

## پرتوهای یون‌ساز و تأثیر کاربرد آن بر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و

### زیستی پساب فاضلاب

حمایت عسگری لجایر<sup>۱</sup>، نصرت‌اله نجفی و ابراهیم مقیسه

دانشجوی دکتری گروه علوم و مهندسی خاک دانشگاه تبریز. [h-asgari@tabrizu.ac.ir](mailto:h-asgari@tabrizu.ac.ir)

دانشیار گروه علوم و مهندسی خاک دانشگاه تبریز. [n-najafi@tabrizu.ac.ir](mailto:n-najafi@tabrizu.ac.ir)

استادیار پژوهشکده کشاورزی هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران. [emoghiseh@nrcam.org](mailto:emoghiseh@nrcam.org)

دریافت: شهریور ۱۳۹۴ و پذیرش: مرداد ۱۳۹۵

#### چکیده

منابع تأمین مواد آلی و آب برای خاک‌های زیر کشت ایران محدود بوده و جوابگوی نیاز روزافزون بخش کشاورزی به کودهای آلی و آب نیست. بنابراین، به دلیل کمبود این منابع، استفاده از لجن فاضلاب و پساب پیشنهاد شده است. پساب، فاضلاب و لجن فاضلاب بسته به منشأ آن‌ها دارای انواع آلودگی‌های میکروبی، آلی و معدنی بوده، لذا استفاده از روش‌های نوین گندزدایی و تصفیه آن‌ها پیش از مصرف ضروری است. یکی از این شیوه‌ها استفاده از روش پرتوتابی برای گندزدایی پساب و لجن فاضلاب می‌باشد. امکان استفاده از پرتوهای غیریون‌ساز ماورای بنفش (UV) و یون‌ساز گاما و بیم الکترون برای گندزدایی پساب وجود دارد. سازوکار متفاوت گندزدایی پرتو یون‌ساز (تشکیل رادیکال‌های آزاد هیدروکسیل، هیدروژن، الکترون‌هیدراته و غیره) و غیریون‌ساز (آسیب مستقیم به DNA ریزجانداران و تشکیل ترکیب‌های نوری مانند دایمر پیریمیدین) باعث شده روش پرتوهای غیریون‌ساز UV به عوامل محیطی مانند مقدار جامدات معلق، مواد آلی و معدنی قابل اکسایش، اکسیژن محلول، pH، دما و غیره وابسته باشد. از معایب دیگر UV در مقایسه با پرتوهای یون‌ساز می‌توان به محدودیت استفاده از آن صرفاً برای گندزدایی پساب ثانویه، امکان رشد مجدد ریزجانداران غیرفعال شده با آن و تغییرات فصلی بازده گندزدایی اشاره نمود. برای گندزدایی لجن فاضلاب فقط می‌توان از پرتوهای یون‌ساز استفاده کرد. در بین پرتوهای یون‌ساز، پرتو گاما نسبت به بیم الکترون مزایایی مانند قدرت نفوذ عالی، امکان پرتودهی سطح مقطع ضخیم تراز لجن، دُر کشنده پایین برای حذف عوامل بیماری‌زا و غیره داشته که باعث استفاده گسترده‌تری از آن می‌شود. با توجه به نتایج رضایت‌بخش استفاده از پرتوهای یون‌ساز در تصفیه و گندزدایی پساب، فاضلاب و لجن فاضلاب در نقاط مختلف دنیا، نتایج بررسی حاضر می‌تواند تأکیدی بر امکان استفاده از روش پرتوتابی یون‌ساز در گندزدایی پساب، فاضلاب و لجن فاضلاب در ایران باشد.

واژه‌های کلیدی: پرتوهای یون‌ساز، پساب، فن‌آوری هسته‌ای، لجن فاضلاب، گاما.

<sup>۱</sup> - آدرس نویسنده مسئول: تبریز، دانشگاه تبریز، دانشکده کشاورزی، گروه علوم و مهندسی خاک.

## مقدمه

در ایران از یک طرف به دلیل رشد روزافزون جمعیت، افزایش تقاضا برای آب و غذا، محدودیت منابع آب و خشکسالی‌های اخیر، بحران آب تشدید شده (کاه‌فروشان و عادل، ۱۳۹۳) و از طرف دیگر در بیش از ۶۰ درصد اراضی زیر کشت آن، میزان مواد آلی کمتر از یک درصد و در بخش قابل توجهی کمتر از ۰/۵ درصد می‌باشد (نجفی و همکاران، ۱۳۹۱). این در حالی است که مقدار بهینه مواد آلی با توجه به نقش آن در بهبود ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی، زیستی و حاصلخیزی خاک، بین دو تا سه درصد گزارش شده است (سماوات و همکاران، ۱۳۹۰). تمرکز مراکز جمعیتی و صنعتی در نقاط مختلف باعث شکل‌گیری حجم زیادی از فاضلاب شده که تصفیه آن‌ها منجر به تولید پساب و لجن زیادی شده است، به طوری که عدم توجه به یافتن بهترین شیوه‌های دفع آن‌ها، دشواری‌های زیست محیطی زیادی را ایجاد کرده است (پارسافر و همکاران، ۱۳۹۴). منابع تأمین مواد آلی و آب برای خاک‌های زیر کشت ایران محدود بوده و جوابگوی نیاز روزافزون بخش کشاورزی به کودهای آلی و آب نیست. بنابراین، در سال‌های اخیر کاربرد لجن فاضلاب و پساب در خاک‌های کشاورزی به دلایل غنی بودن آن‌ها از مواد آلی و عناصر غذایی و به عنوان جایگزین خوبی برای آب‌های با کیفیت مناسب در کشاورزی و صرفه‌جویی در منابع آبی موجود، مورد توجه قرار گرفته است (نجفی و همکاران، ۱۳۹۱؛ کاه‌فروشان و عادل، ۱۳۹۳).

فرآیندهای به‌طور متداول استفاده شده برای تصفیه فاضلاب یا تثبیت لجن مانند لجن فعال، هضم هوازی و بی‌هوازی، تثبیت قلیایی، کمپوست کردن، خشک کردن از طریق هوا یا حرارت و غیره، قادر به حذف کامل بیمارگرها، حذف مواد شیمیایی آلی پیچیده و دیگر آلاینده‌ها نبوده و استفاده از این‌ها می‌تواند بالقوه برای محصولات کشاورزی، انسان و دام خطرناک باشد و می‌بایست قبل از استفاده‌های کشاورزی و یا دفع در محیط

زیست‌گندزدایی شوند (عسگری لجایر و همکاران، ۱۳۹۴). در حال حاضر، با توجه به معایب روش‌های متداول گندزدایی پساب و لجن فاضلاب از قبیل مشکلات زیست محیطی، عدم گندزدایی کامل و رشد مجدد بیمارگرها و غیره، برای تصفیه و گندزدایی بهتر این مواد، تکنیک گندزدایی پرتوهای یون‌ساز پیشنهاد شده است (واتانیل و تاکاهیسا، ۱۹۸۴؛ پانديا و همکاران، ۱۹۸۷؛ ال-موتایم و همکاران، ۲۰۰۶).

پرتوهایی که در برهمکنش با مولکول‌های آب سبب برانگیختگی و یا یونیزه شدن آنها می‌شوند، پرتوهای یون‌ساز نامیده می‌شوند؛ به طوری که، جذب انرژی پرتو به وسیله مولکول‌های آب باعث یونیزه شدن آن و تشکیل رادیکال‌های آزاد اکسنده [رادیکال هیدروکسیل ( $\text{OH}\cdot$ ) و پراکسید هیدروژن ( $\text{H}_2\text{O}_2$ )] و کاهنده [هیدروژن ( $\text{H}\cdot$ ) و الکترون هیدراته]<sup>۲</sup> ( $\text{e}_{\text{aq}}^-$ ) می‌شود (عسگری لجایر و همکاران، ۱۳۹۴). پاره‌ای از خصوصیات پرتوهای یون‌ساز نظیر واحد، قدرت و آهنگ دز پرتو در جدول ۱ اشاره شده است (گتاف، ۲۰۰۲).

بررسی منابع نشان داد که با وجود کاربرد پرتوهای یون‌ساز در تصفیه و گندزدایی فاضلاب و لجن فاضلاب در نقاط مختلف دنیا (جدول ۲)، مطالعه‌ای در داخل کشور در ارتباط با تأثیر پرتوهای یون‌ساز بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی و بیولوژیکی فاضلاب، لجن فاضلاب و پساب انجام نشده است. بنابراین، در این مقاله تلاش گردید تا تأثیر پرتوهای یون‌ساز بر ویژگی‌های شیمیایی و بیولوژیکی فاضلاب، لجن فاضلاب و پساب با اتکا بر پژوهش‌های انجام شده مورد بررسی قرار گیرد.

## تأثیر پرتوتابی بر ویژگی‌های زیستی پساب و فاضلاب

رشد روز افزون جمعیت و افزایش تقاضا برای آب و غذا از یک سو و محدودیت منابع آب و خشکسالی‌های اخیر از سوی دیگر، نظر برنامه‌ریزان و

<sup>2</sup> Hydrated electron

بازده غیرفعال‌سازی، ایمنی، اثرات زیست محیطی و هزینه، مقایسه و نتایج را به صورت جدول ۳ گزارش کرده‌اند.

در کشورهای در حال توسعه برای گندزدایی عمدتاً از روش‌های شیمیایی مبتنی بر ترکیبات کلر [شامل کلرین ( $Cl_2$ )، هیپوکلریت سدیم (ClONa)، کلرآمین (RNHCl)، دی‌اکسید کلر ( $ClO_2$ ) و کلرید برم (CIBr)] به دلایل سهولت کاربرد و هزینه کمتر استفاده می‌کنند (عابدی کوپائی و همکاران، ۱۳۹۴)، اما به دلیل مخاطرات زیست محیطی ترکیبات کلر شامل تشکیل ترکیبات سمی و مقاوم‌تر از ترکیبات اولیه از قبیل تری‌هالومتان‌ها (کلروفرم، تری‌کلرومتان، تری‌کلرواتان، تتراکلرواتان، تتراکلرید کربن و غیره) و برخی معایب دیگر شامل مؤثر بودن به عنوان یک باکتری‌کش و تأثیر کمتر به عنوان یک ویروس‌کش، امکان رشد مجدد جانداران بیمارگر، امکان سمیت پساب کلرزی شده برای آبزیان و غیره، این روش تقریباً منسوخ شده است. به هر حال، آگاهی از اثرات زیست محیطی کلر، منجر به توسعه سامانه‌های گندزدایی جایگزین پرتو ماورای بنفش ( $UV^6$ ) و ازون شده است. هر دوی ازون و UV مواد گندزدایی کننده مؤثر برای طیف وسیعی از جانداران بیمارگر بوده، اما برای عملی شدن از لحاظ اقتصادی و فنی به پساب با کیفیت ثانویه نیاز دارد (رود و همکاران، ۱۹۸۹). در حال حاضر تحقیقات بر روی گندزدایی پساب و فاضلاب توسط پرتوهای یون‌ساز به دلایل وابستگی محیطی (از جمله مقدار جامدات معلق، مواد آلی و معدنی قابل اکسایش، اکسیژن محلول، pH، دما و غیره) روش‌های گندزدایی شیمیایی مانند کلر و ازون (طاهری و همکاران، ۲۰۱۰) و UV (لی و همکاران، ۲۰۱۵) و کاربرد پرتو غیر یون‌ساز مانند UV صرفاً در گندزدایی پساب (رود و همکاران، ۱۹۸۹)، در اولویت هستند.

متخصصان علوم آب را به استفاده از آب‌های نامتعارف<sup>۳</sup> (آب‌های با کیفیت نامطلوب مانند آب‌های شور، پساب‌ها و فاضلاب‌ها) معطوف کرده است (کاه‌فروشان و عادل، ۱۳۹۳).

مشخصه اصلی فاضلاب‌های انسانی، میزان نیاز شیمیایی و بیوشیمیایی به اکسیژن ( $COD^4$  و  $BOD^5$ ) بالا، عناصر غذایی و عوامل بیماری‌زای باکتریایی و انگلی بوده و در صورت عدم نفوذ فاضلاب‌های صنعتی فاقد فلزات سنگین در حد خطرزا می‌باشند (بی‌نام، ۱۳۸۹). بوری و همکاران (۱۹۹۸) گزارش کردند که وجود انواع باکتری‌های هتروتروف در فاضلاب به دلیل نقش آن‌ها در اکسایش مواد آلی ضروری است، ولی باید با استفاده از روش مؤثر گندزدایی در انتهای فرآیند تصفیه حذف شوند. گندزدایی به حذف یا کم کردن بار میکروبی فاضلاب، پساب و غیره با استفاده از روش‌های شیمیایی و فیزیکی اطلاق می‌گردد (آچر و همکاران، ۱۹۹۷).

برای گندزدایی بررسی و شناسایی همه ریزجانداران بیمارگری که پتانسیل بیماری‌زایی در انسان دارند، لازمه ارزیابی جامع کیفیت زیستی می‌باشد؛ ولی به دلیل مشکلات تعیین نوع و تعداد عوامل بیماری‌زا مانند هزینه‌های زیاد تجهیزات آزمایشگاهی، پرسنل و غیره، تعدادی از ریزجانداران با منشأ روده‌ای مانند کلیفرم کل و مدفوعی به عنوان شاخصی برای برآورد و تعیین سرنوشت ریزجانداران بیمارگر روده‌ای در پساب و فاضلاب بررسی می‌شوند (انجمن بهداشت عمومی آمریکا، ۱۹۹۸). روش‌های گندزدایی پساب در سه دسته شیمیایی، فیزیکی و فوتوشیمیایی طبقه‌بندی شده، به طوری که روش گندزدایی مناسب بر اساس پارامترهای کیفیت پساب، روش‌های دفع یا استفاده پساب، نگرانی‌های زیست محیطی و عوامل اقتصادی انتخاب می‌شود (آچر و همکاران، ۱۹۹۷). رود و همکاران (۱۹۸۹) روش‌های مختلف گندزدایی فاضلاب را از جنبه‌های مختلف نظیر

<sup>3</sup> Unconventional water

<sup>4</sup> Chemical oxygen demand

<sup>5</sup> Biochemical oxygen demand

<sup>6</sup> Ultraviolet

جدول ۱- واحد، قدرت<sup>۷</sup> و آهنگ دز<sup>۸</sup> انواع پرتوهای یون ساز (گتاف، ۲۰۰۲)

واحد‌های دز پرتوهای مختلف	قدرت و آهنگ دز پرتوهای مختلف			نوع پرتو
	آهنگ دز (Mrad h <sup>-1</sup> )	قدرت (kW)	آهنگ دز	
100 erg g <sup>-1</sup> = 6.24 × 10 <sup>13</sup> eV g <sup>-1</sup>	1 rad	1.8 × 10 <sup>-3</sup>	0.5 × 10 <sup>-8</sup>	X-rays: 10 mA, 250 kV
1 J kg <sup>-1</sup> = 1 Gray (Gy)	100 rad			<sup>60</sup> Co gamma-source
10 J kg <sup>-1</sup> = 10 Gy	1krad	65	0.18	0.5 × 10 <sup>6</sup> Ci
10 <sup>4</sup> 10 J kg <sup>-1</sup> = 10 <sup>4</sup> Gy	1Mrad	130	0.36	1 × 10 <sup>6</sup> Ci
1000 J kg <sup>-1</sup> = 1000 Gy	1 kGy			Electron accelerators
1 mA × 1 MeV = 3.6 × 10 <sup>6</sup> J kg <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup> = 360 Mrad kg <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup>	1 kW	7.2 × 10 <sup>5</sup>	2	Vande Graaff (1 mA, 2 MeV)
		3.6 × 10 <sup>7</sup>	100	Rhodotron (20 mA, 5 MeV)
		3.6 × 10 <sup>7</sup>	100	Rhodotron (10 mA, 10 MeV)
		7.2 × 10 <sup>7</sup>	200	Dynamitron (40 mA, 5 MeV)
		1.8 × 10 <sup>8</sup>	500	Linac (50 mA, 10 MeV)

جدول ۲- نمونه‌هایی از کاربرد صنعتی پرتوهای یون ساز برای تصفیه فاضلاب و لجن فاضلاب در نقاط مختلف جهان

کشور	منبع پرتو	انرژی (MeV)	قدرت (kW) یا فعالیت (kCi)	هدف	دز (کیلوگری)	مرجع
استرالیا	<sup>60</sup> EBA	۰/۵	۱۲/۵	حذف TCE و PCE <sup>۱۱</sup>	۰/۲-۲	بورلی و همکاران (۱۹۹۸)
آمریکا	EBA	۱/۵	۷۵	گندزدایی مواد آلی	۲-۱۰	بورلی و همکاران (۱۹۹۸)
ژاپن	EBA	۲	۶۰	گندزدایی-کمپوست‌سازی	۵	بورلی و همکاران (۱۹۹۸)
هند	<sup>60</sup> Co	۱/۲۵	۱۵۰	گندزدایی لجن فاضلاب	۵	بورلی و همکاران (۱۹۹۸)
آلمان	<sup>60</sup> Co	۱/۲۵	۱۵۰	گندزدایی لجن فاضلاب	۲	بورلی و همکاران (۱۹۹۸)
آمریکا	<sup>137</sup> Cs	-	-	گندزدایی لجن فاضلاب	۱۰	ویکرامایاکا و اسپرول (۱۹۹۰)
کره	EBA	۱	۴۰۰	گندزدایی فاضلاب صنعت نساجی داگو	۱	هان و همکاران (۲۰۱۲)

جدول ۳- خلاصه مقایسه روش‌های گندزدایی فاضلاب (رود و همکاران، ۱۹۸۹)

شاخص‌ها	گاز کلر	هیپوکلریت سدیم	ازون	UV	کلاری فلاو <sup>۱۲</sup>	دی اکسید کلر	کلرید برم	پرتوتابی یون ساز
باکتری کش	خوب	خوب	خوب	خوب	خوب	خوب	خوب	خوب
ویروس کش	ضعیف	ضعیف	خوب	خوب	خوب	خوب	نسبتاً خوب	خوب
رشد مجدد	بله	بله	خیر	بله	خیر	بله	بله	خیر
سمیت آبزیان	سمی	سمی	غیرمنتظره	غیرسمی	موضعی	سمی	متوسط	؟
محصولات فرعی	بله	بله	کم	خیر	لجن	کم	بله	؟
خطرناک								
خوردندگی	بله	بله	بله	خیر	خیر	بله	بله	خیر
خطرات ایمنی برای مردم	بله	خیر	خیر	خیر	خیر	خیر	بله	بله
خطرات ایمنی	زیاد	متوسط	متوسط	کم	کم	زیاد	متوسط	زیاد
متصدی								
پیچیدگی نسبی	ساده	ساده	پیچیده	ساده	متوسط-پیچیده	متوسط	متوسط	پیچیده
تکنولوژی	متوسط	متوسط	متوسط	متوسط	متوسط	متوسط	متوسط	متوسط
کنترل فرآیند	خوب	خوب	در حال توسعه	در حال توسعه	در حال توسعه	در حال توسعه	در حال توسعه	در حال توسعه
اندازه کارخانه	همه اندازه‌ها	همه اندازه‌ها	متوسط-بزرگ	متوسط-کوچک	کوچک-متوسط	متوسط-بزرگ	همه اندازه‌ها	متوسط-بزرگ
پیش تیمار مورد نیاز	هیچ کدام	هیچ کدام	هیچ کدام	هیچ کدام	هیچ کدام	هیچ کدام	هیچ کدام	هیچ کدام
هزینه	کم	کم	زیاد	متوسط	متوسط	متوسط	متوسط	زیاد

<sup>7</sup> Power radiation

<sup>8</sup> Dose rate

<sup>9</sup> Electron beam accelerator

<sup>10</sup> Trichloroethylene

<sup>11</sup> Perchloroethylene

<sup>12</sup> Example lime

با بررسی دز مورد نیاز برای کشتن باکتری‌ها در فاضلاب خام و لجن گزارش کردند که مقدار باکتری‌ها در فاز آبی بسیار کمتر از لجن بوده و به دلیل اثر رقت، دز مورد نیاز برای نابودی کامل آن‌ها در لجن و فاضلاب خام به ترتیب شش و یک کیلوگری و دز لازم برای کاهش ۹۰ درصدی جمعیت آن‌ها ( $D_{10}$ ) نیز به ترتیب ۰/۶۷ و ۰/۱۷ کیلوگری بود. فاروق و همکاران (۱۹۹۳) با بررسی تعداد کلی‌فاژ، کلیفرم و کل باکتری‌ها به عنوان شاخص میکروبیولوژیکی در فاضلاب خام و پساب ثانویه تحت تأثیر دزهای یک، دو و پنج کیلوگری پرتوهای بیم الکترون و گاما گزارش نمودند که پرتو بیم الکترون با دز پنج کیلوگری به کاهش تقریباً ۱۰۰۰ برابری هر سه گروه جانداران در فاضلاب خام منجر گردید؛ در حالی که با همان دز پرتوی گاما، میزان غیرفعال‌سازی هر سه جاندار یک تا دو مرتبه بیشتر بود. پرتوتابی فاضلاب خام با هر دو نوع پرتو، نشان دهنده‌ی مقاومت بالای کلی‌فاژ در مقایسه با کلیفرم و باکتری‌های کل بود.

در هر دز جذبی، نسبت غیرفعال‌سازی کلیفرم و باکتری‌های کل تقریباً مشابه بوده که نشان از حذف غیرانتخابی عوامل بیماری‌زا با پرتوتابی و رادیکال‌های حاصل از آن‌ها است. نتایج غیرفعال‌سازی هر سه جاندار با هر دو نوع پرتو در پساب ثانویه تقریباً مشابه فاضلاب خام بود، با این تفاوت که غیرفعال‌سازی در فاضلاب خام بهتر از پساب ثانویه بوده و دلیل احتمالی این امر، تراکم بیشتر جانداران در فاضلاب خام، در نتیجه تراکم هدف بیشتر برای غیرفعال‌سازی بیان شد. غیرفعال‌سازی کمتر جانداران در پساب ثانویه در مقایسه با فاضلاب خام با نتایج قابل انتظار در تضاد بود، به طوری که پساب ثانویه محتوی ذرات و مواد آلی کمتر بوده که با در نظر گرفتن نقش این ذرات در حفاظت جانداران از اثرات مستقیم پرتو، بایستی شانس بقای جانداران در برابر پرتوتابی در پساب کمتر می‌بود. طاهری و همکاران (۲۰۱۰) گزارش کردند که مقادیر  $D_{10}$  برای کلیفرم کل و مدفوعی در فاضلاب خام به ترتیب ۰/۳۲ و ۰/۴ کیلوگری و در پساب

لی و همکاران (۲۰۱۵) با بررسی بازده گندزدایی، مصرف انرژی الکتریکی برای گندزدایی، کنترل رشد مجدد ریزجانداران (شمارش کل میکروبی و کلیفرم کل) در پساب ثانویه پرتوتابی شده با گاما (دز ۱-۰/۱ کیلوگری)، UV و ازون گزارش کردند که بازده گندزدایی UV در طول زمستان ۹۲-۹۹ و ۹۳-۹۹ درصد و در طول تابستان ۲۹-۳۷ و ۳۴-۹ درصد به ترتیب برای شمارش کل میکروبی و کلیفرم کل بود. بازده گندزدایی پرتو گاما با افزایش دز جذبی افزایش داشته (بازده ۶۵-۹۰ و ۹۶-۱۰۰ درصد به ترتیب در دز یک دهم و یک کیلوگری) و تحت تأثیر تغییرات فصلی قرار نگرفت. سازوکار متفاوت گندزدایی پرتو گاما و UV دلیل تغییرات فصلی بازده گندزدایی UV و عدم تغییرات آن با پرتو گاما بود. آسیب مستقیم به DNA و تشکیل ترکیب‌های نوری مانند دایمر پیریمیدین سازوکار عمده گندزدایی UV بوده؛ بنابراین گندزدایی با ویژگی‌هایی مانند مجموع مواد معلق ( $TSS^{13}$ )، دما، بارندگی، فاصله از منبع نور و غیره متأثر گردید. در طول فصل تابستان دما، TSS و بارندگی بیشتر بود.

افزایش بارندگی باعث زیاد شدن TS و TSS در فاضلاب و افزایش حفاظت از جانداران در برابر پرتو UV و با افزایش دما نیز تنفس و رشد ریزجانداران افزایش و به تبع آن بازده گندزدایی کاهش یافت. آسیب عمده پرتو گاما با تولید رادیکال‌های آزاد و به صورت غیرمستقیم بوده و تحت تأثیر تغییرات فصلی نبود. گندزدایی پرتو UV موقتی بوده و ریزجانداران غیرفعال شده با UV توان بازسازی DNA و رشد مجدد با سازوکارهای بازسازی مجدد نوری و تاریکی داشتند. علاوه بر این، UV و ازون برای گندزدایی به مصرف انرژی الکتریکی ۲-۳ مرتبه بیشتر نسبت به پرتو گاما نیاز داشتند. به طور کلی، پرتو گاما در گندزدایی پساب نهایی نسبت به لجن فاضلاب هضم شده بیشتر مؤثر است (پانديا و همکاران، ۱۹۸۷). ال-موتایم و همکاران (۲۰۰۲)

<sup>13</sup> Total suspended solid

ثانویه به ترتیب ۰/۳ و ۰/۳۶ کیلوگری به دست آمد، همچنین غیر فعال‌سازی کامل و بدون رشد مجدد این جانداران در فاضلاب خام و پساب ثانویه به ترتیب در دز ۱/۵ و ۲ کیلوگری حاصل شد. مقاومت انواع باکتری‌ها به پرتوتابی بالا بوده و مقدار  $D_{10}$  آن در فاضلاب خام و پساب ثانویه به ترتیب ۱/۴۵ و ۱/۳۸ کیلوگری به دست آمد، به طوری که علت نیاز به دزهای بالاتر برای غیرفعال‌سازی انواع باکتری‌ها، یکسان نبودن مقاومت آن‌ها به پرتوتابی ذکر شد.

وجود غلظت‌های متفاوت مواد شیمیایی در فاضلاب خام و پساب ثانویه و به تبع آن کاهش محصولات رادیولیز آب (مانند رادیکال هیدروکسیل) برای تحت تأثیر قرار دادن جانداران بیمارگر از طریق واکنش این محصولات با مواد شیمیایی، همچنین متفاوت بودن غلظت اکسیژن محلول در فاضلاب خام و پساب ثانویه (در پساب ثانویه بالاتر از فاضلاب خام بوده) و رابطه هم‌افزایی<sup>۱۴</sup> پرتوتابی با اکسیژن، دلیل متفاوت بودن  $D_{10}$  مورد نیاز برای غیرفعال‌سازی کلیفرم کل، مدفوعی و کل جمعیت باکتریایی در فاضلاب خام و پساب ثانویه بود. راوات و همکاران (۱۹۹۸) نیز گزارش کردند که بار میکروبی پساب اولیه و ثانویه در مقایسه با فاضلاب خام کم‌تر بوده و به همین دلیل برای حذف قابل اطمینان کلیفرم (کمتر از  $10^5$  CFU/mL) به دزهای پایین‌تری از پرتو گاما نیاز بود؛ به طوری که کاهش جمعیت کلیفرم به حدود مجاز در هر دو نوع پساب و فاضلاب خام به ترتیب در دز ۰/۴ و ۲ کیلوگری پرتو گاما حاصل شد. مقادیر  $D_{10}$  کلیفرم برای فاضلاب خام، پساب اولیه و ثانویه به ترتیب ۰/۳، ۰/۲ و ۰/۲۲ کیلوگری به دست آمد. با استناد به مطالب ذکر شده می‌توان بیان نمود، استفاده از پرتوهای یون‌ساز جزء روش‌های نوین گندزدایی بوده است. به طوری که، استفاده از آن‌ها در گندزدایی آب و فاضلاب در نقاط مختلف دنیا بررسی شده است، ولی

متأسفانه در کشور ما در زمینه کاربرد فناوری پرتوتابی یون‌ساز در گندزدایی فاضلاب، ارتقای بهداشت عمومی و حفاظت محیط زیست با این پرتوها، تحقیقاتی انجام نشده و یا مقاله‌ای چاپ نشده است. بنابراین، در تحقیقات آتی مقایسه ویژگی‌های بیولوژیکی و شیمیایی پساب و فاضلاب پرتوتابی شده با استانداردهای موجود در ایران اهمیت خاصی دارد. با توجه به نبود اطلاعات در مورد امکان استفاده از روش پرتوتابی در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب کشور و تجربه موفق کشورهای دیگر در استفاده از این روش، آیا می‌توان در کشور ما با بهره‌برداری از این روش، پساب‌های با کیفیت بهتر برای استفاده‌های مختلف به دست آورد یا خیر؟

#### تأثیر پرتوتابی بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی پساب و فاضلاب

با توجه به بحران کمبود منابع آب و لزوم بهره‌برداری از آب‌های نامتعارف (عابدی کوپائی و همکاران، ۱۳۹۴)، تولید فاضلاب مازاد بر ظرفیت تصفیه‌خانه‌های فاضلاب در شهرهای مختلف، آزادسازی پساب و فاضلاب بدون تصفیه به محیط‌زیست و زمین‌های کشاورزی از یک سو (شایگان و افشاری، ۱۳۸۳)، وجود آلودگی‌های میکروبی و انواع ترکیبات آلی و معدنی مختلف مانند عناصر غذایی، انواع آلاینده‌های آلی و معدنی مانند فلزات سنگین، ترکیبات هالوژنه، باقیمانده داروها و مواد شیمیایی سمی فاضلاب‌های بیمارستانی و غیره در پساب و فاضلاب و عدم توانایی تکنیک‌های به‌طور متداول استفاده شده تصفیه فاضلاب در حذف آن‌ها و ورود این عناصر و آلاینده‌ها به خاک (کاه‌فروشان و عادل، ۱۳۹۳)، لزوم استفاده از تکنیک‌های جدید برای تصفیه فاضلاب، مانند پرتوتابی را آشکار می‌سازد. طاهری و همکاران (۲۰۱۰) نمونه‌های فاضلاب خام و پساب ثانویه را با دز صفر تا ۱۴ کیلوگری پرتوگاما پرتوتابی و بیان نمودند که تا دز هشت کیلوگری بر اثر شکستن ترکیبات آلی (از قبیل فنول، بنزن، تولوئن و غیره)

<sup>14</sup> Synergistic

<sup>15</sup> Colony forming unit

تجزیه آلاینده‌های آلی را سرعت می‌بخشد. آنان پساب ثانویه را پس از تهیه، با اشعه گاما و با دزهای صفر، ۵، ۱۰ و ۱۵ کیلوگری پرتوتابی کردند و در تیمار ترکیب پرتوتابی و کاتالیست دی‌اکسید تیتانیم، دو گرم از این ماده به هر نمونه آماده شده اضافه گردید. نتایج آنان نشان داد که تیمار پرتوتابی صرف نظر از دز آن، BOD را ۸۵ درصد کاهش داد. در دز ۱۵ کیلوگری به ترتیب ۶۴، ۳۴ و ۸۸ درصد COD، TOC<sup>۱۶</sup> و رنگ حذف شد. پرتوتابی به‌طور مؤثر و کامل ریزجانداران را در دز ۰/۳ کیلوگری حذف نمود. ترکیب پرتوتابی و کاتالیست دی‌اکسید تیتانیم فرآیندهای تصفیه را به‌طور معناداری بهبود بخشیده، به‌طوری که باعث افزایش حذف ۴۰، ۱۰ و ۲۰ درصد به ترتیب در COD، TOC و رنگ شدند.

هان و همکاران (۲۰۱۲) گزارش کردند که استفاده از دزهای جذبی بالاتر برای تجزیه کامل آلاینده‌ها، در مقیاس صنعتی از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه نبوده و بهتر است به تجزیه قسمتی از آلاینده‌ها و تبدیل آن‌ها به مولکول‌های زیست‌تخریب‌پذیر در مرحله‌های بعدی اکتفا شود. لذا، برای تصفیه فاضلاب مجتمع صنعتی رنگرزی داگو<sup>۱۷</sup> (DDIC) از پرتو یون‌ساز بیم الکترون با انرژی ۱MeV، قدرت ۴۰۰ kW و دز یک کیلوگری کوپل شده با فرآیندهای تصفیه بیولوژیکی معمولی استفاده شد. نتایج نشان دهنده افزایش قابلیت زیست‌تخریب‌پذیری (تبدیل رادیولیتیک ترکیبات آلی مقاوم به ترکیبات به آسانی زیست‌تخریب‌پذیر از قبیل اسیدهای آلی با وزن مولکولی کم)، افزایش بازده حذف COD و BOD<sub>5</sub> و کاهش زمان ماند هیدرولیکی در فرآیند لجن فعال تحت پرتوتابی بود. گو و همکاران (۲۰۰۸) با اضافه کردن کلرید کادمیم و سرب به انواع مختلف آب‌ها (آب زیرزمینی، آب سطحی، آب ورودی و پساب تصفیه‌خانه فاضلاب شهری)، غلظت این فلزات را به ۰/۱ میلی‌مول بر لیتر رسانده و اثرات تلفیقی پرتو گاما (دزهای ۱، ۲، ۴ و ۸ کیلوگری) با pH (۵، ۷ و ۹)، غلظت

به مولکول‌های آلی کوچک‌تر، pH به‌طور معناداری کاهش یافت. اثرات پرتوتابی بر غلظت نیتروژن، فسفر و پتاسیم معنادار نشد و این نشان دهنده حفظ ارزش غذایی پساب تحت پرتوتابی برای استفاده گیاهان بود. با افزایش دز پرتوتابی BOD<sub>5</sub> کاهش یافت، به‌طوری که کاهش ۴۵ و ۳۹ درصدی به ترتیب در فاضلاب خام و پساب ثانویه در دز ۱۴ کیلوگری مشاهده شد. کاهش مقادیر BOD<sub>5</sub> به افزایش معدنی شدن کربن آلی بر اثر افزایش دز پرتوتابی نسبت داده شد. به‌طور کلی، اثرات اکسایشی پرتوتابی بر آلاینده‌های آلی در فاضلاب با اندازه‌گیری مقادیر COD مشخص می‌شود. با افزایش دز پرتوتابی مقادیر COD به‌طور معناداری کاهش یافت.

کاهش مقادیر COD با پرتوتابی با اکسایش مواد آلی پیچیده و سمی در فاضلاب ارتباط داشت. راوات و همکاران (۱۹۹۸) با بررسی ویژگی‌های فیزیک و شیمیایی پساب اولیه و ثانویه تحت دزهای صفر، ۰/۴ و ۰/۶ کیلوگری پرتو گاما گزارش کردند که پرتوتابی به کاهش ۱۰، ۱۴ و ۲۰ درصدی به ترتیب در سختی کل، COD و BOD پساب اولیه منجر گردید. هدایت الکتریکی و اکسیژن محلول پساب اولیه نیز بر اثر پرتوتابی به ترتیب شش درصد و سه برابر افزایش یافت. پارامترهای فیزیک و شیمیایی پساب ثانویه پس از قرار گرفتن در معرض پرتو گاما تا حد زیادی بدون تغییر باقی ماند. سمپا و همکاران (۲۰۰۷) گزارش کردند که ترکیب پرتوهای یون‌ساز با اکسیدکننده‌هایی مثل ازون و پراکسید هیدروژن یا افزودن کاتالیست‌هایی مانند تیتانیم قبل از پرتوتابی، باعث افزایش بازده تخریب آلاینده‌های آلی از قبیل ترکیبات هالوژنه، رنگ و حشره‌کش‌ها می‌شود.

جونگ و همکاران (۲۰۰۲) نیز در گزارش مشابهی بیان کردند که روش پرتوتابی توانایی حذف آلاینده‌های آلی و جانداران بیمارگر را داشته و اخیراً برای افزایش بازده پرتوتابی از کاتالیست‌هایی مثل دی‌اکسید تیتانیم استفاده شده است. کاتالیست با افزایش بازده تولید رادیکال هیدروکسیل به‌عنوان غالب‌ترین گونه اکسنده،

<sup>16</sup> Total organic carbon

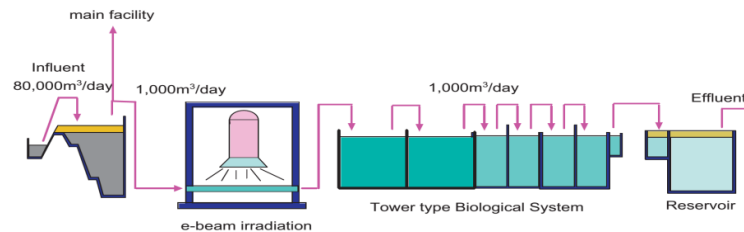
<sup>17</sup> Daegu Dyeing Industrial Complex

اکسیژن محلول؛ تولید یون کربنات و بیکربنات پس از اضافه کردن کربنات سدیم (۰/۱ میلی‌مول بر لیتر) و EDTA (۰/۵ میلی‌مول بر لیتر) بر حذف این فلزات را بررسی و گزارش کردند که در یک دز معین پرتوتابی، بیشترین بازده حذف فلزات مذکور از تلفیق آن دز با pH کم، غلظت اکسیژن محلول کم و کربنات سدیم و کمترین بازده حذف نیز از تلفیق آن با EDTA به‌دست آمد.

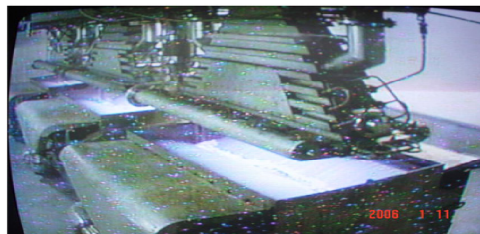
ولی با افزایش دز پرتوتابی در حضور تمام تیمارهای به کار برده شده، بازده حذف فلزات افزایش یافت. علت تأثیر مثبت pH کم، غلظت اکسیژن محلول کم و کربنات سدیم به‌ترتیب غالب بودن  $Pb^{2+}$  و  $Cd^{2+}$  در محلول‌های با pH پایین و کاهش مستقیم آن‌ها با گونه‌های کاهنده (الکترون هیدراته و رادیکال هیدروژن)؛ عدم کاهش غلظت گونه‌های کاهنده بر اثر واکنش با

اکسیژن محلول (۱/۸، ۷/۸ و ۱۸/۷ میلی‌گرم بر لیتر)، کربنات سدیم (۰/۱ میلی‌مول بر لیتر) و EDTA (۰/۵ میلی‌مول بر لیتر) بر حذف این فلزات را بررسی و گزارش کردند که در یک دز معین پرتوتابی، بیشترین بازده حذف فلزات مذکور از تلفیق آن دز با pH کم، غلظت اکسیژن محلول کم و کربنات سدیم و کمترین بازده حذف نیز از تلفیق آن با EDTA به‌دست آمد.

ولی با افزایش دز پرتوتابی در حضور تمام تیمارهای به کار برده شده، بازده حذف فلزات افزایش یافت. علت تأثیر مثبت pH کم، غلظت اکسیژن محلول کم و کربنات سدیم به‌ترتیب غالب بودن  $Pb^{2+}$  و  $Cd^{2+}$  در محلول‌های با pH پایین و کاهش مستقیم آن‌ها با گونه‌های کاهنده (الکترون هیدراته و رادیکال هیدروژن)؛ عدم کاهش غلظت گونه‌های کاهنده بر اثر واکنش با



شکل ۱- تصویر کوپل پرتوی یون‌ساز بیم الکترون با فرآیندهای تصفیه بیولوژیکی معمولی به‌صورت پابلوت برای تصفیه فاضلاب DDIC (هان و همکاران، ۲۰۱۲)



شکل ۲- تصویر فاضلاب تحت تیمار پرتو بیم الکترون (هان و همکاران، ۲۰۱۲)

باید از واکنش مجدد فلزات کاهش یافته با گونه‌های اکسندگی جلوگیری شود و برای این منظور و حذف گونه‌های اکسندگی (رادیکال هیدروکسیل) از اتانول استفاده شد. نتایج نشان‌دهنده حذف جیوه (۹۹/۹ درصد) و سرب (۹۵ درصد) از محلول آبی به‌ترتیب در دزهای ۳ و ۴۰ کیلوگری بود و همچنین دزهای بالاتر تا ۱۰۰ کیلوگری به اکسایش مجدد این فلزات منجر نشد. اهمیت عدم

چاپ‌چیان و همکاران (۱۹۹۸) نیز با بررسی اثر پرتوهای یون‌ساز گاما و بیم الکترون با دز ۱۰۰-۰ کیلوگری بر حذف سرب و جیوه، در محلول‌های آبی آماده شده با غلظت یک میلی‌مولار این فلزات گزارش کردند که گونه‌های کاهنده تولید شده بر اثر تداخل پرتو یون‌ساز و مولکول‌های آب منجر به کاهش این فلزات به ظرفیت‌های پایین‌تر و رسوب آن‌ها خواهد شد. به هر حال



تصفیه‌خانه‌های کشور از روش لجن فعال برای فرآیندهای تصفیه بیولوژیکی فاضلاب استفاده می‌کنند (شایگان و افشاری، ۱۳۸۳)، با در نظر گرفتن محدودیت‌های این روش، استفاده از روش پرتوتابی برای حفاظت محیط زیست ضروری است.

#### تأثیر پرتوتابی بر ویژگی‌های زیستی لجن فاضلاب

یکی از مشکلات استفاده از لجن فاضلاب وجود بیمارگرهای باکتریایی، انگلی و ویروسی بوده که با روش‌های متداول تصفیه و تثبیت لجن حذف نشده و باعث ورود آن‌ها به محیط‌زیست، خاک‌های کشاورزی و محصولات تولیدی از آن‌ها می‌شود. رحمانی و همکاران (۱۳۹۳) گزارش کردند که مقادیر کلیفرم کل و مدفوعی به‌عنوان شاخص آلودگی باکتریایی در لجن فاضلاب تصفیه شده تصفیه‌خانه شاهین شهر اصفهان تغییرات فصلی دارد. به‌طوری که، تعداد آنها در فصل تابستان کمترین و در زمستان بیشترین مقدار را به خود اختصاص داد.

همچنین، لجن فاضلاب تصفیه شده به غیر از فصل بهار دارای حد مجاز استاندارد سازمان حفاظت محیط‌زیست آمریکا برای کاربردهای کشاورزی نبود. به‌طور کلی، برای آشنایی به برخی عوامل بیماری‌زای لجن و بیماری‌های مرتبط در انسان در جدول ۴ اشاره شده است (ال-موتایم، ۲۰۰۶). در مورد لجن فاضلاب نیز پایش زیستی و بررسی وجود جانداران بیمارگر در آن برای اهداف کشاورزی اهمیت زیادی دارد. به‌دلیل مشکلات تعیین نوع و تعداد عوامل بیماری‌زا، مطالعات معمولاً بر روی جانداران شاخص انجام می‌گیرد. به‌طور کلی، بر اساس قوانین بخش ۵۰۳ سازمان حفاظت محیط زیست آمریکا، ریزجانداران شاخص برای بررسی عوامل بیماری‌زای باکتریایی، کلیفرم مدفوعی و سالمونلا و شاخص آلودگی انگلی، تخم آسکاریس لومبریکوئید می‌باشد (سازمان حفاظت محیط زیست آمریکا، ۱۹۹۳). به‌دلیل مطرح شدن روش‌های نوین گندزدایی لجن

اکسایش مجدد از جهت احتمال نیاز آلاینده‌های دیگر موجود در فاضلاب و پساب به دزهای بالاتر پرتوتابی برای حذف بود. هی و همکاران (۲۰۱۴) گزارش کردند مصرف زیاد مواد دارویی و محصولات مراقبت‌های شخصی<sup>۱۸</sup> (PPCPs)، عدم توانایی فرآیندهای تصفیه فیزیکی مانند فیلتراسیون (شامل نانوفیلتراسیون و اسمز معکوس) و بیولوژیکی مثل لجن فعال در تجزیه PPCPs و غیره، سبب انتشار این ترکیبات به رودخانه‌ها، دریاچه‌ها، آب زیرزمینی و حتی ذخایر آب آشامیدنی شده، به تبع آن نیز نگرانی‌های علمی و عمومی به‌دلیل پتانسیل بالای آن‌ها در آسیب زدن به اکوسیستم‌های آبی و سلامت انسان افزایش یافته است. فرآیندهای اکسایش پیشرفته (شامل ازن، واکنش فتون، فتولایز، سونولایز و پرتوتابی) به تولید رادیکال هیدروکسیل وابسته بوده و برای تخریب PPCPs پیشنهاد شده‌اند.

آنان تخریب دیکلوفناک<sup>۱۹</sup> (به‌عنوان یکی از PPCPs) از محلول‌های آبی با غلظت ۱۰ تا ۴۰ میلی‌گرم بر لیتر آماده‌سازی شده را با دز صفر تا دو کیلوگری پرتو بیم الکترون بررسی و گزارش کردند که تقریباً ۱۰۰ درصد دیکلوفناک در دز پرتوتابی ۰/۵ کیلوگری تخریب شدند. با توجه به مطالب ذکر شده می‌توان بیان نمود که اولاً گزارشی در ایران در زمینه تغییر ویژگی‌های شیمیایی فاضلاب و پساب تحت پرتوهای یون‌ساز وجود ندارد، شاید یکی از دلایل این امر مرتبط با هزینه بالای احداث مجتمع‌های پرتوتابی گاما در کشور بوده است.

امید است با طراحی و ساخت شتاب‌دهنده‌های الکترون به‌عنوان منابع ارزان‌تر پرتوهای یون‌ساز (تار، ۲۰۰۳)، موانع اقتصادی مربوطه مرتفع شده و تحقیقات مربوط به کاربرد روش‌های پرتوتابی و سایر روش‌های هسته‌ای در بخش محیط زیست و کشاورزی جهت حل مشکلات مربوط به این بخش‌ها و رفع نیازهای کشور انجام پذیرد. از طرف دیگر، با توجه به این که بخش عمده

<sup>18</sup> Pharmaceuticals and personal care products  
<sup>19</sup> Diclofenac

گاما نسبت به بیم الکترون مانند قدرت نفوذ عالی (حدود ۳۰۰ میلی‌متر) به مواد با خروجی و ورودی پرتو برابر، امکان پرتودهی سطح مقطع ضخیم‌تر از لجن (به صورت فله)، دز کشته پائین برای حذف عوامل بیماری‌زا و غیره باعث شده که پرتو گاما استفاده گسترده‌تری در گندزدایی لجن فاضلاب نسبت به پرتو بیم الکترون داشته باشد (عسگری لجاير و همکاران، ۱۳۹۴).

فاضلاب قبل از استفاده مثل روش پرتوتابی یون‌ساز و نبود تحقیقات ملی در این زمینه، به برخی مطالعات انجام شده در مورد میزان دز مورد نیاز پرتوهای یون‌ساز جهت گندزدایی و تأثیر دزهای مختلف بر ویژگی‌های زیستی لجن اشاره می‌گردد. به طور کلی، گزارش شده است که از پرتوهای یون‌ساز، پرتو گاما و بیم الکترون می‌تواند برای اهداف گندزدایی لجن فاضلاب استفاده شود. مزایای پرتو

جدول ۴- بیمارگرهای موجود در لجن فاضلاب و بیماری‌های مرتبط در انسان (ال-موتایم، ۲۰۰۶)

بیماری‌های مرتبط	بیمارگرهای انگلی	بیماری‌های مرتبط	بیمارگرهای ویروسی	بیماری‌های مرتبط	بیمارگرهای باکتریایی
آسکارازیس	آسکاریس لومبریکوئید	هیپاتیت	هیپاتیت-A	سالمونلوزیس	سالمونلا
وریدهای شکمی	گونه‌های کرم کدو	گاستروانتریت و فلج اطفال	روتا ویروس	تب تیفوئید	سالمونلا تیفیموریوم
ژباردبازیس	ژباردیا لامبلیا	گاستروانتریت	ویروس نوروالک	شیگلوزیس	شیگلا
اسهال خونی آمیبی	انتاموبا هیستولیسیتیکا	تب و عفونت مجرای تنفسی	رئو ویروس	اسهال	انتروکوکوس (استریتوکوک مدفوعی)
		عفونت چشم و مجرای تنفسی	آدنوویروس	اسهال	اشرشیا کلی
				وبا	ویبریو کلرا
				گاستروانتریت	کامپلیوباکتر ژژونی

پرتوتابی لجن به روشی تثبیت شده باشد. انجمن اقتصاد اروپا نیز استانداردی مشابه با سازمان حفاظت محیط زیست آمریکا توصیه نموده و تفاوت آن‌ها بین دز مورد نیاز برای گندزدایی لجن مایع و خشک بوده، به طوری که برای لجن مایع و خشک به ترتیب دز ۵ و ۱۰ کیلوگری را توصیه نموده است (ویکرامایاکا و اسپرول، ۱۹۹۰). چمیلوسکی (۲۰۰۷) گزارش داد که در تصفیه‌خانه مونیخ، دز پرتوتابی ۳-۲ کیلوگری منجر به نابودی بیش از ۹۹/۹ درصد باکتری‌های موجود در لجن فاضلاب شد. در تصفیه‌خانه بوستون و تصفیه‌خانه آلبرکوک اوکراین برای گندزدایی به ترتیب از دز ۴ و ۱۰ کیلوگری پرتو گاما استفاده می‌شود. مک کالسن و سیوینسکی (۱۹۸۰) یافتند که دز ۱۰ کیلوگری پرتو گاما به طور مؤثری باکتری‌های بیماری‌زا و انگل‌ها را در لجن فاضلاب خشک تخریب می‌نماید. کاپیزی و همکاران (۱۹۹۹) تأثیر تیمار پرتودهی بر زنده ماندن تخم آسکاریس را بررسی و گزارش کردند که تخم آسکاریس باید به طور مؤثر در دز ۱۰ کیلوگری توصیه شده به وسیله سازمان حفاظت محیط‌زیست آمریکا از لجن حذف شود. اتزل و همکاران (۱۹۶۹) تأثیر پرتو

دز کشته عوامل بیماری‌زا در لجن فاضلاب به فاکتورهای متعددی مانند تعداد اولیه عوامل بیماری‌زا، نوع عامل بیماری‌زا، مقدار رطوبت، مقدار اکسیژن، انرژی جذب شده، آهنگ دز، درجه حرارت و فرآیندهای تصفیه قبل از پرتودهی بستگی دارد (ال-موتایم، ۲۰۰۶؛ وانگ و وانگ، ۲۰۰۷). گزارش شده است که دز لازم برای گندزدایی لجن فاضلاب از ۲-۲۵ و عمدتاً بین ۳-۶ کیلوگری بسته به ویژگی‌های لجن متغیر بوده و در دز پرتوتابی ۴-۲، ۶-۴ و بالاتر از شش به ترتیب کاهش ۱۰، ۱۰۰۰ و بالاتر از ۱۰۰۰ برابر در کلیفرم‌ها حاصل شده است (آژانش بین‌المللی انرژی اتمی، ۲۰۰۲).

هاشیموتو (۱۹۸۸) دز پنج کیلوگری را برای گندزدایی مناسب لجن آبیگری شده مناسب دانسته‌اند. براندون (۱۹۷۸) نشان داد که دز کافی برای اطمینان از غیرفعال‌سازی تخم آسکاریس موجود در کیک لجن هضم شده و لجن کمپوست شده، ۱۰ کیلوگری بود. سازمان حفاظت محیط زیست آمریکا، پرتو گاما با دز ۱۰ کیلوگری را برای کاهش بیشتر جانداران بیمارگر در لجن فاضلاب شهری خشک توصیه نموده و بایستی قبل از

شده به مدت ۳۰ روز در دمای اتاق (۱۶-۶) و ۳۰ درجه سانتی‌گراد بود. ال بشیر و همکاران (۲۰۰۳) با بررسی اثرات هم‌افزایی پرتوتابی گاما (دزهای صفر، یک، دو، سه، چهار و پنج کیلوگری) و رطوبت [هوا خشک (۲)، ۲۰، ۴۰، ۶۰ و ۸۰ درصد] را بر شمارش تعداد کل میکروبی و عوامل بیماری‌گر باکتریایی از قبیل انتروباکتر، کلبسیلا، سالمونلا و اشرشیا کلی گزارش کردند که پایین‌ترین دز کشنده برای عوامل بیماری‌گر باکتریایی مورد آزمایش در لجن فاضلاب هوا خشک (دو درصد رطوبت)، پنج کیلوگری؛ در حالی‌که برای لجن فاضلاب مرطوب با رطوبت بیش از ۴۰ درصد دز کشنده یک کیلوگری به دست آمد. پیریدارشیمی و معظومدار (۲۰۱۴) تلفیق تیمارهای پرتوتابی ۱/۵، ۳ و ۵ کیلوگری پرتو گاما همراه با پاستوریزاسیون را به‌عنوان وسیله‌ای برای بهداشتی کردن لجن خام مرطوب (با رطوبت ۷۵-۶۵ درصد) بررسی و گزارش کردند دز پرتوتابی ۵-۱/۵ کیلوگری منجر به کاهش صد برابر در تعداد کلیفرم مدفوعی شد.

در نهایت دز پرتوتابی مناسب برای لجن پاستوریزه سه کیلوگری به دست آمد که در مقایسه با تحقیقات پیشین و توصیه دز پنج کیلوگری برای پرتوتابی لجن، این مقدار دز باعث صرفه‌جویی در انرژی پرتو خواهد شد. ویکرامایاکا و اسپرول (۱۹۹۰) بیان کردند که باکتری‌های روده‌ای گرم منفی در لجن با ۵۰ درصد مواد جامد،  $D_{10}$  برابر با ۰/۵ کیلوگری، تخم انگل آسکاریس لومبریکوئید در لجن مایع و کمپوست شده  $D_{10}$  برابر با ۰/۵ کیلوگری، اسپورهای قارچ *آسپرژیلوس فومیگاتوس* در لجن خشک،  $D_{10}$  برابر با ۰/۶-۰/۵ کیلوگری داشتند. ویروس‌ها نسبت به باکتری‌ها، قارچ‌ها و انگل‌ها مقاومت بیشتری به پرتوتابی داشته، به‌طوری‌که انتروویروس در لجن،  $D_{10}$  برابر با ۳/۳ کیلوگری داشت.

همچنین اغلب ویروس‌ها کاهش ۱۰۰۰ برابری با دز ۱۰ کیلوگری نشان دادند. ال-موتایم (۲۰۰۶) گزارش کرد که مقدار  $D_{10}$  برای غیرفعال‌سازی ویروس‌ها در لجن فاضلاب ۲/۵ کیلوگری به دست آمد. با استناد به مطالب

گاما با دزهای صفر، ۰/۵، ۱، ۲ و ۳ کیلوگری بر گندزدایی شاخص آلودگی میکروبی (کلیفرم و استرپتوکوک مدفوعی) لجن فعال مازاد و لجن فعال مازاد هضم شده بررسی و گزارش کردند که مقاومت استرپتوکوک مدفوعی به پرتو گاما بیشتر از کلیفرم بود، در نتیجه دزهای بالاتری از پرتو گاما برای رسیدن به درصد حذف یکسان استرپتوکوک مدفوعی مورد نیاز بود. دز کافی برای گندزدایی هر دو نوع لجن فاضلاب مورد آزمایش دو کیلوگری گزارش شد، به‌طوری‌که ۹۹/۹۹ و ۹۸ درصد به ترتیب کلیفرم و استرپتوکوک مدفوعی در این دز حذف شدند.

واتانیل و تاکاهیسا (۱۹۸۴) گندزدایی کیک لجن‌های متفاوت (لجن آبیگری شده) از تصفیه‌خانه‌های مختلف [کیک لجن فعال از تصفیه‌خانه مائه‌باشی (MA-C)، کیک لجن هضم شده بی‌هوازی (TD-C)، کیک لجن فعال از تاکاساکی (TA-C) و لجن فعال مایع از تاکاساکی (TA)] را با پرتو گاما بررسی و گزارش کردند که نتایج نشان دهنده تجمع کلیفرم نسبت به باکتری‌ها با آبیگری در لجن و به تبع آن بالا بودن نسبت کلیفرم به کل باکتری‌ها در کیک لجن نسبت به لجن مایع بود. حساسیت به پرتو کلیفرم‌ها در کیک لجن بسته به فصل سال متغیر بوده، به‌طوری‌که دز پرتو مورد نیاز برای گندزدایی در فصل تابستان و زمستان به ترتیب سه و پنج کیلوگری بود. مقاومت کل باکتری‌ها به پرتوتابی نسبت به کلیفرم در کیک لجن بیشتر بود، به‌طوری‌که در همه کیک لجن‌ها برای کاهش تعداد کل باکتری‌ها به زیر حد تشخیص به دز پرتوتابی ۵۰-۳۰ کیلوگری مورد نیاز بود.

با توجه به کاربرد لجن پرتوتابی شده در اراضی کشاورزی در فاصله زمانی چند روز بعد از عملیات پرتوتابی، ممکن است رشد مجدد سریعتر باکتری‌های باقیمانده بواسطه حذف رقابت رشد آن‌ها یا آلودگی مجدد از منابع خارجی با توجه حذف عمده ریزجانداران بر اثر پرتوتابی مطرح شود. نتایج نشان‌دهنده عدم رشد مجدد کلیفرم در لجن پرتوتابی شده با پنج کیلوگری و ذخیره

ذکر شده می‌توان بیان نمود که با افزایش ساخت و بهره‌برداری تصفیه‌خانه‌ها در کشور (شایگان و افشاری، ۱۳۸۳) ظرفیت تولید لجن فاضلاب افزایش یافته است. از طرفی دیگر، به دلیل میزان کم مواد آلی خاک‌های زیر کشت در ایران، استفاده از لجن فاضلاب در اراضی کشاورزی مورد توجه قرار گرفته است. لجن فاضلاب عمدتاً به خاطر ارزانی قیمت در کشت سبزیجات استفاده شده است. سبزیجات از گیاهان خام‌خوری بوده و عاری از عوامل بیماری‌زا بودن لجن اهمیت زیادی دارد.

بنابراین، لازم است اولاً تحقیقات علمی در مورد روش‌های مختلف گندزدایی لجن و مقایسه آن‌ها انجام شده و به سؤالاتی مانند آیا پرتوتابی می‌تواند در کشور ما جایگزین گندزدایی کننده‌های به‌طور متداول استفاده شده در تصفیه‌خانه‌ها شود یا خیر؟ یا کمترین دز مؤثر انواع پرتوهای یون‌ساز برای کاهش بیمارگرهای شاخص به زیر حدود مجاز لجن فاضلاب چقدر می‌باشد؟ پاسخ داده شود. ثانیاً بازرسی و تحقیقی در مورد آلودگی مواد خام سبزیجات یا سایر گیاهان کشت شده تحت تأثیر لجن فاضلاب موجود در بازار و مورد استفاده عموم مردم نیز انجام شود، زیرا آلوده بودن لجن فاضلاب به بیمارگرها یا سایر آلاینده‌ها، ممکن است سلامت و بهداشت عمومی مردم را در معرض خطر قرار دهد.

#### تأثیر پرتوتابی بر ویژگی‌های شیمیایی لجن فاضلاب

استفاده کشاورزی از لجن فاضلاب به دلیل وجود عناصر غذایی و ماده آلی در آن فواید اقتصادی زیادی دارد. لجن علاوه بر عوامل بیماری‌زا، حاوی عناصر غذایی پرمصرف نیتروژن، فسفر و پتاسیم، کم‌مصرف آهن، روی، مس، منگنز، مولیبدن و انواع فلزات سنگین از قبیل آرسنیک، کادمیم، کروم، سرب، جیوه، نیکل و سلنیم می‌باشد (عسگری لجایر و همکاران، ۱۳۹۴). گزارش جامعی در مورد اثر پرتوتابی بر روند تغییرات ویژگی‌های شیمیایی لجن وجود ندارد، ولی به هرحال گزارش‌های ضد و نقیضی در مورد تغییر برخی ویژگی‌های شیمیایی مانند غلظت عناصر غذایی کم‌مصرف و پرمصرف و

فلزات سنگین در دزهای پرتوتابی استفاده شده برای گندزدایی لجن وجود دارد. نتایج پانديا و همکاران (۱۹۸۷) نشان داد که پرتوتابی لجن فاضلاب علاوه بر حذف جانداران بیمارگر ممکن است منجر به تغییر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی لجن شد؛ بنابراین، لجن پرتوتابی شده از لحاظ کیفیت متفاوت از لجن حاصل از روش‌های تصفیه معمولی بود. مگناواکا و گراینو (۲۰۰۰) مزایای لجن فاضلاب پرتوتابی شده را برای کاربرد کشاورزی بررسی و گزارش کردند که پرتوتابی باعث تجزیه آفت‌کش‌های موجود در لجن، غیرفعال کردن بذر علف‌های هرز (دز غیرفعال‌سازی بذور معمولاً پایین‌تر از دز کاربردی برای گندزدایی است)، تولید شکل‌های معدنی نیتروژن و به تبع آن افزایش فراهمی نیتروژن برای گیاهان می‌شود. مگناواکا (۲۰۰۲) گزارش کرد که پرتوتابی لجن خشک و مایع باعث آزاد شدن آمونیم و به تبع آن افزایش غلظت نترات در خاک به دلیل نترات‌سازی، با کاربرد مقادیر کم لجن پرتوتابی شده در مقایسه با پرتوتابی نشده گردید.

در حالی‌که پرتوتابی هیچ اثری بر شکل‌های مختلف شیمیایی فسفر و فسفر کل لجن مایع و خشک نداشت. زو و همکاران (۲۰۰۲) لجن فاضلاب خشک را با دز پنج کیلوگری پرتو گاما پرتوتابی و گزارش کردند که اگرچه مقادیر نیتروژن، فسفر و کربن کل تحت پرتوتابی تغییر نکرد ولی فراهمی نیتروژن و فسفر و مقدار ماده آلی محلول (DOM) به ترتیب ۱۵، ۲۲ و ۸۶ درصد افزایش نشان داد. افزایش DOM تحت تأثیر پرتوتابی و نقش آن‌ها در تحرک و انتقال عناصر از جمله نیتروژن، فسفر، آهن، آلومینیم و فلزات سنگین از طریق تشکیل کمپلکس فلز-ماده آلی، نباید در کاربرد زمینی لجن فاضلاب نادیده گرفته شود. پیریدارشمی و معظومدار (۲۰۱۴) گزارش کردند که پرتوتابی نه تنها اثر منفی بر ارزش غذایی لجن نداشت، بلکه اثرات مطلوب بر افزایش غلظت عناصر فسفر، آهن و نیتروژن و کاهش غلظت فلز سنگین سرب نشان داد. چو و همکاران (۲۰۱۱) تأثیر پرتو گاما با دز

شیمیایی GISS و NISS بود. مقدار نیتروژن در GISS < FYM < NISS بوده، در حالی که مقدار پتاسیم و فسفر در GISS < NISS < FYM قرار داشت. تفاوت معناداری در pH، کربن آلی، نیتروژن آلی خاک، عناصر کم مصرف و فلزات سنگین قابل عصاره‌گیری با DTPA از منابع مختلف کود و در تمام سطوح وجود نداشت و این نشان دهنده امکان استفاده لجن به‌عنوان جایگزین برای FYM در تأمین نیتروژن خاک بود. GISS باعث افزایش معنادار در فسفر و پتاسیم قابل دسترس گیاه در خاک در مقایسه با دیگر تیمارها گردید. تفاوت قابل توجه بین GISS و NISS از لحاظ تأمین عناصر غذایی برای خاک و گیاه مشاهده نشد و این مؤید استفاده از GISS بدون اثر منفی بر سلامتی خاک و گیاه بود. راتد و همکاران (۲۰۱۱) در تحقیقی دیگر، ویژگی‌های شیمیایی FYM، GISS و NISS و اثر سطوح یک، سه، شش، هفت، نه و ۱۱ تن بر هکتار آن‌ها بر رشد سبزی تربچه و ویژگی‌های شیمیایی خاک پس از برداشت گیاه بررسی کردند.

لجن فاضلاب به‌صورت مایع و پرتوتابی شده با دز بین ۳-۴ کیلوگری (GISS) و نشده NISS پس از تهیه از مرکز پرتوتابی لجن فاضلاب و ادودارا هند، در مزرعه محل کشت خشک، خرد و از الک عبور گردید. لجن خشک با مخلوط دو اسید، اسید نیتریک و پرکلریک با نسبت ۲:۱ هضم شده و در عصاره هضم، عناصر فسفر، پتاسیم، عناصر کم مصرف (آهن، روی، منگنز و مس) و فلزات سنگین (سرب، کادمیم، نیکل و کبالت) تعیین شد. نمونه‌های خاک قبل از کشت گیاهان و پس از برداشت گیاهان جمع‌آوری و خصوصیات شیمیایی از جمله pH، نیتروژن آلی، فسفر و پتاسیم قابل دسترس، مس، روی، آهن، منگنز، سرب، کادمیم و کبالت قابل استخراج با DTPA تعیین گردید. نتایج آنان نشان داد که GISS و NISS مقدار نیتروژن و فسفر تقریباً برابری داشتند. اکثر ویژگی‌های فیزیکی شیمیایی لجن به جزء برخی عناصر کم مصرف و فلزات سنگین بعد از پرتوتابی بدون تغییر

صفر، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ کیلوگری را بر ویژگی‌های فیزیک و شیمیایی لجن فاضلاب تهیه شده از مخزن هوازی بررسی و گزارش کردند که پرتوتابی منجر به متلاشی کردن توده لجن و آزادسازی پروتئین‌ها، پلی‌ساکاریدها و آنزیم‌های برون‌سلولی به داخل توده محلول شد. به‌طوری که پروتئین آزاد شده از توده لجن بسیار بیشتر از پلی‌ساکاریدها بوده و در نتیجه غلظت کربن آلی، فسفر و نیتروژن کل بعد از پرتوتابی افزایش داشت. بعد از پرتوتابی بر اثر تبدیل نترات به گاز N<sub>2</sub> یا N<sub>2</sub>O از طریق واکنش‌های کاهشی با الکترون هیدراته به سرعت غلظت نترات کاهش یافت.

غلظت آمونیم تا دز نه کیلوگری افزایش و بعد از آن اندکی کاهش داشت، به‌طوری که آمونیم شکل عمده نیتروژن معدنی بود. علت احتمالی افزایش غلظت آمونیم، تغییر شکل کمتر نیتروژن آلی (بخش پروتئین سلولی) از سلول‌های تجزیه شده و کاهش آن نیز، اکسایش آمونیم با الکترون هیدراته در دزهای بالای پرتوتابی عنوان شد. زای و همکاران (۲۰۱۴) اثر پرتو گاما با دز صفر، ۲، ۴، ۶، ۱۰ و ۱۵ کیلوگری بر لجن مخزن ته‌نشینی ثانویه بررسی و گزارش کردند که افزایش دز پرتوتابی منجر به شکستن توده‌های لجن، افزایش آزادسازی آب پیوندی و در نتیجه خاصیت آبگیری بهتر لجن می‌شود. راتد و همکاران (۲۰۰۹) ویژگی‌های شیمیایی کود دامی<sup>۲۰</sup> (FYM)، لجن فاضلاب پرتوتابی شده با اشعه گاما<sup>۲۱</sup> (GISS) و نشده<sup>۲۲</sup> (NISS) و همچنین اثر سطوح ۵، ۱۰ و ۱۵ تن بر هکتار این کودها را بر ویژگی‌های شیمیایی خاک جمع‌آوری شده پس از برداشت گیاه پیاز بررسی کردند. لجن فاضلاب به‌صورت مایع و پرتوتابی شده با دز ۳-۴ کیلوگری (GISS) و نشده (NISS) پس از تهیه از مرکز پرتوتابی لجن فاضلاب گایسبلاچ هند، در مزرعه آفتاب خشک و ویژگی‌های شیمیایی آن‌ها در لجن خشک تعیین شد. نتایج نشان‌دهنده تفاوت اندک بین ویژگی‌های

<sup>20</sup> Farmyard manure

<sup>21</sup> Gamma irradiated sewage sludge

<sup>22</sup> Non-irradiated sewage sludge

باقی ماندند. مس، روی، منگنز و سرب در GISS بسیار بیشتر از NISS بود. آنان دلیل آن را افزایش شکل‌های قابل جذب فلزات ناشی از تخریب کمپلکس‌های آلی محلول تحت تأثیر پرتو گاما دانستند. اثر نوع کود و سطوح کاربرد آن‌ها بر ویژگی‌های رشد و عملکرد گیاه تریچه و ویژگی‌های خاک بعد از برداشت گیاه مانند غلظت عناصر پرمصرف و کم‌مصرف و فلزات سنگین معنادار نبود. آنان عدم معنادار نشدن تیمارها را به ویژگی‌های خاک و عدم تغییر اکثر ویژگی‌های لجن تحت پرتوتابی بیان کردند. ال- موتایم (۲۰۰۶) گزارش کرده است که فلزات سنگین شکل‌های مختلفی (مانند محلول، تبدالی، کربناتی، کمپلکس شده با مواد آلی، کمپلکس شده با اکسیدهای آهن و منگنز، باقیمانده و غیره) دارد که در تحرک آن‌ها در خاک و قابلیت استخراج به‌وسیله گیاهان مختلف تأثیر دارد.

اثرات پرتوهای یون‌ساز بر زیست‌فراهمی فلزات سنگین به خوبی بررسی نشده است و مطالعات بیشتر در این زمینه نیاز می‌باشد. ال-موتایم و همکاران (۲۰۰۲) اثرات پرتو گاما با دزهای ۱۰-۱ کیلوگری را با افزایش یک کیلوگری بر تخریب آلاینده‌های آلی لجن مرطوب و خشک بررسی و گزارش کردند که غلظت بالای از ترکیبات آلی سمی (PAHs) در لجن مرطوب در مقایسه با لجن خشک وجود داشت. PAHs با پرتوتابی حتی در دزهای پایین تخریب شده، به‌طوری‌که دز ۲ تا ۱۰ کیلوگری، غلظت PAHs کل را از ۵۳ تا ۷۵ درصد در لجن مرطوب و از ۲۶ تا ۶۳ درصد در لجن خشک کاهش داد. با توجه به مطالب ذکر شده و با در نظر گرفتن مواردی مانند پایین بودن دز تجزیه آلاینده‌های آلی موجود در لجن از دز توصیه شده برای گندزدایی (۱۰ کیلوگری) و حذف بهتر بیمارگرهای مختلف با پرتوتابی از گندزدایی کننده‌های دیگر، می‌توان این‌طور جمع‌بندی نمود که اگر هدف از کاربرد روش پرتوتابی حذف کامل بیمارگرهای مختلف لجن فاضلاب (و نه تغییر آنچنان ویژگی‌های شیمیایی و حذف آلاینده‌های معدنی) باشد، توانایی زیاد

روش پرتوتابی نسبت به سایر روش‌های گندزدایی در حذف بیمارگرها یک ویژگی مثبت می‌باشد. بنابراین، می‌توان استدلال نمود که حتی در صورت اثر مثبت نداشتن بر حذف آلاینده‌های معدنی و به شرط عدم تأثیر منفی بر ارزش تغذیه‌ای لجن، باز برتری پرتوتابی نسبت به سایر روش‌های گندزدایی از لحاظ کارایی ثابت می‌شود. هرچند که لازم است تحقیقات تکمیلی در مورد تغییر برخی ویژگی‌های شیمیایی مانند فلزات سنگین، عناصر غذایی و غیره تحت پرتوتابی در دزهای گندزدایی صورت گیرد.

### نتیجه‌گیری

با مشخص شدن معایب روش‌های متداول تصفیه و گندزدایی فاضلاب و لجن فاضلاب، استفاده از روش‌های نوین گندزدایی برای حفظ محیط‌زیست ضروری بوده؛ به‌طوری‌که، یکی از این روش‌ها استفاده از پرتوتابی یون‌ساز برای گندزدایی پساب و لجن فاضلاب می‌باشد. در مورد پساب، امکان استفاده از پرتوهای غیریون‌ساز UV و یون‌ساز گاما و بیم الکترون برای گندزدایی آن وجود دارد. مزایای استفاده از پرتو یون‌ساز نسبت به غیر یون‌ساز در گندزدایی پساب شامل عدم وابستگی آن به عوامل محیطی مانند مقدار جامدات معلق، مواد آلی و معدنی قابل اکسایش، اکسیژن محلول، pH، دما و غیره، گندزدایی کامل و بدون رشد مجدد ریزجانداران، عدم تغییرات فصلی گندزدایی و امکان استفاده از آن برای گندزدایی فاضلاب و پساب می‌باشد.

در مورد لجن فاضلاب فقط امکان استفاده از پرتوهای یون‌ساز وجود دارد. مزایای پرتو گاما نسبت به بیم الکترون مانند قدرت نفوذ عالی، امکان پرتودهی سطح مقطع ضخیم‌تر از لجن، دز کشته پایین برای حذف عوامل بیماری‌زا و غیره باعث شده که از پرتو گاما در گندزدایی لجن فاضلاب استفاده گسترده‌تری شود. هر چند که تحقیقات ملی در مورد کاربرد روش پرتوتابی یون‌ساز در گندزدایی پساب، فاضلاب و لجن فاضلاب

گندزدایی تعیین و در صورت استفاده از این روش‌ها با هدف غیر از گندزدایی مانند حذف آلاینده‌های آلی، معدنی و غیره، دز مورد نیاز آن‌ها تعیین شود. تحقیقات علمی در مورد امکان استفاده از روش پرتوتابی در تصفیه و گندزدایی فاضلاب و لجن فاضلاب صنعتی انجام شود. تحقیقات علمی در مورد روش‌های مختلف گندزدایی لجن فاضلاب، پساب و مقایسه آن‌ها انجام شود. در تحقیقات آتی ویژگی‌های زیستی و شیمیایی پساب و فاضلاب پرتوتابی شده با استانداردهای موجود ایران مقایسه شود. همچنین، به دلیل نبود استاندارد ویژه شرایط ایران برای بررسی کیفیت لجن فاضلاب تولیدی تحت تأثیر پرتوهای یونساز، به استاندارد کد ۴۰ قانون فدرال بخش ۵۰۳ سازمان حفاظت محیط‌زیست آمریکا استناد گردد.

با توجه به یکسان بودن سازوکار انواع پرتوهای یونساز در حذف آلودگی‌های میکروبی، آلی و معدنی، کاربرد انواع پرتوهای یونساز در تصفیه و گندزدایی فاضلاب، پساب و لجن فاضلاب امکان‌سنجی و مناسب‌ترین پرتو با توجه به اهداف انتخاب شود. با در نظر گرفتن شرایط تصفیه‌خانه‌های کشور، در تحقیقات آتی مرحله مناسب برای کاربرد روش پرتوتابی یونساز مشخص شود. برای عملی بودن از لحاظ فنی بعد از انجام مطالعات مقدماتی در این مورد و در نظر گرفتن مسائل اقتصادی، بحث نصب دستگاه‌های پرتوتابی به صورت پایلوت و صنعتی در تصفیه‌خانه‌ها صورت گیرد.

انجام نشده، ولی نتایج این بررسی می‌تواند تأکیدی بر امکان استفاده از روش پرتوتابی یونساز در گندزدایی آنها باشد. پساب، فاضلاب و لجن فاضلاب علاوه بر عوامل بیماری‌زا، حاوی عناصر غذایی پرمصرف، کم مصرف و فلزات سنگین می‌باشند. گزارش جامعی در مورد دز مورد نیاز برای حذف انواع بیمارگرها و اثر پرتوتابی بر روند تغییرات ویژگی‌های شیمیایی پساب و لجن وجود ندارد، ولی به هر حال گزارش‌های ضد و نقیضی در مورد تغییر برخی ویژگی‌های شیمیایی مانند غلظت عناصر غذایی کم مصرف و پرمصرف و فلزات سنگین در دزهای پرتوتابی استفاده شده برای گندزدایی لجن وجود دارد. لذا، در این مقاله تأثیر پرتوهای یونساز بر ویژگی‌های شیمیایی و بیولوژیکی فاضلاب، لجن فاضلاب و پساب با اتکا بر پژوهش‌های انجام شده تشریح شد.

### رهیافت ترویجی

با عنایت به مطالب ارائه شده پیشنهادهای زیر می‌تواند ارائه شود:

بررسی‌های کلی و دقیق‌تر تأثیر انواع پرتوهای یونساز بر ویژگی‌های زیستی فاضلاب، پساب و لجن فاضلاب با هدف مشخص کردن کمترین دز مؤثر این پرتوها برای کاهش بیمارگرهای شاخص به زیر حدود مجاز فاضلاب، پساب و لجن فاضلاب در شرایط ایران انجام شود. پتانسیل روش پرتوتابی برای تغییر ویژگی‌های شیمیایی فاضلاب، پساب و لجن فاضلاب در دزهای

### فهرست منابع

۱. بی‌نام. ۱۳۸۹. ضوابط زیست محیطی استفاده از آب‌های برگشتی و پساب‌ها. معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رئیس جمهور.
۲. پارسا، ن.، معروفی، ص.، رحیمی، ق و معروفی، ح. ۱۳۹۴. ارزیابی میزان شاخص آلودگی (PI) کادمیم، روی، مس و سرب در خاک آبیاری شده با فاضلاب شهری. نشریه دانش آب و خاک. جلد ۲۵، شماره ۱: ۱-۱۲.
۳. سماوات، س.، طهرانی، م.، م.، بازرگان، ک و بصیرت، م. ۱۳۹۰. دستورالعمل نحوه بررسی مواد آلی. موسسه تحقیقات خاک و آب کشور.

۴. شایگان، ج و افشاری، ع. ۱۳۸۳. بررسی وضعیت فاضلاب‌های شهری و صنعتی در ایران. مجله آب و فاضلاب. جلد ۱۵، شماره ۱: ۶۹-۵۸.
۵. عابدی کوپائی، ج، جواهری طهرانی، م و بهفرنیاء، ک. ۱۳۹۴. بهبود کیفیت پساب فاضلاب شهری با استفاده از بتن متخلخل برای آبیاری. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب و خاک. جلد ۱۹، شماره ۷۱: ۹۳-۱۰۶.
۶. عسگری لجایر، ح، نجفی، ن و مقیسه، ا. ۱۳۹۴. تحلیلی بر سازوکار پرتو گاما در تصفیه و گندزدایی لجن فاضلاب. مجله تابش و فناوری هسته‌ای، جلد ۲، شماره ۱: ۲۳-۹.
۷. کاه‌فروشان، د و عادل، س. ۱۳۹۳. اثر استفاده از فاضلاب صنعتی تصفیه نشده در آبیاری کلزا. بازیافت آب. جلد ۱، شماره ۱: ۴۵-۳۷.
۸. نجفی، ن، ا، مردمی، س و اوستان، ش. ۱۳۹۱. اثر غرقاب، لجن فاضلاب و کود دامی بر جذب برخی عناصر پرمصرف و سدیم در گیاه آفتابگردان در یک خاک شن لومی. نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی). جلد ۲۶، شماره ۳: ۶۱۹-۶۳۶.
۹. رحمانی، ح. ر.، مظاهری کوهانستانی، ز، خدابخش، ن و شریفی، ح. ۱۳۹۳. بررسی برخی ویژگی‌های کیفی و غلظت عناصر سنگین در لجن فاضلاب خشک شده تصفیه‌خانه شاهین‌شهر اصفهان. نشر علوم و تکنولوژی محیط زیست. دوره ۱۶، شماره ۲: ۶۶-۵۶.
10. Acher, A., Fischer, E., Turnheim, R., and Manor, Y. 1997. Ecologically friendly wastewater disinfection techniques. *Water Research*, 31 (6), 1398-1404.
11. Al-Bachir, M., Al-Adawi, M., and Shamma, M. 2003. Synergetic effect of gamma irradiation and moisture content on decontamination of sewage sludge. *Bioresource Technology*, 90 (2), 139-143.
12. APHA., AWWA .1998. Standard methods for the examination of water and wastewater, 20th edition, APHA Publication.
13. Borrely, S., Cruz, A., Del Mastro, N., Sampa, M., and Somessari, E. 1998. Radiation processing of sewage and sludge. A review. *Progress in Nuclear Energy*, 33 (1), 3-21.
14. Brandon, J. 1978. Pathogen reduction in sludge by irradiation. Sandia Irradiator for dried sewage solids. Seminar Proceedings and Dedication, Albuquerque, New Mexico, Sandia Laboratory Energy Report. Sandia, 79-0182, Applied Biology and Isotope Utilization Division, Sandia National Laboratory, 37-47.
15. Capizzi, S., Chevallier, A., and Schwartzbrod, J. 1999. Destruction of *Ascaris ova* by accelerated electron. *Radiation Physics and Chemistry*, 56 (5), 591-595.
16. Chaychian, M., Al-Sheikhly, M., Silverman, J., and McLaughlin, W.L. 1998. The mechanisms of removal of heavy metals from water by ionizing radiation. *Radiation Physics and Chemistry*, 53 (2), 145-150.
17. Chmielewski, A. 2007. Practical applications of radiation chemistry. *Russian Journal of Physical Chemistry A*, 81 (9), 1488-1492.
18. Chu, L., Wang, J., and Wang, B. 2011. Effect of gamma irradiation on activities and physicochemical characteristics of sewage sludge. *Biochemical Engineering Journal*, 54 (1), 34-39.
19. El-Motaium, R. 2006. Application of nuclear techniques in environmental studies and pollution control. In *Proceedings of the 2<sup>nd</sup> Environmental Physics Conference*. Alexandria, Egypt, 169-182.



20. El-Motaium, R., Ezzat, H., El-Batanony, R., and Seoud, M. 2002. Irradiated sewage sludge for increased crop production–I. pathogens and polycyclic aromatic hydrocarbons. Irradiated sewage sludge for application to cropland, Results of a co-ordinated research project. (Joint FAO/IAEA Division of Nuclear Techniques in Food and Agriculture), International Atomic Energy Agency Press, Vienna (Austria). 67-73.
21. Etzel, J., Born, G., Stein, J., Helbing, T., and Baney, G. 1969. Sewage sludge conditioning and disinfection by gamma irradiation. American Journal of Public Health and the Nations Health, 59 (11), 2067-2076.
22. Farooq, S., Kurucz, C. N., Waite, T. D., and Cooper, W. J. 1993. Disinfection of wastewaters: high-energy electron vs gamma irradiation. Water Research, 27 (7), 1177-1184.
23. Getoff, N. 2002. Factors influencing the efficiency of radiation-induced degradation of water pollutants. Radiation Physics and Chemistry, 65 (4), 437-446.
24. Guo, Z., Tang, D., Liu, X., and Zheng, Z. 2008. Gamma irradiation-induced Cd<sup>2+</sup> and Pb<sup>2+</sup> removal from different kinds of water. Radiation Physics and Chemistry, 77 (9), 1021-1026.
25. Han, B., Kim, J. K., Kim, Y., Choi, J. S., and Jeong, K. Y. 2012. Operation of industrial-scale electron beam wastewater treatment plant. Radiation Physics and Chemistry, 81 (9), 1475-1478.
26. Hashimoto, S., Nisimurak, K., and Machi S. 1988. Economic feasibility of irradiation composting plant of sewage sludge. Radiation-Physics and Chemistry, 31 (1-3), 109-114
27. He, S., Wang, J., Ye, L., Zhang, Y., and Yu, J. 2014. Removal of diclofenac from surface water by electron beam irradiation combined with a biological aerated filter. Radiation Physics and Chemistry, 105, 104-108.
28. IAEA. 2002. Irradiated sewage sludge for application to cropland. Results of a co-ordinated research project. (Joint FAO/IAEA Division of Nuclear Techniques in Food and Agriculture), International Atomic Energy Agency Press, Vienna (Austria).
29. Jung, J., Yoon, J. H., Chung, H. H., and Lee, M. J. 2002. Radiation treatment of secondary effluent from a sewage treatment plant. Radiation Physics and Chemistry, 65 (4), 533-537.
30. Lee, O.M., Kim, H.Y., Park, W., Kim, T.H. and Yu, S. 2015. 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, 295, 201-208.
31. Magnavacca, C. 2002. Evaluation of irradiated sewage sludge as an industrial crop fertilizer using nuclear techniques. Irradiated sewage sludge for application to cropland, 5.
32. Magnavacca, C., and Graino, J. 2000. Additional advantages of irradiation treatment of sewage sludge for agriculture reuse. International symposium on nuclear techniques in integrated plant nutrient, water and soil management, Vienna (Austria), 83-84.
33. McCaslin, B. and Sivinski, J. 1979. Dried gamma-irradiated sewage solids use on calcareous soils: crop yeilds and heavy metals uptake. (New Mexico State University., Las Cruces (USA); Sandia Labs., Albuquerque, NM (USA).

34. Pandya, G. A., Kapila, S., Kelkar, V. B., Negi, S., and Modi, V. V. 1987. Inactivation of bacteria in sewage sludge by gamma radiation. *Environmental Pollution*, 43 (4), 281-290.
35. Priyadarshini, J., Roy, P., and Mazumdar, A. 2014. Qualitative and Quantitative Assessment of Sewage Sludge by Gamma Irradiation with Pasteurization as a Tool for Hygienization. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series A*, 95 (1), 49-54.
36. Sampa, M. H. O., Takács, E., Gehringer, P., Rela, P. R., Ramirez, T., Amro, H., Trojanowicz, M., Botelho, M. L., Han, B., Solpan, D., Cooper, W. J., Emmi, S. S., and Wojnárovits, L. 2007. Remediation of polluted waters and wastewater by radiation processing. *Nukleonika*, 52 (4), 137-144.
37. Rathod, P. H., Patel, J. C., and Jhala, A. J. 2011. Potential of gamma irradiated sewage sludge as fertilizer in radish: evaluating heavy-metal accumulation in sandy loam soil. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 42 (3), 263-282.
38. Rathod, P. H., Patel, J. C., Shah, M., and Jhala, A.J. 2009. Recycling gamma irradiated sewage sludge as fertilizer: A case study using onion (*Alium cepa*). *Applied Soil Ecology*, 41 (2), 223-233.
39. Rawat, K., Sharma, A., and Rao, S. 1998. Microbiological and physicochemical analysis of radiation disinfected municipal sewage. *Water Research*, 32 (3), 737-740.
40. Rudd, T., and Hopkinson, L. 1989. Comparison of disinfection techniques for sewage and sewage effluents. *Water and Environment Journal*, 3 (6), 612-618.
41. Tahri, L., Elgarrouj, D., Zantar, S., Mouhib, M., Azmani, A., and Sayah, F. 2010. Wastewater treatment using gamma irradiation: Tétouan pilot station, Morocco. *Radiation Physics and Chemistry*, 79 (4), 424-428.
42. Tarr, M.A. 2003. Chemical degradation methods for wastes and pollutants: environmental and industrial applications: CRC Press
43. U.S. EPA, 1993. The standards for the use or disposal of sewage sludge, Code of Federal Regulation-Part 503 Rule, Federal Register Number-9248-9415, Environmental Protection Agency Press.
44. Wang, J., and Wang, J. 2007. Application of radiation technology to sewage sludge processing: a review. *Journal of Hazardous Materials*, 143 (1), 2-7.
45. Watanabe, H., and Takehisa, M. 1984. Disinfection of sewage sludge cake by gamma-irradiation. *Radiation Physics and Chemistry*, 24 (1), 41-54.
46. Wickramanayake, G. B., and Sproul, O. J. 1990. Decontamination technologies for release from bioprocessing facilities. Part V. decontamination of sludge. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 19 (6), 515-537.
47. Xie, S., Wu, Y., Wang, W., Wang, J., Luo, Z., and Li, S. 2014. Effects of acid/alkaline pretreatment and gamma-ray irradiation on extracellular polymeric substances from sewage sludge. *Radiation Physics and Chemistry*, 97, 349-353.
48. Zhou, L., Xu, Y., Jiang, T., Zheng, S., and Wu, H. 2002. Characterization of irradiated sewage sludge and its effects on soil fertility, crop yields and nutrient bioavailability. Irradiated sewage sludge for application to cropland, Results of a co-ordinated research project. (Joint FAO/IAEA Division of Nuclear Techniques in Food and Agriculture), International Atomic Energy Agency Press, Vienna (Austria). 53-66.