



کنگره علوم و مهندسی آب و فاضلاب ایران

دانشگاه تهران، تهران

۲۶ و ۲۷ بهمن ماه ۱۳۹۵

1140P-NWWCE

## مدلسازی سینتیکی فرایند تصفیه در شبکه انتقال فاضلاب

روناک امیری<sup>۱</sup>، مجتبی احمدی<sup>۲</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی شیمی-بیوتکنولوژی دانشگاه رازی

۲- استادیار گروه مهندسی شیمی دانشگاه رازی

roonak.amiri1369@yahoo.com

### خلاصه

هدف از این پژوهش مدل سازی سینتیکی فرایند های انجام شده در خط لوله فاضلاب است. در این راستا یک کیلومتر از خط لوله فاضلاب کرمانشاه به عنوان پایلوت انتخاب گردید. برای نمونه گیری رباتی طراحی شد که می توانست در داخل خط لوله حرکت کرده و از عمق های مختلف خط لوله نمونه برداری کند. ربات از راه منهول به خطوط انتقال فرستاده شده و دو نمونه از سطح و عمق بیست سانتی متری در دو فصل بهار و تابستان گرفته شد. به طور میانگین راندمان حذف مواد آلی در فصل بهار ۳۶.۵ درصد و در فصل تابستان ۲۳ درصد بود. بازده حذف مواد آلی برای سطح و عمق ۲۰ سانتی متری تقریباً یکسان بود. برای مدل سازی فرایند حذف آلاینده از مدل سینتیکی مرتبه اول، و مدل استور-کینکانن استفاده شد. با توجه به تحلیل سینتیکی حذف آلاینده مدل استور-کینکانن در رابطه با پیش بینی حذف آلاینده در خط لوله پیشنهاد می شود.

کلمات کلیدی: مدل سازی سینتیکی - ربات - فاضلاب - خط لوله.

### ۱. مقدمه

سیستم تصفیه فاضلاب شامل سیستم جمع آوری فاضلاب و واحد تصفیه فاضلاب است. سیستم جمع آوری فاضلاب شامل شبکه لوله ها، ایستگاه پمپاژ و دیگر امکاناتی است که فاضلاب شهری و صنعتی را به صورت مجزا یا مرکب به داخل واحد تصفیه فاضلاب منتقل می کند. در طراحی و مدیریت سیستم جمع آوری فاضلاب توجه اصلی بر روی هیدرولیک و انتقال فاضلاب است و به ندرت این سیستم را به صورت یک راکتور ساده شیمیایی و راکتور بیولوژیکی در نظر می گیرند [1]. مطالعات نشان داده که در طی انتقال فاضلاب در سیستم جمع آوری در بالک فاضلاب و بایوفیلیم آن تغییرات میکروبی مواد ارگانیک و مواد مغذی رخ می دهد. زمان ماند هیدرولیکی در بسیاری از سیستم های مجاری فاضلاب نزدیک به زمان ماند واحد های تصفیه لجن فعال است به علاوه جریان معمولاً بیشتر از ۶۰٪ لوله را پر نمی کند، و در طول دوره DWF خطوط لوله تقریباً خالی است از این رو خطوط لوله میتواند همانند یک راکتور بیولوژیکی عمل کند [2]. در مطالعه ای یاسونوری تانجی و همکارانش، برای تخمین ظرفیت خودپالایی شبکه های جمع آوری فاضلاب، ۶ قطعه بتنی مختلف را به مدت ۹ ماه در یک شبکه واقعی قرار دادند. پس از ۷۹ روز که قطعات در معرض جریان فاضلاب بودند، یک لایه بایوفیلیم ناهمگن بر روی قطعات تشکیل شد. آن ها قابلیت بایوفیلیم ها را از طریق اندازه گیری نرخ کاهش غلظت سوبسترای فاضلاب مصنوعی مقایسه کردند. آنالیز آن ها شامل محاسبه تغییرات غلظت اکسیژن محلول، کربن آلی، آمونیاک و نیترات بود. نتایج آن ها نشان دهنده این موضوع بود که قطعه بتنی با سوراخ های ۱۲ میلیمتری بیشترین نرخ مصرف سوبسترا را داشته است. آن ها بیان کردند که شبکه های جمع آوری فاضلاب قابلیت بالایی در حذف مواد آلی داشته و بهینه سازی آن ها می تواند فعالیت شان را افزایش دهد [3]. همچنین در مطالعه ای که توسط آلمدیا و همکارانش انجام گرفت تبدیلات بیولوژیکی یکی از خطوط اصلی شبکه جمع آوری فاضلاب را در شهری ساحلی به نام استوریل واقع در کشور پرتغال مورد بررسی قرار دادند. طول شبکه انتخاب شده ۷۲۴۰ متر و تمرکز آن ها بر دوره های بدون بارندگی و شرایط هوایی بوده است. نتایج آن ها بیان کننده این موضوع است که در صورت حضور اکسیژن مورد نیاز فعالیت باکتری های هوایی، نرخ تبدیلات بیولوژیکی در شبکه ها بالاست. آن ها بیشترین میزان حذف را در غلظت COD محلول مشاهده کردند [4]. درک بهتر واکنش هایی که در شبکه جمع آوری فاضلاب رخ می دهند می توان شبکه ها را به نحوی طراحی کرد که

میزان حذف مواد آلی هنگام انتقال افزایش یابد و مهندسیین قادر خواهند بود که ابعاد تأسیسات تصفیه‌خانه را کاهش دهند در این مطالعه میزان حذف مواد آلی و سنتیک فرایند در خط لوله تعیین می شود، در واقع هدف از این مطالعه شناساندن سیستم انتقال فاضلاب به عنوان یک سیستم پیش تصفیه و بررسی سنتیک فرایندها در خط لوله است.

## ۲. روش کار

### ۲-۱- مشخصات فیزیکی خطوط انتقال مورد مطالعه

سیستم مورد مطالعه بخشی از خطوط انتقال فاضلاب شهر کرمانشاه منتهی به تصفیه‌خانه فاضلاب شهر کرمانشاه به طول حدود یک کیلومتر است. مقدار سرعت جریان در داخل خطوط لوله یک متر بر ثانیه اندازه گیری شد. نمونه گیری از ده منهول خطوط لوله انتقال انجام گرفت. فواصل منهول ها حدود ۱۰۰ متر می باشد. برای نمونه گیری رباتی طراحی شد که می توانست در داخل خط لوله حرکت کرده و از عمق های مختلف خط لوله نمونه برابری کند. ابتدا ربات مخصوص از راه منهول به خطوط انتقال فرستاده شده و دو نمونه از سطح و عمق بیست سانتی متری گرفته شد سپس ربات ۵۰ متر در مسیر جریان حرکت کرده و در محل مورد نظر نیز از سطح و عمق بیست سانتی متری نمونه گیری انجام شده است. نمونه ها در فصول بهار، تابستان به ترتیب در تاریخ ۹۴/۳/۲۰، ۹۴/۶/۲۷ گرفته شده است.

### ۲-۲- ساخت ربات جهت نمونه برداری ویدیومتری از خطوط لوله فاضلاب

این ربات قادر است با دو مدل وینچ، ۱۰۰ و یا ۱۵۰ متری وارد لوله فاضلاب شده و با دوربین حامل، تمام مشکلات، شامل: علت مسدود شدگی لوله فاضلاب و تعیین محل آن، تعیین متراژ دقیق لوله گذاری و وضعیت اتصال لوله ها و محل خمیدگی لوله فاضلاب و همچنین سنجش شیب مسیر فاضلاب را انجام دهد و همچنین قادر است از عمق های مختلف در خط لوله نمونه بردارد. این ربات دارای کابل جمع کن اتوماتیک ریموت کنترل و ۳ نوع پروژکتور برای نور پردازی مناسب می باشد و برای ویدیومتری لوله های با سایز ۱۵۰ الی ۶۰۰ میلی متر قابل استفاده می باشند. و قادر است بعد از اتمام کار، کل مراحل ویدیومتری را بر روی DVD ضبط نماید.



شکل ۱- ربات بازرسی خط لوله فاضلاب، مجهز به سیستم تصویر برداری و نمونه گیری



شرکت مهندسی آب و فاضلاب کوز

کنگره علوم و مهندسی آب و فاضلاب ایران

دانشگاه تهران، تهران

۲۶ و ۲۷ بهمن ماه ۱۳۹۵



## ۲-۳- روش انجام آزمایش :

جهت بررسی میزان آلاینده در فاضلاب از تست COD استفاده شد. در مورد پساب هایی که حاوی مواد سمی هستند، این آزمایش را می توان تنها روش قابل قبول در تعیین مواد آلی به حساب آورد که بر روش BOD برتری دارد، چرا که در صورت وجود مواد سمی، میکروارگانیسم های آزمایش BOD نمی توانند زنده باقی بمانند و لذا آزمایش BOD عملی نخواهد بود [5]. برای اندازه گیری مقدار COD نمونه ها از روش تیتراسیون بر اساس کتاب روشهای استاندارد آزمایشات آب و فاضلاب استفاده گردید [6]. به طوریکه نمونه ها پس از گرفته شدن بلافاصله به آزمایشگاه منتقل شد و مقادیر COD آنها تعیین گردید.

## ۳- مدل سازی واکنش های بیولوژیکی

سینتیک به توصیف میزان حذف سوبسترا و پارامترهای تاثیرگذار در طراحی خط لوله کمک قابل توجهی میکند. به همین دلیل مطالعه و کشف روابط در مکانیسم هایی که فرایندها را کنترل می کنند امری ضروری است [7]. تا به حال مدل های سینتیکی زیادی برای فرایندهای تصفیه فاضلاب ارائه شده اند که در این میان می توان به مدل های مونود، الدن، گراو و استور-کینکون اشاره کرد [8]. در ادامه مدل های سینتیکی درجه یک و استور-کینکون برای خط لوله فاضلاب که همانند یک راکتور بیولوژیکی است، مورد بررسی قرار میگیرد.

### ۳-۱- مدل درجه اول

تغییرات در سرعت حذف آلاینده در خط لوله با در نظر گرفتن درجه اول بودن واکنش برای حذف آلاینده می تواند به صورت زیر بیان شود [9-10]

$$-\frac{dS}{dt} = \frac{Q}{V} \cdot S_i - \frac{Q}{V} \cdot S_e - k_1 S_e \quad (1)$$

که در این رابطه  $Q$  دبی جریان در سیستم،  $V$  حجم راکتور،  $S_i$  غلظت خوراک ورودی به سیستم ( $\frac{mg}{L}$ )،  $S_e$  غلظت خوراک خروجی از سیستم ( $\frac{mg}{L}$ )،  $k_1$  ثابت سینتیکی درجه اول در شرایط تعادل پایدار در راکتور بیولوژیکی، تغییرات در حذف غلظت های آلاینده ها ( $ds/dt$ ) برابر صفر است. لذا رابطه (۱) را می توان به صورت زیر نوشت:

$$\frac{S_i - S_e}{HRT} = k_1 S_e \quad (2)$$

که HRT زمان ماند هیدرولیکی بر حسب ساعت است. در این حالت  $k_1$  شیب خط حاصل از ترسیم  $\frac{S_i - S_e}{HRT}$  بر حسب  $S_e$  محاسبه می گردد.

### ۳-۲- مدل استور-کین کانن

این مدل به صورت رابطه زیر بیان می گردد [11]. که در آن  $U_{max}$  و  $K_B$  به ترتیب بیشترین نرخ مصرف سوبسترا بر حسب ( $g/l.s$ ) و پارامتر مربوط به چگونگی رشد توده های بیولوژیکی بر حسب ( $g/l.s$ ) می باشد.

$$\frac{ds}{dt} = \frac{U_{max} \cdot Q \cdot \frac{S_i}{A}}{K_B + Q \cdot \frac{S_i}{A}} \quad (3)$$

نرخ مصرف خوراک در زمان  $t$   $(\frac{mg}{L.s})$ ،  $Q$  دبی جریان در سیستم،  $S_i$  خوراک ورودی به سیستم  $(\frac{mg}{L})$ ،

$A$  سطح مقطع،  $K_B$  پارامتری مربوط به چگونگی رشد توده‌های بیولوژیکی  $(\frac{mg}{L.s})$ ،  $U_{max}$  بیشترین نرخ مصرف خوراک  $(\frac{mg}{L.s})$  است.

با نوشتن موازنه جرم در سیستم، رابطه زیر بدست خواهد آمد:

$$\frac{ds}{dt} = \frac{Q}{V}(S_i - S_e) \quad (4)$$

$S_e$ : خوراک خروجی از سیستم  $(\frac{mg}{L})$  است.

با استفاده از روابط (۳) و (۴) معادله (۵) بدست می‌آید:

$$\frac{ds}{dt} = \frac{Q}{V}(S_i - S_e) = \frac{U_{max} \cdot Q \cdot \frac{S_i}{A}}{K_B + Q \cdot \frac{S_i}{A}} \quad (5)$$

رابطه (۵) اولین بار برای رآکتورهای RBC با فرض چشم پوشی از جامدات معلق از جامدات بیولوژیکی چسبیده استفاده شد. که توسط تحقیقات Broch-Due و Kristofferson رد شد. و به جای سطح  $(A)$  از حجم استفاده شد.

$$\frac{ds}{dt} = \frac{Q}{V}(S_i - S_e) = \frac{U_{max} \cdot Q \cdot \frac{S_i}{V}}{K_B + Q \cdot \frac{S_i}{V}} \quad (6)$$

نتایج تحقیقات این دو نشان داد که سرعت حذف (بازدهی حذف) COD بیش از آنکه به غلظت مواد آلی و یا بار هیدرولیکی بستگی داشته باشد، به بار آلی اعمال شده وابسته است.

با خطی سازی رابطه (۶) رابطه (۷) بدست می‌آید:

$$\left(\frac{ds}{dt}\right)^{-1} = \frac{V}{Q(S_i - S_e)} = \frac{K_B}{U_{max}} \left(\frac{V}{Q.S_i}\right) + \frac{1}{U_{max}} \quad (7)$$

با رسم عبارت  $\frac{V}{Q(S_i - S_e)}$  بر حسب  $\left(\frac{V}{Q.S_i}\right)$  خط راستی حاصل خواهد شد که عرض از مبدا این خط  $\frac{1}{U_{max}}$  و شیب آن  $\frac{K_B}{U_{max}}$  خواهد بود [12].

با نوشتن موازنه جرم برای کل رآکتور، حجم و همچنین غلظت مواد آلی خروجی از رآکتور قابل محاسبه است.

از جایگزینی رابطه (۶) رابطه (۸) بدست خواهد آمد:

$$Q.S_i = Q.S_e \left[ \frac{U_{max} \cdot Q \cdot \frac{S_i}{A}}{K_B + Q \cdot \frac{S_i}{A}} \right] \cdot V \quad (8)$$

با حل این معادله روابط زیر حاصل می‌گردند:

$$V = \frac{Q.S_i}{\left(\frac{U_{max} \cdot S_i}{S_i - S_e}\right) - K_B} \quad (9)$$

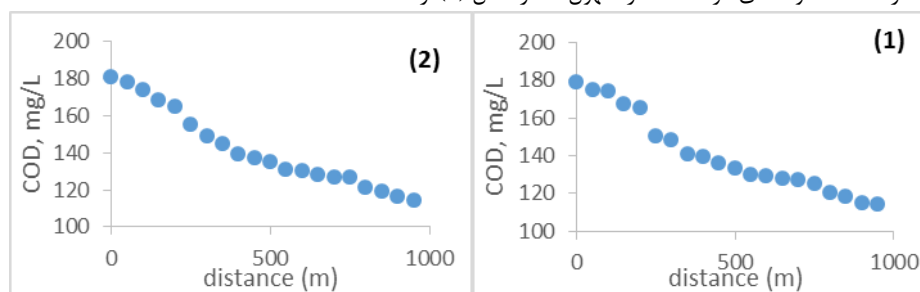
$$S_e = S_i - \frac{U_{\max} \cdot S_i}{\left(\frac{Q \cdot S_i}{V}\right) + K_B}$$

روابط (۹) و (۱۰) نشان می‌دهند که معادله اصلاح شده استور-کین کانن معادله خوبی برای طراحی این گونه از رآکتورها محسوب می‌شود. چرا که این معادله قابلیت محاسبه حجم و غلظت خروجی از رآکتورها را دارا می‌باشد.

#### ۴. نتایج و بحث

#### ۴-۱- نمونه گیری در فصل بهار

نمودار تغییرات مقدار COD نمونه های گرفته شده از منهول ها در شکل (۲) ارائه شده است.



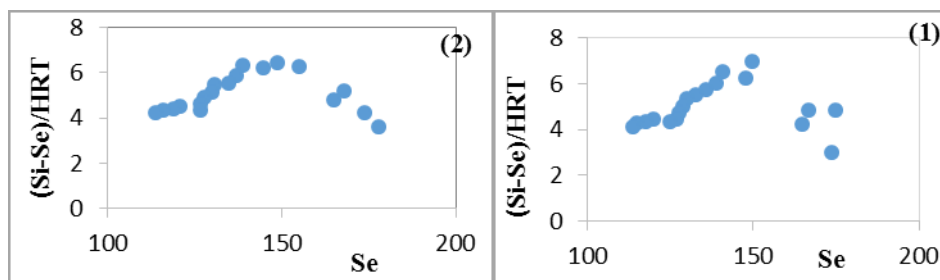
شکل ۲- نمودار تغییرات COD از سطح (۱) و عمق 20cm (۲) در خطوط انتقال فاضلاب در فصل بهار

مقدار سرعت متوسط جریان ۱ متر بر ثانیه تخمین زده شد. راندمان حذف COD در سطح پس از گذشتن از دهمین منهول ۳۶ درصد بدست آمد، برای عمق ۲۰ سانتی متری ۳۷ درصد بدست آمد.

#### ۴-۲- بررسی سینتیکی داده های جمع آوری شده

#### ۴-۲-۱- مدل درجه اول

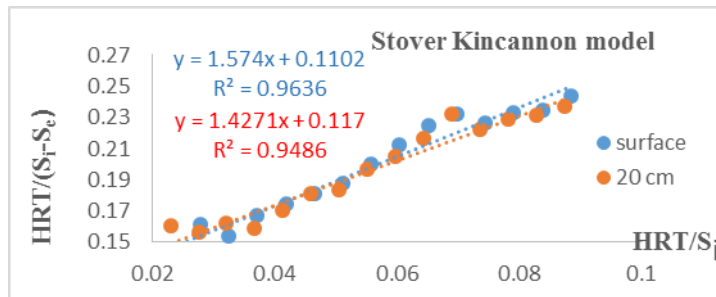
مدل درجه اول را برای بررسی داده ها به کار برده، نتایج برای هر داده های سطحی و عمق بیست سانتی متری در شکل (۳) ارائه شده است. با توجه به نتایج بدست آمده این مدل داده ها را برای هر دو حالت پوشش نمی دهد.



شکل ۳- نمودار سینتیکی مدل درجه اول داده های سطحی (۱) و عمق ۲۰ سانتی متری (۲)

#### ۴-۲-۲- مدل اصلاح شده استور - کینکانن

شکل ۴ نتایج سینتیکی برای مدل کینکانن را نشان می دهد.



شکل ۴- تعیین ثوابت سینتیکی حذف COD برای مدل استور- کینکانن

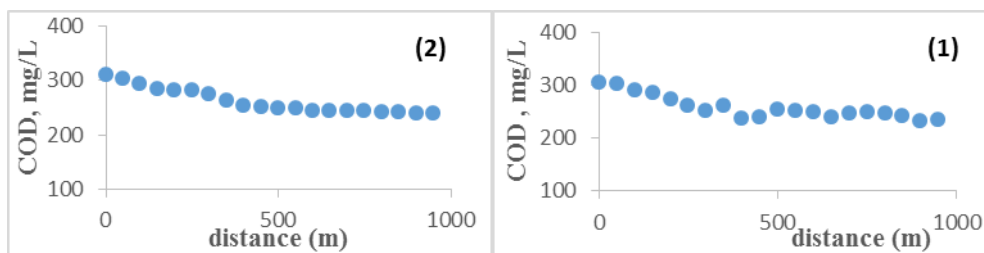
ثوابت بدست آمده از مدل کینکانن در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول ۱- مقادیر ثوابت سینتیکی مدل استور- کینکانن

سطحی	عمق 20cm	پارامتر
۱/۵۷۴	۱/۴۲۷۱	شیب
۰/۱۱	۰/۱۱۷	عرض از مبدا
۰/۹۶۳۶	۰/۹۴۸۶	$R^2$
۹/۰۹	۸/۵۵	$U_{max}$ (mg/l.min)
۱۴/۳۱	۱۲/۱۹	$K_B$ (mg/l.min)

#### ۴-۳- نمونه گیری در فصل تابستان

نمودار تغییرات COD در مسیر انتقال به طول ۱۰۰۰ متر در شکل (۵) نشان داده شده است.



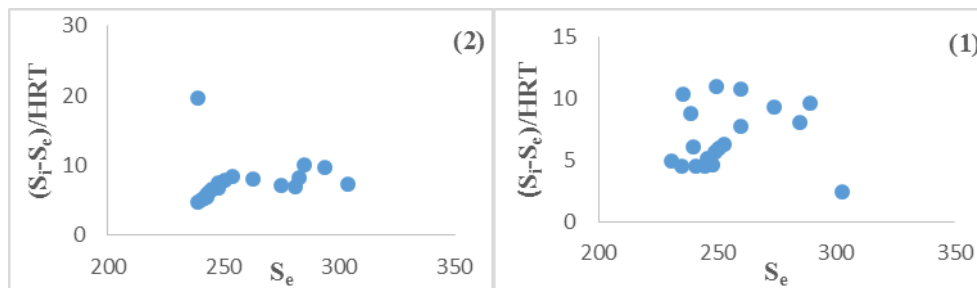
شکل ۵- نمودار تغییرات COD از سطح (۱) و عمق 20cm (۲) در خطوط انتقال فاضلاب در فصل تابستان

راندمان حذف COD بعد از عبور فاضلاب از دهمین منهول ۲۳ درصد بدست آمد.

#### ۴-۴- بررسی سینتیکی داده های جمع آوری شده

#### ۴-۴-۱- مدل درجه اول

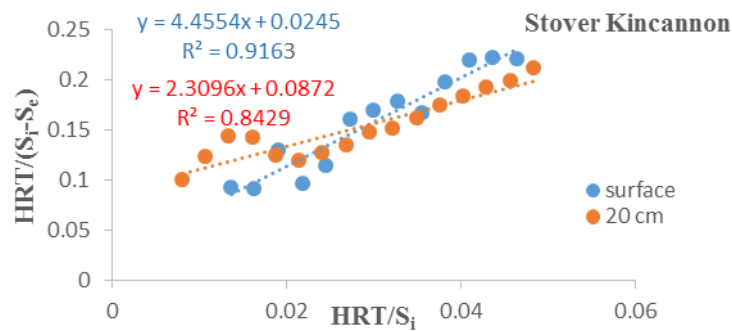
مدل درجه اول را برای بررسی داده ها به کار برده، نتایج برای هر دو داده های سطحی و عمق بیست سانتی متری در شکل (۶) ارائه شده است.



شکل ۶- نمودار سینتیکی مدل درجه اول داده های سطحی (۱) و عمق ۲۰ سانتی متری (۲)

#### ۴-۴-۳- مدل اصلاح شده استور- کینکانن

شکل (۷) نتایج سینتیکی برای مدل کینکانن را نشان می دهد.



شکل ۷- تعیین ثوابت سینتیکی حذف COD برای مدل استور- کینکانن

ثوابت بدست آمده از مدل کینکانن در جدول (۲) ارائه شده است.

جدول ۲- مقادیر ثوابت سینتیکی مدل استور- کینکانن

عمق 20cm	سطحی	پارامتر
۲/۳۰۹	۴/۴۵۵	شیب
۰/۰۸۷۲	۰/۰۲۴۵	عرض از مبدا
۰/۸۴۳	۰/۹۱۶	R <sup>2</sup>
۱۱/۴۷	۴۰/۸۲	U <sub>max</sub> (mg/l.min)
۲۶/۴۸	۱۸۱/۸۴	K <sub>B</sub> (mg/l.min)



## ۵. نتیجه گیری

در این مطالعه میزان حذف آلودگی در یک کیلومتر از خط لوله جمع آوری فاضلاب شهر کرمانشاه مورد بررسی قرار گرفت. تغییرات میزان حذف آلاینده (COD) نشان می دهد که خطوط انتقال فاضلاب توانایی حذف آلاینده را دارد و همانند یک راکتور بیولوژیکی عمل می کند. برای نمونه هایی که در دو فصل مختلف از سال گرفته شد، به طور میانگین راندمان حذف مواد آلی در فصل بهار ۳۶.۵ درصد و در فصل تابستان ۲۳ درصد بود. بازده حذف مواد آلی برای سطح و عمق ۲۰ سانتی متری تقریباً یکسان بود. همچنین در این مطالعه جهت پیش بینی میزان حذف آلاینده مدل های سینتیکی درجه اول و مدل استور-کینکانن مورد بررسی قرار گرفت، و نشان داده شد که مدل سینتیکی استور-کینکانن مناسب ترین مدل جهت پیش بینی میزان حذف مواد آلی در خطوط انتقال فاضلاب است.

## ۶. قدردانی

نویسندگان مقاله از شرکت آب و فاضلاب استان کرمانشاه به خاطر حمایت های بی دریغشان تشکر و سپاسگزاری می نمایند.

## ۷. مراجع

1. Bulbul Ahmed. Sewer Collection System Bioaugmentation Reduces Energy. "Use in Wastewater Treatment Plants." *In-Pipe Tech*, Inc, 2005.
2. Ahmet Baban, Ilhan Talinli. "Modeling of organic matter removal and nitrification in sewer systems — an approach to wastewater treatment." *Desalination*, 246, 640–647, 2009.
3. Yasunori Tanji, Rie Sakai, Kazuhiko Miyana, Hajime Unno. "Estimation of the self-purification capacity of biofilm formed in domestic sewer pipes." *Biochem Engineering*, 31, 96–101, 2006.
4. M.C. Almedia, D. Bulter, J.S. Matos. "In-sewer biodegradation study at the Coasta do Estroil interceptor system." *Urban Water* 2 327-334, 2000.
۵. کیانی، س. (۱۳۸۷). "آزمایش های شیمی و کیفیت آب و فاضلاب"، انتشارات طاق بستان، کرمانشاه، ایران.
6. Way, c.. "Standard methods for the examination of water and wastewater". (2015)
7. Hosseiny, S. H., and Borghei, S. M. "Modelling of organic removal in a moving bed biofilm reactor (MBBR)." *Scientia Iranica*, 9(1), 53-58. (2002).
8. Stover, E. L., and Kincannon, D. F. "Rotating biological contactor scale-up and design." *Oklahoma State Univ Still Water*, 14 (2), 123-128. (1982).
9. Borghei, S.M., Sharbatmaleki, M., Pourrezaei, P., and Borghei, G. "Kinetics of organic removal in fixed-bed aerobic biological reactor." *Bioresource Technology*, 99, 1118-1124. (2008).
10. Sharbatmaleki, M. A., and Borghei, S. M. "Performance of pumice stone as a packing in fixed-bed aerobic bioreactor." *J. of Water and Wastewater*, 56, 62-71. (2006).
11. Aydinol, F.I., Yetilmezsoy, K., Comez, S., Bayhan, H.; Performance evaluation and kinetic modeling of the start-up of a UASB reactor treating municipal wastewater at low temperature. *Bioprocess. Biosyst. Eng*; 34:153-162, 2011.





شرکت مهندسی آب و فاضلاب ایران

کنگره علوم و مهندسی آب و فاضلاب ایران

دانشگاه تهران، تهران

۲۶ و ۲۷ بهمن ماه ۱۳۹۵



12. Jin, R. C., and Zheng, P. "Kinetics of nitrogen removal in high rate anammox upflow filter." Journal of Hazardous Materials, 170(2), 652-656. (2009).