

استفاده از روشهای نوین در تصفیه فاضلاب شهری با هدف حذف نیتروژن و فسفر

محمدرضا فلاح پور^۱، مجتبی فاضلی^۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی آب و فاضلاب دانشگاه صنعت آب و برق (شهید عباسپور)

۲- استاد گروه مهندسی آب و فاضلاب دانشگاه صنعت آب و برق (شهید عباسپور)

خلاصه

ترکیبات نیتروژن و فسفر در پساب تصفیه خانه های فاضلاب سبب معضلات و مشکلات خطرناکی می شوند که به عنوان نمونه بیماری متوهموگلوبینیا در نوزادان در اثر مصرف آب آلوده به نیترات از آن جمله است. روشها و فرآیندهای مختلفی جهت نیل به کاهش نیتروژن پساب فاضلاب تا حد استاندارد در مقیاسهای مختلف بکار گرفته شده اند که یکی از آنها روش A^2/O در فرآیند لجن فعال می باشد بطوریکه می توان نشان داد ۶۳٪ اکسیژن مورد نیاز برای فرآیند نیتریفیکاسیون قابل بازیابی است و این بدان معنی است که روش مذکور می تواند در کاهش مصرف انرژی جهت استفاده از دمنده های هوا نیز بسیار موثر باشد.

کلمات کلیدی: فاضلاب، نیتریفیکاسیون، دنیتریفیکاسیون، حذف نیتروژن و فسفر، لجن فعال

مقدمه

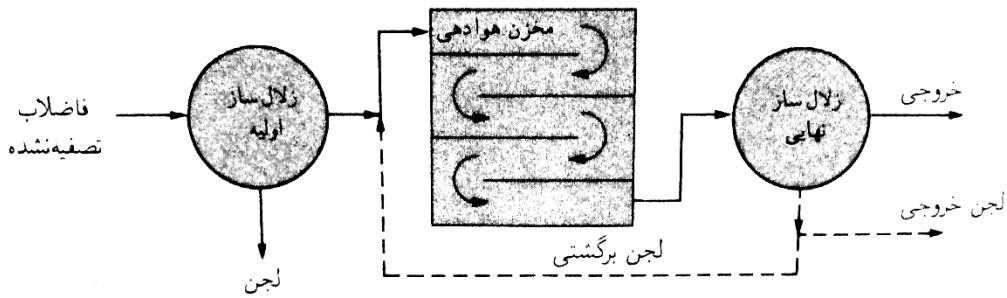
هنگامیکه انسان در چرخه طبیعی آب دست می برد و علی رغم تلاش فراوان برای جلوگیری از نابودی و آلوده سازی منابع مختلف آب، مسبب خطرات بعضاً جبران ناپذیری در این عرصه می گردد، نیاز به استفاده از روشهای نوین برای جلوگیری از آلوده سازی منابع آب قابل تأمل می نماید. در چرخه ای که انسان آب را برای رفع نیازهای روزمره خود مورد استفاده قرار می گیرد، آخرین بخش این چرخه قبل از ورود به آبهای پذیرنده (رودخانه، دریا، دریاچه و غیره) تصفیه فاضلاب است. بطور کلی فاضلاب عبارتست از جریان آب زائد ناشی از مصرف آب در فعالیتهای مختلف انسانی که می تواند حاوی آلاینده های مختلف فیزیک، شیمیایی و بیولوژیکی بوده و با آلودگی محیط زیست، سلامت انسانها را به مخاطره بیندازد. از طرف دیگر ۹۹/۹٪ فاضلاب را آب تشکیل می دهد و تنها ۰/۱٪ فاضلاب از مواد خارجی شامل مواد محلول، معلق (قابل ته نشینی / غیر قابل ته نشینی)، آلی و معدنی می شود. اما وجود همین مقدار به ظاهر اندک آنچنان می تواند لطمات جبران ناپذیری را به محیط زیست وارد کند که در هر کشور بندی از قانون اساسی هر کشور به این مسئله پرداخته شده است. دراصل پنجاهم قانون اساسی جمهوری اسلامی ایران آمده است: "در جمهوری اسلامی، حفاظت محیط زیست که نسل امروز و نسلهای بعد باید در آن حیات اجتماعی رو به رشدی داشته باشند، وظیفه عمومی تلقی میگردد. از این رو فعالیتهای اقتصادی و غیر آن که با آلودگی محیط زیست یا تخریب غیر قابل جبران آن ملازمه پیدا کند، ممنوع است".

در صورتی که بتوان در محل تصفیه خانه مواد زائد و مضر را از فاضلاب جدا نمود و طبق استانداردهای تعریف شده میزان آلاینده های موجود در آن را به حد تعیین شده رساند می توان امیدوار بود که تخلیه پساب (فاضلاب تصفیه شده) به آبهای پذیرنده مشکلی را برای اکوسیستم و محیط زیست منطقه ایجاد نمی نماید. آنچه مشخص است تصفیه خانه های فاضلاب شهری در گذشته عموماً با هدف حذف آلاینده های آلی، مواد معلق و آلاینده های میکروبی احداث شده اند. با توجه به مشخص شدن اثرات ترکیبات نیتروژنه و فسفره در محیط های آبی (عمدتاً سمیت امونیاک، رشد زیاد گیاهان آبی و ایجاد پدیده یوتروفیکاسیون، آلودگی آبهای زیرزمینی به نیترات) باعث گردید که محدودیت هایی درغلظت این ترکیبات در پسابهای ورودی به محیط و آبهای پذیرنده اعمال گردد. از جمله موارد عینی تاثیر ورود آلاینده های موجب یوتروفیکاسیون میتوان به بروز آن در دریای مازندران (شکل ۱) اشاره نمود.

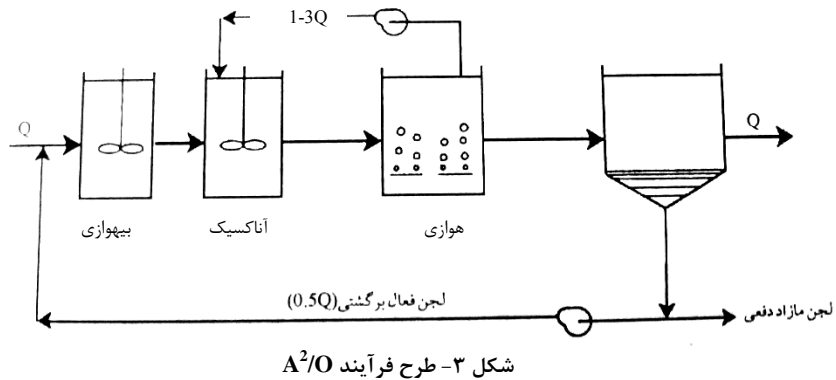


شکل ۱- وقوع پدیده یوتریفیکاسیون در دریای مازندران (نواحی سبز رنگ)

امروزه باید در طراحی تصفیه خانه های فاضلاب شهری به حد این ترکیبات از فاضلاب توجه نیز شود و سیستمهای طرح شده جهت تصفیه فاضلاب شهری باید قادر به حذف ترکیبات ازته و فسفر، تا حد استاندارد باشد. از طرفی در بعضی مواقع برای دستیابی به استانداردهای توصیه شده، لازم است نیتروژن و فسفر هر دو حذف شوند. بعلاوه فرآیندهای بیولوژیکی برای حذف این دو آلاینده نسبتاً به سهولت با سیستم های استاندارد لجن فعال ترکیب می شوند. این عوامل باعث شده که سیستم های متعددی جهت انجام این امور مورد استفاده قرار گیرد. در تمام این سیستم ها، اجزا اساسی مشابه و شامل بخش های بیهوازی، انوکسیک و هوازی می باشد و تفاوت آنها در تعداد بخش های تشکیل دهنده، ترتیب آنها و محل های برگشت جریان است. [۱] یکی از این فرآیندها A^2/O می باشد (Anaerobic-Anoxic-Oxic) که در مواقعی که نیاز به حذف آمونیاک به تنهایی (نیترات سازی) و حذف نیتروژن (نیترات سازی- نیترات زدایی) می باشد از آن استفاده می شود. در این فرآیند یک ناحیه آنوکسیک ما بین بیهوازی و هوازی قرار می گیرد که سبب حذف آمونیاک و کاهش بار نیترات موجود در لجن برگشتی وارده به ناحیه بیهوازی می شود. زیرا بواسطه وجود این ناحیه مقداری از نیتروژن تحت تاثیر فرآیند نیترات زدایی حذف می شود که این امر کارایی این سیستم را جهت حذف فسفر بهبود می بخشد. زیرا وجود نیترات در لجن برگشتی ورودی به ناحیه بیهوازی سبب کاهش راندمان حذف فسفر می شود. در هر صورت با بازگرداندن محلول آمیخته نیتریفای شده از بخش هوازی، اکسیژن موجود در ترکیبات شیمیایی بصورت نیترات یا نیتريت به آن وارد می شود. غلظت مورد انتظار فسفر در پساب خروجی، بدون صاف کردن کمتر از 2mg/lit است؛ با صاف کردن پساب خروجی، ممکن است غلظت فسفر از $1/5\text{ mg/lit}$ کمتر شود. [۲]



شکل ۲- طرح ساده فرآیند لجن فعال



شکل ۳- طرح فرآیند A^2/O

مهمترین مزایای فرآیند A^2/O را می توان بطور خلاصه به شرح ذیل اعلام کرد:

- کارایی در سرعت های بالای باردهی
- ارزش کودی لجن دور ریز با مقدار نسبتاً زیادی فسفر (۳ تا ۵٪)

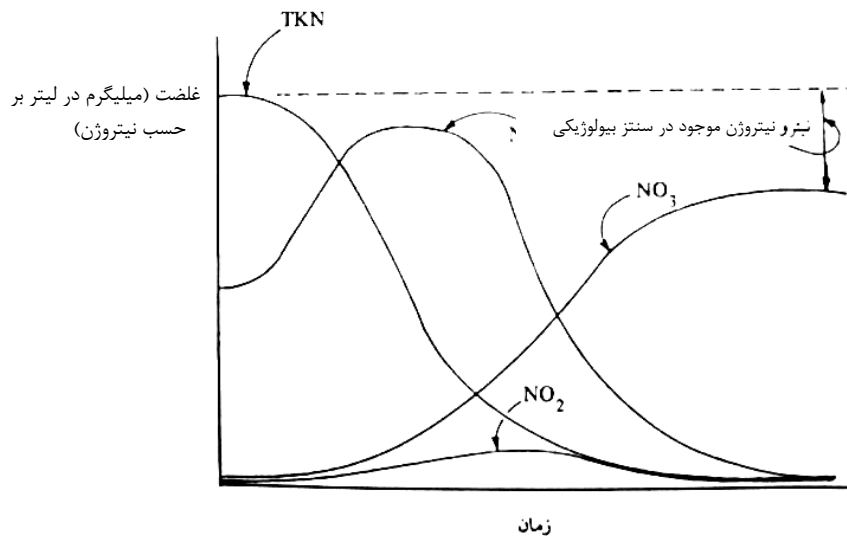
تنها عیب شاخص این روش نامطمئن بودن عملکرد آن در هوای سرد می باشد که از فرآیند A/O (حذف فسفر به تنهایی) پیچیدگی بیشتری دارد. [۳]

آشنایی با اصول اولیه مورد استفاده در فرآیند A^2/O در مقایسه با لجن فعال متعارف

در فاضلاب شهری، عمدتاً با منشأ خانگی، نیتروژن به شکل آلی و آمونیومی موجود است. این ترکیبات، عمدتاً زائدات ناشی از سوخت و ساز پروتئین در بدن انسان می باشند. در فاضلاب تازه حدود ۶۰٪ از نیتروژن به شکل آلی و ۴۰٪ به شکل آمونیومی است. در اثر تجزیه باکتریایی ترکیبات پروتئینی و هیدرولیزه اوره، نیتروژن آلی تبدیل به نیتروژن آمونیومی می شود. بطور معمول در فاضلاب تازه مقدار کمی نیتروژن (کمتر از یک درصد) به شکل اکسید شده نیترات یا نیتريت وجود دارد.

فسفر در فاضلاب به شکل ارتوفسفات (PO_4^{-3})، پلی فسفات (P_2O_7) و ترکیبات آلی فسفر دیده می شود. دو ترکیب آخری تا ۷۰٪ فسفر ورودی را تشکیل می دهد. میکروبها در حین سنتز سلولی و انتقال انرژی، فسفر را مصرف می کنند. در نتیجه ۱۰ تا ۳۰٪ فسفر ورودی در حین تصفیه بیولوژیکی ثانویه جداسازی می شود. اما رمز موفقیت در جداسازی بیولوژیکی فسفر، قرار دادن میکروارگانیسمها در معرض شرایط متناوب بیهوازی و هوازی است. وقتی میکروارگانیسمها در معرض شرایط متناوب قرار گیرند، دچار تنش می شوند بطوریکه جذب فسفر آنها بیشتر از حد عادی خواهد بود. فسفر نه تنها برای نگهداری سلول، سنتز و انتقال انرژی مصرف می شود بلکه برای استفاده بعدی میکروارگانیسمها نیز ذخیره می شود.

نیتروژن آلی موجود در فاضلاب خام ممکن است به آمونیاک تبدیل شود. این تبدیل از طریق تجزیه باکتریایی مواد پروتئینی و هیدرولیز اوره صورت می پذیرد. در هر سیستم تصفیه بیولوژیکی، همیشه مقداری رشد باکتریایی اتفاق می افتد، چون ۱۲-۱۳ درصد جرم خشک سلولی را نیتروژن تشکیل می دهد، مقداری نیتروژن آمونیاکی جذب سلولهای جدید می شود. همچنین اکسیداسیون خود بخودی و لیز شدن سلولی، بسته به فرآیند تصفیه و شرایط بارگذاری، اتفاق خواهد افتاد. از این رو، بخشی از آمونیاک مورد استفاده برای سنتز سلول، از طریق لیز شدن و اکسیداسیون خود بخودی، مجدداً به فاضلاب بر می گردد. نیتروژن جذب شده باقی مانده می تواند بصورت رشد خالص یا لجن بیولوژیکی دفعی، از سیستم حذف گردد.

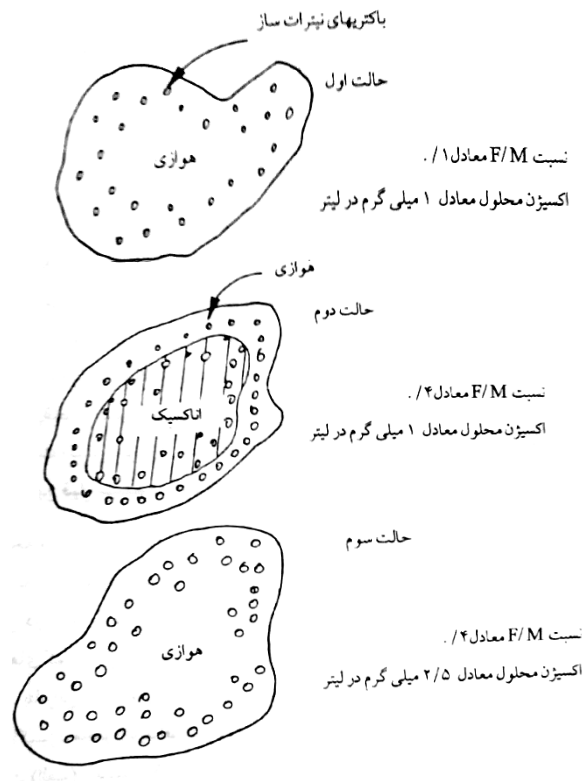


نمودار ۱- فرآیندهای بیولوژیکی تبدیل نیتروژن

تحت شرایط مناسب، نیتروژن آمونیاکی می تواند در طی یک فرآیند دو مرحله ای به نیترات تبدیل شود. این فرآیند که در حضور اکسیژن بوسیله دو گروه از میکروارگانیسم ها (نیترات سازها) انجام می شود، نیترات زایی نامیده شده است. (نیتروزوموناس و نیتروباکتر). سرانجام ممکن است نیترات از طریق فرآیندی به نام نیترات زدایی به گاز نیتروژن تبدیل شود. این تبدیل در غیاب اکسیژن بوسیله میکروارگانیسمهای نیترات زدا انجام می پذیرد. برای انجام فرآیند نیترات زدایی، یک منبع کرن آلی احتیاج است. گاز نیتروژن تولیدی به اتمسفر وارد می شود. حدود 1 mgN/lit نیتروژن آلی

محلول غیر قابل تجزیه در پساب باقی خواهد ماند. [۱]

مسئله مهمی که در حذف هر دو ترکیبات نیتروژن و فسفر وجود دارد میزان اکسیژن محلول در فاضلاب می باشد.



شکل ۴- تأثیر نسبت F/M بر فرآیند نیترات سازی [۱]

به منظور حفظ فرآیند نیترات زایی در حداکثر میزان، با کاهش SRT (زمان ماند جامدات برای انجام فرآیند نیترات زایی) غلظت اکسیژن محلول باید افزایش یابد. البته باید توجه داشت که با کاهش SRT، سرعت مصرف اکسیژن به دلیل اکسیداسیون کربن افزایش یافته، در نتیجه نفوذ اکسیژن کاهش می یابد. بالعکس در SRT بالا، سرعت پایین مصرف اکسیژن اجازه نفوذ اکسیژن حتی در غلظت های کم اکسیژن را می دهد و بنابراین نیترات زایی با سرعت بالا اتفاق می افتد. البته باید این نکته را در نظر داشت که با افزایش نرخ هوادهی هر چند غلظت اکسیژن محلول در توده مایع افزایش می یابد، ولی به دو دلیل زیر بازده انتقال اکسیژن کاهش پیدا می کند:

- کاهش زمان تماس بین حباب هوا و توده مایع به دلیل افزایش سرعت خروج حبابها از نازل هوا
- کاهش نیروی محرکه انتقال به دلیل افزایش غلظت اکسیژن محلول در توده مایع

در مورد فسفر تاثیر هوادهی به این ترتیب است که با افزایش نرخ هوادهی بازده حذف فسفر کاهش می یابد. رابطه بین غلظت فسفر کل خروجی و نرخ هوادهی را با یک معادله خطی می توان توصیف کرد. اگر مقوله لجن را نیز در نظر بگیریم در نرخ های هوادهی مشابه غلظت فسفر کل خروجی در سن لجن ۱۵ روز کمتر از سن لجن ۳۰ روز می باشد. با توجه به مکانیزم حذف بیولوژیکی فسفر انتظار می رود که در نرخ های هوادهی پایین بازده حذف فسفر بالاتر باشد. همچنین با توجه به خارج کردن مقدار بیشتری لجن اضافی در سن های لجن پایین تر، انتظار می رود که غلظت فسفر کل خروجی در سن های لجن پایین تر کمتر باشد. (رجوع به USEPA, 1987).

$$y(\text{mg / lit}) = 0.0023x + .469 \quad 15\text{day sludge}$$

$$y(\text{mg / lit}) = 0.001x + .398 \quad 30\text{day sludge}$$

که در آن y ، غلظت فسفر کل و x ، سن لجن می باشد. [۴]

چرا محیط آنوکسیک؟

تبدیل بیولوژیکی نیترات به اشکال احیا شده تر، از قبیل NO ، N_2O ، N_2 را فرآیند نیترات زدایی می گویند. این فرآیند توسط انواع مختلف ارگانسیم های هتروتروف اختیاری-سودوموناس- (بر خلاف میکروارگانسیم های فرآیند نیترات زایی یعنی نیتروزوموناس و نیتروباکتر که اتوتروف هستند) که قادرند از نیترات به جای اکسیژن بعنوان گیرنده نهایی الکترون استفاده نمایند، انجام می شود. تجزیه ترکیبات آلی کربن دار در فرآیند نیترات زدایی با آنچه که در فرآیندهای هوازی رخ می دهد مشابه است و تنها اختلاف آن در مراحل پایانی انتقال الکترون است. در نتیجه اصطلاح نیترات زدایی بدون

اکسیژن، مناسب تر از نیترات زدایی بیهوازی می باشد. این امر نیاز به شرایط آنوکسیک مطلق در سیستم نیترات زدایی را نشان می دهد. [۱]

فرآیند نیترات زدایی بدون حضور مواد کربن دار امکان پذیر نیست.

تشریح واکنش موازنه ای نیترات زدایی، به میزان مواد کربنه موجود بستگی دارد. واکنش متانول که بطور گسترده ای به عنوان منبع خارجی کربن مورد استفاده قرار می گیرد به صورت زیر است:



واکنش تجربی سنتز سلولی عبارت است از:



این واکنش نشان می دهد به ازاء هر گرم نیترات حذف شده:

- ۲/۴۷ گرم متانول (یا تقریباً ۳/۷ گرم COD) مصرف می شود.

- ۰/۴۵ گرم سلولهای جدید تولید می شود.

- ۳/۵۷ گرم قلیائیت تولید می شود.

همچنین میزان نیترات زدایی به درجه حرارت و غلظت اکسیژن محلول بستگی دارد.

$$R_{DN}(T) = R_{DN}(T_0) \cdot K^{(T-T_0)} \cdot (1 - I) \quad (3)$$

محدوده k بین ۱/۱-۱/۰۳ است. معمولاً مقدار ۱/۰۹ مورد استفاده قرار می گیرد. مقدار نیترات زدایی به غلظت DO قابل تجزیه بیولوژیکی هم بستگی دارد.

جدول (۱) میزان نیترات زدایی در استفاده از منابع مختلف کربن

منبع	درجه حرارت °C	میزان نیترات زدایی $\text{gNO}_3\text{-N XgNvss-day}$	منبع کربن
۶	۲۵	۰/۲۱-۰/۳۲	متانول
۷	۲۰	۰/۱۲-۰/۹	متانول
۷	۱۵-۲۷	۰/۰۳-۰/۱۱	فاضلاب خانگی
۸	---	۰/۰۷۲-۰/۷۲	فاضلاب خانگی
۷	۱۲-۲۰	۰/۰۱۷-۰/۰۴۸	سوخت و ساز خود ترکیبی

مقادیر بالا برای مواد آلی قابل تجزیه بیولوژیکی در فاضلاب خام می باشد که به راحتی تجزیه می شوند.

سرعت فرآیند نیترات زدایی در شرایط هوازی به قسمت بیهوازی لخته بیولوژیکی و وجود منبع کربن بستگی خواهد داشت. اصطلاح DO در معادله اخیر نشان می دهد که سرعت فرآیند نیترات زدایی زمانیکه غلظت اکسیژن محلول به مقدار ۱ mg/lit می رسد، به طور خطی به سمت صفر کاهش پیدا می کند. سرعت نیترات زدایی تحت شرایط هوازی معادل $\text{gNO}_3\text{-N XgNvss/day}$ ۰/۰۰۶ گزارش شده است. [۵]. در عمل، هنگامیکه غلظت های اکسیژن محلول بیش از ۱ mg/lit باشد، فرآیند نیترات زدایی را می توان نادیده گرفت.

نیترات زدایی؛ کاهش مصرف انرژی؟

۱ میلیگرم نیتروژن آمونیاکی یا نیتروژن کجمدال برای تبدیل به نیترات به ۴/۵۷ میلیگرم اکسیژن نیاز دارد. یعنی حدود ۵ برابر مقدار نیتروژن باید هوا تأمین شود. اما ۱ میلیگرم نیتروژن نیتراتی که دنیتریفای می شود، معادل ۲/۶۸ mg/lit اکسیژن تأمین می نماید. بدین ترتیب هر چند برای نیترات زایی به ۴/۵۷ میلیگرم اکسیژن نیاز است، اما در نیترات زدایی ۲/۸۶ میلیگرم اکسیژن بازیابی می شود؛ بعبارت دیگر اگر نیترات زدایی بطور کامل انجام شود، ۶۳٪ از اکسیژن مورد نیاز برای نیترات زدایی قابل بازیابی است، که با برگشت جریان از حوض آنوکسیک به هوادهی در فرآیند A2/O می توان

این کار را انجام داد.

$$\frac{dO_n}{dt} = 4.57 \frac{dN_a}{dt} \& 1mgNO_3 \text{ as } N \equiv 2.86mgO \text{ as } O$$

این مطلب با سیکل انرژی فرآیند تصفیه (assimilation / dissimilation) کاملاً مطابقت دارد.

راهکارهای کلی برای بهبود فرآیند

برای بهبود فرایند لجن فعال می توان از تمهیداتی به صورت زیر استفاده کرد:

- تخصیص بخشی از حوض هوادهی به مناطق آنوکسیک و بی هوازی و تبدیل آن به فرایند A2/O
- استفاده از رژیم نهرگونه بجای اختلاط کامل که علاوه بر تولید لجن کمتر، حذف مواد آلی بسیار سریعتر و بر خلاف اختلاط کامل که نمودار حذف خطی دارد در این حالت نمودار به شکل لگاریتمی افزایش می یابد.
- تغییر در شکل سازه حوض ها که با تغییر ساده از شکل مقطع |_| به U و یا حتی V می توان بخش قابل توجهی از فضای مرده در عمق حوض ها را از بین برد.
- تأمین منبع کربنی کافی جهت انجام موثر فرآیندها و همینطور تعیین میزان بهینه F/M

جمع بندی و نتیجه گیری

در بعضی مواقع برای دستیابی به استانداردهای توصیه شده لازم است که ازت و فسفر هر دو حذف شوند. بعلاوه فرآیندهای بیولوژیکی برای حذف این دو آلاینده نسبتاً به سهولت با سیستم های استاندارد لجن فعال ترکیب می شوند. در A^2/O که یکی از این سیستم ها می باشد یک ناحیه آنوکسیک مابین بیهوازی و هوازی قرار می گیرد که سبب حذف آمونیاک و کاهش بار نیترات موجود در لجن برگشتی وارده به ناحیه بیهوازی می شود. زیرا بواسطه وجود این ناحیه مقداری از نیتروژن تحت تأثیر فرآیند نیترات زدایی حذف می شود که این امر کارایی این سیستم را جهت حذف فسفر بهبود می بخشد. زیرا وجود نیترات در لجن برگشتی ورودی به ناحیه بیهوازی سبب کاهش راندمان حذف فسفر می شود. میزان مایع مخلوط برگشتی از ناحیه هوازی به آنوکسیک ۱۰۰ تا ۳۰۰ درصد جریان ورودی به تصفیه خانه است. در نتیجه عملکرد این فرآیند حدود ۴۰ تا ۷۰ درصد نیتروژن حذف می شود. اما قابلیت این فرآیند جهت حذف فسفر تا حدودی کمتر از فرآیند A/O (حذف فسفر به تنهایی) است.

پیشنهادی که در اینجا مطرح است امکان قرار دادن صفحات مشبک در بین نواحی هوازی و آنوکسیک است. با تعبیه صفحات مشبک که می تواند از جنس بتن و یا آرزبت باشد، اختلاط ایجاد شده در ناحیه هوازی که توسط نازل ها و یا هوادهای سطحی در فاضلاب رخ می دهد به ناحیه آنوکسیک منتقل نمی شود؛ از طرف دیگر ابعاد سوارخها به نحوی انتخاب می شوند که افت فشار نیز پدیدار نشود و جریان تحت ثقل نواحی مختلف تصفیه را سپری نماید. بارزترین مزیت این ایده جلوگیری از بوجود آمده نواحی مرده در حوض هوادهی است که سبب می شود هوادهی بطور موثرتری به فاضلاب صورت گیرد و همچنین حجم حوض ها کمتر شده و دقت پارامترهای کنترلی مثل زمان ماند و میزان هوای مورد نیاز بدلیل دقیق بودن حجم حوض های هوادهی و آنوکسیک افزایش قابل توجهی یابند.

طرح متصور دیگر تلفیق سه ناحیه هوازی، بیهوازی و آنوکسیک در سیستم بیج و به صورت SBR است، بطوریکه می توان برای جمعیت های کم مرحله پرشدن تانک به عنوان ناحیه بیهوازی، هوادهی توسط نازل های دیفیوزری و یا در صورت امکان هوادهای سطحی به عنوان مرحله هوادهی و اختلاط آرام به نحوی که ته نشینی صورت نگیرد به عنوان ناحیه آنوکسیک مورد بررسی قرار بگیرد. با این فرضیه می توان از فضای قابل توجهی صرفه جویی کرد که در نتیجه آن هزینه ساخت کمتری و بهره برداری روان تری (در هر دو طرح مذکور) از تصفیه خانه را انتظار داشت. علاوه بر این عملاً فاکتورهای اصلی که در A^2/O وجود دارد (مثل برگشت حداقل ۱۰۰٪ جریان ورودی به تصفیه خانه از حوض هوازی به حوض آنوکسیک) نیز کاملاً رعایت می شود.

در هر صورت انجام کار پایلوتی قبل از راه اندازی نهایی تصفیه خانه جهت تدقیق مبانی بهره برداری بسته به محل، شرایط اقلیمی و همینطور میزان و نوع مواد تشکیل دهنده فاضلاب خام، لازم الاجرا خواهد بود.

مراجع

- [۱] ریچارد سدلاک و همکاران، " تصفیه فاضلاب، حذف ازت و فسفر از فاضلاب شهری " ترجمه دکتر احمدرضا یزدانبخش، مهندس اکبر اسلامی، مهندس ادريس بذرافشان، مهندس قادر غنی زاده، چاپ اول اسفند ۱۳۸۰
- [2] Walsh, T.K., B.W. Behrman, G. W. Weil, and E.R. Jones: "A Review of Biological Phosphorus Removal Technology," presented at the Water Pollution Control Federation Annual conference, October 1983.
- [3] Metcalf and Eddy, Inc. *Wastewater Engineering: Treatment, Disposal, Reuse*. McGraw Hill Book Company, New York, 1979
- [۴] هاشمی، سید حسین، " بررسی اثر توزیع فضایی و زمانی غلظت اکسیژن محلول بر بازده فرآیند نیتریفیکاسیون و دنیتریفیکاسیون همزمان در راکتورهای ناپیوسته متوالی تصفیه فاضلاب " استاد راهنما دکتر عظیمی، دانشکده بهداشت، دانشگاه تهران، ۱۳۸۴
- [5] Christensen, M. H. Denitrification of Sewage by Alternating Process Operation. Progress in Water Technology, Pergamon Press, 7,2,339, 1975
- [6] Baccari, M., R. Passino, R. Ramadori, and V. Tandoi. "Kinetics of dissimilatory nitrate and nitrite reduction in suspended growth culture." Jour. Water Pollut. Control Fed.,55,58,1983
- [7] U.S. Environmental Protection Agency. *Process Design Manual for Nitrogen Control*. Washington, D.C., 1975.
- [8] Ekama, G. A., v. R. Marais, and i. P. Siebritz. Biological excess phosphorus removal. *Design and Operation of Nutrient Removal Activated Sludge Processes*. Water Research Commission, P.O. Box 824, Pretoria0001, South Africa, 1984.