مقاله پژوهشی

علوم و تکنولوژی محیط زیست، دوره بیست و چهارم، شماره دوازده، اسفند ماه ۱۴۰۱ (۹۲-۷۹)

نقشه راه کاربرد تکنولوژی هسته‌ای در محیط‌زیست

زهرا سلطانی ۱ *

zhr_soltani@yahoo.com

امیرمحمد بیگ‌زاده۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۹/۲۰ **تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۶/۲**

چکیده

زمینه و هدف: امروزه، استفاده از دستگاه‌های پیشرفته تصفیه آلاینده‌های محیطی مبتنی بر تکنولوژی هسته‌ای در فرآیندهایی که با تولید آلاینده‌های گازی و مایع و جامد همراه است، شدیداً توصیه می‌شود. تکنولوژی هسته‌ای، پیشرفته، پیچیده و در مرحله رشد است و نیاز به سرمایه‌گذاری بالا، نیروهای با تخصص بالا و همکاری و هماهنگی سلسله‌ای از پروژه‌ها دارد، لذا تدوین استراتژی و برنامه‌ریزی برای توسعه کاربرد تکنولوژی هسته‌ای در محیط‌زیست، ضروری است. هدف از این پژوهش پشتیبانی از برنامه‌ریزی راهبردی و بلندمدت تکنولوژی هسته‌ای در حوزه محیط‌زیست با تهیه و تدوین نقشه راه است، تا تکنولوژی‌های کلیدی و روش‌های دستیابی به آن‌ها شناسایی شوند.

روش بررسی: در این مقاله جهت تدوین نقشه راه کاربرد تکنولوژی هسته‌ای در محیط‌زیست، ابتدا با مرور پژوهشی در زمینه‌ی کاربردهای تکنولوژی هسته‌ای در محیط‌زیست، پتانسیل‌های بالقوه و تکنولوژی‌های کلیدی در این زمینه شناسایی شد. سپس با اجرای گام‌های فرایندی از طریق بررسی مقالات و متون علمی، بازار شناسایی شد و سپس انواع محصولات تعیین شدند. بازه زمانی تحقیق بین سال‌های ۱۳۹۹-۱۴۰۰ می‌باشد.

یافته‌ها: مهم‌ترین بازار سیستم‌های تصفیه بر پایه تکنولوژی هسته‌ای نیروگاه‌ها، صنایع بزرگ شیمیایی و پتروشیمی و صنایع پسماند هستند. تأسیسات آلاینده زدایی گازها، تصفیه‌خانه لجن و فاضلاب و تأسیسات رفع آلودگی پسماندهای صنعتی در دسته محصولات طبقه‌بندی می‌شوند. مطابق نقشه راه، دستیابی به تکنولوژی شتاب‌دهنده‌ها و سامانه‌های پرتودهی گاما از طریق انتقال تکنولوژی و خرید تجهیزات و نیز مشارکت و انتقال تجارب از طریق سازمان‌های بین‌المللی میسر می‌گردد. ازآنجایی‌که تمامی مراحل تحقیق و توسعه سیستم‌های تصفیه حالت‌جامد با امکانات موجود در کشور قابل انجام است و نیز ساده‌تر بودن فرآیند، در طول سه سال اولیه تمرکز بر سیستم‌های تصفیه حالت‌جامد تعیین شد و به‌موازات آن و با کسب تجارب لازم، امکان انتقال تکنولوژی به سیستم‌های تصفیه مایع و گاز فراهم می‌گردد.

۱- دکتری مهندسی هسته‌ای، مرکز تحقیقات سیاست علمی کشور، تهران، ایران. *(مسوول مکاتبات)

۲- استادیار پژوهشکده کاربرد پرتوها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای، سازمان انرژی اتمی ایران، تهران، ایران.

بحث و نتیجه‌گیری: سیستم‌های تصفیه مبتنی بر تکنولوژی هسته‌ای پیشرفته، مقرون‌به‌صرفه و با کارایی بالاتر و سازگار با محیط‌زیست هستند. در این راستا، کاربرد نقشه راه به‌عنوان یکی از مهم‌ترین ابزارهای مدیریتی برای برنامه‌ریزی توسعه‌ی این تکنولوژی ضروری است، که در این مقاله بدان پرداخته شده است.

واژه‌های کلیدی: نقشه راه، تکنولوژی هسته‌ای، محیط‌زیست، پساب‌های صنعتی، تصفیه.

J. Env. Sci. Tech., Vol 24, No.12, March, 2023

Roadmap of nuclear technology application in the environment

Zahra Soltani [1*]
zhr_soltani@yahoo.com
Amir Mohammad Beigzadeh [2]

Admission Date: August 24, 2022 Date Received: December 11, 2021

Abstract

Background and Objective: Today, the use of advanced environmental pollutants based on nuclear technology in processes associated with the production of gaseous, liquid and solid pollutants is highly recommended. Developing a strategy and planning for the development of the application of nuclear technology in the environment is necessary because this technology is advanced, complex and in the growth stage and requires high investment, highly specialized forces and cooperation and coordination of a series of projects.

Material and Methodology: In order to develop a roadmap for the application of nuclear technology in the environment, first, by reviewing research in the field of applications of nuclear technology in the environment, potentials and key technologies in this field were identified. Then, by performing process steps through reviewing scientific articles and texts, the market was identified and then the types of products were determined.

Findings: The most important markets for nuclear technology-based treatment systems are power plants, chemical and petrochemical industries, and waste industries. Gaseous decontamination facilities, sludge and wastewater treatment and industrial waste facilities are classified in the product category. According to the roadmap, the acquisition of accelerator technology and gamma-rayirradiator systems is possible through technology transfer and equipment purchase. Since all stages of research and development of solid-state purification systems can be done with the existing facilities in the country and also the simplicity of the process, during the first three years, the focus on solid state purification systems was determined and in parallel by gaining the necessary experience, it is possible to transfer technology to liquid and gas purification systems.

Discussion and Conclusion: Purification systems based on advanced nuclear technology are cost-effective, more efficient and environmentally friendly. In this regard, the use of roadmap as one of the most important management tools for planning the development of this technology is essential.

Keywords : roadmap, nuclear technology, environment, industrial wastewater, purification.

1- PhD Nuclear Engineering, Research Fellow of National Research Institute of Science Policy (NRISP), Tehran, Iran. *(*CorrespondingAuthor*)
2- Assistant Professor, Radiation Application Research School, Nuclear Science & Technology Research Institute, Tehran, Iran.

مقدمه

توسعه کاربرد تکنولوژی صلح‌آمیز هسته‌ای در سطح جامعه موجب افزایش و ارتقاء سطح کیفیت زندگی مردم می‌گردد. تحقیق و توسعه و نوآوری در به‌کارگیری تکنولوژی هسته‌ای، بهره‌وری شرکت‌های تولیدکننده را افزایش داده و باعث تولید ثروت می‌شود. به‌عنوان‌مثال به‌کارگیری تکنولوژی هسته‌ای در حوزه محیط‌زیست در جهت بهبود و حفاظت از محیط‌زیست و پیاده‌سازی سیاست‌های اقتصاد کم‌کربن از اهداف مهم کاربردهای صلح‌آمیز تکنولوژی هسته‌ای به شمار می‌رود که در کشورهای پیشرفته صنعتی به‌خوبی اجرایی شده است. در کشور ما نیز با توجه به شرایط ویژه منطقه‌ای و زیست‌محیطی و افزایش جمعیت در شهرها، ایجاد زیرساخت‌ها و مراکز پرتودهی جهت تصفیه آلاینده‌های گازی کارخانه‌ها و صنایع به‌ویژه در مناطق نفت‌خیز، تصفیه آلاینده‌های فاضلاب و پساب‌های صنعتی و بیمارستانی، در حفظ محیط‌زیست امری ضروری است. امروزه مشکلات حاصل از فعالیت‌های انسانی در محیط‌زیست به‌قدری گسترده است که نه‌تنها در داخل کشورها و منطقه بلکه در مقیاس قاره‌ای هم می‌تواند اثرگذار باشد. بدین لحاظ استفاده از دستگاه‌های پیشرفته جهت تصفیه آلاینده‌های محیطی در فرآیندهایی که با تولید آلاینده‌های گازی و مایع و جامد همراه است شدیداً توصیه می‌شود. به‌کارگیری دستگاه‌های تصفیه که اساس کار آن‌ها بر پایه تکنولوژی هسته‌ای است می‌تواند به‌عنوان بهترین گزینه مورد استفاده قرار گیرد. مهم‌ترین کاربردهای تکنولوژی هسته‌ای در محیط‌زیست شامل تصفیه سیستم‌های گازی، مایع و حالت‌جامد بر پایه تکنولوژی هسته‌ای است. طی چند دهه گذشته، تحقیقات گسترده‌ای در مورد استفاده از پرتو تکنولوژی برای اصلاح محیط‌زیست انجام شده است.

نقشه راه به‌عنوان یکی از مهم‌ترین ابزارهای مدیریتی برای برنامه‌ریزی توسعه‌ی تکنولوژی‌های نوین مطرح است. نقشه راه مبتنی بر زمان است و به شناسایی، انتخاب و توسعه تکنولوژی برای پاسخگویی به مجموعه‌ای از نیازها تعریف می‌شود (۱). نقشه راه در تصمیم‌گیری‌ها، بهبود برنامه‌ریزی و راهبردهای توسعه و تحقیق و نوآوری در تکنولوژی و آینده‌نگاری شرکت‌ها کمک می‌کند. کاربرد نقشه راه در صنایع مختلف در امریکا، کانادا، ژاپن و اخیراً اروپا و استرالیا گسترش زیادی یافته است. به‌عنوان‌مثال آژانس بین‌المللی انرژی اتمی جهت دستیابی به تکنولوژی‌های نوآورانه درزمینه‌ی انرژی هسته‌ای از نقشه راه مبتنی بر برنامه‌ریزی استراتژیک چندلایه و مبتنی بر زمان استفاده کرده است (۲). احمدی و همکاران برای برنامه‌ریزی تحقیق و توسعه‌ی ساخت قرص‌های سوخت هسته‌ای توریم از روش نقشه راه بهره‌گیری کرده‌اند (۳). هم‌چنین در جدول ۱ برخی از نقشه راه‌های مرتبط با حوزه‌های مختلف انرژی هسته‌ای به‌طور خلاصه آورده شده است. هدف از این مقاله پشتیبانی از برنامه‌ریزی راهبردی و بلندمدت تکنولوژی هسته‌ای در حوزه محیط‌زیست با تهیه نقشه راه است، تا تکنولوژی‌های کلیدی و روش‌های دستیابی به آن‌ها شناسایی شوند.

جدول ۱- نقشه راه‌های مرتبط با حوزه‌های مختلف انرژی

Table 1. Roadmap related to different energy fields

نویسندگان	سال	نتایج
Heidricha, Pimblott, Was, Zinkle	۲۰۲۰	در این مقاله وضعیت، قابلیت‌ها و امکانات پرتوهای یونی در ایالات‌متحده بررسی شده و بهترین شیوه برای انجام تابش‌های یونی مواد توصیه شده است (۴).
Lee	۲۰۲۰	این مطالعه با استفاده از مفاهیم "دولت توسعه انرژی هسته‌ای " و "جامعه معرفتی سیاسی " به تغییرات معاصر در سیاست انرژی هسته‌ای کره جنوبی می‌پردازد (۵).

Sekimoto	۲۰۱۶	در این مقاله، با اشاره به توسعه دستگاه‌های انرژی هسته‌ای نوآورانه، نقشه راهی برای استفاده از انرژی هسته‌ای جهت تولید برق با استفاده از راکتورهای نوآورانه در ژاپن ارائه شده است (۶).
Sinha, Kakodkar	۲۰۰۳	این مقاله شرح فنی از اجزای اصلی سیستم انرژی هسته‌ای هند را ارائه می‌دهد و نتایج اولیه یک مطالعه فیزیکی را نشان می‌دهد تا پتانسیل نقشه راه را برای رسیدن به برخی از اهداف پیش‌بینی شده نشان دهد (۷).

روش بررسی

روش تدوین نقشه راه شامل چهار مرحله است:

۱. مرحله بازار که در آن به شناسایی و اولویت‌بندی نیازهای صنایع پرداخته می‌شود.

۲. مرحله محصول که در آن به شناسایی ویژگی‌های عملکردی و مشخصه‌های محصولات پرداخته می‌شود.

۳. مرحله تکنولوژی که به شناسایی راه‌حل‌های فناورانه برای رفع نیازهای صنایع می‌پردازد.

۴. در مرحله تحقیق و توسعه که شناسایی طرح‌های پژوهشی مناسب برای رسیدن به اهداف موردنظر موردتوجه قرار می‌گیرد.

در این پژوهش جمع‌آوری داده‌های موردنیاز پژوهشی به روش کتابخانه‌ای که شامل مطالعه متون فارسی و انگلیسی مرتبط با کاربرد پرتوها در محیط‌زیست و مقالات مرتبط با نقشه راه، در بازه زمانی بین سال‌های ۱۳۹۹-۱۴۰۰ انجام شده است. در این مقاله ابتدا با مرور پژوهشی درزمینه‌ی کاربردهای تکنولوژی هسته‌ای در محیط‌زیست، پتانسیل‌های بالقوه و تکنولوژی‌های کلیدی در این زمینه شناسایی می‌شوند. سپس با اجرای گام‌های فرایندی از طریق بررسی مقالات و متون علمی، بازار و سپس انواع محصولات شناسایی می‌شوند. با شناسایی حوزه‌های کلیدی تکنولوژی‌های هسته‌ای در محیط‌زیست، سرفصل‌ها و پروژه‌های پژوهشی به‌منظور اکتساب تکنولوژی‌ها مشخص می‌شود.

کاربردهای تکنولوژی هسته‌ای در محیط‌زیست

مهم‌ترین کاربردهای تکنولوژی هسته‌ای در محیط‌زیست شامل تصفیه سیستم‌های گازی، مایع و حالت‌جامد بر پایه تکنولوژی در سال‌های اخیر، به‌طور فزاینده‌ای در سراسر جهان موردتوجه قرارگرفته است. رشد جمعیت، استانداردهای بالاتر زندگی، افزایش شهرنشینی و افزایش فعالیت‌های صنعتی، همگی در تخریب محیط‌زیست نقش دارند. به‌عنوان‌مثال، سوخت‌های فسیلی - ازجمله زغال‌سنگ، گاز طبیعی، نفت، روغن و قیر- اصلی‌ترین منابع اصلی تولید انرژی گرمایی و الکتریکی در جهان هستند و مسئول انتشار افسارگسیخته آلاینده هایی هستند که از طریق گازهای خروجی از صنایع، دودکش های کارخانه ها، نیروگاه‌ها، دستگاه‌های گرمایش مسکونی و وسایل نقلیه در اتمسفر هستند. تمامی این سوخت ها حاوی ترکیبات کربن، هیدروژن و اکسیژن و مواد دیگری مانند گوگرد و ترکیبات نیتروژن و فلزات سنگین هستند. در طی فرآیند سوخت، آلاینده‌های گوناگونی مانند خاکستر هوابرد حاوی عناصر کمیاب متنوع (فلزات سنگین)، اکسیدهای گوگرد SO_x (ازجمله SO_2 و SO_3)، اکسیدهای نیتروژن NOx (ازجمله NO_2 و NO_3) و ترکیبات آلی فرار تولید و منتشر می‌شوند(۱۰-۸).

تصفیه سیستم‌های گازی بر پایه تکنولوژی هسته‌ای

آلودگی هوا ناشی از ذرات معلق و سایر آلاینده‌ها نه‌تنها به‌طور مستقیم بر محیط جوی تأثیر می‌گذارد بلکه آب‌وخاک را نیز آلوده می‌کند و منجر به تخریب آن‌ها می‌شود. انتشار وسیع مجموع آلاینده‌ها یک بحران جهانی محسوب می‌شود(۹). ازجمله تکنولوژی‌های متداول برای تصفیه گاز دودکش با هدف کنترل میزان انتشار SO_2 و NO_x می‌توان به گوگردزدایی آلاینده‌های مرطوب گازی دودکش و کاهش انتخابی با کاتالیزور را اشاره کرد. ترکیبات آلی فرار می‌توانند در حفرات کربن اکتیو جذب سطحی شوند. این تکنولوژی‌های معمول تصفیه گاز، فرآیندهای شیمیایی پیچیده‌ای هستند که منجر به تولید فاضلاب، سنگ گچ و کاتالیزور استفاده‌شده، می‌شود (۱۰). تکنولوژی باریکه الکترونی از امیدبخش‌ترین تکنولوژی‌های پیشرفته موجود برای تصفیه

گازهای متصاعد شده از دودکش‌ها، به‌ویژه با توجه به اشکالات تکنولوژی‌های متداول است. این تکنولوژی یک فرایند شستشوی خشک برای حذف هم‌زمان SO_2 و NO_x بدون تولید پسماند است. پرتودهی آلاینده‌های گازی دودکش با استفاده از پرتوی الکترون سبب تغییرات شیمیایی در آن‌ها شده و حذف اکسیدهای گوگرد و نیتروژن را ساده‌تر می‌کند. اجزای اصلی گازهای دودکش شامل N_2، O_2، H_2O، CO_2 و غلظت بسیار کمتری از SO_x و NO_x هستند. در پرتودهی با باریکه الکترون، الکترون‌های پرسرعت با گاز اندرکنش کرده و یون‌ها و رادیکال‌های مختلف ایجاد می‌کنند. گونه‌های اولیه تشکیل‌شده عبارت‌اند از: e^-، N_2^+، N^+، O_2^+، O^+، H_2O^+، OH^+، H^+، CO_2^+، CO^+، N_2*، O_2*، N، O، H، OH و CO. در حضور تراکم‌های بالای بخار آب، رادیکال‌های اکسیدکننده $OH^{\bullet}$ و $H_2O^{\bullet}$ و گونه‌های برانگیخته مانند $O(^3P)$ مهم‌ترین محصولات تشکیل‌شده هستند (۱۰). شرکت Ebara از شتاب‌دهنده الکترون با انرژی ۰/۷۵ مگاالکترون ولت و توان ۴۵ کیلووات برای تبدیل SO_x و NO_x به یک محصول خشک حاوی $(NH_4)2SO_4$ و NH_4NO_3 که به‌عنوان کود در کشاورزی قابل‌استفاده است بهره برد. با استفاده از فرآیند Ebara، دو تأسیسات دیگر در مقیاس بزرگ‌تر در ایالات‌متحده آمریکا و آلمان ساخته شدند. تأسیسات ایالات‌متحده آمریکا به دو شتاب‌دهنده الکترونی با انرژی ۰/۸ مگاالکترون ولت و توان ۱۶۰ کیلووات مجهز است که دارای ظرفیت تصفیه گاز ($۱۰^۴ \times ۳/۲$-۱/۶) مترمکعب در ساعت برای گاز حاوی ۱۰۰۰ppm از SO_2 و حاوی ۴۰۰ppm از NO_x است. در آلمان، از دو شتاب‌دهنده الکترون با انرژی ۰/۳ مگاالکترون ولت و توان ۱۸۰ کیلووات برای تصفیه ($۱۰^۴ \times ۲$-۱) مترمکعب در ساعت گاز دودکش حاوی ۵۰۰-۵۰ppm از SO_2 و حاوی ۳۰۰-۵۰۰ ppm از NO_x استفاده می‌شود . کارایی روش برای حذف SO_x، ۸۰ درصد و برای حذف NO_x، ۲۰ درصد گزارش شده است (۹).

تصفیه سیستم‌های مایع بر پایه تکنولوژی هسته‌ای

در دهه‌های آینده، امنیت آب، مانند امنیت غذا، در بسیاری از مناطق جهان به یک اولویت اصلی ملی و منطقه‌ای تبدیل خواهد شد. بنابراین نیاز به توسعه تکنولوژی‌های پیشرفته‌ای است که قادر باشد آلودگی این منبع گران‌بها را کنترل کنند. رشد سریع جمعیت و افزایش توسعه کشاورزی و صنعتی منجر به تولید مقادیر زیادی فاضلاب صنعتی و شهری آلوده شده است. تشخیص اینکه این آب‌های آلوده ممکن است تهدیدی جدی برای انسان باشد، باعث شده است که متخصصان به دنبال تکنولوژی‌های مقرون‌به‌صرفه برای تصفیه باشند. روش‌های مختلفی مبتنی بر فرایندهای بیولوژیکی، شیمیایی، فتوشیمیایی و الکتروشیمیایی برای تجزیه آلاینده‌های شیمیایی و بیولوژیکی موجود در این فاضلاب‌ها در دست بررسی است. چندین واحد تصفیه در مقیاس آزمایشی و تعدادی از تصفیه‌خانه‌های فاضلاب در مقیاس صنعتی در سراسر جهان بر اساس پرتو تکنولوژی در حال بهره‌برداری یا در دست ساخت هستند(۱۴-۱۱). نتایج حاصل از کاربردهای عملی تأیید کرده است که می‌توان به‌راحتی و به‌طور مؤثر از پرتو تکنولوژی برای تصفیه مقادیر زیادی از فاضلاب استفاده کرد.

تصفیه سیستم‌های حالت‌جامد بر پایه تکنولوژی هسته‌ای

لجن فاضلاب ازجمله ضایعات بسیار خطرناک است که برای از بین بردن آن نیاز به هزینه‌های گزاف است. لجن فاضلاب حتی پس از تجزیه و روش‌های معمول اصلاح حاوی غلظت‌های بالایی از عوامل بیماری‌زا مانند انگل‌ها، باکتری‌ها و ویروس‌ها می‌باشند. از جنبه دیگر لجن فاضلاب منبع عظیمی از مواد مغذی برای گیاهان بوده و می‌تواند در کشاورزی به‌صورت کود مورد استفاده قرار گیرد. ماده آلی موجود در آن توسط چرخه اکسیداسیون طبیعی در خاک تجزیه‌شده و مواد مغذی برای گیاهان ایجاد می‌نماید. خروج مواد از لجن‌ها آهسته‌تر از کودهای شیمیایی است، بنابراین فرصت دارند تا به اندازه لازم جذب بذرها گردد فاضلاب باعث نرم شدن خاک شده و رشد ریشه گیاهان را بهتر می‌سازد اما غلظت بالای عوامل بیماری‌زا از مهم‌ترین موانع کاربرد این مواد در کشاورزی است (۱۵). در حال حاضر، عملیات حرارتی و آهکی روش‌هایی است که بیشتر برای پردازش لجن فاضلاب استفاده می‌شود. پرتودهی لجن فاضلاب یک تکنولوژی بسیار نویدبخش برای تصفیه لجن است و توسط سازمان حفاظت از محیط‌زیست ایالات‌متحده به‌عنوان روشی برای تولید لجن "کلاس A" که برای مصارف کشاورزی بی‌خطر است، تأییدشده

است. یک کارخانه برای تصفیه لجن مایع با استفاده از اشعه گاما از کبالت-۶۰ از سال ۱۹۹۲ در وادودارا، هند در حال بهره‌برداری است. این کارخانه برای تصفیه ۱۱۰ مترمکعب لجن از یک تصفیه‌خانه معمولی در روز طراحی شده است. تجربه عملیاتی کارخانه نشان داده است که فرآیند ساده، مؤثرتر و آسان برای ادغام در یک تصفیه‌خانه فاضلاب موجود است و لجن تصفیه‌شده با پرتو می‌تواند به‌عنوان کود در کشاورزی استفاده شود. به همین ترتیب، می‌توان از شتاب‌دهنده الکترونی برای تصفیه لجن آبگیری شده نیز استفاده کرد (۹).

در جدول ۲ جنبه‌های مختلف روش پرتو تکنولوژی در تصفیه گاز دودکش، فاضلاب و لجن با یکدیگر مقایسه شده است.

جدول ۲- جنبه‌های مختلف روش پرتودهی در تصفیه گاز دودکش، تصفیه فاضلاب و لجن (۱۶)

Table 2. Different aspects of irradiation method in flue gas treatment, wastewater and sludge treatment [16]

	تصفیه گاز دودکش	تصفیه فاضلاب	تصفیه لجن
آلاینده‌ها	SO_2، NO_X، (دیوکسین)	ترکیبات پیچیده از COD، BOD، S/S و غیره	ضدعفونی کردن میکروارگانیسم
فرآیند تصفیه	ساده	محدودیت از نظر عمق	محدودیت از نظر عمق
مقایسه با فرآیندهای متداول	برتری روش پرتودهی در مرحله صنعتی به اثبات رسیده است.	نیاز به بررسی بیشتر	مزایای زیادی نسبت به فرآیندهای شیمیایی دارد.
تکنولوژی	کاملاً توسعه یافته است.	آزمایشگاه به مقیاس پایلوت	آزمایشگاه به مقیاس پایلوت
اقتصاد	در پایلوت و صنعتی ثابت شده است.	نیاز به بررسی بیشتر	نیاز به بررسی بیشتر
محصول جانبی	برای کود مفید است.	فاضلاب (کمتر سمی)	مفید برای کود یا خاک

احداث کارخانه‌ها در مقیاس نیمه‌صنعتی و مطالعات در مقیاس صنعتی، از قاره آمریکا گرفته تا اروپا و آسیا، نشان داده‌اند که تصفیه آلاینده‌ها به روش پرتودهی سازگارتر با محیط‌زیست بوده و با توجه به قوانین زیست‌محیطی سخت‌گیرانه‌تر، استفاده از مواد شیمیایی را محدود می‌کند، نسبت به سایر روش‌های شیمیایی تصفیه آلاینده‌ها، برتری دارد. درنتیجه حمایت‌های آژانس بین‌المللی انرژی اتمی از پروژه‌های مربوط به استفاده از تکنولوژی هسته‌ای در محیط‌زیست، مراکز پیشرفته پرتو - تصفیه در بسیاری از کشورها تأسیس شد و فعالیت‌های زیادی مانند تصفیه گاز دودکش کارخانه صنعتی با پرتو الکترون، تصفیه فاضلاب با پرتوی الکترونی و سایر موارد انجام شده است (۱۷). با حمایت آژانس بین المللی انرژی اتمی، در سال ۲۰۰۵، کره جنوبی اولین کارخانه صنعتی را برای تصفیه فاضلاب رنگ نساجی با استفاده از پرتو الکترونی با ظرفیت تصفیه ۱۰۰۰۰ مترمکعب فاضلاب در روز تأسیس کرد (۱۸). در یک پروژه اخیر در برزیل، موسسه تحقیقات انرژی هسته ای با همکاری آژانس بین المللی انرژی اتمی، یک واحد پرتو الکترونی متحرک را برای افزایش ظرفیت ملی برای تصفیه پساب‌های صنعتی کارخانه‌های مواد شیمیایی، دارویی و نفت برای استفاده مجدد ساخت. این واحد متحرک تصفیه به روش پرتودهی روزانه تا ۱۰۰۰ مترمکعب پساب را در محل تصفیه می‌کند، که روشی مؤثر برای نشان دادن کارایی تکنولوژی پرتو الکترونی ارائه می‌کند (۱۹). هم‌چنین به‌عنوان یک پروژه آژانس بین‌المللی انرژی اتمی در سال ۲۰۱۲، دانشمندان چینی برنامه‌ای را برای تصفیه فاضلاب با پرتوهای الکترونی توسعه دادند (۱۷). شروع برنامه با حمایت آژانس بین‌المللی انرژی اتمی برای دانشمندان چینی که شامل کمک هزینه جهت دوره آموزشی و مشاوره کارشناسان فعال در تأسیسات آزمایشگاهی در سایر کشورها، که از فناوری پرتو الکترونی استفاده می‌کردند، بود. نتیجه بازدیدها، راهنمایی‌ها و مشاوره‌ها، قدم مهمی جهت توسعه پروژه بود. به‌طوری‌که در سال ۲۰۱۷، یک مرکز آزمایشی در شهر Jinhua، در ۳۰۰ کیلومتری جنوب غربی شانگهای، با ظرفیت تصفیه ۱۵۰۰ مترمکعب

فاضلاب در روز در یک کارخانه نساجی ساخته شد. در نهایت شرکت انرژی هسته‌ای چین، نیروگاه جدید فاضلاب مبتنی بر تکنولوژی هسته‌ای، با تصفیه روزانه بیش از ۳۰۰۰۰ مترمکعب فاضلاب را با بهره‌برداری از هفت شتاب‌دهنده الکترونی احداث نمود.

در تحقیقی که توسط هان و همکاران در مورد برآورد هزینه عملیاتی شدن تصفیه پساب مجتمع صنعتی رنگرزی داگو در کره جنوبی با تکنولوژی هسته‌ای انجام شده، برآورد شده است، کارخانه پرتو تصفیه در مقیاس آزمایشی با شتاب دهنده الکترونی ۱ مگا الکترونی و توان ۴۰ کیلووات در برای تصفیه ۱۰۰۰ مترمکعب فاضلاب در روز ساخته شد (۱۸). هزینه ساخت شتاب‌دهنده‌های توان بالا در حدود ۰/۲ میلیون دلار آمریکا، ساخت‌وساز، لوله‌کشی، سایر تجهیزات و کارهای ساختمانی حدود ۱/۵ میلیون دلار و ۰/۵ میلیون دلار جهت مالیات اضافی، بیمه و غیره برآورد شد. کل هزینه سرمایه برای ساخت‌وساز کارخانه تصفیه پرتوی تقریباً ۴/۰ میلیون دلار آمریکا در جدول ۳ نشان داده شده است.

جدول ۳- سرمایه مورد نیاز برای تصفیه ۱۰۰۰۰ مترمکعب پساب مجتمع صنعتی رنگرزی داگو در روز (۱۸)

Table 3. Capital required for treatment of 10,000 cubic meters of effluent of Daegu Dyeing Industrial Complex(DDIC) per day (18)

موارد	هزینه (هزار دلار)
شتاب‌دهنده الکترونی ۱ مگا ولت، ۴۰۰ کیلو وات	۲۰۰۰
اتاق محافظ (بتنی) ،تجهیزات کمکی، حمل‌ونقل و نصب و سیستم انتقال آب	۱۵۰۰
سایر موارد - اسناد، مالیات، بیمه و غیره	۵۰۰
کل سرمایه موردنیاز	۴۰۰۰

برآورد فوق شامل هزینه‌های زمین و تحقیق و پژوهش نمی‌شود. زمان ساخت این کارخانه، شامل ۱۷ ماه کار عمرانی و تأسیساتی و ۳ ماه عملیات آزمایشی می‌باشد. برای برآورد هزینه عملیات، مصرف برق شتاب‌دهنده و سایر تجهیزات به‌صورت ۵۰۰ کیلووات (بازده ۸۰ درصد) و ۳۰۰ کیلووات و در مجموع ۸۰۰ کیلووات محاسبه می‌شود. بر اساس زمان بهره‌برداری در طول سال (۸۰۰۰ ساعت در سال)، زمانی که هزینه برق (کیلووات ساعت) ۰/۰۵دلار آمریکا در نظر گرفته شد، ۳۲۰۰۰۰ دلار در سال هزینه دارد. هزینه نیروی کار اپراتور در ۳ نوبت تقریباً ۱۰۰۰۰۰ دلار در سال محاسبه شده است. بنابراین، هزینه بهره‌برداری واقعی برای تصفیه ۱۰۰۰۰ مترمکعب پساب در روز به کمتر از ۱/۰ میلیون دلار در سال می رسد و هزینه عملیاتی فرآیند پرتو الکترونی برای تصفیه پساب مجتمع صنعتی رنگرزی داگو ۰/۳ دلار آمریکا به ازای هر مترمکعب پساب تخمین زده شد. لازم به ذکر است که با روش‌های متداول شیمیایی هزینه تصفیه هر مترمکعب فاضلاب در حدود ۱/۱ دلار برآورد شده است (۱۸).

مطابق محاسبات انجام شده و تجارب جهانی آموخته در مقیاس پایلوت و صنعتی نشان می‌دهد که استفاده از سیستم‌های تصفیه مبتنی بر تکنولوژی هسته‌ای از لحاظ اقتصادی مقرون‌به‌صرفه بوده و به لحاظ بازدهی، سازگار با محیط‌زیست نسبت به کارخانجات تصفیه با روش‌های معمول (شیمیایی) کاملاً برتری دارد (۲۱-۱۷).

یافته‌ها

تدوین استراتژی و برنامه‌ریزی برای توسعه کاربرد تکنولوژی هسته‌ای در محیط‌زیست، به دلیل اینکه این تکنولوژی پیشرفته، پیچیده و در مرحله رشد است و نیاز به سرمایه‌گذاری بالا، ملاحظات ایمنی و ریسک، نیروهای با تخصص بالا و همکاری و هماهنگی سلسله‌ای از پروژه‌ها دارد ضروری می‌شود. از مرور پژوهش‌ها و متون علمی مهم‌ترین کاربردهای تکنولوژی هسته‌ای در محیط‌زیست شامل تصفیه سیستم‌های گازی، مایع

و حالت‌جامد بر پایه تکنولوژی هسته‌ای است. هدف از این بخش به‌کارگیری نقشه راه برای پشتیبانی از برنامه‌ریزی توسعه‌ی تکنولوژی هسته‌ای در کاربردهای محیط‌زیست است. در شکل ۱ نقشه راه برای کاربرد صلح‌آمیز تکنولوژی هسته‌ای در حوزه محیط‌زیست ترسیم شده است.

مرحله بازار

تکنولوژی هسته‌ای در تأسیسات صنعتی تصفیه آلاینده‌های گازهای به‌طور مؤثری مفید واقع‌شده است و در کاربردهایی نظیر نیروگاه‌های با سوخت زغال‌سنگ، دودکش‌های نیروگاه‌های برق فسیلی، دودکش دیگ‌های بخار، کوره‌های زباله‌سوز جامد شهری و کارخانه‌های پتروشیمی و صنایع قابل به‌کارگیری است. شهرداری، بیمارستان‌ها، کارخانه‌های صنایع شیمیایی، پتروشیمی و فلزات مهم‌ترین بازار برای سیستم‌های پیشرفته تصفیه محسوب می‌شود.

مرحله محصول

مهم‌ترین خروجی محصول در سیستم‌های تصفیه مایع عبارت‌اند از:

- تأسیسات رفع آلودگی پسماندهای مایع صنعتی،
- تأسیسات رفع آلودگی فاضلاب شهری و
- تأسیسات تصفیه آب شهری.

مهم‌ترین خروجی محصول در سیستم‌های تصفیه حالت‌جامد عبارت‌اند از:

- تصفیه‌خانه لجن و فاضلاب با شتاب‌دهنده الکترونی
- سیستم‌های گندزدایی لجن و فاضلاب با به‌کارگیری پرتوهای گاما
- تولید کود کشاورزی از لجن پرتودیده و سیستم تولید کود کشاورزی

مهم‌ترین خروجی محصول در سیستم‌های تصفیه حالت‌جامد عبارت‌اند از:

- تأسیسات آلاینده زدایی گازی جهت گازهای خروجی از دودکش‌های نیروگاه برق و صنایع دیگر.

مرحله تکنولوژی

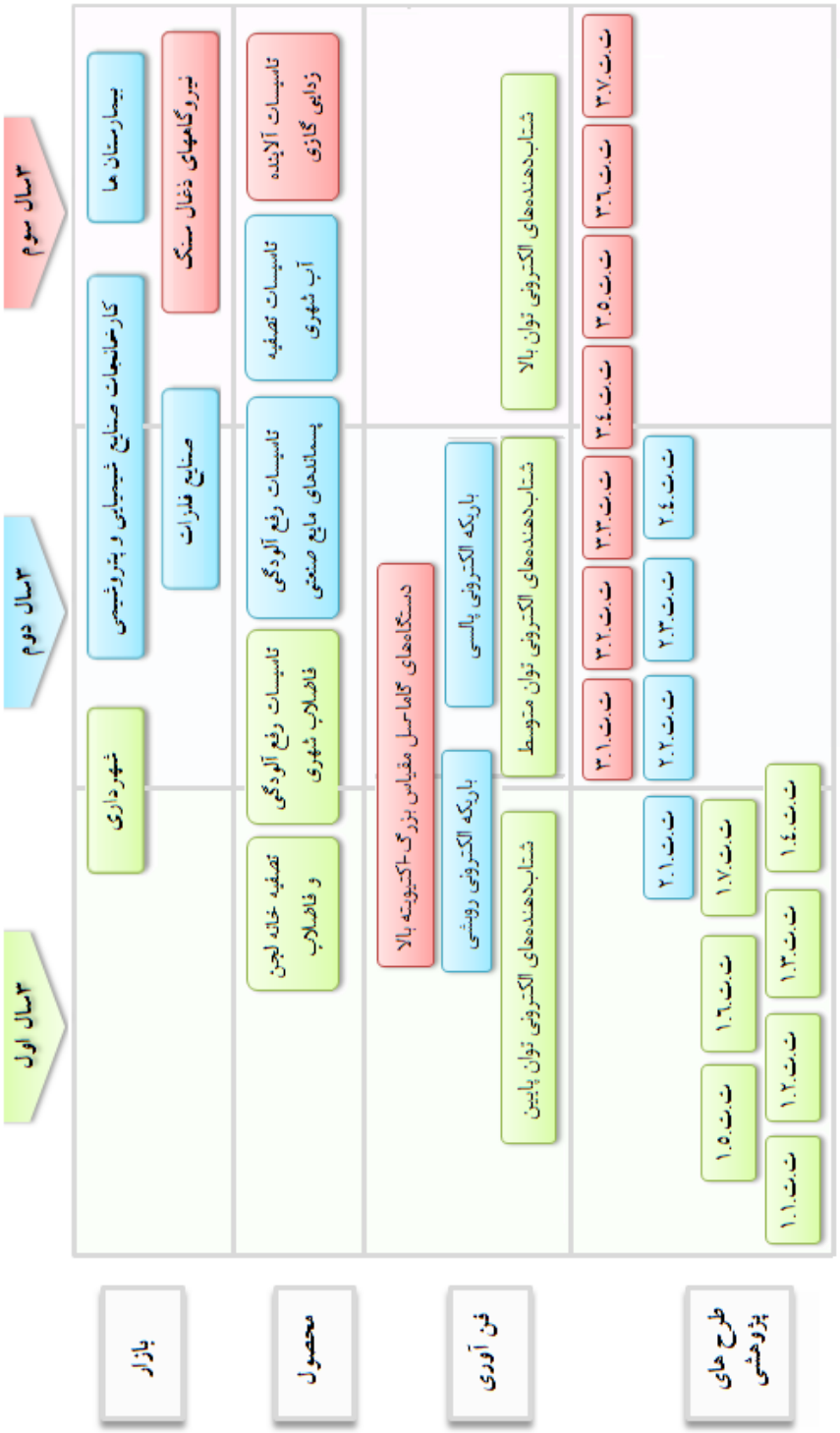
تکنولوژی‌های راهبردی که در تأسیسات تصفیه سیستم‌های گازی، جامد و مایع مبتنی بر تکنولوژی هسته‌ای استفاده می‌شوند، عبارت‌اند از:

- شتاب‌دهنده‌های الکترونی توان بالا، متوسط و پایین
- سامانه‌های پرتودهی مقیاس بزرگ- اکتیویته بالا (چشمه کبالت-۶۰)

مرحله تحقیق و توسعه

برای اکتساب تکنولوژی‌های راهبردی باید پروژه‌های تحقیق و توسعه (ت.ت) تعریف و اجرا شوند. سرفصل‌های پژوهشی مرتبط با کاربرد تکنولوژی هسته‌ای در تصفیه سیستم‌های حالت‌جامد عبارت‌اند از:

۱. تعیین دز استاندارد برای گندزدایی پسماند فاضلاب شهری و تجزیه آلاینده‌ها (ت.ت.۱,۱)
۲. تعیین محدوده دز مناسب برای از بین بردن بیش از ۹۹/۹٪ از باکتری‌های موجود در لجن فاضلاب (ت.ت.۲,۱)
۳. تعیین دز استاندارد برای غیرفعال کردن ارگانیسم‌های مقاوم در برابر تابش (ت.ت.۳,۱)
۴. تعیین مدت‌زمان پرتودهی و آهنگ پرتودهی بر کارایی تصفیه لجن با باریکه الکترونی (ت.ت.۴,۱)



شکل ۱- نقشه راه برای کاربرد صلح‌آمیز تکنولوژی هسته‌ای در حوزه محیط‌زیست

Figure 1. Roadmap for the peaceful application of nuclear technology in the field of environment

۵. تعیین ضخامت لایه‌های لجن جهت تصفیه با باریکه الکترون (ت.ت.۵,۱)

۶. بررسی اثر افزودن عوامل حساسیت‌زای شیمیایی بر کیفیت تصفیه با باریکه الکترونی یا چشمه‌های پرتوی گاما (ت.ت.۶,۱)

۷. تعیین ابعاد اتاقک پرتودهی و ظرفیت سیستم پرتودهی با باریکه الکترون و چشمه‌های گاما (ت.ت.۷,۱)

۸. تعیین میزان عوامل بیماری‌زای میکروبی باقیمانده، میزان آلودگی رادیواکتیو باقی‌مانده در آلاینده‌ها (ت.ت.۸,۱)

۹. تأثیر پرتودهی بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی پسماند فاضلاب شهری (ت.ت.۹,۱)

سرفصل‌های پژوهشی مرتبط با کاربرد تکنولوژی هسته‌ای در تصفیه سیستم‌های آبی عبارت‌اند از:

۱. بررسی دز استاندارد جهت تصفیه سیستم‌های آبی با شتاب‌دهنده الکترونی و چشمه‌های گاما (ت.ت.۱,۲)

۲. بررسی کاربرد روش باریکه الکترونی در کنار تصفیه بیولوژیکی بر افزایش کارایی سیستم تصفیه (ت.ت.۲,۲)

۳. بررسی مدت‌زمان و آهنگ جریان در سیستم‌های تصفیه با باریکه الکترونی و چشمه‌های گاما (ت.ت.۳,۲)

۴. بررسی اثر دز باریکه الکترونی بر حذف فلزات سنگین از فاضلاب و پسماندهای صنعتی (ت.ت.۴,۲)

۵. تعیین میزان عوامل بیماری‌زای میکروبی باقیمانده، میزان آلودگی رادیواکتیو باقی‌مانده در سیستم‌های آبی و محصولات ناخواسته گندزدایی و بررسی رشد مجدد عوامل بیماری‌زا (ت.ت.۵,۱)

۶. تأثیر پرتودهی بر ویژگی های فیزیکی و شیمیایی پساب فاضلاب شهری مانند pH ،کدورت، میزان فسفات کل، نیتروژن کل ، آمونیوم و نیترات قبل و بعد از تصفیه با شتاب‌دهنده الکترونی و یا چشمه‌های گاما (ت.ت.۶,۱).

سرفصل‌های پژوهشی مرتبط با کاربرد تکنولوژی هسته‌ای در تصفیه سیستم‌های گازی عبارت‌اند از:

۱. بررسی کارایی حذف SO_X و NO_X از آلاینده‌های گازی با استفاده از باریکه الکترون (ت.ت.۱,۳)

۲. بررسی پارامترهای محیطی نظیر دما و فشار بر کارایی حذف آلاینده‌ها حین پرتودهی با باریکه الکترونی (ت.ت.۲,۳)

۳. بررسی دز استاندارد جهت حذف مؤثر آلاینده‌های گازی در سیستم‌های تصفیه مبتنی بر باریکه‌های الکترونی (ت.ت.۳,۳)

۴. بررسی اثر غلظت ورودی آلاینده‌ها بر کارایی حذف (ت.ت.۴,۳)

۵. بررسی حجم مؤثر و ظرفیت سیستم‌های تصفیه گازی مبتنی بر تکنولوژی هسته‌ای (ت.ت.۵,۳)

۶. بررسی آهنگ جریان باریکه و سایر پارامترهای فیزیکی و شیمیایی مؤثر در حذف آلاینده‌های گازی (ت.ت.۶,۳)

۷. تعیین ابعاد سیستم‌های پرتودهی در تصفیه آلاینده‌های گازی (ت.ت.۷,۳)

بحث و نتیجه‌گیری

در این مقاله نقشه راه کاربرد تکنولوژی هسته‌ای مطابق با اطلاعات استخراج شده در مقالات و متون مرتبط ترسیم شد (شکل ۱). برای این کار ابتدا بازار و بخش‌های آن بررسی و تعیین شد. در این مرحله گروه بزرگی از کاربران سیستم‌های تصفیه شامل (نیروگاه‌های با سوخت زغال‌سنگ، دودکش‌های نیروگاه‌های برق فسیلی، کوره‌های زباله‌سوز جامد شهری، بیمارستان‌ها، صنایع شیمیایی، پتروشیمی و فلزات) به‌عنوان مهم‌ترین بازار برای سیستم‌های پیشرفته تصفیه تعیین شد. اولویت‌دهی بازارها با توجه به برآورد میزان اهمیت و سهم آن‌ها در آلودگی در کشور و با توجه به مسیر دستیابی به تکنولوژی‌ها و کسب تجارب، تعیین شد.

از نظر میزان اهمیت و سهم آلودگی، همان‌طور که در بخش قبل اشاره شد، انتشار وسیع آلاینده‌های گازی یک بحران جهانی محسوب می‌شود و به‌تبع آن آلودگی هوا ناشی از ذرات معلق و سایر آلاینده‌ها به معضل جهانی تبدیل شده است. مسئله امنیت آب نیز در آینده نزدیک به اولویت اصلی ملی در بسیاری از مناطق جهان تبدیل خواهد شد؛ از طرفی با افزایش جمعیت، تولید حجم بسیار زیاد پسماند شهری، یک بحران زیست‌محیطی تلقی می‌شود. بنابراین به لحاظ اهمیت هر سه آلاینده‌های گازی، مایع و جامد در کشور ما دارای اولویت است که نیاز به توسعه تکنولوژی‌های پیشرفته‌ای

جهت کنترل منابع آلاینده وجود دارد. بنابراین پرداختن به اولویت‌دهی را از دیدگاه تکنولوژی بررسی می‌کنیم.

همان‌طور که در بخش قبل اشاره شد، تکنولوژی‌های راهبردی مبتنی بر شتاب‌دهنده‌های الکترونی و سامانه‌های پرتودهی (چشمه کبالت-۶۰) در تأسیسات تصفیه سیستم‌های گازی، جامد و مایع استفاده می‌شوند. هم‌اکنون ایران دارای سه سامانه پرتودهی با چشمه گاما در تهران، شهرکرد و بناب و دو سامانه پرتودهی با شتاب‌دهنده الکترونی در یزد و قزوین و یک سامانه پرتودهی قابل‌حمل با چشمه گاما است (۲۲). در کشور ما، از نظر مسیر دستیابی به تکنولوژی‌ها، با توجه به تجربه ساخت شتاب‌دهنده‌های الکترونی توان متوسط توسط متخصصان داخلی و بهره‌برداری از سامانه‌های پرتودهی (چشمه کبالت-۶۰)، امکان بهره‌گیری از هر دو تکنولوژی وجود دارد که انتخاب باید با توجه به امکان اقتصادی و نیز نوع سیستم تصفیه بهره-بردار (مایع، جامد یا گازی) صورت گیرد.

اجرای پروژه‌های تحقیقات و توسعه آزمایشگاهی معمولاً به دلیل سهولت انجام، با استفاده از سامانه‌های پرتودهی (چشمه کبالت-۶۰) انجام می‌شود و در مقیاس صنعتی در سیستم‌های تصفیه آلاینده‌های حالت‌جامد (لجن) از پرتو گاما استفاده می-شود و به لحاظ اقتصادی با هزینه و زمان کمتری قابلیت عملیاتی شدن و نصب در یک تصفیه‌خانه معمولی را دارند، لذا بر این اساس اولویت بازار و تولید محصولات در سه سال اولیه بر سیستم‌های تصفیه حالت‌جامد متمرکز می‌گردد. در ادامه مسیر، با کسب تجارب لازم، امکان انتقال تکنولوژی به سیستم تصفیه بهره‌بردار (مایع و گاز) فراهم می‌گردد و در سه سال دوم بر سیستم‌های آبی و در سه سال پایانی بر سیستم‌های گازی متمرکز می‌شود.

مطابق نقشه راه تبیین شده در این مقاله، برای بکار گیری تکنولوژی هسته‌ای در صنعت پسماند، می‌توان مراحل تحقیق و توسعه و مطالعات مقدماتی را با امکانات موجود در کشور که شامل سامانه‌های پرتودهی با چشمه کبالت۶۰ در تهران، شهرکرد و بناب و سامانه پرتودهی با شتاب‌دهنده الکترونی در یزد انجام داد. تاکنون گزارش‌های پراکنده و محدودی درزمینهٔ تکنولوژی هسته‌ای در سیستم‌های تصفیه مایع، جامد و گاز انجام شده (۲۶-۲۳) که نیاز به تحقیقات منسجم و هدفمند با همکاری گروه‌های پژوهشی مختلف از رشته محیط‌زیست و مهندسی هسته‌ای ضروری است.

بعد از مطالعات مقدماتی، می‌توان مرحله فناوری را با در نظر گرفتن مسائل اقتصادی اجرا کرد. بحث نصب دستگاه‌های شتاب‌دهنده به‌صورت پایلوت و صنعتی در تصفیه‌خانه‌ها از دو روش، امکان‌پذیر است: ۱) انتقال تکنولوژی؛ ۲) تحقیق و توسعه درون‌سازمانی. برخی از روش‌های امکان‌پذیر انتقال و توسعه فناوری دستگاه‌های مولد پرتو به‌منظور پاسخگویی به نیازهای داخل کشور، عبارت است از (۲۷): خرید حق لیسانس، سرمایه‌گذاری مستقیم خارجی، سرمایه‌گذاری و تحقیق و توسعه مشترک با کشورهای صاحب تکنولوژی.

در بخش محصول، سه دسته محصول- سیستم‌های تصفیه جامد، مایع و گازی- جهت نصب در کارخانه‌ها معرفی می‌گردد. درنهایت با کسب دانش فنی سیستم‌های تصفیه مبتنی بر باریکه‌های الکترونی و یا چشمه‌های گاما در هر یک از حوزه‌های سه‌گانه سیستم‌های تصفیه بازار مناسبی در هر یک از حوزه‌ها قابل دسترسی است.

نتایج مطالعات نشان می‌دهد کاربرد پرتوها در حذف آلاینده‌های مختلف تکنولوژی روز دنیا، سازگار با محیط‌زیست و به لحاظ اقتصادی مقرون‌به‌صرفه است. در کشور ما تاکنون در مورد تجاری کردن تصفیه سیستم‌های مختلف با استفاده از تکنولوژی هسته‌ای گزارشی ارائه نشده است و تنها چند مورد گزارش تحقیقاتی به چشم می‌خورد. دستیابی به سامانه‌های نوین تصفیه مبتنی بر تکنولوژی هسته‌ای با ایجاد سامانه‌های جدید پرتودهی، راهنمایی، مشاوره و آموزش کارفرمایان از طرق مختلف مانند پروژه‌های تحقیقاتی هماهنگ آژانس بین‌المللی انرژی هسته‌ای که مکانیسمی را برای گرد هم آوردن محققان از مؤسسات کشورهای توسعه‌یافته و درحال‌توسعه برای همکاری در یک موضوع خاص تحقیق و تبادل و انتقال دانش در استفاده از تکنیک‌های هسته‌ای برای کاربردهای مختلف صلح‌آمیز فراهم می‌کند، امکان‌پذیر است. کشور ما با پیشرفت در حوزه کاربردهای صلح‌آمیز فناوری هسته‌ای در محیط‌زیست، نه‌تنها می‌تواند نیاز داخلی را مرتفع نماید بلکه می‌تواند در آینده

نزدیک بـه بـازار صـادرات صـنعت هسـته‌ای وارد شـود. بـازاری انحصاری و پرسود که در دست کشورهای بزرگ بوده است.

تشکر و قدردانی

این پژوهش با حمایت مرکـز تحقیقـات سیاسـت علمـی کشـور انجام شده است. لذا نویسندگان مراتب قدردانی خـود را از ایـن نهاد محترم اعلام می‌دارد.

References

1. Phaal R, Farrukh CJ, Probert DR. Technology roadmapping—A planning framework for evolution and revolution. Technological forecasting and social change. 2004 Jan 1;71(1-2):5-26.
2. Houssin D, Dujardin T, Cameron R, Tam C, Paillere H, Baroni M, Bromhead A, Baritaud M, Cometto M, Gaghen R, Herzog A. Technology Road-map-Nuclear Energy. Organisation for Economic Co-Operation and Development; 2015.
3. Ahmadi A, Ghazinoory S, Ahmadi SJ, Soltani B, Saghafi F, Mohseni N. R&D Planning of Thorium Fuel Pellets Fabrication Using Technology Roadmapping Technique. JOURNAL OF NUCLEAR SCIENCE AND TECHNOLOGY. 2018 Jan 1;83:46-61.
4. Heidrich B, Pimblott SM, Was GS, Zinkle S. Roadmap for the application of ion beam technologies to the challenges of nuclear energy technologies. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. 2019 Feb 15;441:41-5.
5. Lee T. From nuclear energy developmental state to energy transition in South Korea: The role of the political epistemic community. Environmental Policy and Governance. 2021 Mar;31(2):82-93.
6. Sekimoto H. Nuclear Power Generation. InEnergy Technology Roadmaps of Japan 2016 (pp. 257-268). Springer.
7. Sinha RK, Kakodkar A. The road map for a future Indian nuclear energy system. 2003.
8. Chmielewski AG. Electron accelerators for environmental protection. Reviews of Accelerator Science and Technology. 2011;4(01):147-59.
9. Chmielewski AG. Industrial applications of electron beam flue gas treatment—From laboratory to the practice. Radiation Physics and Chemistry. 2007 Aug 1;76(8-9):1480-4.
10. Maezawa A, Izutsu M. Application of e-beam treatment to flue gas cleanup in Japan. InNon-Thermal Plasma Techniques for Pollution Control 1993 (pp. 47-54). Springer, Berlin, Heidelberg.
11. Dhuley RC, Gonin I, Kazakov S, Khabiboulline T, Sukhanov A, Yakovlev V, Saini A, Solyak N, Sauers A, Thangaraj JC, Zeller K. Design of a 10 MeV, 1000 kW average power electron-beam accelerator for wastewater treatment applications. Physical Review Accelerators and Beams. 2022 Apr 21;25(4):041601.
12. Sampa MH, Takacs E, Gehringer P, Rela PR, Ramirez T, Amro H, Trojanowicz M, Botelho ML, Han B, Solpan D, Cooper WJ. Remediation of polluted waters and wastewater by radiation processing. Nukleonika. 2007;52(4):137-44.
13. Kurucz CN, Waite TD, Cooper WJ. The Miami electron beam research facility: a large scale wastewater treatment

application. Radiation Physics and Chemistry. 1995 Feb 1;45(2):299-308.

14. Ponomarev AV. High-speed electron-beam water treatment: A technological consideration. Radiation Physics and Chemistry. 2020 Jul 1;172:108812.
15. Wang J, Wang J. Application of radiation technology to sewage sludge processing: a review. Journal of Hazardous Materials. 2007 May 8;143(1-2):2-7.
16. Aleev AA, Ivanov SV, Kozlov VA, Kuibeda RP, Kulevoy TV, Rogozhkin SV, Semennikov AI, Sharkov BY, Zaluzhny AG. International Topical Meeting on Nuclear Research Applications and Utilization of Accelerators, Vienna, Austria, 4-8 May.
17. He S. Innovative solutions for wastewater treatment: case of China. InIAEA technical cooperation programme: sixty years and beyond-contributing to development. Proceedings of an international conference. Companion CD-ROM 2018.
18. Han B, Kim JK, Kim Y, Choi JS, Jeong KY. Operation of industrial-scale electron beam wastewater treatment plant. Radiation Physics and Chemistry. 2012 Sep 1;81(9):1475-8.
19. Lainetti FD. Development of the architectural design of a mobile electron beam accelerator unit of IPEN for the treatment of industrial effluents.
20. Kim Y, Han B, Kim JK, Jeong KY. Cost assessment of e-beam wastewater treatment. InProceeding Series: International Topical Meeting on Nuclear Research Applications and Utilization of Sccelerators. Vienna 2009 May (4-8).
21. Meeroff DE, Bloetscher F, Shaha B. Economics of wastewater/biosolids treatment by electron beam technology. Radiation Physics and Chemistry. 2020 Mar 1;168:108541.
22. Portal of the Atomic Energy Organization of Iran, Radiation Application Development Company (aeoi.org.ir)
23. Behjat A, Mozahheb SA, Khalili MB, Vakhshoor B, Zareshaei H, Fallahzadeh M. Advanced oxidation treatment of drinking water and wastewater using high-energy electron beam irradiation. Journal of Water and Wastewater; 2007 Mar 1;18(1):60-8. (In Persian)
24. Hashemi H, Amin MM, Bina B, Abdellahi M, Hatamzadeh M. Disinfection of water and wastewater using gamma irradiation in Isfahan water and wastewater treatment plants. J Water Wastewater. 2010;4:28-32.
25. Madah AH, Khodadadi M, Khoramipour S. Comparison of gamma ray and ultraviolet radiation on regrowth control of microorganism in urban sewage effluent. J. Env. Sci. Tech. 2020; 22(7): 287-300. (In Persian)
26. Betesho R, Ghotbikohan K, Nabardi F, Rafiee R. A Study on the Effect of Gamma Rays on Reducing the Burden of Some Pathogens in Sewage Sludge. J. of Nucl Sci. and Tech. 2017; 37(4): 24-33. (In Persian)
27. Conceptual study of technology transfer and case study of the implementation of this process in the Surge Arrester system, Pardis Technology Park, No. 22. (In Persian)