روش نوین اکسیداسیون پیشرفته با استفاده از باریکه الکترون‌های پر انرژی برای گندزدایی آب و پساب

عباس بهجت [۱] سید علی رضا مذهب [۲] محمد باقر خلیلی [۳]
بهرام وخشور [۴] حسن زارعشاهی [۵] محمود فلاح‌زاده [۶]

(دریافت ۸۵/۲/۳۰ پذیرش ۸۵/۱۲/۲۰)

چکیده

در این بررسی، استفاده از باریکه الکترونی به عنوان یک روش اکسیداسیون قوی به منظور ضدعفونی کردن آب چاه و پساب معرفی شده است. نمونه‌برداریها به پیشنهاد شرکت آب و فاضلاب استان یزد از چند حلقه چاه در مناطق سنگلاخی یزد و همچنین از ورودی و خروجی تصفیه‌خانه شهر یزد (برکه تثبیت) انجام گرفت. نمونه‌های فوق تحت تابش پرتوهای الکترونی با انرژی ۱۰ مگا الکترون ولت با دُزهایی در محدوده ۰/۵ تا ۵ کیلوگری قرار گرفتند. نمونه‌ها قبل و بعد از پرتودهی در آزمایشگاه میکروبیولوژی مرکز تحقیقات و کاربرد پرتو فرآیند سازمان انرژی اتمی ایران (مرکز یزد) پس از کشت‌های میکروبی مورد آزمونهایی از قبیل شمارش باکتری‌های مزوفیل هوازی، کلیفرم‌ها و *اشرشیاکلی* با روش MPN قرار گرفتند. بعد از پرتو دهی با باریکه الکترونی و کشت و شمارش مجدد، میزان مقاومت میکروبی نمونه‌ها بر حسب میزان دُز تابشی دریافت شده در مقایسه با نمونه‌های پرتو داده نشده (شاهد)، به دست آمد. میزان چند نمونه باکتری دیگر نیز از جمله *شیگلا و سالمونلا* قبل و بعد از پرتودهی نمونه‌ها، با روشهای استاندارد اندازه‌گیری شد. نتایج به دست آمده از پرتودهی نمونه‌های آب و پساب توسط پرتوهای الکترونی در ناحیه دُزهای اشاره شده در فوق نشان داد که ۹۰ درصد اکثر آلودگیهای میکروبی با دریافت دُز تابشی کمتر از ۵ کیلوگری از بین می‌روند. لذا استفاده از باریکه الکترونی را می‌توان در زمره یکی از روشهای مؤثر در ضد عفونی کردن پساب قلمداد نمود.

واژه‌های کلیدی: آب، پساب، پرتوهای الکترونی، آلودگیهای میکروبی، اکسیداسیون پیشرفته.

Advanced Oxidation Treatment of Drinking Water and Wastewater Using High-energy Electron Beam Irradiation

Abbas Behjat [1] Seyyed Alireza Mozahheb [2] Mohammad Bagher Khalili [3]
Bahram Vakhshoor [4] Hassan Zareshaei [5] Mahmoud Fallahzadeh [6]

(Received May 20, 2006 Accepted Mar. 11, 2007)

Abstract

Application of electron beam as a strong oxidation method for disinfection of drinking water and wastewater has been investigated. Drinking water samples were prepared from wells in rock zones in Yazd Province. Wastewater samples were collected from Yazd Wastewater Treatment Plant. Samples were irradiated by 10 MeV electron beam accelerator at Yazd Radiation Processing Center. The irradiation dose range varied from 0.5-5 kGy. Biological parameters and microbial agents such as aerobic mesophiles and coliforms including E. coli count before and after irradiation versus irradiation

۱- دانشیار دانشکده فیزیک، دانشگاه یزد، abehjat@yazduni.ac.ir
۲-مربی گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد یزد
۳- دانشیار دانشکده پزشکی، دانشگاه شهید صدوقی یزد
۴- کارشناس میکروبیولوژی، سازمان انرژی اتمی یزد
۵- کارشناس دُزیمتری، سازمان انرژی اتمی یزد
۶- کارشناس کنترل کیفیت، شرکت آب و فاضلاب شهرستان یزد

1- Associate Professor, Physics Department, Yazd University, abehjat@yazduni.ac.ir
2- Member of Faculty, Civil Engineering Department, Azad University, Yazd Branch, Yazd.
3- Associate Professor, Shhid- Sadooghi Medical University, Yazd
4- Lab Technical Staff Member, Yazd Radiation Processing Center, AEOI, Yazd, Iran
5- Dosimeter Technical Staff Member, Yazd Radiation Processing Center, AEOI, Yazd, Iran
6- Quality Control Engineer, Yazd Water and Wastewater Company, Yazd, Iran

dose were obtained using MPN method. The data obtained from irradiated water and wastewater were compared with un-irradiated (control) samples. The results showed a removal of 90% of all microorganisms at irradiation doses below 5 kGy, suggesting electron beam irradiation as an effective method for disinfection of wastewater.

Keywords: Drinking Water, Wastewater, Electron Beam, Microbial Contamination, Advanced Oxidation.

۱- مقدمه

آلوده شدن آبهای سطحی و لزوم دسترسی به منابع آب جدید از بزرگ‌ترین مشکلات بسیاری از کشورهای در حال توسعه است که طرحهای بین‌المللی و جهانی را معطوف خود کرده است. با رشد جمعیت و کاهش منابع آب سالم، نیاز به آن یکی از نیازمندیهای بسیار حیاتی قرن بیست و یکم خواهد بود. مهم‌ترین منابع آلوده کننده آبهای‌سطحی عبارت‌اند از: پساب صنایع و پسابهای شهری.

به دلیل افزایش میزان آلودگیها و همچنین پیچیدگی آلودگیهای صنعتی، روشهای معمول برای تصفیه کامل پساب و رفع آلودگیها ناکافی و ناموفق هستند [۱ و ۲]. لذا گرچه امروزه روشهای بیولوژیکی و شیمیایی مؤثری امروزه جهت خالص‌سازی آب و پساب در دست است، لکن آنها قادر به حل همه مشکلات نیستند و نمی‌توان از این آبها برای مصرف مجدد چه در صنعت و چه جهت مصارف دیگر از جمله کشاورزی و آشامیدن استفاده نمود [۳].

از جمله روشهای ممکن برای تصفیه آب و پساب روش پرتودهی است [۳ و ۴]، که شکل بسیار مؤثرتر استفاده از انرژی به منظور کاهش ترکیبات سمی آلی و آلودگیهای بیولوژیکی است. گرچه هنوز به دلیل تنوع زیاد پسابها که توسط صنایع مختلف ایجاد می‌شود روش تصفیه واحدی ارائه نشده است لکن هدف اصلی پرتودهی اولاً حذف آلودگیهای غیر قابل تجزیه بیولوژیکی[1] ازطریق تبدیل آن به ترکیبات معدنی و ترکیبات آلی قابل تجزیه وثانیاً رفع آلودگیهای میکروبی ایجاد شده توسط ویروس‌ها، باکتری‌ها و غیره است [۳ و۴].

تابش‌های یون‌ساز مانند پرتوهای UV، X و پرتوهای γ و باریکه‌های الکترونی از شکلهای مؤثر انرژی هستند که می‌توانند آلودگیهای آلی بیولوژیکی را نابود کنند. استفاده از تابش‌های یون‌ساز باعث رادیولیز آب و ایجاد الکترون‌های هیدراته، رادیکال آزاد OH و هیدروژن می‌شود که میل به واکنش شیمیایی قوی آنها سبب غیر فعال نمودن میکروارگانیسم‌ها و تجزیه آلودگیها می‌شود[۳-۵]. در این میان روش پرتودهی با باریکه الکترونی از فناوریهای اکسیدکننده پیشرفته جهت تصفیه آب محسوب می‌شود که در مقایسه با روشهای دیگر از کارآیی بیشتری برخوردار است [۶-۹]. کشورهای مختلفی در حال پژوهشهای اولیه در خصوص به کارگیری این فناوری هستند [۷ و۹]. به دلیل رویکرد جهانی و اهمیت استفاده از پرتودهی بوسیله باریکه الکترونی به دلیل کارآیی و سرعت عمل زیاد، با استفاده از دستگاه شتاب‌دهنده الکترون‌ها در مرکز تحقیقات و کاربرد پرتو فرآیند یزد، بررسی‌هایی در خصوص اثر باریکه الکترونی پر انرژی بر روی آب آلوده و پساب صورت گرفت.

در این گزارش برخی از نتایج به دست آمده از پروژه امکان‌سنجی پرتودهی آب و پساب شهری توسط پرتوهای الکترونی به منظور ضد عفونی کردن آنها که به سفارش شرکت آب و فاضلاب استان یزد انجام پذیرفته است، ارائه می‌شود.

قبل از توضیح در مورد مواد و روشها به توضیح مختصر چند مفهوم که معمولاً در پرتودهی مواد توسط تابش الکترومغناطیسی و یا پرتوهای الکترونی مورد استفاده قرار می‌گیرد، می‌پردازیم.

۱-۱- انرژی

هر یک از فوتون‌های امواج الکترومغناطیسی در باریکه فوتونی و یا الکترون‌های مربوط به یک باریکه الکترونی انرژی خاصی دارند که معمولاً بر حسب الکترون ولت (eV) سنجیده می‌شود. هر الکترون ولت معادل $۱/۶ \times ۱۰^{-۱۹}$ ژول می‌باشد. شتاب‌دهنده‌های الکترونی بر اساس انرژی دسته‌بندی می‌شوند و میزان نفوذ الکترون‌ها در ماده بستگی به انرژی آنها دارد.

۱-۲- دُز جذبی[2]

انرژی جذب شده توسط هر ماده‌ای که تحت پرتودهی قرار گیرد را دُز جذبی می‌نامند. دُز جذبی بر حسب گری[3] اندازه‌گیری می‌شود که عبارت از انرژی جذب شده توسط واحد جرم بر حسب ژول بر کیلوگرم است.

۱-۳- میزان نفوذ الکترون ها (منحنی دُز-عمق)

میزان نفوذ الکترون‌ها متناسب با انرژی شتاب‌دهنده و در واقع انرژی الکترون‌هاست و با چگالی محصول مورد پرتودهی رابطه

[1] Non- biodegradable

[2] Absorbed Dose

[3] Gray

عکس دارد. رابطه اساسی که میزان عمق نفوذ الکترون‌ها به ماده را تعیین می‌کند عبارت است از

$$\text{میزان نفوذ (سانتی متر)} = \frac{۰/۵۲۴\,E - ۰/۱۳۳۷}{\rho} \qquad (۱)$$

که در آن :

E : مقدار انرژی باریکه الکترون بر حسب مگا الکترون ولت و

ρ : چگالی جسم تحت پرتودهی بر حسب گرم بر سانتی‌متر مکعب است [۹].

رابطه ۱ برای انرژی‌های بالاتر از ۱ مگا الکترون ولت صادق است و ماده شاخص معمولاً آب است، چرا که بیشتر موادی که پرتودهی می‌شوند را می‌توان از نظر چگالی با آن مقایسه نمود. مهم‌ترین پارامترهای یک شتاب‌دهنده، انرژی و جریان الکترون‌ها است. انرژی شتاب‌دهنده تعیین کننده ضخامتی از ماده است که می‌تواند به طور یکنواخت پرتودهی شود و میزان دُز دریافتی توسط جریان شتاب‌دهنده تعیین می‌گردد. فرآیند تعیین ضخامتی که در آن مقدار دُز دریافتی روی سطح جسم و در انتهای آن یکسان باشد، برای یک شتاب‌دهنده با انرژی خاص بسیار مهم است. لذا قبل از پرتودهی هر ماده لازم است، منحنیهای دُز بر حسب عمق برای آن ماده و انرژی شتاب‌دهنده به دست آورده شود.

۲- مواد و روشها

در این پژوهش، آب و پساب از سه موقعیت الف- چاه آب، ب- پساب مرکب ورودی تصفیه خانه فاضلاب شهر یزد (برکه تثبیت) و ج- پساب لحظه‌ای خروجی تصفیه‌خانه فاضلاب شهر یزد نمونه‌برداری شد. نمونه‌برداری یاد شده به کمک ظروف پلی‌اتیلنی انجام شد که توسط پرتو دهی، استریل شده بودند (شکل ۱). سپس در هر آزمایش پنج نمونه آب و یا پساب در ظروف مخصوص با ارتفاع ۹ میلی‌متر از جنس پلکسی گلاس با حجم مورد نیاز تهیه شد. ارتفاع مزبور با توجه به منحنیهای دُز بر حسب عمق آب، لحاظ گردید تا امکان دریافت دُز یکنواخت برای ظروف کاملاً پر از آب یا پساب فراهم آورده شود. در هنگام پر کردن ظروف اجازه ایجاد حباب هوا داده نشد تا در هنگام پرتودهی از ایجاد ازن در داخل ظروف جلوگیری شود و صرفاً اثر پرتودهی الکترون‌ها بر روی آب یا پساب بررسی گردد.

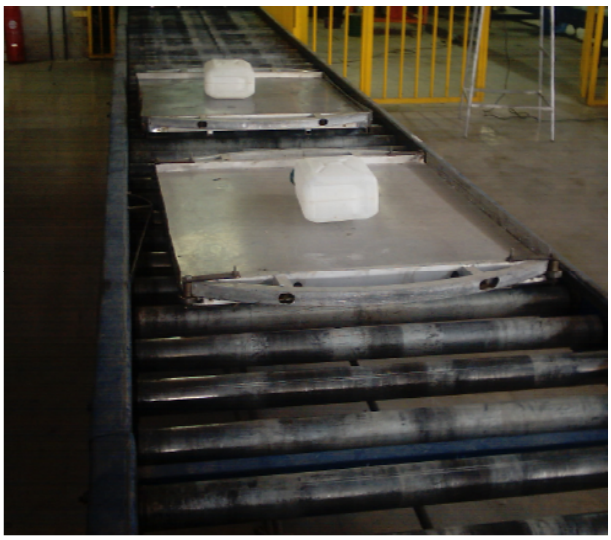
۲-۱- پرتو دهی

پرتودهی نمونه ها توسط شتاب‌دهنده الکترونی رودوترون TT200 مرکز تحقیقات و کاربرد پرتو فرآیند سازمان انرژی اتمی ایران که باریکه الکترونی با انرژی ۱۰مگا الکترون ولت تولید می‌نماید، انجام گرفت. مشخصات دستگاه فوق در جدول ۱ ارائه شده است. نمونه‌های آب و یا پساب تهیه شده، در ظروف مخصوص تحت تابش دُزهای بین ۰/۵ تا ۵ کیلوگری قرار گرفتند. مقدار دُز دریافتی نمونه توسط فیلم‌های مخصوص دُزیمتری CTA[1] که بر روی ظروف حاوی نمونه قرار می‌گرفت، با روش اسپکتروسکوپی ارزیابی شد (شکلهای ۲ و ۳).

۲-۲- تعیین بار میکروبی

در انجام آزمایش‌های میکروبیولوژیکی آب و فاضلاب، در نمونه‌گیریها و آماده کردن ظروف و همچنین در آزمایش‌های تشخیص *سالمونلا، شیگلا و ویبریو* از استاندارد شماره ۱۷۷۹ ایران استفاده شد [۱۰-۱۲] وآزمایش‌هایی به شرح زیر بر روی

[1] Cellulose Triacetate (CTA)



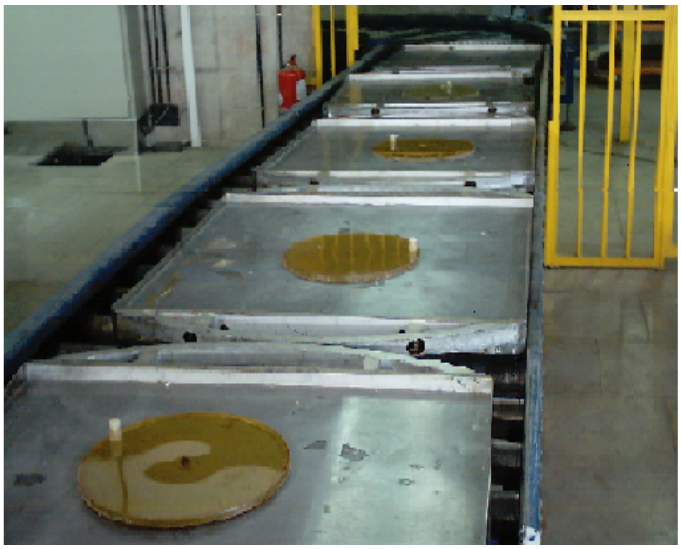
شکل ۱- ظروف پلاستیکی از جنس پلی‌اتیلن جهت نمونه برداری توسط پرتوهای الکترونی استریل می‌شوند

جدول ۱- مشخصات دستگاه شتاب‌دهنده الکترون (رودوترون) مرکز تحقیقات و کاربرد پرتو فرآیند

انرژی باریکه الکترونی	۵ و ۱۰ مگا الکترون ولت
توان باریکه در انرژی ۵ مگا الکترون ولت	۳۵ کیلو وات
توان باریکه در انرژی ۱۰ مگا الکترون ولت	۷۵ کیلو وات
پاشندگی انرژی در ۱۰ مگا الکترون ولت	۳۰۰± کیلو الکترون ولت
محدوده جاروب	۱۰۰-۳۰ سانتی‌متر
توان کل مصرفی	کمتر یا برابر ۳۰۰ کیلو وات
بسامد رادیویی (RF)	۱۰۷/۵ مگا هرتز
توان خروجی بسامد رادیویی (RF)	۲۰۰ کیلو وات
جریان متوسط تفنگ الکترونی	۱۰-۰ میلی آمپر
دقت	۵۰± میکرو آمپر

تمام نمونه‌ها قبل و بعد از پرتودهی انجام گرفت. برای شمارش کلی باکتری‌های مزوفیل هوازی از کشت نمونه روی محیط تشتک شمارش آگار به صورت مخلوط کردن نمونه‌ها با محیط کشت در ظروف پتری و گرمخانه گذاری به مدت ۷۲ ساعت استفاده شد.
به منظور شمارش و تشخیص کلیفرم‌ها و *اشرشیاکلی* از روش MPN استفاده گردید[۱۰و۱۱]. همچنین برای تشخیص *سالمونلا و شیگلا* و دیگر باکتری‌ها نیز به روش زیر عمل گردید: پس از ۲۰-۱۶ ساعت انکوباسیون نمونه مورد نظر در پپتون واتر بافره در دمای ۳۷ درجه سانتی‌گراد، ۵ میلی لیتر از نمونه را به لوله‌های جداگانه حاوی آبگوشت تتراتیونات و نیز آبگوشت سلینت اف اضافه کردیم و ۲۴-۱۸ ساعت در دمای ۳۷ درجه سانتی‌گراد گرمخانه‌گذاری کردیم. سپس از هر دو محیط روی پتری های حاوی محیط‌های کشت بیسموت سولفیت آگار و دزکسی کولات سیترات آگار و SS آگار کشت داده شد. پس از ۲۴ ساعت انکوباسیون در دمای ۳۷ درجه سانتی‌گراد، کلنی‌های مشکوک را به محیط مک کانکی آگار انتقال دادیم. بعد از ۲۴ ساعت انکوباسیون کلنی‌های بی‌رنگ و گرد را به پپتون واتر انتقال دادیم، تا پس از ۲۴ ساعت، از این محیط به منظور انجام آزمونهای تحرک و تست‌های تکمیلی دیگر استفاده نماییم [۱۲].

شکل ۲- دُز دریافتی نمونه توسط فیلم های مخصوص دُزیمتری که بر روی ظروف حاوی نمونه نصب شده است، با روش اسپکتروفوتومتری اندازه‌گیری می‌شود.



شکل ۳- نمونه های آب و پساب جهت پرتو دهی و دریافت دُز لازم از زیر باریکه جاروب کننده الکترون‌ها یک یا چند بار عبور داده می‌شوند.

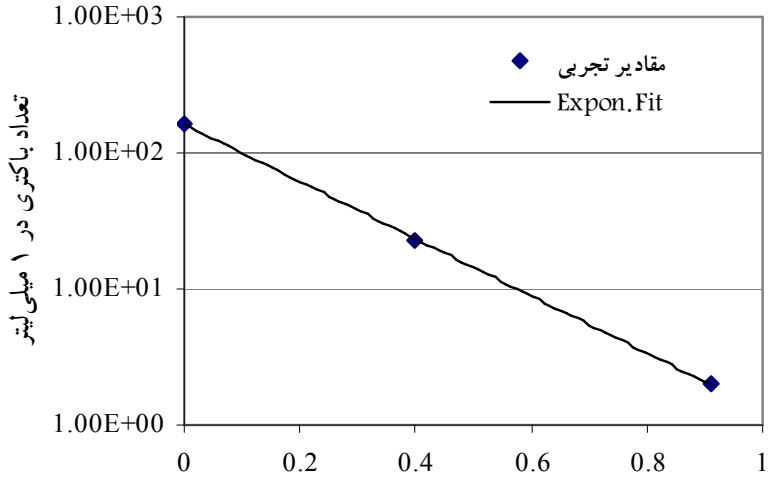
۳- نتایج و بحث

میزان آلودگی نمونه‌ها شامل شمارش آ لودگی کلی باکتریایی، تعداد *اشرشیاکلی* وهمچنین کلی فرم‌های نمونه‌های مختلف آب چاه و پساب شهری قبل و بعد از پرتودهی با دُزهای مختلف با روش کشت اشاره شده اندازه گیری شد.

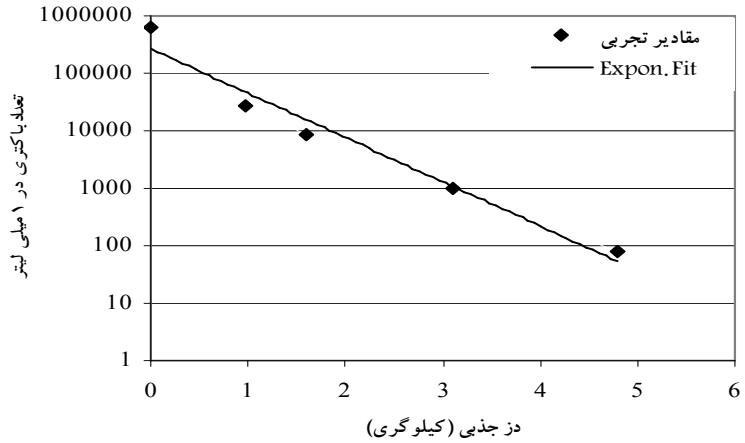
۱- در شکل ۴ ، میزان مقاومت باکتری‌های موجود در نمونه‌ای از آب چاه در برابر پرتودهی با دُزهای مختلف (دُز پایندگی) نشان داده شده است.

۲- نمونه‌های مختلفی از پساب مرکب از ورودی تصفیه‌خانه (برکه تثبیت) استان یزد تهیه گردید و مورد پرتو دهی قرار گرفت. شکلهای ۵ تا ۷ به ترتیب تغییرات تعداد کلی باکتری‌ها، تعداد *اشرشیاکلی* و کلیفرم‌ها را بر حسب دُزهای جذب شده در اثر تابش پرتوهای الکترونی در یک نمونه از پساب مرکب ورودی قبل و بعد از پرتودهی نشان می‌دهند.

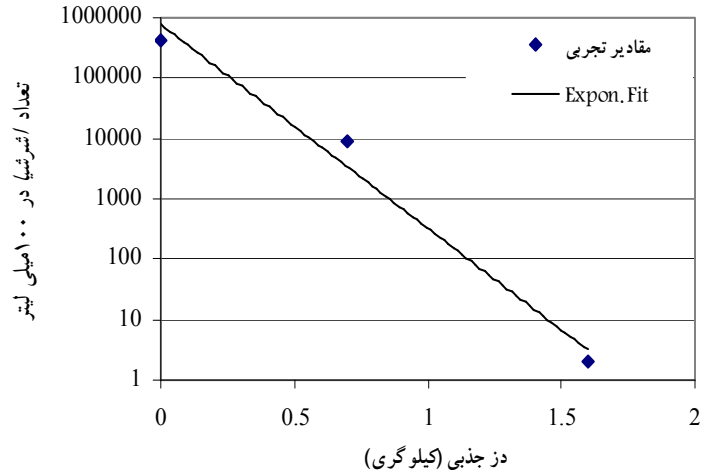
۳- نمونه‌های مختلفی از پساب لحظه‌ای از خروجی تصفیه‌خانه نیز تهیه شد و قبل و بعد از پرتودهی مورد بررسی و آزمایش قرار گرفت. شکلهای ۸ تا ۱۰ اثر پرتودهی بر روی پساب لحظه‌ای برکه تثبیت را نشان می‌دهند که در آنها به ترتیب تغییرات شمارش باکتری‌ها، کلیفرم و *اشرشیاکلی* در اثر پرتودهی با باریکه الکترونی تحت دُزهای کمتر از ۵ کیلوگری نشان داده شده است.



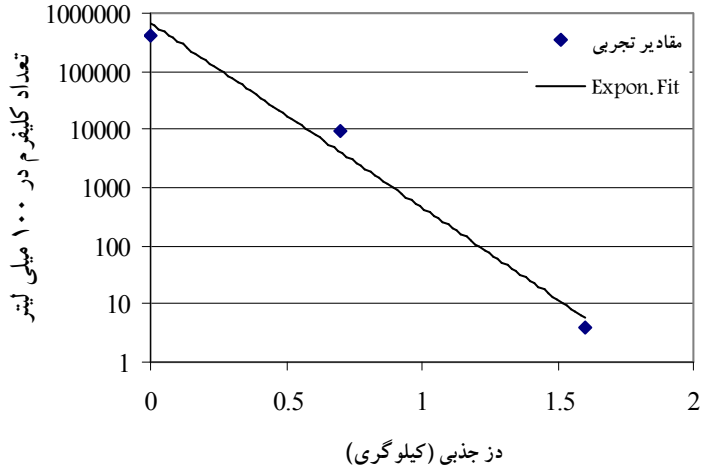
شکل ۴- دُز پایندگی کلی باکتری‌ها در نمونه آب چاه



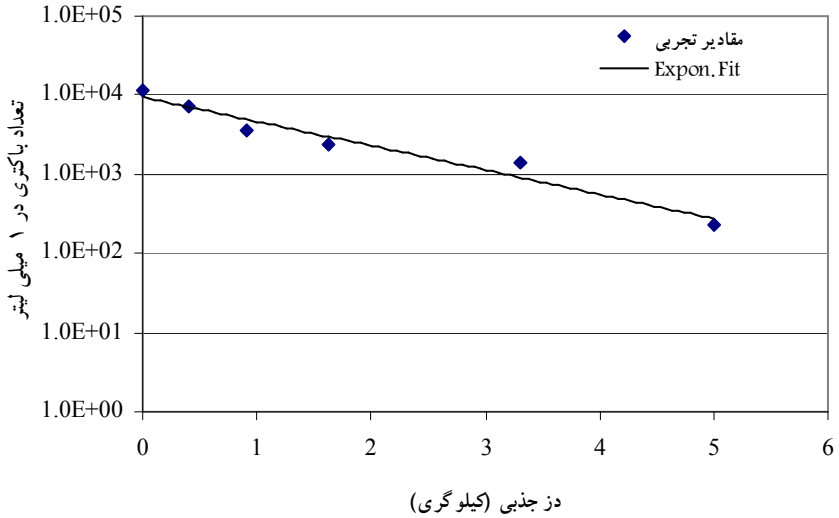
شکل ۵- تغییرات تعداد باکتری‌ها برحسب میزان دُز جذبی در نمونه پساب مرکب ورودی تصفیه‌خانه یزد



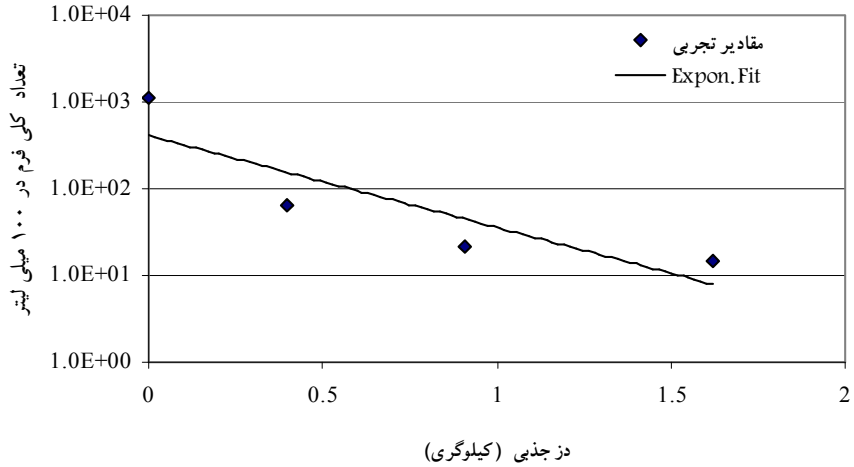
شکل ۶- تغییرات تعداد *اشرشیا کلی* برحسب میزان دُز جذبی در نمونه پساب مرکب ورودی تصفیه‌خانه یزد



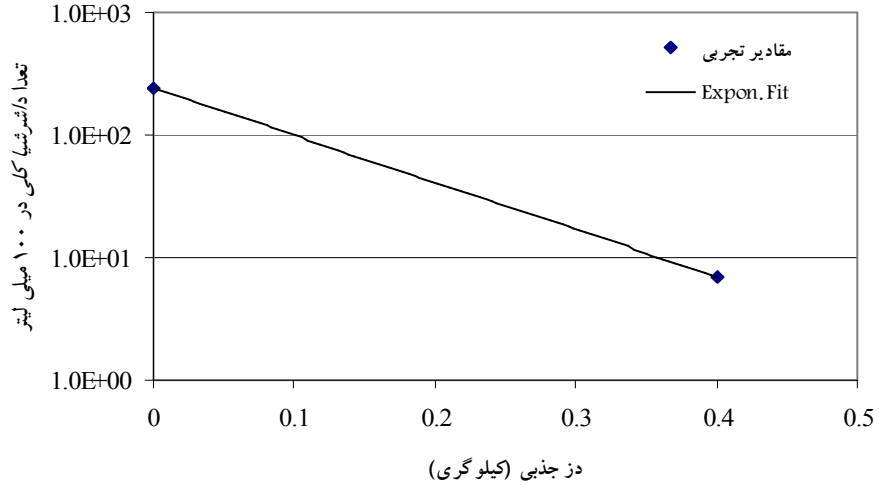
شکل ۷-تغییرات تعداد کلیفرم‌ها برحسب میزان دُز جذبی در نمونه پساب مرکب ورودی تصفیه‌خانه



شکل ۸- تغییرات تعداد باکتری‌ها بر حسب دُز جذب شده در نمونه پساب خروجی لحظه‌ای برکه تثبیت



شکل ۹- تغییرات دُز پایندگی کلی‌فرم‌ها برحسب میزان دُز جذبی در نمونه پساب خروجی لحظه‌ای برکه تثبیت



شکل ۱۰- تغییرات *اشرشیاکلی* نسبت به دُز جذبی توسط پرتوهای الکترونی در نمونه پساب خروجی قبل و بعد از پرتودهی

جدول۲- باکتری‌های تشخیص داده شده در فاضلاب شهری قبل وبعد از تابش الکترونی

دُز kGy	*اشرشیاکلی*	*کلبسیلا*	*انتروباکتر*	*سالمونلا*	*پروتئوس*	*مورگانلا*	*شیگلا*
۰	+	+	+	+	+	+	+
۰/۵۴	+	+	+	+	+	+	+
۰/۸۸	+	+	+	+	+	+	−
۱/۵	+	+	+	−	−	−	−
۵/۱	−	−	−	−	−	−	−

جدول ۳- باکتری های پساب و مقدار D_{10} آنها بر حسب کیلو گری

نوع باکتری	مقدار D_{10} (کیلو گری)
باکتری های مزوفیل هوازی	۱/۳
کلیفرم ها	۰/۴
اشرشیا کلی	۰/۳

۴- انواع مختلف باکتری‌های تشخیص داده شده در نمونه پساب مرکب ورودی، قبل و بعد از پرتودهی در جدول ۲، نشان داده شده است. وجود و یا عدم وجود آنها قبل و بعد از پرتودهی به ترتیب با علامت مثبت و منفی نشان داده شده است. همان طور که ملاحظه می‌شود این باکتری‌ها با توجه به نوع آنها پس از دریافت دُز حد اکثر ۵ کیلوگری از بین می‌روند.

همان طور که از شکلهای ۴ تا ۱۰ و همچنین جدول ۲، استنباط می‌شود در کلیه نمونه‌های مورد آزمون که دارای آلودگی اولیه بودند، تعداد کلی‌فرم‌ها و *اشرشیاکلی* تحت پرتودهی الکترونی با دُزهای حداکثر ۲ کیلوگری به صفر می‌رسد. تحت همین شرایط هیچ‌گونه آلودگی *سالمونلا* و یا *شیگلا* نیز مشاهده نشد. سایر میکروارگانیسم‌های تشخیص داده شده که در جدول ۲، نام برده شده است در دُزهای حداکثر ۵ کیلوگری حیات خود را از دست می‌دهند. در این تحقیق سعی شده است صرفاً اثر پرتوهای الکترونی در رفع آلودگی میکروبی از آب و پساب شهری مورد بررسی قرار گیرد، لذا نمونه‌های مورد آزمایش در ظروف مخصوص در بسته و نه در مجاورت هوای آزاد مورد پرتودهی قرار گرفتند. در صورت عبور نمونه‌ها (آب ویا پساب) در ظروف سر باز و یا در هوای آزاد، در اثر برخورد الکترون‌های پر انرژی با مولکول‌های هوا مقداری ازن نیز ایجاد می‌شود که باعث افزایش کارآیی میکروب زدایی می‌گردد. در صورت نیاز برای اضافه نمودن ازن به فرآیند، برای کارآیی مورد نظر، باید به مقدارکافی اکسیژن در پساب وارد نمود تا در حین عبور پساب از مقابل باریکه الکترونی و با ایجاد ازن بهره عمل افزایش یابد.

استفاده از پرتوهای یون‌ساز مانند UV روش تقریباً مرسومی است که اخیراً مورد توجه زیاد قرار گرفته است. افزایش ازن یا پراکسید هیدروژن به همراه روش پرتودهی با پرتوهای UV نیز باعث افزایش ایجاد رادیکال‌های آزاد می‌شود که خود عامل اصلی جهت رفع آلودگی و همچنین افزایش کارآیی می‌باشد [۵ و۱۳]. با این وجود، کارآیی استفاده از باریکه‌های الکترونی در رفع آلودگی میکروبی، حتی وقتی به تنهایی مورد استفاده قرار گیرد، به دلیل وجود الکترون‌ها (که دارای جرم هستند) و مقطع مؤثر بیشتر، در مقایسه با استفاده از پرتوهای ماورای بنفش بیشتر است.

۵- تعیین ارزش D_{10}: با استفاده از نتایج حاصل از آزمون میکروبی نمونه‌ها که قبل و بعد از پرتودهی انجام گردید، نمودارهای دُز پایندگی برای باکتری‌های مزوفیل هوازی، کلی فرم‌ها و *اشرشیاکلی* ارائه شد. با استفاده از معادله حاصل از برازش داده‌ها مقدار میانگین D_{10} را می‌توان به دست آورد (جدول ۳). D_{10} ، مقدار دُزی است که تحت آن، ۹۰ درصد از شمارش آلودگیها کاهش می‌یابد. از این طریق دُز بهینه جهت پرتودهی آب را می‌توان به دست آورد. مقدار دُز بهینه از رابطه زیر به دست می‌آید

$$D=D_{10}(\log N_0-\log N_T) \qquad (۲)$$

که در آن :

D : دُز بهینه، N_0 : تعداد اولیه باکتری‌ها و N_T تعداد مجاز باکتری‌ها می‌باشد [۱۴].

با توجه به نتایج ارائه شده در این پژوهش با ملاحظه مقدار دُز لازم جهت پرتو دهی و از بین رفتن آلودگیهای میکروبی می‌توان ادعا نمود با استفاده از پرتو دهی با باریکه الکترونی می‌توان پسابهای با حجم زیاد را با کارآیی بسیار خوبی تصفیه نمود و برای استفاده مجدد به خصوص در صنایع به کار برد. در خصوص ایجاد و یا تغییر میزان عناصر سمی آلی ویا غیر آلی از قبیل فلزات سنگین در اثر پرتودهی الکترونی پساب، در این پروژه بررسی به خصوصی

به عمل نیامد. بررسی‌های محققان نشان از تأثیر قابل توجه این پرتوها بر عناصر دیگر موجود در آب و پساب دارد. در این خصوص بررسی‌های بیشتر توسط همین گروه در دست انجام می‌باشد.

۴-نتیجه گیری

دراین مقاله به استفاده از پرتوهای یون‌ساز به عنوان یک روش مؤثر جهت رفع آلودگیهای میکروبی اشاره شده است. به خصوص استفاده از باریکه الکترونی به عنوان یک روش جدید یونیزاسیون بسیار قوی که باعث ایجاد رادیکال‌های آزاد OH و هیدروژن می‌شود، معرفی شده است. در مقیاس آزمایشگاهی نمونه‌های آب چاه و پساب (ورودی و خروجی برکه تثبیت)، با دُزهای مجاز مورد پرتودهی با باریکه الکترونی قرار گرفتند. نتایج حاصل از این پرتودهی توسط باریکه الکترونی که برای اولین بار گزارش می‌شود، حاکی از کارآیی بسیار بالا در از بین بردن آلودگی میکروبی و با دُزهای بسیار کم (کمتر از ۵ کیلوگری) است. گرچه استفاده از این روش به عنوان یک روش بسیار مؤثر برای ضدعفونی کردن پساب از نظر اقتصادی نیاز به بررسی بیشتر دارد، لکن این روش در مقایسه با دیگر روشهای شیمیایی روشی بسیار تمیز می‌باشد که باعث ایجاد آلودگیهای زیست‌محیطی نمی‌شود و در مقایسه با روشهای دیگر یونیزاسیون از جمله ازن‌زنی وپرتودهی با اشعه ماورای بنفش دارای کارآیی بیشتری است.

۵- تشکر و قدردانی

این پروژه با مشارکت مالی و حمایت شرکت آب و فاضلاب و شرکت سهامی آب منطقه‌ای استان یزد و همچنین کمک مالی سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور صورت پذیرفته است که مؤلفین از این طریق تشکر و سپاسگزاری خود را ابراز می‌نمایند. از کارکنان آزمایشگاه آب و فاضلاب در امر تهیه نمونه‌ها، آزمایشگاه میکروبیولوژی مرکز تحقیقات و کاربرد پرتو فرآیند به خصوص خانم نیره فلاح‌نژاد و آقای مسعودی در کشت نمونه‌ها نیز تشکر می‌شود. همچنین از مدیریت و پرسنل واحدهای دُزیمتری و پرتودهی به خصوص آقایان مهندس قاسمی، مهندس پور صالح و مهندس بابایی نیز کمال امتنان به عمل می‌آید. از آقای محمد علی غفارزاده از مرکز تحقیقات مهندسی وابسته به دانشگاه یزد به دلیل همکاری در مراحل مختلف اجرای طرح نیز تشکر می‌گردد.

۶- مراجع

1- Duarte, C.L., et al. (2000). "Application of electron beam irradiation combined to conventional treatment to treat industrial effluents." *Radiation Physics and Chemistry*, 57, 513-518.

2- Fang, X., and Wu , J. (1999). "Some remarks on applying radiation technology combined with other methods to the treatment of industrial wastes." *Radiation Physics and Chemistry*, 55, 465-468.

3- Borrely, S.I., Crus, A.C., Del Mastro, N.L., Sampa, M.H.O., and Somessari, E.S. (1998). "Radiation processing of sewage and sludge." *A Review, Progress in Nuclear Energy*, 33 (1-2), 3-21.

4- Das, K. (2001). "Ultraviolet disinfection to a wastewater treatment plant." *Clean Prod. Processes,* 3, 69-80.

5- Beltran, F.J., Gonzalez, M., and Gonzalez, F.J. (1997)."Industrial wastewater advanced oxidation." *Water Research*, 31 (10), 2405-2414.

6- Cooper, W.J., Nickelson, M.G., Meacham, D.E., Waite, T.D., and Kurucz, C.N. (1992). "High-energy electron beam irradiation: An innovation process for the treatment of aqueous-based organic hazardous wastes." *J. Environ. Sci. Health*, A27 (1), 219-244.

7- Sampa, M.H.O., Borrely, S.I., Silva, B.L., Viera, J.M., et al. (1995). "The use of electron beam accelerator for the treatment of drinking water and wastewater in Brazil." *Rad. Phys. Chem.,* 46 (4-6), 1143-1146.

8- IAEA-TECDOC-1225. (2001). *Use of irradiation for chemical and microbial decontamination of water, wastewater and sludge,* Final report of a co-ordinated research project 1995-1999, Viena.

9- Sarma, K.S.S., IAEA-TECDOC-1386. (2004). "Emerging application of radiation processing." *Proceedings of a technical meeting held in Viena*, 28-30 April, 2003, 73-77.

۱۰- مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران. (۱۳۶۸). *روش جداسازی- شناسایی و شمارش کلیفرم ها*، چاپ چهارم، تهران.

۱۱- مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران. (۱۳۷۳). *روش جستجو و شمارش بیشترین مقدار احتمالی اشرشیا کلی در مواد غذایی*، چاپ سوم، تهران.

۱۲- مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران. (۱۳۶۹). *روش شناسایی و جستجوی سالمونلا ها*، ویرایش پنجم، تهران.

13- Glaze, W.H., Kang, J.W., and Chapin, D.H. (1987). "The chemistry of water treatment processing involving ozone, hydrogen peroxide and ultraviolet radiation." *Ozone: Science &Engineering,* 9, 335-352.

14- Katusin-Razem, B., Novak, B., and Razem, D. (2001). "Microbiological decontamination of botanical raw materials and corresponding pharmaceutical products by irradiation." *Rad. Phys. Chem.,* 62, 261-275.