فصلنامه انسان و محیط زیست، شماره ۴۵، تابستان ۹۷

# روش نوین تصفیه آب و فاضلاب با استفاده از باریکه‌های الکترونی

**سید محمد موسویان** [1*]

smm1358@gmail.com

**تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۱۲/۲۲** **تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۲/۰۵**

**چکیده**

ورود فزاینده انواع آلاینده به محیط زیست و وضع استانداردهای زیست محیطی سخت گیرانه و عدم توانایی روش‌های معمول تصفیه برای حذف کامل و یا کاهش آلاینده ها به سطح مطلوب منجر به مطالعه و توسعه فرایندهای تصفیه جدید نظیر باریکه‌های الکترونی شده است. تاباندن باریکه‌های الکترونی به آب و فاضلاب، باعث تولید هم‌زمان گونه های فعال احیاءکننده و اکسیدکننده ($e^-_{aq}$، $H^\bullet$، $OH^\bullet$) می شود که به سرعت و به صورت غیرانتخابی با ترکیبات آلاینده واکنش داده و آن‌ها را تجزیه نمایند. در این مقاله، سابقه استفاده از باریکه‌های الکترونی و کاربردهای آن در کنترل آلودگی زیست محیطی در مقیاس های مختلف و شتاب دهنده های الکترونی به عنوان تجهیزات تولیدکننده باریکه های الکترونی، راکتورهای مورد استفاده برای تابش باریکه‌های الکترونی، عوامل موثر در کارایی این روش و سیستم های باریکه‌های الکترونی ارایه شده است و با توجه به نقاط قوت این روش نسبت به روش‌های متداول تصفیه و همچنین هزینه کم‌تر و عملکرد بهتر آن به خصوص در زمینه گندزدایی فاضلاب و لجن و حذف رنگ از فاضلاب صنایع، دور از ذهن نیست که در آینده نزدیک به عنوان یکی از فناوریهای مهم در حفظ محیط زیست معرفی گردد.

**کلمات کلیدی**: باریکه‌های الکترونی، تصفیه، آب و فاضلاب، شتاب‌دهنده الکترونی، گونه‌های فعال، رادیکال‌های هیدروکسیل.

۱- دانش آموخته کارشناس ارشد مهندسی بهداشت محیط دانشگاه تربیت مدرس و کارشناس گروه محیط زیست وزارت نیرو، تهران، ایران. *(مسوول مکاتبات)

*Human & Environment., No. 45, Summer 2018*

# New Method of Water and Wastewater Treatment Using Electron Beams

**Seyed Mohammad Mosavian** [1*] *(Corresponding Author)*
smm1358@gmail.com

## Abstract

Release of several types of pollutants to the environment and implementation of ever strict environmental rules and the inability of traditional treatment methods to completely eliminate or reduce the pollutants to a standards level lead to study and develop of new treatment processes such as the electron beams. The electron beams irradiation to water and wastewater resulting generation of reducing and oxidizing species (OH•, H•, e-aq) that react quickly and non-selectively with contaminants in the water and wastewater and then decompotion them. In this paper, the history of using of electron beam and its applications in environmental pollution control in various scales, electron accelerators as electron beams production tools, reactors used for irradiation, Factors affecting the efficiency of this method, electron beams systems and advantages and disadvantages of electron beams is presented. Due to the strengths of this method than conventional methods and also lower costs and better performance, especially in the field of disinfection, sewage, sludge and color removal of wastewater industries, in the near future, is not far from the mind to be introduced as one of the key technologies in protecting the environment**.**

**Key Words:** Electron Beams, Treatment, Water and Wastewater, Electron Accelerator, Active Species, Hydroxyl Radicals.

1- MSc of Environmental Health Engineering - University of Tarbiat Modares, Member of Environment Office of Ministry of Energy, Tehran, Iran. **(Corresponding Author)*

**مقدمه**

نگاهی گذرا بر وضعیت محیط زیست جهان در دو دهه گذشته نشان می‌دهد که مشکلات و مسایل آلودگی محیط‌زیست نه‌تنها کاهش نیافته بلکه روز به روز در حال افزایش است. حدود ۳۰۰ سال پیش، انقلاب صنعتی در قرن ۱۹ میلادی همراه با پیشرفت‌های علمی، موجبات تعالی جامعه بشری را فراهم آورد و دست‌آوردهای با ارزشی به همراه داشت اما عدم توجه به نیازهای آتی بشر و بهره‌برداری لجام گسیخته از منابع طبیعی برای برآورده کردن نیاز صنایع مختلف و به دنبال آن، تولید و مصرف روز افزون انواع مواد شیمیایی، منجر به رها شدن انواع آلاینده‌های شیمیایی به منابع آبی شده است که به دلیل پیچیدگی و افزایش روزافزون آلاینده‌ها، روش‌های معمول قادر به تصفیه کامل آلاینده‌ها نیستند و از طرفی طی دو دهه گذشته، استانداردهای زیست‌محیطی سخت‌گیرانه‌تری وضع شده است که این عوامل باعث شده است که در چند سال اخیر روش‌های تصفیه متنوعی از لحاظ اقتصادی و فنی مورد آزمایش قرار گرفته و توسعه پیدا کنند. از جمله روش‌های تصفیه ممکن برای تصفیه آب و فاضلاب بکارگیری تابش‌های یون‌ساز می‌باشد. تابش‌های یون‌ساز مانند پرتو گاما و باریکه‌های الکترونی از شکل‌های موثر انرژی هستند که می‌توانند آلاینده‌های آلی را تجزیه کنند. پرتوهای یون‌ساز منجر تجزیه آب و متعاقب آن باعث ایجاد رادیکال‌های آزاد هیدروکسیل، هیدروژن و الکترون می‌شود که میل به واکنش قوی آنها بویژه رادیکال‌های هیدروکسیل باعث تجزیه ترکیبات آلی می‌شود(۱). قدرت نفوذ باریکه‌های الکترونی نسبت پرتو گاما در مواد کم است اما از نظر انتقال انرژی به اتم‌های ماده هدف، باریکه‌های الکترونی نسبت به پرتو گاما و حتی سایر امواج الکترومغناطیسی (پرتوهای نور مرئی، ماوراء بنفش و اشعه ایکس) برتری دارد(۲). تابش باریکه‌های الکترونی[1] جزء فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته[2] محسوب می‌گردد(۳). همان‌طور که می‌دانید در فرایندهای اکسیداسیون پیشرفته گونه‌های شیمیایی خیلی فعال واکنش‌پذیر مانند رادیکال‌های هیدروکسیل تولید می‌شود که اکسیده‌کننده‌های خیلی قوی و فعال بوده و به سرعت ($10^{6}$-$10^{9}$ $M^{-1}S^{-1}$) و به‌صورت غیرانتخابی[3] با اکثر ترکیبات آلی واکنش داده و آن‌ها را تجزیه می‌کنند(۴). از کشف تابش‌های با انرژی بالا بیش از ۱۰۰ سال می‌گذرد و توانایی این تابش‌ها در تغییرات ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی مواد به خوبی شناخته شده است و استفاده از فناوری تابش برای استریلیزاسیون ادوات پزشکی، تابش‌دهی مواد غذایی، فرواری پلیمر و در چند دهه گذشته به منظور تصفیه هوا، آب و فاضلاب رشد چشمگیری داشته است(۵). مطالعات انجام شده در سال‌های اخیر نشان می‌دهد تابش‌های یونیزه‌کننده نظیر پرتو گاما و باریکه‌های الکترونی به تنهایی یا در ترکیب با روشهای دیگر در تجزیه ترکیبات آلی مقاوم در محلول‌های آبی و حذف و غیر فعال سازی انواع میکروارگانیسم‌ها و انگل‌ها موثر می‌باشند. باریکه‌های الکترونی قابلیت خود را در تجزیه بسیاری از ترکیبات آلی خطرناک و غیرفعال کردن باکتری‌ها و کلی‌فرم‌ها نشان داده است و می‌تواند برای تصفیه فاضلاب انواع صنایع نظیر صنایع غذایی، بهداشتی، داروسازی، کاغذ و نساجی کاربرد داشته باشد. از این باریکه‌ها نه تنها برای حذف ترکیبات سمی ساده بلکه برای حذف مخلوطی از آلاینده‌های موجود در انواع آب و فاضلاب با کیفیت‌های مختلف می‌توان استفاده کرد(۵،۱۴). کاربرد باریکه‌های الکترونی در زمینه تصفیه آب آشامیدنی، فاضلاب و تصفیه آب زیرزمینی مقرون به صرفه خواهد بود (۹). در جدول ۱ کارایی باریکه‌های الکترونی را برای حذف برخی ترکیبات آلی در محیط آبی را مشاهده می‌کنید.

1-Electron Beam Irradiation
2-Advanced Oxidation Process
3-Non-Selective

**جدول۱- کارایی فرآیند باریکه های الکترونی پر انرژی برای حذف ترکیبات آلی در محیط آبی (۱۳)**

| ترکیب | درصد حذف | دز مورد نیاز (کیلو راد) | ترکیب | درصد حذف | دز مورد نیاز (کیلو راد) |
|---|---|---|---|---|---|
| Chloroform | ۸۳-۹۹ | ۵۸۶-۶۵۰ | Benzene | >۹۹ | ۴۹-۶۵۰ |
| Bromodichloromethane | >۹۹ | ۸۰ | Toluene | ۹۷ | ۴۹-۶۵۰ |
| Dibromochloromethane | >۹۹ | ۸۰ | Chlorobenzene | ۹۷ | ۶۵۰ |
| Bromoform | >۹۹ | ۸۰ | Ethylbenzene | ۹۲ | ۶۵۰ |
| Carbon tetrachloride | >۹۹ | ۸۰ | 1,2-Dichlorobenzene | ۸۸ | ۶۵۰ |
| Trichloroethylene (TCE) | >۹۹ | ۵۷-۵۰۰ | 1,3-Dichlorobenzene | ۸۶ | ۶۵۰ |
| Tetrachloroethylene (PCE) | >۹۹ | ۲۴۱-۵۰۰ | 1,4-Dichlorobenzene | ۸۴ | ۶۵۰ |
| 1.1 – Dichloroethene | >۹۹ | ۸۰۰ | o-Xylene | ۹۲ | ۶۵۰ |
| 1.2 – Dichloroethene | ۶۰ | ۸۰۰ | Dieldrin | >۹۹ | ۸۰۰ |
| Hexachloroethane | >۹۹ | ۸۰۰ | Total phenol | ۸۸ | ۳۷-۸۰۰ |
| 1,1,1-Trichloroethane | ۸۹ | ۶۵۰ | TNT | ۴۰ | ۸۰۰-۱۷۰۰ |

اولین مطالعات در زمینه تصفیه با تابش که با هدف گندزدایی انجام گرفت به دهه ۱۹۵۰ میلادی بر می‌گردد. در دهه ۱۹۶۰ میلادی این مطالعات برای تصفیه آب و فاضلاب توسعه پیدا کرد و بعد از انجام تحقیقات آزمایشگاهی بر روی فاضلاب صنایع و آب زیرزمینی آلوده در دهه‌های ۷۰ و ۸۰ میلادی، چند واحد تصفیه در مقیاس پایلوت برای تحقیق و بررسی بیش‌تر در دهه ۹۰ میلادی ساخته شد(۱۴، ۹). اولین کاربرد تابش در مقیاس کامل برای تصفیه فاضلاب واحد صنعتی تولید لاستیک مصنوعی در شهر ورونژ[1] روسیه گزارش شده است. در واحد مذکور از تابش برای تبدیل امولسیون‌کننده غیر قابل تجزیه بیولوژیکی و سمی نکال[2] به شکل قابل تجزیه استفاده می‌شد (۹،۱۰،۱۴). در سال ۲۰۰۵ نیز از باریکه‌های الکترونی در مقیاس بزرگ در تصفیه‌خانه صنعتی شهر دائگو[3] کره جنوبی با حمایت آژانس بین‌المللی انرژی اتمی برای تصفیه فاضلاب نساجی با ۱۰،۰۰۰ مترمکعب در شبانه روز استفاده شد و نشان داد این روش نسبت به سایر روش‌های متداول تصفیه دیگر کم هزینه‌تر است (۱۴، ۹). علاوه بر کشور کره‌جنوبی با هماهنگی آژانس بین‌المللی انرژی اتمی، در کشورهای دیگری نظیر هلند، اردن، اتریش، برزیل، آمریکا، مجارستان، پرتغال، اکوادر و ترکیه استفاده از تابش‌های یونیزه‌کننده در مقیاس‌های مختلفی برای تصفیه آب و فاضلاب مورد آزمایش قرار گرفت که به برخی از نتایج مهم آزمایشات انجام گرفته اشاره می‌شود(۹):

- کاربرد باریکه‌های الکترونی در مقیاس کامل در کره‌جنوبی ثابت کرد فرآیند مذکور در مقایسه با سایر روش‌های تصفیه مقرون به صرفه‌تر می‌باشد.
- مقایسه تصفیه فاضلاب با باریکه‌های الکترونی با اشعه ماوراءبنفش و ازن‌زنی از نظر اقتصادی نشان داد فرآیند باریکه الکترونی برای کنترل ای‌کلی[4] در حجم‌های بالای ۵،۰۰۰ مترمکعب در روز خیلی مقرون به صرفه‌تر از دو روش ذکر شده است.

1-Voronezh
2-Nekal
3-Daegu
4-E. coli

- تابش باریکه الکترونی و گاما جریان خروجی از واحد تصفیه ثانویه و پیشرفته تصفیه‌خانه فاضلاب شهری منجر به تخریب ترکیبات آلی، حذف فعالیت استروژنی و کاهش محسوس در تعداد میکروارگانیسم‌ها به طور هم‌زمان می شود.
- فرآیند تابش قادر است غلظت‌های پایین استروژن را در پساب‌هایی با کیفیت گوناگون با کارایی بالایی حذف نماید.
- بعد از حذف موفقیت‌آمیز آلاینده‌های آب توسط فرآیند تابش باید آب تصفیه شده از نظر وجود محصولات جانبی سمی غیر تشخیص، با روش‌های شیمیایی، مورد بررسی قرار گیرد.

لازم به ذکر است به دلیل این‌که این فرآیند نسبتا سرمایه‌بر (سرمایه‌گذاری اولیه) بوده و فناوری جدیدی در عرصه تصفیه آب و فاضلاب می‌باشد تصفیه‌خانه‌های که از روش فوق استفاده می‌کنند کم است و باید مطالعات و اطلاع‌رسانی زیادی برای شناساندن و کاربرد تجاری آن برای تصفیه و حذف انواع مختلف ترکیبات آلی و میکروارگانیسم‌ها صورت پذیرد(۱۶، ۹).

**اثر باریکه‌های الکترونی**

فناوری باریکه‌های الکترونی برپایه استفاده از اشعه‌های یون‌ساز (گاما و باریکه الکترون) برای شروع تغییرات شیمیایی در محیط آبی استوار است. بر خلاف سایر اشعه‌ها (اشعه ماوراءبنفش و مادون بنفش) باریکه‌های الکترونی تقریبا به طور کامل در اوربیتال‌های الکترونی ترکیبات هدف جذب می‌شوند و بدین سان باعث افزایش سطح انرژی الکترون‌های اتم/ مولکول می‌شوند و در نهایت باعث خارج شدن یک یا چند الکترون از مدار و شکسته شدن باند شیمیایی آن‌ها و ایجاد تغییرات ساختاری ترکیبات هدف می‌شوند. سطح انرژی باریکه‌های الکترونی تابش شده به حدی است که منجر به تغییر در ساختار مولکولی ترکیبات می‌شود اما به قدری نیست که باعث فعالیتهای رادیواکتیویته شود(۱۵).

در فاصله زمانی $10^{-7}$ ثانیه بعد ازعبور باریکه‌های الکترونی از محیط آبی، گونه‌های فعال مختلفی نظیر رادیکال‌های هیدروکسیل($OH^{\bullet}$)، الکترون‌ها($e^{-}_{aq}$) و اتم‌های هیدروژن($H^{\bullet}$) تولید می‌گردد. تغییرات شیمیایی انجام شده بعد از عبور الکترون‌ها توسط هیمن گونه‌های فعال صورت می‌گیرد. این گونه‌ها با قدرت اکسیدکنندگی و احیاءکنندگی بالای خود آلاینده‌های شیمیایی و بیولوژیکی آب را تحت تاثیر قرار می‌دهند و همچنین بخشی از باریکه‌های الکترونی به طور مستقیم بر روی میکروارگانیسم‌ها تاثیر می‌گذارند(۱۸). واکنش شماره ۱، تشکیل گونه‌های فعال در اثر رادیولیز آب توسط باریکه‌های الکترونی را نشان می‌دهد:

$$H_2O + EB\ (\text{باریکه الکترونی}) \rightarrow OH^{\bullet} + e^{-}_{aq} + H^{\bullet} + HO_2^{\bullet} + H_2O_2 \quad (۱)$$

کارایی حذف توسط باریکه‌های الکترونی معمولاً تحت عنوان $G$ بیان می شود. $G$ به میزان برانگیختگی، گونه‌های فعال و سایر ترکیبات تشکیل شده یا از بین رفته در یک سیستم وقتی که صد الکترون‌ولت انرژی جذب می‌شود تعریف می‌گردد و در حقیقت بیان‌گر کارایی تبدیل انرژی الکترون به محصولات شیمیایی است.

ترکیب محصولات تولید شده در واکنش شماره ۱ محیط منحصر به فردی بوجود می‌آورند که در آن واکنش‌های اکسایش و احیا هم‌زمان اتفاق می‌افتد. به عبارت دیگر فرآیند باریکه الکترونی تنها فرآیندی است قابلیت تولید هم‌زمان گونه‌های احیاءکننده ($H^{\bullet}$ ،$e^{-}_{aq}$) و اکسیدکننده ($OH^{\bullet}$، $HO_2^{\bullet}$، $H_2O_2$)و حتی با غلظت یکسان دارا می‌باشد. باریکه‌های الکترونی قادرند چندین هزار گونه‌های فعال را تشکیل دهد(۱۳). بازدهی تشکیل رادیکال‌های آزاد در ازای انرژی مصرفی بالاتر از سایر فرایندهای اکسیداسیون پیشرفته است(۱۷).

اکسیدکننده غالب در میان اکسیدکننده‌ها، رادیکال هیدروکسیل است که بیش‌ترین تاثیر را در کارایی تصفیه با باریکه‌های الکترونی را دارند.. لازم به ذکر است که رادیکال‌های هیدروکسیل قدرت اکسیدکنندگی بالایی نسبت به اکسیدکننده‌های متداول نظیر کلر، ازن، اکسیژن، پرمگنات-پتاسیم، اسید هیپوکلروس دارد(۱۸).

**تولید باریکه‌های الکترونی**

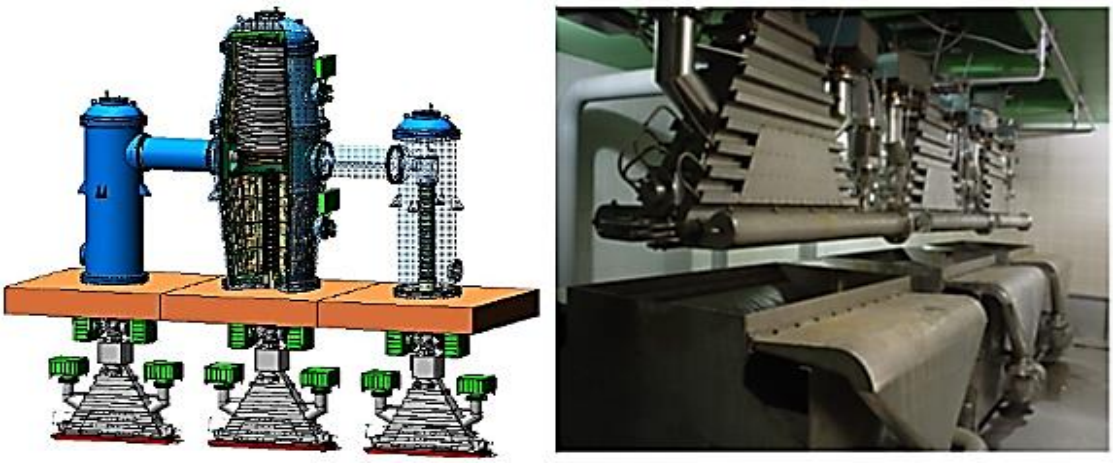
تولید الکترون‌های پرانرژی از طریق شتاب دهنده‌های الکترونی انجام می پذیرد. در شکل ۲ اجزای اصلی یک شتاب دهنده‌های الکترونی نشان داده شده است. از تفنگ الکترون[1] (شامل کاتد، آند و کلاهک نگهدارنده) برای تولید و شتاب الکترون استفاده می‌شود که در آن الکترون‌ها از یک کاتد حاوی الکترون‌های ساکن(رشته تنگستن) که در اثر عبور جریان گرم شده است منتشر شده و در اثر اختلاف پتانسیلی که از چند صد تا چند هزار ولت بین کاتد و آند در داخل محفظه خلاء برقرار می‌گردد به سمت آند شتاب داده می‌شود. وقتی الکترون‌ها شتاب می-یابند سطح انرژی آن‌ها به چند میلیون برابر می‌رسد و برخوردار از انرژی عظیمی می‌شوند و سرانجام الکترون‌های شتاب گرفته از مجرای آند به شکل نوار باریکی خارج شده و به صورت جریانی از الکترون‌های پرانرژی به لایه آب یا فاضلاب تابانده می‌شوند.

**شکل ۲- شمای یک شتاب دهنده الکترونی**

سابقه استفاده از شتاب‌دهنده‌های الکترونی در زمینه فرآوری مواد به بیش از نیم قرن می‌رسد. در حال حاضر ۱۳۰۰ شتاب-دهنده الکترونی با مجموع قدرت حدود ۵۰ مگاوات در سرتاسر جهان برای فرآیند تابش و با اهداف تحقیقاتی مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد(۵). از پیشگامان استفاده از شتاب دهنده-ها در کنترل آلودگی زیست‌محیطی، موسسه تحقیقات انرژی اتمی ژاپن[2] موسوم به تاکاساکی[3] است. در آن زمان (۱۹۷۰ میلادی) انگیزه اصلی موسسه، توسعه شتاب‌دهنده‌های با قدرت بالا برای تصفیه پیوسته گاز اضافی و فاضلاب با حجم‌های زیاد بود(۱۴).

ولتاژ شتاب‌دهنده‌های الکترونی که برای کاربردهای زیست-محیطی استفاده می‌شود از ۵۰۰ کیلوالکترون ولت تا ۱۰ مگاالکترون ولت متغیر است. در حال حاضر فقط تعدادی از صنایع و سازمان‌های علمی قادر به ساخت شتاب‌دهنده‌ها هستند. تولیدکننده‌های اصلی شتاب‌دهنده‌ها در کشورهای ایالات متحده آمریکا، ژاپن، بلژیک، فرانسه، روسیه، چین و هلند قرار دارند و در بیش‌تر کشورهای در حال توسعه نیز گرایش برای ساخت و استفاده از این تجهیزات وجود دارد(۲۰، ۱۹، ۱۶، ۱۳، ۵). شتاب‌دهنده‌ها بر اساس انرژی تقسیم بندی می‌شوند ولی آن‌چه که در کاربرد فناوری باریکه‌های الکترونی در زمینه محیط زیست یک عامل مهم محسوب می‌شود قیمت شتاب دهنده الکترونی است. سازندگان شتاب‌دهنده‌ها انواع مختلف شتاب‌دهنده‌های الکترونی را با دامنه انرژی ۰/۵ تا ۱۰ مگاالکترون‌ولت و قدرت باریکه ۵۰ تا ۴۰۰ کیلووات تولید می-کنند. برای تصفیه گاز دودکش صنایع، انرژی الکترون تقریباً ۱-۰/۷ مگاالکترون ولت مناسب است ولی انرژی‌های بالای ۱ مگاالکترون ولت برای تصفیه فاضلاب مفید خواهد بود. بعضی شتاب‌دهنده‌ها با انرژی بالای ۵ مگاالکترون‌ولت با قدرت باریکه پایین‌تری (کمتر از ۵۰ کیلووات) ساخته می‌شوند. قدرت‌های پایین‌تر برای واحدهای آزمایشگاهی و پایلوت مناسب می‌باشند. شتاب‌دهنده‌های با انرژی متوسط برای تصفیه گاز دودکش و فاضلاب سودمند خواهد بود. برای تصفیه لجن، انرژی‌های بالاتر نیاز بود که قدرت باریکه این شتاب‌دهنده‌ها به ۴۰۰ کیلووات می‌رسد. در شکل ۱ شتاب‌دهنده الکترونی مورد استفاده در تصفیه‌خانه فاضلاب نساجی دائگو کره‌جنوبی با قدرت ۴۰۰ کیلووات و انرژی ۱ مگاالکترون‌ولت را مشاهده می‌کنید.

1-Electron Gun
2-Japan Atomic Energy Research Institute
3-Takasaki



**شکل ۳- واحد تصفیه فاضلاب نساجی شهر با استفاده از باریکه‌های الکترونی دائگو کره جنوبی(۲۰)**

به طور کلی در انتخاب شتاب‌دهنده‌ها برای کاربردهای زیست-محیطی باید به معیارهای زیر توجه نمود:

- قدرت باریکه بالا که بهره‌وری را افزایش و هزینه عملیاتی را کاهش می دهد.
- کارایی الکتریکی بالا که مصرف انرژی را کم و هزینه عملیاتی را کاهش می‌دهد.
- قابلیت استفاده حداکثری از باریکه که بهره‌وری را افزایش و هزینه عملیاتی را کاهش می‌دهد.

در جدول ۲ سازندگان شتاب دهنده‌ها، انواع و مشخصات آن‌ها و هزینه واحد شتاب دهنده‌ها را بر حسب قدرت آن‌ها ارایه می-دهد.

**جدول ۲- سازندگان شتاب دهنده‌ها، انواع و مشخصات آن‌ها (۵)**

| سازنده | انرژی (MeV) | جریان (mA) | قدرت (KW) | قیمت در سال ۲۰۰۴ ($ ۱۰^۹ دلار) | هزینه واحد (دلار/W) |
|---|---|---|---|---|---|
| IBA بلژیک | ۱۰ | ۱۵ | ۱۵۰ | ۶/۱ | ۴۰/۷ |
| RDI آمریکا | ۵ | ۵۰ | ۲۵۰ | ۴/۹ | ۱۹/۶ |
| NHV ژاپن | ۵ | ۳۰ | ۱۵۰ | ۵ | ۳۳/۳ |
| Vivirad فرانسه | ۵ | ۲۰۰ | ۱۰۰۰ | ۴/۴ | ۴/۴ |
| BINP فدراسیون روسیه | ۵ | ۱۰ | ۵۰ | ۱/۲ | ۲۴ |
| BINP فدراسیون روسیه | ۱ | ۴۰۰ | ۴۰۰ | ۲ | ۵ |
| قدرت (وات) =جریان باریکه ( آمپر) × انرژی الکترون‌ها (الکترون ولت) نشان دهنده میزان قدرت الکتریکی منتقل شده به باریکه الکترونی در شتاب دهنده است | | | | | |

در پرتودهی مواد، بخشی از تابش که جذب محیط می‌شود و باعث تغییرات فیزیکی و شیمیایی می‌شود مدنظر قرار می‌گیرد که تحت عنوان دز جذب شده تعریف می‌شود. دز جذب شده یکی واحد کمی مهم بوده و به مقدار انرژی جذب شده در واحد جرم ماده گفته می‌شود. واحد دز جذب شده در سیستم SI،

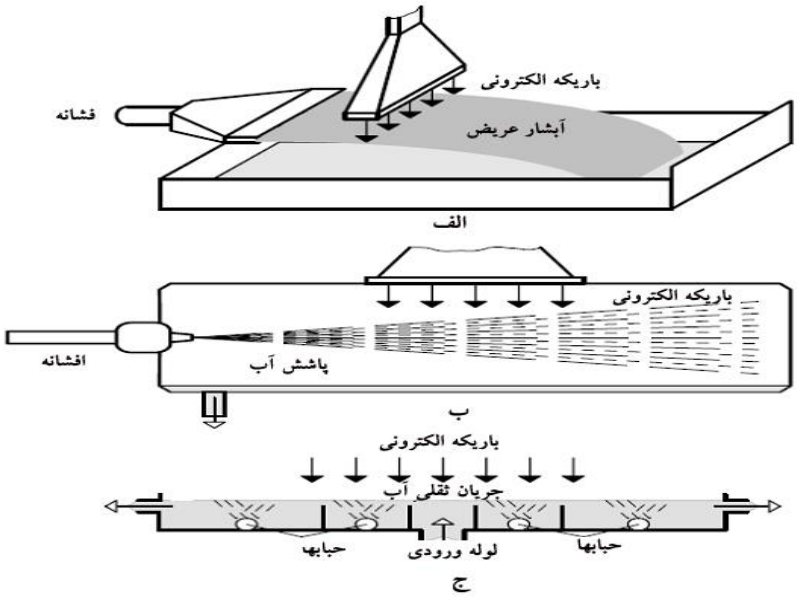
گری[1] می باشد و شامل جذب یک ژول در یک کیلوگرم ماده است. واحد سابق دز جذب شده، راد[2] می‌باشد و معادل ۱۰۰ ارگ[3] برای هر گرم ماده است و هر گری برابر با ۱۰۰ راد می‌باشد. حداکثر نفوذ یک باریکه الکترونی به انرژی الکترون‌ها، چگالی ماده مورد هدف، قدرت باریکه، مدت زمانی که ماده در معرض باریکه الکترون قرار می گیرد دارد. اغلب سیستم‌های باریکه الکترونی که برای تصفیه آب و فاضلاب کاربرد دارند معمولا قدرت نفوذی کم‌تری دارند. برای مثال میزان نفوذ الکترونهای ۱/۵ مگاالکترون ولتی تقریباً برابر ۷ میلی‌متر است. بنابراین به منظور استفاده از این فرآیند ابتدا باید حجم آب را به روش‌های مختلف به صورت لایه‌های نازک در آورده و سپس تابش صورت گیرد. بنابراین سیستم توزیع آب یکی از واحدهای مهم در کاربرد فرآیند باریکه الکترونی است. برای این‌که یک سیستم باریکه الکترونی در تصفیه موثر باشد باید مایع با ضخامت‌های کم پخش گردد به طوری که الکترون‌ها بتوانند به صورت یکنواخت به تمامی مایع نفوذ کنند. اگر ضخامت مایع به سبب میزان بالای جریان یا محدودیت‌های سیستم توزیع زیاد باشد در این صورت نیاز است مایع بر حسب هدف تعریف شده چند بار در معرض باریکه‌های الکترونی قرار گیرد. کدورت و رنگ تاثیر چندانی در میزان نفوذ باریکه ندارند(۲۱).

عمدتاً سه نوع راکتور برای برهم‌کنش باریکه‌های الکترونی و آب و فاضلاب مورد استفاده قرار می‌گیرد که در شکل ۳ مشاهده می‌کنید. در راکتور (الف) آب یا فاضلاب توسط فشانه‌هایی[4] به طور مداوم با فشار درون یک مخزنی پاشیده می‌شود و باریکه‌های الکترونی به صورت عمودی به مایع تابانده می‌شود. این نوع راکتور امکان تصفیه حجم‌های زیاد فاضلاب را توسط شتاب‌دهنده‌های نیرومند فراهم می‌آورد. در راکتور (ب) مایع توسط افشانه‌ها[5] در سطح محدودی پخش شده و باریکه‌های الکترونی به آن قطرات ریز تابانده می‌شود. این راکتور شرایط مناسبی برای وقوع اکسیداسیون زنجیری آلاینده‌ها در تماس با هوا ایجاد می‌کند. این تماس باعث نفوذ اکسیژن به فاضلاب می‌شود و به دنبال آن ترکیب ازن رادیولیتیک و باریکه‌های الکترونی در جهت تصفیه موثر اتفاق می‌افتد. در راکتور نوع (ج) فاضلاب در داخل مخزن کم عمق به صورت ثقلی جریان پیدا کرده و به شدت با گاز یا هوا تزریق شده توسط حباب‌سازها و یا منافذ تعبیه شده در کف مخزن، مخلوط می‌شود(۵).

به طور کلی مهم‌ترین اجزای سیستم‌های باریکه‌های الکترونی شامل موارد زیر است:

- شتاب دهنده الکترونی
- منبع قدرت
- جاروبگر باریکه[6]
- اتاقک تماس باریکه با آب یا فاضلاب
- تجهیزات توزیع آب و فاضلاب
- پمپ‌ها و لوله های تغذیه کننده و تخلیه
- تجهیزات مقاوم در برابر حرارت
- سیستم‌های پایش و کنترل
- حفاظ سربی

1-Gray (Gy)
2-Rad
3-Erg
ارگ واحد انرژی در دستگاه cgs است و معادل کار انجام گرفته در جابجایی جرمی معادل ۰/۰۰۱ گرم تا ارتفاع یک سانتیمتر می باشد.
4-Jet
5-Sprayer
6-Beam Scanner




**شکل۴- راکتورهای مورد استفاده برای تابش باریکه‌های الکترونی**

**الف- فشانه،ب-افشانه، ج- جریان رو به بالا (۵)**

**کاربردهای باریکه‌های الکترونی در تصفیه آب و فاضلاب**

همان‌طور که گفته شد تحقیقات آزمایشگاهی بر روی فاضلاب صنعتی و آب‌های زیرزمینی آلوده در دهه ۷۰ و ۸۰ میلادی صورت پذیرفت. در دهه ۹۰ میلادی، چندین تصفیه‌خانه و تجهیزات سیار باریکه‌های الکترونی برای بررسی‌های بیشتر ساخته شد. مطالعات انجام گرفته در سال‌های اخیر کارایی تابش‌های یون‌ساز نظیر پرتوهای گاما، باریکه‌های الکترونی را با ترکیب با سایر روش‌های تصفیه را در تجزیه ترکیبات آلی مقاوم در محلول‌های آبی و حذف موثر یا غیرفعال‌سازی میکروارگانیسم‌های گوناگون و انگل‌ها را به اثبات رسانده‌اند و نشان داده است کاربرد باریکه‌های الکترونی برای تصفیه آب آشامیدنی، فاضلاب و آب‌های زیرزمینی مقرون به صرفه خواهد بود. سرعت فرآیند تابش در تجزیه آلاینده بیش‌تر از سایر فرآیندهای متداول ارزیابی شده است. معمولا حداکثر کارایی این فرآیند در غلظت‌های $10^{-3}$ مول بر لیتر(۱۰۰ pmm) یا کمتر آلاینده خواهد بود. تصفیه چنین فاضلاب‌های آسان بوده و به دزهای پایین (حدود ۱ کیلوگری) نیاز داشته و تقریبا حذف کاملی از بو، طعم، رنگ و کدورت را فراهم می‌کند. به طور کلی تبدیل آلاینده‌ها در اثر اکسیداسیون زنجیری، تشکیل ترکیبات نامحلول، انعقاد ذرات کلوئیدی و بالا بردن تجزیه پذیری بیولوژیکی اتفاق می‌افتد(۱۰).

آب‌های سطحی و زیرزمینی که برای تامین آب شرب مورد استفاده قرار می‌گیرند معمولا آلوده به میکروارگانیسم‌های بیماریزا و انگل‌ها و آلاینده‌های شیمیایی هستند و غالبا سطح آلودگی به قدری است که با دزهای پایین تابش از بین می‌روند. دزهای نزدیک یک کیلوگری برای تصفیه و گندزدایی آب‌های طبیعی به ویژه برای تخریب ترکیبات آلی نظیر مواد هیومیکی ایجادکننده رنگ و بو و غیره کافی است. تابش، ترکیبات آلی حاوی کلر را تخریب می‌کند. برای تجزیه غلظت‌های کمتر از $10^{-4}$ مول، دزهای پایین (۱ کیلوگری و حتی پایین تر) مورد نیاز است. همان‌طور که می‌دانید این ترکیبات سمی و سرطان‌زا بوده و از محیط نشات می‌گیرند و یا در اثر کلرزنی آب‌های دارای ترکیبات آلی تولید می‌شوند. باید این نکته توجه نمود

تابش ترکیبات کلرینه می‌تواند باعث بوجود آمدن محصولات سمی دیگری شود که باید این محصولات نیز مورد تصفیه قرارگیرد و در این صورت دز مورد نیاز به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد.

تلفیق تابش با ازن منجر تقویت اثر تصفیه می‌شود. برای مثال برای کاهش تری‌کلرواتان از ppb ۱۲۰ به ppb ۵ با استفاده از تابش نیاز به ۳۷۰ گری می‌باشد ولی وقتی ppm ۳ ازن به آب اضافه می شود دز تابش مورد نیاز برای همان میزان کاهش به ۴۵ گری است. استفاده از تابش برای تصفیه آب‌های زیرزمینی نیز گزارش شده است. در ابتدا از این روش برای احیاء چاه‌هایی که منافذ آنها با رسوب مواد نامحلول گرفته شده استفاده می‌شد. تابش باکتری‌های احیاء کننده آهن و منگنز را از بین برده و به تبع آن مانع رسوب مواد نامحلول در روی منافذ چاه می‌شد(۲۲).

در جریان خروجی از صنایع، فلزات سمی نظیر نقره، سرب، جیوه، نیکل، روی و کروم (فلزات سنگین) وجود دارد که این فلزات سنگین در خاک تجمع پیدا می‌کنند و می‌توانند وارد زنجیره غذایی انسان شوند. راهبرد کلی در استفاده از تابش در تصفیه فلزات، احیاء کردن و کاهش انحلال‌پذیری آن‌ها است که در این صورت یون‌های احیاء شده را می‌توان با رسوب دادن جدا نمود(۱۰).

به طور مثال الکترون‌های آبی به آسانی یون‌های نقره را به اتم‌های نقره احیاء می‌کنند و در نهایت اتم‌ها تجمع و در نهایت رسوب پیدا می‌کنند (واکنش شماره‌های ۴-۲).

$$e^-_{aq}+Ag^+ \rightarrow Ag^0 \quad (۲)$$

$$H+Ag^+ +H_2O \rightarrow Ag^0+H_3O^+ \quad (۳)$$

$$Ag^0+Ag^0 \rightarrow Ag_2 \quad (۴)$$

بیش‌ترین تمرکز فرآیند تابش بر روی تبدیل آلاینده‌های غیرقابل تجزیه بیولوژیکی به ترکیبات قابل تجزیه بیولوژیکی است(۵). همان‌طور که گفته شد اولین کاربرد تابش در مقیاس بزرگ برای تبدیل امولسیون نکال در یک واحد صنعتی تولید لاستیک‌های مصنوعی اتفاق افتاد. نکال مخلوطی از ایزومرهای سولفانات ایزوبوتیل- نفتالین[1] بوده، یک ماده سمی و در مقابل تجزیه بیولژیکی مقاوم است. در این واحد از دو شتاب دهنده الکترونی ۵۰ کیلوواتی ساخت BINP استفاده می‌شود که اولی در سال ۱۹۸۴ میلادی و دومی در سال ۱۹۸۸ میلادی نصب گردید. این واحد در روز ۲۰۰۰ مترمکعب فاضلاب مورد تصفیه قرار می‌دهد عملکرد دراز مدت آن نشان داد که این فرایند از کارایی بالا و پایداری خوبی برخوردار است(۲۳).

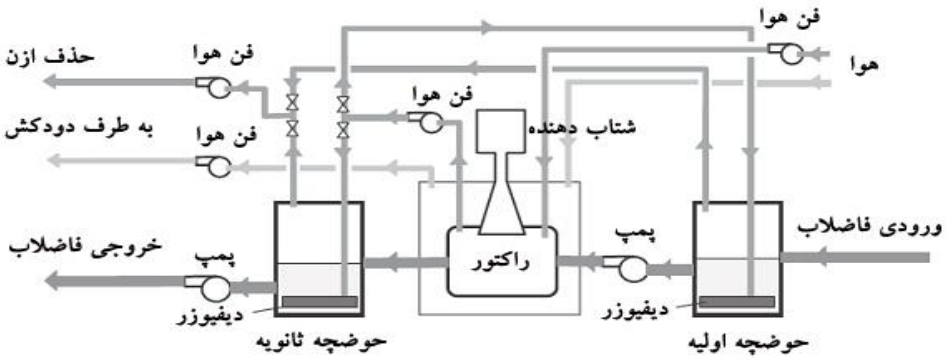
به خاطر ساختار پیچیده مولکولی رنگ و پایداری آن در مقابل تجزیه هوازی و سایر اکسیدکنندها متداول، حذف رنگ از فاضلاب‌ها مشکل می باشد. فاضلاب‌های خروجی از صنایع نساجی و یا واحدهای عملیات‌های تکمیلی[2] حاوی مقدار قابل ملاحظه‌ای رنگ، جامدات معلق، مواد آلی کلرینه، سورفاکتانت[3] و مقداری فلزات سمی بوده و دما، pH و COD در آن‌ها متغیر است. ماده رنگ‌زای آزو[4] به عنوان یکی از مهم‌ترین گروه‌های رنگ‌های مصنوعی و محصولات حاصل از تجزیه آن‌ها (آمین-های آروماتیک) باعث بروز سرطان در انسان و آبزیان می‌شود. مواد رنگ‌زای آزو به ترکیبات شیمیایی گفته می‌شود که دارای یک یا چند پیوند گرو آزو (N=N) می‌باشند و گروه‌های مذکور باعث پیوند ساختارهای حلقوی رنگ به یکدیگر می‌شوند. رنگ علاوه بر آثار سرطان‌زایی، به علت ایجاد ظاهری نامناسب و همچنین برای حفظ سلامت انسان و محیط زیست باید قبل از تخلیه به محیط از فاضلاب صنایع حذف گردد.

روشهای تصفیه متداول به خصوص تصفیه بیولوژیکی قادر نیستند به تنهایی با کارایی بالای رنگ‌زای آزو را از فاضلاب حذف نمایند. بنابراین علاوه بر روش‌های متداول باید از روش-های شیمیایی و فیزیکی موثری با برای تصفیه آن استفاده نمود. فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته (ازن، فتوفنتون، تجزیه نوری تیتانیوم، فرآیند تابش) با ایجاد رادیکال‌های فعال می‌توانند ترکیبات آلاینده را با کارایی بالایی تجزیه نمایند. در زمینه حذف رنگ توسط فرآیند تابش تحقیقات متعددی صورت

1-Isobuthyle-nephtalene sulfonate
2-Finishing
3-Surfactant
4-Azo Dye

گرفته است نحوه واکنش و چگونگی تجزیه رنگ آزو توسط فرآیندهای یاد شده به خوبی تشریح شده است(۲۴).

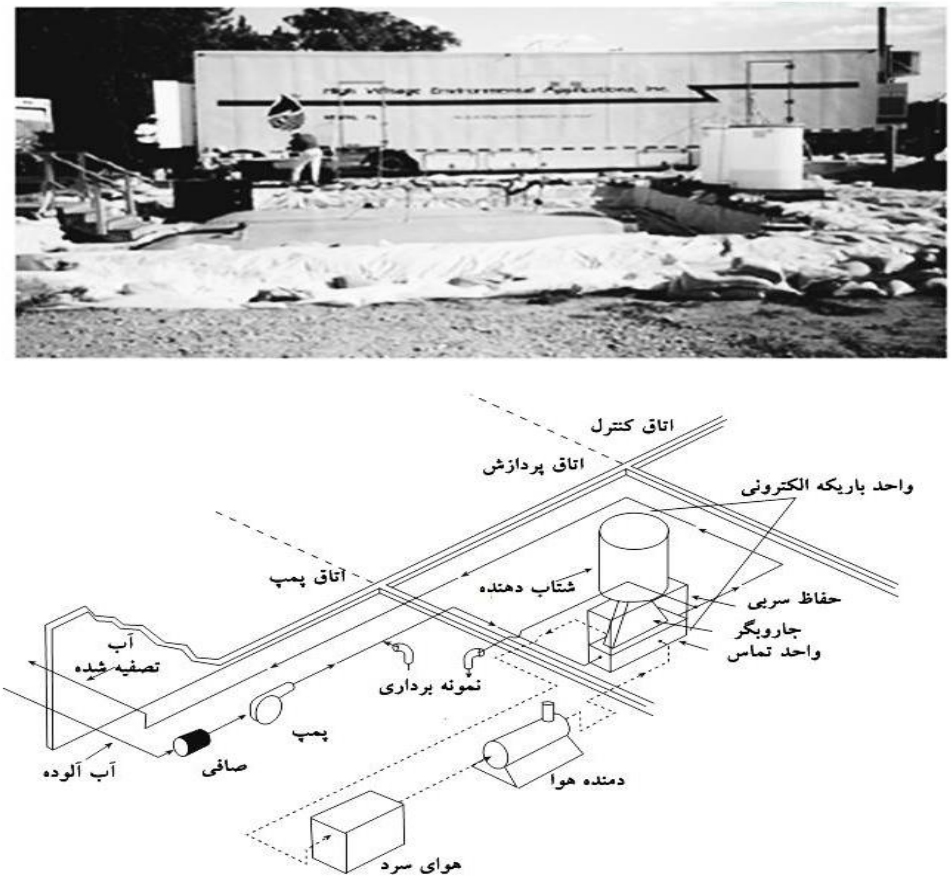
گونه‌های فعال تشکیل شده در اثر پرتودهی آب (الکترون آبی، اتم هیدروژن و ردایکال‌های هیدروکسیل) به مولکول‌های رنگ واکنش داده و آنها را با سرعت بالا مورد تجزیه قرار می‌دهند. اتم‌های هیدروژن و الکترون‌های آبی به پیوند گروه آزو حمله می‌کند. سایر قسمت‌های مولکول رنگ و محصولات تولید شده در طول تجزیه، تمایل کمتری برای واکنش با دو گونه فوق دارند. رادیکال‌های هیدروکسیل بیشتر حلقه‌های آروماتیکی را مورد هدف قرار داده و آن‌ها را به ترکیبات رادیکالی فعال تجزیه می‌نماید. بعد از وقوع واکنش‌های متعدد و متوالی و تبدیل آنها به ترکیباتی با وزن مولکولی کم، رنگ‌زدایی و معدنی‌سازی اتفاق می‌افتد. رنگ‌زدایی موثر با واکنش‌های دو گونه الکترون آبی و اتم‌های هیدروژن بدون حضور اکسیژن اتفاق می‌افتد اما برای معدنی‌سازی، حضور رادیکال‌های هیدروکسیل و اکسیژن مورد نیاز است(۲۴). به منظور تصفیه فاضلاب صنایع حاوی رنگ توسط فرآیند تابش، در سال ۱۹۹۸ اولین واحد آزمایشی در مجموعه صنعتی شهر دایگو کره جنوبی برای تصفیه ۱,۰۰۰ مترمکعب در شبانه روز فاضلاب صنایع نساجی ساخته شد. در این واحد از یک شتاب دهنده الکترونی ۴۰ کیلوواتی و با انرژی الکترونی ۱ مگاالکترون ولت استفاده گردید. عملکرد موفق آن منجر به شروع ساخت واحد تصفیه در مقیاس کامل در سال ۲۰۰۴ و اتمام آن در سال ۲۰۰۵ برای تصفیه ۱۰,۰۰۰ مترمکعب در شبانه‌روز فاضلاب توسط باریکه‌های الکترونی و تصفیه بیولوژیکی در همان مجموعه صنعتی گردید(۹). در شکل ۴ شمای ساده‌ای از فناوری تصفیه فاضلاب صنایع نساجی در مقیاس بزرگ در مجموعه صنعتی شهر دایگو را نشان می‌دهد. بررسی‌های صورت گرفته در واحد آزمایشی نشان داد میزان تصفیه انجام شده در واحد تصفیه بیولوژیکی طی ۱۷ ساعت بدون استفاده از تابش برابر با ۸ ساعت تصفیه بیولوژیکی به همراه تابش در دز ۲-۱ کیلوگری است. همچنین عملکرد این روش نیز نشان داد که نسبت به روش‌های رایج تصفیه، مقرون به صرفه‌تر می باشد.




**شکل۵- شمای از واحدهای فناوری تصفیه فاضلاب صنایع نساجی در مجموعه صنعتی شهر دایگو (۱۹)**

سیستم‌های متحرک نیز برای کاربرد باریکه‌های الکترونی نیز در زمینه تصفیه آب و فاضلاب ساخته شده‌اند که از جمله این سیستم‌ها می‌توان به سیستم ساخته شده توسط شرکت HVEA[1] اشاره نمود که مورد تایید سازمان محیط‌زیست نیز قرار گرفته است اشاره نمود(شکل ۵)(۲۵، ۱۸). البته سیستم-های متحرک دیگری نیز ساخته شده است که هر کدام ویژگی‌های و مشخصات خاص خود را دارا می باشند (۳۸، ۳۵).

1-High Voltage Environmental Applications, Inc.




**شکل۶-نمای ظاهری و نمودار جریان در سیستم قابل حمل ساخته شده توسط شرکت HVEA (۲۶)**

احیا، کربن فعال استفاده شده برای تصفیه آب‌های زیرزمینی یکی دیگر از کاربردهای باریکه‌های الکترونی در زمینه آب و فاضلاب است. کربن فعالی که سدیم لوریل سولفانات را جذب کرده می‌تواند با دز تابش ۱ مگاگری احیاء شود. تجزیه و تحلیل اقتصادی این موضوع نشان داد احیاء کربن فعال توسط تابش حدود ۱۰-۸ برابر نسبت به روش احیا با بخار ارزان‌تر در می-آید(۲۱). در زمینه استفاده از باریکه‌های الکترونی در احیاء و فعال سازی مجدد کربن فعال تحقیقات و مطالعات کمی صورت گرفته است اما در خصوص احیاء توسط اشعه گاما چندین پژوهش و بررسی انجام شده است که به عنوان نمونه می‌توان به مطالعات کیس[1] و کچن[2] (۲۷)، مینگهانگ[3] و همکارانش (۲۸) اشاره نمود که همگی بر تاثیرات قابل ملاحظه تابش اتفاق نظر دارند.

استفاده از باریکه‌الکترونی در آماده‌سازی غشاها به ویژه غشاهای تعویض یونی مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته و تاثیر مثبت آن در آماده‌سازی غشاها ثابت شده است. غشاهایی‌که با باریکه‌های الکترونی آماده‌سازی می‌شوند برای حذف یون‌های فلزات سنگین فاضلاب صنایع، گرفتن یون‌های اورانیوم و کبالت ۶۰ از پسماندهای رادیواکتیو مایع و برداشت اورانیوم از آب دریا مورد استفاده قرار می‌گیرند(۳۹).

یکی از مهم‌ترین مشکلات زیست محیطی، استفاده مجدد از فاضلاب صنایع است. کاربرد باریکه‌های الکترونی برای حل این مشکل نیز در مقیاس تجاری در کارخانه کاغذ شهر چونگ-ون[4] کره‌جنوبی مورد بررسی قرار گرفت و نتایج نشان داد

1-Case
2-Ketchen
3-Minghonga

1-Cheongwon

استفاده از تابش باریکه‌های الکترونی به همراه روش‌های متداول (انعقاد+لخته‌سازی و تصفیه بیولوژیکی) منجر به کاهش اکسیژن مورد نیاز شیمیایی(COD) و کل کربن آلی (TOC) به زیر ppm ۲۵ و افزایش درصد استفاده مجدد از فاضلاب از ۳۰-۲۰ درصد به ۸۰-۷۰ درصد گردید. در این کارخانه برای تصفیه فاضلاب(۱۵۰۰۰ مترمکعب در روز) از ۳ شتاب‌دهنده الکترونی با مجموع قدرت باریکه ۳۰۰ کیلوات استفاده گردید(۴۰).

توانایی باریکه الکترونی پرانرژی در گندزدایی مواد بیولوژیکی فاضلاب و لجن به خوبی اثبات شده است و برتری خود را از لحاظ هزینه کم‌تر و عملکرد بهتر نسبت سایر روش‌ها نشان داده است(۳۰، ۲۹، ۵). در سال ۱۹۷۶ به طور آزمایشی تابش-دهنده باریکه‌های الکترونی در تصفیه خانه فاضلاب دیر آیلند[1] بوستون برای غیرفعالسازی و از بین بردن میکروارگانیسم‌های بیماری‌زا نصب گردید. در این واحد از شتاب‌دهنده ۵۰ کیلوواتی برای تولید باریکه‌های الکترونی استفاده می‌گردید و لجن مایع که به وسیله پخش کردن روی استوانه در حال چرخش به صورت لایه نازک در حدود ۲ میلیمتری درآمده مورد تابش قرار می‌گیرد(۳۱). در شکل ۶ فرآیند تابش لجن، بکار گرفته شده در تصفیه‌خانه فاضلاب دیر آیلند نشان داده شده است. سیستم باریکه‌های الکترونی دیگری نیز در مقیاس بزرگ در میامی[2] آمریکا برای گندزدایی لجن فاضلاب ساخته شده است(۳۲) که در شکل ۷ شمای کلی از تاسیسات فرآیند باریکه‌های الکترونی استفاده شده در شهر یاد شده را نشان می-دهد. در این سیستم لایه‌های نازک لجن مایع (حداکثر ۰/۷۴ سانتی‌متر) تحت تابش دزهای ۴۰۰-۳۵۰ کیلوراد قرار می‌گیرد و سپس لجن خروجی بعد از طی مراحل آماده‌سازی، آبگیری و ذخیره‌سازی برای کاربردهای کشاورزی به فروش می‌رسید. سیستم اخیر برای گندزدایی در حدود ۶۴۵۰۰۰ لیتر در شبانه روز لجن هضم شده ۸-۲٪ طراحی شده و شتاب دهنده الکترونی ۱/۵ مگاالکترون ولتی در آن به کار رفته است.

غیرفعال شدن کلی‌فرم‌ها و باکتری‌ها در دز ۳ کیلوگری و نابودی تخم کرم‌ها در دز ۴ کیلوگری اتفاق می‌افتد. همچنین باریکه الکترونی قادر به کاهش ویروس‌های روده‌ای انسان در دز ۴ کیلوگری می‌باشد. اندازه یک ارگانیسم در میزان حذف یا غیرفعال‌سازی موثر است. ارگانیسم‌های بزرگ‌تر نسبت به ارگانیسم‌های کوچک‌تر مستعدتر به غیرفعال شدن در اثر تابش می‌باشند. مطالعات نشان می‌دهد تخم کرم آسکاریس سئوم[3] و شیتوزما مانسونی[4] در دزهای خیلی پایین غیرفعال می شوند. کرم شیستوزما مانسونی در دز کم‌تر از ۷۰۰ گری کاملا حذف می‌گردد. اما در لجن به منظور غیرفعال‌سازی ۹۰ درصدی دزهای بالایی برای به علت کند شدن سرعت فرآیند غیرفعال سازی، نیاز می‌باشد. کیفیت آب در نحوه غیرفعال شدن باکتری‌های کلی‌فرم نقش دارند. برای مثال وقتی جریان خروجی دارای کلر باشد روند غیرفعال شدن سریع خواهد بود اما در دزهای بالای ۱/۵ کیلوگری مقاومت در مقابل غیرفعال شدن مشاهده می‌گردد. در خروجی خام و بدون کلر، غیرفعال شدن کلیه باکتریها مشاهده گردید. در دزهای بین ۶ و ۷ کیلوگری باکتریها و باکتریهای کلیفرمی، تا ۵ واحد لگاریتمی غیرفعال می‌شوند. آزمایشاتی که جهت مطالعه روند غیرفعال شدن باکتری‌های کلی‌فرم مدفوعی در پساب تصفیه‌خانه انجام گرفت نشان می‌دهد برای غیرفعال کردن ۴ واحد لگاریتمی کلیفرم‌های مدفوعی موجود در پساب حاوی کلر، تابش ۱/۵ کیلوگری کافی است. در دزهای بالای ۱/۵ کیلوگری افزایشی در میزان حذف آن‌ها مشاهده نگردید که علت آن را به مقاومت باکتری‌ها نسبت دادند. همچنین این مطالعات نشان داد برای غیرفعال‌سازی ۵ واحد لگاریتمی کلی‌فرم‌های مدفوعی در خروجی بدون کلر دزهای بالای ۶/۵ کیلوگری لازم است. در پساب کلرزنی شده، حضور کلر، شرایط سخت و نامناسبی برای رشد و زندگی ارگانیسم‌ها ایجاد نموده که این وضعیت اجازه

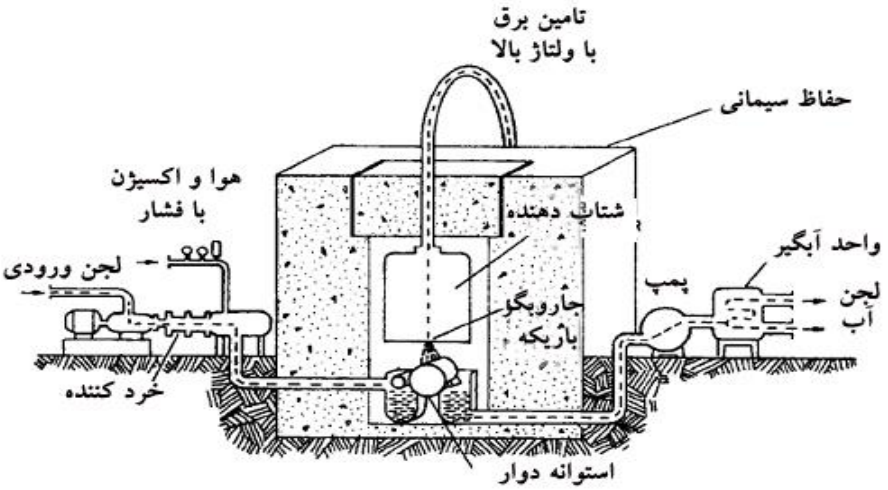
2-Deer Island
3-Miami
4-Ascaris Suum
5-Shistoma Mansoni

می‌دهد میکروارگانیسم به راحتی غیرفعال شده و در نهایت دزهای پایین‌تری نیاز باشد(۱۱).

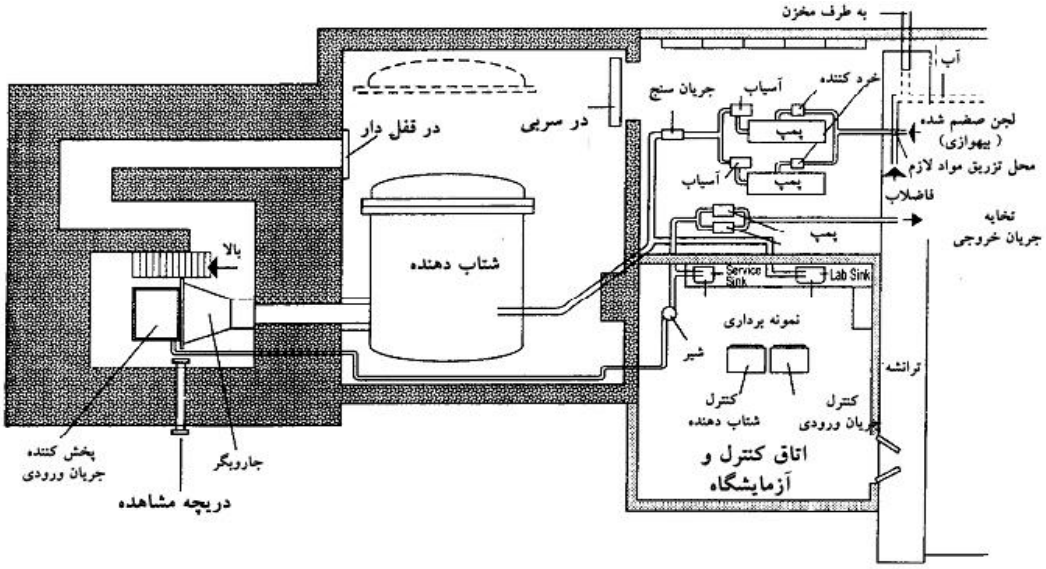
باریکه‌های الکترونی پرانرژی به صورت مستقیم و غیرمستقیم در غیرفعال‌سازی میکروارگانیسم‌ها نقش دارد. باریکه‌های الکترونی به صورت مستقیم بر مولکول‌های حیاتی سلول‌ها نظیر DNA[1] و پروتئین‌های موجود در داخل میکروارگانیسم تاثیر گذاشته و باعث مرگ سلولی می‌شود. در روش غیرمستقیم،گونه‌های فعال تشکیل شده در اثر واکنش باریکه‌ها با آب، با اجزای مولکولی میکروارگانیسم‌ها واکنش می‌دهند و DNA باکتری‌ها و DNA و RNA[2] ویروس‌ها را مورد هدف قرار داده و به آن‌ها آسیب زده و از این طریق موجب غیرفعال شدن میکروارگانیسم‌ها می‌شود(۱۲).

به طور کلی هزینه تصفیه با استفاده از فرآیند باریکه‌های الکترونی پرانرژی به میزان دز تابش شده، غلظت آلاینده‌ها، ابعاد تجهیزات مورد استفاده و طول مدت استفاده از این تجهیزات بستگی دارد. هزینه تصفیه توسط باریکه‌های الکترونی در حدود ۵۰۰-۴۰۰ دلار به ازای هر مترمکعب فاضلاب با فرض تابش دز ۸۰۰ کیلوراد، تخمین زده می‌شود(۱۳). هزینه حذف ۹۹ درصدی ۲۰ میلی‌گرم در لیتر بنزن و ۲۰ میلی‌گرم در لیتر تتراکلرواتیلن از آب زیرزمینی با استفاده از عریان‌سازی با هوا[3]/سیستم جذب کربن و سیستم $UV/H_2O_2$ و یک سیستم باریکه الکترونی(۷۵ کیلووات)، ۳:۱,۲:۱ (۳ عریان‌سازی با هوا/۱سیستم جذب کربن و ۲ سیستم $UV/H_2O_2$ / ۱ سیستم باریکه الکترونی) برآورده شده است(۳۶).

1-Deoxyribonucleic Acid
2-Ribonucleic Acid
3-Air Stripping




**شکل۷- فرآیند تابش لجن، بکار گرفته شده در تصفیه خانه فاضلاب دیر آیلند (۳۱)**




**شکل۸- شمای کلی از تاسیسات مربوط به باریکه‌های الکترونی استفاده شده در میامی آمریکا (۳۲)**

### عوامل موثر بر فرآیند باریکه‌های الکترونی

فرآیند باریکه‌های الکترونی پرانرژی مستقل از pH در دامنه ۱۱-۳ می‌باشد. بنابراین هرگونه تغییری در pH تاثیر منفی در کارایی تصفیه نخواهد داشت به جز مواردی که خود آلاینده به pH حساس باشد. در صورت نیاز می‌توان pH را جهت حذف رباینده‌های رادیکال‌های هیدروکسیل نظیر کربنات و بی‌کربنات پایین آورد. این فرآیند نیز مستقل از دما می‌باشد. یعنی تغییرات دما در آب و فاضلاب تاثیری در میزان حذف نخواهد داشت. واکنش‌های گونه‌های فعال تولید شده با ترکیبات آلی سریع بوده و در فاصله زمانی بسیار کوتاهی (کم‌تر از یک ثانیه) اتفاق می‌افتد. لذا می‌توان از سیستم جریان پیوسته با انعطاف پذیری بسیار بالا وقتی که تغییرات جریان نسبت به زمان بالا باشد استفاده نمود. رباینده‌های رادیکالی یکی دیگر از عواملی است که بر روی فرآیند باریکه‌های الکترونی تاثیر می‌گذارند. رباینده‌های رادیکالی با رادیکال‌های آزاد تولید شده در طول فرآیند، واکنش داده و آن‌ها را از مسیر تجزیه ترکیبات آلی خارج می‌کنند به همین دلیل کارایی رادیکال‌ها در تجزیه

آلاینده ها کاهش می‌دهند. متانول یکی از رباینده‌های رادیکالی می‌باشد که به طور طبیعی در آب وجود دارد. متانول با رادیکال‌های هیدروژن و به نسبت کمتر با الکترون‌های آبی و رادیکال‌های اتم هیدروژن واکنش می‌دهند. متانول ابتدا رادیکال‌های هیدروکسیل و سپس رادیکال‌های اتم هیدروژن و الکترون‌های آبی را می‌رباید. کربنات و بی‌کربنات از معمول‌ترین رباینده‌های رادیکال‌های هیدروکسیل می باشند که در آب‌های طبیعی وجود داشته و با رادیکالهای هیدروکسیل با ثابت سرعت $۸/۵ \times ۱۰^{۶} M^{-1}S^{-1}$ و $۳/۹ \times ۱۰^{۸} M^{-1}S^{-1}$ واکنش می‌دهند. میزان تاثیر این یون‌ها در رباینده‌گی رادیکال‌های هیدروکسل در آبی با pH=۹ و فاضلابی با pH=۷ مورد آزمایش قرار گرفته و نتایج آزمایشات نشان داد که با افزایش pH در آب میزان رباینده‌گی رادیکال‌های هیدروکسیل به علت حضور ترکیبات قلیایی افزایش می‌یابد. اگرچه میزان قلیاییت در فاضلاب آزمایش شده ۵ برابر بیش‌تر از میزان قلیاییت آب بوده است اما میزان رباینده‌گی یون‌های کربنات و بی‌کربنات در فاضلاب تقریباً ۲/۵ برابر میزان رباینده‌گی این یونها در آب بوده است. بنابراین میزان حذف بستگی به pH، غلظت یون‌های کربنات و بی-کربنات داشته، به طوری که اگر pH پایین و غلظت یون‌های کربنات و بی‌کربنات کم باشد میزان حذف افزایش می‌یابد. کربن آلی محلول یکی دیگر از ترکیباتی است که به طور طبیعی در آب و فاضلاب یافت می‌شود و کارایی حذف فرآیند تاثیر منفی می‌گذارد. در فاضلاب میزان کربن آلی محلول حدوداً ۶ برابر میزان آن در آب آشامیدنی است. بنابراین فاضلاب نیاز به تابش با دز بیش‌تر جهت دست‌یابی به میزان حذف موردنظر دارد. در اکثر آزمایشات وجود مواد معلق تاثیر قابل ملاحظه‌ای در میزان حذف این فرآیند نداشته است(۱۳).

**مزایا و معایب فرآیند باریکه الکترونی**

مزایا و معایب فرایند باریکه الکترونی به شرح زیر می-باشد(۳،۱۳،۳۳،۳۴،۳۷):

**۱- مزایا**

– تشکیل ترکیبات جانبی آلی در این فرآیند در مقایسه با سایر فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته کم‌تر است اما انجام مطالعات بیش‌تر جهت تایید این یافته‌های اولیه نیاز می باشد.

– سیستم باریکه‌های الکترونی می‌تواند به عنوان ممکل مرحله گندزدایی عمل نموده و از رشد میکروارگانیسم‌های بیماری‌زا جلوگیری نماید.

– کدورت و رنگ در میزان عملکرد سیستم باریکه‌های الکترونی بی تاثیر است.

– نیاز به اضافه کردن مواد شیمیایی یا کاتالیزور نیست.

– پسماند رادیواکتیو تولید نمی‌شود.

– نیاز به دماهای بالا نیست.

– کنترل واکنش در سیستم‌های باریکه الکترونی آسان است چون سیستم باریکه الکترونی یک سیستم الکتریکی است که در آن واکنش‌های شیمیایی به راحتی با روشن یا خاموش کردن یک کلید شروع یا متوقف می‌شوند.

**۲-معایب**

– با وجود بی‌خطر بودن این فرآیند، از نظر عموم مردم به دلیل عدم آگاهی کافی ازاین فرآیند، یک فناوری خطرناک محسوب می‌شود. بنابراین به منظور استفاده از این فناوری جدید و موفقیت آن، در گام اول باید ذهنیت و دید جامعه را نسبت به این مساله عوض نمود و سپس اقدام به کاربرد آن صورت پذیرد.

– نیاز به نیروهای آموزش دیده و متخصص جهت کار با سیستم‌های تابش باریکه‌های الکترونی یکی دیگر از معایب این فرآیند است.

– محدودیت‌هایی از لحاظ تولید شتاب‌دهنده‌های تجاری وجود دارد.

**نتیجه گیری**

با توجه به نقاط قوت فرایند باریکه الکترونی نسبت به روش‌های متداول تصفیه و کاربردهای مطالعاتی و صنعتی از باریکه‌های الکترونی و همچنین عدم ایجاد آلودگی‌های محیط زیستی،

استفاده و توسعه روزافزون این روش تصفیه در نقاط مختلف دنیا و حتی ایران قابل تصور است و پیش بینی می‌شود در آینده نزدیک یکی از فناوری‌های مهم در حفظ محیط زیست گردد. نتایج آزمایشات مختلف نشان می‌دهد این روش هزینه کم‌تر و عملکرد بهتری به خصوص در زمینه گندزدایی فاضلاب و لجن و حذف رنگ از فاضلاب صنایع نسبت به سایر روش‌های تصفیه دارد و همچنین فاضلاب تصفیه شده با این روش را می‌توان در کشاورزی بکار برد.

انتظار می‌رود با مطالعات بیش‌تر، تلفیق با سایر روش‌های تصفیه و افزایش کارخانجات تولید انواع شتابدهنده‌های الکترونی، هزینه استفاده از فناوری باریکه‌های الکترونی نیز کاهش یافته و استفاده از آن به صورت تجاری افزایش یابد. در ایران نیز به تبع تحقیقات انجام شده در دنیا، مطالعات لازم در زمینه استفاده از فرایند تابش باریکه‌های الکترونی در تصفیه آب و فاضلاب با سرعت بیش‌تری انجام گیرد و در نهایت شاهد بکارگیری آن در مقیاس‌های کوچک و بزرگ باشیم.

**منابع**


1- Duartea, C.L., Ribeiro, M.A., Sato, I.M., Sampa, M.H.O., 2004. Efficiency of Organic Compounds Removal by Electron-Beam Irradiation in Presence of High Metal Concentration. Radiation Physics and Chemistry, Vol. 71, pp. 449–452.

2- Kashiwagi, M., Hoshi, Y., 2012. Electron Beam Processing System and Its Application. NHV Corporation, Vol. 75, pp. 47-54.

3- Duarte C.L., Sampa M.H.O., Rela P.R., Oikawa H., Silveira C.G., Azevedo A.L., 2002. Advanced Oxidation Process by Electron-Beam-Irradiation Induced Decomposition of Pollutants in Industrial Effluents. Radiation Physics and Chemistry. Vol. 63, pp. 647–651.

4- Munter, R., 2001. Advanced Oxidation Process-Current Status and Prospect. Proceedings of the Estonian Academy of Sciences, Chemistry, Vol. 50, pp. 59-80.

5- International Atomic Energy Agency, 2007. Radiation Processing: Environmental Application (IAEA-RPEA, Vienna, Austria)

6- Duarte, C.L., Sampa, M.H.O., Rela, P.R., Oikawa, H., Silveira, C.G., Azevedo, A.L., 2002. Advanced Oxidation Process by Electron-beam Irradiation Induced Decomposition of Pollutants in Industrial Effluents. Radiation Physics and Chemistry, Vol. 63, pp. 647–651.

7- Duarte, C.L., Sampa, M.H.O., Rela, P.R., Silveira, C.G., 2000. Application of Electron Beam Irradiation Combined with Conventional Treatment to Treat Industrial Effluents. Radiation Physics and Chemistry, Vol. 57, pp. 513–518.

8- Getoff, N., 1996. Radiation-induced Degradation of Water Pollutants: State of the Art. Radiation Physics and Chemistry, Vol. 47, pp. 581-593.

9- International Atomic Energy Agency, 2008. Radiation Treatment of Polluted Water and Wastewater (IAEA-TECDOC-1598, Vienna, Austria)

10- Vertes, A., Nagy, S., Klencsar, Z., Lovas, R., Rosch, F., 2010. Handbook of Nuclear Chemistry; Vol. 3, Chemical Applications of Nuclear Reactions and Radiations (Springer)

11- Kurucz, C. N., Waite, T. D., Cooper, W. J., Nickelsen, M. G., 1991. High Energy Electron Beam Irradiation of Water, Wastewater and Sludge. Advances in Nuclear Science & Technology, Vol. 22, pp. 1-37.

12- AVASN Maruthi, Y., Lakshmana Das, N., Kaizar Hossain, Rawat, K.P., Sarma, K.S.S., Sabharwal, S., 2013. Appliance of Electron Beam Technology for Disinfection of Sewage Water to Minimize Public Health Risks. European Journal of Sustainable Development, Vol. 2, pp. 1-18.
13- Walter Z.T., 2004. Physicochemical Treatment of Hazardous Wastes (CRC Press)
14- Han, B., Kim, J., Kim, Y. 2006. Application and Economics of Electron Beam Wastewater Treatment. (Online) Available from: hnp:// pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/P 12510cd/ papers/6.pdf
15- Siddiqui M. S, Amy G., Cooper W. J., Kurucz C. N., Waite T. D., Nickelsen M. G., 1996. Bromate Ion Removal by HEEB Irradiation. AWWA, vol. 88, pp. 90-101.
16- Chao, A.W., Chou, W., 2011. Reviews of Accelerator Science and Technology: Vol. 4, Accelerator Applications in Industry and the Environment (World Scientific)
17- Hanna, S., 2012. RF Linear Accelerators for Medical and Industrial Applications (Artech House)
18- Tarr, M.A., 2003. Chemical Degradation Methods for Wastes and Pollutants, Environmental and Industrial Applications (Marcel Dekker Inc.)
19- International Atomic Energy Agency, 2004. Emerging Applications of Radiation Processing (IAEA-TECDOC-1386 Vienna, Austria)
20- Kuk, S.H., Kim, S.M., Kang, W.G., Han, B., 2011. High-power Accelerator for Environmental Applications. Korean Physical Society, Vol. 59, pp.3485-3488.
21- Kavanaugh, M., Chowdhury, Z., 2003. Removal of MTBE with Advanced Oxidation Processes (IWA Publishing)
22- International Atomic Energy Agency, 1997. Sewage Sludge and Wastewater for Use in Agriculture. (IAEA-TECDOC-971, Vienna, Austria)
23- Cooper, W.J., Curry, R.D., O'Shea, K.E., 1998. Environmental Applications of Ionizing Radiation (A Wiley Interscience Publication)
24- Adel, A. K.; Azni, I.; Katayon, S.; Chuah, T.G., 2004. Treatment of Textile Wastewater by Advanced Oxidation Processes – A Review. In: Global Nest: The International Journal – General Information Vol. 6, pp. 222-230.
25- Takacs, E., Wojnarovits, L., Tamas, P., 2007. Azo Dye Degradation by High-energy Irradiation: Kinetics and Mechanism of Destruction. Nukleonika, Vol. 52, pp. 69−75.
26- United States Environmental Protection Agency, 1997. High Voltage Environmental Applications, Inc. Electron Beam Technology Innovative Technology Evaluation Report (EPA/540/R-96/504)
27- Case, F.N., 1973. Ketchen, E.E., Study of Gamma Induced Low Temperature Oxidation of Textile Effluents (EPA- R2-73-260.)
28- Minghong, W., Boronga, B., Ruiminb, Z., Jinliang, Z., Longxin, H., 1998. The Regeneration of Polluted Activated Carbon by Radiation Techniques. Radiation Physics and Chemistry, Vol. 53, pp. 431-435.
29- Chmielewski, A.G., 2005. Application of Ionizing Radiation to Environment Protection. Nukleonika, Vol. 50, pp.17-24.

30- Mckeown, J., 1996. Electron Sterilization of Sewage Sludge: A Real Case Comparison with Other Processes. Radiation Physics and Chemistry, Vol. 47, pp. 469-473.
31- Bitton, G., 2005. Wastewater Microbiology (John Wiley & Sons, Inc.)
32- Lewins, J., Becker, M., 1991. Advances in Nuclear science and Technology: Volume 22. (Springer)
33- Crittenden, J.C., Trussell, R.R, Hand, D.W., Howe, K.J., Tchobanoglous, G., 2012. MWH's Water Treatment - Principles and Design, Third Edition (John Wiley & Sons, Inc.)
34- Jung, H., Mah, Y.J., Lee, M.J., 2008. Destruction of PCBs in Transformer Oil by an E-Beam. Waste Management and the Environment IV, Vol. 109, pp. 341-348.
35- International Atomic Energy Agency, 2015. Radiation Processing Applications in Industry: Prospects in Latin America and the Caribbean. Scientific Forum on "Atoms in Industry – Radiation Technology for Development. Vienna, Austria.
36- Techcommentary, 1996. Advanced Oxidation Processes for Treatment of Industrial Wastewater. An EPRI Community Environmental Center Publ. No. 1.
37- International Atomic Energy Agency, 2003. Status of Industrial Scale Radiation Treatment of Wastewater and Its Future. Proceedings of a Consultants Meeting Held in Daejon, (IAEA-TECDOC-1407, Vienna, Austria)
38- Han, B., Kim, J.K., Kim, Y.R., Zommer, N., 2011. Treatment of Wastewater for Reuse with Mobile Electron Beam Plant, Report of the 2nd RCM on Radiation Treatment of Wastewater for Reuse with Particular Focus on Wastewaters Containing Organic Pollutants. Working Material, IAEA, Vienna, Austria.
39- Nasef, M.M., 2003. Application of Electron Beam for Preparation of Membranes. Proceedings of the FNCA 2003 Workshop on Application of Electron Accelerator -Radiation System for Thin Film, Kuala Lumpur, Malaysia.
40- Shin, H.S., Kim, Y.R., Han, B., Makarov, I.E., Ponomarev, A.V., Pikaev, A.K., 2002. Application of Electron Beam to Treatment of Wastewater from Papermill. Radiation Physics and Chemistry, Vol. 65, pp. 539-547.