پژوهشی

بسط یک مدل ریاضی برای پیش‌بینی حذف نیترات در راکتورهای بستر شناور بیولوژیکی

* دکتر علی ترابیان
** مهندس امیر حکمی
*** مهندس بهنوش امین زاده

کلمات کلیدی :

دنیتریفیکاسیون، راکتورهای بستر شناوربیولوژیکی، مدل، تصفیه آب و فاضلاب

چکیده :

راکتورهای بستر شناور بیولوژیکی،یکی از زمینه‌های مهم تحقیق در فرایند تصفیه آب و فاضلاب طی سالهای گذشته بوده‌اند.این راکتورها به دلیل آنکه فیلم بیولوژیکی در آنها روی ذرات ریز با سطح ویژه بسیار زیاد رشد می‌نماید، می‌توانند غلظت بسیار زیاد توده بیولوژیکی داشته باشند. در عین حال راکتورهای بستر شناور بیولوژیکی مشکل گرفتگی بسترهای ثابت نظیر برجهای پر شده را نیز نخواهند داشت.به دلیل غلظت بالای توده بیولوژیکی و سرعت زیاد واکنش،زمان ماند و در نتیجه حجم راکتورهای بستر شناور از سایر راکتورهای بیولوژیکی بسیار کمتر می‌باشد.به دلیل این مزایای بسیار کمتر، راکتورهای بستر شناور بیولوژیکی به طور گسترده در تصفیه هوازی و بی هوازی آب و فاضلاب تجربه شده‌اند.

هدف از انجام این تحقیق ارائه یک مدل ریاضی بوده است که علاوه‌بر تعیین پارامترهای شناورسازی نظیر ضخامت فیلم و غلظت توده بیولوژیکی، به تعیین پروفیل غلظت در طول راکتور نیز قادر باشد. بدین منظور مدل ریاضی دنیتریفیکاسیون در سه قسمت مجزا و در عین حال مرتبط با یکدیگر ارائه گردیده است. این سه قسمت عبارتند از:

۱- مدل شناور سازی؛ ۲- مدل جریان؛ ۳- مدل واکنش در ذره بیولوژیکی.

باترکیب سه زیر مدل فوق، مدل ریاضی دنیتریفیکاسیون در راکتور بستر شناور بیولوژیکی بسط داده شده است. مقایسه نتایج حاصل از مدل حاضر با مشاهدات مراجع مختلف نشان می‌دهد که این مدل می‌تواند واکنش دنیتریفیکاسیون در راکتورهای بستر شناور بیولوژیکی را بخوبی پیش‌بینی نماید.[۱]

---

* - استادیار و معاون پژوهشی دانشکده محیط زیست ، دانشگاه تهران.

** - کارشناس ارشد مهندسی عمران محیط زیست.

*** - مربی گروه مهندسی محیط زیست دانشکده محیط زیست ، دانشگاه تهران.

مقدمه :

در سالهای اخیر بالا رفتن غلظت نیترات در آبهای زیرزمینی و سطحی یکی از مهمترین مشکلات مدیریت منابع آبی بسیاری از کشورها و از جمله ایران بوده است. استفاده روزافزون از کودهای شیمیایی، تخلیه فاضلابهای شهری و صنعتی با غلظت زیاد نیتروژن آلی و یا نیترات و شستشوی مواد آلی موجود بر روی خاک توسط آبهای سطحی از مهمترین دلایل افزایش غلظت این آلاینده در منابع آبهای سطحی و زیرزمینی است. امروزه برای کنترل غلظت نیترات در منابع آبی، حدود مجازی برای غلظت این ماده در فاضلابهای شهری و صنعتی وضع گردیده است. همچنین کشورهای مختلف برای غلظت نیترات در آب آشامیدنی، استانداردهای سخت گیرانه‌ای تدوین نموده‌اند. غلظتهای بالای نیترات، دو خطر عمده را متوجه سلامتی انسان می‌سازد. نیترات در کودکان شیرخوار، موجب بروز بیماری کشندهٔ متهموگلوبینمیا و هم عامل بالقوه سرطان معده است.

روشهای مختلفی برای حذف نیترات از آب و فاضلاب تجربه شده است. در این میان یکی از روشهایی که چشم انداز بسیار روشنی را ارائه می‌دهد، دنیتریفیکاسیون در راکتورهای بستر شناور بیولوژیکی است. این راکتورها به دلیل سطح ویژه بسیار زیاد ماده حامل، غلظت بسیار زیاد توده بیولوژیکی را در خود جای می‌دهند و بنابراین شدت واکنش در آنها بسیار زیاد بوده و زمان اقامت و در نتیجه حجم راکتور بسیار کم خواهد بود. راکتورهای بستر شناور بیولوژیکی برای تصفیه آب و فاضلاب تجربه شده‌اند و در تمامی موارد عملکرد مناسبی از خود نشان داده‌اند. مجموعه قابلیتهای راکتورهای بستر شناور بیولوژیکی سبب گردیده که این فرایند یکی از مطرح‌ترین زمینه‌های حاضر پژوهش در حیطه تصفیه آب و فاضلاب باشد.

این تحقیق با عنایت به اهمیت حذف نیترات از جریانهای فاضلاب و نیز منابع آبی، مدل سازی ریاضی فرایند دنیتریفیکاسیون در راکتورهای بستر شناور را موضوع خود قرار داده است.

استفاده از مدلهای ریاضی در توصیف و مقایسه سیستمها در طول چند دهه گذشته با سرعتی باور نکردنی گسترش یافته است. امروزه مدل سازی و شبیه سازی ریاضی یکی از ضروری‌ترین ابزارهای مدیران و مهندسین محسوب می‌شود. فراتر از رشته‌های مهندسی و علوم تجربی، مدلهای ریاضی در زمینه‌هایی نظیر علوم طبیعی و انسانی نیز به طور گسترده به کار برده می‌شوند. مهمترین ویژگی مدل سازی ریاضی، فراهم ساختن امکان پیش‌بینی و بررسی یک پدیده بدون نیاز به انجام آن در عمل است. در فرایندهای تصفیه، مدل سازی ریاضی نه تنها کمکی شایان در رسیدن به شناختی جامع از رفتار سیستم است، بلکه یک ضرورت برای ارزیابی فرایند، قبل از اجرای آن در مقیاس صنعتی محسوب می‌شود. مدلهای ریاضی برای فرایندهای تصفیه آب و فاضلاب نه تنها در مرحله طراحی فرایندها در مقیاس صنعتی یک ضرورت محسوب می‌شوند، بلکه کمک قابل ملاحظه‌ای به راهبران فرایند نیز خواهند بود.

روش تحقیق :

هدف اصلی این تحقیق بسط یک مدل ریاضی برای توصیف فرایند دنیتریفیکاسیون در راکتورهای بستر شناور است. یک مدل ریاضی برای توصیف این فرایند باید جنبه‌های مختلف واکنش و رفتار هیدرولیکی راکتورهای بستر شناور را مد نظر قرار دهد. از طرفی یک مدل ریاضی پیچیده گرچه خطای محاسبات کمتری خواهد داشت، اما نیاز به اطلاعات گوناگونی داشته و خطای اطلاعات در آن زیاد خواهد بود. بنابراین به عنوان نخستین قدم برای مدل سازی واکنش بیولوژیکی در راکتور بستر شناور از پیچیدگی پرهیز شده و فرضیات زیر در نظر گرفته شده‌اند:

- شرایط حالت پایدار در راکتور بر قرار است ؛
- تنها واکنش در راکتور، احیاء بیولوژیکی نیترات و تبدیل آن به گاز نیتروژن می‌باشد که فقط در فیلم بیولوژیکی رخ می‌دهد؛
- واکنش بیولوژیکی در حضور ماده آلی اضافه رخ داده و تنها غلظت نیترات، کنترل کننده سرعت ذاتی واکنش است؛
- شرایط فیزیکی عملکرد (سرعت جریان، کمیت و کیفیت ذرات حامل، درجه حرارت و...) در طول راکتور ثابت فرض می‌شود.

برای بسط مدل، جنبه‌های مختلف فرایند در سه زیر - مدل بررسی گشته‌اند. گرچه این سه زیر - مدل هر یک گوشه‌ای از فرایند را در نظر داشته و متمایز می‌باشند، اما مدل کلی از ترکیب

تمامی آنها حاصل خواهد شد. این سه زیر مدل عبارتند از:

۱ - زیر مدل شناور سازی که در آن معادلات مربوط به دانسیته ظاهری ذره بیولوژیکی، شناور سازی و انبساط بستر با یکدیگر ارتباط داده می‌شوند. حل همزمان این معادلات، به رسیدن به یک ضخامت فیلم در حالت تعادل، و در نتیجه غلظت توده بیولوژیکی برای مجموعه‌ای از شرایط فیزیکی عملکرد، منجر خواهد شد. پارامترهای اصلی محاسبه شده در این زیر مدل، ضخامت تعادلی فیلم بیولوژیکی، غلظت توده بیولوژیکی و در نهایت تخلخل بستر می‌باشند که همگی در مدل کلی مورد استفاده قرار خواهند گرفت. در مجموع این زیر - مدل رفتار هیدرولیکی یک راکتور بستر شناور را پیش بینی می‌کند؛

۲ - زیر مدل جریان، که واکنش بیولوژیکی و انتقال سوبسترا را در طول راکتور توصیف می‌نماید. سرعت واکنش مطابق معادله Michaelis - Menten بیان می‌گردد. انتقال سوبسترا در طول راکتور نیز از طریق انتقال جرم و مومنتوم خواهد بود. مجموعه واکنش و انتقال در طول راکتور از طریق دخالت دادن تخلخل و ضریب تأثیرگذاری در عبارت مربوط به واکنش به شکل ریاضی بیان می‌گردد ؛

۳ - زیر مدل واکنش در ذره بیولوژیکی، که واکنش و انتقال جرم در فیلم تشکیل شده بر روی ذره حامل را بررسی می‌نماید. نتیجه این مدل ضریب تأثیرگذاری در هر ارتفاع از راکتور است که برای حل زیر مدل جریان ضروری می‌باشد. تأثیر انتقال جرم بر سرعت واقعی واکنش و فاصله شرایط عملکرد با راکتور با حالت بهینه در این زیر مدل مشخص خواهد شد.

ترکیب این سه زیر مدل به حل مدل ریاضی دنیتریفیکاسیون در راکتور بستر شناور بیولوژیکی خواهد انجامید. این مدل به سه گروه اطلاعات اولیه نیاز خواهد داشت. این سه گروه اطلاعات به شرح زیر است:

۱ - شرایط عملکرد که خصوصیات جریانی را که باید مورد تصفیه قرار گیرد بیان می‌کند. این پارامترها عبارتند از:

- دبی جریان ورودی؛
- غلظت نیترات در جریان ورودی ؛
- درجه حرارت جریان ورودی؛

۲ - ثابتهای فیزیکی و بیولوژیکی که شامل موارد زیر است:

- ویسکوزیته سیال؛
- دانسیته سیال؛
- ضرایب نفوذ سوبسترا در توده سیال و در فیلم بیولوژیکی؛
- ثابت بیولوژیکی شدت حداکثر مصرف سوبسترا و ثابت نیمه اشباع؛

۳ - پارامترهای طراحی که برای رسیدن به عملکرد بهینه در اختیار طراحی است. این پارامترها عبارتند از:

- ارتفاع بستر؛
- سطح مقطع راکتور؛
- قطر ذرات حامل؛
- دانسیته ذرات حامل؛
- مقدار ذرات حامل.

پس از ورود اطلاعات فوق و حل مدل، خروجی مدل دنیتریفیکاسیون در راکتور بستر شناور شامل موارد زیر خواهد بود :

- ضخامت فیلم بیولوژیکی در بستر؛
- غلظت توده بیولوژیکی در بستر؛
- تخلخل بستر؛
- پروفیل غلظت نیترات در طول راکتور؛
- تغییرات ضریب تأثیرگذاری در طول راکتور.

برای حل مدل، یک برنامه کامپیوتری به زبان بیسیک تدوین گردیده است. شمایی کلی از مدل دنیتریفیکاسیون در راکتور بستر شناور بیولوژیکی و الگوریتم برنامه کامپیوتری در شکل(۱) نشان داده شده‌اند. در این شکل نحوه ارتباط سه زیر - مدل شناورسازی، جریان و واکنش در ذره بیولوژیکی با یکدیگر مشاهده می‌گردد. برای حل معادلات دیفرانسیلی توصیف کننده رفتار راکتور، از روشهای عددی استفاده شده است .

بحث و نتیجه گیری :

به منظور بررسی صحت و دقت مدل، نتایج آزمایشهای پایلوت در مراجع مختلف با پیش بینی مدل حاضر مقایسه گردیده است. از آنجاکه دقت یا عدم دقت مدل به بهترین شکل در پروفیل غلظت نیترات در راکتور مشخص می‌گردد، تنها مراجعی قابل استفاده‌اند که روند تغییرات غلظت نیترات در طول راکتور را

ارائه نموده باشند.

نقطه آغاز فرایند دنیتریفیکاسیون در راکتورهای بستر شناور بیولوژیکی تحقیقات John Jeris (1975) بوده است. وی در مقاله‌ای نتایج حاصل از آزمایشهای خود را ارائه کرده است. متأسفانه توضیحات ارائه شده در این مرجع در خصوص شرایط عملکرد، بویژه ضخامت فیلم و غلظت توده بیولوژیکی ناکافی است. در شکل (۲) پروفیل غلظت به دست آمده در این تحقیق با پیش‌بینی مدل برای درجه حرارت ۲۳°C مقایسه شده است. [2] پیش‌بینی مدل، مطابقت خوبی با نتایج عملی ندارد. دلیل این امر احتمالاً پیر بودن توده بیولوژیکی موجود در راکتور است. رفتار بسترهای بیولوژیکی پیر کاملاً از بسترهای بیولوژیکی جوان متفاوت می‌باشد. این تفاوت بویژه در غلظت بمراتب بیشتر توده بیولوژیکی در بسترهای پیر مشاهده می‌گردد. روش جداسازی مورد استفاده Jeris و همکارانش، ایجاد نیروی برشی با همزن در انتهای فوقانی راکتور بوده است. دراین روش، عمل جداسازی فیلم بیولوژیکی از ذره حامل، ناقص انجام شده و عمدتاً لایه‌های جوان بیرونی از ذره جدا می‌گردند و در نتیجه لایه‌های پیر درونی روی ذره باقی می‌مانند. چنین به نظر می‌رسد که مدل حاضر برای راکتورهایی که عمل جداسازی لجن در آنها به طور کامل و در خارج از راکتور صورت نمی‌پذیرد، پیش‌بینی مناسبی ارائه نخواهد داد.

Terlouw (1979) و Eggers یک مدل دینامیک برای دنیتریفیکاسیون در راکتورهای بستر شناور ارائه داده‌اند. این مدل نیز واکنش در ذره بیولوژیکی و انتقال سوبسترا در طول راکتور را به عنوان معادلات اصلی توصیف‌کننده سیستم در نظر می‌گیرد. در این مدل واکنش بیولوژیکی در دو مرحله انجام می‌گیرد. در مرحله نخست نیتریت به عنوان ماده واسطه تولید گردید. احیای نیتریت با توجه به بازدارندگی نیترات، در دو مدل سنتیتیکی رقابتی و غیر رقابتی توصیف گردیده است. همچنین ضخامت فیلم بیولوژیکی به دو قسمت تقسیم شده است. در لایه بیرونی احیانیترات و نیتریت رخ می‌دهد در لایه درونی تنها نیتریت احیا می‌شود. ضخامت دو لایه توسط غلظت نیترات در سطح تماس فیلم - سیال و ضخامت نیتریت در حد فاصل دو لایه تعیین می‌گردد. برای واکنش بیولوژیکی از معادله Michaelis - Menten استفاده شده است. [3]

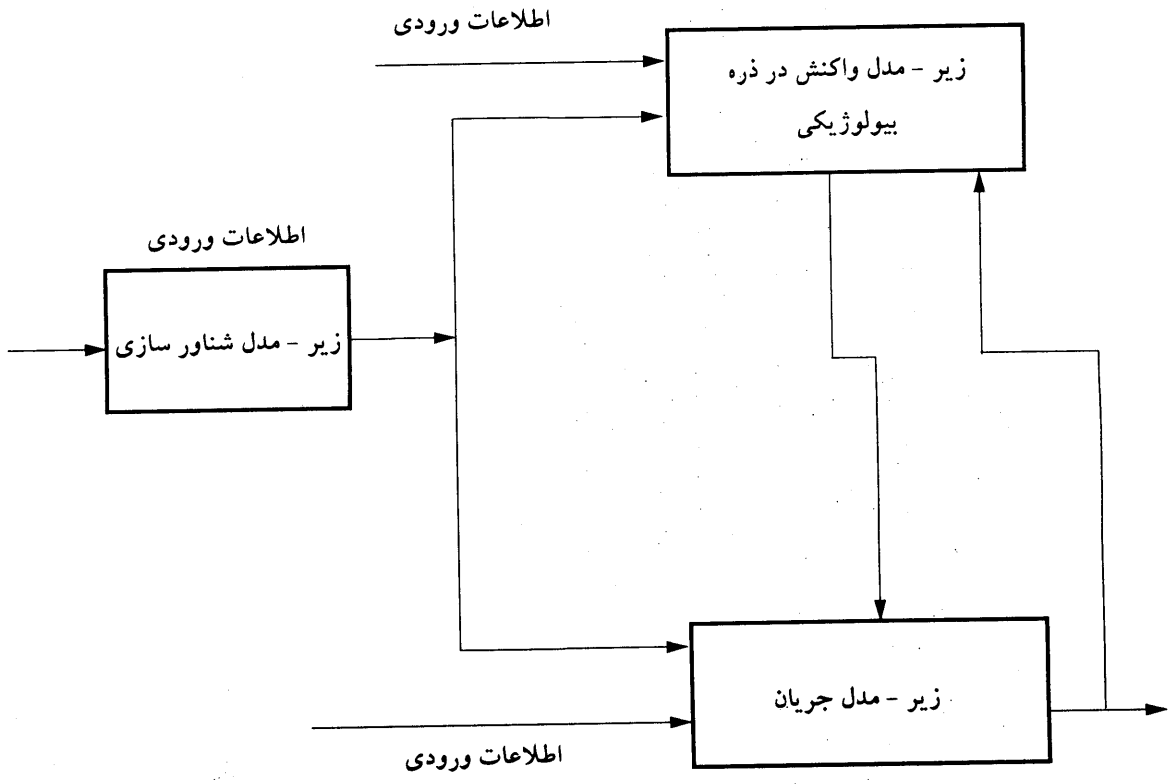
برای بررسی صحت مدل یک پایلوت با استفاده از ماسه به عنوان ذره حامل، مورد بهره‌برداری قرار گرفته است. گرچه قطر ذرات به کار رفته ذکر نشده است، اما با توجه به اطلاعات ارائه شده در باره ذرات بیولوژیکی می‌توان این قطر را محاسبه نمود. شکل (۳) پروفیل نیترات در طول راکتور را در آزمایشهای به عمل آمده برای این مدل و نیز پیش‌بینی مدل Eggers را با پیش‌بینی مدل این تحقیق مقایسه می‌کند. همانگونه که مشاهده می‌شود توافق بسیار خوبی بین نتایج پایلوت و مدل ارائه شده در این تحقیق، وجود دارد.

در آزمایشهایی که توسط Richard (1980) و همکاران او انجام شده، پروفیل غلظت نیترات در راکتور بستر شناور بیولوژیکی برای سه سرعت سطحی متفاوت ارائه گردیده است.[4] خوشبختانه توضیحات ارائه شده در باره شرایط عملکرد راکتور در این تحقیق کامل بوده و امکان بررسی دقیق را فراهم می‌سازد. شکلهای (۴) و (۵) و (٦) بترتیب پروفیل غلظت نیترات در طول راکتور و پیش‌بینی مدل برای درجه حرارت ۱۴°C را نشان می‌دهد. در مجموع توافق بسیار خوبی بین نتایج عملی و پیشبینی مدل حاضر وجود دارد. مقدار تخلخل بستر در این تحقیق ۰/۷۷ - ۰/۷ برای سرعتهای ۴۰-۲۰ m/hr ذکر شده است، که این رقم با محدوده ۰/۸۱-۰/۷۱ پیش‌بینی شده توسط مدل، مطابقت قابل قبولی دارد. غلظت توده بیولوژیکی برای هر سه حالت عملکرد ۱۰۰۰۰ mg/lit گزارش شده است. در عمل وجود یک غلظت توده بیولوژیکی ثابت برای سه سرعت سطحی مختلف غیر ممکن است. پیش‌بینی مدل محدوده ۱۶۷۰۰-۱۰۸۰۰ mg/lit برای سرعتهای ذکر شده است. پیش‌بینی مدل بر اساس ضخامت فیلم بیولوژیکی برابر با ۳۰۰ میکرون انجام شده، که مطابق ضخامت فیلم ذکر شده در مرجع است.

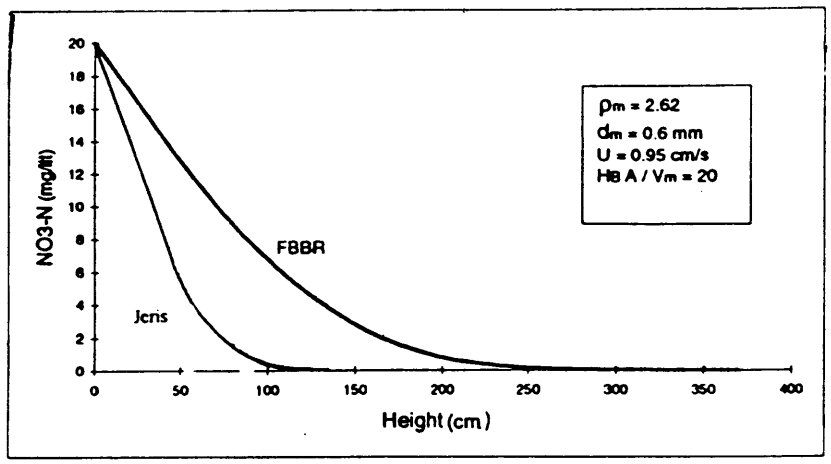
Liessens (1993) و همکاران، یک پایلوت با ظرفیت نسبتاً بالا برای دنیتریفیکاسیون آب آشامیدنی را برای حدود ۴ سال مورد بهره‌برداری قرار داده‌اند. پروفیل نیترات در طول راکتور در شکل (۷) نشان داده شده است.[5] پیش‌بینی مدل برای درجه حرارت عملکرد راکتور (۱۰/۵°C) در همین شکل ترسیم گردیده است. ارتفاع راکتور در مدل کمتر از ارتفاع واقعی راکتور

در نظر گرفته شده است. زیرا مقدار ماده کربنی در ارتفاع ۳۲۰cm به صفر می‌رسد و در نتیجه حذف نیترات در این ارتفاع متوقف خواهد شد. در عمل نیز در راکتور پس از این ارتفاع دنیتریفیکاسیون قابل ملاحظه‌ای صورت نگرفته است. در این پایلوت جداسازی فیلم بیولوژیکی از ذرات حامل، در خارج از راکتور و به طور کامل صورت می‌گرفته است. همانگونه که در شکل مشخص است مدل دنیتریفیکاسیون در راکتورهای بستر شناور گرچه راندمان حذف را بخوبی پیش‌بینی می‌کند، اما پروفیل غلظت نیترات در اواسط راکتور را به دقت ارائه نمی‌نماید. نکته عجیب در این تحقیق انحراف از واکنش درجه صفر در غلظت حدود ۸ mg/lit می‌باشد. این امر دلیل اصلی اختلاف در پروفیل غلظت پیش بینی شده و واقعی است. به نظر می‌رسد که دلیل اصلی این اختلاف، پایین بودن غلظت مواد آلی در اواسط راکتور (در حدود ۱ mg/lit) و کنترل سرعت واکنش توسط غلظت ماده آلی در حضور نیترات اضافی است که با فرضیه اصلی مدل دنیتریفیکاسیون در راکتور بستر شناور بیولوژیکی متفاوت خواهد بود. به هر صورت پیش‌بینی مدل در مورد این آزمایش پایلوت نیز قابل قبول به نظر می‌رسد.

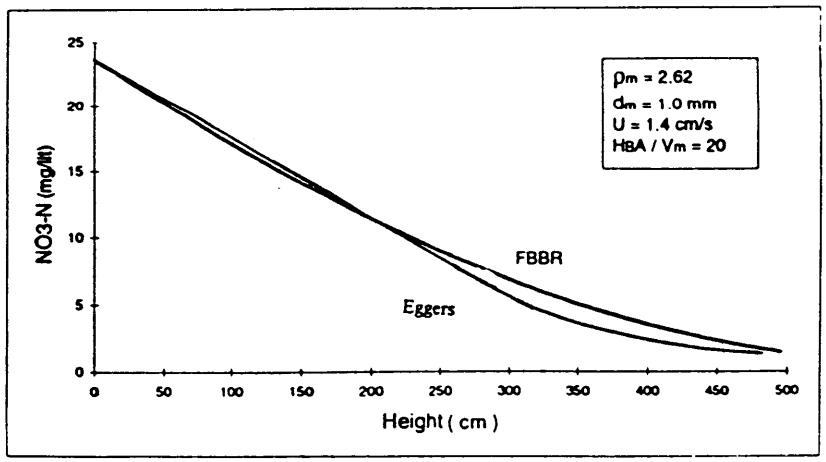
به طور خلاصه بررسی نتایج حاصل از مدل با نتایج آزمایشهای پایلوت و مراجع مختلف نشان می‌دهد که مدل ارائه شده فرایند دنیتریفیکاسیون در راکتورهای بستر شناور را بخوبی توصیف می‌کند. با استفاده از این مدل همچنین می‌توان رفتار سیستم در شرایط مختلف و پاسخ آن به تغییرات گوناگون در شرایط عملکرد را بررسی کرد و از آن در بهینه سازی فرایند استفاده نمود.



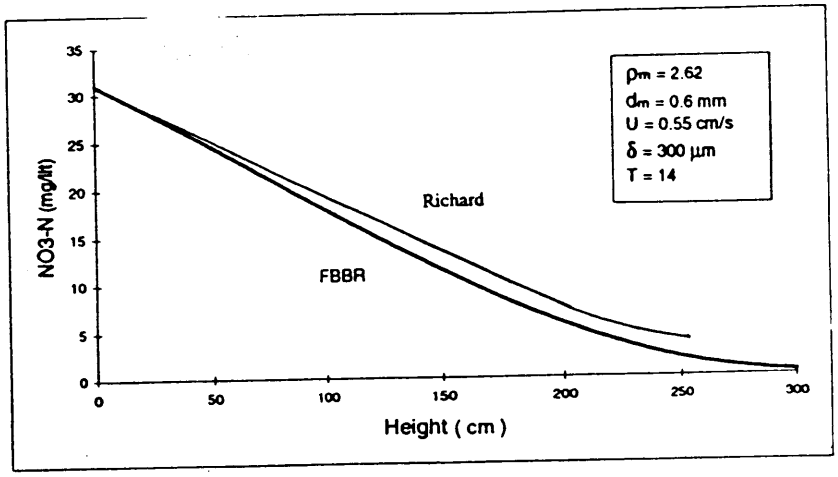
شکل شماره ۱ - شمایی کلی از ارتباط اجزای مدل ریاضی



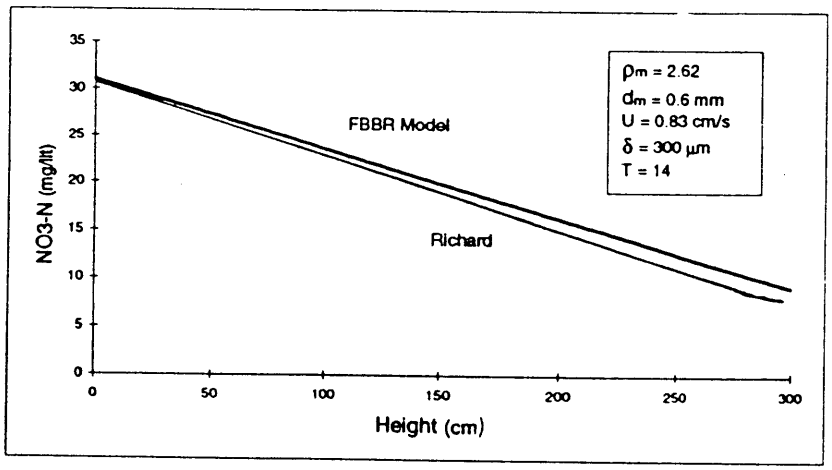
شکل شماره ۲ - مقایسه نتایج مدل و آزمایشهای Jeris و همکاران



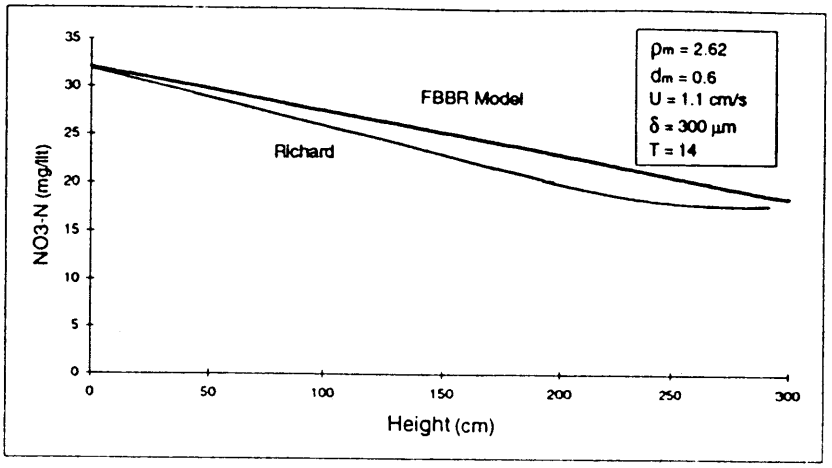
شکل شماره ۳ - مقایسه نتایج مدل و مطالعات Eggers و همکاران



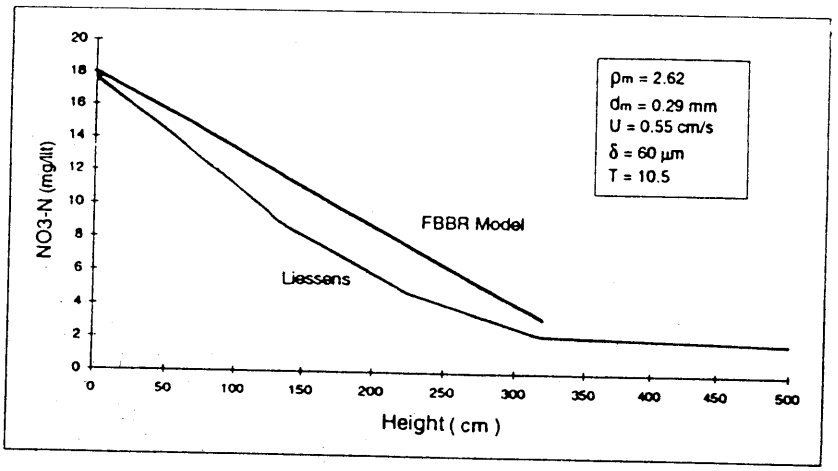
شکل شماره ۴ - مقایسه نتایج مدل و آزمایشهای Richard و همکاران



شکل شماره ۵ - مقایسه نتایج مدل و مطالعات Richard و همکاران



شکل شماره ۶ - مقایسه نتایج مدل و آزمایشهای Richard و همکاران



شکل شماره ۷ - مقایسه نتایج مدل و مطالعات Liessens و همکاران

منابع :

۱- حکمی، امیر. ۱۳۷۵. مدل ریاضی دنیتریفیکاسیون در راکتورهای بستر شناور بیولوژیکی، پایان نامه کارشناسی ارشد. دانشکده محیط زیست دانشگاه تهران.

2 - Jeris, J. S. and Owens, R. W. 1975. Pilot - Scale, High-rate Biological Denitrification. JWPCF, Vol . 47, No. 8.

3 - Eggers, E. and Terlouw, T. 1979. Biological denitrification in a fludized bed with sand as carrier material. Wat. Res., Vol. 13: 1077-1090.

4 - Richard, Y. et al. 1980. Denitrification of Water for Human Consumption. Prog. Wat. tech., Vol.12: 173-191.

5 - Liessens, J. et al. 1993. Removing nitrate with a methylotrophic fludized bed: Technology and operating performance. J. AWWA: 144-154.