

بررسی فن آوری های نوین ذرات نانو در مهندسی محیط زیست (تصفیه آب و فاضلاب)

بیثا آیتی، استادیار بخش مهندسی عمران - مهندسی محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران *

محمد دلنواز، دانشجوی کارشناسی ارشد عمران - مهندسی محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران **

سمیرا فرتوس، دانشجوی کارشناسی ارشد عمران - مهندسی محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

* تلفن تماس: ۰۲۱-۸۸۰۱۱۰۰۱ نمابر: ۰۲۱-۸۸۰۰۶۵۴۴ پست الکترونیکی: ayati_bi@modares.ac.ir

** تلفن تماس: ۰۹۱۲۲۸۱۲۱۷۴ آدرس پست الکترونیکی: mdelnavaz@modares.ac.ir

چکیده

با توجه به توانمندی های فراوان فن آوری نانو در حذف و کنترل آلودگی های محیطی و تصفیه و جلوگیری از انتشار آنها می توان آن را به عنوان یک تکنولوژی سبز و ابزاری موثر برای دستیابی به توسعه پایدار در نظر گرفت. ورود این فناوری به عرصه مهندسی محیط زیست و استفاده کاربردی از آن بالاخص در زمینه های تصفیه آب و فاضلاب و ایجاد شرایط لازم برای استفاده مجدد از پساب های تصفیه شده با توجه به قرار گرفتن کشور در شرایط بحران آب امری ضروری است. لذا در این مقاله، کاربردهای ذرات نانو مقیاس در تصفیه آب برای حذف رنگ، آرسنیک، نیترات، مواد آلی و فلزات سنگین و نیز حذف آلاینده های خاص از فاضلاب به کمک نانو سرامیک ها و حذف آلاینده های نفتی پساب های صنعتی توسط نانو ذرات اکسید تیتانیم و استفاده از نانو تیوپ ها برای ردیابی آلودگی پساب ها مورد بررسی قرار گرفته است.

کلید واژه ها: نانو، آب، فاضلاب، آلاینده.

۱- مقدمه

امروزه در دنیا از فناوری نانو به عنوان یک تکنولوژی کلیدی و تاثیر گذار بر علم و صنعت یاد می شود. بسیاری از کشورهای توسعه یافته و در حال توسعه (در حدود ۳۰ کشور)، برنامه هایی را در سطح ملی برای پشتیبانی از فعالیتهای تحقیقاتی و صنعتی این فن آوری تدوین و اجرا می نمایند. زیرا فن آوری نانو به عنوان انقلابی در شرف وقوع، آینده اقتصادی کشورها و جایگاه آنها در جهان را تحت تأثیر جدی قرار خواهد داد و این مساله توسط صاحب نظران و محققان تبیین شده و برای مدیران اجرایی به صورت یک امر شفاف و قطعی درآمده است. در بخشی از این کشورها، در یکی دو سال اخیر اقدامات قابل توجهی از طرف دولتها

برای سرعت بخشیدن به توسعه فن آوری نانو صورت گرفته و فعالیتهایی که تا قبل از این به صورت خودجوش توسط محققان انجام می گرفته است، با تشویق و حمایت های مستقیم دولت ادامه یافته اند [۱].

معیار توسعه پایدار به عنوان راهکار اساسی برای توسعه جوامع در زمینه های مختلف مد نظر تمامی کشورهای پیشرفته قرار گرفته، از این رو استفاده از فناوری های نوین با راندمان بالاتر، زمان و هزینه کمتر امری ضروری است. فناوری نانو به دلیل قابلیت بالای خود در تعیین و کنترل محدوده وسیعی از منابع آلوده کننده تاثیر قابل ملاحظه ای در ایجاد و رفع مسائل زیست محیطی دارد. از طرفی نیز این فناوری، پتانسیل لازم جهت کمینه کردن مواد زائد در تولید محصولات و رفع منابع آلوده کننده موجود در آب و هوا را دارا می باشد. حذف آلاینده های کمتر از ۳۰۰ نانو متر از آب و کمتر از ۲۰ نانومتر از هوا و اندازه گیری پیوسته و کاهش آلاینده ها در محدوده وسیعی از محیط زیست از دیگر توانایی های این فناوری است [۲].

۲- تاریخچه فناوری نانو

چهل و پنج سال پیش Feynman، متخصص کوانتوم نظری و دارنده جایزه نوبل، درسخرانی معروف خود در سال ۱۹۵۹ با عنوان "آن پایین فضای بسیاری هست There is plenty of room in the bottom" به بررسی بعد رشد نیافته علم مواد پرداخت [۳].

Feynman در ذهن خود یک "دکتر مولکولی" تصور کرد که صدها بار از یک سلول منحصربه فرد کوچکتر است و می تواند به بدن انسان تزریق شود و درون بدن برای انجام کاری یا مطالعه و تایید سلامتی سلولها و یا انجام اعمال ترمیمی و به طور کلی برای نگهداری بدن در سلامت کامل به سیر پردازد. از آن تاریخ به بعد با ساخت میکروسکوپ های قوی، جنبه های ناشناخته این علم برای استفاده در بخش های مختلف علمی و صنعتی مورد استفاده قرار گرفته است [۲].

فناوری نانو به معنای ساخت اتم ها یا مولکول ها جهت تولید مواد، دستگاه ها و تکنولوژی های جدید است. به عبارت دیگر فناوری نانو، ساخت مواد در مقیاس نانو، اتم در مقیاس اتم و مولکول توسط مولکول می باشد. اصل اساسی فناوری نانو این است که به جای کاهش ماده به کوچکترین ذره ممکن برای انجام کار، کوچکترین ذره ممکن از ماده استخراج شود [۴].

فناوری نانو (علم یا هنر ساختن مواد در مقیاس مولکول یا اتم) پتانسیل بالقوه ای در تغییر و تحول هر چیزی در محیط را دارد. از این رو کاربرد آن در حوزه های مختلف غذا، دارو، تشخیص پزشکی و بیوتکنولوژی، الکترونیک، کامپیوتر، ارتباطات، حمل و نقل، انرژی، مواد، هوا، امنیت ملی و محیط زیست افزایش چشمگیری داشته است.

۳- کاربرد فن آوری نانو در تصفیه آب

علیرغم اینکه حدود ۲/۳ سطح زمین را آب پوشانده است اما امروزه مسئله بحران آب در جوامع انسانی وجود دارد. با افزایش جمعیت جهان و نیز مصرف آب آشامیدنی بیشتر از یک سو و آلوده شدن بخش قابل ملاحظه ای از آب از سوی دیگر، منابع آب قابل شرب با شتاب بیشتری کاهش می یابد. بر اساس پیش بینی سازمان ملل در سال ۲۰۲۵ حدود ۴۸ کشور (یعنی ۳۲ درصد جمعیت جهان) دچار کمبود آب آشامیدنی خواهند شد [۶]. در ارائه راه حل برای این مسئله، فن آوری نانو در دو عرصه می تواند سودمند باشد:

✓ با تولید نانو کامپوزیت ها و دخل و تصرف در ساختار آنها برای جداسازی بسیاری از منابع آلاینده آب که به عنوان نمونه پژوهش های انجام شده در این عرصه حاکی از حذف فلزات سنگین از جمله جیوه، سرب و آرسنیک می باشد.

✓ تولید الکترودهای با مساحت سطحی بسیار بالا که از طریق کنار هم قرار دادن نانولوله های کربنی و دیگر ابتکارات طراحی که رسانای الکتریکی شده اند و قادرند نسبت به تامین آب شرب از دریا با مصرف انرژی کمتر (به میزان حداقل ۱۰ برابر کمتر از انرژی دستگاه اسمز معکوس و ۱۰۰ برابر کمتر از روش تقطیر) آب دریا را نمک زدایی و آب شرب لازم را تامین نمایند [۶].

۳-۱- حذف آرسنیک

آرسنیک در اثر انحلال مواد معدنی موجود در سنگ ها و خاک هایی که تحت تاثیر عوامل فرساینده طبیعی قرار گرفته اند در لایه های زمین پخش می گردد. این ماده بی بو، بی مزه و بسیار سمی و سرطان زا می باشد که استفاده دراز مدت از آب آلوده به آن باعث ایجاد سرطان های پوستی، لنفاوی، کلیوی، صفراوی و ریوی می شود. حد مجاز آرسنیک مطابق استاندارد WHO برابر 0.01 mg / lit می باشد در حالیکه طبق آمار، چاه های شخصی بیش از ۱۴ میلیون خانه در آمریکا بیش از حد مجاز ذکر شده آلوده می باشند. بنابراین کاربرد فن آوری های جدید برای حذف این عنصر از آب های آشامیدنی حائز اهمیت است که در زیر بطور مثال به دو نمونه اشاره می شود:

۱- اختراع جدید موسوم به ArsenXnp کارایی و راندمان بالایی در حذف آرسنیک نشان داده است. این اختراع در حقیقت یک رزین مبادله یونی است که در راستای تکمیل رزین های انتخابگر جهت تصفیه آب های زیر زمینی از یون های نیترات، پرکلرات و کروم شش ظرفیتی ساخته شده است. از مهم ترین امتیازات ArsenXnp، انتخابگری بالای آن برای یون آرسنیک است که پلیمر های پایه آن برای دوام و بقا نیاز به شستشو ندارند. به عبارت دیگر این محصول عمر طولانی و کاربرد بسیار ساده ای دارد. این فناوری

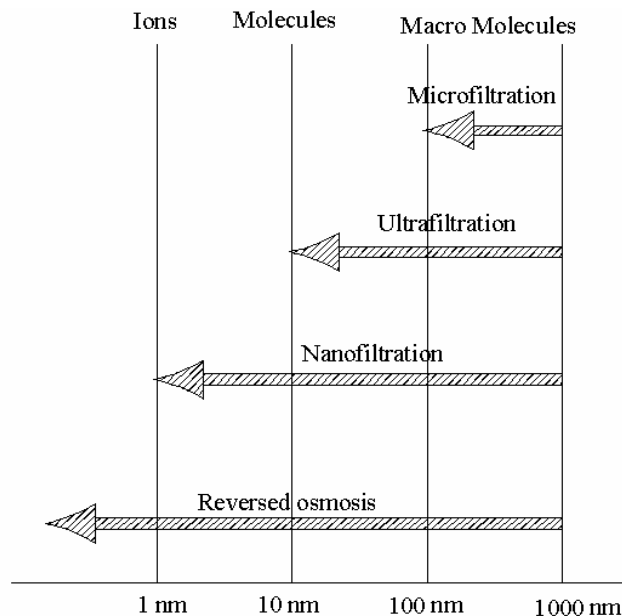
علاوه بر حذف آرسنیک از آب آشامیدنی، جهت حذف آرسنیک از پساب های صنایع نیمه هادی و آب های استفاده شده در برج های خنک کننده نیز کاربرد دارد [۷].

۲- در تحقیقات اخیر دانشمندان، برای حذف آرسنیک از آب از نانو ذرات اکسید روی استفاده شده است زیرا اکسید روی توده ای نمی تواند آرسنیک را جذب نماید در حالیکه نانو ذرات خواص کاتالیستی و جذبی مفیدی را از خود نشان داده اند. البته استفاده از آنها به طور صنعتی با مشکلاتی همراه بوده است به نحوی که این مواد در ستون آب یا به سادگی معلق می شوند و یا هر فیلتری را که در مسیر حرکت آنها قرار گرفته باشد مسدود می کنند. بنابراین روش های جدید برای ساخت توده های نانو ذره ای هم اندازه و هم شکل رشته های رزینی را پیدا کرده اند. محققین برای ایجاد این توده ها، رزین های تبادل کاتیون را با یون های روی پر کردند، سپس آنها را سوزاندند: در نتیجه گوی هایی از نانو ذرات کروی دی اکسید روی با قابلیت بالای حذف آرسنیک بوجود آمدند. این فرآیند همچنین می تواند برای ایجاد توده های نانو ذرات سولفید فلزی و اکسید فلزی به منظور استفاده در کاربرد های کاتالیستی، تصفیه آب و رفع آلودگی ها به کار رود [۸].

۳-۲- حذف ذرات

نانوفیلتراسیون یکی از کاربردهای مهم فن آوری نانو است که امکان جداسازی ذرات را از آب در مقیاس نانو و تولید آب تصفیه شده در حجم انبوه را فراهم می سازد. با استفاده از نانوفیلترها، مواد معدنی لازم برای سلامتی انسان، در آب باقی می ماند و مواد سمی و مضر از آن حذف می شود. با توجه به این که پنجاه درصد آب های زیرزمینی و هفتاد و هشت درصد آب رودخانه ها در مناطق شهری، غیر قابل شرب است، کاربرد این فناوری برای تصفیه آب، طرفداران زیادی دارد. تحقیقات در چین نشان داده است که با مصرف آب حاصل از نانوفیلترها در مدت طولانی، شیوع بیماری های " قلبی و عروقی " و " سرطان " به ترتیب به میزان چهل و بیست درصد کاهش یافته است [۹].

فیلترها براساس اندازه منافذشان به سه دسته میکروفیلترها، اولترافیلترها و نانوفیلترها (شکل ۱) دسته بندی می شوند. نانوفیلتراسیون در اصل فیلتراسیون با فشار پایین تر از اسمز معکوس است، بنابراین قیمت تمام شده نانوفیلترها و انرژی مصرفی کمتر می باشد.



شکل ۱: دسته بندی انواع فیلترها بر اساس منافذ [۱۰]

نوع خاصی از این فیلترها که در شرایط نظامی برای حذف آلودگی های شیمیایی از آب بکار می رود تقریباً مانند قاب نگهدارنده CD با قطر ۵ اینچ و ضخامت ۱ اینچ است. آب از طریق یک لوله از پایین وارد فیلتر از جنس نانو لوله کربنی و پس از تصفیه توسط یک لوله دیگر از بالا خارج می شود. این نانو فیلترها قادرند از عبور ذرات کوچک مولکول های گاز در حملات شیمیایی در جنگ ها ممانعت نمایند [۱۱].

به کمک فناوری جدید در فیلترهای هوشمند، هر مولکول نسبت به محیط اطراف خود واکنش نشان داده و با مولکول های دیگر ارتباط برقرار کرده و تبادل اطلاعات می نماید و در مجموع نتیجه دلخواه به دست می آید. تقریباً حدود ۶۵٪ از بازار مصرف نانوفیلتراسیون مربوط به شیرین کردن آب، ۲۵٪ مربوط به صنایع غذایی (در تولید لبنیات) و کمتر از ۱۰٪ مربوط به صنایع شیمیایی می باشد [۲].

۳-۳- حذف رنگ

رنگ موجود در آب آشامیدنی نه تنها به خاطر ظاهر آن باید زدوده شود، بلکه چون این رنگ ها می توانند منشأ تولید تری هالو متان ها مانند (CHCl_3) نیز باشند، خطرناک محسوب می شوند. این ماده هنگام ترکیب با کلر موجب تشکیل کلروفرم و دیگر ترکیبات هالوژنه مضر و سرطان زا می شود. رنگ موجود در آب طبیعی معمولاً ناشی از وجود اسیدهای معدنی با جرم مولکولی $800-50000 \text{ gr/mol}$ است. اسیدهای مذکور در اثر تجزیه مواد آلی موجود در آب حاصل می شوند. اغلب روش های متداول برای تصفیه آب قادر

به جداسازی مواد فوق نیستند، لیکن با استفاده از غشاهای نانو می توان تا ۹۹ درصد این گونه مواد را به سهولت از آب جدا کرد [۱۲].

۳-۴- حذف نیترات

استفاده از $4\text{g} / \text{lit}$ نانوذرات آهن با قطر $100\text{nm} - 10\text{nm}$ (متوسط 25nm) و سطح ویژه $31\text{ m}^2/\text{g}$ در حذف نیترات از محیط های آبی، راندمان حذف بسیار بالایی داشته بطوری که غلظت های اولیه $300-50$ میلیگرم بر لیتر در طی 3 ساعت به $5-4$ میلیگرم بر لیتر رسیده است. در این فرایند pH به عنوان پارامتری اساسی، احیاء نیترات را کنترل کرده بطوریکه در $\text{pH} < 4/5$ طی 3 ساعت تغییری در غلظت نیترات مشاهده نشده است. کنترل pH با تزریق اسید در طی واکنش در محدوده $4-2$ باعث افزایش سرعت و راندمان واکنش می شود [۱۳].

۳-۵- حذف فلزات سنگین و مواد آلی

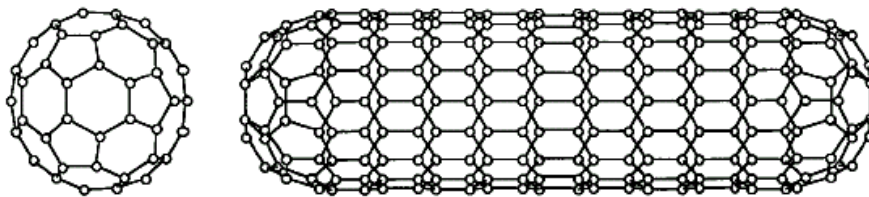
نانو ذرات TiO_2 برای اکسید کردن آلاینده های آلی و به صورت دام های نانو مقیاس برای جذب فلزات سنگین در مکان های آلوده مورد استفاده قرار می گیرند. در حالات ذکر شده این ذرات می توانند عامل اکساینده باشند و تولید آب یا دی اکسید کربن می کنند. مطالعات اخیر نشان می دهد که از TiO_2 در مقیاس نانو می توان برای رفع آلاینده ها، ویروس ها و مواد شیمیایی آلی خطرناک استفاده کرد. ذرات نانو با سطوح مناسب (لیگاند ها و معرف ها) می توانند برای جداسازی فلزات سنگین و برای غیر فعال کردن سطوح آلوده استفاده شوند. بدیهی است که فرآیند های شیمیایی با کارایی بالاتر مواد آلاینده و ضایعات کمتری تولید می کنند [۳].

۴- کاربرد فناوری نانو در تصفیه فاضلابهای شهری و صنعتی

با توجه به مسأله بحران آب که امروزه یکی از مشکلات اساسی اکثر کشورهای توسعه یافته و در حال توسعه است، بی شک با توجهی دوباره به منابع آب آلوده شده، می توان به مقابله با این بحران پرداخت. تصفیه فاضلابهای خانگی و نیز پسابهای صنعتی از دیرباز مورد توجه بشر قرار گرفته است ولی آنچه که فناوری نانو می تواند در اختیار قرار دهد، بهبود کیفیت فاضلاب تصفیه شده برای استفاده مجدد در کشاورزی، کشت آبی، مصارف صنعتی یا حتی شرب و شستشو می باشد. البته در زمینه پیشگیری و تشخیص آلودگی بکمک فناوری نانو نیز تحقیقاتی بعمل آمده که در زیر بطور خلاصه به آن اشاره می شود:

۴-۱- ردیابی و ارزیابی آلودگی

نانو تیوبهای کربنی (شکل ۲)، ساختارهای حلقوی توخالی متشکل از اتم های کربن هستند که می توانند به شکل یک یا چند دیواره آرایش یابند و دارای خواص فلزی یا شبه رسانایی نیز باشند. تحقیقات و پیشرفتهای وسیعی در سطح جهان برای شناسایی کاربردهای نانو تیوبهای کربنی برای مصارف صنعتی در حال انجام است و اخیراً قابلیت استفاده از آنها در کاربردهای زیست محیطی نیز مطرح شده است [۱۴]. نانو تیوبهای کربنی را می توان برای ردیابی آلودگی و نیز ارزیابی احتمالی آلاینده های آبی و جمع آوری و ارائه اطلاعات مربوط به آلاینده های محیط زیست بکار برد. از آنجا که نانو تیوپها مولکولهای غیرقطبی کربن خالص می باشند، با حل شدن در بعضی حلالهای آلی می توانند براحتی توسط گروههای عملکردی متفاوت جهت جفت کردن واکنش و حلالیت آلاینده مشخص، تغییر حالت پیدا کنند و در نتیجه عمل ردیابی آلودگی را امکانپذیر سازند [۱۵].



شکل ۲: نانو تیوبهای کربنی [۱۶]

۴-۲- حذف آلاینده های آلی با استفاده از نانو ذرات TiO_2

نانو ذرات TiO_2 از مهمترین کاتالیست هایی هستند که برای حذف آلودگی های ناشی از مواد آلی موجود در آبهای آلوده به مواد نفتی و نیز پسابهای صنعتی کاربرد دارند. بدین ترتیب که نانو ذرات TiO_2 را روی، زیر لایه های مناسبی پوشش می دهند و در حوضچه هایی تحت تابش نور فرابنفش قرار می دهند. در اثر تابش نور فرابنفش، ماده خاصیت اکسید کنندگی پیدا کرده و مواد آلی را به آب و دی اکسید کربن تبدیل و برخی اسیدهای معدنی را تجزیه می کند. با توجه به آزمایشات بعمل آمده، پساب آلوده به مواد آلی نفتی بعد از ۷ روز کاملاً تجزیه شده است. البته برای بهبود اثربخشی نانو ذرات اکسید تیتانیم می توان از Fe و Er نیز استفاده کرد که بر اثر این تلقیح عمل اکسایش تحت تابش هایی با طول موج بلندتر و بطور ویژه در ناحیه قابل مرئی انجام می شود [۵].

۴-۳- حذف آلاینده‌های آلی با استفاده از نانو ذرات اکسید آهن

ذرات نانومتری اکسید آهن پوشش داده شده با کربن فعال را می‌توان جهت حذف آلاینده‌های آلی موجود در پساب‌های صنعتی و فاضلاب‌های شهری بکار برد. بدین صورت که طی یک فرآیند با فن‌آوری بالا ذرات اکسید آهن را بوسیله کربن فعال پوشش می‌دهند و نیز با اعمال تغییراتی در مرحله تولید کربن فعال از جمله تغییر در مراحل کربونیزاسیون و اکتیواسیون کربن فعال ماده موردنظر را جهت جذب آلاینده‌های خاص تقویت می‌کنند. در نهایت مجموعه ذره الکترومغناطیس پوشش داده شده با کربن فعال به مقدار کافی را به درون حوضچه ایزوله‌ای هدایت می‌کنند و توسط یک مگنت میله‌ای عمل اختلاط فاضلاب را انجام می‌دهند. این مگنت که از یک محور امتداد یافته تا بالای سطح پساب می‌رسد و اتصال الکتریکی آن بگونه‌ای است که قابلیت القای خاصیت مغناطیسی در آن وجود دارد، پس از اختلاط پساب و در تماس قرار گرفتن آن با گونه‌های جاذب، خاصیت مغناطیسی در مگنت القاء می‌شود و به یکباره تمام گونه‌های جاذب از داخل پساب جذب سطح مگنت می‌شوند. در نهایت با خارج کردن و شستن مگنت با حجم اندکی حلال، مواد آلاینده از پساب جداسازی و بطور صحیح دفع می‌شوند [۶].

۵- وضعیت فن‌آوری نانو در ایران

ایران در سال ۲۰۰۴ با داشتن ۵۳ مقاله در زمینه فناوری نانو در رتبه ۴۲ جهان و دوم کشورهای اسلامی قرار داشت، که در سال ۲۰۰۵ با ۱۲۵ مقاله به جایگاه ۳۵ جهان و بالاتر از کشورهایی مانند بلغارستان، اسلواکی، اسلونی و نروژ قرار گرفت. در بین کشورهای اسلامی نیز ایران همچنان در رتبه دوم بعد از ترکیه و بالاتر از کشورهایی مانند مالزی، مصر و تونس قرار دارد. به گزارش مرکز اطلاعات علمی بین‌المللی، در سال ۲۰۰۵ آمریکا با بیش از ۱۱۰۰۰ مقاله در رتبه نخست جهان و کشورهای ژاپن، فرانسه، انگلیس، روسیه و کره جنوبی به ترتیب در رتبه‌های بعدی قرار دارند.

کل بودجه متمرکز تخصیص یافته در کشور برای توسعه فناوری نانو در سال ۸۳، ۵۰ میلیارد ریال بوده است که معادل یک هزارم بودجه‌های متمرکز دولتهای دنیاست [۱۷].

۶- نتیجه‌گیری

با توجه به سیاست‌های تشویقی اعمال شده در دو سال اخیر پیش‌بینی می‌شود ایران اولین کشور در سطح منطقه و در بین کشورهای اسلامی از لحاظ دستیابی به فناوری نانو خواهد بود.

فعالتهای علمی پژوهشی در عرصه مهندسی محیط زیست با طرح دانش فنی و به تولید رساندن جاذبهای ویژه در مقیاس نانومتری توانسته است سهم ارزنده‌ای در حذف آلاینده‌ها داشته باشد. با توجه به اهمیت ویژه

و کلیدی این فن آوری، برخی از کشورها برای کسب رده بعنوان یکی از ده کشور اول دنیا برنامه ده ساله تنظیم کرده‌اند. برنامه های اجرایی در نظر گرفته شده در عرصه فن آوری نانو سبب کاهش ۱۰ درصدی مصرف انرژی در دهه اول هزاره جدید خواهد شد که ارزش آن یک میلیارد دلار برآورد شده است و این میزان کاهش مصرف انرژی، کاهش انتشار آلاینده های زیست محیطی را بدنبال خواهد داشت.

با توجه به توانمندیهای فراوان نانو فن آوری در حذف و کنترل آلودگی های محیطی و تصفیه و جلوگیری از انتشار آنها می توان آنرا بعنوان یک تکنولوژی سبز و ابزار موثری برای دستیابی به توسعه پایدار در نظر گرفت.

۷- منابع و مراجع

[1] <http://www.irannano.org>

[2] <http://www.autnano.org>

[۳] نانوتکنولوژی، انقلاب صنعتی آینده، دفتری همکاری های فن آوری ریاست جمهوری، ۱۳۸۰

[4] <http://www.nanotec.org.uk>

[۵] فضای نانو، نشریه دانشجویی علمی-خبری-تحلیلی، شماره دوم، آذر ۸۴

[۶] اکبری بهروز، بررسی میزان اثربخشی نانوتکنولوژی در شاخه های مختلف بهداشت محیط، هشتمین همایش ملی بهداشت

محیط، بیمارستان امام خمینی، ۱۳۸۴

[7] <http://waterandwastewater.com>

[8] <http://nanotechweb.com>

[9] <http://www.itantwork.org>

[10] <http://smaltimes.com>

[11] <http://www.spillsorb.com>

[12] <http://www.lenntech.com>

[13] <http://www.nanoidea.com>

[14] Sandeep Angihotri, Mark. J. Rood, Application of Nanotubes in the Field of Energy, Illinois university

[۱۵] احمدی آسور اکبر، نقش نانو فناوری در حل مشکلات زیست محیطی، هشتمین همایش ملی بهداشت محیط، بیمارستان

امام خمینی، ۱۳۸۴

16- Cynthia Folsom Murphy, David Allen, Nanotechnology and the environment: Beauty and the beast, University of Texas, October 2004

[۱۷] خبرنامه فناوری نانو، ویژه نامه شماره ۱۰۰، بهمن ۸۴