

“Research article”

Pilot design and modeling of the A₂O process for cell growth kinetics to increase the efficiency of organic and nutrient removal from Pardis city wastewater

Mojtaba Darzi Daronkola¹, Amir Hossein Mahvi^{2,*}, Bahman Ramavandi³, Seyed Enayat Hashemi³, Fazel Amiri¹

¹Department of Environmental Engineering, Water and Wastewater Department, Bu.C., Islamic Azad University, Bushehr, Iran

²Department of Environmental Health Engineering, School of Public Health, Tehran University of Medical Sciences, Tehran, Iran

³Department of Environmental Health Engineering, Faculty of Health and Nutrition, Bushehr University of Medical Sciences, Bushehr, Iran

*Corresponding author: ahmahvi@yahoo.com

(Received: 30 April 2025, Accepted: 13 May 2025)

Abstract

A₂O wastewater treatment is actually an upgrade of the activated sludge process with extensive aeration, where two anaerobic and anoxic units are added to remove nitrogen and phosphorus, and the sludge is returned from the settling tank to the anaerobic unit. There is also a return line from the aeration unit to the anoxic tank. Obviously, not all environmental conditions affecting substrate consumption and microbial growth rate may be possible, and controlling factors, such as pH and nutrients, is necessary to provide effective treatment. The rate of substrate consumption in biological systems can be modeled based on the Monod relationship for soluble substrates. Pilot design is based on hydraulic retention time (HRT) according to existing references. After launching the mentioned pilot with real wastewater, biological processes are used to create and maintain stable conditions in the reactors. In this study, raw wastewater, aeration pond, effluent, secondary sedimentation, and activated sludge were collected with 500 samples and the qualitative parameters of COD, BOD₅, TSS and VSS (as dependent variables) were measured. Hence, to measure organic parameters and solids, 100 samples were taken from each of these cases: the aeration tank, the returned activated sludge, the incoming raw sewage, the effluent sedimentation, and secondary sedimentation. In kinetic study, K_s was determined to be 27.9 g COD/m³, μ_H as 4.4 1/day, b_H as 0.0085 1/day and Y_H as gCOD XH / (gCOD SS) as 0.42. Based on the findings, the synthetic coefficients in the Lineweaver-Burk and Hanes models are suitable, but in the Hofstee model, the amount of K and K_d is lower than the optimal amount for the proper exploitation of the pilot. The efficiency coefficient and the growth rate were also found to be lower than the optimal level.

Conflict of interest: None declared.

Keywords: Kinetics coefficients, A₂O process, Organic matter, Nutrient



دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز
فصلنامه آلودگی‌های محیطی و توسعه پایدار شهری

دوره ۲، شماره ۱، پیاپی ۵
بهار ۱۴۰۴، صفحات ۶۷-۷۸

«مقاله پژوهشی»

طراحی پیلوت و مدلسازی فرآیند A_2O جهت ضرایب سینتیکی رشد سلولی برای افزایش راندمان حذف مواد آلی و مغذی از فاضلاب شهر پردیس

مجتبی درزی درونکلا^۱، امیرحسین محوی^{۲*}، بهمن رمانندی^۳، سید عنایت هاشمی^۳، فاضل امیری^۱

^۱ گروه مهندسی محیط زیست، واحد بوشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، بوشهر، ایران

^۲ گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی تهران، تهران، ایران

^۳ گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت و تغذیه، دانشگاه علوم پزشکی بوشهر، بوشهر، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: ahmahvi@yahoo.com

(دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۲/۱۰، پذیرش نهایی: ۱۴۰۴/۰۲/۲۳)

چکیده

تصفیه فاضلاب به روش A_2O در واقع شیوه ارتقایافته فرآیند لجن فعال با هوادهی گسترده است. در این روش برای حذف نیترژن و فسفر دو واحد بی‌هوازی و آنوکسیک به آن اضافه می‌شود. برگشت لجن، از مخزن ته‌نشینی به واحد بی‌هوازی است. از واحد هوادهی، یک خط برگشت به آنوکسیک تانک وجود دارد. بدیهی است، بررسی تمام شرایط محیطی مؤثر، بر مصرف سوپسترا و سرعت رشد میکروبی ممکن است میسر نباشد. با این حال کنترل عواملی مانند pH و مواد مغذی برای فراهم کردن تصفیه مؤثر لازم است. سرعت مصرف سوپسترا را در سیستم‌های بیولوژیکی می‌توان بر مبنای رابطه مونود برای سوپستراهای محلول مدلسازی نمود. طراحی پیلوت براساس میزان زمان ماند هیدرولیکی (HRT) مطابق با منابع موجود انجام شد. پس از راه‌اندازی پیلوت مذکور با فاضلاب واقعی بهره‌برداری فرآیندهای بیولوژیکی صورت می‌پذیرد تا شرایط پایدار (Steady State) در راکتورها ایجاد و حفظ گردد. در این پژوهش از فاضلاب خام، حوض هوادهی، پساب خروجی، ته‌نشینی ثانویه و لجن فعال برگشتی جمعاً ۵۰۰ نمونه برداشت شد و اقدام به اندازه‌گیری پارامترهای کیفی COD_5 ، COD ، TSS و VSS (به عنوان متغیرهای وابسته) شد به این ترتیب که ۱۰۰ نمونه از تانک هوادهی، ۱۰۰ نمونه از لجن فعال برگشتی، ۱۰۰ نمونه از فاضلاب خام ورودی، ۱۰۰ نمونه از پساب خروجی، ۱۰۰ نمونه از ته‌نشینی ثانویه برای اندازه‌گیری پارامترهای آلی و جامدات برداشته شد. در بررسی سینتیکی، K_s به میزان $27/9 \text{ g COD/m}^3$ ، μ_H به میزان $1/4 \text{ (1/day)}$ ، b_H به میزان $0/0085 \text{ 1/day}$ و Y_H معادل $0/42 \text{ gCOD X}_H / \text{gCOD SS}$ تعیین گردید. مطابق نتایج به‌دست آمده، ضرایب سینتیکی در مدل‌های Hanes و Lineweaver-Burk مناسب بوده ولی در مدل Hofstee میزان K و K_d کم‌تر از میزان بهینه برای بهره‌برداری مناسب پیلوت به‌دست آمده است. همچنین ضریب بازدهی و میزان نرخ رشد پایین‌تر از میزان بهینه است.

واژه‌های کلیدی: ضرایب سینتیکی، فرآیند A_2O ، مواد آلی، نوترینت

مقدمه

در سال‌های آغازین قرن بیستم، روش تصفیه بیولوژیکی ابداع شد. امروزه این روش، اساس موضوع تصفیه در سرتاسر جهان را شکل می‌دهد. این روش، شیوه ساده‌ای است که به وسیله باکتری‌ها در غلظت‌های بالای آنها در تانک‌ها رخ می‌دهد. این باکتری‌ها، به همراه برخی پروتوزوآها و سایر میکروب‌ها مجموعاً لجن فعال را تشکیل می‌دهند (۱). خط مشی این روش بسیار ساده است. باکتری‌ها، از مولکول‌های کربن‌دار آلی تغذیه می‌کنند. در نتیجه باکتری‌ها رشد می‌کنند و فاضلاب تصفیه می‌شود و پساب تصفیه شده به محیط پذیرنده تخلیه می‌شود (۲). فاضلاب خانگی عمدتاً از کربن آلی (هم به صورت محلول و هم به صورت ذرات معلق) تشکیل شده است. حدود ۶۰٪ از این کربن به شکل ذرات ریز هستند که کمتر از نصف آن‌ها قادر به ته‌نشینی می‌باشند (۳). ذرات با اندازه ۱ μm تا ۱۰۰ nm به صورت کلوئیدی در مخلوط مایع باقی می‌مانند و در حین فرآیند تصفیه توسط فلوک‌های لجن فعال جذب می‌شوند (۴). بخش عمده مواد آلی، قابلیت تجزیه بیولوژیکی را دارند که شامل پروتئین‌ها، آمینو اسیدها، لیپیدها، کربوهیدرات‌ها، چربی‌ها و اسیدهای چرب می‌شود. برای متوسط نسبت کربن به نیتروژن و فسفر (P:N:C) مقادیر مختلفی بیان شده‌اند که تقریباً ۵:۱۷:۱۰۰ یا ۶:۱۹:۱۰۰ می‌باشد (۵). این مقادیر، مقادیر ایده‌آل برای رشد باکتری‌های لجن فعال می‌باشند. این در حالی است که فاضلاب‌های صنعتی، ترکیبات متفاوتی دارند. برای رسیدن به نسبت درست رشد میکروبی و انجام تصفیه در بهترین حالت لازم است که مواد مغذی به فاضلاب اضافه شود (۶).

از میان دسته‌بندی فرآیندهای مختلف تصفیه فاضلاب، A_2O یکی از روش‌های مناسب و پرکاربرد برای تصفیه فاضلاب‌های حاوی نوترینت‌ها است. بخش عمده حذف نوترینت‌ها به واسطه بازچرخش متناوب لجن فعال در راکتورهای بی‌هوازی (anaerobic) و غیرهوازی (anoxic) صورت می‌پذیرد (۷). یکی از نگرانی‌های بزرگ در دنیای صنعتی امروز، وجود مقادیر بیش از اندازه نیتروژن و فسفر در فاضلاب‌های بهداشتی و صنعتی است که تهدیدی بزرگ برای سلامت انسان و سایر موجودات و طبیعت به شمار می‌روند. این ترکیبات یکی از منابع تغذیه باکتری‌ها و جلبک‌ها بوده و ورود آن‌ها به آب‌های سطحی می‌تواند زمینه را برای رشد و تکثیرشان فراهم کند (۸). به همین دلیل روش‌های متعددی برای حذف این ترکیبات ارائه شده است که از بهترین آن‌ها می‌توان به تصفیه فاضلاب به روش A_2O اشاره نمود. این روش ترکیبی از بخش‌های تصفیه بی‌هوازی، غیر-هوازی و هوازی (anaerobic, anoxic, aerobic) می‌باشد که تفاوت آن با AO در اضافه شدن واحد غیرهوازی است (۹).

تصفیه فاضلاب به روش A_2O در واقع شیوه ارتقایافته فرآیند لجن فعال با هوادهی گسترده می‌باشد که در آن برای حذف نیتروژن و فسفر دو واحد بی‌هوازی و آنوکسیک به آن اضافه شده است و برگشت لجن نیز از مخزن ته‌نشینی به واحد بی‌هوازی می‌باشد و از واحد هوادهی نیز یک خط برگشت به آنوکسیک تانک وجود دارد (روش A_2O همان فرآیند A/O می‌باشد که با اصلاح آن و اضافه کردن یک واحد آنوکسیک جهت حذف نیتروژن فرآیند A_2O شکل گرفته است) (۱۰). روابط سینتیکی مهم‌ترین

معادله‌های ریاضی برای بررسی نرخ رشد میکروارگانیسم‌ها و مصرف سوبسترا در یک محیطی بیولوژیکی رشد می‌باشند (۳).

حذف نیتروژن و فسفر در تصفیه فاضلاب زمانی اهمیت پیدا می‌کند که منبع پذیرنده پساب تصفیه شده دریا، اقیانوس، رودخانه، دریاچه و یا به بیان عام آب‌های سطحی باشد؛ چرا که با ورود ترکیبات حاوی نیتروژن و فسفر به آب‌های سطحی که منبع مناسبی برای تغذیه جلبک‌ها و خزه‌ها هستند، جلبک‌ها و خزه‌ها رشد می‌کنند. این گیاهان آبی با مصرف اکسیژن محلول در آب باعث کاهش اکسیژن محلول در آب و مرگ آب‌زیان خواهند شد (۱۱). بدیهی است تمام شرایط محیطی موثر بر مصرف سوبسترا و سرعت رشد میکروبی ممکن است میسر نباشد. در این فرایند، کنترل عواملی مانند pH و مواد مغذی برای فراهم کردن تصفیه موثر لازم است. سرعت مصرف سوبسترا در سیستم‌های بیولوژیکی را می‌توان بر مبنای رابطه مونود برای سوبستراهای محلول مدل‌سازی کرد (۱۲).

محاسبه ضرایب سینتیکی در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب، جهت تعیین شرایط بهینه برای رشد میکروارگانیسم‌ها اهمیت ویژه‌ای دارد. بهینه‌سازی ضرایب سینتیکی تصفیه‌خانه فاضلاب در هر کشور یا شهر و یا هر منطقه می‌تواند بهره‌برداری صحیح از تصفیه‌خانه فاضلاب را به همراه داشته باشد (۱۳). تغییر پارامترهای کیفی پساب تصفیه‌خانه فاضلاب، بر پایه میزان ضرایب سینتیکی رشد میکروارگانیسم‌ها استوار است (۱۴). برای بررسی اینکه میزان تجزیه بار آلی و تبدیل به بیومس سلولی چه میزان است، ارتباط بین میزان بار آلی و زمان ماند سلولی به‌دست آمد.

جهت تعیین پارامترهای مدل مونود نمونه بیومس موجود در حوض هوادهی تصفیه‌خانه در یک پایلوت آزمایشگاهی در شرایط مختلف غلظت سوبسترا رشد داده شد و با استفاده از سه معادله ریاضی مستخرج از رابطه اصلی مونود، (Hanes, Lineweaver-Burk, Hofste)، ضرایب سینتیکی تعیین گردید. سپس با استفاده از اطلاعات موجود در این تصفیه‌خانه نتایج ضرایب سینتیکی حاصل از نتایج آزمایشگاهی با نتایج حاصل از راهبری تصفیه‌خانه شامل ضریب بازده رشد (Y)، ثابت نیمه اشباع (K_s)، نرخ حداکثر مصرف سوبسترا (K)، و ضریب خودخوری (K_d) مقایسه شد. بررسی موضوعی این فرآیند در تصفیه‌خانه فاضلاب شهری پردیس، امکان‌سنجی اصلاح احجام بیوراکتورهای طراحی شده از طریق اندازه‌گیری و محاسبه ضرایب سینتیکی رشد کنسرسیوم میکروبی در پایلوت گارگاهی کنترل و اعمال تغییرات مناسب، به کمک متغیرهای مستقل و وابسته در پایلوت اصلاح شده را ممکن می‌کند (۴). ابهامات موجود در مطالعه شامل ارزیابی کیفیت سامانه تصفیه پس از اعمال تغییرات و اصلاحات ساختاری احجام بیوراکتورها از نتایج حاصل این تحقیق بود (۹). از این حیث مدل‌سازی سینتیکی فرآیند لجن فعال از طریق متغیرهای مختلف در بیوراکتورها صورت پذیرفت، مقادیر ضرایب عددی ثابت‌های بیوسینتیکی به عنوان متغیر شامل μ_{max} ، Y ، k ، K_d و K_s برای مواد آلی کربنی (BOD یا COD) با بکارگیری تجربیات آزمایشگاهی تعیین شد (۸). این مطالعه با هدف بررسی و تعیین ضرایب سینتیکی رشد سلولی و حذف مواد آلی و مغذی از فاضلاب واقعی برای مدل‌سازی لجن فعال به روش A_2O انجام شد. پارامترهای کیفی فاضلاب شامل

هوادهی، ۱۰۰ نمونه از لجن فعال برگشتی، ۱۰۰ نمونه از فاضلاب خام ورودی، ۱۰۰ نمونه از پساب خروجی، ۱۰۰ نمونه از ته‌نشینی ثانویه جهت اندازه‌گیری پارامترهای آلی و جامدات برداشته شد. نمونه‌برداری دو بار در هفته تکرار شد. کلیه شرایط نمونه‌برداری و انجام آزمایش‌ها بر اساس آخرین روش ارائه شده در کتاب استاندارد متد ورژن ۲۰۰۷ انجام شد.



شکل (۱): نقشه هوایی تصفیه‌خانه فاضلاب شهر پردیس

پس از راه‌اندازی پایلوت با فاضلاب واقعی، بهره‌برداری از فرایندهای بیولوژیکی صورت گرفت تا شرایط پایدار (Steady State) در راکتورها ایجاد و حفظ گردد، پس از دستیابی به حالت پایدار، نمونه‌برداری و آزمایش‌های پیش‌بینی شده روزانه و هفتگی برای نظارت بر کیفیت پساب، تولید لجن و ویژگی‌های لجن انجام شد. شاخص‌های کنترلی در ایستگاه‌های نمونه‌برداری، شامل: DO، pH، MLSS، TANک هوادهی، SVI، SRT برای راهبری و بهره‌برداری صحیح و حفظ شرایط بهینه و پارامترهای اصلی چون COD، TSS و BOD، ازت و فسفر و ... پساب خروجی اندازه‌گیری شد. نتایج داده‌های کیفی در این سیستم با توجه بررسی‌های مشابه تغییرات جزئی قابل قبول می‌باشد. این شرایط با کنترل بارگذاری مواد آلی و ثابت بودن نرخ جریان‌های برگشتی مهیا می‌شود.

اکسیژن مورد نیاز بیوشیمیایی، اکسیژن خواهی شیمیایی، مواد معلق، اندازه‌گیری شده و راندمان حذف و ضرایب (K_s)، ضریب بازده رشد (Y) و حداکثر رشد بیوسنتیکی مانند نرخ حداکثر مصرف سوبسترا (K)، ضریب خود تخریب (K_d)، ثابت نیمه‌اشباع و ویژه (μ_{max}) محاسبه گردید (۶).

مواد و روش‌ها

- مشخصات تحقیق

فرآیند تصفیه فاضلاب شهر پردیس (شکل (۱)) از نوع فرآیند لجن فعال به روش A_2O با قابلیت حذف نیتروژن و فسفر است. کیفیت پساب حاصل از این فرآیند، مطابق با استانداردهای سازمان حفاظت محیط زیست ایران، جهت تخلیه به آب‌های سطحی و استفاده از آن در کشاورزی است که پس از جمع‌آوری توسط شبکه فاضلاب به طول ۲۳۶ km و تعداد ۶۸۱۲ منهول و خط انتقالی با قطر ۱۲۰۰ mm به ابتدای محدوده سایت تصفیه‌خانه وارد می‌شود. خط انتقال مذکور از نقطه ورود به تصفیه‌خانه شروع و به حوضچه مقسم مدول‌ها منتهی می‌شود. در حال حاضر این تصفیه‌خانه قادر به تصفیه فاضلاب جمعیتی معادل ۱۲۵۰۰۰ نفر با متوسط ظرفیت اسمی $24000 \text{ m}^3/\text{day}$ می‌باشد. حوض بی‌هوازی به منظور حذف بیولوژیکی فسفر، حوض انوکسیک برای حذف بیولوژیکی نیترات و حوض هوازی برای حذف ترکیبات کربنه در این فرآیند، مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این پژوهش از فاضلاب خام، حوض هوادهی، پساب خروجی، ته‌نشینی ثانویه و لجن فعال برگشتی جمعاً ۵۰۰ نمونه برداشت شد و اقدام به اندازه‌گیری پارامترهای کیفی COD، BOD_5 ، TSS و VSS (به عنوان متغیرهای وابسته) شد. به این ترتیب که ۱۰۰ نمونه از تانک

پس از کنترل پایدار بهره‌برداری از پایلوت، متغیرهای وابسته مانند اکسیژن مورد نیاز شیمیایی محلول (sCOD)، اکسیژن مورد نیاز بیولوژیکی محلول پنج روزه ($sBOD_5$)، ازت، فسفر، جامدات معلق مایع مخلوط (MLSS)، جامدات معلق فرار مایع مخلوط (MLVSS) مطابق با برنامه تعیین شده اندازه‌گیری شد. آزمایش‌هایی برای تعیین سن لجن در ۱۴ روز و زمان‌های ماند هیدرولیکی در ۹/۶ h انجام پذیرفت. در این مطالعه، میانگین زمان ماند سلولی و زمان ماند هیدرولیکی به عنوان متغیرهای مستقل کنترل کننده برای آهنگ رشد توده زیستی و بار آلی در راکتور هوادهی به کار گرفته شد. سن لجن با دفع روزانه حجم مشخصی از لجن از سامانه تعیین گردید.

فرایند حذف مواد آلی در تصفیه‌خانه فاضلاب شهر پردیس مبتنی بر سیستم A_2O می‌باشد که ترکیبی از فرایندهای بی‌هوازی، آنوکسیک و هوازی است. در این تحقیق با توجه به محدودیت‌های اطلاعات موجود در تصفیه‌خانه و برای مقایسه بین روش‌های مختلف مدلسازی، صرفاً فرایندهای مختلف آنوکسیک و هوازی تصفیه با استفاده از مدل ASM_1 (مدل ASM_1 یکی از پرکاربردترین مدل‌های لجن فعال می‌باشد که مورد اقبال محققین واقع شده است. این مدل در سال ۱۹۸۷ توسط گروه IAWQ ارائه شد و نخستین مدل رسمی لجن فعال است) و با استفاده از اطلاعات اخذ شده در دوره زمانی یک‌ساله مدل شده است. با توجه به اطلاعات اخذ شده از تصفیه‌خانه، دمای اجرای مدل در $20^\circ C$ تنظیم شد. مدل ASM_1 شامل ۱۳ مولفه است که این مقادیر باید با توجه به اطلاعات تصفیه‌خانه استخراج گردد. مؤلفه‌ها شامل pH ، $MLVSS$ ، $MLSS$ ، BOD ، $rbCOD$ ، دما،

TSS، نیتروژن کل، نیتروژن نیتراتی، نیتروژن آلی، فسفر کل، باکتری‌های هتروتروف، باکتری‌های اتوتروف هستند. اگرچه پارامترهای مواد محلول غیر قابل تجزیه (S_I) و مواد معلق غیر قابل تجزیه (X_I) فاقد ضریب هستند ولی مقادیر آن‌ها در نمونه فاضلاب در اندازه‌گیری‌های COD و VSS نمونه‌های خروجی حائز اهمیت است.

طراحی پایلوت بر اساس میزان زمان ماند هیدرولیکی (HRT) مطابق با منابع موجود طراحی و انجام شد. میزان جریان فاضلاب ورودی به پایلوت معادل 100 L/h ($2/4 \text{ m}^3/\text{day}$) در نظر گرفته شد. زمان ماند حوض بی‌هوازی ۱ h و ۳۳ min، زمان ماند حوض آنوکسیک ۲ h، زمان ماند حوض هوادهی ۹ و ۳۶ min، زمان ماند حوض ته‌نشینی نهایی ۴ h و ۳۰ min در نظر گرفته شد.

- تعیین ضرایب مدل مونود

سرعت مصرف سوبسترا در فرایند هوازی بیولوژیکی با استفاده از معادله (۱) یعنی معادله مونود تعیین شد. در این معادله ضرایب را می‌توان با تغییر مصرف سوبسترای آلی در مقابل تولید بیومس محاسبه نمود.

$$r_{su} = -\frac{K_0 X S}{K_s + S} \quad (1)$$

در این رابطه:

r_{su} : سرعت تغییرات غلظت بیومس بدلیل مصرف آن $(g/m^3.d)$

K_0 : ماکزیمم مصرف سرعت ویژه سوبسترا بر حسب گرم سوبسترا بر گرم میکروارگانیزم در روز؛
X: غلظت بیومس (g/m^3)

$$\frac{S}{K} = \frac{S}{K_0} + \frac{K_S}{K_0} \quad (3)$$

مدل Hofstee -

در این مدل معادله اصلی مونود در عبارت $(K_S+S)/S$ ضرب شده و با ساده کردن عبارت در نهایت رابطه زیر حاصل خواهد شد.

$$\frac{S}{K} = \frac{1}{K_0} \quad (4)$$

دیاگرام فرآیند پایلوت در شکل (۲) نمایش داده شده است:

S: غلظت سوبسترای محدود کننده رشد در محلول (g/m^3)

K_S : ثابت نیمه اشباع، غلظت سوبسترا در نصف ماکزیمم سرعت ویژه مصرف سوبسترا (g/m^3) .

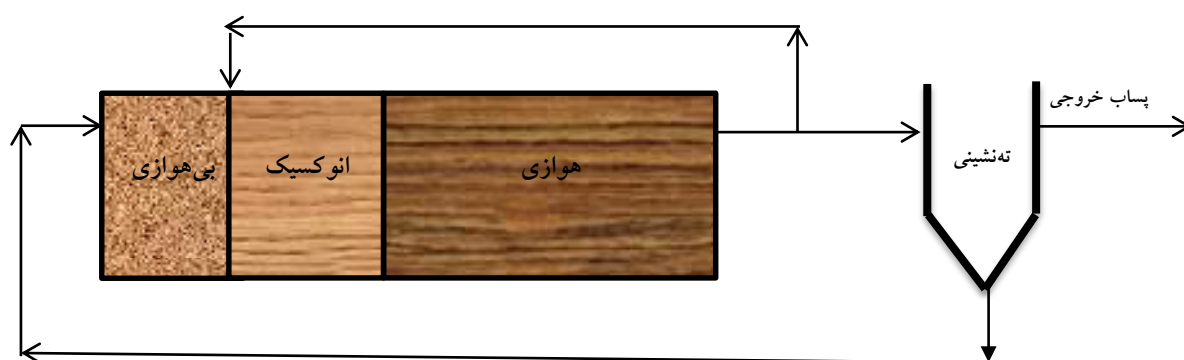
مدل Lineweaver-Burk -

در این مدل معادله اصلی مونود را می‌توان به صورت معادله (۲) بیان کرد:

$$\frac{1}{S} = \frac{1}{K} \quad (2)$$

مدل Hanes -

در این مدل معادله اصلی مونود را می‌توان به صورت معادله (۳) بیان کرد.

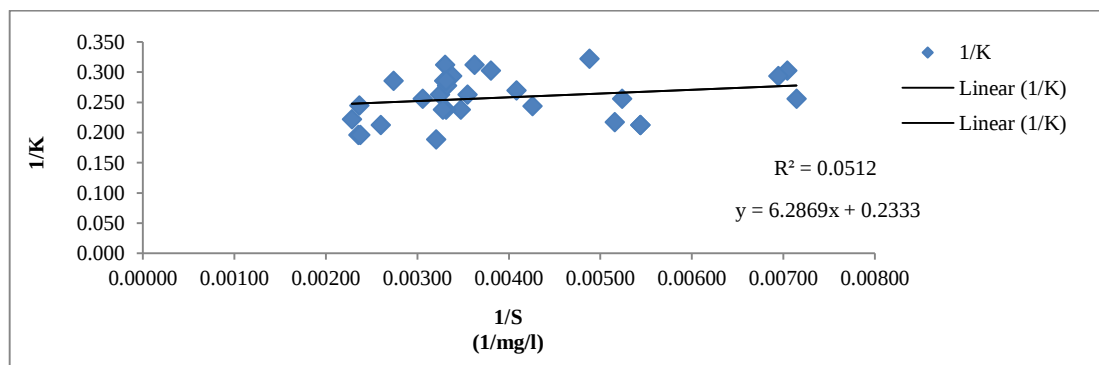


شکل (۲): دیاگرام فرآیند

نتایج

به تصفیه‌خانه در نمودار (۱) نشان داده شده است. مقادیر K_0 و K_S برای ماه فروردین ۱۴۰۰ به ترتیب به برابر با $4/28$ و $26/94$ به دست آمده است.

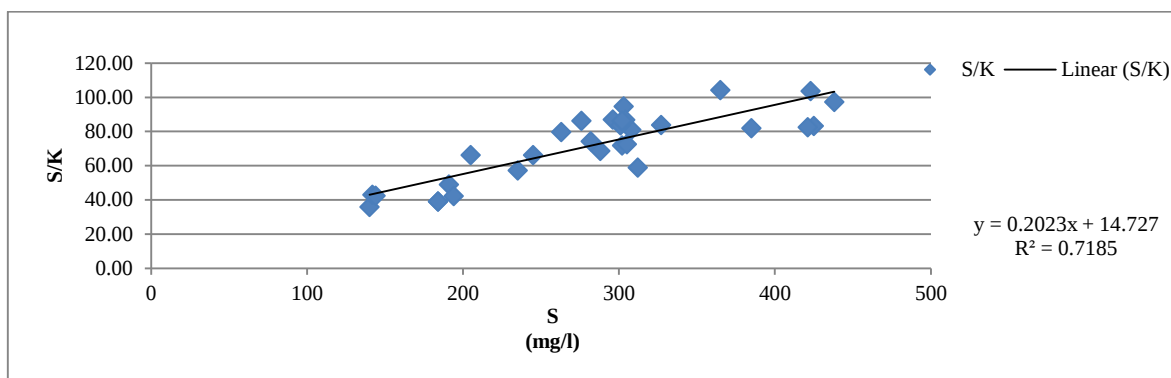
رسم نمودار Lineweaver-Burk بر اساس اطلاعات تغییرات غلظت بیومس و سوبسترای ورودی



نمودار (۱): تغییرات عکس غلظت بیومس و عکس ثابت معادله در تصفیه‌خانه واقعی

رسم نمودار Hanes بر اساس اطلاعات تغییرات غلظت بیومس و میزان سوبسترای ورودی به تصفیه-خانه در نمودار (۲) نشان داده است. همانطور که

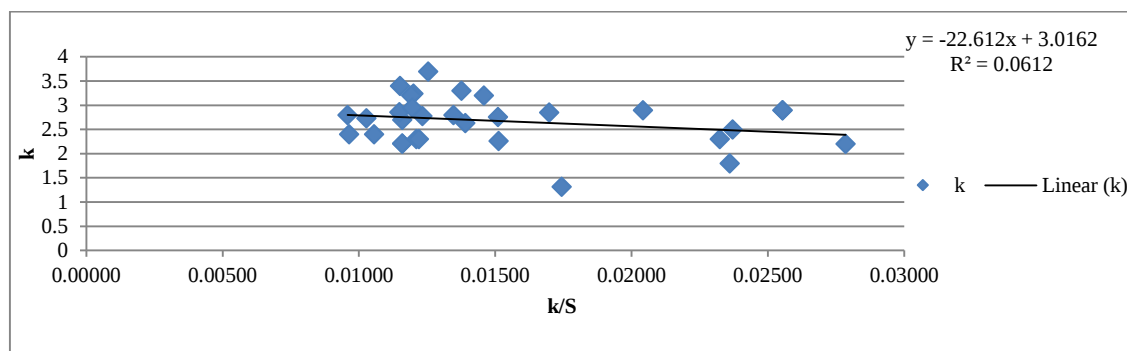
ملاحظه می‌شود مقادیر K_0 و K_S به ترتیب برابر با ۴/۹۴ و ۷۲/۷۹ به دست آمد.



نمودار (۲): تغییرات غلظت بیومس و سوبسترای ورودی به تصفیه‌خانه

رسم نمودار Hofstee براساس اطلاعات تغییرات غلظت بیومس و میزان سوبسترای ورودی به تصفیه‌خانه در نمودار (۳) نشان داده شده است.

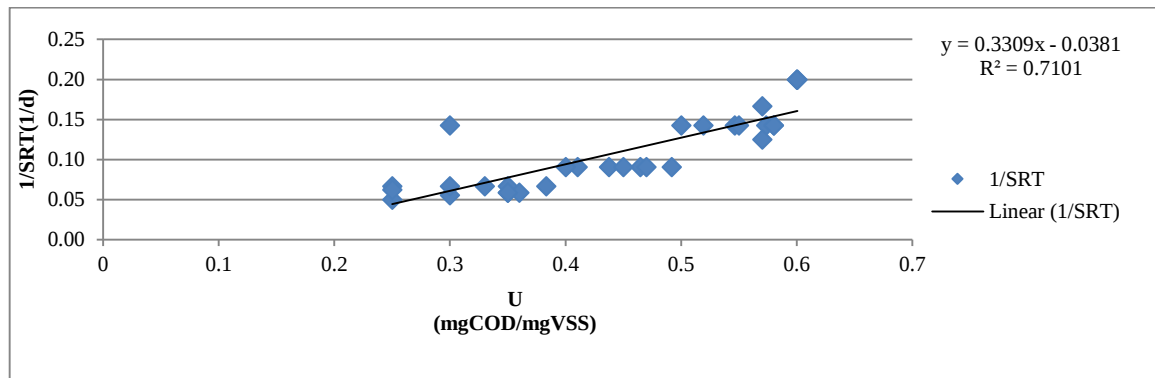
همانطور که ملاحظه می‌شود مقادیر K_0 و K_S به ترتیب برابر با ۳/۰۱ و ۲۲/۶۱۲ به دست آمده است.



نمودار (۳): تغییرات ثابت معادله و میزان سوبسترای ورودی به تصفیه‌خانه

با رسم نمودارهای $1/SRT$ در مقابل U ضرایب سینتیکی تعیین شد. با خطی کردن نمودار ذکر شده،

عرض از مبدأ این نمودار معرف K_d و شیب نشان دهنده Y می‌باشد.



نمودار (۴): تأثیر زمان ماند سلولی بر نرخ مصرف سوبسترا

ترتیب، علاوه بر این، مناسب‌ترین شرایط عملیاتی برای لجن فعال در بین SMBR ها OLR، $gCOD/L.day$ و 0.1 و 15 SRT روز بود. تحت این شرایط بهینه، راندمان حذف COD $92/8$ درصد و μ_{max} $1/day$ $3/708$ به دست آمد. جداول (۱)، (۲) و (۳) به ترتیب مشخصات تصفیه‌خانه و غلظت پارامترهای مختلف در زمان تحقیق، نتایج ناشی از مدل ASM1 و مقایسه آن با مدل مونود و مشخصات پایلوت در فاصله زمانی تحقیق را نشان می‌دهند.

همان‌طور که از نمودار (۴) مشخص است مقدار Y برابر با 0.33 و K_d برابر با 0.03 است. علیزاد اقیانوس و همکاران (۸) در یک بررسی مشابه در نهایت به این نتایج دست یافتند که کیفیت کف در OLR $gCOD/L.day$ 0.3 در مقایسه با OLRهای بیشتر در همه SRTها بالاتر بود. مشخص شد که بازده (Y)، ضریب فروپاشی درون‌زا (k_d)، حداکثر نرخ رشد ویژه (μ_{max}) و ثابت اشباع (K_s) چهار SMBR در محدوده $1/day$ $3/1561$ ، mg/mg $232/55-73/53$ و $1/269-3/708$ $mgCOD/L$ و $145/8-2/57$ به

جدول (۱): مشخصات بهره‌برداری تصفیه‌خانه در فاصله زمانی انجام تحقیق

ردیف	محل	T (C)	pH	TS (mg/L)	TSS (mg/L)	BOD5 (mg/L)	COD (mg/L)	MLSS (mg/L)	MLVSS (mg/L)	SVI	DO
۱	میانگین	۲۳/۵	۷/۵	۸۵۶	۲۴۰/۹	۲۱۹	۳۸۴	-	-	-	-
۲	ورودی	۲۴-۲۳	۶/۵-۸	۹۶۰-۶۵۰	۱۹۵-۲۹۷	۱۸۷-۲۳۴	۳۳۹-۴۴۸	-	-	-	-
۳	مخزن	۲۲	۷/۸	-	-	-	-	۲۸۵۰	۲۱۵۰	۱۱۶	۳/۸
۴	هوادهی	۲۳-۲۱/۵	۸-۷/۵	-	-	-	-	۳۱۸۵-۲۴۳۵	۲۴۶۵-۱۹۵۵	۱۳۴-۹۳	۴/۳-۲/۹
۵	میانگین	۲۳/۲	۶/۸	۵۳۲	۱۴	۷/۵	۲۱	-	-	-	-
۶	خروجی	-۲۲/۸	-۶/۵	۶۰۵-۴۹۵	۱۸-۱۱	۹/۵-۴	۲۷-۱۷	-	-	-	-
	محدوده	۲۳/۶	۷/۲								

جدول (۲): نتایج ضرایب سینتیکی تعیین شده با استفاده از مدل ASM1 و مقایسه آن با نتایج مدل مونود

محدوده توصیه شده متکف و ادی	مقدار توصیه شده IWQA	نتایج حاصل از پایلوت آزمایشگاهی				نتایج بهره‌برداری تصفیه‌خانه	مدل ASM_1	واحد	ضریب سینتیکی
		مدل Hofstee	مدل Hanes	مدل Lineweaver-Burk	مدل بهره‌برداری				
۲۵-۱۰۰	۲۰	۲۱/۴۹	۵۲/۰۲	۲۸/۹۲	۳۵/۴	۲۷/۹		$g\text{ COD}/m^3$	K_s
۲-۱۰	۶	۲/۹۹	۴/۷۱	۴/۳۷	۳/۳۵	۴/۴		1/day	$\mu_H (k_0)$
۰/۰۶-۰/۱۵	۰/۰۶۲		۰/۰۱		۰/۰۱۵	۰/۰۰۸۵		1/day	$b_H (k_d)$
۰/۳-۰/۶	۰/۶۷		۰/۲۷		۰/۳۲	۰/۴۲		$g\text{COD XH}/(g\text{COD SS})$	Y_H
۰/۰۸-۰/۲	۰/۰۸	-	-	-	-	۰/۰۸		-	f_p
-	۳	-	-	-	-	۲/۴		(g cell COD/day)	k_h
-	۰/۰۳	-	-	-	-	۰/۰۲۵		(g cell COD/day)	K_x

جدول (۳): مشخصات بهره‌برداری پایلوت در فاصله زمانی انجام تحقیق

ردیف	محل	T (°C)	pH	TS (mg/L)	TSS (mg/L)	BOD5 (mg/L)	COD (mg/L)	MLSS (mg/L)	MLVSS (mg/L)	SVI	DO
۱	میانگین ورودی	۲۴	۷/۵	۵۷۶	۱۶۴	۱۹۶	۲۸۹	-	-	-	-
۲	محدوده	۲۵-۲۳	۶/۵-۸	۴۲۵-۶۳۴	۱۳۵-۲۴۲	۱۶۲-۲۱۷	۲۴۳-۳۳۷	-	-	-	-
۳	میانگین مخزن	۲۳	۷/۸	-	-	-	-	۲۶۵۰	۱۹۶۰	۱۰۳	۳/۲
۴	محدوده هوادهی	۲۴	۸-۷/۵	-	-	-	-	۳۱۸۵-۲۴۳۵	۲۳۱۵-۱۸۲۰	۱۲۱-۸۰	۲/۷-۳/۹
۵	میانگین	۲۳/۵	۷	۴۸۹	۱۲	۶/۵	۱۹	-	-	-	-
۶	محدوده خروجی	۲۳/۴	۷/۲	۴۵۴-۵۱۹	۱۵-۱۰	۸-۴	۲۴-۱۷	-	-	-	-

بحث

SS $g\text{COD}/۰/۴۲$ (برای بهره‌برداری تصفیه‌خانه $g\text{ cell COD}/۰/۳۲$ و K_x برابر با $g\text{ cell COD}/۰/۲۵$ تعیین شد.

از طرف دیگر ضرایب سینتیکی رشد میکروارگانیسم‌ها در محدوده توصیه شده مراجع قرار داشته و به عبارت دیگر راهبری تصفیه‌خانه از لحاظ راندمان حذف و شرایط بیولوژیکی انجام فرایند در شرایط مطلوبی است. مقایسه بین اطلاعات اخذ شده از تصفیه‌خانه و نتایج حاصل از مدل برای هر سه پارامتر اندازه‌گیری شده در بخش یافته‌ها مشخص است. همانطور که ملاحظه می‌شود، انطباق خوبی بین نتایج اخذ شده از تصفیه‌خانه و مدل وجود دارد.

همان‌طور که ملاحظه شد همبستگی مناسبی برای ضرایب سینتیکی فرایندهای بیولوژیکی بین نتایج حاصل از بررسی رشد میکروارگانیسم‌ها در پایلوت آزمایشگاهی، نتایج حاصل از بهره‌برداری و مدل ASM_1 مشاهده می‌شود.

مطابق با جدول (۲)، ضرایب سینتیکی K_s برابر با $۲۷/۹ g\text{COD}/m^3$ (برای بهره‌برداری تصفیه‌خانه $g\text{COD}/۳۵/۴$)، $\mu_H (k_0)$ به میزان ۴/۴ 1/day (برای بهره‌برداری تصفیه‌خانه برابر با ۳/۳۵ 1/day)، $b_H (k_d)$ به میزان ۰/۰۰۸۵ 1/day (برای بهره‌برداری تصفیه‌خانه برابر با ۰/۰۱۵ 1/day)، Y_H برابر با $g\text{COD XH}$

بالاتر میزان ضریب بازدهی و نرخ رشد بالاتر خواهد شد.

ملاحظات اخلاقی

نویسندگان همه نکات اخلاقی از جمله عدم سرقت ادبی، عدم انتشار مقاله در سایر نشریه‌ها، عدم تحریف داده‌ها و پرهیز از داده‌سازی را در این مقاله رعایت کرده‌اند.

قدردانی و تشکر

این مقاله مستخرج از رساله دکتری تخصصی محیط زیست مصوب دانشگاه آزاد اسلامی، واحد بوشهر با عنوان «طراحی پایلوت و مدل‌سازی فرآیند A_2O جهت ضرایب سینتیکی رشد سلولی برای افزایش راندمان حذف مواد آلی و مغذی از فاضلاب، مورد مطالعه: تصفیه‌خانه پردیس» و بدون کد است. نهایت تشکر و سپاس از کلیه مدیران آب و فاضلاب شرق استان تهران بابت همکاری، همیاری و هماهنگی در انجام این مطالعه را داریم.

تعارض منافع

نویسندگان هیچ‌گونه تعارض منافی برای اعلام ندارند.

منابع

- [1] Naghizadeh, A., Mahvi, A.H., Vaezi, F., Naddafi, K., 2008, Evaluation of hollow fiber membrane bioreactor efficiency for municipal wastewater treatment. Iranian Journal of Environmental Health Science & Engineering, 5(4), 257.
- [2] Bina, B., Mohammadi, F., Amin, M.M., Pourzamani, H.R., Yavari, Z., 2018, Evaluation of the effects of AlkylPhenolic compounds on kinetic coefficients and biomass activity in MBBR by means of respirometric techniques. Chinese Journal of Chemical Engineering, 26, 822.
- [3] Orhon, D., Cokgor, E.U., Insel, G., Karahan, O., Katipoglu, T., 2009, Validity of Monod

اختلاف بین نتایج حاصل از اطلاعات تصفیه‌خانه و مدل با استفاده از میانگین مطلق خطا در ماه‌های مختلف بهره‌برداری، اندازه‌گیری شد که به ترتیب برای VSS، COD و sCOD معادل $6/8$ ، $4/3$ ، $8/9$ درصد اختلاف وجود داشت. نوشادی و همکاران (۱۵) در یک بررسی مشابه آزمایش‌های غلظت اکسیژن‌خواهی شیمیائی فاضلاب ورودی و خروجی و جامدات فرار مایع مخلوط شده، حین هوادهی و پس از ته‌نشینی را بر اساس استاندارد متد، برای ۲۸ بار راه‌اندازی پایلوت در ۲۸ روز انجام دادند. در این پژوهش ضریب فروپاشی درونی و ضریب بازدهی رشد به ترتیب معادل $1/day$ $0/1264$ و $0/6579$ gVSS/gCOD به‌دست آمد. حداکثر نرخ ویژه مصرف ماده غذایی و ثابت نیمه‌اشباع ماده غذایی به ترتیب $3/3467$ ، $25/305$ gCOD/m، میزان نرخ ویژه مصرف ماده غذایی یا ضریب بازدهی در تحقیق ما $0/27$ gCOD/gVSS.d است و ثابت نیمه‌اشباع K_s برابر با $27/9$ gCOD/m به‌دست آمده است این نتیجه، نشان می‌دهد که مواد آلی (COD) موجود در فاضلاب شهر پردیس قابلیت تجزیه‌پذیری بالاتری داشته است (sCOD).

نتیجه‌گیری

مطابق نتایج به‌دست آمده ضرایب سینتیکی در مدل‌های Lineweaver-Burk و Hanes مناسب بوده ولی در مدل Hofstee میزان K_d و K کم‌تر از میزان بهینه جهت بهره‌برداری مناسب پایلوت به‌دست آمده است. همچنین ضریب بازدهی و میزان نرخ رشد، پایین‌تر از میزان بهینه است که نشان می‌دهد میزان بار آلی ورودی به پایلوت به علت ورودی نشتاب و روان آب سطحی بسیار رقیق شده است که در غلظت‌های

- [12] Hu, Z., Wentzel, M.C., Ekama, G.A., 2003, Modelling biological nutrient removal activated sludge systems-a review. *Water Research*, 37, 3430.
- [13] Rezvani Ghalhari, M., Schönberger, H., Askari Lasaki, B., Asghari, K., Ghordouei-Milan, E., Rezaei Rahimi, N., Yousefi, S., Vakili, B., Mahvi, A.H., 2021, Performance evaluation and siting index of the stabilization ponds based on environmental parameters: A case study in Iran. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 19, 1681.
- [14] Jones, E.R., van Vliet, M.T.H., Qadir, M., Bierkens, M.F.P., 2021, Country-level and gridded estimates of wastewater production, collection, treatment and reuse. *Earth System Science Data*, 13, 237.
- [15] Noshadi, M., Ahadi, A. 2017, Determination of kinetic coefficients on Shiraz municipal wastewater treatment plant by batch reactor. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 47(2), 63. (in Persian).
- kinetics at different sludge ages – Peptone biodegradation under aerobic conditions. *Bioresource Technology*, 100, 5678.
- [4] Lee, E., Zhang, Q., 2016, Integrated co-limitation kinetic model for microalgae growth in anaerobically digested municipal sludge centrate. *Algal Research*, 18, 15.
- [5] Xu, F., Huang, Z., Miao, H., Ren, H., Zhao, M., Ruan, W., 2013, Identical full-scale biogas-lift reactors (BLRs) with anaerobic granular sludge and residual activated sludge for brewery wastewater treatment and kinetic modeling. *Journal of Environmental Sciences*, 25, 2031.
- [6] Baeten, J.E., van Loosdrecht, M.C.M., Volcke, E.I.P., 2018, Modelling aerobic granular sludge reactors through apparent half-saturation coefficients. *Water Research*, 146, 134.
- [7] Xu, J., Cheng, Z., Ren, C., Yi, L., Wei, W., Jin, H., Gou, L., 2022, Supercritical water gasification of oil-containing wastewater with a homogeneous catalyst: Detailed reaction kinetic study. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47, 25541.
- [8] Alizad Oghyanous, F., Etemadi, H., Yegani, R., 2020, Foaming control and determination of biokinetic coefficients in membrane bioreactor system under various organic loading rate and sludge retention time. *Biochemical Engineering Journal*, 157, 107491.
- [9] Karkare, M., Murthy, Z.V.P., 2012, Kinetic studies on agrochemicals wastewater treatment by aerobic activated sludge process at high MLSS and high speed agitation. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 18, 1301.
- [10] Lee, E., Cumberbatch, J., Wang, M., Zhang, Q., 2017, Kinetic parameter estimation model for anaerobic co-digestion of waste activated sludge and microalgae. *Bioresource Technology*, 228, 9.
- [11] Paul, S.R., Das, R., Debnath, A., 2023, Sequential coagulation/flocculation and sonolytic oxidation using persulfate and hydrogen peroxide for real rubber processing industry wastewater treatment: Kinetic modelling and treatment cost analysis. *Materials Today: Proceedings*, 77, 247.