع آبی، همراه با افزایش

مصرف آب شیرین، باعث آلودگی گسترده آب‌ها شده است (۱). از سوی دیگر، فاضلاب‌های صنعتی حاوی مواد شیمیایی خطرناک، فلزات سنگین و دیگر

آلاینده‌هایی هستند که در صورت ورود به منابع آبی، اکوسیستم‌های آبی را نابود کرده و سلامت انسان و سایر موجودات زنده را تهدید می‌کنند. لذا تصفیه اصولی این فاضلاب‌ها قبل از تخلیه به محیط‌زیست، امری ضروری است تا از آلودگی منابع آب جلوگیری شده و از این منابع ارزشمند به نحو مطلوب محافظت شود (۲، ۳). به طور کلی، تصفیه فاضلاب‌های صنعتی به دلیل وجود آلاینده‌های متفاوت با غلظت‌های بالا، مشکل و پرهزینه بوده و همواره به دلایل کاهش منابع آب و گسترش صنایع مختلف در دستور کار قرار گرفته است (۴-۶). به‌طوری‌که، صنایع مختلف آلاینده‌های متفاوتی مانند هیدروکربن‌ها، روغن و ذرات کلوئیدی تولید می‌کنند که تصفیه آن‌ها بر اساس نوع صنعت و نوع فاضلاب تولیدی، با روش‌های متفاوتی صورت می‌گیرد (۷، ۸). در مقابل، روش‌های متداول تصفیه فاضلاب صنعتی، ممکن است نتوانند به طور کامل این ترکیبات شیمیایی را حذف کنند و آلودگی را به حداقل برسانند (۹). در سال‌های اخیر، روش‌های نوین تصفیه فاضلاب مانند اکسیداسیون پیشرفته (AOP) و غشایی به عنوان جایگزین‌های کارآمد برای روش‌های سنتی مطرح شده‌اند. AOP از رادیکال‌های هیدروکسیل یا سولفات تولید شده در محل برای تخریب آلاینده‌های آلی و کاهش سمیت فلزات سنگین استفاده می‌کند (۱۰-۱۲). فرایندهای اکسیداسیون پیشرفته آلاینده‌های آلی سخت و مواد زائد میکروبی را به مواد ساده‌ای تبدیل می‌کنند که به راحتی تجزیه شده و بی‌ضرر هستند. این فرایندها باعث کاهش قابل توجه آلودگی‌های آلی در پساب می‌شوند. برای انجام این کار، از روش‌های مختلفی استفاده می‌شود که در آن‌ها با استفاده از نور، پرتوهای پرانرژی یا مواد شیمیایی، واکنش‌های اکسیداسیونی با خاصیت بالای اکسیدکنندگی ایجاد می‌شود (۱۳، ۱۴). یکی از این روش‌ها، تصفیه فاضلاب با استفاده از پرتوتابی است که به دلیل مزایایی مانند حذف طیف وسیعی از آلاینده‌ها و سرعت بالا، مورد

توجه قرار گرفته است (۱۵). رایج‌ترین انواع پرتوهای مورد استفاده در این زمینه، انواع یونیزان آن هستند که متداول‌ترین آنها عبارتند از پرتو گاما^۱ که منبع آن ایزوتوپ‌های رادیواکتیو مانند کبالت-۶۰ و سزیم-۱۳۷ می‌باشد (۱۶). پرتو ایکس^۲ و پرتو الکترون^۳ و پرتوهای آلفا^۴ که منابع آن‌ها دستگاه‌های شتاب‌دهنده الکترون و ایزوتوپ‌های رادیواکتیو مانند رادون و پلونیوم هستند، جزو پرتوهای یونیزان در نظر گرفته می‌شوند (۱۷). اما به طور کلی، انتخاب نوع پرتو برای تصفیه فاضلاب به عوامل مختلفی از قبیل نوع و غلظت آلاینده‌ها، حجم فاضلاب، عمق نفوذ مورد نیاز، هزینه و ایمنی بستگی دارد (۱۸). هنگامی که پرتوهای یونیزان به آب یا فاضلاب برخورد می‌کنند، مولکول‌های آب به رادیکال‌های هیدروکسیل ($\cdot\text{OH}$) و هیدروژن ($\cdot\text{H}$) تجزیه می‌شوند. این رادیکال‌ها به شدت واکنش‌پذیر هستند و با آلاینده‌های آلی واکنش داده و آن‌ها را به ترکیبات ساده‌تر و کم‌خطرتر تبدیل می‌کنند (۱۹). از سوی دیگر، فرآیند پرتوتابی معمولاً بسیار سریع است و در مدت زمان کوتاهی می‌توان به نتایج مطلوب دست یافت (۲۰). مطالعاتی که کاربرد پرتو در تصفیه فاضلاب صنعتی را بررسی می‌کنند، معمولاً بر اثربخشی آن در حذف آلاینده‌ها، کاهش سطح سمیت و بهبود کیفیت کلی آب تمرکز دارند (۲۱). بسیاری از محققان استفاده از انواع مختلف تشعشعات مانند پرتوهای گاما، اشعه ماوراء بنفش (UV) و پرتوهای الکترونی و اثرات آنها بر آلاینده‌های مختلف موجود در فاضلاب را بررسی کرده‌اند. به عنوان مثال، اقبال^۵ و همکاران (۲۰۱۵ میلادی)، پساب‌های نساجی را با پرتو گاما با دوزهای جذبی ۵، ۱۰ و ۱۵ کیلوگری تصفیه نمودند. نتایج نشان داد دوزهای جذبی بالاتر اثر قابل توجهی در تصفیه

¹ Gamma Rays

² X-rays

³ Electron Beams

⁴ Alpha Particles

⁵ Iqbal

فاضلاب صنعتی نداشته و برای افزایش کارایی تصفیه نیاز به بهینه‌سازی دوز تابش گاما وجود دارد (۲۲). هم‌چنین نتایج پژوهش مداح و همکاران (۱۳۹۷) خورشیدی) نشان داد که استفاده از پرتو گاما کارایی بالایی در گندزدایی و کنترل رشد مجدد میکروارگانیسم‌ها دارد (۲۳). از سوی دیگر، مطالعه چو^۱ و همکاران (۲۰۲۱ میلادی) نشان داده است که پرتو گاما می‌تواند به طور موثر آنتی‌بیوتیک‌ها، ژن‌های مقاوم ضد میکروبی و فعالیت ضد میکروبی را در فاضلاب دارویی کاهش دهد (۲۴). کیم^۲ و همکاران (۲۰۱۴ میلادی) مطالعه‌ای با هدف تاثیر پرتوهای یونیزان بر تبلور استروویت^۳ فاضلاب دامی انجام دادند، نتایج نشان داد که تابش اشعه گاما می‌تواند غلظت COD، NH_4^+ و PO_4^{3-} موجود در فاضلاب دام را کاهش دهد، که نه تنها باعث افزایش راندمان بلوری شدن استروویت می‌شود، بلکه باعث کاهش نیازهای شیمیایی برای تبلور استروویت فاضلاب دامی نیز می‌گردد (۲۵). نتایج مطالعه وانگ^۴ و همکاران (۲۰۱۹ میلادی) نشان داد فرایند پرتوتابی در حضور پراکسی‌مونوسولفات (PMS) می‌تواند تجزیه و معدنی‌شدن کاربامازپین از فاضلاب دارویی را افزایش دهد و دوز جذب شده مورد نیاز برای تجزیه کامل کاربامازپین را از ۸۰۰ گری به ۳۰۰ گری کاهش دهد و حداکثر کانی‌سازی ۴۶٫۵ درصد در دوز ۶۰۰ گری به دست آمد (۲۶). همچنین مطالعه He و همکاران (۲۰۲۱ میلادی) بر روی تجزیه ۳-متیل ایندول با پرتوتابی نشان داد که راندمان حذف ۳-متیلیندول زمانی که غلظت اولیه ۲۰ میلی گرم در لیتر، دوز جذبی ۳ کیلوگری و $pH=3$ بود، ۹۶/۲ درصد بدست آمد (۲۷). به علاوه، مطالعه دیگر هی^۵ و همکاران (۲۰۲۲ میلادی) راندمان حذف ایندول با پرتوهای

¹ Chu² Kim³ Struvite⁴ Wang⁵ He

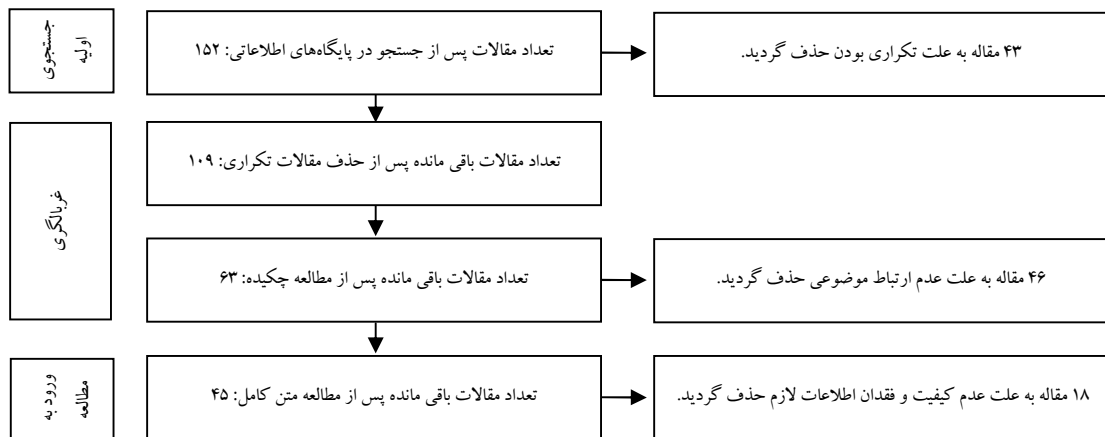
یونیزان را در غلظت اولیه ۱۰ میلی گرم در لیتر، دوز جذبی ۲ کیلوگری و $pH=5$ ، ۹۹/۲ درصد ارزیابی کرد (۲۸). تصفیه فاضلاب صنعتی با پرتوتابی یک روش نوین و امیدوارکننده برای مقابله با آلودگی‌های پیچیده و پایدار در فاضلاب‌های صنعتی است. از سوی دیگر، پرتوتابی می‌تواند به عنوان یک مرحله تکمیلی در فرآیند تصفیه فاضلاب استفاده شود تا کارایی کل فرآیند را افزایش دهد و کیفیت پساب خروجی را بهبود بخشد (۲۹). حتی در برخی موارد، پرتوتابی می‌تواند به کاهش تولید لجن در فرآیند تصفیه کمک کند (۳۰). با وجود مزایای ذکر شده، تصفیه فاضلاب با پرتوتابی هنوز با چالش‌هایی همراه است که نیازمند تحقیقات بیشتر است، از این رو هدف از این پژوهش، بررسی و مقایسه روش‌های تصفیه فاضلاب‌های صنعتی با استفاده از پرتوهای الکترومغناطیس بوده است که بتواند با کارایی بالا و نتایج مطلوب در صنایع مختلف مورد استفاده و در اختیار متخصصان این حوزه قرار گیرد.

روش کار

پژوهش مروری حاضر به منظور دستیابی به مستندات، جستجو به وسیله کلیدواژه‌های انگلیسی Treatment Methods Industrial Wastewater Radiation Treatment، و کلیدواژه‌های فارسی فاضلاب صنعتی، روش‌های تصفیه، تصفیه و پرتوتابی؛ در پایگاه‌های اطلاعاتی ScienceDirect، Google Scholar، Web of Science، Scopus، PubMed و پایگاه استنادی جهان اسلام (ISC) به صورت منفرد و ترکیبی با قرار دادن "and" در بین آن‌ها، در قسمت‌های عنوان، چکیده و کلیدواژه‌های انگلیسی، صورت پذیرفت. مستندات استخراج شده شامل سه گروه مقاله، کتاب و گزارش بودند. بدین شیوه، مستندات معتبر از سال ۲۰۰۰ میلادی تا مارس ۲۰۲۳ میلادی که حاوی متن کامل و مرتبط با هدف مطالعه بودند، استخراج شدند. معیارهای ورود به مطالعه،

شدند نیز از فرایند بررسی خارج گردیدند. در پایان طی بررسی نهایی، مطالب جمع آوری شده دسته‌بندی و خلاصه شدند. همان‌طور که در تصویر ۱ مشاهده می‌شود، پس از حذف مقالات تکراری، مطالعه چکیده و در نهایت متن کامل مقالات، ۴۵ مقاله مرتبط وارد مطالعه شد.

شامل ارتباط موضوعی، در دسترس بودن متن کامل در پایگاه‌های اطلاعات علمی معتبر و استنادات به آنها بود. معیارهای خروج از مطالعه، منابع غیرمرتبط، فاقد متن کامل و مقالات بدون استناد و متعلق به قبل از سال ۲۰۰۰ میلادی بودند. موضوعات و روش‌هایی که در طول پژوهش‌های متعدد در نهایت مردود اعلام



شکل ۱. مراحل انتخاب و ورود مقالات به مطالعه

یک کارخانه رنگرزی منسوجات استفاده می‌کند، افتتاح کرده است و از سوی دیگر، کشورهای دیگر مانند هند، بنگلادش و سریلانکا نیز در حال بررسی و تاسیس این فناوری با کمک آژانس بین‌المللی انرژی اتمی هستند (۳۴). در مطالعات متعددی به فناوری پرتوتابی در تصفیه فاضلاب صنعتی اشاره شده است. در مطالعه وی‌ما^۲ و همکاران (۲۰۲۳ میلادی) بیان شد که تشعشعات یونیزان می‌توانند به طور موثر آلاینده‌های آلی مانند ۲-کلروآنیلین را در فاضلاب شیمیایی تجزیه کنند (۳۵). همچنین مطالعه ویالکوا^۳ و همکاران (۲۰۲۱ میلادی) نشان داده است که تصفیه فاضلاب به وسیله پرتوتابی در حذف فلزات، تصفیه فاضلاب و لجن موثر است (۳۶). از سوی دیگر، مطالعات اهمیت پیش تصفیه را قبل از استفاده از فناوری EB برای تصفیه فاضلاب برجسته کرده‌اند. ذرات معلق می‌توانند مقدار قابل-توجهی از تشعشعات را جذب کنند، به‌دنبال آن، باعث

یافته‌ها و بحث

روش‌های تصفیه فاضلاب صنعتی با پرتوتابی

با افزایش آلودگی در محیط‌زیست، نیاز به روش‌های تصفیه فاضلاب صنعتی با استفاده از فناوری‌های جدید احساس می‌شود. این روش‌ها باید اقتصادی و سازگار با محیط‌زیست باشند (۳۱). در تصفیه فاضلاب صنعتی به وسیله پرتوتابی، از پرتوهای یونیزان مانند پرتوهای گاما یا EB برای تجزیه آلاینده‌های پیچیده و غیرقابل تجزیه در فاضلاب صنایع مختلف مانند رنگرزی نساجی، کاغذ و خمیر کاغذ و داروسازی استفاده می‌شود (۳۲). تصفیه با پرتوتابی می‌تواند رنگ، بو، سمیت و اکسیژن مورد نیاز بیوشیمیایی (BOD)^۱ فاضلاب را کاهش دهد و به دنبال آن، تصفیه آن را با روش‌های بیولوژیکی مرسوم یا استفاده مجدد برای آبیاری آسان‌تر کند (۳۳). کشور چین در سال ۲۰۱۷ میلادی اولین تأسیسات خود را که از EB برای تصفیه فاضلاب صنعتی

^۲ Wei Ma

^۳ Vialkova

^۱ Biochemical Oxygen Demand

بهبود بخشد و باعث نفوذ بهتر تشعشع گردد (۳۹). برخی از آلاینده‌های غیر آلی مانند فلزات سنگین می‌توانند به تجهیزات EB آسیب برسانند. حذف این آلودگی‌ها می‌تواند طول عمر تجهیزات پرتوتابی را افزایش دهد (۴۰). جدول ۱ مطالعات انجام شده در زمینه کاربرد پرتوها در تصفیه فاضلاب صنعتی را نشان می‌دهد.

کاهش تجزیه آلاینده‌ها می‌شوند. با حذف آنها، فرآیند EB می‌تواند اثر کارآمدتری داشته باشد (۳۷). همچنین، ذرات معلق می‌توانند به تجهیزات پرتوتابی آسیب برسانند و طول عمر آنها را کاهش دهند (۳۸). از سوی دیگر، کدورت زیاد می‌تواند مانع از نفوذ تشعشعات به فاضلاب شود و اثربخشی آن را کاهش دهد. پیش تصفیه می‌تواند شفافیت فاضلاب را

جدول ۱. مطالعات صورت گرفته در زمینه تصفیه فاضلاب صنعتی با استفاده از پرتوتابی

نویسندگان	کشور	هدف از مطالعه	نوع پرتو	نتایج	مرجع
تولابی و همکاران (۱۳۹۶ خورشیدی)	ایران	فرایند تلفیقی لخته‌سازی توام با تجزیه فتو کاتالیستی (TiO ₂ /UV-A) در حذف رنگ ۲- (متوکسی کربونیل آمینو- متیل)- آکریلیک اسید متیل استر از فاضلاب سنتتیک صنعتی	UV- A	بیشترین درصد حذف رنگ و (chemical oxygen demand (COD)) در غلظت ۱۵۰ میلی گرم در لیتر نانو ذره و با شدت اشعه ۴۸۰ میکرووات بر سانتی متر مربع در تصفیه فاضلاب صنعت خودروسازی رخ داد	(۴۱)
هینا ^۱ و همکاران (۲۰۲۱ میلادی)	پاکستان	تصفیه فاضلاب صنعتی با تابش گاما برای حذف بار آلی از نظر اکسیژن بیولوژیکی و شیمیایی	پرتو گاما	تابش گاما یک روش فوری برای پساب صنعتی است و در این مطالعه توصیه شد.	(۳۳)
چو ^۲ و همکاران (۲۰۲۱ میلادی)	چین	تصفیه فاضلاب دارویی با پرتوهای یونیزان: حذف آنتی‌بیوتیک‌ها، ژن‌های مقاوم و فعالیت ضد میکروبی	پرتو گاما	پرتوهای یونیزان یک گزینه بالقوه برای تصفیه فاضلاب دارویی برای کاهش آنتی‌بیوتیک‌ها، ژن‌های مقاوم و فعالیت ضد میکروبی می باشند.	(۲۴)
جیانگ ^۳ و همکاران (۲۰۲۰ میلادی)	ژاپن	پرتوهای یونیزان پرانرژی برای تصفیه فاضلاب صنعتی و سنتز مواد	پرتوهای گاما و EB	پرتوهای یونیزان پرانرژی، به دلیل توانایی یونیزاسیون قوی ابزاری قدرتمند برای تصفیه فاضلاب و سنتز مواد در صنعت هستند.	(۴۲)
چانگوترا ^۴ و همکاران (۲۰۱۹ میلادی)	هند	ارزیابی فرآیند لخته‌سازی پرتوهای یونیزان همراه با تصفیه بیولوژیکی فاضلاب دارویی	پرتو گاما	تصفیه ترکیبی فاضلاب در ارزیابی سمیت سلولی بر روی میکروارگانیسم‌ها در از بین بردن سمیت مؤثر بود.	(۴۳)
مادوریرا ^۵ و همکاران (۲۰۱۸ میلادی)	پرتغال	تجزیه اسیدهای فنولیک توسط تابش گاما در فاضلاب صنعت چوب پنبه	پرتو گاما	در pH طبیعی، راندمان تخریب بیش از ۵۰ درصد برای اسیدهای گالیک، وانیلیک و سیرینگیک در محلول‌های ایزوله و مخلوط در دوز ۲۰ کیلوگری به دست آمد.	(۴۴)
اتری ^۶ و همکاران (۲۰۱۸ میلادی)	ژاپن و کره	تأثیر پرتوهای گاما و تصفیه پلاسما تخلیه سد دی الکتریک (dielectric barrier discharge (DBD)) بر تصفیه فاضلاب صنعتی	پرتو گاما	پرتوهای گاما پتانسیل قوی برای رنگ‌زدایی متیل اورانژ و متیلن بلو دارند.	(۴۵)

¹ Hina² Chu³ Jiang⁴ Changotra⁵ Madureira⁶ Attri

نویسندگان	کشور	هدف از مطالعه	نوع پرتو	نتایج	مرجع
یونس و همکاران (۲۰۱۷ میلادی)	مصر	توسعه نانوجاذب پلی آمینه (گلیسیدیل متاکریلات) توسط تابش گامای سبز برای تصفیه فاضلاب آلوده به فنل و مالاتیون	پرتو گاما	نانوجاذب پلی آمینه تهیه شده توسط پرتو گاما به طور مؤثری فاضلاب های صنعتی و کشاورزی را تصفیه می کند.	(۴۶)
هی ^۱ و همکاران (۲۰۱۶ میلادی)	چین	تجزیه پذیری زیستی فاضلاب نساجی و رنگرزی با تابش EB	پرتو EB	تابش EB می تواند تجزیه پذیری زیستی را تا ۲۲۴ درصد افزایش دهد.	(۴۷)
ورده ^۲ و همکاران (۲۰۱۶ میلادی)	پرتقال	اثرات تابش گاما بر میکروب های فاضلاب صنعتی کشتارگاه	پرتو گاما	میزان تابش و دوز پرتو، بر پاسخ میکروارگانیسم ها به تابش گاما تأثیر می گذارد و عوامل مهمی برای پاکسازی زیستی است.	(۴۸)
بویان ^۳ و همکاران (۲۰۱۶ میلادی)	بنگلادش	استفاده مجدد و بازیافت پساب نساجی پس از تصفیه با اشعه گاما	پرتو گاما	پرتودهی گاما در آلودگی زدایی پساب نساجی، بازیافت و استفاده مجدد در آبیاری با خواص کوددهی مؤثر است.	(۴۹)
بویان و همکاران (۲۰۱۶ میلادی)	بنگلادش	رنگ زدایی و بی خطر سازی پساب نساجی با تابش گاما در حضور پراکسید هیدروژن (H_2O_2)	پرتو گاما	استفاده از تابش گاما با ترکیب H_2O_2 سبب تخریب مؤثر مواد آلی (TSS و COD) و کاهش خطرات زیست محیطی شود.	(۵۰)
امامی میبدی و همکاران (۲۰۱۶ میلادی)	ایران	بررسی تجربی تصفیه فاضلاب کارخانه نساجی یزدیاف و نقشین یزد با استفاده از تابش EB	EB	EB گران تر از کلر زنی و ارزان تر از لجن فعال است. بنابراین، پرتودهی EB در صورتی که روش های مرسوم میسر نباشد یا کلر زنی به دلایل بهداشتی مجاز نباشد، مناسب ترین روش در مقیاس صنعتی است.	(۵۱)
اقبال ^۴ و نثار ^۵ (۲۰۱۵ میلادی)	پاکستان	ارزیابی سمیت سلولی و جیش زایی پساب های نساجی تصفیه شده با پرتو گاما و H_2O_2 با استفاده از سنجش زیستی	پرتو گاما	جیش زایی پساب های تصفیه شده با پرتو گاما در مورد TA98 و TA100 به ترتیب تا ۵۹ درصد و ۵۴ درصد کاهش یافت. تابش گاما در ترکیب با H_2O_2 می تواند برای سم زدایی پساب های نساجی استفاده شود.	(۵۲)
حسن (۲۰۱۵ میلادی)	مصر	حذف رنگ های واکنش پذیر از پساب نساجی توسط کیتوزان بر روی الیاف جوت پیوندی با اسید اکریلیک توسط پرتودهی گاما	پرتو گاما	پیوند بهینه در دز جذبی ۳۰ کیلوگری و درصد مونومر ۳۰ درصد به دست آمد. جذب رنگ توسط الیاف جوت تیمار شده در محیط اسیدی با pH ۳، افزایش یافت.	(۵۳)
عبدو ^۶ و همکاران (۲۰۱۱ میلادی)	مصر	رنگ زدایی و تخریب ضایعات رنگ باقی مانده پس از رنگرزی پارچه های پنبه ای بوسیله پرتوهای یونیزان	پرتو گاما و EB	رنگ زدایی و تخریب بیشتر رنگ ها در شرایط استفاده از EB نسبت به تابش گاما به دست می آید.	(۵۴)
پارک و همکاران (۲۰۰۸ میلادی)	کره	تصفیه اشعه گاما بر سمیت فاضلاب از یک کارخانه محصولات لاستیکی	پرتو گاما	تصفیه فاضلاب خام با دوز ۲۰ کیلوگری پرتو گاما و فیلتراسیون در pH ۳ و ۳/۶، تغییرات چشمگیری (به ترتیب ۹ به ۷۷ و ۲۹ به ۸۵ درصد) در کاهش سمیت نشان داد.	(۵۵)

¹ He

² Verde

³ Bhuiyan

⁴ Iqbal

⁵ Nisar

⁶ Abdou

انواع روش‌های تصفیه فاضلاب صنعتی با پرتوتابی وجود دارد که رایج‌ترین آنها عبارتند از:

تصفیه با پرتو یونساز گاما

تصفیه فاضلاب صنعتی با پرتوی گاما فرآیندی است که از تابش‌های پرانرژی گاما برای تخریب یا حذف آلاینده‌های پایدار و گندزدایی میکروارگانیسم‌های مضر استفاده می‌کند (۵۶). در این روش، فاضلاب در معرض پرتوهای گاما از یک منبع رادیواکتیو (کبالت-۶۰ یا سزیم-۱۳۷) قرار می‌گیرد (۵۷، ۵۸). پرتوهای گاما توانایی کاهش باکتری‌ها، ویروس‌ها، انگل‌ها و سایر آلاینده‌های زیستی را نیز دارند (۵۹، ۶۰). به طوری که می‌توانند پیوندهای مولکولی آلاینده‌های آلی را بشکنند و میکروارگانیسم‌های موجود در آب و لجن را از بین ببرند، که این فرآیند پرتوکافت یا رادیولیز^۱ نامیده می‌شود (۶۱) و در طی این فرایند، گونه‌های بسیار واکنش‌پذیری مانند رادیکال‌های هیدروکسیل تولید می‌کند که می‌توانند آلاینده‌ها را بیشتر تجزیه نمایند (۶۲). پرتوهای گاما دارای مزایایی نسبت به سایر روش‌های تصفیه هستند، به طوری که نیاز به افزودنی‌های شیمیایی ندارند و می‌توانند هزینه و اثرات زیست محیطی تصفیه را کاهش دهند (۶۳). از سویی دیگر، سریع و موثر هستند و می‌توانند حجم زیادی از فاضلاب را در یک سیستم جریان پیوسته و با سطوح بالایی آلاینده‌ها، تصفیه و حذف کنند (۶۴). تصفیه فاضلاب صنعتی با پرتوهای یونیزان گاما در مقالات متعددی مورد بررسی قرار گرفته است. هینا^۲ و همکاران (۲۰۲۱ میلادی) مطالعه‌ای در مورد استفاده مجدد از پساب صنعتی پس از تصفیه با پرتو گاما انجام دادند و دریافتند که به طور موثر TSS، BOD₅ و COD را در محدوده مجاز کاهش می‌دهد (۳۳). مطالعه ملو^۳ و همکاران (۲۰۰۸ میلادی) با استفاده از

تابش گاما بر روی نمونه‌های فاضلاب کشتارگاه انجام شد، که در آن کاهش COD، BOD و رنگ پس از تابش در دوزهای جذب بالا مشاهده شد و نتایج میکروبیولوژیکی، پس از تابش در شرایط مشابه، با نتایج BOD همبستگی داشت (۶۵). علاوه بر این، وانگ و همکاران (۲۰۲۰ میلادی) یک رویکرد ترکیبی برای تصفیه فاضلاب دارویی را بررسی کردند که شامل پرتودهی گاما به عنوان مرحله پیش‌تصفیه و پس از تصفیه برای افزایش راندمان حذف بود (۶۶). نتایج مطالعه ورده و همکاران (۲۰۱۶ میلادی) نشان داد که میزان تابش و دوز امواج گاما، بر پاسخ میکروارگانیسم‌ها به تابش گاما تأثیر می‌گذارد و همچنین می‌تواند عامل مهمی برای غیرفعال شدن میکروارگانیسم‌ها باشد (۴۸). این نوع از پرتوتابی به دو صورت ناپیوسته یا پیوسته صورت می‌گیرد (۶۷). حالت ناپیوسته به این معناست که محصول در اطراف منبع پرتوتابی است و تخلیه یا بارگذاری هنگام پرتوتابی صورت نمی‌گیرد. این در حالی است که در حالت پیوسته، محصول با کمک سیستم خودکار به سلول پرتوتابی انتقال می‌یابد و با عبور از جلوی منبع پرتوتابی به سمت خارج از سلول حرکت می‌کند. نتایج مطالعه چانگوترا^۴ و همکاران (۲۰۱۹ میلادی) نشان داد پیش تصفیه با پرتو گاما، سبب حذف 58.7 ± 3.2 درصد COD و 80.4 ± 2.1 درصد TOC برای تصفیه فاضلاب دارویی با قدرت آلی کم و 62 ± 2.9 درصد COD و 71 ± 2.7 درصد TOC برای تصفیه فاضلاب دارویی با قدرت آلی بالا شد (۶۸). اقبال و همکاران (۲۰۱۵ میلادی) در مطالعه‌ای تصفیه فاضلاب نساجی با پرتودهی را ارزیابی کردند و بیان نمودند که تصفیه با پرتو گاما به طور موثری فاضلاب‌های نساجی را سم‌زدایی می‌کند و همچنین تشعشعات گاما سمیت سلولی و جهش‌زایی در نمونه‌های فاضلاب را کاهش می‌دهد (۲۲). به طور کلی، این مطالعات

^۴ Changotra

^۱ Radiolysis

^۲ Hina

^۳ Melo

اثر بخشی پرتوهای یونیزان گاما را در تصفیه فاضلاب صنعتی با کاهش آلاینده‌ها و بهبود کیفیت آب نشان می‌دهند. برای تصفیه فاضلاب صنعتی، پرتوهای یونساز، از جمله پرتو گاما و پرتو الکترونی (EB)، قابل استفاده هستند. هر دو پرتو مزایا و معایبی برای کاربردهای صنعتی دارند. چشمه کبالت-۶۰ به عنوان یک منبع راجح پرتو گاما استفاده می‌شود (۶۹)، اما به دلیل دز پایین‌تر پرتو گاما (۱۰ کیلوگری در ساعت) نسبت به EB (۱ کیلوگری در ثانیه)، و همچنین نیمه عمر ایزوتوپ کبالت-۶۰ که ۲۷/۵ سال است، فعالیت آن سالانه حدود ۱۲/۵ درصد کاهش می‌یابد. همچنین، هزینه‌های جایگزینی منبع ایزوتوپی باعث شده است که استفاده از شتاب‌دهنده‌ها برای تولید EB در مقیاس صنعتی برای تصفیه آب، پساب و سایر موارد، مقرون به صرفه‌تر باشد (۷۰-۷۲). از لحاظ کاربرد، به طور عمده برای گندزدایی لجن در مقیاس صنعتی، از پرتو گاما و برای پساب و آب از EB استفاده می‌شود (۵۷، ۷۳).

تصفیه با پرتو یونساز EB

تصفیه فاضلاب صنعتی با پرتوهای یونیزه کننده EB فرآیندی است که از الکترون‌های پرانرژی برای تجزیه یا حذف آلاینده‌های آلی پایدار استفاده می‌کند (۷۴). فناوری پرتو EB یک تکنولوژی اثبات شده است که درجه بالایی از تصفیه فاضلاب را نشان می‌دهد (۷۵). در این روش، فاضلاب در معرض پرتوهای EB از یک شتاب‌دهنده ذرات قرار می‌گیرد (۷۵). این روش مشابه پرتوهای گاما است، اما تفاوت‌هایی دارد. EB به منبع رادیواکتیو نیاز ندارد، از این رو خطرات مرتبط با ایمنی را کاهش می‌دهد (۷۶). از سویی دیگر، EB را می‌توان راحت‌تر و دقیق‌تر کنترل کرد، زیرا می‌توان آنها را فوراً خاموش و روشن کرد (۷۷). EB انرژی و عمق نفوذ کمتری نسبت به پرتوهای گاما دارند، به این معنی که به حفاظت کمتری نیاز دارد و به نسبت حجم کمتری از فاضلاب را تصفیه می‌کند (۵۶). تابش EB همچنین می‌تواند برای تخریب و

سم‌زدایی مواد دارویی در فاضلاب و بهبود کیفیت آب استفاده شود (۷۸). مطالعات بسیاری نتیجه تصفیه فاضلاب‌های صنعتی با EB را نشان دادند. بعنوان مثال مطالعه تراک^۱ و همکاران (۲۰۲۱ میلادی) بر استفاده از EB به عنوان یک فناوری موثر تصفیه فاضلاب برای کاربرد در مقیاس آزمایشگاهی تمرکز کرده است (۷۹). نتایج مطالعه وانگ و همکاران (۲۰۲۲ میلادی) در مطالعه فناوری پرتو EB برای تصفیه فاضلاب رنگریزی (۳۰۰۰۰ متر مکعب در روز) در چین نشان داد COD خروجی واحد پرتو EB بین ۲۰ تا ۵۰ میلی گرم در لیتر می‌باشد، در حالی که COD ورودی بین ۱۸۰ تا ۲۸۰ میلی گرم در لیتر بوده و رنگ موجود در پساب رنگریزی تصفیه شده حدود ۱۰ برابر کاهش یافت (۸۰). در مطالعه دیگری فاضلاب بیمارستانی واقعی با استفاده از فناوری پرتو EB به عنوان فرآیند تصفیه پیشرفته در طی شیوع همه‌گیری کووید-۱۹ در شهر هوبی^۲ چین در جولای ۲۰۲۰ توسط وانگ و همکاران (۲۰۲۲ میلادی) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج مطالعه نشان داد حداکثر راندمان حذف روتاوایروس، آنتروویروس و نوروویروس به ترتیب ۹۸/۹۰، ۸۸/۴۹ و ۸۱/۵۸ درصد بوده است (۸۱). مطالعه کومار^۳ و همکاران (۲۰۲۱ میلادی) بیان نمود که تابش EB می‌تواند کارایی فرآیند تصفیه پساب‌های دارویی را افزایش دهد و در برخی موارد منجر به کاهش COD خروجی تا ۶۵ درصد شود (۸۲). از سویی دیگر، جویدر^۴ و همکاران (۲۰۱۸ میلادی) استفاده از تابش EB برای تصفیه فاضلاب صنعتی آلوده به کروم مورد بحث قرار دادند و بیان نمودند که تابش EB می‌تواند به طور موثر کروم سمی (VI) را از آب حذف کند و آن را به کروم غیر سمی (III) تبدیل کند (۸۳).

تصفیه با پرتو غیر یونساز UV

¹ Truc

² Hubei

³ Kumar

⁴ Djouider

استفاده از اشعه UV برای تصفیه فاضلاب صنعتی برای کشتن یا غیرفعال‌سازی میکروارگانیسم‌ها و تجزیه آلاینده‌های آلی موجود در فاضلاب می‌باشد (۸۴). گندزدایی UV می‌تواند به طور موثر پاتوژن‌هایی مانند باکتری‌ها، ویروس‌ها، کرم‌ها و تک یاخته‌ها، از جمله سویه‌های مقاوم به کلر را غیرفعال کند (۸۵). این پرتو، دارای محدوده طول موج ۱۰۰-۴۰۰ نانومتر است و می‌تواند به چهار محدوده تقسیم شود: UV-A (۳۱۵-۴۰۰ نانومتر)، UV-B (۲۸۰-۳۱۵ نانومتر)، UV-C (۲۰۰-۲۸۰ نانومتر) و UV خلاء (۲۰۰-۱۰۰ نانومتر) (۸۶). که UV-C با طول موج ۲۵۴ نانومتر به طور موثری در فرآیند گندزدایی مورد استفاده قرار گرفته است، زیرا گندزدایی معمولی با کلر به شکل‌گیری محصولات جانبی بالقوه سرطان‌زا کمک می‌کند (۸۷)، اما پرتو UV سبب غیرفعال کردن باکتری‌ها بدون تشکیل محصولات جانبی سمی می‌شود. به همین دلیل آژانس حفاظت محیط‌زیست ایالات متحده آمریکا (USEPA) گندزدایی بوسیله UV را بهترین فناوری گندزدایی فعلی می‌داند (۸۸، ۸۹). اشعه UV می‌تواند توسط انواع مختلفی از لامپ‌ها مانند لامپ‌های جیوه‌ای کم فشار، لامپ‌های جیوه‌ای فشار متوسط و دیوهای ساطع نور (LED) تولید شود (۹۰). این پرتو می‌تواند با آسیب به DNA موجودات زنده، آنها را از بین ببرد. پرتوهای UV همچنین می‌توانند پیوندهای شیمیایی بین مولکول‌های آلی را بشکنند و آنها را تجزیه کنند (۹۱). ریزو^۱ و همکاران (۲۰۱۳ میلادی) اثر UV بر سویه‌های اشرشیاکلی مقاوم به آنتی‌بیوتیک را با فرآیند کلرزنی مقایسه نمودند. نتایج مطالعه آنان نشان داد، فرآیند گندزدایی با UV منجر به غیرفعال شدن کامل پس از ۶۰ دقیقه تابش (توان $10^4 \times 1/25$ میکرووات ثانیه بر سانتی متر مربع) شد (۹۲). همچنین نتایج مطالعه کریستوا^۲ و همکاران (۲۰۱۵)

میلادی) در تصفیه پساب صنعت کنسرو ماهی نشان داد که حذف باکتری‌های هتروتروف با ضدعفونی UV به ۱۰۰ درصد رسید (۸۹).

تصفیه با امواج مایکروویو

در تصفیه فاضلاب صنعتی با مایکروویو از تابش مایکروویو برای تخریب یا حذف آلاینده‌ها و گندزدایی میکروارگانیسم‌های مضر موجود در فاضلاب استفاده می‌کند (۳۶). این امواج دارای محدوده فرکانسی ۰/۳ گیگاهرتز تا ۳۰۰ گیگاهرتز است که مربوط به محدوده طول موج ۱ متر تا ۱ میلی‌متر است (۹۳). تابش مایکروویو می‌تواند مولکول‌های آب را با چرخش دوقطبی یا مهاجرت یونی گرم کند و گونه‌های بسیار واکنش‌پذیری مانند رادیکال‌های هیدروکسیل تولید کند که می‌توانند آلاینده‌ها را تجزیه کنند (۹۴). از سوی دیگر، این فرایند می‌تواند همراه با سایر فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته مانند ازن، H_2O_2 یا UV برای افزایش کارایی و اثربخشی تصفیه استفاده شود (۹۵). مکانیسم تخریب امواج مایکروویو در گندزدایی بر اساس تعامل بین تابش امواج مایکروویو و میکروارگانیسم‌ها است (۹۶). به‌طوری‌که تابش مایکروویو می‌تواند دو اثر ایجاد کند: حرارتی و غیر حرارتی. اثر حرارتی نتیجه گرم شدن آب و سایر مولکول‌های موجود در میکروارگانیسم‌ها توسط ارتعاش و اصطکاک ناشی از امواج مایکروویو است (۹۷). اثر غیرحرارتی نیز نتیجه تولید گونه‌های اکسیژن فعال (ROS) توسط واکنش‌های رادیولیز آب و سایر مولکول‌ها در میکروارگانیسم‌ها است (۹۸) که سهم اثرات حرارتی و غیر حرارتی به قدرت مایکروویو، فرکانس، زمان مواجهه و نوع و غلظت میکروارگانیسم‌ها بستگی دارد (۹۹). در مطالعات متعددی تاثیر امواج مایکروویو در تصفیه فاضلاب صنعتی ذکر شده است. پلازاس^۳ -توتل^۳ و همکاران (۲۰۱۸ میلادی) بیان نمودند که امواج مایکروویو، در

¹ Rizzo

² Cristóvão

³ Plazas-Tuttle

میکروارگانیزم‌ها، با ایجاد آنزیم باعث تغییر شکل پروتئین غشا و اختلال در فعالیت متابولیک سلولی می‌شوند (۱۰۰). در مطالعه وو^۱ (۲۰۰۸ میلادی) بیان شد که امواج مایکروویو در تصفیه لجن، باعث بهبود آبگیری، قابلیت هضم و تخریب پاتوژن در لجن می‌شود (۱۰۱). همچنین در مطالعه پینو-جلیسک^۲ و همکاران (۲۰۰۶ میلادی) لجن مایکروویو شده، تولید بیوگاز و حلالیت بیشتری در مقایسه با لجن حرارت

^۱ Wu

^۲ Pino-Jelcic

داده شده معمولی نشان داد. همچنین افزایش تجزیه پذیری بی‌هوازی و غیرفعال سازی کلیفرم‌های مدفوعی و گونه‌های سالمونلا از موارد تاثیر لجن حرارت دیده با مایکروویو بود (۱۰۲). بنابراین، تابش مایکروویو یک راه حل جهانی برای تصفیه فاضلاب نیست، بلکه یک گزینه امیدوارکننده است که می‌تواند با روش‌های دیگر ترکیب شود تا به نتایج مطلوب دست یابد. براساس جدول ۲، مشاهده می‌شود که تحت تأثیر اشعه مایکروویو تغییراتی در خواص فیزیکی و شیمیایی فاضلاب رخ می‌دهد.

جدول ۲. تغییرات خواص فیزیکی و شیمیایی فاضلاب تحت تأثیر اشعه مایکروویو (۱۰۳-۱۰۷)

تغییرات	توان اشعه (وات)	زمان تابش اشعه (ثانیه)	خصوصیات
تحریک و تحرک مولکول‌های آب	۳۰۰	۶۰۰	ساختار
کاهش ویسکوزیته و افزایش فعالیت مولکول‌های آب	۶۰۰-۳۰	۱۰-۱۲۰	کشش سطحی
استخراج دی اکسید کربن	۳۰۰	۴۸۰-۳۰۰	pH
افزایش فعالیت مولکول‌های آب	۳۰۰	۶۰۰	رسانایی الکتریکی
تجزیه مواد	۸۰۰	۶۰۰-۳۰۰	تغییر در شاخص‌های کیفی فاضلاب

مزایا و معایب روش‌های تصفیه فاضلاب صنعتی با پرتوتابی

همانگونه که بیان شد روش پرتوتابی یکی از روش‌های رایج گندزدایی پساب و همچنین لجن فاضلاب می‌باشد. پرتوهای یون‌ساز از طریق تشکیل رادیکال‌های آزاد و پرتوهای غیر یون‌ساز از طریق آسیب به DNA میکروارگانیزم‌ها در گندزدایی استفاده می‌شوند (۹۱). از سویی دیگر، پرتوتابی نیاز به

سرمایه گذاری اولیه و هزینه نگهداری بالایی برای تجهیزات تشعشع و منبع تغذیه دارد (۱۰۸) و همچنین می‌تواند تحت تأثیر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی فاضلاب مانند کدورت، pH و اکسیژن محلول قرار گیرد (۱۰۹). مزایا و معایب انواع روش‌های پرتوتابی در تصفیه فاضلاب در جدول ۳ آمده است.

جدول ۳. مزایا و معایب انواع روش‌های تصفیه فاضلاب صنعتی با پرتوتابی

فرایندها	مزایا	معایب	هزینه اولیه	هزینه عملیاتی	هزینه انرژی	مراجع
پرتو گاما	- مؤثر در از بین بردن طیف گسترده‌ای از آلاینده‌ها، از جمله باکتری‌ها، ویروس‌ها، انگل‌ها، مواد آلی و معدنی	- نیاز به استفاده از منابع رادیواکتیو				
	- ایمن برای محیط زیست	- نیاز به تجهیزات تخصصی				
	- کم هزینه در بلندمدت	- نیاز به آموزش کارکنان				(۲۴، ۲۳)
	- کارآمد در مصرف انرژی	- خطرات احتمالی برای سلامتی				۶۹، ۱۱۰
	- قابل اجرا در مقیاس‌های مختلف	- در صورت عدم استفاده صحیح				(۱۱۳)
	- تولید مقادیر زیاد رادیکال‌های آزاد در واحد زمان	- هزینه بالا	بالا	متوسط	متوسط	

فرایندها	مزایا	معایب	هزینه اولیه	هزینه عملیاتی	هزینه انرژی	مراجع
EB	-عدم نیاز به مواد شیمیایی -امکان ترکیب با بعضی از اکسیدان‌ها (H_2O_2) و پرسولفات) و ایجاد اثر هم‌افزایی -شرایط محیطی بر عملکرد تابش گاما تأثیر نمی‌گذارد -محصول جانبی تولید نمی‌کند -نفوذ عالی	-احتمال تولید فلزات سنگین				
	-تولید مقادیر زیاد رادیکال‌های آزاد در واحد زمان -کاهش دز و هزینه پرتوتابی -امکان تجزیه آلاینده‌های آلی از هر دو روش اکسیداسیون و احیا -عدم وجود هزینه‌های تعویض منبع رادیوایزوتوپی گاما و کاهش فعالیت سالانه آن -نبود منبع رادیواکتیو -کنترل راحت در موارد اضطراری -تعمیر، نگهداری و خاموش و روشن کردن آبی -رنگ زدایی و کاهش کدورت و TOC, BOD, COD -تخریب آفت‌کش‌ها و علف‌کش‌های موجود در پساب کشاورزی	-عدم وجود آگاهی کافی در مورد این روش -نیازمند افراد مجرب و متخصص جهت استفاده از سیستم‌های تابش باریکه الکترونی -وجود محدودیت در تولید دستگاه‌های شتاب دهنده‌ی تجاری				(۱۵, ۳۹) (۵۱, ۹۱) -۱۱۴ (۱۱۷)
پرتو UV	-موثر در از بین بردن طیف گسترده‌ای از آلاینده‌ها -ایمن برای محیط‌زیست -کم هزینه -کاهش مصرف انرژی -قابل اجرا در مقیاس‌های مختلف	-ممکن است تمام آلاینده‌ها را از بین نبرد -ممکن است برای برخی از آلاینده‌ها مانند ترکیبات آلی کلردار موثر نباشد -ممکن است در برابر مواد معلق مانند لجن و چربی موثر نباشد -ممکن است برای برخی از مواد مانند آب آشامیدنی و پساب کشاورزی مناسب نباشد	متوسط	پایین	پایین	(۴۱, ۱۱۸) (۱۲۱)
پرتو مایکروویو	-عملکردهای ترمودینامیکی متفاوتی نسبت به گرمایش معمولی دارد -قابلیت کنترل عالی دارد -سنتز مواد آلی و معدنی -اصلاح خاک آلوده -تخریب ماکرومولکول -فرآیندهای پلیمریزاسیون -استخراج در شیمی تجزیه -پیش تصفیه لجن فاضلاب به منظور تولید بیوگاز بیشتر و تثبیت لجن -قابلیت ترکیب بسیاری از روش‌های تصفیه فاضلاب آلی با تابش مایکروویو (مانند فرایندهای شبه فنتون/فنتون، اکسیداسیون هوای مرطوب کاتالیزوری، اکسیداسیون فوتوکاتالیستی، فرآیندهای الکتروشیمیایی و فناوری سونولیز)	- هزینه‌های بالا نصب و نگهداری - مقاومت بالای برخی میکروارگانیسم‌ها در برابر امواج مایکروویو - ایجاد اثرات زیست‌محیطی (آسیب به سلامتی حیوانات و گیاهان)	بالا	متوسط	بالا	(۹۴, ۱۲۲) (۱۲۳)

ملاحظات زیست‌محیطی تصفیه فاضلاب صنعتی با

پرتوتابی

همانند هر فناوری دیگری، استفاده از پرتوتابی در تصفیه فاضلاب نیز با چالش‌ها و ملاحظات زیست‌محیطی همراه است. پرتوتابی به طور موثر می‌تواند آلاینده‌های آلی، میکروارگانیسم‌ها و فلزات سنگین را از فاضلاب حذف کرده و از آلودگی منابع آبی و خاک جلوگیری کند (۱۲۴). از سوی دیگر، در بسیاری از روش‌های پرتوتابی، تولید لجن بسیار کم یا حتی صفر است که این امر به کاهش مشکلات دفع لجن کمک می‌کند (۱۲۵). همچنین در مقایسه با روش‌های شیمیایی، پرتوتابی به مصرف مواد شیمیایی کمتری نیاز دارد و در نتیجه، بار آلودگی ثانویه کمتری ایجاد می‌کند (۱۲۶). در برخی موارد، پرتوتابی می‌تواند منجر به تولید محصولات جانبی شود که ممکن است سمی یا خطرناک باشند. بنابراین، لازم است محصولات جانبی تولید شده به دقت مورد ارزیابی قرار گیرند (۱۲۷). از سوی دیگر، می‌توان با بهینه‌سازی پارامترهای فرآیندی مانند دوز پرتو، زمان تابش و نوع پرتو، می‌توان از تولید محصولات جانبی مضر جلوگیری کرد (۱۲۸). همچنین پرتوهای یونیزان مانند گاما و الکترون می‌توانند اثرات نامطلوبی بر محیط‌زیست داشته باشند. بطوری که، این پرتوها می‌توانند باعث ایجاد جهش در موجودات زنده و آسیب به اکوسیستم شوند (۱۲۹). ترکیب پرتوتابی با سایر روش‌های تصفیه مانند فرایندهای بیولوژیکی یا شیمیایی می‌تواند به افزایش کارایی و کاهش اثرات زیست‌محیطی کمک کند (۱۳۰). همچنین، انجام ارزیابی چرخه حیات (LCA) برای مقایسه اثرات زیست‌محیطی روش‌های مختلف تصفیه فاضلاب می‌تواند به انتخاب بهترین گزینه کمک کند (۱۳۱). استفاده از کمترین دوز پرتو برای رسیدن به هدف تصفیه، می‌تواند از تولید مواد رادیواکتیو اضافی جلوگیری کند (۳۵). استفاده از پرتوهای الکترونی به

دلیل کنترل‌پذیری بیشتر و تولید رادیواکتیوینه کمتر، نسبت به پرتوهای گاما، ارجحیت دارد (۱۳۲). همچنین، طراحی سیستم‌های پرتودهی به گونه‌ای که حداکثر بهره‌وری از پرتوها را داشته باشند و از پراکندگی آن‌ها جلوگیری کنند، می‌تواند به کاهش اثرات زیست‌محیطی کمک کند (۱۳۳). از سوی دیگر، تدوین استانداردهای بین‌المللی برای ایمنی در استفاده از پرتوهای یونیزان، می‌تواند به بهبود ایمنی و کاهش اثرات زیست‌محیطی این فناوری کمک کند (۱۳۴).

ارزیابی اقتصادی تصفیه فاضلاب صنعتی با پرتوتابی

مقرون به صرفه بودن تصفیه فاضلاب صنعتی با پرتوتابی به عوامل مختلفی از جمله نوع و میزان آلاینده‌ها، فناوری و تجهیزات تشعشع و هدف از تصفیه پساب، بستگی دارد (۱۵). برای ارزیابی اقتصادی تصفیه فاضلاب صنعتی با پرتوتابی، ابتدا هزینه‌های سرمایه‌گذاری برای تهیه و نصب تجهیزات و سپس هزینه‌های عملیاتی برای بهره‌برداری و نگهداری از تجهیزات مربوطه بررسی می‌شود. این هزینه‌ها شامل خرید تجهیزات، نصب و راه‌اندازی آن‌ها، هزینه‌های مربوط به تغییرات ساختاری و اصلاحات ممکن، مصرف انرژی الکتریکی، هزینه‌های مربوط به نگهداری و تعمیرات دوره‌ای تجهیزات و مواد مصرفی در سیستم فاضلاب می‌شود (۱۳۵). از سوی دیگر گزارشاتی مبنی بر اینکه از پرتوهای یونساز، کاربرد گاما در مقیاس صنعتی مقرون به صرفه نیست، ارائه شده است، اما متأسفانه تصور غلط رایج در مورد فرآیند EB این بوده که الکترون‌های با انرژی بالا به معنای هزینه بالای انرژی می‌باشد، در حالی نتایج تحقیقات در مقیاس پایلوت و صنعتی خلاف این موضوع را ثابت می‌نماید (۱۳۶). هان^۱ و همکاران (۲۰۱۲ میلادی) گزارش کردند که نصب شتاب‌دهنده EB در مجتمع صنعتی رنگرزی از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه بوده است، به طوریکه هزینه کلی ساخت شتاب‌دهنده ۴

¹ Han

طور کلی، با توجه به مزایای اقتصادی تصفیه فاضلاب صنعتی با پرتوتابی از قبیل کاهش تولید لجن، افزایش کارایی تصفیه، کاهش مصرف مواد شیمیایی، برای ارزیابی دقیق اقتصادی تصفیه با پرتوتابی در صنعت، انجام یک مطالعه جامع اقتصادی ضروری است که در آن تمام هزینه‌ها و درآمدهای مرتبط با این روش به دقت بررسی شوند (۱۴۱).

جدول ۴. مقادیر دامنه EE/O مورد نیاز برای تجزیه آلاینده‌های آلی (۱۴۰، ۱۴۲-۱۴۴)

نوع آلاینده	EE/O
بنزن	۰/۵-۳
تولوئن	۰/۴-۳
زایلین	۱-۳
فنول	۰/۴-۷
متیلن بلو	۰/۲-۲
تری کلرواتیلن	۰/۵-۲
تتراکلرو اتیلن	۲-۶
کلروفرم	۲-۱۲
تتراکلرید کربن	۰/۵-۵
تتراکلرید کربن	۰/۵-۲

نتیجه‌گیری

مطالعه حاضر نشان می‌دهد که فناوری پرتوتابی با استفاده از پرتوهای EB، UV، گاما و غیره پتانسیل قابل‌توجهی در تصفیه فاضلاب‌های صنعتی و لجن حاصل از آن‌ها دارد. این فناوری می‌تواند با حذف موثر آلاینده‌ها و گندزدایی، به بهبود کیفیت آب و کاهش آلودگی محیط‌زیست کمک شایانی کند. مزیت اصلی این روش، امکان دستیابی به سطوح بالای تصفیه در یک مرحله و بدون نیاز به مواد شیمیایی افزودنی است. با این حال، هزینه بالای سرمایه‌گذاری اولیه و نگهداری از تجهیزات پرتوتابی، از جمله چالش‌های اصلی این فناوری محسوب می‌شود. بنابراین، ترکیب پرتوتابی با فرآیندهای تصفیه بیولوژیکی یا اکسیداسیون پیشرفته، می‌تواند به بهینه‌سازی فرآیند و کاهش هزینه‌ها منجر شود.

میلیون دلار، هزینه عملیات با در نظر گرفتن استهلاک تقریباً یک میلیون دلار بوده که حدود ۳/۰ دلار برای تصفیه هر مترمکعب فاضلاب برآورد شد (۱۳۷). همچنین لی^۱ و همکاران (۲۰۱۵ میلادی) بررسی نمودند که پرتوهای گاما، ازن و UV از لحاظ مصرف انرژی الکتریکی در گندزدایی پساب ثانویه و امکان‌سنجی کاربرد، چه تفاوتی دارند. آنها به این نتیجه رسیدند که استفاده از پرتو گاما در گندزدایی پساب به نسبت استفاده از ازن و UV مقرون به صرفه‌تر است (۱۳۸). از سوی دیگر، در مطالعه‌ای گزارش شده است که مقایسه هزینه‌های انرژی فناوری‌های مختلف یا تصفیه‌های مختلف پرتو EB بهتر است از طریق کیلووات ساعت الکتریسیته مورد نیاز برای کاهش غلظت یک آلاینده به اندازه یک مرتبه بزرگی (کاهش ۹۰ درصد) در یک واحد حجم آب (۱۰۰۰ گالن آب) انجام شود که به اختصار EEO^۲ نامیده می‌شود. به عنوان مثال اگر ۳۰ کیلووات ساعت انرژی الکتریکی برای کاهش غلظت آلاینده از ۱۰۰ تا ۱۰ میلی‌گرم بر لیتر در ۱۰۰۰ گالن فاضلاب صنعتی مورد نیاز باشد، در آن صورت EE/O برابر $30 \text{ kWh}/1000 \text{ gal/order}$ می‌باشد (۱۳۹). EE/O معمولاً از طریق مطالعات امکان‌سنجی تعیین شده و به عواملی مانند نوع آلاینده مورد تصفیه، غلظت اولیه آلاینده و ترکیبات فاضلاب بستگی دارد. همچنین با محاسبه EE/O می‌توان دز پرتو EB (کیلووات) مورد نیاز برای حذف هر آلاینده خاص را از طریق معادله (۱) محاسبه کرد (۱۱۲):

$$Dose = (EE/O) \times \left(\log \frac{C_0}{C} \right)$$

با توجه به معادله، C_0 و C به ترتیب غلظت اولیه و نهایی آلاینده می‌باشد. از سوی دیگر، مقادیر EE/O برای آلاینده‌های متداول رایج از ۰/۵ تا ۱۲ می‌باشد که جدول ۴ مقادیر دامنه EE/O مورد نیاز برای تجزیه آلاینده‌های آلی را نشان می‌دهد (۱۴۰). به

^۱ Lee

^۲ Electrical Energy per Order (EEO)

یافته‌های این پژوهش مروری حاکی از ضرورت انجام مطالعات بیشتر در زمینه‌های زیر است:

- بهینه‌سازی پارامترهای پرتوتابی: تعیین دوز بهینه پرتو، زمان تابش و سایر پارامترهای موثر بر کارایی فرآیند، برای دستیابی به حداکثر حذف آلاینده‌ها.

- ارزیابی سمیت پساب و لجن تصفیه شده: بررسی اثرات سمیت محصولات جانبی حاصل از پرتوتابی بر محیط زیست و ارزیابی پتانسیل استفاده مجدد از پساب و لجن تصفیه شده.

به طور کلی، فناوری پرتوتابی می‌تواند به عنوان یک ابزار مکمل در کنار روش‌های سنتی تصفیه فاضلاب، به بهبود کیفیت آب و کاهش آلودگی محیط زیست کمک کند. با انجام مطالعات بیشتر و رفع چالش‌های موجود،

می‌توان از این فناوری به صورت گسترده‌تر در صنایع مختلف استفاده کرد.

تشکر و قدردانی

این مقاله حاصل طرح تحقیقاتی با عنوان «مروری بر روش‌های تصفیه فاضلاب‌های صنعتی با پرتوتابی و آینده آن»، مصوب کمیته تحقیقات دانشجویی دانشگاه علوم پزشکی و خدمات بهداشتی درمانی مازندران در سال ۱۴۰۲ با کد طرح ۱۸۹۹۸ و همچنین کد اخلاق IR.MAZUMS.REC.1402.679 می‌باشد. نویسندگان مقاله مراتب سپاس خود را از کمیته تحقیقات دانشجویی معاونت تحقیقات و فناوری دانشگاه علوم پزشکی مازندران جهت حمایت از این طرح اعلام می‌دارند.

References

- 1- An M, Fan L, Huang J, Yang W, Wu H, Wang X, et al. The gap of water supply—Demand and its driving factors: From water footprint view in Huaihe River Basin. *Plos one*. 2021;16(3):e0247604.
- 2- Saravanan A, Kumar PS, Jeevanantham S, Karishma S, Tajsabreen B, Yaashikaa P, et al. Effective water/wastewater treatment methodologies for toxic pollutants removal: Processes and applications towards sustainable development. *Chemosphere*. 2021;280:130595.
- 3- Ahmed J, Thakur A, Goyal A. Industrial Wastewater and Its Toxic Effects. In: Shah MP, editor. *Biological Treatment of Industrial Wastewater: The Royal Society of Chemistry*; 2021. p. 1-14.
- 4- Patwardhan AD. *Industrial wastewater treatment*. PHI Learning Pvt. Ltd.; 2017.
- 5- Gunatilake SK. Methods of removing heavy metals from industrial wastewater. *Methods*. 2015;1(1):14.
- 6- Wang S HJ, He S, Wang J. Removal of ammonia and phenol from saline chemical wastewater by ionizing radiation: Performance, mechanism and toxicity. *Journal of Hazardous Materials*. 2022;5(433):128727.
- 7- Stephenson RL BJ. *The industrial wastewater systems handbook*. CRC Press; 2018 May 4.
- 8- Garg S, Chowdhury ZZ, Faisal AN, Rumjit NP, Thomas P. Impact of industrial wastewater on environment and human health. *Advanced Industrial Wastewater Treatment and Reclamation of Water: Comparative Study of Water Pollution Index during Pre-industrial, Industrial Period and Prospect of Wastewater Treatment for Water Resource Conservation*. . 2022:197-209.
- 9- Barakat M. New trends in removing heavy metals from industrial wastewater. *Arabian journal of chemistry*. 2011;4(4):361-77.
- 10- Deng Y, Zhao R. Advanced oxidation processes (AOPs) in wastewater treatment. *Current Pollution Reports*. 2015;1:167-76.
- 11- Miklos DB, Remy C, Jekel M, Linden KG, Drewes JE, Hübner U. Evaluation of advanced oxidation processes for water and wastewater treatment—A critical review. *Water research*. 2018;139:118-31.
- 12- Babu DS, Srivastava V, Nidheesh P, Kumar MS. Detoxification of water and wastewater by advanced oxidation processes. *Science of the Total Environment*. 2019;696:133961.
- 13- Liu N, Lei Z-D, Wang T, Wang J-J, Zhang X-D, Xu G, et al. Radiolysis of carbamazepine aqueous solution using electron beam irradiation combining with hydrogen peroxide: Efficiency and mechanism. *Chemical Engineering Journal*. 2016;295:484-93.

- 14- Meng M, Pellizzari F, Boukari SO, Leitner NKV, Teychene B. Impact of e-beam irradiation of municipal secondary effluent on MF and RO membranes performances. *Journal of membrane science*. 2014;471:1-8.
- 15- Jan S, Kamili AN, Parween T, Hamid R, Parray JA, Siddiqi T, et al. Feasibility of radiation technology for wastewater treatment. *Desalination and Water Treatment*. 2015;55(8):2053-68.
- 16- Kreeedy KMT, Qassem SQ, Hani FH, Sawadi HK. Ionizing Rays its Sources and Medical Applications. *Innovative: International Multidisciplinary Journal of Applied Technology* (2995-486X). 2024;2(6):56-64.
- 17- Parke WC, Parke WC. Ionizing radiation and life. *Biophysics: A Student's Guide to the Physics of the Life Sciences and Medicine*. 2020:279-324.
- 18- Babuponnusami A, Sinha S, Ashokan H, Paul MV, Hariharan SP, Arun J, et al. Advanced oxidation process (AOP) combined biological process for wastewater treatment: A review on advancements, feasibility and practicability of combined techniques. *Environmental research*. 2023:116944.
- 19- Wojnárovits L, Takács E, Szabó L. Gamma-ray and electron beam-based AOPs. *Advanced oxidation processes for water treatment: fundamentals and applications: IWA publishing*; 2017.
- 20- Shahi S, Khorvash R, Goli M, Ranjbaran SM, Najarian A, Mohammadi Nafchi A. Review of proposed different irradiation methods to inactivate food-processing viruses and microorganisms. *Food science & nutrition*. 2021;9(10):5883-96 [In Persian].
- 21- Palani G, Arputhalatha A, Kannan K, Lakkaboyana SK, Hanafiah MM, Kumar V, et al. Current trends in the application of nanomaterials for the removal of pollutants from industrial wastewater treatment—a review. *Molecules*. 2021;26(9):2799.
- 22- Iqbal M, Abbas M, Arshad M, Hussain T, Ullah Khan A, Masood N, et al. Short Communication Gamma Radiation Treatment for Reducing Cytotoxicity and Mutagenicity in Industrial Wastewater. *Polish Journal of Environmental Studies*. 2015;24(6).
- 23- Madah AH KM, Khorami Pour S. Comparison of gamma ray and ultraviolet radiation on regrowth control of microorganism in urban sewage effluent. *Journal of Environmental Science and Technology*. 2020;22(7):287-300 [In Persian].
- 24- Chu L, Wang J, He S, Chen C, Wojnárovits L, Takács E. Treatment of pharmaceutical wastewater by ionizing radiation: Removal of antibiotics, antimicrobial resistance genes and antimicrobial activity. *Journal of Hazardous Materials*. 2021;415:125724.
- 25- Kim T-H, Nam Y-K, Joo Lim S. Effects of ionizing radiation on struvite crystallization of livestock wastewater. *Radiation Physics and Chemistry*. 2014;97:332-6.
- 26- Wang S, Wang J. Oxidative removal of carbamazepine by peroxymonosulfate (PMS) combined to ionizing radiation: Degradation, mineralization and biological toxicity. *Science of The Total Environment*. 2019;658:1367-74.
- 27- He H, Wang S, Wang J. Degradation of 3-methylindole by ionizing radiation: Performance and pathway. *Separation and Purification Technology*. 2021;278:119515.
- 28- He H, Wang S, Wang J. The performance and pathway of indole degradation by ionizing radiation. *Chemosphere*. 2022;287:131983.
- 29- Wang J, Wang J. Application of radiation technology to sewage sludge processing: a review. *Journal of Hazardous Materials*. 2007;143(1-2):2-7.
- 30- Lv X, Song Z, Yu J, Su Y, Zhao X, Sun J, et al. Study on the demulsification of refinery oily sludge enhanced by microwave irradiation. *Fuel*. 2020;279:118417.
- 31- Carolin CF, Kumar PS, Saravanan A, Joshiba GJ, Naushad M. Efficient techniques for the removal of toxic heavy metals from aquatic environment: A review. *Journal of environmental chemical engineering*. 2017;5(3):2782-99.
- 32- Carmen Z, Daniela S. Textile organic dyes-characteristics, polluting effects and separation/elimination procedures from industrial effluents-a critical overview: *IntechOpen Rijeka*; 2012.
- 33- Hina H, Nafees M, Ahmad T. Treatment of industrial wastewater with gamma irradiation for removal of organic load in terms of biological and chemical oxygen demand. *Heliyon*. 2021;7(2).

- 34- Hasanbeigi A, Price L. A technical review of emerging technologies for energy and water efficiency and pollution reduction in the textile industry. *Journal of Cleaner Production*. 2015;95:30-44 [In Persian].
- 35- Ma H, Shen M, Tong Y, Wang X. Radioactive Wastewater Treatment Technologies: A Review. *Molecules*. 2023;28(4):1935.
- 36- Vialkova E, Obukhova M, Belova L. Microwave irradiation in technologies of wastewater and wastewater sludge treatment: A review. *Water*. 2021;13(13):1784.
- 37- Liu X, Wang J. Decolorization and degradation of various dyes and dye-containing wastewater treatment by electron beam radiation technology: an overview. *Chemosphere*. 2024:141255.
- 38- Gangnaik AS, Georgiev YM, Holmes JD. New generation electron beam resists: a review. *Chemistry of Materials*. 2017;29(5):1898-917.
- 39- Hossain K, Maruthi YA, Das NL, Rawat K, Sarma K. Irradiation of wastewater with electron beam is a key to sustainable smart/green cities: a review. *Applied water science*. 2018;8:1-11.
- 40- Rajendran S, Priya T, Khoo KS, Hoang TK, Ng H-S, Munawaroh HSH, et al. A critical review on various remediation approaches for heavy metal contaminants removal from contaminated soils. *Chemosphere*. 2022;287:132369.
- 41- Tolabi A DZ, Ghaneian MT. Application of Coagulation and Flocculation Coupled with Photo Catalytic Degradation (TiO₂/UV-A) for 2-(Methoxy Carbonyl Amino-methyl)-acrylic acid methyl ester dye Removal from Synthetic wastewater. *Tolooebehdasht*. 2017;16(3):34-45 [In Persian].
- 42- Jiang L IH. Current research on high-energy ionizing radiation for wastewater treatment and material synthesis. *Environmental Progress & Sustainable Energy*. 2020;39(1):13294.
- 43- Changotra R RH, Guin JP, Khader SA, Dhir A. Techno-economical evaluation of coupling ionizing radiation and biological treatment process for the remediation of real pharmaceutical wastewater. *Journal of Cleaner Production*. 2020;1(242):118544.
- 44- Madureira J, Barros L, Melo R, Verde SC, Ferreira IC, Margaça F. Degradation of phenolic acids by gamma radiation as model compounds of cork wastewaters. *Chemical Engineering Journal*. 2018;341:227-37.
- 45- Attri P, Tochikubo F, Park JH, Choi EH, Koga K, Shiratani M. Impact of Gamma rays and DBD plasma treatments on wastewater treatment. *Scientific reports*. 2018;8(1):2926.
- 46- Younis SA, Ghobashy MM, Samy M. Development of aminated poly (glycidyl methacrylate) nanosorbent by green gamma radiation for phenol and malathion contaminated wastewater treatment. *Journal of environmental chemical engineering*. 2017;5(3):2325-36.
- 47- He S, Sun W, Wang J, Chen L, Zhang Y, Yu J. Enhancement of biodegradability of real textile and dyeing wastewater by electron beam irradiation. *Radiation Physics and Chemistry*. 2016;124:203-7.
- 48- Verde SC, Silva T, Matos P. Effects of gamma radiation on wastewater microbiota. *Radiation and environmental biophysics*. 2016;55:125-31.
- 49- Bhuiyan MR, Rahman MM, Shaid A, Bashar M, Khan MA. Scope of reusing and recycling the textile wastewater after treatment with gamma radiation. *Journal of Cleaner Production*. 2016;112:3063-71.
- 50- Bhuiyan MR, Shaid A, Hossain M, Khan MA. Decolorization and decontamination of textile wastewater by gamma irradiation in presence of H₂O₂. *Desalination and Water Treatment*. 2016;57(45):21545-51.
- 51- Emami-Meibodi M, Parsaeian M, Amraei R, Banaei M, Anvari F, Tahami S, et al. An experimental investigation of wastewater treatment using electron beam irradiation. *Radiation Physics and Chemistry*. 2016;125:82-7 [In Persian].
- 52- Iqbal M, Nisar J. Cytotoxicity and mutagenicity evaluation of gamma radiation and hydrogen peroxide treated textile effluents using bioassays. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2015;3(3):1912-7.
- 53- Hassan MS. Removal of reactive dyes from textile wastewater by immobilized chitosan upon grafted Jute fibers with acrylic acid by gamma irradiation. *Radiation Physics and Chemistry*. 2015;115:55-61.

- 54- Abdou L, Hakeim O, Mahmoud M, El-Naggar A. Comparative study between the efficiency of electron beam and gamma irradiation for treatment of dye solutions. *Chemical Engineering Journal*. 2011;168(2):752-8.
- 55- Park E, Jo H, Kim H, Cho K, Jung J. Effects of gamma-ray treatment on wastewater toxicity from a rubber products factory. *Journal of radioanalytical and nuclear chemistry*. 2008;277(3):619-24.
- 56- Trojanowicz M, Bobrowski K, Szreder T, Bojanowska-Czajka A. Gamma-ray, X-ray and electron beam based processes. *Advanced oxidation processes for waste water treatment*: Elsevier; 2018. p. 257-331.
- 57- Chmielewski AG. Future developments in radiation processing. *Applications of Ionizing Radiation in Materials Processing 1st ed* Institute of Nuclear Chemistry and Technology. 2017:501-16.
- 58- Eskander S, El-Dien FN, Hoballa E, Hamdy K. Capability of Lemna gibba to biosorb cesium-137 and cobalt-60 from simulated hazardous radioactive waste solutions. *Journal of microbiology, biotechnology and food sciences*. 2011;1(2):148-63.
- 59- El-Toony MM, Rajab AH, Eid GA, Maziad NM. Groundwater Purification Using Gamma Irradiation under Oxidation and Reduction Conditions. 2022.
- 60- Musaad R. Disinfection of sewage water and sludge using gamma radiation. 2008.
- 61- Pricaz M, Uță A-C. Gamma radiation for improvements in food industry, environmental quality and healthcare. *Rom J Biophys*. 2015;25(2):143-62.
- 62- Trojanowicz M. Removal of persistent organic pollutants (POPs) from waters and wastewaters by the use of ionizing radiation. *Science of The Total Environment*. 2020;718:134425.
- 63- Flores-Rojas G, López-Saucedo F, Bucio E. Gamma-irradiation applied in the synthesis of metallic and organic nanoparticles: A short review. *Radiation Physics and Chemistry*. 2020;169:107962.
- 64- Aguilera Y, Consuegra R, Rapado M. Treatment of coffee wastewater by gamma radiation. 1997.
- 65- Melo R, Verde SC, Branco J, Botelho ML. Gamma radiation induced effects on slaughterhouse wastewater treatment. *Radiation Physics and Chemistry*. 2008;77(1):98-100.
- 66- Wang R, Chen B, Chen D, Zhao X. Effects of Gamma Irradiation on Organic Membrane Materials. *Nuclear Technology*. 2020;206(12):1909-18.
- 67- Silindir M, Özer AY. Sterilization methods and the comparison of E-beam sterilization with gamma radiation sterilization. *Fabad Journal of Pharmaceutical Sciences*. 2009;34(1):43.
- 68- Changotra R, Rajput H, Guin JP, Varshney L, Dhir A. Hybrid coagulation, gamma irradiation and biological treatment of real pharmaceutical wastewater. *Chemical Engineering Journal*. 2019;370:595-605.
- 69- Marek T. Removal of persistent organic pollutants (POPs) from waters and wastewaters by the use of ionizing radiation. *Science of The Total Environment*. 2020;20(718):134425.
- 70- Changotra R RH, Guin JP, Khader SA, Dhir A. Techno-economical evaluation of coupling ionizing radiation and biological treatment process for the remediation of real pharmaceutical wastewater. *Journal of Cleaner Production*. 2020;242:118544.
- 71- Changotra RR, H.; Guin, J.P.; Varshney, L.; Dhir, A. Hybrid coagulation, gamma irradiation and biological treatment of real pharmaceutical wastewater. *Chem Eng J*. 2019;370:595–605.
- 72- Hegazy E A-RH, Shehata EM, Adel G, Elbakry S, Eldeghiedy N. Radiation treatment of wastewater for reuse with particular focus on wastewaters containing organic pollutants and removal of heavy metals from wastewater. *Iaea Tecdoc Series*. 682018.
- 73- Jianlong WA LC. Research progress of ionizing irradiation technology on wastewater treatment. *Chinese Journal of Environmental Engineering*. 2017;11(2):653-72.
- 74- Deshpande M, Kumar KS, Rengaraj R, Venkatakrishnan G, Anand H. Electron Beam Accelerators: Wastewater to Useable Water. *Advanced Oxidation Processes for Wastewater Treatment*: CRC Press; 2022. p. 93-100.
- 75- Gryczka U, Zimek Z, Walo M, Chmielewska-Śmietanko D, Bułka S. Advanced Electron Beam (EB) Wastewater Treatment System with Low Background X-ray Intensity Generation. *Applied Sciences*. 2021;11(23):11194.
- 76- No SS. Radiation Safety of Gamma and Electron Irradiation Facilities.

- 77- Tseng AA, Chen K, Chen CD, Ma KJ. Electron beam lithography in nanoscale fabrication: recent development. *IEEE Transactions on electronics packaging manufacturing*. 2003;26(2):141-9.
- 78- Kim Y, Ershov B, Ponomarev A. Features and ways to upgrade electron-beam wastewater treatment. *High Energy Chemistry*. 2020;54:462-8.
- 79- Truc LVT, Can LD, Luu TL. Electron Beam as an Effective Wastewater Treatment Technology in Lab-Scale Application. *Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste*. 2021;25(2):03120003.
- 80- Wang S, Wang J, Chen C, He S, Hu J, Zhang Y. First full-scale application of electron beam technology for treating dyeing wastewater (30,000 m³/d) in China. *Radiation Physics and Chemistry*. 2022;196:110136.
- 81- Wang J, Wang S, Chen C, Hu J, He S, Zhou Y, et al. Treatment of hospital wastewater by electron beam technology: Removal of COD, pathogenic bacteria and viruses. *Chemosphere*. 2022;308:136265.
- 82- Kumar P, Meena M, Kavar AB, Nama P, Pathak A, Varma R, et al. Experimental study to optimise the treatment efficacy of pharmaceutical effluents by combining electron beam irradiation with conventional techniques. *arXiv preprint arXiv:210902479*. 2021.
- 83- Djouider F, Aljohani MS, editors. Simulated industrial wastewater treatment using continuous high-energy electron beam irradiation: Removal of chromium (VI) toxic metal. *AIP Conference Proceedings*; 2018: AIP Publishing.
- 84- Turtoi M. Ultraviolet light potential for wastewater disinfection. *Ann Food Sci Technol*. 2013;14(1):153-64.
- 85- Zyara AM. Removal of viruses from drinking water by chlorine and UV disinfections: Itä-Suomen yliopisto; 2018.
- 86- Parrish JA, Anderson RR, Urbach F, Pitts D, Parrish JA, Anderson RR, et al. The spectrum of electromagnetic radiation: UV-A in perspective. *UV-A: Biological Effects of Ultraviolet Radiation with Emphasis on Human Responses to Longwave Ultraviolet*. 1978:1-6.
- 87- Collivignarelli MC, Abbà A, Benigna I, Sorlini S, Torretta V. Overview of the main disinfection processes for wastewater and drinking water treatment plants. *Sustainability*. 2017;10(1):86.
- 88- Hijnen W, Beerendonk E, Medema GJ. Inactivation credit of UV radiation for viruses, bacteria and protozoan (oo) cysts in water: a review. *Water research*. 2006;40(1):3-22.
- 89- Cristóvão RO, Botelho CM, Martins RJ, Loureiro JM, Boaventura RA. Fish canning industry wastewater treatment for water reuse—a case study. *Journal of Cleaner Production*. 2015;87:603-12.
- 90- Mkabela M. The development of a measuring technique for the UV-C distribution emitted from low pressure mercury lamps: University of Pretoria; 2019.
- 91- Asgari B. Review on some applications of ionizing radiation in water, sewage effluent and sludge refinement on an industrial scale. *Journal of Radiation and Nuclear Technology*. 2017;4(2):39-51 [In Persian].
- 92- Rizzo L, Fiorentino A, Anselmo A. Advanced treatment of urban wastewater by UV radiation: Effect on antibiotics and antibiotic-resistant *E. coli* strains. *Chemosphere*. 2013;92(2):171-6.
- 93- Rosenthal I, Rosenthal I. Microwave radiation. *Electromagnetic Radiations in Food Science*. 1992:115-54.
- 94- Mudhoo A, Sharma SK. Microwave irradiation technology in waste sludge and wastewater treatment research. *Critical reviews in environmental science and technology*. 2011;41(11):999-1066.
- 95- Xia H, Li C, Yang G, Shi Z, Jin C, He W, et al. A review of microwave-assisted advanced oxidation processes for wastewater treatment. *Chemosphere*. 2022;287:131981.
- 96- Liu L, Wang N, Laghari AA, Li H, Wang C, Zhao Z, et al. A review and perspective of environmental disinfection technology based on microwave irradiation. *Current pollution reports*. 2023;9(1):46-59.
- 97- Heddleson RA, Doores S. Factors affecting microwave heating of foods and microwave induced destruction of foodborne pathogens—a review. *Journal of Food Protection*. 1994;57(11):1025-37.
- 98- Kubo MT, Siguemoto ÉS, Funcia ES, Augusto PE, Curet S, Boillereaux L, et al. Non-thermal effects of microwave and ohmic processing on microbial and enzyme inactivation: a critical review. *Current Opinion in Food Science*. 2020;35:36-48.

- 99- Shaw P, Kumar N, Mumtaz S, Lim JS, Jang JH, Kim D, et al. Evaluation of non-thermal effect of microwave radiation and its mode of action in bacterial cell inactivation. *Scientific Reports*. 2021;11(1):14003.
- 100- Plazas-Tuttle J, Das D, Sabaraya IV, Saleh NB. Harnessing the power of microwaves for inactivating *Pseudomonas aeruginosa* with nanohybrids. *Environmental Science: Nano*. 2018;5(1):72-82.
- 101- Wu T-N. Environmental perspectives of microwave applications as remedial alternatives. *Practice Periodical of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste Management*. 2008;12(2):102-15.
- 102- Pino-Jelicic SA, Hong SM, Park JK. Enhanced anaerobic biodegradability and inactivation of fecal coliforms and *Salmonella* spp. in wastewater sludge by using microwaves. *Water environment research*. 2006;78(2):209-16.
- 103- Parmar H, Asada M, Kanazawa Y, Asakuma Y, Phan CM, Pareek V, et al. Influence of microwaves on the water surface tension. *Langmuir*. 2014;30(33):9875-9.
- 104- Asakuma Y, Kanazawa Y, Parmar H, Pareek V, Phan CM, Evans G. Surface tension profiles under various microwave radiation modes. *Journal of Energy and Power Engineering*. 2014;8(3).
- 105- Asakuma Y, Munenaga T, Nakata R. Observation of bubble formation in water during microwave irradiation by dynamic light scattering. *Heat and Mass transfer*. 2016;52:1833-40.
- 106- Zhang J, Pang Q, He Z, Tian C, Wu T, editors. *Treatment of Blast Furnace Gas Washing Water by Utilization of Coagulation Associated with Microwave. Applications of Process Engineering Principles in Materials Processing, Energy and Environmental Technologies: An EPD Symposium in Honor of Professor Ramana G Reddy*; 2017: Springer.
- 107- Vialkova E, Zemlyanova M, Danilov O, editors. *Energy efficiency in municipal waste treatment. MATEC Web of Conferences*; 2018: EDP Sciences.
- 108- Goitein M, Jermann MJ. The relative costs of proton and X-ray radiation therapy. *Clinical Oncology*. 2003;15(1):S37-S50.
- 109- Al-Ani MY, Al-Khalidy FR. Use of ionizing radiation technology for treating municipal wastewater. *International journal of environmental research and public health*. 2006;3(4):360-8.
- 110- Asgari Lajayer B, Najafi N, Moghiseh E. Review on some applications of ionizing radiation in water, sewage effluent and sludge refinement on an industrial scale. *Journal of Radiation and Nuclear Technology*. 2017;4(2):39-51 [In Persian].
- 111- Wang J, Zhuan R, Chu L. The occurrence, distribution and degradation of antibiotics by ionizing radiation: an overview. *Science of the Total Environment*. 2019;646:1385-97.
- 112- Asgari Lajayer B, Najafi N, Moghiseh E, Mosafieri M, Hadian J. Effects of gamma irradiation on physicochemical and biological characteristics of wastewater effluent and sludge. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 2020;17:1021-34 [In Persian].
- 113- Tahri L, Elgarrouj D, Zantar S, Mouhib M, Azmani A, Sayah F. Wastewater treatment using gamma irradiation: Tétouan pilot station, Morocco. *Radiation Physics and Chemistry*. 2010;79(4):424-8.
- 114- Majid M, Bhatti IA, Bhatti HN. Treatment of dyes industrial effluents by ionizing radiation. *Asian Journal of Chemistry*. 2011;23(6):2392-4.
- 115- Han B, Kim J, Kim Y. Disinfection of effluent from municipal wastewater plant with electron beam. *Radiation treatment of polluted water and wastewater*. 2008:109-14.
- 116- Mousavian SM. New Method of Water and Wastewater Treatment Using Electron Beams. *Human & Environment*. 2018;16(2):1-19 [In Persian].
- 117- Ndong JEU, R.M.; Gregory, R.; Gangoda, M.; Nickelsen, M.G.; Loar, P. Effect of electron beam irradiation on bacterial and *Ascaris* ova loads and volatile organic compounds in municipal sewage sludge. *Radiat Phys, Chem*. 2015;112:6-12.
- 118- Suresh R RB, Chenniappan M, Palanichamy M. Experimental analysis on the synergistic effect of combined use of ozone and UV radiation for the treatment of dairy industry wastewater. *Environmental Engineering Research*. 2021;26(5).
- 119- Iervolino G, Zammit I, Vaiano V, Rizzo L. Limitations and prospects for wastewater treatment by UV and visible-light-active heterogeneous photocatalysis: a critical review. *Heterogeneous Photocatalysis: Recent Advances*. 2020:225-64.

- 120- Segneanu AE, Orbeci C, Lazau C, Sfirloaga P, Vlazan P, Bandas C, et al. Waste water treatment methods. *Water Treat.* 2013;53-80.
- 121- I Litter M, Quici N. Photochemical advanced oxidation processes for water and wastewater treatment. *Recent Patents on Engineering.* 2010;4(3):217-41.
- 122- Martin D, Craciun G, Manaila E, Ighigeanu D, Oproiu C, Iacob N, et al. Waste treatment by microwave and electron beam irradiation. 2007.
- 123- Shaheen YA. Utilization of microwave for Industrial Wastewater Treatment 2018.
- 124- Tyagi VK, Lo S-L. Microwave irradiation: A sustainable way for sludge treatment and resource recovery. *Renewable and Sustainable Energy Reviews.* 2013;18:288-305.
- 125- Li Y, Feng H, Wang J, She X, Wang G, Zuo H, et al. Current status of the technology for utilizing difficult-to-treat dust and sludge produced from the steel industry. *Journal of cleaner production.* 2022;367:132909.
- 126- Bartolomeu M, Neves M, Faustino M, Almeida A. Wastewater chemical contaminants: Remediation by advanced oxidation processes. *Photochemical & Photobiological Sciences.* 2018;17(11):1573-98.
- 127- Yang J, Pan M, Han R, Yang X, Liu X, Yuan S, et al. Food irradiation: An emerging processing technology to improve the quality and safety of foods. *Food Reviews International.* 2024;40(8):2321-43.
- 128- Naikwadi AT, Sharma BK, Bhatt KD, Mahanwar PA. Gamma radiation processed polymeric materials for high performance applications: a review. *Frontiers in Chemistry.* 2022;10:837111.
- 129- Mohan S, Chopra V. Biological effects of radiation. *Radiation dosimetry phosphors: Elsevier;* 2022. p. 485-508.
- 130- Wang J, Chu L. Irradiation treatment of pharmaceutical and personal care products (PPCPs) in water and wastewater: an overview. *Radiation Physics and Chemistry.* 2016;125:56-64.
- 131- Zang Y, Li Y, Wang C, Zhang W, Xiong W. Towards more accurate life cycle assessment of biological wastewater treatment plants: a review. *Journal of Cleaner Production.* 2015;107:676-92.
- 132- Suliman G, Iancu V, Yasin Z. Gamma beam delivery and diagnostics. *Romanian Reports in Physics.* 2016;68:S447-S81.
- 133- Durand M, Murchie EH, Lindfors AV, Urban O, Aphalo PJ, Robson TM. Diffuse solar radiation and canopy photosynthesis in a changing environment. *Agricultural and Forest Meteorology.* 2021;311:108684.
- 134- Guide SS. Radiation protection and safety in medical uses of ionizing radiation. *Specific Safety Guide SSG-46, IAEA, Vienna.* 2018.
- 135- AsgariLajayer B, Najafi N, Moghiseh E. Review on some applications of ionizing radiation in water, sewage effluent and sludge refinement on an industrial scale. *Journal of Radiation and Nuclear Technology.* Summer 2017;4(2):39-51 [In Persian].
- 136- Gulfishan M, Mir RA, Hussain SA, Khan S, Shabir F, Khan E. Gamma ray irradiation technology for textile surface treatment/modification: An overview. *Emerging Technologies for Textile Coloration.* 2022:157-70.
- 137- Han B, Kim JK, Kim Y, Choi JS, Jeong KY. Operation of industrial-scale electron beam wastewater treatment plant. *Radiation Physics and Chemistry.* 2012;81(9):1475-8.
- 138- Lee O-M, Kim HY, Park W, Kim T-H, Yu S. A comparative study of disinfection efficiency and regrowth control of microorganism in secondary wastewater effluent using UV, ozone, and ionizing irradiation process. *Journal of hazardous materials.* 2015;295:201-8.
- 139- Sgroi M, Snyder SA, Roccaro P. Comparison of AOPs at pilot scale: Energy costs for micro-pollutants oxidation, disinfection by-products formation and pathogens inactivation. *Chemosphere.* 2021;273:128527.
- 140- Tarr MA. Chemical degradation methods for wastes and pollutants: environmental and industrial applications. *CRC Press.* 2003.
- 141- Hossain MK, Raihan GA, Akbar MA, Kabir Rubel MH, Ahmed MH, Khan MI, et al. Current applications and future potential of rare earth oxides in sustainable nuclear, radiation, and energy devices: a review. *ACS Applied Electronic Materials.* 2022;4(7):3327-53.

- 142- Ali N, Khan AA, Wakeel M, Khan IA, Din SU, Qaisrani SA, et al. Activation of Peroxymonosulfate by UV-254 nm Radiation for the Degradation of Crystal Violet. *Water*. 2022;14(21):3440.
- 143- Daneshvar N, Aleboyeh A, Khataee AR. The evaluation of electrical energy per order (EEo) for photooxidative decolorization of four textile dye solutions by the kinetic model. *Chemosphere*. 2005;59(6):761-7 [In Persian].
- 144- Behnajady MA, Eskandarloo H, Modirshahla N, Shokri M. Influence of the chemical structure of organic pollutants on photocatalytic activity of TiO₂ nanoparticles: Kinetic analysis and evaluation of electrical energy per order (EEO). *Dig J Nanomater Bios*. 2011;6:1887-95.