

# نانو مواد ضد میکروبی برای ضد عفونی سازی آب و کنترل میکروبی آن: کاربرد

## ها و پیامد های بالقوه

### چکیده :

چالش دستیابی به ضد عفونی سازی مناسب بدون تشکیل محصولات ضد عفونی سازی توسط ضد عفونی کننده های شیمیایی سنتی و نیز تقاضای رو به رشد برای تصفیه غیر متمرکز یا نقطه مورد استفاده و سیستم های بازیافت مستلزم فناوری های جدید برای کنترل میکروبی و ضد عفونی سازی می باشد. چندین نانومواد مهندسی شده و طبیعی، ویژگی های ضد میکروبی قوی را از طریق مکانیسم های مختلف نشان می دهد از جمله تولید فتوکاتالیزی گونه های اکسیژن واکنشی که بر اجزای سلول و ویروس ها آسیب می زند ( تیتانیوم اکسید، اکسید روی، فلورول)، آسیب به پوشش باکتری سلول (به عنوان مثال پپتیدها، کیتوزان، کربوکسی فلورون ها، نانولوله های کربنی، نانوذرات نقره (NAG))، قطع انتقال انرژی (به عنوان مثال nAg و نانوذرات آبی فولرین (C60))، و مهار فعالیت آنزیم و سنتز DNA (به عنوان مثال کیتوزان). اگرچه برخی از مواد به عنوان عامل ضد میکروبی در محصولات مصرف کننده استفاده می شود از جمله سیستم های تصفیه خانگی به عنوان عوامل ضد میکروبی، پتانسیل آن ها برای عفونت زدایی یا کنترل میکروبی در تصفیه آب به طور کامل ارزیابی نشده است.

این مقاله مروری بر مکانیسم های آنتی میکروبی نانوذرات مختلف داشته و در مورد نقاط قوت، نقاط ضعف و نیز کاربرد آن ها برای ضد عفونی کردن آب و کنترل خزه ها بحث کرده و بر نیاز های تحقیقاتی برای استفاده از نانومواد جدید برای کاربرد های تصفیه آب تاکید می کند.

کلید واژه ها : نانومواد ، آنتی باکتریال ، اب ، ضد عفونی ، فولرین ، نانولوله ، نانو نقره ، TiO2 ، اکسید روی ، پپتیدها ، کیتوزان ، باکتری ، ویروس ، غشاء

### فهرست موضوعات

1- مقدمه

2- نانومواد آنتی باکتریال: مکانیسم های سمیت میکروبی

1-2 کیتوزان و پپتید های آنتی میکروبی

nAg 2-2

TiO<sub>2</sub> 2.3

2.4. اکسید روی

2.5. فولرن

2.6. نانولوله های کربنی

3. کاربرد های فعلی و بالقوه برای ضد عفونی و کنترل میکروبی

3.1. کیتوزان

TiO<sub>2</sub> 3.2

3.3. فولرینها و مشتقات

3.4. نانولوله های کربنی

3.5. اکسید روی

3.6. ترکیب فن آوری های فعلی با فناوری نانو

3.6.1. افزایش فیلتراسیون غشایی با فناوری نانو

4. محدودیت های فناوری نانو برای تصفیه آب

5. نیازهای پژوهشی مهم

6. جمع بندی

## 1- مقدمه

استفاده از فیلتراسیون شنی و ضد عفونی سازی با استفاده از کلر موجب شد تا بسیاری از بیماری های آبی در جهان توسعه یافته و پیشرفته نسبت به یک قرن پیش از بین برود. با این حال شیوع بیماری های آبی هنوز هم در سطح غیر منتظره ای بالا باقی مانده است. بر طبق داده های بر گرفته از گزارش هفتگی مرکز کنترل بیماری، امراض و مرگ و میر، 155 شیوع و 431.846 مورد بیماری در سیستم های آبی عمومی و فردی از 1991 تا 2000 وجود داشت (بخش شورای شیمی آمریکا 2003). در کل دنیا، بیماری های آبی به یک عامل اصلی مرگ

و میر در بسیاری از کشور های در حال توسعه تبدیل شده است. بر طبق گزارش سازمان بهداشت جهانی 2004، حداقل یک ششم جمعیت دنیا (1.1 میلیارد نفر) به آب ایمن دسترسی ندارند (سازمان بهداشت جهانی 2004). آمار کشته های اسهال حدود 2.2 میلیون نفر در سال است که کودکان زیر 5 سال را نیز در بر می گیرد. در مورد اهمیت ضد عفونی سازی آب و کنترل میکروبی نمی توان اغراق کرد.

اگرچه روش های ضد عفونی سازی مورد استفاده در تصفیه آب قادر به کنترل پاتوژن های میکروبی می باشند، تحقیقات در طی دهه گذشته، به بررسی ضد عفونی سازی موثر و شکل محصولات جانبی حاصل از ضد عفونی (DBP) پرداخته اند. مواد ضد عفونی کننده شیمیایی مورد استفاده توسط صنایع آب نظیر کلر، کلرامین و اوزون با ترکیبات و اجزای مختلف در آب طبیعی واکنش داده و تشکیل محصولات جانبی حاصل از ضد عفونی (DBP) داده اند و بسیاری از آن ها سرطان زا بوده است. بیش از 600 محصولات جانبی حاصل از ضد عفونی (DBP) در منابع گزارش شده است (کراسنر و همکاران 2006). با در نظر گرفتن مکانیسم های تشکیل محصولات جانبی حاصل از ضد عفونی (DBP)، پیش بینی میشود که DBP متشکل از اکسیدان های شیمیایی مورد استفاده در تصفیه آب است (ترسل 1993). به علاوه مقاومت برخی از پاتوژن ها نظیر *Cryptosporidium* و *Giardia* به مواد ضد عفونی شیمیایی نیازمند دوز ضد عفونی بالایی است که منجر به تشکیل محصولات جانبی حاصل از ضد عفونی (DBP) می شوند. از این روی نیاز مبرمی به ارزیابی مجدد روش های ضد عفونی سازی سنتی و در نظر گرفتن رویکرد های نوآورانه در راستای بهبود اطمینان پذیری و تقویت ضد عفونی ضمن اجتناب از تشکیل محصولات جانبی حاصل از ضد عفونی (DBP) وجود دارد.

رشد سریع نانوفناوری موجب شده است تا کاربرد های زیست محیطی نانومواد از اهمیت زیادی برخوردار شود. به ویژه این که، پتانسیل آن برای انقلاب و تحول در فرایند های تصفیه آب سنتی، اخیراً اعلام شده است (USEPA، شانون و همکاران 2008). نانومواد شامل مواد جاذب، کاتالیزور ها و سنسور های عالی به دلیل سطح مقطع بزرگ آن ها و واکنش پذیری بالا هستند. اخیراً، چندین نانومواد طبیعی و مهندسی شده، خواص میکروبی قوی را نشان داده اند از جمله کیتوزان (چی و همکاران، 2004)، نانوذرات نقره (NAG)،  $TiO_2$  فوتوکاتالیستی (مورنز و همکاران، 2005). (چو و همکاران، 2005؛ وی و همکاران، 1994)، نانوذرات آبی فولرین (nC60) (لیون و همکاران، 2006)، و نانولوله های کربنی (CNT) (کانگ و همکاران، 2007). بر خلاف مواد ضد عفونی کننده

شیمیایی سنتی، این نانومواد ضد میکروبی اکسیدان های قوی نمی باشند و در آب نسبتا کم اثر و ساکن هستند. از این روی، انتظار نمی رود که آن ها تولید DBP مضر کنند. در صورتی که آن ها در فرایند های تصفیه استفاده شوند می توانند پتانسیل خوبی برای جایگزینی و یا بهبود روش های ضد عفونی سازی سنتی باشند.

کاربرد بالقوه دیگر نانو مواد آنتی میکروبی، استفاده در سیستم های استفاده مجدد و تصفیه آب غیر متمرکز است. مفهوم سیستم های تصفیه آب غیر متمرکز و توزیع شده، توجه زیادی را در سال های اخیر به دلیل مشکلات مربوط به از دست رفت آب و کاهش کیفیت مربوط به شبکه های توزیع قدیمی و افزایش هزینه های انرژی برای انتقال آب و نیز افزایش نیاز به منابع آبی جایگزین و استفاده مجدد از فاضلاب برای مناطق با کمبود آب و مسائل امنیت ملی، به خود معطوف کرده است (NRC، 2006، عاس 2000). از این روی گفته می شود که نامومواد کارکردی (عاملی)، را می توان برای ایجاد سیستم های با عملکرد بالا، کوچک مقیاس برای افزایش مقاومت و استحکام شبکه های تامین آب، برای سیستم های غیر مرتبط با شبکه مرکزی و برای پاسخ های اورژانسی پس از حوادث نامطلوب استفاده کرد.

این مقاله به مرور مکانیسم های آنتی میکروبی نانومواد مختلف، و کاربرد آن ها در ضد عفونی سازی آب و کنترل میکروبی و نیز محدودیت ها پرداخته و مرور منابعی را برای درک کنترل میکروبی و ضد عفونی سازی مبتنی بر نانوفناوری ارائه می کند.

## 2- نانومواد آنتی میکروبی: مکانیسم های سم زدایی سمیت

نانوذرات آنتی باکتریایی بحث شده در این مقاله در سه مقوله کلی قرار می گیرند: مواد آنتی باکتریایی موجود در طبیعت، اکسید های فلزی و فلزات و نانومواد مهندسی شده جدید. این نانوذرات با سلول های میکروبی از طریق طیف وسیعی از مکانیسم ها فعل و انفعال دارند. مکانیسم های آنتی میکروبی اصلی گزارش شده در منابع در شکل 1 خلاصه شده اند. نانوذرات می توانند به طور مستقیم با سلول های میکروبی فعل و اتفعال داشته باشند برای مثال اختلال در انتقال الکترون غشایی، اختلال و نفوذ در پوشش سلول و اکسید سازی اجزای سلولی و تولید محصولات ثانوی (برای مثال گونه های اکسیژن واکنشی ROS یا یون های فلزات سنگین محلول) که می تواند موجب بروز آسیب و خسارت شود

## 2-1 پتید های آنتی میکروبی و کیتوزان

پتیدهای خاص و کیتین طبیعی، از دیر باز از نظر ویژگی‌های ضد میکروبی خود شناخته شده هستند. اخیراً این مواد به نانوذرات مهندسی شده اند (کی و همکاران 2004، گازیت 2007). آن‌ها دارای کاربرد های ضد عفونی سازی کم هزینه ای به خصوص در کشور های در حال توسعه می باشند. مکانیسم آنتی میکروبی پتید های طبیعی نظیر سکروپین های پروانه ابریشم، تشکل کانال های نانومقیاس در غشای سلول های باکتریایی بوده است که منجر به فروپاشی اسمزی می شود (گازیت 2007). پتید های آنتی میکروبی بر اساس ساختار های پروتین های سنتز شده اند (گدیری و همکاران 1994). توانایی سنتز این پتید ها، امکان ساخت نانو ساختار های آنتی میکروبی را می دهد (گازیت 2007). پتید های مهندسی شده از نظر اندازه، مورفولوژی، پوشش، مشتق سازی و سایر ویژگی های مربوط به کاربرد آنتی میکروبی خاص، بهینه سازی می شوند.

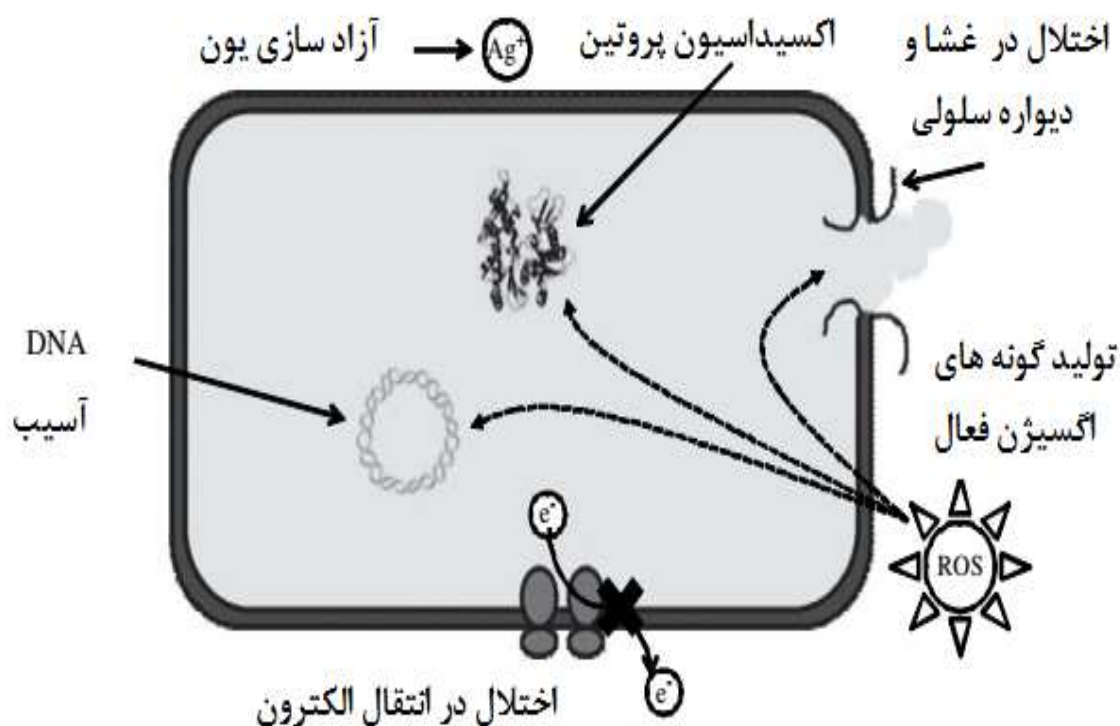
کیتوزان، بدست آمده از کیتین پوسته بند پایان دارای فعالیت آنتی میکروبی بوده است و اخیراً گفته می شود که این پلیمر به صورت نانوذرات تبدیل شده است (کی و همکاران 2004، بی و همکاران 2006). کیتوزان نانومقیاس علاوه بر مشتقات آن، اثرات آنتی میکروبی را بر روی باکتری ها، ویروس ها و قارچ ها نشان داده اند (بادوی و همکاران 2005، کی و همکاران 2004، رابا و همکاران 2003، نو و همکاران 2002، جیرکوف 2002). به این ترتیب کنترل قارچ ها و ویروس ها نسبت به باکتری ها، موثر تر است (رابی و همکاران 2003). در درون باکتری ها، فعالیت آنتی میکروبی کیتوزان، برای باکتری های گرم مثبت بیشتر از باکتری های گرم منفی است (دان و همکاران 2005، نو و همکاران 2002). کیتوزان مانع از انتشار باکتریوفاژ ها در باکتری ها شده و موجب بروز مقاومت به بیماری های ویروسی در گیاهان می شود (چیرکوف و همکاران 2002). طیف وسیعی از غلظت های باز دارنده حداقل MIG از 18 تا 5000 پی پی ام بسته به نوع ارگانسیم، اسیدیتیف وزن مولکولی، درجه بسپارش و حضور لیپید ها و پروتین ها گزارش شده اند (رابی و همکاران 2003، نو و همکاران 2002).

چندین مکانیسم آنتی میکروبی برای کیتوزان گزارش شده اند. یک مکانیسم شامل فعل و انفعال ذرات کیتوزان با بار مثبت با غشای سلول های با بار منفی وجود دارد که منجر به افزایش در تراوایی غشا و نیز شکستگی و نشست اجزای بین سلولی می شود (کی و همکاران 2004). این مسئله با این مشاهده که درشت مولکول های کیتوزان طبیعی و نانوذرات مهندسی شده در مقدار PH بالاتر از 6 به دلیل نبود گروه های آمینی پروتون دار (کی و همکاران 2004) موثر نمی باشند. به همین دلیل، فعالیت های آنتی باکتریایی مشتقات کیتوزان حاوی گروه های

آمونوم کواترنر، نظیر کیتوزان تری متیل N-N-N، کیتوزان دی متیل N- پروپیل N-N-، کیتوزان دی منیل N- فورفوریل-N-N قوی تر از انواع کیتوزان ها بوده و با کاهش اسیدیته، افزایش می یابد (جیا و همکاران 2001). در یک مکانیسم پیشنهادی دیگر، کیتوزان موجب کلاته شدن فلزات کم مصرف شده و در نهایت فعالیت های آنزیمی را متوقف می سازد (رابی و همکاران 2003). در سلول های قارچی، کیتوزان وارد دیواره سلول و هسته شده و با DNA پیوند برقرار کرده و مانع از سنتز RNA می گردد (رابی و همکاران 2003).

## nAg 2-2

خواص آنتی میکروبی ترکیبات نقره و یون های نقره کاملا شناخته شده و در طیف وسیعی از زمینه ها از دستگاه های پزشکی ضد عفونی کننده و وسایل منزل تا تصفیه آب استفاده شده است (بوزتی و همکاران 2002، چو و همکاران 2005، گوپتا و سیلور 1998). با این حال، مکانیسم سمیت به خوبی درک نشده است.



شکل 1: مکانیسم های مختلف فعالیت های آنتی میکروبی اعمال شده توسط نانومواد

یون های نقره با گروه های تیول در پروتئین ها فعل و انفعال داشته و منجر به غیر فعال شدن آنزیم های تنفسی گردیده و در نهایت تولید ROS را باعث می شوند (ماتسومورا و همکاران 2003). نشان داده شده است که یون های نقره مانع از تکرار DNA شده و بر ساختار و تراوایی غشای سلول اثر دارد (فانگ و همکاران 2000). یون

های نقره نیز در حضور اشعه دهی فرابنفش A و C فتو اکتیو بوده و منجر به بهبود غیر فعال سازی باکتری ها و ویروس ها می شود. (کیم و همکاران 2008، راهن و همکاران 1973). فرض کلی بر این است که کمپلکس شدن نقره با سیستمین موجب تسریع فتو دیمیریزاسیون DNA شده و در نهایت یک اثر هم افزایی را در غیر فعال سازی فاژ Haemophilus influenzae (ران و همکاران 1973) و فاژ MS2 (کیم و همکاران 2008) ایجاد می کند. تا کنون، مکانیسم های متعددی برای خواص ضد میکروبی نانوذرات نقره ارائه شده است: 1- چسبندگی نانوذرات به سطح و تغییر خواص غشا. ذرات nAg موجب تجزیه مولکول های لیپو پلی ساکاریدی شده و در درون غشا با تشکیل یک سری حفره ها انباشته شده و منجر به افزایش تراوایی غشا می شود (سوندی و سالپگ و ساندی 2004) 2- ذرات nAg نفوذ کننده به درون سلول باکتریایی منجر به آسیب دی ان ای می شوند 3- انحلال nAg موجب آزاد سازی یون های آنتی میکروبی نقره می شود (مورنز و همکاران 2005).

خواص فیزیوشیمیایی نقش مهمی در فعالیت آنتی میکروبی nAg ایفا می کنند. به طور کلی، ذرات کم تر از 10 نانومتر برای باکتری هایی نظیر ا کولای و نیز *Pseudomonas aeruginosa* سمی تر هستند (زو و همکاران 2004، کوگی و همکاران 2006). نانوذرات نقره از 1 تا 10 نانومتر، مانع از اتصال برخی ویروس ها به سلول های میزبان با اتصال انتخابی به گلیکوپروتین های gp120 ویروس می شوند (الیکوورا و همکاران 2005). به علاوه، نانوپلیت های nAg مثلثی حاوی صفحات واکنشی <111> سمی تر از میله های nAg، کره های nAg و یون های نقره هستند (پال و همکاران 2007).

### 3-2 تیتانیوم اکسید

تیتانیوم اکسید رایج ترین فتوکاتالیزور نیمه رسانا است. در میان نانومواد های مختلف، این رایج ترین و شناخته شده ترین است. تحت تاثیر تابش اشعه فرابنفش A، خواص فتو کاتالیستی در کاربرد های محیطی مختلف برای حذف مواد آلاینده از هر دو آب و هوا استفاده شده است (گلاور و همکاران 2006، میورای و همکاران 2007) ف سلامت و فرمن (2007). طیف وسیعی از اطلاعات در زمینه غیر فعال سازی فتوکالیستی تیتانیوم اکسید باکتری هاف در طی 20 سال اخیر کسب شده است (ماتسونگا و همکاران 1985، وی و همکاران 1994). تیتانیوم اکسید می تواند هر دو باکتری های گرم مثبت و منفی را بکشد، و این در حالی است که باکتری های گرم مثبت حساسیت کمی به دلیل توانایی تشکیل هاگ ها دارند (وی و همکاران 1994).

اخیراً، تیتانیوم اکسید با تندازه نانو موجب کشته شدن ویروس ها از جمله پلی ویروس 1 (واتس و همکاران 1995)، ویروس هیپاتیت ب (زان و همکاران 2007)، ویروس هرپس (هاجکوا و همکاران 2007)، و باکتریوفاژهای MS2 (پو همکاران 2005) شده است. غلظت تیتانیوم اکسید برای کشتن باکتری ها بین 100 و 1000 پی پی است و این بستگی به اندازه ذرات و شدت و طول موج نور مورد استفاده دارد (وی و همکاران 1994)

فعالیت آنتی باکتریایی تیتانیوم اکسید با تولید ROS به خصوص رادیکال های آزاد هیدروکسیل و پروکسید تحت اشعه دهی UV-A از طریق مسیر های اکسایشی و کاهشی همراه است (کیگوچی و همکاران 1997). جذب قوی اشعه UV-A موجب فعال سازی تیتانیوم اکسید تحت تابش خورشید شده و موجب بهبود معنی داری در ضد عفونی سازی خورشیدی می شود. در مطالعه گلوور و همکاران (2006)، غیر فعال سازی کامل کولیفرم های مدفوع، در 15 دقیقه در یک غلظت اولیه  $3000 \text{ cfu}/100 \text{ MI}$  با قرار دادن آب در محفظه های پلاستیکی پوشش دهی شده با تیتانیوم اکسید صورت گرفت، در حالی که همین غیر فعال سازی نیازمند 60 دقیقه با محفظه های بدون پوشش شد. در عین حال همین مطالعه نشان داد که باکتری های در معرض ضد عفونی سازی فتوکاتالیستی تیتانیوم اکسید قادر به خود تعمیر نیستند. با این حال، مرگ و میر باکتریایی در شرایط تاریکی نشان می دهد که سایر مکانیسم های مجهول ممکن است دخیل می باشند (ادامز و همکاران 2006).

یک ویژگی جذاب ضد عفونی سازی فتوکاتالیستی تیتانیوم اکسید، پتانسیل فعال شدن آن از طریق نور مرئی نظیر نور خورشید است. دوپ شدن فلز موجب بهبود جذب نور مرئی توسط تیتانیوم اکسید می شود (انوپو و همکاران 2001، ویلیامسون 1939) و این موجب افزایش فعالیت فتوکاتالیستی تحت اشعه UV می شود (چوی و همکاران 1994، مو و همکاران 1989، دانکوک و همکاران 1981). فلزات نجیب به خصوص نقره، توجه زیادی را به این منظور جلب کرده اند. نقره قادر به برانگیخته سازی نور مرئی توسط تیتانیوم اکسید می شود (سیر یو همکاران 2007). اخیراً، گزارش شده است که دوپینگ تیتانیوم اکسید با بهبود غیر فعال سازی فتوکاتالیستی باکتری ها و ویروس ها همراه است (کیم و همکاران 2006). برای مثال، ردی و همکاران (2007) نشان داده است که یک درصد وزنی نقره  $ag_0$  در تیتانیوم اکسید موجب کاهش زمان واکنش مورد نیاز برای حذف کامل  $10^7 \text{ cfu}/\text{mL E. coli}$  ز 65 تا 16 دقیقه در نور UV-a است.  $Ag(0)$  موجب بهبود فعالیت نوری با تسهیل تفکیک حفره الکترونی و ایجاد سطح مقطع بیشتر برای جذب سطحی می شود (سانگ ساه و همکاران 2004).



سالکفانی و همکاران (1997). جذب نور مرئی توسط پلاسمون های سطح نقره، موجب انتقال الکترون به تیتانیوم اکسید شده و در نهایت منجر به تفکیک بار و فعال سازی از طریق نور مرئی می شود (تیان و تاتسوما 2004، سیری و همکاران 2007). از این روی نقره و تیتانیوم اکسید به عنوان یک ماده فتوکاتالیستی ناشی از واکنش نور و پاسخ نور مرئی می باشد.

## ZnO 4-2

مشابه با تیتانیوم اکسید، روی اکسید در ضد افتاب ها، پوشش ها و رنگ ها به دلیل کارایی جذب اشعه فرابنفش و شفافیت به نور مرئی استفاده می شود (فرانکلین و همکاران 20079). نانوذرت اکسید روی، فعالیتی های آنتی باکتریایی قوی را بر روی یک طیف وسیعی از باکتری ها نشان می دهند (ساوای 2003، ادامز و همکاران 2006، جنز و همکاران 2008، هوانک 2008 الف). مکانیسم آنتی باکتریایی اکسید روی به شدت مورد مطالعه قرار گرفته است. تولید فتوکاتالیستی پروگسید هیدروژن یکی از مکانیسم های اصلی بوده است (ساوای 2003). به علاوه، نفوذ به پوشش سلول و غیر سازمان دهی غشای باکتریایی با نانوذرات اکسید روی در تماس بوده و مانع از رشد باکتریایی می شود (برانیر و همکاران 2006، هوانک و همکاران 2008 الف). با این حال نقش یون های روی ازاد شده از انحلال اکسید روی، هنوز مشخص نیست (فرانکلین و همکاران 2007، ساوای 2003). پیشنهاد شده است که پیوند یون روی به غشای میکرو آرکانیسم ها موجب طولانی تر شدن فاز تاخیر چرخه رشد میکروبی می شود (اتامکا و همکاران 1998). نتایج متناقض در مورد اثر اندازه ذرات بر روی فعالیت ضد باکتریای اکسید روی گزارش شده است. جونز و همکاران 2008، گزارش کرده اند که ذرات کوچک تر اکسید روی سمی تر از ذرات بزرگ تر است، با این حال اثرات غیر مرتبط با اندازه نیز در مطالعه فرانکلین و همکاران 2007 گزارش شده است.

## 5-2 فلورن ها

کشف و توانایی سنتز فلورن ها، یک ماده جدید را با رسانایی الکتریکی بالاتر، مقاومت کششی و خواص نوری و حرارتی منحصر به فرد (کروتو و همکاران 1985، کارتسمر و همکاران 1990) معرفی کرده است. کاربرد های فعلی و آینده متغیر از نانو الکترون ها تا نانوکامپوزیت ها و دارو رسانی است. فلورن ها به شدت در آب نامحلول هستند (هیمن 1994)، با این حال آن ها با مشتق سازی می توانند در آب محلول شوند. چندین مشتق  $C_{60}$  اثرات آنتی باکتریایی نشان داده اند (تساو و همکاران 2002، اسپسیا و همکاران 2007)، با این حال سمیت

بستگی به مشتقات خاص دارد (سایس و همکاران 2007، تانک و همکاران 2007). C60 قادر به تشکیل سوسپانسیون های آبی نانوذرات موسوم به  $nC_{60}$  می باشند (پارتر و همکاران 2005) و دارای اندازه های بسیار بزرگ هستند (برانت و همکاران 2006). نانوذرات  $nC_{60}$  دارای فعالیت آنتی باکتری های با طیف وسیع می باشد (لیون و همکاران 2005، 2006، 2008 الف).

مکانیسم آنتی باکتریایی برای  $nC_{60}$  هنوز مورد بحث است. مطالعاتی که سیتو توکسیته  $nC_{60}$  را در سیستم های یوکاریوتی گزارش کرده اند، سمیت را به تولید ROS نسبت داده اند (ابراسدرتر 2004). با این حال، مطالعات مشاهده کننده  $nC_{60}$  در سیستم های پروکاریوتی نشان داده اند که فعالیت آنتی باکتریایی از طریق اکسیداسیون مستقیم سلول تعدیل می شود (فانگ و همکاران 2007، لیون 2008 ب). این مسئله مشخص نیست که آیا فعالیت آنتی میکروبی ناشی از بقایای حلال الی می باشد یا خیر (برانت و همکاران 2005).

## 2-6 نانولوله های کربنی

نانولوله های کربنی، ورقه های گرافنی می باشند که به شکل لوله در می آیند و توسط نیمی از فلورن پوشش دهی می شوند. آن ها لوله های تک دیواره ای با قطر 1 تا 5 نانومتر و یا لوله های چند دیواره ای با طول متغیر از 100 نانومتر تا بیش از چند ده میکرومتر هستند. مطالعات سمیت بر روی نانولوله های کربنی نشان داده است که آن ها دارای سمیت کلیوی و سیتو توکسیته بر روی سلول های پستانداران می باشد (وارهیت و همکاران 2004، ویک و همکاران 2007) و میزان سمیت به ترتیب نزولی به صورت  $SWNTs > MWNTs > quartz > C_{60}$  است (جیا و همکاران 2005). اثر نانولوله های کربنی بر روی باکتری و ویروس ها توجه زیادی را به دلیل مشکل انتشار و توزیع CNT در آب به خود جلب کرده است. سورفاکتانت ها یا پلیمر هایی نظیر سولفونات دودسیل بنزن (SDBS)، پلیوینیلپیرولیدون (PVP) و یا تریتون X- برای تسهیل توزیع استفاده می شوند. برخی از مطالعات به بررسی فعالیت آنتی میکروبی SWNT در باکتری های گرم مثبت و منفی نسبت داده شده است و آسیب ها ناشی از فعل و انفعالات فیزیکی و تنش اکسایشی ای بوده است که موجب اختلال در یکپارچگی غشای سلولی گردیده است (کتنگ و همکاران 2007، 2008، ناراین و همکاران 2005). نانولوله های کربنی برای جلوگیری از اتصال میکروبی مفید بوده است. با این حال، درجه ترکیب، اثرات تثبیت با NOM (هیان و همکاران 2007)، و زیست فراهمی نانولوله ها (برانت 2008) بایستی با توجه به این ویژگی های آنتی میکروبی در نظر گرفته شود.

### 3- کاربرد های فعلی و بالقوه برای کنترل میکروبی و ضد عفونی سازی

چندین نانومواد نظیر nAg، کیتوزان و تیتانیوم اکسید، کاربرد های زیادی در محصولات مختلف و فرایند های صنعتی از جمله تصفیه آب نظیر عوامل آنتی میکروبی دارد (جدول 1)

در میان نانومواد آنتی میکروبی، nAg رایج ترین است. این یک عامل آنتی میکروبی در بیش از 100 محصول است (میتارد 2007) و متغیر از مکمل های غذایی تا پوشش های سطحی لوازم آشپزخانه ای (چن و شلوسترا 2008، مینارد 2007) است. سیستم های تصفیه آب خانگی نظیر Aquapure, Kinetico و QSI-Nano که 99.99 درصد پاتوژن ها را حذف می کنند، از غشا های اشباع شده با نقره یا سطوح پوشش دهی شده با نقره استفاده می کنند (مینارد 2007).

کیتوزان نانوذره ای در زمینه های ارایشی بهداشتی، حفاظت غذایی، کشاورزی و پزشکی استفاده می کنند (رابی و همکاران 2003). علاوه بر عملکرد ضد باکتریایی، مقاومت مکانیکی و آب گریزی را می توان در نظر گرفت. کیتوزان در سیستم های تصفیه فاضلاب و آب بزرگ مقیاس به عنوان عامل انعقاد یا فلکوله کننده استفاده شده است (زننگ و همکاران 2008) و اخیرا به عنوان عامل ضد عفونی کننده در نظر گرفته شده است (دنکباس و اتبانیست 2006).

به دلیل شاخص انکساری بالا و سفید بودن، نانوذرات تیتانیوم اکسید در شکل آاناتاز، در طیف وسیعی از محصولات نظیر ضد افتاب، رنگ، خمیر دندان و پوشش استفاده می شود. این در تصفیه کننده های هوا نظیر تصفیه کننده چند مرحله ای و نانو بریز ها برای حذف ترکیبات آلی فرار و نیز کشتن باکتری ها استفاده شده است. سیستم های تصفیه آب صنعتی بزرگ مقیاس از فتوکاتالیست های تیتانیوم اکسید استفاده کرده اند، اگرچه کاربرد اصلی آن، تجزیه الاینده های آلی به جای ضد عفونی سازی شده است.

به منظور ارزیابی پتانسیل نانومواد آنتی میکروبی به عنوان ضد عفونی کننده های جایگزین در تصفیه آب آشامیدنی، اثر بخشی آنتی میکروبی نانومواد انتخاب شده، با ضد عفونی کننده های آبی در جدول 2 مقایسه شده است. گفته می شود که این نانومواد دارای فعالیتی های آنتی میکروبی مشابه یا برتر در مقایسه با ضد عفونی کننده های سنتی شده است. آن ها به عنوان ضد عفونی کننده های جایگزین و یا همراه با فناوری های موجود نظیر فرابنفش برای بهبود کارایی ضد عفونی استفاده شده اند. دیگر کاربرد بالقوه، مربوط به کنترل خزه در ممبران های

فیلتراسیون آب و سایر سطوح در ری اکتور ها و در خط لوله های مورد استفاده در تصفیه آب و توزیع می باشند. جدول 1، خلاصه ای از کاربرد های ضد میکروبی نانومواد مختلف را نشان می دهد که شکل و فرم آن ها بستگی به خواص نانومواد خاص دارد.

### 1-3 کیتوزان

کیتوزان نانومقیاس دارای کاربرد های ضد عفونی آب اشامیدنی به عنوان یک عامل ضد میکروبی در ممبران ها، اسفنج ها و پوشش های سطحی مخازن ذخیره ای آب هستند. مزیت های آن ها نسبت به ضد عفونی سازی های دیگر بیشتر است زیرا دارای فعالیت های آنتی باکتریایی بوده و دارای طیف وسیعی از فعالیت ها در برابر باکتری ها، ویروس ها و قارچ ها شده اند و دارای سمیت کم تری برای حیوانات و انسان ها می باشند. با این حال، اثر بخشی کنترل میکروبی بستگی به روش آماده سازی مواد و وجود مواد الی دارد. کیتوزان یک عامل ضد عفونی کننده در پی اچ اسیدی به دلیل انحلال و دسترسی به گروه های آمینی باردار است (رابی و همکاران 2003، مو و همکاران 2002). تهیه مشتقات محلول در آب کیتوزان می تواند به غلبه بر این محدودیت کمک کند.

### 2-3 تیتانیوم اکسید

تیتانیوم اکسید برای تصفیه آب بسیار اهمیت دارد زیرا در آب پایدار است، غیر سمی و کم هزینه می باشد. طیف وسیعی از مطالعات بر روی ضد عفونی ساز فتوکالیستی تیتانیوم اکسید، پتانسیل تیتانیوم اکسید را برای ضد عفونی سازی آب اشامیدنی نشان داده اند. فعالیت نوری در دامنه UV-A و فعالیت نور مرئی بالقوه در صورت دوپ شدن با فلزات موجب شده است تا ضد عفونی سازی تیتانیوم اکسید در کشور های در حال توسعه مفید باشد به خصوص در کشور هایی که برق کمی وجود دارد. با این حال ضد عفونی سازی خورشیدی مبتنی بر تیتانیوم اکسید، یک فرایند کند به دلیل بخش کوچکی از UV-A در تابش خورشیدی است. از این روی، موفقیت در تحقیقات بر روی دوپینگ فلزی یا نیتروژن برای بهبود جذب اشعه مرئی تیتانیوم اکسید و یا فعالیت UV-A، برای کاربرد ضد عفونی سازی تیتانیوم اکسید اهمیت دارد. اخیرا نشان داده شده است که دوپینگ تیتانیوم اکسید با نقره موجب بهبود غیر فعال سازی باکتریایی از طریق تیتانیوم اکسید فعال شده با اشعه فرابنفش می شود (پیجو همکاران 2007، ردی و همکاران 2007). تیتانیوم اکسید می تواند به صورت سوسپانسیون در راکتور دوغاب UV، به

صورت فیلم نازک بر روی سطح راکتور و یا فیلتر ممبران به کار برده شود( بنباو و همکاران 2007 ف بلکوا و همکاران 199، کواک و همکاران 2001)

جدول 1: کاربرد های فعلی و بالقوه نانومواد آنتی میکروبی

نانومواد	مکانیسم آنتی میکروبی	کاربرد های فعلی	کاربرد های آینده بالقوه
	آسیب غشایی، کلاته شدن فلزات	محصولات مراقبت شخصی، میکروب کش در بخش کشاورزی و محصولات پزشکی، مواد غذایی، پزشکی، فلوکولانت در آب و پساب	تثبیت کننده باکتری ها، آنزیم و سایر بیولوژیکی مولکول ها، جاذب های زیستی
nAg	انتشار یون Agb، اختلال در غشاء سلول و انتقال الکترون، آسیب DNA	فیلتر قابل حمل آب، لباس، دستگاه های پزشکی، پوشش برای ماشین لباسشویی، یخچال و فریزر، و ظروف غذا	پوشش سطحی، غشا
تیتانیوم اکسید	تولید ROS، غشای سلولی و آسیب دیواره سلولی .	تصفیه هوا، سیستم های تصفیه آب برای تجزیه آلایندهها آلی	ضد عفونی سازی خورشیدی و UV آب و فاضلاب، ممبران راکتیو، سطوح مقاوم در برابر خزه
CNT	اختلال فیزیکی در سلول	-	مقاوم در برابر خزه ، الیاف کربن توخالی ،

فیلتر تخت بسته بندی شده			
دهان شوپه، پوشش سطحی	کرم ضد باکتری، لوسیون و پماد، دئودورانت، شیشه پاک کن و سرامیک	تجمع درون سلولی نانوذرات، آسیب غشای سلولی، تولید H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ، انتشار یون Zn <sup>2+</sup>	اکسید روی

جدول 2: اثر بخشی نسبی عوامل آنتی میکروبی مختلف

منابع	CTa (mg-min/L or mJ/cm <sup>2</sup> )	مواد ضد عفونی سازی
Don et al., 2005; Qi et al., 2004	7.5–144 <sup>b</sup>	کیتوزان
Lyon et al. (2007)	100	
Hoff (1986)	95–180	nC60
Huang et al. (2008b), Kim et al. (2008)	0.075 <sup>c</sup> –26	
Hoff (1986)	0.03–0.05	کلورامین
MWH (2005), Hunt and Marinas (1997), Sulzer et al. (1959), Farooq and Akhlaque (1982), Chang et al. (1985), Oguma et al. (2002)	0.0007–0.02	یون نقره
Choi et al. (2007), Mori et al. (2007)	3.8–4.8	
Benabbou et al. (2007), Liu and Yang (2003), Ibanez et al. (2003)	16,300–20,000	کلرین آزاد
Kikuchi et al. (1997), Choi et al. (2007)	700–5000	
Mamane et al. (2007)	3600–8500	اوزون
	66–89	UV-C (254 nm)
		UV-A (300–400 nm)
		TiO <sub>2</sub> d p UV (300–400 nm)
		TiO <sub>2</sub> e p UV (300–400 nm)
		UV p H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (315–400 nm)

### 3-3 فلورن ها و مشتقات

گزارشات اخیر در خصوص خواص آنتی میکروبی فلورن ارایه شده و دانش موجود بر روی این ترکیبات بسیار محدود است. از این روی، هنوز نمی توان در مورد نقش آن ها با اطمینان صحبت کرد. اگرچه مشتقات C60 و nC60 فعالیت آنتی باکتریایی قوی را نشان داده اند، ولی فلورل ها سمیتی را در سلول های پستانداران نشان نداده (سایز و همکاران 2004) و یا فعالیت آنتی باکتریایی (لیون و همکاران 2005) به علی رغم فعالیت فتو شیمیایی قوی تر، نشان نداده اند (هاتز 2008). از سوی دیگر، اگرچه سمیت فلورن ها در باکتری ها مستلزم وجود ROS نیست (لیون و همکاران 2008 ب)، سایر میکرو ارگانیسم ها نظیر باکتریوفاژ ها MS2، به طور موثر توسط فلورل ها در اشعه فرابنفش UV-A غیر فعال شده اند (بیردی و همکاران 2007). یکی از مطالعات منتشر نشده توسط همین تیم نشان داده است که غلظت تیتانیوم اکسید اثری بر روی این ویروس ندارد (بردریدی 2007). این مشاهده با نتایج مطالعه اخیر هم خوانی دارد که نشان می دهد نانوذرات کربناته تولید اکسیژن بیشتری نسبت به تیتانیوم اکسید می کنند (بارنت و همکاران 2008). به علاوه، مشتقات فلورن گروه عای عاملی را بر روی کربن ایجاد کرده و این موجب تسهیل ارتباط آن ها به یک سطح بدون به خطر اتداختن ویژگی های ضد عفونی سازی می شود. C60 کپسوله شده می تواند خواص آنتی میکروبی در آب داشته باشد (لیون و همکاران 2006) و از این روی کاربرد زیادی به دلیل انعطاف پذیری کپسوله سازی دارد. هر دو فلورل ها و فلورن های کپسوله سازی شده را می توان برای ضد عفونی استفاده کرد

### 3-4 نانولوله های کربنی

فعالیت آنتی میکروبی CNT ها نیازمند تماس مستقیم بین نانولوله های کربنی و میکرو ارگانیسم های هدف است (کانگ و همکاران 2007) و سوسپانسیون نانولوله های کربنی غیر عاملی در آب به شدت سخت بوده و نمی تواند تماس میکروبی کافی نانولوله های کربنی را برای ضعو عفونی ارایه کند. بر همین اساس، فعالیت آنتی باکتریایی نانولوله های کربنی توسط پوشش دهی نانولوله های کربنی بر روی سطح رکتور در تماس با آب پر از پاتوژن استفاده می شود. برای مثال، کانک و همکاران (2007) SWNT ها را بر روی سطح فیلتر غشا تثبیت کرده و 87 درصد کشته شدن اکولای در طی 2 ساعت مشاهده کردند. سرویاستاوا و همکاران (2004) نشان داد که نانولوله های کربنی را می توان در الیاف توخالی قرار داد و این موجب غیر فعال شدن اکولای و پلی ویروس ها می شود.

برادی استویز و همکاران (2008) غیر فعال سازی موثر اکولای را تابیش از 5-7 لگاریتم حذف باکتریوفاژ MS2 با استفاده از غشای میکروفاژ PVDF پوشش دهی شده با یک لایه نازک SWNT نشان دادند. دسته های نانولوله های کربنی تک و چند دیواره را می توان در ستون ها و یا فیلتر های بسته ای استفاده کرد. اگرچه سرعت غیر فعال سازی باکتریایی توسط نانولوله های کربنی در مقایسه با ضد عفونی کننده های سنتی نسبتا پایین است، پیش گیری از تشکیل بیو فیلم و خزه بر روی سطوح نظیر ممبران های فیلتراسیون آبی، کافی است.

### 3-5 اکسید روی

نانوذرات اکسید روی به عنوان ترکیبات فعال در تولید کرم های ضد باکتریایی، لوسیون ها و غیره استفاده شده اند. کاربرد در دهان شویه و رنگ ها به عنوان عوامل آنتی میکروبی و نیز در پوشش های سطحی برای پیش گیری از رشد بیو فیلم امروزه در نظر گرفته شده است (جونز و همکاران 2008). اگرچه هر دو نانوذرات اکسید روی و یون های روی دارای فعالیت های آنتی باکتریایی هستند، موجودات آبی به شدت به روی محلول حساس هستند (فرانکلین و همکاران 2007). چون اکسید روی به آسانی حل می شود، کاربرد آن در تصفیه آب آشامیدنی محدود است

### 3-6 ترکیب فناوری های فعلی با نانو تکنولوژی

یکی از کاربرد های بالقوه نانومواد آنتی میکروبی، فرایند های ترکیبی و هیبریدی با فناوری های ضد عفونی سازی موجود است. برای مثال، نانومواد حساس به نور به آسانی به راکتور های UV برای بهبود ضد عفونی سازی افزوده می شوند. ضد عفونی سازی اشعه فرابنفش برای تصفیه آب آشامیدنی در برابر پروتوزاهای تشکیل دهنده کیست نظیر Giardia و Cryptosporidium استفاده می شود. با این حال برخی از ویروس های پاتوژنیک نظیر ادنو ویروس ها به شدت به ضد عفونی سازی فرابنفش مقاوم هستند و نیازمند دوز های بسیار بالا هستند (یاتس و همکاران 2006). ترکیبی از اشعه فرابنفش با مواد فتو کاتالیستی نظیر فلورل و تیتانیوم اکسید که مکانیسم غیر فعال سازی را فراهم می کند، به حل این مشکل کمک می کند. نشان داده شده است که راکتور های UV پوشش دهی شده با تیتانیوم اکسید موجب بهبود سرعت ضد عفونی سازی می شود (سانا و همکاران 1998، بلهوا و همکاران 1990). لذا در ترکیب با قبالت تجزیه الاینده های الی (هافمن و همکاران 1995) و نیز مواد الی طبیعی)



هانک و همکاران 2008 ف میورای و همکاران 2007، فکیتز و همکاران 1997)، و این موجب شده است تا تیتانیوم اکسید یکی از نانومواد مهم برای کاربرد در سیستم های تصفیه آب بزرگ مقیاس است.

### 3-6-1 بهبود فیلتراسیون غشا با نانوفناوری

کاربرد ممبران ها برای تصفیه آب آشامیدنی و فاضلاب به شدت در حال توسعه است (مارکای و همکاران 2003). با این حال، تشکیل خزه و کف در مواد ممبران به خصوص مواد الی، از بزرگ ترین موانع برای تصفیه اب و فاضلاب است. به علاوه، الاینده های مختلف در آب و تنوع در خواص آن ها نیازمند چندین مرحله تصفیه است. استفاده از نانومواد فتو اکتیو و انتی میکروبی موجب می شود تا ممبران ها حالت واکنشی به خود بگیرند تا این که یک مانع فیزیکی ساده باشند و به این ترتیب می توان به چندین هدف تصفیه در یک راکتور ضمن کاهش تشکیل رسوب رسید. برای مثال، ممبران های سرامیکی و پلیمری حاوی تیتانیوم اکسید در حذف تعدادی از الاینده های الی و میکرو ارگانیسم های پاتوژنیک در حضور الاینده های الی و میکرو ارگانیسم پاتوژنیک در حضور تابش UV-A موثر بوده است. غیر فعال سازی باکتری ها و تجزیه مواد الی توسط تیتانیوم اکسید موجب می شود تا ممبران ها کم تر به رسوب آلی و بیولوژیکی آسیب پذیر شود (کای و همکاران 2007 ف کیم و همکاران 2003). هم چنین، الیاف تو خالی استات بار گذاری شده با نقره، دارای فعالیت انتی باکتریایی در برابر اکولای و *S. aureus* است (چو و همکاران 2005). ممبران های کامپوزیت حاوی لایه کیتوزان 50 نانومتری بر روی پلی (اکریلیک اسید) / پلی (اتیلن گلیکول) فعالیت انتی باکتریایی را در برابر باکتری های گرم مثبت و منفی نشان داده و فعالیت انتی باکتریایی ممبران با افزایش مقدار کیتوزان بهبود می یابد (دان و همکاران 2005). به طور مشابه، ممبران های نانو کامپوزیتی حاوی نانوذرات عاملی (کاتالیستی، فتو کتالیستی و انتی میکروبی) را می توان توسعه داد. وقتی که نانومواد فتو کتالیستی در ممبران ها قرار داده شد، یک ملاحظه کلیدی، معرفی اشعه فرابنفش در سیستم است. یک پیکر بندی راکتور ممبران الترافیلتراسیون و میکرو فیلتراسیون مستغرق را می توان برای دسترسی آسان به نور با استفاده از منابع UV استفاده کرد. استفاده بالقوه از الیاف نوری در این راکتور ها در حال توسعه است.

### 4- محدودیت های فناوری نانو برای تصفیه آب

چندین چالش پیش روی کاربرد کارآمد نانومواد آنتی میکروبی در تصفیه آب آشامیدنی وجود دارد به خصوص از حیث توزیع و حفظ مواد نانو و پایداری فعالیت آنتی میکروبی. اگرچه مواد نانوذرات دارای سطح مقطع بالایی هستند ولی این یک دلیل اصلی برای واکنش پذیری بالای آن ها است. نانوذرات نظیر تیتانیوم اکسید وقتی که به آب افزوده شود، به صورت انباشه می شود. اگرچه آن ها در آب خالص پایدار هستند ولی  $nc60$  به دلیل شوری منعقد شود. (لیون 2008 الف)

از سوی دیگر، سوسپانسیون نانوذرات حاوی ذرات با اندازه بسیار کوچک است. اگر نانو مواد در شکل دوغاب استفاده شوند، یک ففرایند تفکیک کارآمد در پایین دست نظیر فیلتراسیون ممبران برای حفظ و بازیافت نانومواد لازم است. تثبیت نانومواد بر روی سطح راکتور یا فیلترهای ممبران موجب حذف نیاز به تفکیک می شود. با این حال، دوز نانومواد موثر، با سطح موجود راکتور محدود می شود و در ترکیب با کاهش دسترسی به منبع نور، موجب کاهش کارایی ضد عفونی سازی در مقایسه با راکتور دوغاب می شود. نانوذرات از سیستم تصفیه ممکن است خارج شده و وارد آب شوند. به علاوه، چون نانوذرات بایستی در سیستم تصفیه باقی بمانند، بایستی همراه با ضد عفونی کننده ثانویه استفاده شوند تا مواد باقی مانده در سیستم توزیع قرار بگیرد.

حفظ مواد نانو، نه تنها به دلیل هزینه های مربوط به کاهش نانوذرات، بلکه به دلیل اثرات بالقوه نانومواد بر روی سلامت انسان و اکوسیستم ها حیاتی است (ویزیر و همکاران 2006 وزارت امور رستایی و محیط زیست بریتانیا، پاول و کنراک 2006، مور 2006، سرویس 2003، لیون و همکاران 2007 ف بت و وستروعهوف 2008). آگاهی ما از سلامت انسان و محیط و نقش نانومواد در این موارد، با افزایش تعداد مطالعات در گذشته افزایش پیدا کرده است. ذرات حجمی تیتانیوم اکسید بزرگ تر از 100 نانومتر برای انسان و حیوان بی ضرر هستند (برنارد و همکاران 1990، چن و فایویر 1988). اگرچه تیتانیوم در مقیاس نانو به صورت سرطان زا توسط آژانس بین المللی تحقیقات سرطان نامیده شده است، با این حال جذب آن از طریق آب بعید است که منجر به بروز مشکل جدی شود چرا که به فراوانی نیز در خمیر دندان و لوسیون استفاده می شود. شواهدی در خصوص سمیت نانوذرات نقره برای انسان مشاهده نشده است. تنها اثر سلامتی منفی نقره، تیره شدن پوست و غشای موکوزی به دلیل مواجهه بلند مدت با غلظت بالای نقره است.

با این حال، برخی از مواد نانو نظیر C60 سمیت را برای سلول های پستانداران نشان می دهند (سایس و همکاران 2004). نانوذرات اکسید روی موجب کاهش زنده مانی سلول های T انسانی در غلظت های بالا (بیش از 5 میلی مول) (ردی 2007) شده اند. با این وجود، اطلاعات موجود برای تعیین بالاترین غلظت مجاز نانومواد در آب اشامیدنی ناکافی است. تا زمانی که سمیت انسانی آن ها به طور کامل ارزیابی نشود و یا فناوری هایی برای حفظ مواد نانو در سیستم تصفیه استفاده نشود، کاربرد مواد نانو در سیستم های تصفیه بزرگ مقیاس، دور از انتظار در آینده است. چون بیشتر مطالعات بر روی فعالیت های ضد میکروبی نانومواد در محلول های تمیز و نسبتا پاک صورت گرفته است، پایداری فعالیت های ضد میکروبی آن ها در آب طبیعی یا فاضلاب که اجزای تشکیل دهنده آن ها در اثرات متقابل میکروب- نانومواد اثر دار، مشخص نیست. جذب به جاذب های زمینی و پوشش دهی توسط مواد الی طبیعی موجب کاهش سمیت nc60 برای باکتری ها می شود (لی و همکاران 2008). وقتی که سطوح برای پیش گیری از تشکیل بیوفیلم و اتصال میکروبی پوشش دهی شوند، پوشش های نانوذرات انتی میکروبی سریعا کارایی خود را به دلیل جذب مواد برون سلولی پلیمری و انسداد با رسوبات از دست می دهند (لیون و همکاران )

## 5- نیاز های تحقیقاتی آینده

همان طور که در بالا گفته شد، محدودیت های مهمی در استفاده از نانومواد برای ضد عفونی سازی و کنترل میکروبی وجود دارد. این مسئله مستلزم تحقیقات بیشتر برای ارزیابی کاربرد آن ها و حل محدودیت ها است. یک نیاز تحقیقاتی مشهود، فناوری های بهتر برای حفظ نانومواد است. روش های موثر و مطمئن برای اتصال نانوذرات به سطح راکتور و لایه های انتخابی غشای فیلتراسیون و یا تفکیک و حفظ نانوذرات معلق برای کاهش هزینه های مربوط به از دست رفت مواد و پیش گیری از اثرات زیست محیطی و سلامت انسان است. این موارد شامل توسعه فنون بهتر پوشش دهی از طریق عاملی سازی سطوح ذرات، کاهش کف و رسوب در ممبران از طریق سوسپانسیون نانومواد و لاشباع سازی نانوذرات در مواد بسته بندی فیلتر برای مثال کربن فعال ذره ای و یا رزین های تبادل یونی است. پیشرفت در این زمینه ها موجب شده است تا نانومواد انتی میکروبی در سیستم تصفیه آب قرار گیرند. تحقیقات بر روی فناوری های جدید تثبیت یا تفکیک نظیر تفکیک مغناطیسی، نیاز است. برای مثال، قرار دادن نانوذرات بر روی بستر های مغناطیسی نظیر نانو مغناطیس را می توان مورد استفاده قرار داد (یاورز

2006). نانوذرات با خواص مختلف را می توان بر روی هسته نانومغناطیس برای ایجاد مواد نانوکامپوزیت چند عاملی قرار داد.

تحلیل های سود به هزینه جامع برای ارزیابی کاربرد نانوفناوری برای تصفیه آب لازم است. تحلیل های اقتصادی بایستی مزایای تشکیل DBP پایین تر و نیز هزینه های مربوط به اثرات زیست محیطی بالقوه را در صورت خروج نانوذرات از سیستم های تصفیه ای در نظر بگیرند. مزیت اصلی مواد ضد عفونی کننده سنتی، کم هزینه بودن است. فناوری های تصفیه آب مبتنی بر نانو تنها در صورتی قادر به رقابت با درمان سنتی است که هزینه مواد نانو مشابه با روش های سنتی باشد. تحقیقات آینده بایستی به بررسی توسعه پذیری تولید نانومواد و نیز سیستم های تصفیه مبتنی بر نانومواد بپردازند. برای مثال، پودر های آهن میکرو مقیاس و شن های پوشش دهی شده با آهن برای جذب ویروس ها از طریق جذب الکترواستاتیک ها گزارش شده این منجر به از هم گسیختگی ویروس ها می شود (ریان و همکاران 2002). ذرات آهن نانو، کارایی بالایی در مقایسه با ذرات با مقیاس میکرو و یا بزرگ تر دارند

#### 6- جمع بندی

به طور کلی، نانومواد ضد میکروبی مختلف نظیر کیتوزان،  $nAg$ ,  $TiO_2$  و نانولوله های کربنی، جایگزین مناسبی برای مواد ضد عفونی کننده شیمیایی سنتی می باشند که دارای اثرات جانبی مضر می باشند. اگرچه ملاحظات اقتصادی فعلی و اثرات محیط زیست و اثرات بر روی انسان مانع از کاربرد فرایندهای تصفیه آب مبتنی بر نانو در آینده نزدیک شده است، افزایش توجه به تصفیه آب غیر متمرکز و سیستم های استفاده مجدد، نیازمند تحقیقات بیشتری در این زمینه هستند. تحقیقات آینده در زمینه مقیاس پذیری، اقتصاد و ایمنی این سیستم ها، بر بسیاری از محدودیت های فعلی غلبه کرده و فرصت را برای تحول و تغییر در تصفیه آب آشامیدنی فراهم ساخته است.