نشریه تابش و فناوری هسته ای، دوره ٤، شماره ٢، تابستان ١٣٩٦

مروری بر برخی کاربردهای پرتوهای یونیزان در تصفیه آب، پساب و لجن فاضلاب در مقیاس صنعتی

بهنام عسگری لجایر*[1]، نصرت‌اله نجفی[2]، ابراهیم مقیسه[3]

[1] دانشجوی دکتری گروه علوم و مهندسی خاک دانشگاه تبریز، تبریز، آذربایجان شرقی، ایران
[2] دانشیار گروه علوم و مهندسی خاک دانشگاه تبریز، تبریز، آذربایجان شرقی، ایران
[3] استادیار پژوهشکده کشاورزی هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، تهران، ایران

(تاریخ دریافت مقاله: ١٣٩٦/٠٢/٠٧ - تاریخ پذیرش مقاله: ١٣٩٦/٠٣/٢٠)

چکیده

با صنعتی شدن کشورها و افزایش غلظت آلاینده‌های مختلف در محیط زیست، توسعه فن‌آوری‌های جدید به‌خصوص فن‌آوری هسته‌ای مانند روش پرتودهی یون‌ساز برای حذف آلاینده‌های زیست محیطی مطرح شده است. در توسعه روش‌های جدید باید هر دو شرایط مقدور به صرفه بودن و سازگاری آن با محیط زیست مورد توجه باشد. از پرتوهای یون‌ساز، پرتو گاما و بیم الکترون امکان استفاده برای حذف آلاینده و تصفیه آب، پساب و لجن فاضلاب را دارد. کاربرد پرتو بیم الکترون برای تصفیه و گندزدایی آب یا پساب در مقیاس صنعتی به‌دلایل مزایای آن از قبیل تولید مقادیر زیاد رادیکال‌های آزاد در واحد زمان، کاهش دز و هزینه پرتوتابی، 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 آنی بر پرتو گاما ترجیح داده می‌شود. اکثر تحقیقات آزمایشگاهی پرتوهای یون‌ساز، به‌دلیل سهولت انجام با استفاده از پرتو گاما مخصوصاً چشمه کبالت -٦٠ انجام می‌شود. در دنیا کاربرد پرتوهای یون‌ساز در مقیاس صنعتی در سال‌های اخیر روند رو به رشدی داشته است. با ساخت و بهره‌برداری از تصفیه‌خانه‌ها در ایران، ظرفیت تولید لجن و فاضلاب و ضرورت استفاده ایمن از آنها به عنوان کود یا منابع آب در کشت محصولات کشاورزی افزایش یافته است. از سوی دیگر، با اجرای برنامه جامع اقدام مشترک (برجام) با کشورهای پیشرو، زمینه‌سازی برای انجام تحقیقات و طراحی و ساخت سامانه‌های پرتودهی برای گندزدایی لجن و فاضلاب به صورت صنعتی، امری اجتناب‌ناپذیر می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: آلاینده‌های زیست محیطی، پرتوهای یون‌ساز، سامانه‌های پرتودهی، فن‌آوری هسته‌ای

* آذربایجان شرقی، تبریز، دانشگاه تبریز، گروه علوم و مهندسی خاک
پست الکترونیکی: *h-asgari@tabrizu.ac.ir*

۱. مقدمه

در طی سالیان اخیر با افزایش فعالیت‌های صنعتی، غلظت آلاینده‌های مختلف در محیط زیست روند رو به رشدی داشته است. با آزاد شدن آلاینده‌ها به محیط زیست، پاک کردن آن بسیار مشکل، وقت‌گیر و پرهزینه بوده، لذا دانشمندان تحقیقات زیادی را برای توسعه روش‌های پاکسازی این مکان‌ها انجام داده‌اند. روش‌های شیمیایی حذف آلاینده‌ها به‌دلیل سریع بودن، توانایی پاکسازی سیستم‌های بسیار آلوده و حساسیت کمتر به شرایط محیطی، نسبت به روش‌های زیستی مزایای بیشتری داشته، اما پرهزینه بودن آنها و نیاز به نیروی کار بیشتر از محدودیت‌های روش‌های شیمیایی می‌باشد. در مقابل، حساسیت روش‌های زیستی به برخی آلاینده‌ها و عوامل محیطی مانند دما، pH و غیره کاربرد آنها را در مقیاس وسیع با مشکل مواجه می‌سازد. با وجود محدودیت‌های هر دو روش زیستی و شیمیایی، ترکیب آنها اغلب مزایای بیشتری نسبت به تک‌تک آنها دارد [۵].

توسعه فن‌آوری‌های جدید برای جلوگیری از آلودگی‌های محیط زیست به اندازه تمیز کردن آلودگی‌های قبلی مهم می‌باشد. در توسعه روش‌های جدید برای جلوگیری از آلودگی، باید هر دو شرایط مقرون به صرفه بودن و سازگاری آن با محیط زیست مورد توجه باشد [۵]. روش پرتودهی یون‌ساز به‌عنوان فن‌آوری جدید از نوع فرآیند اکسایش پیشرفته و مبتنی بر تولید رادیکال‌های آزاد اکسنده و کاهنده برای تصفیه منابع آب، پساب و لجن فاضلاب مطرح شده است. پرتوهای یون‌ساز به پرتوهایی مانند آلفا، بتا، گاما، ایکس و نوترون اطلاق شده که باعث یون‌سازی در مواد زیستی می‌شوند [۱]. از پرتوهای یون‌ساز، پرتو گاما و بیم الکترون امکان استفاده برای اهداف تصفیه آب، پساب و لجن فاضلاب را داشته ولی هر دو پرتو برای کاربرد در مقیاس صنعتی معایب و مزایایی دارند. اکثر تحقیقات آزمایشگاهی پرتوهای یون‌ساز، با استفاده از پرتو گاما مخصوصاً چشمه کبالت- ۶۰ انجام می‌شود؛ اما به‌دلیل آهنگ دز پایین پرتو گاما (۱۰ کیلوگری بر ساعت) در مقایسه با بیم الکترون (۱ کیلوگری بر ثانیه)، ایزوتوپی بودن منبع تولید گاما و نیمه‌عمر ۵/۲۷ سال کبالت-۶۰ به‌عنوان ایزوتوپ رایج تولید گاما، کاهش فعالیت ۱۲/۵ درصدی سالانه آن به‌دلیل ایزوتوپی بودن و هزینه‌های جایگزینی منبع ایزوتوپی باعث شده است که استفاده از شتاب‌دهنده‌ها برای تولید پرتو بیم الکترون در مقیاس صنعتی برای تصفیه آب، پساب و غیره مقرون به صرفه باشد [۵]. هرچند که قدرت نفوذ پایین بیم الکترون(حدود ۳ میلی‌متر به ازای هر مگا الکترون ولت) در مقابل نفوذ ۳۰۰ میلی‌متری پرتو گاما، تنها استفاده از آن را برای مایعات با سطح مقطع نازک امکان‌پذیر می‌سازد. سازوکار پرتوهای یون‌ساز بدین صورت بوده که به‌دلیل تولید همزمان و تقریباً به مقدار مساوی گونه‌های واکنش‌پذیر کاهنده قوی مانند الکترون هیدراته و اتم هیدروژن(به‌ترتیب دارای پتانسیل استاندارد رداکس ۲/۷۷- و ۲/۳- ولت) و گونه‌های واکنش‌پذیر اکسنده قوی مانند رادیکال هیدروکسیل و پراکسید هیدروژن(به‌ترتیب دارای پتانسیل استاندارد رداکس ۲/۸۰ و ۱/۷۷ ولت) در محلول، این پرتوها انواع آلاینده‌های آلی، معدنی و زیستی را به‌صورت غیرانتخابی تخریب می‌نماید [۵].

بنا به مطالعات انجام شده، در کشور ما مطالعه‌ای در مورد کاربرد صنعتی پرتو گاما یا بیم الکترون در تصفیه آب، پساب و لجن فاضلاب انجام نشده است. لذا، در این مقاله سعی شد تاریخچه کاربرد صنعتی انواع پرتوتابی‌ها و طراحی‌های مختلف آنها بحث و بررسی گردد.

۲. تاریخچه تحقیقات جهانی و کاربرد صنعتی پرتوهای یون‌ساز برای تصفیه لجن فاضلاب

پرتوهای یون‌ساز به‌طور طبیعی از منابع کیهانی و رادیواکتیو از بدو پیدایش کره زمین وجود داشته ولی بعد از دهه ۱۸۹۰ با کشف تصادفی اشعه ایکس توسط ویلهولم رونتگن و با پیشرفت فناوری‌های اخیر کاربرد پرتوهای یون‌ساز گسترش قابل‌توجهی داشته است [٦]. به‌طوری‌که امروزه بیش از ٦۰۰ پرتودهنده صنعتی گاما و ۱۳۰۰ شتابدهنده‌های الکترون تحت عملیات در جهان وجود دارد [۷]. اکثر مطالعات کاربرد پرتوهای یون‌ساز در تصفیه آب، پساب و لجن فاضلاب به بعد از در دسترس بودن چشمه‌های پرتوتابی در دهه ۱۹٦۰ مربوط می‌شود [۸]. در مورد لجن فاضلاب به‌دلیل نفوذ بالای پرتو گاما، عمدتاً در واحدهای صنعتی گندزدایی لجن با پرتوهای یون‌ساز استفاده می‌شود؛ هرچند که برخی پروژه‌های تحقیقاتی پایلوت برای استفاده از بیم الکترون در گندزدایی لجن نیز وجود دارد. لذا، به‌دلیل اهمیت پرتو گاما در گندزدایی صنعتی لجن فاضلاب، ابتدا به تاریخچه پرتو گاما و سپس بیم الکترون اشاره خواهد شد. در سال ۱۹۷۳، اولین واحد پرتوتابی برای گندزدایی لجن فاضلاب با پرتو گاما از منبع کبالت-٦۰ در تصفیه‌خانه گایسبلاچ[۱] در ۱۰ کیلومتری شرق مونیخ-آلمان نصب گردید. ظرفیت این پرتودهنده برای پرتوتابی لجن فاضلاب حدود ۱۲۰ مترمکعب بر روز با دز ۳ کیلوگری بود [۹]. چشمه پرتوتابی در زیرزمین تعبیه شده و در هر بار پرتوتابی ۵/٦ مترمکعب لجن فاضلاب حاوی ٤ درصد مواد جامد از طریق لوله‌ها به محور پرتوتابی منتقل و به‌صورت دسته‌ای[۲] پرتوتابی گردید. برای پرتوتابی یکنواخت لجن، عمل اختلاط و گردش لجن با پمپ انجام می‌شد. پس از یک زمان معین بسته به قدرت و فعالیت منبع رادیواکتیو نصب شده و دز پرتوتابی مورد نیاز، لجن توسط پمپ تخلیه می‌شد. متأسفانه در بهار سال ۱۹۹۳، عملیات این پرتوتابی صنعتی برای تعمیرات اساسی متوقف شد [٦]. به‌طور کلی، پرتوتابی لجن با پرتو گاما می‌تواند به صورت دسته‌ای یا پیوسته انجام شود. در حالت دسته‌ای محصول پرتوتابی شده در اطراف منبع پرتوتابی قرار گرفته و عمل تخلیه یا بارگذاری در حین پرتوتابی انجام نمی‌شود؛ ولی در حالت پیوسته، محصول توسط سیستم اتوماتیک به سلول پرتوتابی منتقل شده و با گذشتن از جلوی منبع پرتوتابی با سرعت مناسب به خارج از سلول هدایت می‌شود [۱۰]. در سال ۱۹۷۹، آزمایشگاه ملی ساندیا در نیومکزیکو اولین واحد پایلوت پرتوتابی لجن فاضلاب آبگیری شده یا کمپوست آن با پرتو گاما از منبع سزیم-۱۳۷ با فعالیت ۱۰٦کوری[۳] را طراحی و ساختند. این واحد قادر بود روزانه حدود ۸ تن لجن خشک (دارای ۵۰ درصد مواد جامد) را با دز ۱۰ کیلوگری پرتوتابی نماید [٦]، اما عملیات این واحد به دلایل نامعلومی متوقف گردید. اولین واحد صنعتی گندزدایی لجن با پرتودهی در آسیا با دز ۳ کیلوگری در شهر ودودارا[٤] هند با پرتو گاما از منبع کبالت-٦۰ از سال ۱۹۹۲ برای گندزدایی لجن سوسپانسیون در تصفیه‌خانه این شهر آغاز به کار کرد. تصفیه‌خانه شامل مخزن شن‌گیر، مخزن ته‌نشینی اولیه[۵] (PST)، صافی‌های قطره چکان، مخزن ته‌نشینی ثانویه[٦] (FST) و هاضم بی‌هوازی بود. چشمه کبالت-٦۰ با فعالیت ۲۰۰ و ۱۰٦ کیلوکوری به‌ترتیب در سیستم حلقه بسته[۷] و باز[۱] پس از

۱- *Geiselbullach*

۲ -*Batch*

۳ -*Curie*

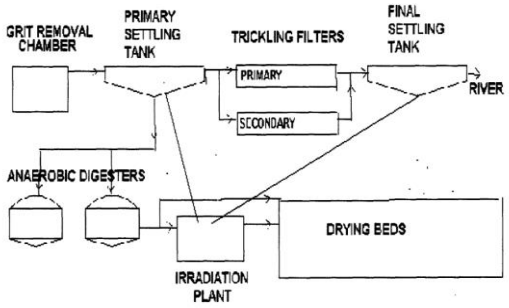
٤ – *Vadodara*

۵ – *Primary Settling Tank*

٦ – *Final settling tank*

۷ – *Closed-circulation-loops*

هاضم بی‌هوازی نصب شد تا لجن مخازن PST، FST و هاضم بی‌هوازی را پرتوتابی کند. لجن پس از پرتوتابی برای خشک شدن به بستر خشک‌کن خورشیدی آزاد می‌شود (شکل ۱).



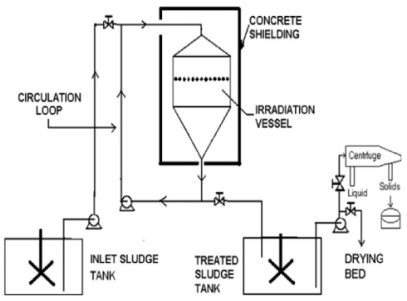
شکل ۱- تصویر محل قرارگیری دستگاه پرتوتابی در تصفیه خانه شهر ودودارا هند [۱۱]

برای انجام پرتودهی، اوایل از سیستم حلقه بسته استفاده می‌شد ولی با توجه به رشد مجدد جانداران بیماری‌زا از جمله کلیفرم‌ها در این سیستم، سیستم پرتودهی به حلقه باز تغییر داده شد که مشخصات این دو سیستم پرتوتابی در جدول ۱ به‌طور خلاصه ارائه و مقایسه شده است [۱۱].

جدول۱- مقایسه سیستم حلقه بسته و باز برای پرتوتابی لجن فاضلاب در تصفیه ودودرا هند [۱۱]

شاخص‌ها	سیستم حلقه بسته	سیستم حلقه باز
حجم لجن (متر مکعب)	۳	۱۲
کاهش کلیفرم بلافاصله پس از پرتوتابی (CFU/mL[۲])	۱۰۰۰۰ برابر (تقریباً از ۱۰[۵] به ۱۰)	۱۰۰۰۰ برابر (تقریباً از ۱۰[۵] به ۱۰)
رشد مجدد کلیفرم‌ها بعد از نگه داشتن لجن	بله (گاهی مواقع بیشتر از شاهد پرتو	خیر (اغلب کمتر از شاهد پرتو ندیده و تقریباً ۱۰[۲])
پرتو دیده در حالت مایع (CFU/mL)	ندیده و تقریباً بیشتر از ۱۰[۶])	
سرعت جریان (متر مکعب بر ساعت)	۶۰	۳۰
زمان باقی ماندن لجن در منطقه پرتودهی در طول هر بار چرخش سیستم (دقیقه)	۳	۶
فاصله بین دو تابش متوالی (دقیقه)	۳	۱۸
هوادهی	ضعیف	خوب

در تازه‌ترین اصلاحات انجام شده سرعت جریان در سیتم حلقه باز به ٤٤ مترمکعب بر ساعت، زمان باقی ماندن لجن در منطقه پرتودهی در طول هر بار چرخش سیستم حلقه باز به ٤ دقیقه، فاصله بین دو تابش متوالی به ١٦ دقیقه و حجم لجن تحت پرتوتابی به ۱۵ مترمکعب رسانده شد [۱۲]. در سیستم حلقه بسته (شکل ۲) حدود ۳ مترمکعب لجن توسط پمپی از مخزن اولیه به مخزن پرتودهی منتقل، دریچه ورودی بسته شده و لجن با سرعت جریان ۶۰ مترمکعب بر ساعت بسته به دز مورد نظر پرتوتابی به چرخش در می‌آید. پس از اتمام پرتوتابی، دریچه خروجی باز و لجن پرتوتابی شده در مخزن لجن تصفیه شده جمع‌آوری شده و سپس به بستر خشک‌کن یا سانتریفیوژ برای جدا کردن مواد جامد لجن جهت استفاده به‌عنوان کود کشاورزی منتقل می‌شود. در طول فرآیند، از کل حجم لجن به جز بخشی که در لوله‌ها در گردش بوده در منطقه پرتوتابی قرار می‌گیرد [۸ و ۹].

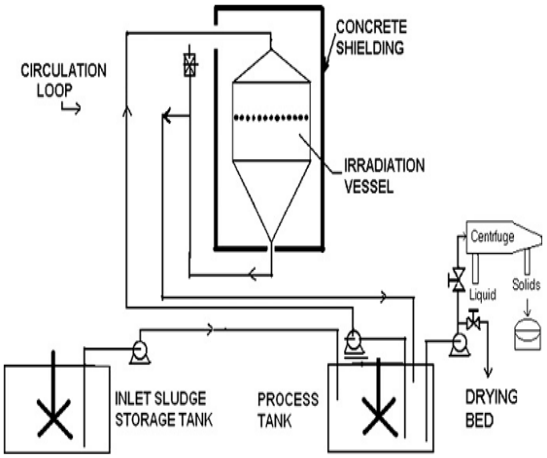


شکل ۲ تصویر سیستم حلقه بسته مورد استفاده در مرکز پرتوتابی لجن ودودارا هند [۱۲]

۱ – *Open-circulation-loops*

۲ - *Colony Forming Unit*

در سیستم حلقه باز (شکل ۳) حدود ۱۵ مترمکعب از لجن ذخیره شده اولیه از طریق لوله‌ای به مخزن دوم که برای ذخیره لجن پرتودیده استفاده شده منتقل می‌شود. سپس لجن از طریق لوله‌ای با سرعت جریان ٤٤ مترمکعب بر ساعت تا اتمام پرتودهی به چرخش در می‌آید. در این سیستم در هر لحظه ۸۰ درصد حجم لجن در خارج از منطقه پرتوتابی باقی می‌ماند. پس

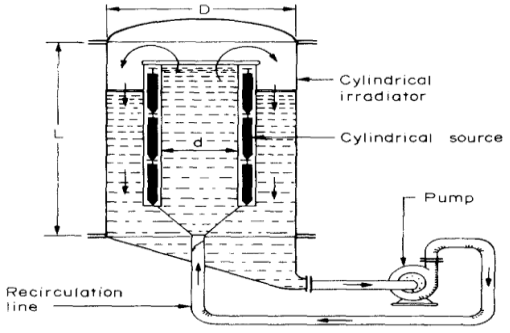


شکل۳- تصویر سیستم حلقه باز مورد استفاده در مرکز پرتوتابی لجن ودودارا هند [۱۲]

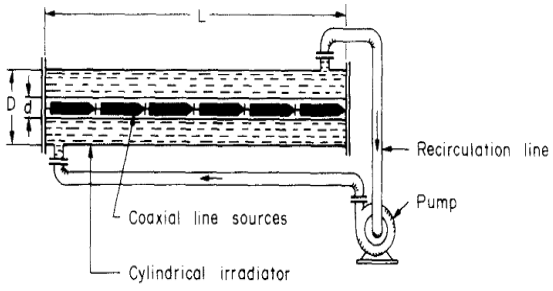
از جذب دز مورد نظر، لجن پرتودیده به بستر خشک‌کن خورشیدی یا سانتریفیوژ برای جدا کردن بخش جامد منتقل می‌شود.

فرآیند مجدداً برای لجن تازه از اول تکرار می‌شود. سرعت جریان بالای سیستم حلقه بسته منجر به ماندن کوتاه‌مدت لجن در مخزن پرتودهی در طول هر چرخش سیستم می‌شود. همچنین در سیستم حلقه بسته کاهش مداوم اکسیژن در طول فرآیند اتفاق افتاده و به‌دلیل اثرات هم‌افزایی اکسیژن با تولید گونه‌های اکسنده و حذف بیماری‌زاها با گونه‌های اکسنده، تغییرات اکسیژن می‌تواند بر حذف بیماری‌زاها و رشد مجدد آنها نیز مؤثر می‌باشد. با فعالیت ۱۰٦ کیلوکوری چشمه کبالت ٦۰ و دز پرتوتابی مورد نیاز ۳ کیلوگری، میزان ۱ مترمکعب لجن در ساعت می‌تواند گندزدایی شده که با افزایش فعالیت چشمه به ۵۰۰ کیلوکوری ظرفیت کل پرتوتابی لجن در روز به ۱۱۳ مترمکعب در روز خواهد رسید [۱۲]. هزینه اولیه راه اندازی این واحد صنعتی ۱ میلیون دلار و هزینه عملیاتی در هر سال شامل جایگزینی چشمه کبالت-٦۰ و حقوق کارمندان ۱۰۰ هزار دلار محاسبه گردید [۱۱].

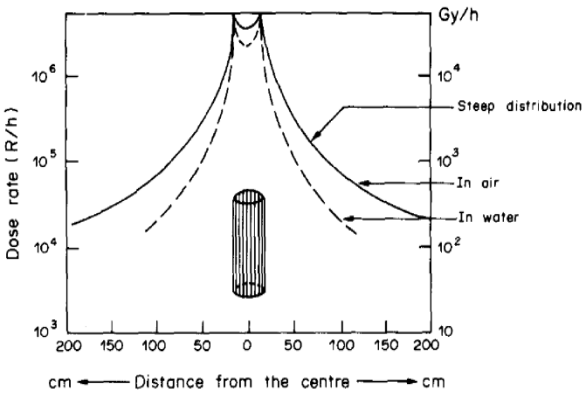
گزارش شده است که همگنی و یکنواختی دز جذب شده از نگرانی‌های گندزدایی لجن مایع با روش پرتوتابی در حالت صنعتی می‌باشد. برای پرتوتابی معمولاً از چشمه پرتوتابی حلقوی (شکل ٤) و خطی (شکل ۵) در داخل راکتور استوانه‌ای یا لوله‌ای استفاده شده، اما هر دو شکل هندسی پیشنهاد شده برای تعبیه چشمه‌ها، آهنگ دز غیریکنواخت با فاصله از منبع پرتوتابی فراهم می‌نماید (شکل ٦).



شکل ٤ تصویر راکتور استوانه‌ای با چشمه حلقوی [۱۳].

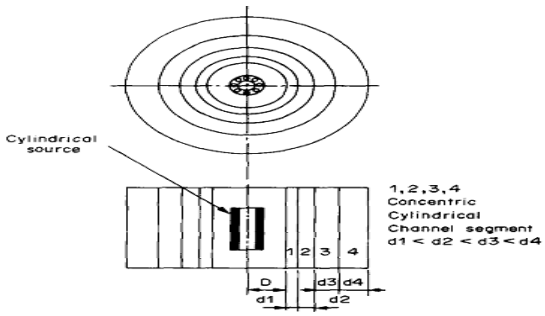


شکل ۵- تصویر راکتور لوله‌ای با چشمه خطی [۱۳].



شکل ٦- تصویر توزیع دز با فاصله از منبع پرتوتابی [۱۳].

دو روش برای به دست‌آوردن دز یکنواخت گندزدایی لجن مایع در حین پرتودهی پیشنهاد گردیده است: در روش اول مطابق شکل ۷، منطقه پرتوتابی به تعدادی از کانال‌های حلقه‌ای تقسیم شده و عرض هر کانال طوری انتخاب شده که آهنگ دز نسبتاً یکنواخت در داخل هر بخش قابل دریافت باشد. با وجود تأمین یکنواخت دز با این روش ولی مشکلاتی از قبیل گرفتگی کانال‌ها به‌دلیل باریک بودن عرض آنها، ته‌نشست لجن و غیرممکن است مشاهده گردد.



شکل ۷- تصویر نحوه تقسیم منطقه پرتوتابی به کانال‌های حلقوی [۱۳].

لذا، از روش دوم یعنی همزدن یا متلاطم نگه داشتن لجن در منطقه پرتوتابی برای رسیدن به آهنگ دز یکنواخت استفاده می‌شود.همزدن توسط همزن‌های مکانیکی یا چرخش مایعات با استفاده از پمپ‌های خارج از سیستم پرتودهی انجام می‌شود. روش دوم مزایایی از قبیل سادگی در نصب، راه‌اندازی و نگهداری تجهیزاتی مانند پمپ، موتور و غیره بوده، ولی به‌هر حال آن‌هم دارای مشکلاتی مانند کاربرد متناسب قدرت پمپ‌ها با تغییر فعالیت منبع، اندازه مخزن پرتودهی و خواص هیدرودینامیکی لجن می‌باشد [۱۳].

از تابش پرتو الکترون به‌دلیل قدرت نفوذ پایین در گندزدایی لجن به‌صورت صنعتی استفاده نمی‌شود؛ هرچند که در برخی تحقیقات به صورت پایلوت از این پرتو استفاده شده است. دو شتاب‌دهنده الکترون استفاده شده برای گندزدایی لجن فاضلاب شهری در آمریکا در بوستون و میامی بود. شتاب‌دهنده بوستون در سال ۱۹۷٦ برای تصفیه ٤۰۰ متر مکعب لجن فاضلاب شهری سوسپانسیون به‌وسیله مؤسسه فن‌آوری ماساچوست طراحی و اجرا شد [٦]. قدرت شتاب‌دهنده مورد استفاده این پروژه ۵۰ کیلووات (۸۵/ مگا الکترون ولت و ٦۰ میلی‌آمپر) و دز پرتوتابی ٤ کیلوگری بود [١٤]. نتایج به‌دست آمده از این پروژه پایه و اساس ایجاد شتاب‌دهنده بیم الکترون میامی به‌عنوان جایگزین تیمار حرارتی استفاده شده برای گندزدایی لجن فاضلاب بود. این شتاب‌دهنده با هزینه‌ای بالغ بر ۱۷۵۰۰۰۰ دلار در سال ۱۹۸٤عملیاتی شد و تا سال ۱۹۸۵ در فعالیت بود، اما به‌دلیل تغییر مقررات دفع لجن، مدتی غیرفعال شده و مجدداً به‌عنوان مرکز تحقیقاتی در سال ۱۹۸۸ آغاز به کار نمود [۱۵]. شتاب‌دهنده میامی نیز در بین سال‌های ۱۹۸۱ تا ۱۹۸۳ با قدرت ۷۵ کیلووات (۱/۵ مگا الکترون ولت و ۵۰ میلی‌آمپر) برای تصفیه روزانه ٦٤۵ مترمکعب لجن سوسپانسیون (حداکثر ۲ درصد مواد جامد) با دز ٤ کیلوگری ساخته شد. این واحد صنعتی برای تصفیه و ضدعفونی روزانه ۵۰۰۰ مترمکعب لجن در روز به‌وسیله نصب هشت شتاب‌دهنده به‌صورت موازی

طراحی شده بود. در مورد کاربرد شتاب‌دهنده‌های الکترون در تصفیه و گندزدایی لجن فاضلاب در آلمان، استرالیا و ژاپن نیز گزارش‌هایی وجود دارد، اما همه آن شتاب‌دهنده‌ها برای مدت ۲ تا ٤ سال در عملیات بودند. در بین سال‌های ۱۹۷٦ تا ۱۹۷۷، دانشمندان دانشگاه هوهنیم اشتوتگارات[1] آلمان امکان گندزدایی لجن فاضلاب با بیم الکترون با قدرت پایین ۳٤ کیلووات (۰/٤ مگا الکترون ولت و ۷۵ میلی‌آمپر) بررسی کردند. با توجه به قدرت نفوذ پایین انرژی الکترون‌های استفاده شده (حدود ۱ میلی‌متر)، حداکثر ضخامت لجن برای پرتودهی حدود ۱۲ میلی‌متر تنظیم شد. لذا برای توزیع یکنواخت دز و گندزدایی بهتر از تزریق هوا برای متلاطم نگه داشتن و بازچرخش حداکثر ٤۰ دور استفاده گردید. در ژاپن نیز در سال ۱۹۸۷ در آزمایشگاه مرکز ملی اتمی تاکاساکی، تاسیسات تحقیقاتی با قدرت ۳۰ کیلووات و ۲ مگا الکترون ولت برای پرتودهی روزانه ۷/۲ تن کمپوست لجن فاضلاب با دز ۵ کیلوگری طراحی و ساخته شد. کارهای تحقیقاتی به مدت ۳ سال ادامه داشت ولی بعد از سال ۱۹۹٤ هیچ کاربرد عملی از آن گزارش نشد [۱٤].

با استناد به مطالب ذکر شده و ارائه سازوکار چندین واحد صنعتی گندزدایی لجن با پرتو گاما در جهان می‌توان بیان نمود که در اکثر تصفیه‌خانه‌های دارای واحد گندزدایی لجن با پرتوتابی، از سوسپانسیون لجن به‌دلیل نیاز به دز پایین و به‌تبع آن کاهش هزینه‌های پرتودهی نسبت به لجن خشک استفاده می‌شود. با افزایش ظرفیت تولید لجن فاضلاب با ساخت و بهره‌برداری تصفیه‌خانه‌ها در کشور و ضرورت استفاده ایمن از آنها به‌عنوان کود در کشت محصولات کشاورزی از یک طرف و عقد پیمان برجام (برنامه جامع اقدام مشترک) با قدرت‌های جهانی مبنی بر استفاده صلح‌آمیز از فناوری هسته‌ای از طرف دیگر، امید است سازمان انرژی اتمی ایران به‌عنوان متولی نظارت بر واردات و طراحی دستگاه‌های پرتو دهنده مورد نیاز صنعت کشور، اولین واحد گندزدایی لجن به‌صورت صنعتی با پرتو گاما را در آینده در کشور ما عملی سازد.

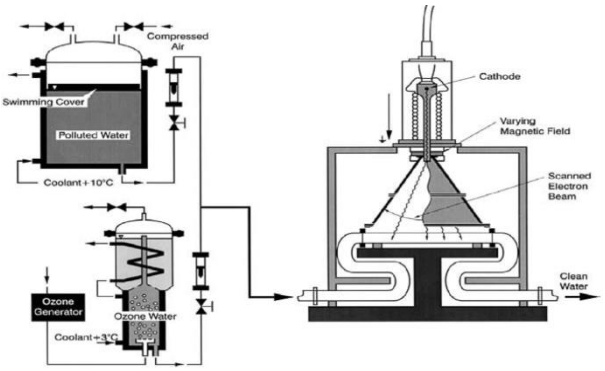
۳. تاریخچه تحقیقات جهانی و کاربرد صنعتی پرتوهای یون‌ساز برای تصفیه فاضلاب و پساب

در تصفیه و گندزدایی آب یا پساب در مقیاس صنعتی، کاربرد تابش بیم الکترون به‌دلیل مزایای آن شامل تولید مقادیر زیاد رادیکال‌های آزاد در واحد زمان و کاهش دز و هزینه پرتوتابی، عدم وجود هزینه‌های تعویض منبع رادیوایزوتوبی گاما و کاهش فعالیت سالانه آن، نبود منبع رادیواکتیو، کنترل راحت در موارد اضطراری، تعمیر و نگهداری و خاموش و روشن کردن آنی بر پرتو گاما ترجیح داده می‌شود. هرچند که به‌دلیل سهولت انجام تحقیقات آزمایشگاهی با استفاده از پرتو گاما و سازوکار یکسان پرتوهای الکترون و گاما، پرتو گاما به‌عنوان چشمه آزمایشی برای طراحی فرآیند پرتو الکترون در مقیاس صنعتی نیز استفاده می‌شود [۵] به‌دلیل نبود تاسیسات صنعتی در جهان برای تصفیه پساب یا آب با استفاده از فناوری پرتو گاما به دلایل مذکور، به تاریخچه و کاربرد صنعتی پرتو بیم الکترون برای تصفیه و پساب اشاره می‌گردد. به‌طور کلی، بیم الکترون توسط شتاب‌دهنده‌های ماشینی ذرات تولید می‌شود. یک شتاب دهنده الکترون شبیه به تلویزیون معمولی بوده و در هردو الکترون‌های منتشر شده از یک کاتد، به‌روش الکترواستاتیکی شتاب می‌گیرند؛ با این تفاوت که پتانسیل شتاب دهندگی ماشین‌های شتاب‌دهنده بیشتر است. ولتاژ شتاب دهنده، معمولاً به‌عنوان انرژی الکترون نامیده شده، با طراحی شتاب‌دهنده تعیین می‌شود [۵]. شتاب‌دهنده‌ها با توجه به ساختار آنها یا محدوده انرژی بیم الکترون دارای طبقه‌بندی‌هایی بوده؛ به‌طوری‌که از

۱ - *Stuttgart - Hohenheim*

لحاظ انرژی بیم الکترون به شتاب‌دهنده‌های با انرژی پایین (دارای محدوده انرژی ۰/۱۵ تا ۰/۵ مگا الکترون ولت و قدرت ۳۰۰ تا ۳۵۰ کیلووات)، متوسط (دارای محدوده انرژی ۰/۵ تا ۵ مگا الکترون ولت و قدرت ۳۰۰ تا ۳۵۰ کیلووات) و بالا (دارای محدوده انرژی ۵ تا ۱۰ مگا الکترون ولت و قدرت ۱۰۰ کیلووات) تقسیم‌بندی می‌شود [۸]. شتاب‌دهنده‌ها از قسمت‌هایی مانند چشمه یونی برای تولید یون، کاواک یا محفظه شتاب برای شتاب‌دهی ذرات، مگنت یا آهن‌رباها جهت خمش باریکه و شتاب مجدد، سامانه تقویت کننده برای تقویت جریان تزریق شده با کاواک، سامانه تغذیه برای تولید جریان سیم پیچ‌ها و غیره تشکیل شده است [۲].

شتاب‌دهنده‌ها تقریباً در تمامی جنبه‌های زندگی بشر امروزی کاربرد دارند و روز به روز استفاده از آنها در جهان توسعه می‌یابد. اخیراً در کشورهای صنعتی استفاده از شتاب‌دهنده‌ها برای کاربردهای زیست محیطی بسیار مورد توجه قرار گرفته است [۳]. در برخی کشورها شتاب‌دهنده الکترون برای حذف انواع آلاینده‌های آلی و زیستی [۵] و یا برای افزایش قابلیت زیست‌تخریب‌پذیری ترکیبات آلی مقاوم در آب یا پساب با جفت کردن آنها با فرآیندهای تصفیه زیستی معمولی به‌صورت پایلوت یا صنعتی اجرا شده است [۱۶]. در سال ۱۹۷۵، تاسیسات سیبرسدورف[1] در استرالیا با شتاب‌دهنده الکترون دارای مشخصات ۱۲/۵ کیلووات قدرت، انرژی ۰/۵ مگا الکترون ولت و ۲۵ میلی‌آمپر برای تصفیه فاضلاب ساخته شد. تصویر شماتیکی این شتاب‌دهنده در شکل ۸ نشان داده شده است. با توجه به تولید همزمان و تقریباً مساوی گونه‌های کاهنده و اکسنده توسط پرتو بیم الکترون، برای جارو کردن گونه‌های کاهنده مانند الکترون هیدراته و افزایش قدرت اکسایشی و بازده تصفیه از تلفیق آنها با ازون مطابق شکل ۸ استفاده کردند. همان‌طور که در بخش کاربرد صنعتی شتاب‌دهنده‌ها در گندزدایی لجن فاضلاب اشاره گردید، اولین تاسیسات تحقیقاتی بزرگ مقیاس با شتاب‌دهنده الکترون در سال ۱۹۸۵ برای گندزدایی لجن در میامی ساخته شد، اما بعداً به تحقیقات ارزیابی کارایی پرتو بیم الکترون بر حذف آلاینده‌های آلی سمی از آب و فاضلاب‌های صنعتی متمرکز شد. طراحی این شتاب‌دهنده طوری بوده که می‌توانست برای پرتوتابی آب یا پساب فاضلاب در حالت پیوسته یا دسته‌ای (دریافت از مخزن) استفاده شود. در حالت پیوسته، آلاینده‌های مورد نظر به جریان فاضلاب یا آب افزوده شده ولی در حالت دسته‌ای، آلاینده در مخزن تقریباً ۲۰۰۰۰ لیتری حل شده و سپس پرتوتابی انجام می‌شد [۱۵].



شکل ۸- شتابدهنده الکترون مرکز تحقیقاتی سیبرسدورف استرالیا برای تصفیه آب [۱۵]

شاید به جرأت می‌توان گفت که موفق‌ترین کاربرد پرتو بیم الکترون در مقیاس صنعتی در مجتمع صنعتی رنگرزی داگو (DDIC)[2] کره جنوبی می‌باشد. این مجتمع مصرف آب (۹۰۰۰۰ مترمکعب در روز)، برق و بخار آب بالایی داشته و روزانه مقدار زیادی لجن و فاضلاب به شدت رنگی به‌ترتیب به مقادیر ۵۰۰

۱ - *Seibersdorf*

۲ –*Daegu Dyeing Industrial Complex*

و ۸۰۰۰۰ مترمکعب بر روز تولید می‌کند. فاضلاب DDIC حاوی ترکیب‌های آلی، رنگ‌های آلی و خیساننده‌های[1] زیادی بوده؛ به‌طوری‌که، تریفتالیک اسید و اتیلن گلیکول عمده‌ترین ترکیب‌های آلاینده آن بودند. تحقیقات نشان داده بود که تجزیه کامل آلاینده‌ها به دوزهای جذبی بالاتری نیاز داشته ولی استفاده از دوزهای جذبی بالاتر در مقیاس صنعتی از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه نبود؛ لذا بهتر بود به تجزیه بخشی از آلاینده‌ها و تبدیل آن‌ها به مولکول‌های به آسانی زیست‌تخریب‌پذیر در مرحله‌های بعدی اکتفا شود. تصفیه‌خانه در مقیاس پایلوت در سال ۱۹۹۷ با شتاب‌دهنده الکترون و قدرت ٤٠ kW در DDIC برای تصفیه ۱۰۰۰ مترمکعب در روز ساخته شد. سپس در سال ۲۰۰۵ از شتاب‌دهنده الکترون ۱MeV و قدرت ۴۰۰ kW برای تصفیه ۱۰۰۰۰ مترمکعب فاضلاب در روز در مقیاس صنعتی با دز پرتودهی ۱ کیلوگری جفت شده با فرآیندهای تصفیه بیولوژیکی معمولی استفاده شد. نتایج آزمایشات نشان داد که پرتوتابی بیم الکترون با دز ۱ کیلوگری باعث افزایش قابلیت زیست‌تخریب‌پذیری (تبدیل رادیولیتیک ترکیبات آلی مقاوم به ترکیبات به آسانی زیست‌تخریب‌پذیر از قبیل اسیدهای آلی با وزن مولکولی کم)، افزایش راندمان حذف COD و BOD_5، افزایش فعالیت میکروبی در فرآیند لجن فعال و کاهش زمان ماند در این فرآیند شد [١٦]. با توجه به مطالب ذکر شده می‌توان بیان نمود که استفاده از پرتو بیم الکترون در کارهای زیست محیطی مخصوصاً رفع آلودگی فاضلاب یا پساب در برخی کشورهای جهان به مرحله صنعتی رسیده و جزء فناوری‌های سازگار با محیط زیست می‌باشد. به دلایل بومی شدن فناوری طراحی و ساخت شتاب‌دهنده‌های پرقدرت صنعتی توسط سازمان انرژی اتمی [٤] امید است در آینده طراحی و ساخت شتاب‌دهنده‌های مورد نیاز تصفیه‌خانه‌های فاضلاب شهرک‌های صنعتی و شهری با قدرت و جدیت هرچه بیشتر عملیاتی گردد.

٤. بررسی اقتصادی بودن کاربرد صنعتی پرتوهای یونیزان برای تصفیه پساب و لجن فاضلاب

در مورد اقتصادی بودن کاربرد پرتوهای یونیزان برای تصفیه پساب، فاضلاب و لجن فاضلاب می‌توان بیان نمود که اظهار نظر در مورد مقرون به صرفه بودن یا نبودن پرتوتابی در مقایسه با دیگر فرآیندهای موجود تصفیه یا گندزدایی باید از لحاظ عوامل مختلف مانند توانایی حذف آلاینده‌ها، هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه و مدت زمان بازگشت سرمایه یا هزینه عملیاتی در طی سال و غیره انجام گیرد. هرچند گزارش شده است که از پرتوهای یون‌ساز، کاربرد گاما در مقیاس صنعتی مقرون به صرفه نیست، اما متأسفانه تصور غلط رایج در مورد فرآیند بیم الکترون این بوده که الکترون‌های با انرژی بالا به معنای هزینه‌های بالای انرژی می‌باشد. در حالی نتایج تحقیقات در مقیاس پایلوت و صنعتی خلاف این موضوع را ثابت می‌نماید. هان و همکاران (۲۰۱۲) گزارش کردند که نصب شتاب‌دهنده بیم الکترون در DDIC از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه بوده، به‌طوری‌که هزینه کلی ساخت شتاب‌دهنده DDIC ۴ میلیون دلار، هزینه عملیات با در نظر گرفتن استهلاک تقریباً یک میلیون دلار بوده که حدود ۰/۳ دلار برای تصفیه هر مترمکعب فاضلاب احتساب شد. همچنین، گزارش شده است که هزینه عملیات فرآیندهای متداول برای تصفیه زیستی و شیمیایی فاضلاب حدود ۱/۱ تا ۱/۲ دلار بر هر مترمکعب برآورد شده است. در حالی‌که در تصفیه‌خانه DDIC، هزینه تصفیه هر مترمکعب فاضلاب با تلفیق تصفیه زیستی و بیم الکترون ۱ دلار بر هر مترمکعب برآورد گردید [١٦]. هرچند که

١-*Surfactants*

نگارندگان به گزارشی از هزینه عملیات سایر تصفیه‌خانه‌های مبتنی بر شتاب‌دهنده‌های الکترون دست نیافتند. از طرف دیگر گزارش شده است که مقایسه هزینه‌های انرژی فن‌آوری‌های مختلف یا تیمارهای مختلف پرتو بیم الکترون بهتر است از طریق کیلووات ساعت الکتریسیته مورد نیاز برای کاهش ۱۰ برابر (۹۰ درصد یا یک مرتبه) غلظت آلودگی ۱۰۰۰ گالن آب انجام شود. اصطلاحاً این شاخص انرژی الکتریکی بر هر مرتبه[۱] نامیده شده و با اختصار EE/O in kWh/1000 U.S gal/Order نشان داده می‌شود. به عنوان مثال اگر ۱۰ کیلووات ساعت انرژی الکتریکی برای کاهش غلظت آلاینده از ۱۰۰ تا ۱۰ میلی‌گرم بر لیتر در ۱۰۰۰ گالن فاضلاب یا آب و غیره لازم باشد، آن‌وقت EE/O برابر kWh/1000 gal/order ۱۰ می‌باشد. برای رساندن بازده حذف به ۹۹ درصد (یعنی از ۱۰ تا ۱ میلی‌گرم بر لیتر یا یک مرتبه دیگر) ۱۰ کیلووات ساعت انرژی الکتریکی مازاد دیگر نیز لازم می‌باشد. با توجه به اینکه رابطه لگاریتمی بین تغییر غلظت آلاینده و دز پرتو بیم الکترون اغلب خطی بوده، لذا شیب می‌تواند توصیف کننده EE/O باشد. هنگام مقایسه فن‌آوری‌ها یا تیمارهای مختلف با استفاده از EE/O باید مراقب بود که همه هزینه‌های انرژی مرتبط با هر تیمار در نظر گرفته شود. به‌عنوان مثال، اگر پراکسید هیدروژن در طول تصفیه اضافه شده، هزینه‌های الکتریکی مرتبط با تولید پراکسید وجود داشته و لازم است در مقایسه در نظر گرفته شود. EE/O معمولاً از طریق مطالعات امکان‌سنجی تعیین شده و به عواملی مانند نوع آلاینده تحت تیمار، غلظت اولیه آلاینده و طبیعت آب یا پساب بستگی دارد. با محاسبه EE/O می‌توان دز پرتو بیم الکترون (به کیلووات) مورد نیاز برای حذف هر آلاینده خاص را از طریق معادله ۱ برآورد نمود. مقادیر معمول EE/O برای آلاینده‌های رایج از ۰/۵ تا ۱۲ kWh/1000gal/order می‌باشد. در معادله ۱، C_0 و C به ترتیب غلظت اولیه و نهایی آلاینده می‌باشد [۱].

$$\text{Dose} = (\text{EE}/\text{O}) \times (\log \text{C}_0 / \text{C}) \qquad (۱)$$

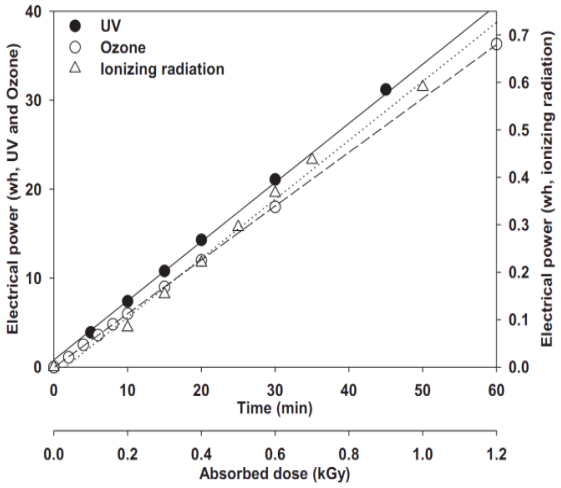
هرچند که نگارندگان اطلاعات کاملی به جز یک مورد (لی و همکاران، ۲۰۱۵) در مورد مقایسه روش‌های مختلف با پرتوهای یونیزان در حذف آلاینده‌های مختلف با شاخص EE/O دست نیافتند، ولی این شاخص برای حذف آلاینده‌های مختلف آلی به‌وسیله پرتو بیم الکترون در تاسیسات تحقیقاتی بیم الکترون میامی در آب آشا میدنی تهیه شده است (جدول ۲).

جدول۲- مقادیر دامنه EE/Oمورد نیاز برای تخریب آلاینده‌های آلی [۵]

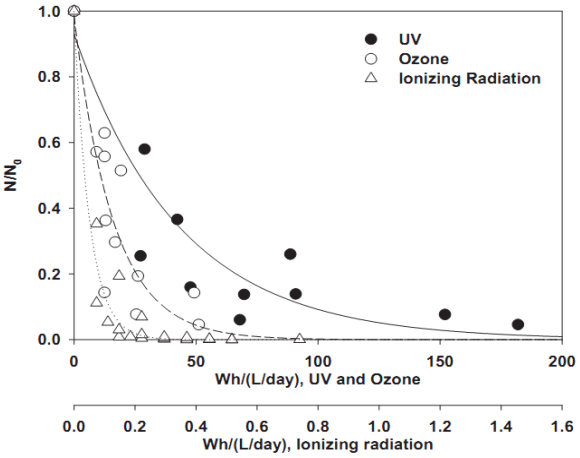
نوع آلاینده	EE/O (kWh/1000gal/order)
بنزن	۰/۵-۳
تولوئن	۰/٤-۳
زایلن	۱-۳
فنول	۰/٤-۷
متیلن بلو	۰/۲-۲
تری کلرواتیلن	۰/۵-۲
تتراکلرو اتیلن	۲-٦
کلروفرم	۲-۱۲
تتراکلرید کربن	۰/۵-۵
کلرید وینیل	۰/۵-۲

لی و همکاران (۲۰۱۵) UV، ازون و گاما را از لحاظ مصرف انرژی الکتریکی برای گندزدایی پساب ثانویه و امکان‌سنجی کاربرد گاما به جای UV و ازون بررسی کردند. نتایج آنان نشان داد که بین گندزدایی کننده‌ها شامل گاما، ازون و UV و مصرف انرژی الکتریکی رابطه خطی وجود دارد (شکل ۹).

۱ - *Electrical Energy per Order*



شکل ۹ ارتباط بین گندزدایی کننده‌های مختلف و مصرف انرژی الکتریکی [۱۷]



شکل ۱۰- مقایسه مصرف انرژی برای حذف ریزجانداران با استفاده گاما، ازون و UV [۱۷]

لذا، بر اساس این رابطه، بازده گندزدایی و مصرف انرژی الکتریکی UV، ازون و گاما با هم مقایسه و گزارش کردند که برای بازده گندزدایی ۹۰ درصد با مصرف انرژی الکتریکی ۰/۱۲، ۳۶/۸۰ و ۹۶/۵۳ Wh/(L/day) به‌ترتیب با گاما، ازون و UV حاصل شد (شکل ۱۰).

لذا، آنان نتیجه‌گیری نمودند که پرتو گاما نسبت به ازون و UV برای گندزدایی پساب مقرون به صرفه‌تر می‌باشد [۱۷]. با استناد به مطالب ذکر شده می‌توان بیان نمود که برخلاف تصور عمومی استفاده از پرتوهای یونیزان در حذف آلاینده‌های مختلف مقرون به صرفه و سازگار با محیط زیست می‌باشد. بنابراین، با پیشرفت فناوری یکی از بزرگترین معایب عدم کاربرد زیاد پرتوهای یونیزان در مقیاس صنعتی مرتفع شده و هرچند که لازم است تحقیقات تکمیلی زیادی با استفاده از شاخص EE/O در آینده انجام پذیرد.

۵. نتیجه‌گیری

با افزایش غظت آلاینده‌ها در محیط زیست، نه تنها پاکسازی آلاینده‌ها با روش‌های مختلف مهم بوده بلکه باید به توسعه فن‌آوری‌های جدید برای جلوگیری از آلودگی‌های آینده محیط زیست نیز توجه نمود. روش‌های جدید برای صنعتی شدن باید هر دو شرایط امکان‌پذیر بودن از لحاظ اقتصادی و سازگاری آن با محیط زیست را داشته باشد. از پرتوهای یون‌ساز، پرتو گاما و بیم الکترون امکان استفاده برای اهداف حذف آلاینده و تصفیه آب، پساب و لجن فاضلاب را دارند. تحقیقات آزمایشگاهی پرتوهای یون‌ساز، به‌دلیل سهولت انجام با استفاده از پرتو گاما مخصوصاً چشمه کبالت ۶۰ انجام می‌شود؛ ولی در مقیاس صنعتی عمدتاً برای گندزدایی لجن از پرتو گاما و پساب و آب از پرتو بیم الکترون استفاده می‌شود. با کاربرد صنعتی پرتوهای یون‌ساز معایبی مانند عدم توزیع یکنواخت دز و یا احتمال رشد مجدد ریزجانداران حذف شده وجود دارد که با افزایش تعداد بازچرخش فرآیند پرتوتابی هر دو مورد رفع می‌گردد. هرچند شتاب‌دهنده پرقدرت صنعتی در واحد یزد پژوهشگاه علوم و

فنون هسته‌ای طراحی و ساخته شده است ولی گزارشی درباره تجاری کردن کاربرد پرتوهای یون‌ساز برای تصفیه آب، پساب و لجن فاضلاب وجود ندارد. با عقد برنامه جامع اقدام مشترک با قدرت‌های جهانی و رفع محدودیت‌های استفاده صلح‌آمیز از فناوری هسته‌ای امید است نتایج این بررسی بتواند در تجاری کردن استفاده از پرتوهای یون‌ساز بر گندزدایی و حذف آلاینده‌های آب، پساب، فاضلاب و لجن فاضلاب مؤثر باشد.

مراجع

[۱] ح. عسگری لجایر، ن. نجفی، ا. مقیسه، تحلیلی بر سازوکار پرتو گاما در تصفیه و گندزدایی لجن فاضلاب، مجله تابش و فناوری هسته ای، ۲ (۱)، ۲۳-۹، ۱۳۹٤.

[۲] ر. صلح‌جو، م.ر. اسدی، س. صابونچی، ف. ذاکر حسینی، م. صالحی، ع. عبدالرحمن، م. نیکبخت، س. ز. کراری، ح. آفریده، م. قرقره چی، ج. سوچای، طراحی شتابدهنده سیکلوترون ۱۰ مگا الکترون ولت. مجله پژوهش فیزیک ایران، ۱۵ (۲)، ۲۳٤-۲۲۵، ۱۳۹٤.

[۳] م. لامعی رشتی، ف. قاسمی، س. زارعی، ح. سیار، ح. آل ابراهیم، م. خسروانی، م. انصاری، م. یاحقی، ا. ح. میردامادی، ش. مدنی، بررسی اهمیت وکاربرد شتابدهنده ها در دنیای امروز. مجله پژوهش فیزیک ایران، ۱۵(۲)، ۱۲۸-۱۱۹، ۱۳۹٤.

[٤] ع.م. پورصالح، ح. خلفی، س. حاصل طلب، م. مرتضوی، س. خ. موسوی، ف. قاسمی، ک. جوکار، و. جمهوری، م. عاطفی، طراحی و ساخت نخستین شتاب دهنده پرقدرت صنعتی الکترون ساخت ایران. مجله پژوهش فیزیک ایران، ۱۵(۲)، ۱٤٤-۱۳۷، ۱۳۹٤.

[5] M.A. Tarr, Chemical degradation methods for wastes and pollutants: environmental and industrial applications: CRC Press. 2003.

[6] J. Wang, J. Wang, Application of radiation technology to sewage sludge processing: a review. *J Hazard Mater*, 143 2-7, 2007.

[7] L. Tahri, D. Elgarrouj, S. Zantar, M. Mouhib, A. Azmani, F. Sayah, Wastewater treatment using gamma irradiation: Tétouan pilot station, Morocco. *Radiat Phys Chem*, 79, 424-428, 2010.

[8] S. Borrely, A. Cruz, N. Del Mastro, M. Sampa, E. Somessari, Radiation processing of sewage and sludge. A review. *Prog Nucl Energ*, 33 (1998), 3-21, 1998.

[9] G. Wickramanayake, O.J. Sproul, Decontamination technologies for release from bioprocessing facilities. Part V. decontamination of sludge. *Crit Rev Environ Sci Technol*, 19, 515-537, 1990.

[10] EudraLex- the rules governing medicinal products in the European Union. Volume 4: EU guidelines to good manufacturing practice medicinal products for human and veterinary use. Annex 12: Use of Ionising Radiation in the Manufacture of Medicinal Products. October 2005.

[11] http://ec.europa.eu/health/files/eudralex/vol-4/pdfs-en/anx12_en.pdf.

[12] S. Gautam, M.R. Shah, S. Sabharwal, A. Sharma, Gamma irradiation of municipal sludge for safe disposal and agricultural use. *Water Environ Res*, 472-479, 2005.

[13] P. Benny, M. Shah, S. Sabharwal, Evaluation of the efficiency and throughput of a gamma irradiator treating municipal sewage sludge. *Appl Radiat Isotopes*, 69 (3), 604-606.

[14] K. Krishnamurthy, Parametric relationships for gamma dose and irradiation homogeneity in a sewage sludge irradiator. *Int J Radiat Appl Instrum Part C Radiat Phys Chem*, 28 (4): 381-386, 1986.

[15] T. Lessel, Disinfection of sewage sludge by gamma raddition, electron beems and alternative methods, IAEA-TECDOC-971, Sewage sludge and wastewater for use in agriculture, Vienna, 1997.

[16] C. N. Kurucz, T. D. Waite, W.; J. Cooper, The Miami electron beam research facility: a large scale wastewater treatment application. *Radiat Phys Chem*, 45 (2): 299-308, 1995.

[17] B. Han, J.K. Kim Y. Kim, J.S. Choi, K.Y. Jeong, Operation of industrial-scale electron beam wastewater treatment plant. *Radiat Phys Chem*, 81, 1475-1478, 2012.

[18] O.M. Lee, H.Y. Kim, W. Park, T.H. Kim, S.Yu, A comparative study of disinfection efficiency and regrowth control of microorganism in secondary wastewater effluent using UV, ozone, and ionizing irradiation process. *J Hazard Mater*, 295, 201-208. 2015.

Journal of Radiation and Nuclear Technology

JRNT
Journal of Radiation and Nuclear Technology

Journal of Radiation and Nuclear Technology / Vol. 04/ No. 02/ Summer 2017

Review on some applications of ionizing radiation in water, sewage effluent and sludge refinement on an industrial scale

B. Asgari Lajayer[1*], N. Najafi[2], E. Moghiseh[3]

[1]*Ph.D Student of Soil Science, College of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, East Azerbaijan, Iran.*
[2] *Associate Professor of Soil Science, College of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, East Azerbaijan, Iran.*
[3]*Assistant Professor of Soil Science, Department of Nuclear Agriculture, Atomic Energy Organization of Iran, Tehran, Iran*

* *Corresponding author's Email:* h-asgari@tabrizu.ac.ir

(Received: 27/04/2017- Accepted: 10/06/2017)

ABSTRACT

With industrialization of countries and increasing concentrations of various pollutants in the environment, developing new technologies especially nuclear technology such as ionizing radiation has been proposed for removing of environmental pollutants. In development of new methods have both conditions economically feasible and environmentally friendly. From the ionizing radiation, gamma and electron beam radiations may be used to removing contaminants and refinement of water, sewage effluent and sludge. The use of electron beam radiation for treatment and disinfection of water or effluent on industrial scale is preferred to gamma radiation due to its advantages such as generating high levels of free radicals in time, lack of replacement costs and reducing annual activity radioisotope's gamma source, no radioactive source, comfortable control in emergencies, repairs, maintenance and switching on and off immediately. Most laboratory studies of ionizing radiation, are done by using gamma radiation especially cobalt-60 source due to ease of using gamma ray Application of ionizing radiation on industrial scale has been growing in recent years in the world. With the construction and operation of the treatment plants in Iran, the production capacity of wastewater and sewage sludge and the necessity of their safe using as fertilizer or water resources have been increased in agricultural crops. On the other hand, by implementing Joint Comprehensive Plan of Action (JCPOA) with the leading countries in laying the groundwork is inevitable to carry out research, design and construction of irradiation systems for disinfection of wastewater and sewage sludge on industrial scale.

Keywords: *Environmental contaminants, Ionizing radiation, Irradiation systems, Nuclear technology*