The Operation of Anaerobic Lagoons

Gheisari., A., Lecturer, Mohajer Technical School, and Senior Scientist, Water and Wastewater Consulting Engineers, Isfahan, Iran

Kazemi., M.A., Executive Manager, Water and Wastewater Consulting Engineers, Isfahan, Iran

Orumieh., H., Senior Scientist, Water and Wastewater Consulting Engineers, Isfahan, Iran

Abstract

The operation of anaerobic lagoons adjacent to Isfahan Wastewater Treatment Plant was studied over a 12 - month period. The rate of organic loading and BOD and SS removal effiiencies, and their relationship with organic reductions and ambient temperature were studied. A high correlation was found to hold among temperature, organic loading rate, and BOD_5 removal. A correlation coefficient of 87% was obtained for temperature and BOD_5 removal efficiency and that for temperature and organic loading was 83%. The lowest atmospheric temperature during the study period was 4°C. The BOD removal efficiency reached 25% at this condition.

A model was developed to predict SS removal efficiency against atmospheric temperature variations in which small increases were observed in removal efficiency with increasing atmospheric temperatures. The BOD reaction constant (K_T) at 20°C was equal to 0.4895. A model was also developed to predict variations in reaction constant against temperature variations which provided a correlation coefficient of 83% with a standard error of 6.3%. According to the observations and studies carried out, the quantity of per capita sludge in the anaerobic lagoon was estimated to be 0.06 to 0.08 m^3 per person/year.

ارزیابی عملکرد برکه‌های بی‌هوازی

علی قیصری* محمدعلی کاظمی** حمیدرضا ارومیه***

چکیده

در این تحقیق عملکرد برکه‌های بی‌هوازی در مجاورت تصفیه‌خانهٔ فاضلاب شهر اصفهان طی یک دوره ۱۲ماهه مشاهده و ارزیابی شده است. نرخ بارگذاری ماده آلی و بازده حذف BOD و SS و ارتباط آن با نرخ کاهش ماده آلی و دمای محیط اندازه‌گیری شد. یک ارتباط قوی بین دمای هوا و نرخ بارگذاری با بازده حذف BOD_5 مشاهده گردید و ضریب همبستگی بازده حذف BOD_5 با دمای هوا و نرخ بارگذاری به ترتیب برابر با ۸۷ و ۸۳ درصد به دست آمد. کمترین دمای هوا در زمان تحقیق برابر با ۴درجه سانتی‌گراد بود و در این شرایط بازده حذف BOD_5 برابر با ۲۵درصد مشاهده شد. لازم به ذکر است که اندازه‌گیری دمای هوا عمدتاً در روز بوده و در شب هنگام به کمتر از این مقدار نیز رسیده است.

در این تحقیق جهت پیش‌بینی بازده حذف SS با دمای هوا مدلی به دست آمد که نشان می‌دهد بازده حذف در برابر افزایش دما رشد ضعیفی دارد.

ثابت واکنش حذف BOD_5 (K_T) در دمای ۲۰درجه برابر با ۰/۴۸۹۵ بر روز بود. جهت پیش‌بینی تغییرات ثابت واکنش نسبت به دمای هوا بر اساس رگرسیون خطی مدلی با ضریب همبستگی ۸۳ درصد و خطای استاندارد ۶/۳ درصد بدست آمد. در نهایت با بررسی‌ها و مشاهدات انجام شده میزان سرانهٔ لجن در برکه بی‌هوازی بین ۰/۰۶ تا ۰/۰۸ مترمکعب به ازای هر نفر در سال برآورد گردیده است.

مقدمه

یکی از معمول‌ترین و در عین حال ساده‌ترین روش تصفیه فاضلاب، برکه‌های تثبیت هستند. فرایند برکه‌ای به طور طبیعی عمل می‌کند و لذا مسئله انرژی و وسائل الکترومکانیک که از اهم مسائل تصفیه‌خانه‌های فاضلاب است برای این روش مطرح نیست. برکه‌های تثبیت برای اجتماعات کوچک و بزرگ کاربرد دارد ولی به علت ارزانی زمین در مناطق کم جمعیت ممکن است ارجحیت داشته باشد.

عملیات تصفیه در برکه‌های تثبیت به کمک مجموعه‌ای از واکنش‌های فیزیکی - شیمیایی و بیولوژیک به طور طبیعی و در محیط آبی انجام می‌پذیرد و باعث حذف پاتوژن‌ها و کاهش

*- عضو هیأت علمی دانشکده فنی مهاجر اصفهان و کارشناس ارشد مهندسین مشاور طرح و تحقیقات آب و فاضلاب

**- مدیرعامل مهندسین مشاور طرح و تحقیقات آب و فاضلاب

***- کارشناس ارشد مهندسین مشاور طرح و تحقیقات آب و فاضلاب

اکسیژن خواهی بیوشیمیایی (BOD)، آمونیاک، نیترات، فسفر و جامدات معلق می‌گردد. برکه‌های تثبیت که مجهز به دستگاه‌های هوادهی نمی‌باشند به سه دسته بی‌هوازی، اختیاری و هوازی (جلادهی) تقسیم می‌شوند [۱ و ۲]. در این مقاله فقط در خصوص طراحی و عملکرد برکه‌های بی‌هوازی بحث خواهد شد.

تجزیهٔ بی‌هوازی عبارت است از تجزیه بیولوژیک مواد آلی در غیاب اکسیژن آزاد که طی این فرایند مواد آلی تجزیه و به متان، دی اکسید کربن و مقداری هم گازهای دیگر تبدیل می‌شوند. بر اساس یک نظر کلی تجزیه اساساً در دو فاز صورت می‌گیرد. در فاز اول ماده آلی توسط باکتری‌های اسید ساز به اسیدهای با زنجیر کوتاه تبدیل می‌شود و در فاز دوم اسیدهای حاصل توسط باکتری‌های متان‌ساز، به متان و دی‌اکسید کربن تبدیل می‌شوند.

تجزیه مواد آلی نه تنها محصولات حاصل از تخریب شیمیایی را تولید می‌کند بلکه توده بیولوژیک هم ایجاد می‌کند. تولید هر یک از محصولات مذکور به دما، زمان ماند، pH و نوع و غلظت مواد غذایی بستگی دارد.

برکه‌های بی‌هوازی را می‌توان با واحدهای متعارف تصفیه از قبیل تانک‌های ته‌نشینی اولیه، واحدهای تغلیظ لجن، هاضم‌های بی‌هوازی، و بعضی مواقع و شن‌گیرها مقایسه نمود [۳].

با عبور فاضلاب از برکه‌های بی‌هوازی که به چند روز زمان ماند نیاز دارد پدیده‌های زیر اتفاق می‌افتد:

الف - درصد زیادی از مواد معلق حذف می‌گردد؛

ب - برخی از پاتوژن‌ها کاهش می‌یابند؛

ج - مواد شناور از قبیل روغن، گریس، پلاستیک، فیلتر سیگارها و سایر مواد مشابه در سطح برکه ایجاد لایه شناور[1] می‌کنند؛

د - با انجام عمل متابولیسم گازهایی نظیر CO_2، CH_4 و SH_2 از سطح برکه به اتمسفر وارد می‌شوند. در این صورت امکان دارد قسمتی از مواد ته‌نشین شده همراه گازها به سطح برکه منتقل شده و همراه پساب خارج شوند. این پدیده در فصل‌هایی که گرما شروع می‌شود شدیدتر شده و باعث کاهش کیفیت پساب می‌گردد [۳]. میزان لجن تجمع یافته در برکه‌های بی‌هوازی از ۴۰ تا ۸۰ لیتر به ازای هر نفر در سال گزارش شده است [۳ و ۴]. پساب حاصل از برکه‌های بی‌هوازی نیاز به تصفیه بیشتری دارند که معمولاً برای این منظور از برکه‌های اختیاری استفاده می‌شود. بازده حذف BOD_5 از ۴۰ تا ۸۵ در صد در شرایط مناسب گزارش شده است [۳، ۵ و ۶].

طراحی برکه‌های بی‌هوازی معمولاً بر اساس زمان ماند و بارگذاری حجمی انجام می‌پذیرد. البته طراحی بر اساس بار حجمی اخیراً بیشتر مورد توجه طراحان قرار گرفته است. زمان ماند پیشنهادی در مراجع مختلف تفاوت زیادی نسبت به یکدیگر دارند. مثلاً آسوالد و همکاران[2] (۱۹۷۶) ۵ روز، آرسیوالا[3] (۱۹۷۳) ۵-۱ روز در درجه حرارت‌های مختلف، متکاف و ادی[4] (۱۹۷۹) ۵۰-۲۰ روز، گلونیا[5] (۱۹۸۹) حداقل ۳ روز و سازمان بهداشت جهانی (WHO, 1987) حداقل یک روز را پیشنهاد کرده‌اند. در خصوص بار حجمی که این روزها بیشتر مورد توجه می‌باشد هم ارقام مختلفی گزارش شده است. مثلاً فیشر و همکاران (۱۹۶۸) برای کانادا ۲۸۳-۴۲، گلونیا (۱۹۷۱) برای مناطق نیمه گرم ۱۲۵، مارا (۱۹۷۶) ۴۰۰-۱۰۰، آرسیوالا (۱۹۸۱) برای هندوستان با توجه به درجه حرارت ۱۳۴-۵۰ و WHO (۱۹۸۷) حداکثر $400g\ BOD_5/m^3.d$ پیشنهاد داده‌اند [۶].

نکته قابل توجه این است که چون به مرور زمان به خاطر تجمع لجن از حجم مفید برکه‌های بی‌هوازی کاسته می‌شود، در موقع طراحی بایستی حجم واقعی محاسبه گردد. هم‌چنین از آنجاکه برکه‌های بی‌هوازی توانایی زیادی در تصفیه فاضلاب‌های صنعتی با غلظت زیاد دارند، بهتر است در این گونه موارد برای طراحی از بار حجمی استفاده گردد.

وسایل و روش‌ها

توصیف محل

جهت بررسی عملکرد برکه‌های بی‌هوازی در حذف مواد

1- Scum
2- Oswald et al.
3 Arceivala
4- Metcalf and Eddy
5- Gloyha

آلی و جامدات معلق با تغییرات پارامترهای مستقل از قبیل دبی ورودی و تغییرات دمای هوا، برکه‌ای در قطعه زمینی در مجاورت تصفیه‌خانه فاضلاب شمال اصفهان احداث و در اواسط تیرماه ۱۳۷۵ آماده بهره‌برداری گردید. مشخصات فیزیکی برکه مذکور به شرح ذیل است :

- حجم مفید ۶۱ مترمکعب
- عمق مفید ۲ متر
- شیب دیواره ۱:۱/۵

از فاضلاب خانگی ورودی به تصفیه‌خانهٔ فاضلاب شمال اصفهان یک خط لوله به قطر ۴ اینچ منشعب گردید و فاضلاب خام به برکه هدایت شد.

دبی فاضلاب ورودی به برکه بی‌هوازی توسط یک شیر کنترل شده و از سطح وارد برکه بی‌هوازی می‌گردید. سپس توسط لوله خروجی واقع در زیر سطح فاضلاب، پساب خارج می‌شد. شکل ۱ نمای این برکه را نشان می‌دهد.

راه‌اندازی و مراحل طرح

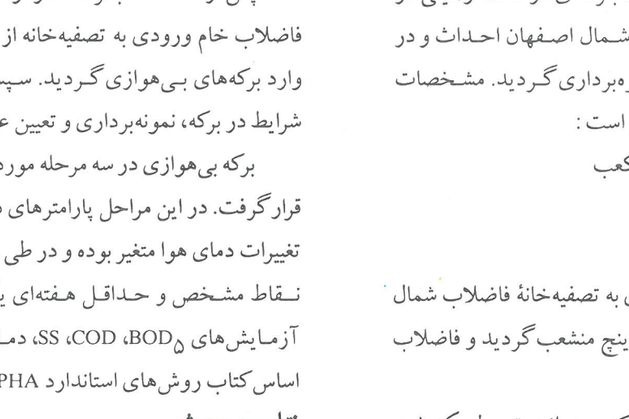
پس از احداث برکه‌ها در اواسط شهریورماه ۱۳۷۵ فاضلاب خام ورودی به تصفیه‌خانه از طریق لوله‌های ارتباطی وارد برکه‌های بی‌هوازی گردید. سپس بعد از پایدار شدن شرایط در برکه، نمونه‌برداری و تعیین عملکرد آن آغاز شد.

برکه بی‌هوازی در سه مرحله مورد بهره‌برداری و آزمایش قرار گرفت. در این مراحل پارامترهای دبی و زمان ماند همراه با تغییرات دمای هوا متغیر بوده و در طی هر یک از این مراحل از نقاط مشخص و حداقل هفته‌ای یک بار نمونه‌برداری و آزمایش‌های BOD_5، COD، SS، دما (هوا و فاضلاب) بر اساس کتاب روش‌های استاندارد APHA انجام گرفت [۷].

نتایج و بحث

مشخصات فاضلاب ورودی

حداقل، متوسط، حداکثر و انحراف معیار پارامترهای فاضلاب ورودی به برکه بی‌هوازی در جدول ۱ آورده شده است.



شکل ۱ : نمایی از برکه بی‌هوازی

جدول ۱ – مشخصات فاضلاب ورودی

ویژگی / مقدار	حداقل	متوسط	حداکثر	انحراف معیار
BOD_5 (mg/lit)	۱۱۱	۲۲۸	۴۶۰	۹۴
pH	۷	۷/۴۹	۷/۹	۰/۲۲۴
کدورت (F.T.U)	۷۸	۱۹۰	۵۰۰	۱۲۱
جامدات معلق (mg/lit)	۵۷	۱۹۳	۵۰۰	۱۱۱
جامدات معلق فرار (mg/lit)	۴۴	۱۱۵	۲۵۰	۵۷
کل جامدات (mg/lit)	۱۱۵	۹۵۳	۱۸۹۶	۳۴۸

حذف BOD و SS

طبق توصیه بار بوسا و سانت آنا[1] عملکرد راکتور را جهت حذف مواد آلی می‌توان بر اساس سه طریق زیر اندازه گیری نمود [۸].

۱-کل مواد آلی ورودی و کل مواد آلی خروجی

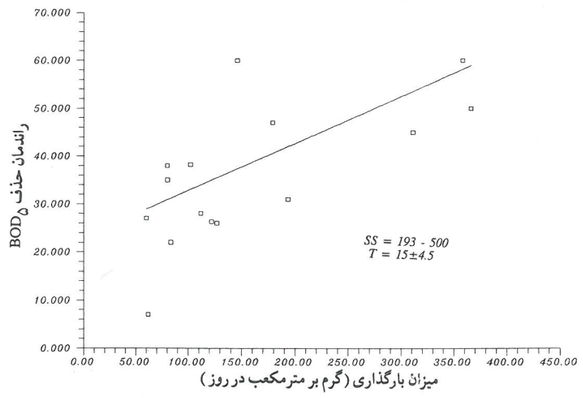
۲- مواد آلی فیلتر شده ورودی و مواد آلی فیلتر شده خروجی

۳-کل مواد آلی ورودی و مواد آلی خروجی فیلتر شده

حذف بار آلی در برکه بی‌هوازی بر اساس فرض اول انجام شد و عملکرد برکه بی‌هوازی در حذف BOD و SS مورد ارزیابی قرار گرفت.

تأثیر نرخ بارگذاری آلی بر روی بازده حذف BOD_5 در نمودار ۲ آورده شده است. شایان ذکر است که نرخ بارگذاری بر پایه حجمی محاسبه گردیده است. بازده حذف BOD_5 با افزایش نرخ بارگذاری آلی افزایش می‌یابد. واضح است که بازده حذف BOD_5 تابعی از زمان ماند هیدرولیکی و میزان نرخ بارگذاری می‌باشد. اما دما و غلظت BOD_5 ورودی نیز تأثیر به سزایی بر روی بازده حذف خواهند داشت. ضمناً تغییرات درجه حرارت فاضلاب در برکه بی‌هوازی در نمودار ۲ بین ۱۵±۴/۵ درجه سانتی‌گراد می‌باشد.

1- Barbosu and Santanna, 1989



نمودار ۲ : ارتباط بازده حذف BOD_5 با نرخ بارگذاری آلی

تا زمانی که توده بیولوژیک در برکه بی‌هوازی به حداکثر مقدار خود برسد بازده حذف BOD_5 با افزایش نرخ بارگذاری افزایش می‌یابد. سپس بازده به سرعت کاهش می‌یابد که این امر ناشی از فعالیت باکتری‌های اسیدساز می‌باشد [۸].

در نمودار ۳ نرخ مناسب بارگذاری جهت طراحی برکه‌های بی‌هوازی در دماهای متفاوت نشان داده شده است. بر این اساس معادله‌ای جهت میزان بارگذاری با استفاده از روش حداقل مربعات به دست آمده که در ذیل آورده شده است. در این معادله، L_V میزان بارگذاری و Ta دمای محیط می‌باشد :

$$L_V = ۷/۲۲۲ \times Ta + ۳۲ \qquad (۱)$$

لازم به ذکر است که در نمودار ۳ متوسط بازده حذف BOD_5 برابر ۷±۴۵درصد می‌باشد.

یک مدل ریاضی جهت توصیف ارتباط بین بازده حذف BOD_5 و دما توسط نرم افزارهای SPSS و TSP به دست آمده است :

$$E_{BOD_5} = ۰/۹۳۶ \times Ta + ۲۲/۴۲۲ \qquad (۲)$$

$$r = ٪۷۸$$

طیف تغییرات دما در فرمول (۲) برابر ۴ تا $35^{\circ}C$ است.

ضمناً بین بازده حذف BOD_5، بارگذاری و درجه حرارت رگرسیون چند متغیره انجام پذیرفته که به دلیل پایین‌تر بودن ضریب رگرسیون از معادله (۲) آورده نشده است. در معادله (۲)، E_{BOD_5} بازده حذف BOD_5 و Ta دمای هوا می‌باشد با استفاده از معادله (۲) در حداقل درجه حرارت ($4^{\circ}C$) بازده حذف BOD_5 برابر ۲۵٪ می‌باشد.

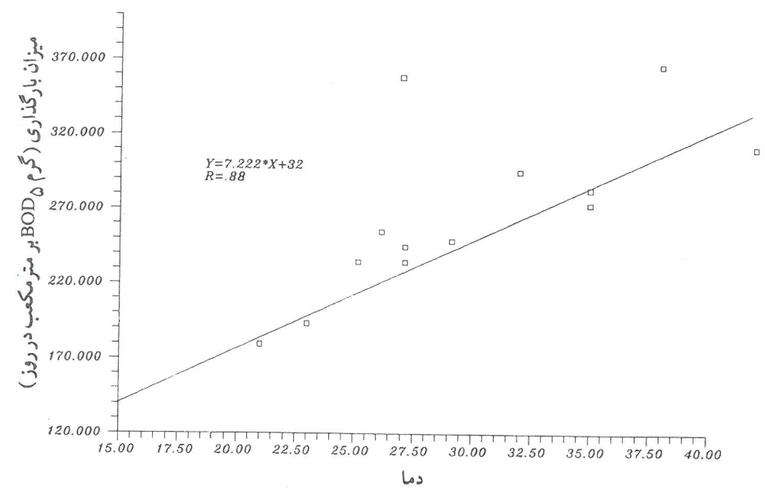
در معادله (۳) ارتباط بازده حذف SS در مقابل درجه‌حرارت از طریق رگرسیون خطی بین داده‌ها نشان داده شده است :

$$ESS = ۰/۲۹۵ \times Ta + ۲۹/۳۴۶ \qquad (۳)$$

E_{SS} = بازده حذف SS

معادله (۳) نشان می‌دهد که افزایش بازده حذف SS در قبال افزایش درجه حرارت از رشد ضعیفی برخوردار است که بیشتر ناشی از فعالیت بی‌هوازی در داخل برکه و تولید حباب‌های گاز بوده که منجر به افزایش SS در پساب خروجی می‌شود به طوری که در بازده حذف SS زمان ماند تأثیر بیشتری دارد.

بررسی‌ها بر روی برکه بی‌هوازی نشان می‌دهد که میزان تجمع سرانه لجن در برکه‌های بی‌هوازی بین ۰/۰۶ تا ۰/۰۸ مترمکعب می‌باشد که می‌تواند جهت تعیین حجم لجن در



نمودار ۳ : ارتباط نرخ بارگذاری و دمای محیط

برکه‌های بی‌هوازی برای نقاط مختلف ایران مورد استفاده قرار گیرد.

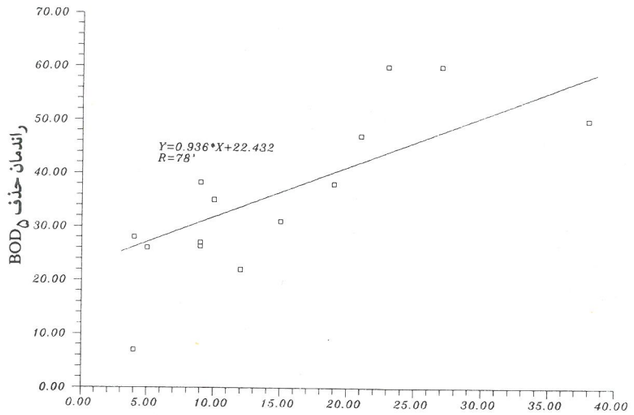
در نمودار ۴ تغییرات بازده حذف BOD_5 و دمای محیط در برکه بی‌هوازی آورده شده است.

در نمودار ۵ نیز ارتباط بین بازده حذف SS و دما آورده شده است.

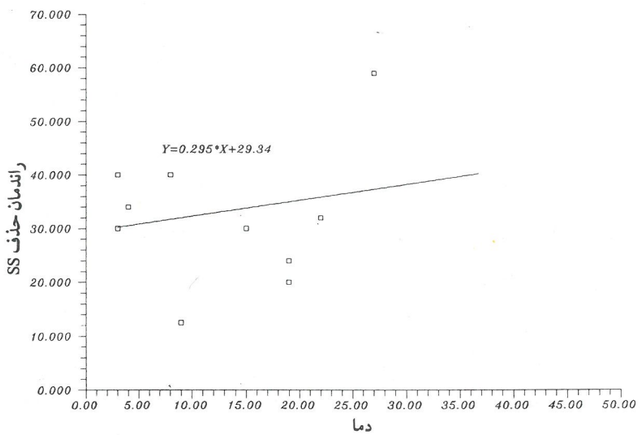
سینتیک حذف BOD

طبق شبیه‌سازی فرارا[1] و هارلمان[2] حذف مواد آلی بر مدل اختلاط کامل استوار می‌باشد و مدل جریان قالبی در بعضی مواقع در عملکرد تصفیه برکه‌های بی‌هوازی غالب می‌گردد.

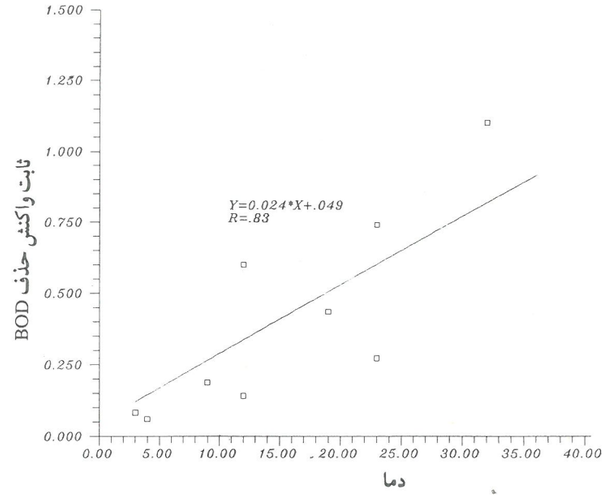
1- Ferrara (1981) 2- Harleman (1981)



نمودار ۴ : ارتباط بین بازده حذف BOD_5 و دمای محیط



نمودار ۵ : ارتباط بازده حذف SS و دمای محیط



نمودار ۶ : ارتباط دمای محیط و ثابت واکنش

همچنین مورنو[1] مدل اختلاط کامل را جهت استفاده در برکه‌های بی‌هوازی توصیه نموده است.

بنابراین برکه‌های بی‌هوازی موجود می‌توانند به صورت راکتور اختلاط کامل در نظر گرفته شوند. اختلاط در برکه بی‌هوازی ناشی از فرایند بی‌هوازی در کف برکه و در نهایت تولید گاز می‌باشد. لازم به یادآوری است که با بررسی انجام شده بر روی برکه‌های بی‌هوازی مورد مطالعه، مشاهده گردید که حالت اختلاط کامل در اغلب موارد حاکم بوده است و نظریه مورنو تأئید می‌گردد.

برای راکتور اختلاط کامل بدون برگشت لجن می‌توان از معادله سنتیکی درجه ۱ برای حذف BOD استفاده نمود که به شرح ذیل می‌باشد:

$$C = \frac{C_0}{(1 + K_T \times t)} \qquad (۴)$$

C_0 و C = به ترتیب غلظت BOD_5 ورودی و خروجی بر حسب میلی‌گرم در لیتر

t = زمان ماند هیدرولیکی بر حسب روز

K_T = ثابت درجه ۱ حذف BOD_5 در دمای T

سپس با آنالیز داده‌های به دست آمده از برکه بی‌هوازی یک مدل ریاضی جهت برآورد K_T در درجه حرارت‌های متفاوت تعیین گردیده است که ضریب همبستگی برای معادله (۵) برابر ۸۳٪ می‌باشد :

$$K_T = ۰/۰۲۲ \times Ta + ۰/۰۴۹ \qquad (۵)$$

K_T = ثابت واکنش در دمای T (1/day)

در نمودارهای ۶ و ۷ رابطه بین درجه حرارت و ثابت واکنش (K) و همچنین نرخ بارگذاری در برکه و ثابت واکنش آورده شده است. همان طور که از نمودار ۷ مشخص می‌باشد ثابت واکنش با افزایش نرخ بارگذاری افزایش می‌یابد.

جهت بررسی میزان K_T با دما و نرخ بارگذاری با استفاده از رگرسیون چند متغیره مدلی ریاضی جهت تعیین رابطه بین K_T، دما و نرخ بارگذاری به دست آمده است که در معادله (۶) نشان داده شده است.

$$K_T = ۰/۰۱۹ \times T_a + ۰/۰۰۶ L_V + ۰/۰۲۹ \qquad (۶)$$

$$r = ٪۸۲$$

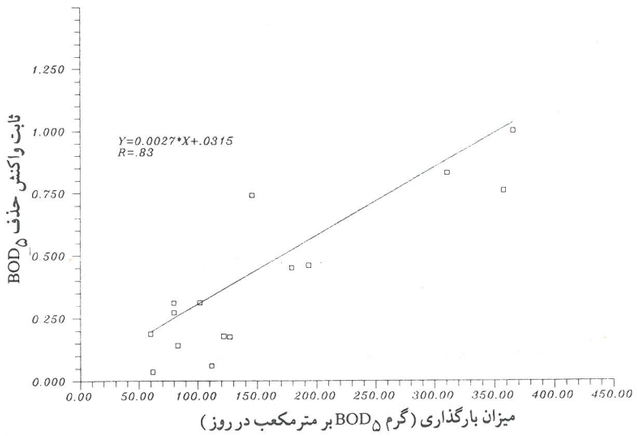
در نهایت با استفاده از روش حداقل مربعات رابطه بین K_t و بازده حذف BOD در برکه بی‌هوازی مشخص گردیده است. ضریب همبستگی این معادله برابر با ۸۸٪ و درصد خطا ۶/۳ درصد بوده است :

$$E_{BOD_5} = ۳۹/۹ \times K_T + ۲۰ \qquad (۷)$$

E_{BOD_5} = بازده حذف BOD_5

K_T = ثابت واکنش

1- Moreno (1990)



نمودار ۷ : ارتباط نرخ بارگذاری مواد آلی و ثابت واکنش

نتیجه گیری

۱- بازده حذف BOD_5 در برکه بی‌هوازی به ۵۵٪ در درجه حرارت بالا می‌رسد و به طور کلی بازده حذف مواد آلی با افزایش درجه حرارت افزایش می‌یابد.

۲- بازده حذف BOD_5 تابعی از زمان ماند هیدرولیکی، نرخ بارگذاری و مواد آلی و دما می‌باشد.

۳- بازده حذف SS با افزایش دما به مقدار کمی افزایش می‌یابد و بیشتر تابع زمان ماند در برکه بی‌هوازی می‌باشد.

۴- نرخ بارگذاری در برکه بی‌هوازی با افزایش دما می‌تواند افزایش یابد.

۵- با افزایش نرخ بارگذاری در برکه بی‌هوازی بازده حذف BOD افزایش می‌یابد.

۶- ثابت واکنش (K_T) در برکه بی‌هوازی در درجه حرارت $20^{\circ}C$ برابر با 0/4895 /day به دست آمده است. ضمناً K_T واکنش با افزایش درجه حرارت و نرخ بارگذاری آلی افزایش می‌یابد.

۷- میزان سرانه لجن برای ایران بین ۰/۰۶ تا ۰/۰۸ مترمکعب در سال پیشنهاد می‌گردد.

۸- برکه‌های بی‌هوازی در اکثر موارد و مخصوصاً در مواقعی که هواگرم می‌شود حالت اختلاط کامل داشته و برای جلوگیری از خروج مواد معلق، باید شکل برکه‌ها، ورودی و خروجی آنها بر اساس اصول فنی طراحی گردد.

منابع و مراجع

1- " *Lagoon System Can Provide Low - Cost Wastewater Treatment* ", (1997). Pipeline Vol. 8, No. 2

2- Maynarad, H.E., Ouki, S.K. and Williams, S.C. (1999). " *Tertiary Lagoon: A Review of Removal and Performance* ", Wat. Res., 33 (1) : 1-13.

3- WHO, (1987). " *Waste Stabilization Ponds* ", Emro Technical Publication, No. 10, Alexandria, Egypt.

4- Arceivala, S. (1991). " *Wastewater Treatment for Pollution Control* ", McGraw - Hill, New Delhi.

5- Tchobanoglus, G. (1991). " *Wastewater Engineering. Treatment, Disposal and Reuse* ", McGraw-Hill, Inc. NewYork.

6- Muwaffaq, M., Saqqar and Pescod, M.S. (1993). " *Modeling the Performance of Anaerobic Wastewater Stabilization Ponds* ", Proc. 2nd. IAWQ. Int. Spec. Conf., " *Waste Stabilization Pond and the Reuse of Pond Effluent* ", IAWQ, California, pp. 211-225.

7- APHA, (1995). " *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* ", 19th edn., American Public Health Association, Washington, DC.

8- Toprak, H. (1995). " *Temperature and Organic Loading Dependency of Methane and Carbon Dioxide Emission Rates of a Full - Scale Anaerobic Waste Stabilization Pond* ", Wat. Res., 29(4) : 1111-1119.