

بررسی شبیه‌سازی CFD راکتورهای گندزدایی پرتو فرابنفش آب

فرخنده قادرزاده، سیدحسن هاشم آبادی*

تهران، دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده مهندسی شیمی، آزمایشگاه تحقیقاتی دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)

پیام نگار: Hashemabadi@iust.ac.ir

چکیده

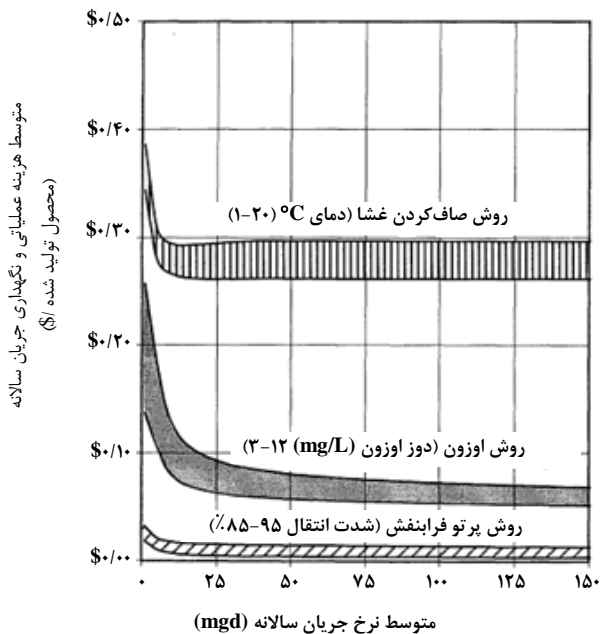
در این مقاله فناوری پرتو فرابنفش (UV) جهت گندزدایی آب و مزایای استفاده از این روش در مقایسه با سایر روش‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. از آنجایی که در عملکرد مناسب این واحدها پارامترهای زیادی دخالت دارند و روشهای مناسبی برای طراحی آنها وجود ندارد، اخیراً در زمینه طراحی این واحدهای عملیاتی با استفاده از شبیه‌سازی CFD کارهای زیادی گزارش شده است. به این صورت که با حل معادلات حاکم بر واحد مورد نظر که شامل معادلات پیوستگی و تکانه، تابش و سینتیک است نیمرخ سرعت، شدت تابش یا نرخ تابش، اندازه و میزان حذف میکروارگانیسم‌ها (ریزاندامگان) را به دست آورده و از این طریق می‌توان یک طراحی بهینه از لحاظ زمانی و هزینه‌ای انجام داد. در این مقاله دیدگاه‌های مختلف مربوط به هیدرودینامیک، تابش و سینتیک در شبیه‌سازی CFD این راکتورها و مزایا و معایب آن‌ها مورد بررسی قرار گرفته است.

کلمات کلیدی: پرتو فرابنفش، گندزدایی آب، نرخ تابش، شبیه‌سازی CFD

۱- مقدمه

آنچه در مورد کاربرد این پرتو مهم است عواملی است که می‌توانند عبور این پرتو را از محیط آبی تحت تأثیر قرار دهند. چهار عامل عمده شامل کدورت آب، غلظت ترکیبات آلی موجود در آب، میزان آهن موجود در آب، غلظت یونهای نیترات و نیتريت می‌باشند. پرتو فرابنفش به‌عنوان یک روش ضدعفونی‌کننده فیزیکی، در تصفیه منابع آب و فاضلاب مورد استفاده قرار می‌گیرد. از طرفی با کمک این پرتو در کنار استفاده از هیدروژن پروکسید، ترکیبات آلی کلردار از بین خواهند رفت. کاربرد پرتو فرابنفش در ضدعفونی آب آشامیدنی در پایان مراحل تصفیه، ضدعفونی آبهای سطحی و چاه، ضدعفونی آب مورد استفاده در صنایع مختلف از جمله صنایع غذایی، دارویی، الکترونیک، گندزدایی پساب‌های گوناگون در آخرین مرحله تصفیه فاضلاب و ضدعفونی اولیه آب استخرهای شنا می‌باشد [۱و۲].

گندزدایی یکی از مهم‌ترین مرحله در تصفیه آب آشامیدنی است که به‌طور مستقیم به سلامت عموم منجر می‌شود. روش‌های گوناگونی برای گندزدایی منابع آب وجود دارد که به‌طور کلی به دو دسته شیمیایی و فیزیکی تقسیم می‌شوند [۱و۲]. از روشهای رایج شیمیایی، کلر زنی [۳] و استفاده از گاز اوزون [۴] و از روش‌های رایج فیزیکی، گرما، استفاده از غشاء و پرتودهی را می‌توان نام برد. به دلیل افزودن مواد شیمیایی و مضراتی که این مواد دارند استفاده از روش‌های فیزیکی بر روش‌های شیمیایی ارجحیت دارد. در میان روش‌های فیزیکی، پرتو دهی از دیر باز مورد توجه بوده است. پرتو فرابنفش از طریق لامپ‌های جیوه که به سه دسته فشار پایین، فشار متوسط و فشار بالا تقسیم می‌شوند بر روی ریزاندامگان‌ها که شامل باکتری‌ها و ویروس‌ها هستند اثر می‌گذارد [۵و۶].

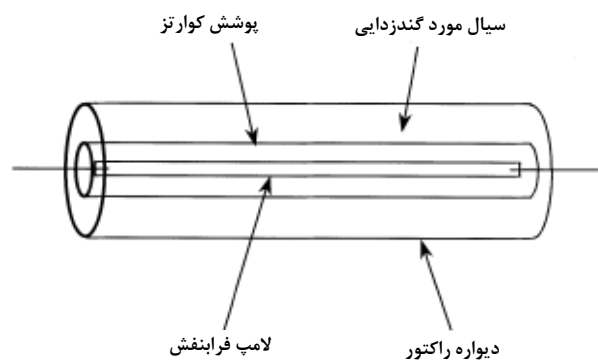


شکل ۲- نمودار متوسط هزینه عملیاتی و نگهداری جریان سالانه برحسب متوسط شدت جریان سالانه برای روش‌های مختلف گندزدایی [۱۰]

در طراحی راکتورهای فرابنفش، هیدرودینامیک جریان و قرارگیری موقعیت لامپ‌ها پارامتر مهمی محسوب می‌شوند [۱۲]. استفاده از ابزار دینامیک سیالات محاسباتی برای مدلسازی جریان و فرایندهای انتقال جریان در مهندسی شیمی در سال‌های اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است. از این ابزار می‌توان در شبیه‌سازی راکتورهای فرابنفش استفاده کرد. یک شبیه‌سازی موفق مزایایی از قبیل ایجاد نمونه اولیه مجازی، بهینه‌سازی هزینه طراحی، کنترل همیشگی و ارزیابی بهتر عملکرد را به همراه خواهد داشت. نکته کلیدی در شبیه‌سازی عملکرد راکتورها، حل معادلات حاکم بر سیستم در نمونه اولیه مجازی است که باعث کاهش هزینه‌ها و زمان محاسبات مربوطه طراحی می‌شود [۱۳].

یک مدل ریاضی برای تعیین سرعت غیرفعال کردن ریزاندامگان‌ها براساس داده‌های آزمایشگاهی توسط داربی و همکاران (۱۹۹۵) به دست آورده شد [۱۴]. اما در این مدل، هیدرودینامیک راکتور مورد بررسی قرار گرفته نشده است. در سال ۱۹۹۹ یک روش برای در نظر گرفتن هیدرودینامیک در راکتور توسط چپو و همکاران ارائه شد که در آن مدل، میزان سرعت توسط یک سرعت‌سنج لیزری اندازه‌گیری می‌شد [۱۵]. باس (۱۹۹۶) با در نظر گرفتن فرض

فوائد کاربرد پرتو فرابنفش در انجام مؤثر عمل ضد عفونی، سرعت عمل، اقتصادی بودن روش، عدم استفاده از مواد شیمیایی، ایمنی و راحتی نصب دستگاه‌ها، نگهداری آسان و بدون نیاز به پرسنل متخصص، اشغال فضای کم، خودکار بودن کار دستگاه، سازگاری با محیط زیست و غیره می‌باشد [۱۰ و ۱۱]. پرتو فرابنفش برای انجام بعضی از واکنش‌های شیمیایی نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد. یک راکتور فرابنفش شامل یک ظرف واکنش است که از تعدادی لامپ فرابنفش تشکیل شده است. لامپ‌های فرابنفش توسط پوشش کوارتز در برابر آب محافظت می‌شوند. آب به داخل راکتور وارد می‌شود و اطراف پوشش کوارتز جریان می‌یابد ریزاندامگان‌ها که در آب قرار دارند و مکانشان از طریق راکتور با جریان آب تغییر می‌کند و نور فرابنفش بر آن‌ها ساطع می‌شود. نور فرابنفش به وسیله آب جذب و ریزاندامگان‌ها با دریافت نور فرابنفش غیرفعال می‌شوند و آب گندزدایی شده از خروجی راکتور خارج می‌شود [۷].



شکل ۱- طرح اجمالی یک راکتور فرابنفش

یک مقایسه هزینه‌ای در سال ۱۹۹۲ نشان می‌دهد که میزان هزینه (۱-۱۰) دلار در هزار گالن برای حذف مواد آلی در محدوده ppm (۱۰۰-۰/۱) می‌باشد [۸]. در مطالعات دیگر هزینه کم استفاده از پرتو فرابنفش نشان داده شده و نموداری از مقایسه هزینه‌های اقتصادی ارائه شده است [۹]. شکل (۲) نشان می‌دهد که گندزدایی با استفاده از پرتو فرابنفش در مقایسه با روش‌های گندزدایی دیگر نظیر صاف کردن غشاء و استفاده از اوزون، متوسط هزینه عملیاتی و نگهداری، کمتر خواهد بود [۱۰]. مقایسه اقتصادی فرایندها نشان می‌دهد که مصرف انرژی بالا از لامپ فرابنفش قسمت اعظم هزینه را شامل می‌شود [۱۱].

تابش و سینتیکی مورد استفاده در شبیه‌سازی CFD راکتورهای فرابنفش بررسی شده و ویژگی‌ها و مزایای هر کدام مورد بحث قرار گرفته است.

۲- شبیه‌سازی CFD راکتورهای فرابنفش

برای شبیه‌سازی راکتورهای فرابنفش باید سه دسته از معادلات، شامل معادلات حاکم بر هیدرودینامیک، معادلات تابش و معادلات سینتیک را همزمان حل نمود.

جریان لوله‌ای، عدم پراکندگی شعاعی و عدم فضای مرده در راکتور و همگنی شدت تابش هیدرودینامیک راکتور فرابنفش را مورد بررسی قرار داد [۱۶]. در مطالعه‌ای دیگر توسط سوزی و تقی پور (۲۰۰۶)، هیدرودینامیک راکتورهای فرابنفش برای دو راکتور مختلف شبیه‌سازی شد و تطابق خوبی بین نتایج آزمایشگاهی با نتایج شبیه‌سازی به دست آمد [۱۳]. بررسی‌های دیگری بر روی گندزدایی راکتورهای فرابنفش انجام شده که در جدول (۱) این بررسی‌ها با خلاصه‌ای از نتایج به دست آمده از آنها درج شده‌اند. با توجه به ضرورت داشتن ابزاری مناسب برای طراحی بهینه فرایند پیچیده گندزدایی توسط UV، در این مقاله انواع مدل‌های جریان،

جدول ۱- خلاصه‌ای از مطالعات انجام شده

مطالعه انجام شده	نتایج
چیو و بلاچلی [۱۵] (۱۹۹۹)	تفاوت بین پیش‌بینی مدل و اندازه‌گیری آزمایشگاهی در ناحیه ورودی مشاهده گردد.
بولتن و همکاران [۱۷] (۲۰۰۰)	منبع تابش علاوه بر طول لامپ در جهت شعاعی نیز ساطع می‌شود. بنابراین بخشی از نرخ تابش در این جهت انتشار می‌یابد.
لیو و همکاران [۱۸] (۲۰۰۵)	در سطح خروجی راکتور نتایج دیدگاه اولرین با دیدگاه لاگرانژین تطابق دارد. بنابراین دیدگاه اولرین جایگزین مناسبی برای دیدگاه لاگرانژین است.
دوکاست و همکاران [۱۹] (۲۰۰۷)	در خارج منطقه چرخش، مدل‌های اغتشاش $RNG(k-\epsilon)$ ، $k-\epsilon$ استاندارد و RSTM و TFM مناسب و در منطقه چرخش، مدل اغتشاش $(k-\omega)$ نتایج بهتری پیش‌بینی می‌کند [۱۹].
سوزی و تقی پور [۲۰] (۲۰۰۶)	با مقایسه دو مدل تابش MPSS و RAD-LSI و دو دیدگاه لاگرانژین و اولرین، مدل MPSS با دیدگاه لاگرانژین نتایج نزدیکتری را با داده‌های آزمایشگاهی نشان داده است.
الیاسی و تقی پور [۲۱] (۲۰۰۶)	مدل اولرین نسبت به لاگرانژین به این دلیل که دوز به دست آمده و سرعت محلی غیرفعال شدن ریزاندامگان‌ها بهبود می‌یابد، عملکرد راکتور را بهتر نشان می‌دهد.
هافمن و همکاران [۲۲] (۲۰۰۷)	تطابق بین داده‌های آزمایشگاهی و شبیه‌سازی را نشان می‌دهد به جز در مناطق پشت لامپ، که به دلیل انتخاب مدل اغتشاش، انحراف بیشتر است.
دورن و تقی پور [۲۳] (۲۰۰۹)	مدل اغتشاش RSM متوسط شدت جریان انتقال جرم را در جریان‌های مغشوش به جز در سطح ورودی که اغتشاش، بالاست، به خوبی پیش‌بینی می‌کند. مدل اغتشاش AKN به خاطر حافظه و محاسبات کمتر، به مدل اغتشاش RSM برتری دارد.

۱-۲ معادلات حاکم بر هیدرودینامیک جریان

از حل معادلات هیدرودینامیک برای به دست آوردن برش عمودی سرعت و میدان جریان استفاده می‌شود که اگر جریان یک فازی باشد معادلات متوسط گیری شده پیوستگی و حرکت RANS به صورت زیر باید حل شوند.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial (\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u u) = -\nabla p - \nabla \cdot (\tau + \tau^{\dagger}) + \rho g \quad (2)$$

اگر جریان دو فازی باشد در فاز پیوسته از نگاه اولرین [۲۴] معادلات پیوستگی و حرکت و در فاز پراکنده معادلات حاکم بر دیدگاه لاگرانژین [۲۴] که از تعادل نیروها روی ذره به دست می‌آیند باید حل شوند. برای شبیه‌سازی جریان مغشوش در راکتور (جمله تنش اغتشاش τ^{\dagger} در معادله ۲) از مدل‌های اغتشاش (k-ε) استاندارد، Realizable (k-ε)، (k-ω) RSTM و TFM استفاده می‌شود [۲۴]. با توجه به مطالعات انجام شده مدل اغتشاش Realizable (k-ε) در راکتورهای فرابنفش نسبت به بقیه مدل‌ها جواب‌های نزدیک‌تری را به مقادیر آزمایشگاهی نشان می‌دهد.

۲-۲ مدل‌های تابش

دسته دیگری از معادلات برای مدلسازی، معادلات مربوط به تابش می‌باشند. در طراحی راکتورهای گندزدایی فرابنفش، دانستن جزئیات مربوط به چگونگی ورود پرتو فرابنفش و تضعیف آن از طریق جذب یا انعکاس، اهمیت دارد. در نظر گرفتن تأثیر این عوامل به هندسه و ترکیب اجزاء در راکتور وابسته است. اعمال منبع تابش به صورت نقطه‌ای خیلی ساده است اما اگر لامپ فرابنفش از لحاظ طول و قطر محدودیت داشته باشد مشکل ایجاد می‌شود. خوشبختانه برای حل این مشکل راه‌های مختلفی می‌تواند به کار برده شود که به طور کلی می‌توان این راه‌ها را به چهار دسته کلی تقسیم کرد:

دسته اول: لامپ را به n نقطه با فاصله مساوی در طول محور لامپ

1. Reynolds Averaged Navier Stokes
2. Reynolds Stress Transport Model
3. Two-Fluid Model

تقسیم کرده و میزان تابش در هر نقطه محاسبه می‌شود و میزان تابش کلی، مجموع تابش در هر یک از این نقاط می‌باشد. مهمترین مدل‌هایی که در این دسته قرار می‌گیرند:

روش مجموع منابع نقطه‌ای چندگانه MPSS^۴: این مدل با در نظر گرفتن عوامل جذب، شکست و انعکاس به صورت زیر بیان می‌شود:

$$I = (1 - R_1)(1 - R_2) \frac{\Phi/n}{4\pi(d_1 + d_2 + d_3)^2} T_w^{0.01} T_q^{0.01} F \quad (3)$$

که R_1 و R_2 شاخص‌های شکست برای فصل مشترک (هوا-کوارتز) و فصل مشترک (آب-کوارتز) می‌باشند که از قانون Fresnel's می‌توانند استخراج شوند. T_w و T_q نیز ضرایب انتقال با طول مسیر ۱۰ mm از آب و کوارتز d_1 و d_2 و d_3 طول مسیر نور فرابنفش در داخل کوارتز می‌باشند. توان خروجی برای هر منبع نقطه‌ای برابر می‌باشد. برای در نظر گرفتن عوامل جذب و شکست از ضریب F استفاده می‌شود [۲۴-۲۵].

دسته دوم: روش دیگر این است که لامپ را به n قطعه مساوی بر روی محور لامپ تقسیم کرده و میزان تابش را در هر یک از این قطعات به دست آورده و در این حالت تابش کلی، مجموع تابش‌ها در هر یک از این قطعات می‌شود که این روش، روش مجموع منابع نقطه‌ای چندگانه M^۵SSS نامیده می‌شود. مدل M^۵SSS ترم‌های شکست و انعکاس و جذب را بیشتر از مدل MPSS در نظر می‌گیرد. در این دیدگاه نور بر سطح استوانه‌ای وارد می‌شود و با کسینوس زاویه شکست θ_1 کاهش می‌یابد. رابطه آن به صورت زیر است:

$$I = (1 - R_1)(1 - R_2) \frac{\Phi/n}{4\pi(d_1 + d_2 + d_3)^2} T_w^{0.01} T_q^{0.01} F \quad (4)$$

دسته سوم: روش دیگر این است که لامپ به صورت یک خط در نظر گرفته شود و میزان تابش بر روی این خط به دست آورده شود. در واقع این روش انتگرال دو روش قبلی می‌باشد که مهمترین مدل آن، روش LSI می‌باشد [۲۵].

4. Finite Line Source Model or Multiple Point Source Summation
5. Multiple Segment Source Summation

یا منبع تابش وجود دارد به خوبی شدت تابش را پیش‌بینی می‌کند. مدل‌های دیگری برای محاسبه نرخ تابش وجود دارد که در جدول (۲) آمده‌اند. با مقایسه مدل‌های تابش می‌توان به این نتایج رسید که: الف) موقعی که واسط کوارتز وجود ندارد، مدل فاکتور دید مناسب تر است. ب) مدل اصلاح شده LSI عملکرد مدل LSI را در نزدیک لامپ بهبود می‌بخشد. استفاده از تابع مینیمم در مدل اصلاح شده LSI، باعث در نظر گرفتن نرخ تابش در مناطق نزدیک سطح لامپ می‌شود، ج) ترکیب روش ضریب فرسایش با مدل LSI نتایج قابل قبولی را از لحاظ زمان محاسبات و دقت در مقایسه با مدل MPSS به دست می‌دهد. به علاوه ضریب مورد استفاده در مدل فاکتور دید و مدل اصلاح شده LSI برای بیان اثرات انعکاس و شکست و جذب بیان می‌شود. د) مدل اصلاح شده LSI و مدل فاکتور دید، نیمرخ توزیع نرخ تابش را در نزدیک سطح لامپ پیش‌بینی می‌کند. اما مدل اصلاح شده LSI نرخ تابش کمتری را نسبت به مدل فاکتور دید، با افزایش فاصله شعاعی می‌دهد. ه) مدل DO توزیع نرخ تابش را در نزدیک سطح لامپ بیشتر و در مناطق دور از سطح لامپ کمتر پیش‌بینی می‌کند البته اثرات شکست در نظر گرفته می‌شود.

۲-۳ مدل‌های سینتیکی حذف ریزاندامگان‌ها

دسته دیگری از معادلات که در مدلسازی راکتور فرابنفش باید در نظر گرفته شوند مدل‌های سینتیکی هستند که در واقع این مدل‌ها میزان حذف ریزاندامگان‌ها را در راکتور نشان می‌دهند و رابطه حذف ریزاندامگان‌ها را با نرخ تابش و زمان نشان می‌دهند. معروف-ترین مدل‌های سینتیکی مدل (چک-واتسن) و مدل مجموع پیشامد می‌باشند.

۲-۳-۱ مدل (چک-واتسن)^۲: واتسن در سال ۱۹۰۸ معادله (۷) را برای ثابت سرعت غیرفعال کردن ریزاندامگان‌ها ارائه کرد:

$$k = k' I \quad (7)$$

در معادله (۷)، k' از غلظت ریزاندامگان‌ها مستقل فرض شده است. رابطه (چک-واتسن) به صورت زیر به دست می‌آید:

روش LSI: یک نسخه پیوسته (انتگرالی) از مدل MPSS مدل LSI است [۱۵]. LSI یک روش کارآمد برای مدل MPSS است که نیاز به حل عددی ندارد. اما استفاده از این مدل موقعی است که جذب و شکست و انعکاس وجود نداشته باشد. نرخ تابش در مدل LSI در یک نقطه با فاصله عمودی R از لامپ و فاصله طولی H از مرکز لامپ و طول لامپ L از معادله زیر محاسبه می‌شود:

$$I = \frac{\Phi}{4\pi R} \left[\text{atan} \left(\frac{L+2H}{2R} \right) + \text{atan} \left(\frac{L-2H}{2R} \right) \right] \quad (5)$$

دسته چهارم: در دسته‌های فوق فرض شده است که تابش در دمای ثابت صورت می‌گیرد اما در این دسته فرض تغییرات دما در نظر گرفته شده و از روش‌های عددی استفاده می‌شود. البته در این دسته هم در شرایط خاص می‌توان دمای ثابت ایجاد کرد، مهمترین مدل این دسته مدل DO می‌باشد:

مدل DO:

$$(\Omega \cdot \nabla) I(r, \Omega) - (k_a + k_s) I(r, \Omega) + k_a I_b(r) + \frac{k_s}{4\pi} \int_{4\pi} I(r, \Omega') \phi(\Omega' \rightarrow \Omega) d\Omega' = 0 \quad (6)$$

که Ω جهت انتشار پرتو تابش، k_s و k_a به ترتیب ضرایب جذب و پراکندگی، و ϕ تابع فازپراکندگی را نشان می‌دهند. همان‌طور که در معادله (۶) نشان داده شده است قسمت اول معادله، گرادیان شدت در طول جهت انتشار، قسمت دوم میزان از دست دادن جذب، قسمت سوم میزان از دست دادن پراکندگی خارجی، قسمت چهارم میزان تابش از جسم سیاه و قسمت پنجم میزان پراکندگی داخلی را نشان می‌دهد. معادله (۶) برای انتقال گرما در یک واسط می‌باشد. فیولند (۱۹۸۴) این مدل را برای مستطیل دو بعدی با شرایط جذب و پراکندگی و انتشار جسم خاکستری به کار برد [۲۶]. استامنس و همکاران (۱۹۸۸) این مدل را با شرایط وجود بازتاب مورد بررسی قرار دادند [۲۷]. لیو و همکاران (۱۹۹۶) این مدل را برای واسط‌های چند لایه یا فصل مشترک Fresnel گسترش داده‌اند [۲۸]. این مدل موقعی که ذرات ریز یا تابش غیر خاکستری

3. Chick-Watson

1. Linear Source Infinite
2. Discrete Ordinate

غلظت با زمان ریزاندامگان‌ها در سطح پیشامد i دارای سرعت مرتبه اول است که از معادله زیر تبعیت می‌کند:

$$r_{Ni} = \frac{dN_i}{dt} = -kI(N_i - N_{i-1}) \quad (9)$$

با حل معادله فوق غلظت اولیه ریزاندامگان‌ها در سطح $(n-1)$ را می‌توان به‌دست آورد:

$$N = \sum_{i=0}^{n-1} N_i = N_T e^{-kTt} \sum_{i=0}^{n-1} \frac{(kIt)^i}{i!} \quad (10)$$

که N_T غلظت اولیه ریزاندامگان‌ها قبل از فرارگیری در برابر پرتو فرابنفش، با فرض اینکه همه ریزاندامگان‌ها در ابتدا در پیشامد صفر قرار داشته باشند، می‌باشد. هنگامی که $n=1$ است این مدل به مدل (چک-واتسن) تبدیل می‌شود [۳۰]. علاوه بر این مدل‌ها، مدل‌های سینتیکی دیگری هم وجود دارند که استفاده از آن‌ها کمتر است و در جدول (۳) لیست شده‌اند.

$$\ln\left(\frac{N}{N_0}\right) = -kIt \quad (8)$$

در این معادله، N غلظت ریزاندامگان‌های زنده در زمان t و N_0 غلظت ریزاندامگان‌های زنده اولیه است. زمانی که غلظت ریزاندامگان‌ها با زمان تغییر کند یا ساختار راکتور پیوسته باشد با به‌کارگیری معادلات بقای جرم، روابط بین زمان و غلظت به‌دست می‌آید [۳۰].

۲-۳-۲ مدل مجموع پیشامد^۱: در این مدل از یک پیشامد، برای انتخاب یک واحد مجزا از آسیب به ریزاندامگان‌ها استفاده می‌شود. در این مدل فرض شده است یک سطح پیشامد بحرانی n وجود دارد. ریزاندامگان‌ها همچنان به آسیب رساندن ادامه می‌دهند تا زمانی که در معرض نور فرابنفش قرار گیرند، ریزاندامگان‌هایی که به سطح آسیب پیشامد n یا بالاتر برسند غیرفعال می‌شوند. در حالی که ریزاندامگان‌هایی که سطح آسیب آنها $(n-1)$ یا کمتر باشد زنده باقی می‌مانند. مقدار عدد بحرانی n بسته به میزان ریزاندامگان‌ها و شرایط آنها تغییر می‌کند. بنابراین برای یک ریزاندامگان با شرایط معلوم، پیشامد بحرانی n ثابت است. برای یک راکتور ناپیوسته، تغییرات

جدول ۲- مدل‌های نرخ تابش

مدل	معادله	دسته
ضریب فرسایش ^۲ [۲۵]	$I = \frac{\Phi}{4\pi R} \left[\text{atan}\left(\frac{L+2H}{2R}\right) + \text{atan}\left(\frac{L-2H}{2R}\right) \right] F$	دسته اول
اصلاح شده LSI ^۳ [۱۵ و ۲۵]	$I = \min \left\{ \frac{\Phi}{2\pi R}, \frac{\Phi}{4\pi R} \left[\text{atan}\left(\frac{L+2H}{2R}\right) + \text{atan}\left(\frac{L-2H}{2R}\right) \right] \right\} F$	دسته سوم
روش فاکتور دید یا مدل سطح به سطح ^۴ [۲۷]	$F_i = \frac{L_i}{\pi H} \left[\frac{1}{L_i} \text{atan}\left(\frac{L_i}{\sqrt{H^2-1}}\right) + \frac{x_i-2H}{\sqrt{x_i y_i}} \text{atan}\left(\sqrt{\frac{x_i(H-1)}{y_i(H+1)}} + \text{atan}\left(\sqrt{\frac{H-1}{H+1}}\right) \right] \right.$ $y_i = (1-H)^2 + L_i^2 \text{ و } x_i = (1+H)^2 + L_i^2$ $L_i = \frac{l_i}{r}, H = \frac{x}{r}, i = 1, 2$ $I = I'(F_1 + F_2)^{2.26}$	دسته چهارم

1. Series-Event
2. Attenuation Factor Approach
3. Modified LSI
4. View Factor Model or Surface-to-Surface (S2S) Radiation Model Theory

۲-۴ مدل‌های عملکرد راکتور

برای واکنش‌های گندزدایی در راکتورهای پیوسته، مسیر ریزاندامگان‌ها در راکتور اهمیت دارد، که برای تعیین موقعیت ریزاندامگان در راکتور معمولاً از دو دیدگاه اولرین و لاگرانژین استفاده می‌شود. در دیدگاه اولرین غلظت اجزا از طریق موازنه جرمی و در دیدگاه لاگرانژین مسیر ذرات، با موازنه نیروها به‌دست می‌آید [۲۰].

۲-۴-۱ دیدگاه اولرین

همان‌طوری که گفته شد در این دیدگاه غلظت ریزاندامگان‌های زنده از طریق حل معادلات بقای اجزا به‌دست می‌آید. کسر جرمی محلی هر جز (ریزاندامگان) با معادلات نفوذ جابجایی از طریق معادله زیر محاسبه می‌شود.

$$\nabla \cdot (u C) + \nabla \cdot J - R = 0 \quad (11)$$

که در آن J فلاکس نفوذی (شامل پراکندگی درهمی) می‌باشد و R سرعت واکنش است [۲۰]. با حل معادله (۱۱) غلظت ریزاندامگان‌های زنده در طول راکتور به‌دست می‌آید. اگر غلظت در خروجی C باشد، آن‌گاه میزان حذف از رابطه $\text{Log}(C_0/C)$ به‌دست می‌آید.

۲-۴-۲ دیدگاه لاگرانژین

در این دیدگاه بعد از حل معادلات هیدرودینامیک و به‌دست آوردن میدان سرعت، با ریزاندامگان‌ها به‌صورت ذرات گسسته‌ای رفتار می‌شود که مسیر پیش‌بینی را می‌توان از طریق موازنه نیرو بر روی ذرات به‌دست آورد. اثرات مربوط به حرکت مغشوش و اتفاقی ریزاندامگان‌ها از طریق مدل قدم زدن تصادفی^۱ یا مدل زمان ماند ادی^۲ در نظر گرفته می‌شود که این باعث می‌شود فعل و انفعال ذره با در نظر گرفتن گردابه‌های اغتشاش فاز سیال شبیه‌سازی شود. در این دیدگاه مسیر ذره بر اساس یک میدان جریان پیوسته و پایا محاسبه می‌شود.

جدول ۳- مدل‌های سینتیکی در راکتورهای فرابنفش

رابطه سینتیکی	مدل سینتیکی
$\ln\left(\frac{N}{N_0}\right) = -\frac{1}{x-1} \ln(1 + (x-1)k t N_0^{x-1} I)$	مدل نسبتی ^۳ [۳۰] (۱۹۹۵)
$\ln\left(\frac{N}{N_0}\right) = -k I t^m$	مدل هوم ^۴ [۳۱] (۱۹۷۲)
$\ln\left(\frac{N}{N_0}\right) = -\frac{1}{x-1} \ln \ln(1 + (x-1)k t N_0^{x-1} I)$	مدل هوم پاورلا ^۵ [۳۱] (۱۹۹۶)
$\frac{N}{N_0} = \frac{1}{1 + 0.23(I t)^3}$	مدل (کولین-سیلک) ^۶ [۱۸] (۱۹۹۹)
$\frac{N}{N_0} = 1$ for $I t < b$ $\frac{N}{N_0} = \left(\frac{I t}{b}\right)^{-n}$ for $I t > b$	مدل اصلاح شده (کولین-سیلک) ^۷ [۳۱] (۱۹۹۹)

1. Discrete Random Walk
2. Eddy Life Time
3. Rational Model
4. Home Model
5. Home Power Law Model
6. Collins-Selleck Model
7. The Refined Colline-Selleck Model

دیدگاه عملکرد مناسب، میزان حذف ریزاندامگان‌های زنده در راکتور فرابنفش حاصل می‌شود. در این مقاله مدل‌های مختلفی که برای این کار به دست آمده است بررسی و مورد بحث قرار گرفته‌اند. با توجه به مدل‌های گفته شده می‌توان به این نتیجه رسید که برای مدل‌سازی راکتورهای فرابنفش، مدل‌های جریان اغتشاش مبتنی بر دیدگاه متوسط گیری معادلات (RANS) مناسب است و برای در نظر گرفتن اغتشاش موجود در جریان مغشوش مدل Realizable (k- ϵ) نسبت به سایر مدل‌ها جواب بهتری را با داده‌های آزمایشگاهی به دست آورده است. در میان مدل‌های تابش، مدل‌های تابش MPSS و LSI نسبت به سایر مدل‌ها بیشتر مورد استفاده قرار گرفته‌اند و نتایج قابل قبولی از آن‌ها به دست آمده است. از مدل‌های سینتیکی (چک-واتسن) و مجموع پیشامدها در اکثر شبیه‌سازی‌ها استفاده شده و از این مدل‌ها نیز نتایج مناسبی به دست آمده است. همچنین توجه شود که برای مدل‌سازی عملکرد راکتور، هر دو دیدگاه اولرین و لاگرانژین مناسب می‌باشند. در دیدگاه لاگرانژین از طریق مسیر ذرات، میزان حذف، و در دیدگاه اولرین با حل معادلات بقای اجزاء میزان حذف به دست می‌آید. همه شبیه‌سازی‌های انجام شده توسط تکنیک‌های CFD برای بررسی عملکرد و استخراج طراحی بهینه راکتورهای گندزدایی UV نتایج رضایت بخشی نشان می‌دهند.

مراجع

- [1] Russell, A. D., Hugo, W. B., Ayliffe, G. A. J., "Principles and practice of disinfection, preservation and sterilization", 3rd ed., Blackwell Scientific Publications Ltd, Oxford, England, (1999).
- [2] Stanton, B. S., "Disinfection, sterilization and preservation", 4th ed., Lea Febiger, Philadelphia, (1991).
- [3] Murphy, H. M., Payne, S. J., Gagnon, G. A., "Sequential UV and chlorine-based disinfection to mitigate Escherichia coli in drinking water bio films", Water. Res, Vol. 42, pp. 2083- 2092, (2008).
- [4] Paraskeva, P., Graham, N. J. D., "Treatment of a secondary municipal effluent by ozone, UV and microfiltration: microbial reduction and effect on effluent quality", Desalination, Vol. 186, pp. 47-56, (2005).
- [5] Harris, G. D., Adams, V. D., Sorensen, D. L., Curtis, M. S., "Ultraviolet inactivation of selected bacteria and viruses with photo reactivation of the bacteria", Water Research, Vol. 25, pp. 687-692, (1987).

تعدادی از ذرات (ریزاندامگان‌ها) در بازه زمانی Δt در ورودی راکتور به مقدار N_0 منتشر می‌شوند و مقدار جذب شده در طول راکتور برای هر مسیر محاسبه می‌گردد. مقدار جذب شده در هر نقطه، به وسیله حاصل ضرب متوسط شدت تابش در دوره زمانی‌ای که در آن ذره در شدت تابش محلی معینی قرار گرفته است، به دست می‌آید. برای هر مقدار داخلی معین n تعداد ریزاندامگان‌هایی که زنده باقی می‌مانند از روابط سینتیکی مربوط به بخش (۲-۳) به دست می‌آیند و جمع تمام ذرات زنده که راکتور را ترک می‌کنند از رابطه $N = \sum N_i$ حاصل می‌شود [۲۰].

بنابراین برای شبیه‌سازی راکتورهای فرابنفش باید سه دسته از مدل‌های حاکم در نظر گرفته شوند، این مدل‌ها شامل مدل‌های جریان، تابش و سینتیک می‌باشند. از طرفی با حل معادلات مربوط به هیدرودینامیک، میدان جریان و نیمرخ سرعت و از طرف دیگر با حل معادله مربوط به تابش، نیمرخ تابش در راکتور به دست می‌آید. برای به دست آوردن غلظت یا چگونگی توزیع ریزاندامگان‌ها در راکتور از دیدگاه اولرین یا لاگرانژین استفاده می‌شود، که در دیدگاه اولرین مدل‌های سینتیکی، در بخش منبع که معادله سرعت واکنش است، جایگزین شده و غلظت ریزاندامگان‌ها در راکتور به دست می‌آیند. در دیدگاه لاگرانژین با استفاده از مدل‌های سینتیکی، مسیر و تعداد ریزاندامگان‌ها حاصل می‌شود. بنابراین با به دست آوردن نسبت لگاریتم غلظت یا تعداد ریزاندامگان‌ها در خروجی راکتور به ورودی آن میزان حذف بعنوان هدف طراحی حاصل می‌گردد.

۵- نتیجه گیری

در این مقاله با بررسی اهمیت و کاربردهای مختلف پرتو فرابنفش می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از پرتو فرابنفش یک روش مناسب برای گندزدایی می‌باشد. یکی از ابزارهای مفید برای شبیه‌سازی این راکتورها ابزار CFD می‌باشد. برای شبیه‌سازی CFD این نوع راکتورها باید سه دسته از معادلات شامل معادلات هیدرودینامیک، تابش و سینتیک با یکدیگر حل شوند. با حل معادلات هیدرودینامیک شامل پیوستگی، مقدار حرکت و مدل اغتشاش، میدان جریان و نیمرخ سرعت و با حل معادلات تابش، توزیع شدت تابش در راکتور به دست می‌آید. با به دست آمدن میدان جریان و توزیع شدت تابش در راکتور، با انتخاب یک مدل سینتیکی و انتخاب

- [6] Hijnen, W.A.M., Beerendonk E.F. and Medema, G.J., "Inactivation credit of UV radiation for viruses, bacteria and protozoan (oo)cysts in water: a review", *Water Research*, Vol. 40, pp. 3–22, (2006).
- [7] Bolton, J. R., "Calculation of ultraviolet fluence rate distribution in an annular reactor: significance of refraction and reflection", *Water Research*, Vol. 34, No. 13, pp. 3315-3324, (2000).
- [8] Kidmen, R., Tsuji, K., "Preliminary costs comparison of advanced oxidation processes", *Tech. Rep*, Los Alamos National laboratory, (1992).
- [9] Bolton, J.R., Birchner, K.G., Tumas, W.A., Tolman, C.A., "Figures of merit for the technical development and application of advanced oxidation technologies for both electric and solar driven systems", *Pure and Applied Chemistry*, Vol. 73, pp. 627-637, (2001).
- [10] Mackey, E.D., Cushing, R.S., Crozes, G.F., "Practical aspects of UV disinfection", *AWWA Research Foundation*, pp. 131-136, (2001).
- [11] Muller, J.P., Jekel, M., "Comparison of advanced oxidation processes in flow-through pilot plants", *Water Science and Technology*, Vol. 44, pp. 303-309, (2001).
- [12] Bolton, J.R., Wright, H., Rokjer, D., "Using a mathematical fluence rate model to estimate the sensor readings in a multi-lamp ultraviolet reactor", *Journal of Environmental Engineering and Science*, Vol. 4, pp. 27-31, (2005).
- [13] Sozzi, A., Taghipour, F., "Computational and experimental study of annular photo-reactor hydrodynamics", *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 27, pp. 1043–1053, (2006).
- [14] Darby, J., Heath, M., Jacangelo, J., Loge, F., Swaim, P., Tchobanoglous, G., "Comparison of UV irradiation to chlorination: guidance for achieving optimal UV performance", *Water Environment Research Foundation*, Alexandria, Virginia, (1995).
- [15] Chiu, K., Lyn, D. A., Savoye, P., Blatchley, E. R., "Integrated UV disinfection model based on particle tracking", *Environmental Engineering*, Vol. 125, No. 1, January, (1999)
- [16] Baas, M.M., "Latest advances in UV disinfection hydrodynamic simulation and relation to practical experiences", *Proceedings AQUATECH*, Amsterdam, (1996).
- [17] Bolton, J.R., "Calculation of ultraviolet fluence rate distribution in an annular reactor: significance of refraction and reflection", *Water Research*, Vol. 34, No.13, pp. 3315-3324, (2000).
- [18] Ducoste, J.J., Liu, D., Linden, K., "Alternative Approaches to Modeling Fluence Distribution and Microbial Inactivation in Ultraviolet Reactors: Lagrangian versus Eulerian", *Environmental Engineering ASCE*, 131(10), pp. 1393-1403, (2005).
- [19] Liu, D., Wu, C., Linden, K., Ducoste, J., "Numerical simulation of UV disinfection reactors: Evaluation of alternative turbulence models", *Applied Mathematical Modeling*, Vol. 31, pp. 1753-1769, (2007).
- [20] Sozzi, D.A., Taghipour, F., "UV Reactor Performance Modeling by Eulerian and Lagrangian Methods", *Environmental Science & Technology*, Vol. 40, No. 5, pp. 1609-1615, (2006).
- [21] Duran, J.E., Taghipour, F., Mohseni, M., "CFD modeling of mass transfer in annular reactors", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 52, No. 23-24, pp. 5390-5401, 2009.
- [22] J. Hofman, L. Shao, B. Wols, W. Uijttewaal, G. Ijpelaar1, E. Beerendonk, H. Dijk, "Design of UV reactors by CFD: model development and experimental validation", *Excerpt from the Proceedings of the COMSOL Users Conference 2007. Grenoble*, (2007).
- [23] Elyasi, S., Taghipour, F., "Simulation of UV photo reactor for water disinfection in Eulerian frame work", *Chemical Engineering Science*, Vol. 61, pp. 4741 – 4749, (2006).
- [24] Unluturk, S.K., Arastoopour, H., Koutchma, T., "Modeling of dose distribution in a thin-film UV reactor for processing of apple cider", *Journal of Food Engineering*, Vol. 65, pp. 125–136, (2004).
- [25] Liu, D., "Numerical simulation of UV disinfection reactors: impact of fluence rate distribution and turbulence modeling", *PhD Dissertation*, North Carolina State University, (2004).
- [26] Fiveland, W.A., "Discrete-Ordinates solutions of the radiative transport equation for rectangular enclosures", *Journal of Heat Transfer*, Vol. 106, pp. 699-705, (1984).
- [27] Stammes, K., Tsay, S.C., Wiscombe, W., Jayaweera, K., "Numerically stable algorithm for discrete-ordinate-method radiative transfer in multiple scattering and emitting layered media", *Applied Optics*, Vol. 27, No. 12, pp. 2502-2509, (1988).
- [28] Liou, B.T., Wu, C.Y., "Radiative transfer in a multi-layer medium with Fresnel interfaces", *Heat and Mass Transfer*, Vol. 32, pp. 103-107, (1996).
- [29] Kowalski, W.J., Bahnfleth, W.P., "Effective UVGI system design through improved modeling", *ASHRAE Transactions*, Vol. 106, pp 4-15, (2000).
- [30] Oppenheimer, J.A., "Evaluation of Cryptosporidium inactivation in natural waters", *AWWA Research Foundation*, (2000).
- [31] Hurst, C.J., "Modeling Disease Transmission and its prevention by disinfection", *Cambridge University Press*, (1996).
- [32] Oguma, K., Katayama, H., Ohgaki, S., "Photo reactivation of Escherichia coli after low- or medium-pressure UV disinfection determined by an end nuclease sensitive site assay", *Applied and Environmental Microbiology*, Vol. 68, pp. 6029–6035, (2002).