

Investigation of the Effect of Magnetic Fields on the Volume Index of Diluted Municipal Wastewater Sludge

G. Asgari¹, R. Khoshniyat², M. Nazifi³, H. Shabrandi⁴

1. Prof., Social Determinants of Health Research Center (SDHRC), Dept. of Environmental Health Engineering, Faculty of Public Health, Hamadan University of Medical Sciences, Hamadan, Iran

2. PhD. Student, Student Research Committee, Dept. of Environmental Health Engineering, Faculty of Public Health, Hamadan University of Medical Sciences, Hamadan, Iran

(Corresponding Author) ramin_kh1975@yahoo.com

3. BSc. Student, Student Research Committee, Dept. of Environmental Health Engineering, Faculty of Public Health, Hamadan University of Medical Sciences, Hamadan, Iran

4. MSc., Supervisor of Sanandaj Wastewater Treatment Laboratory, Kurdistan Water and Wastewater Engineering Company, Sanandaj, Iran

(Received Oct. 28, 2020 Accepted Jan. 13, 2021)

To cite this article:

Asgari, G., Khoshniyat, R., Nazifi, M., Shabrandi, H. 2021. "Investigation of the effect of magnetic fields on the volume Index of diluted municipal wastewater sludge" Journal of Water and Wastewater, 32(3), 113-124. Doi: 10.22093/wwj.2020.254929.3076. (In Persian)

Abstract

One of the most important problems in the process of wastewater treatment by the complete mix activated sludge method is the production of a large volume of sludge, which poses many problems in the management and conditioning of sludge. Since about 60% of the operating costs of wastewater treatment plants are related to sludge management, so any modified process that can produce less sludge can be effective in reducing costs and better sludge management. The use of magnetic fields to treat wastewater has been considered by researchers in recent years due to the lack of application of chemicals in these processes. This study considered the use of MFs strength in the range of 0.19 to 3.21 mT on diluted sludge volume index for 30 minutes. The rate of reduction of this index in the case samples compared to the control samples from 10 to 100 mL/g was different. During this period, the difference between the temperatures of the case samples compared to the control samples was statistically significant and was estimated from 0.4 to 20 °C. The difference between mean pH of the case and control samples was significant but the dissolved oxygen concentration of them, similar to other variables' factors that affect the process, was not statistically significant ($p > 0.05$).

Keywords: Magnetic Fields, Diluted Sludge Volume Index, Municipal Wastewater.



مجله آب و فاضلاب، دوره ۳۲، شماره ۳، صفحه: ۱۲۴-۱۱۳

بررسی تأثیر میدان‌های مغناطیسی بر شاخص حجمی لجن رقیق شده فاضلاب شهری

قربان عسگری^۱، رامین خوش نیت^۲، مهتاب نظیفی^۳، هانا شبرندی^۴

- ۱- استادا، مرکز تحقیقات عوامل اجتماعی مؤثر بر سلامت، گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی همدان، همدان، ایران
۲- دانشجوی دکترا، مرکز پژوهش دانشجویان، گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی همدان، همدان (نویسنده مسئول) ramin_kh1975@yahoo.com
۳- دانشجوی کارشناسی، مرکز پژوهش دانشجویان، گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی همدان، همدان، ایران
۴- کارشناسی ارشد، مسئول آزمایشگاه تصفیه‌خانه فاضلاب شهر سنندج، شرکت مهندسی آب و فاضلاب کردستان، سنندج، ایران

پذیرش ۹۹/۱۰/۲۴

(دریافت ۹۹/۸/۷)

برای ارجاع به این مقاله به صورت زیر اقدام فرمایید:

عسگری، ق.، خوش نیت، ر.، نظیفی، م.، شبرندی، ه.، ۱۴۰۰، "بررسی تأثیر میدان‌های مغناطیسی بر شاخص حجمی لجن رقیق شده فاضلاب شهری"
مجله آب و فاضلاب، ۳۲(۳)، ۱۲۴-۱۱۳. Doi: 10.22093/wwj.2020.254929.3076

چکیده

یکی از مهم‌ترین مشکلات فرایند تصفیه فاضلاب به روش لجن فعال اختلاط کامل، تولید حجم زیادی از لجن است که آمایش و مدیریت لجن تولیدی را با مشکلات زیادی مواجه می‌سازد. از آنجایی که حدود ۶۰ درصد هزینه‌های بهره‌برداری از تصفیه‌خانه‌های فاضلاب مربوط به مدیریت لجن است، بنابراین هر فرایند اصلاحی که بتواند میزان لجن کمتری را تولید کند، می‌تواند در کاهش هزینه‌ها و مدیریت بهتر لجن مؤثر باشد. استفاده از میدان مغناطیسی برای تصفیه فاضلاب به دلیل عدم استفاده از مواد شیمیایی در سال‌های اخیر مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. در این پژوهش با استفاده از شدت میدان ۱۹/۰ تا ۲۱/۳ میلی‌تسلا بر روی شاخص حجمی لجن رقیق شده در مدت زمان ۳۰ دقیقه میزان کاهش این شاخص در نمونه‌های مورد نسبت به نمونه‌های شاهد با هم مقایسه شدند. کاهش میزان این شاخص از ۱۰ تا ۱۰۰ میلی‌لیتر بر گرم متفاوت بود. در این بازه زمانی میزان تفاوت دمایی نمونه‌های مورد در مقایسه با نمونه‌های شاهد از نظر آماری معنی‌دار و از ۴/۰ تا ۲۰ درجه سلسیوس برآورد شد. تفاوت pH نمونه‌های مورد در مقایسه با نمونه‌های شاهد معنی‌دار ولی غلظت اکسیژن محلول نمونه‌های مورد و شاهد به‌عنوان متغیر دیگر مؤثر بر فرایند، از نظر آماری معنی‌دار نبودند ($p > 0.05$).

واژه‌های کلیدی: میدان‌های مغناطیسی، شاخص حجمی لجن رقیق شده، فاضلاب شهری

۱- مقدمه

لجن تولیدی، کاهش حجم لجن و آب‌گیری آن در تصفیه‌خانه‌ها اهمیت زیادی دارد (Niu et al., 2013). از طرف دیگر روزانه حجم زیاد لجن در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب در سراسر دنیا تولید می‌شود که لازم است به روش‌های مناسبی از جنبه‌های مختلف

تصفیه فاضلاب شهری موجب تولید حجم زیادی لجن می‌شود که ۹۹ درصد آن را آب تشکیل می‌دهد. مدیریت لجن تولیدی به‌عنوان اصلی‌ترین چالش بهره‌برداری در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب شهری محسوب می‌شود. برای کاهش هزینه‌های مربوط به حمل‌ونقل



کرده است (Wang et al., 2017b). در مقایسه با سایر روش‌ها، استفاده از میدان مغناطیسی ثابت^۱ (میدانی که شدت آن در طول بازه زمانی تغییر نمی‌کند و یا فرکانس آن صفر است) در فرایندهای تصفیه فاضلاب، موجب تولید مواد خطرناک نمی‌شود و از مصرف انرژی خارجی بیشتر جلوگیری می‌کند و به‌عنوان یک فناوری سبز و دوستدار محیط‌زیست شناخته می‌شود (Zaidi et al., 2014).

اثرات میدان مغناطیسی بر روی موجودات زنده و به‌خصوص میکروارگانیسم‌ها می‌تواند مثبت یا منفی باشد. شدت میدان بهینه می‌تواند در دامنه وسیعی از میدان مغناطیسی رخ دهد در صورتی که شدت میدان مغناطیسی کمتر از ۷۰ میلی‌تسلا باشد، این اثرات می‌تواند مثبت باشد (Beretta et al., 2019). میدان مغناطیسی بهینه می‌تواند فعالیت میکروارگانیسم‌ها را افزایش دهد و فعالیت آنزیم‌ها را بیشتر کند (Wang et al., 2017b).

استفاده از میدان مغناطیسی در تصفیه لجن فاضلاب بیشتر بر افزایش رشد میکروارگانیسم‌ها و تثبیت لجن تولیدی متمرکز دارد. همچنین تعیین میکروارگانیسم‌های مؤثر و غالب در بحث تصفیه لجن توسط میدان مغناطیسی مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است، اما علی‌رغم پژوهش‌های که در بحث تأثیر میدان مغناطیسی بر تصفیه لجن انجام شده است، نیاز به پژوهش‌های بیشتر در این زمینه هنوز وجود دارد (Zaidi et al., 2014).

تعداد پژوهش‌های انجام شده در خصوص بررسی تأثیر میدان مغناطیسی بر فرایندهای تصفیه فاضلاب، اندک است و بیشتر آنها به بحث جدا کردن جامدات یا میکروارگانیسم‌های چسبیده به بستر در فاضلاب ورودی، پرداخته‌اند (Jung et al., 1993).

بیشتر پژوهش‌ها از تأثیر میدان مغناطیسی بر تجزیه ترکیبات آلی و افزایش رشد میکروارگانیسم‌ها حکایت دارد (Ji et al., 2010).

در سال ۲۰۱۹ پژوهشی توسط زیدی و همکاران در دانشگاه مالزی در خصوص تأثیر میدان مغناطیسی بر روی باکتری‌های رشته‌ای موجود در فاضلاب انجام شد. در این پژوهش مورد شاهدهی از شدت میدان ۸۸ میلی‌تسلا استفاده شد. شاخص حجمی لجن در این پژوهش به کمتر از ۱۰ میلی‌لیتر بر گرم کاهش پیدا کرد

از جمله جنبه محیط‌زیستی مدیریت شود (Hong et al., 2009). لجن، ترکیب پیچیده‌ای از مواد ناهمگن و کلوئیدی است که شامل ترکیبات آلی، باکتری‌ها، ذرات غیرآبی و سایر ترکیبات است که قبل از آب‌گیری ۹۹ درصد آن را آب تشکیل می‌دهد اما بعد از آب‌گیری این مقدار به ۹۵ درصد کاهش پیدا می‌کند (Appels et al., 2013). نکته کلیدی در بحث مدیریت لجن فاضلاب، تشخیص و تعیین اثرات لجن بر محیط‌زیست و اثرات اجتماعی بازیافت لجن است. به‌عنوان مثال افزایش خطرات ناشی از تراوش ریزمغذی‌های موجود در لجن به سفره‌های آب زیرزمینی در هنگام کاربرد لجن در زمین‌های کشاورزی و اثر بر روی خصوصیات خاک از جمله این اثرات در کاربرد لجن تصفیه نشده است (Pradel et al., 2014).

تصفیه فاضلاب به روش لجن فعال در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب شهری موجب تولید مقدار زیادی لجن می‌شوند که تهدیدی برای محیط‌زیست و سلامتی انسان محسوب می‌شوند (Yang et al., 2015). کاهش حجم و وزن لجن تولیدی به‌عنوان روش مناسبی برای تصفیه لجن فاضلاب است (Christensen et al., 2015) اما وجود مواد پلیمری خارج سلولی^۱ در لجن که خاصیت آب‌دوستی^۲ دارد و همچنین وجود پیوند هیدروژنی بین مولکول‌های آب و لجن، آب‌گیری از لجن را به یک چالش اصلی در تصفیه فاضلاب شهری تبدیل کرده است (Chen et al., 2015).

روش‌های مختلف فیزیکی و شیمیایی مانند انجماد و ذوب کردن، حرارت دادن لجن، مافوق صوت، استفاده از اسیدها و بازها، ازن‌زنی و روش‌های پلی‌الکترولیت^۳ برای آب‌گیری از لجن پیشنهاد شده است (Xiao et al., 2017). هدف اصلی از این فرایندها تخریب ساختار پلیمرهای خارج سلولی به‌منظور آزادسازی آب پیوندی و تجمع لجن کلوئیدی و تبدیل آن به ذرات بزرگتر است (Hu et al., 2018). بر اساس پژوهش‌های انجام شده کاهش آب پیوندی به‌عنوان اصلی‌ترین روش برای آب‌گیری لجن در نظر گرفته شده است (Li et al., 2016).

در سال‌های اخیر استفاده از فناوری‌هایی مانند میدان مغناطیسی به‌منظور ارتقای فرایندهای تصفیه فاضلاب گسترش زیادی پیدا

¹ Extracellular Polymer

² Hydrophilicity

³ Polyelectrolyte

⁴ Static Magnetic Fields



شاخص حجمی مناسب لجن در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب شهری باید کمتر از ۱۲۰ میلی‌لیتر بر گرم باشد. در صورتی که میزان این شاخص بیش از ۱۵۰ میلی‌لیتر بر گرم باشد نشان‌دهنده رشد زیاد باکتری‌های رشته‌ای است، اما در صورتی که غلظت لجن تولیدی زیاد باشد مثلاً بیش از ۱۰۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر، این لجن تمایلی به ته‌نشینی در مدت ۳۰ دقیقه ندارد. در این حالت در محاسبه SVI خطا ایجاد می‌شود. بنابراین لازم است از شاخص حجمی لجن رقیق‌شده^۳ استفاده شود (Burton et al., 2014).

به دلیل عبور جریان الکتریسیته از سیم لوله^۴ و ایجاد مقاومت داخلی، تولید گرما اجتناب‌ناپذیر است. این مکانیسم به نام گرمای ژول^۵ یا گرمای اهم^۶، شهرت دارد (Agarwal et al., 2014). بنابراین علاوه بر لزوم استفاده از جریان الکتریکی برای تولید میدان مغناطیسی، افزایش دمای فاضلاب را می‌توان به‌عنوان مهم‌ترین چالش استفاده از میدان مغناطیسی بخصوص در شدت‌های بالا عنوان کرد.

در این پژوهش از ۱۷ شدت میدان مغناطیسی ثابت از ۰/۱۹ میلی‌تسلا تا ۳/۲۱ میلی‌تسلا استفاده شد تا تأثیر این شدت میدان‌های مختلف بر روی شاخص حجمی لجن رقیق شده که به مدت ۳۰ دقیقه تحت تأثیر میدان مغناطیسی قرار گرفتند، بررسی شود. بعد از اعمال میدان مغناطیسی بر روی نمونه‌های مورد پارامترهایی مانند دما، pH و میزان اکسیژن محلول^۷ نیز به‌عنوان پارامترهای کنترلی فرایند در نمونه مورد اندازه‌گیری شدند. بدیهی است که در این پژوهش مورد شاهدهی این پارامترها در نمونه شاهد نیز اندازه‌گیری شدند و با استفاده از نرم‌افزار SPSS20 و آماره Independent Sample Test میانگین پارامترها با یکدیگر مقایسه شدند.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- نمونه فاضلاب

در این پژوهش از فاضلاب واقعی تصفیه‌خانه فاضلاب شهر سنج استفاده شد. به همین دلیل و طبق روش استاندارد ملی ایران، نمونه

و همچنین عنوان شد که میدان مغناطیسی به‌عنوان بازدارنده رشد باکتری‌های رشته‌ای عمل می‌کند (Zaidi et al., 2019).

در سال ۲۰۱۹ در مطالعه مروری بر روی ۵۶ پژوهش به‌منظور بررسی تأثیر میدان الکتریکی، مغناطیسی و الکترومغناطیسی بر سیستم‌های بیولوژیکی توسط بادوین و همکاران انجام شد عنوان شد که پژوهش‌های اندکی در خصوص تأثیر میدان مغناطیسی در فرکانس‌های مختلف بر سیستم‌های بیولوژیکی انجام شده است (Bodewein et al., 2019).

بحث تأثیر میدان مغناطیسی بر میکروارگانیسم‌ها و باکتری‌ها پیچیده‌تر از تأثیر این میدان بر مایعات است. چون در شدت‌های مختلف میدان مغناطیسی ممکن است رشد میکروارگانیسم‌ها افزایش یابد یا تأثیر میدان مغناطیسی مانع از رشد آنها شود (Lebkowska et al., 2011).

در سال ۲۰۰۰ یاووز و سلبی پژوهشی در خصوص بررسی تأثیر میدان مغناطیسی ثابت بر فرایند لجن فعال انجام دادند. در این پژوهش از راکتور بسته^۱ و فاضلاب سنیتیک استفاده شده بود. شدت میدان مغناطیسی اعمال شده در این پژوهش ۸/۹ تا ۴۶/۶ میلی‌تسلا عنوان شده است. در این پژوهش تغییر در میزان غلظت گلوکز و غلظت میکروارگانیسم‌ها بررسی شد. حداکثر رشد میکروارگانیسم‌ها در pH برابر ۷/۵ بوده که ۴۴ درصد نسبت به نمونه‌های شاهد بیشتر بوده است. در شدت میدان ۱۷/۸ میلی‌تسلا حداکثر میزان حذف گلوکز مشاهده شده و با افزایش شدت میدان این مقدار کاهش پیدا کرده است (Yavuz and Celebi, 2000).

یکی از شاخص‌های مهم در بحث بهره‌برداری و کنترل فرایند تصفیه فاضلاب، شاخص حجمی لجن^۲ است. میزان این شاخص بر اساس ته‌نشینی مایع مخلوط حوض هوادهی فرایند لجن فعال در یک استوانه مدرج یک یا دو لیتری در مدت زمان ۳۰ دقیقه اندازه‌گیری است. این شاخص نشان‌دهنده ظرفیت ته‌نشینی لجن است. مقدار کمتر این شاخص نشان‌دهنده ته‌نشینی بیشتر لجن است و میزان بالای آن نشان‌دهنده عدم تمایل لجن به ته‌نشینی است که این موضوع باعث کاهش کیفیت پساب خروجی و افزایش مشکلات ناشی از آب‌گیری لجن می‌شود (Szeląg et al., 2020).

³ Diluted Sludge Volume Index (DSVI)

⁴ Solenoid

⁵ Joule Heat

⁶ Ohm Heat

⁷ Rate of Dissolved Oxygen

¹ Batch

² Sludge Volume Index (SVI)



N = تعداد دور سیم‌لوله در واحد طول
 I = شدت جریان مؤثر (آمپر)
 L = طول سیم‌لوله (متر)

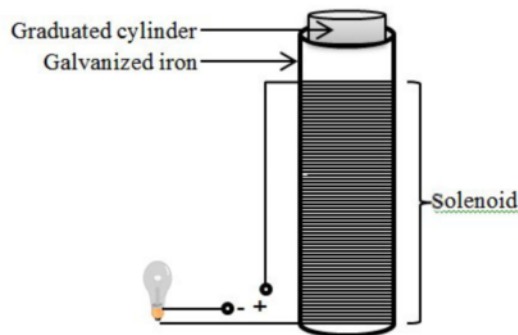


Fig. 1. Schematic of the reactor
 شکل ۱- شماتیک راکتور

۲-۴- طراحی آزمایش

بلافاصله بعد از ریختن نمونه‌های فاضلاب در داخل استوانه‌های مدرج مورد و شاهد، میدان مغناطیسی در شدت‌های گفته شده به مدت ۳۰ دقیقه بر روی نمونه‌های مورد اعمال شد و در پایان این زمان شاخص حجمی لجن، دما، pH و اکسیژن محلول در نمونه‌ها اندازه‌گیری شدند.

۲-۵- حجم نمونه‌ها

در این پژوهش با توجه به اینکه از ۱۷ شدت میدان استفاده شد و هر آزمایش سه بار تکرار شد. بنابراین ۵۱ بار آزمایش برای نمونه‌های مورد و شاهد انجام شد. در واقع هر شدت میدان سه بار برای نمونه مورد و سه بار برای نمونه شاهد تکرار شد تا دستیابی به یک میانگین مناسب، امکان‌پذیر شود.

۲-۶- بازه زمانی انجام نمونه‌برداری

تأثیر فصل سال و یا گرمای هوا، اگرچه بر روی فرایندهای بیولوژیکی و از جمله مقدار MLSS^۱ یا مایع مخلوط فرار حوض هوادهی، ورودی می‌تواند مؤثر باشد اما از آنجایی‌که این پژوهش یک مطالعه مورد شاهدهی^۲ است که هر نمونه مورد با نمونه شاهد

فاضلاب از خروجی حوض هوادهی فرایند لجن فعال اختلاط کامل برداشت شد و بلافاصله در کمتر از ۵ دقیقه به آزمایشگاه تصفیه‌خانه فاضلاب به‌منظور انجام آنالیز منتقل شد.

از آنجایی‌که میزان SVI اندازه‌گیری شده در ابتدای آزمایش بیش از ۱۵۰ میلی‌گرم در لیتر محاسبه شد، از روش DSVI به‌منظور سنجش شاخص حجمی لجن استفاده شد. بنابراین ۵۰۰ میلی‌لیتر از فاضلاب با همین مقدار آب مقطر رقیق شد و حجم یک لیتری در داخل یک استوانه مدرج یک لیتری ریخته شد این روش برای نمونه‌های شاهد نیز انجام شد (Tchobanoglus et al., 2003).

۲-۲- مشخصات راکتور

روش استاندارد برای سنجش SVI و DSVI، استفاده از استوانه مدرج یک یا دو لیتری است (Tchobanoglus et al., 2003). در این پژوهش از استوانه مدرج یک لیتری به تعداد دو عدد (مورد و شاهد) استفاده شد. قطر این استوانه مدرج ۸ سانتی‌متر و ارتفاع بخش مدرج آن ۳۰ سانتی‌متر است. به‌منظور امکان قرارگیری استوانه مدرج در داخل سیم‌لوله، از استوانه مدرج پایه‌دار پلاستیکی استفاده شد تا قبل از قرارگیری استوانه مدرج در راکتور پایه آن برداشته شود.

۲-۳- شدت میدان مغناطیسی

برای تولید میدان مغناطیسی از (DC DAZHENG PS-305D power) استفاده شد. این نوع مبدل جریان قادر به تولید جریان از شدت ۰/۰۱ آمپر تا ۵ آمپر هست. از سیم لاکمی به قطر یک میلی‌متر و به تعداد ۷۵۰ دور (تعداد دور در واحد طول لوله) به دور یک ورق آهن گالوانیزه به‌عنوان پایه یا نگه‌دارنده سیم‌ها استفاده شد. طول سیم لاکمی استفاده شده ۱۵۰ متر در پنج ردیف ۳۰ سانتی‌متری است (شکل ۱).

شدت میدان مغناطیسی وابسته به شدت جریان مؤثر است و برای یک سیم‌لوله از معادله ۱ محاسبه می‌شود (Griffiths, 2005)

$$B = \mu NI/L \quad (1)$$

که در آن

B = شدت میدان مغناطیسی (تسلا)

μ = نفوذپذیری مغناطیسی آب ($1/26 \times 10^{-6}$ H/m)

¹ Mixed Liquor Volatile Suspended Solids (MLSS)

² Case-Control



همان گونه که از شکل ۲ مشخص است در شدت‌های کمتر از ۲/۰۸ میلی‌تسلا تأثیر میدان مغناطیسی بر SVI در نمونه‌های مورد نسبت به نمونه‌های شاهد تفاوت چندانی ندارد اما از این شدت میدان به بالا این تفاوت محسوس است، به گونه‌ای که SVI در نمونه‌هایی که تحت تأثیر میدان مغناطیسی قرار گرفتند کمتر از نمونه‌های شاهد است. از نظر آماری نیز در کل تأثیر میدان مغناطیسی بر DSVI در نمونه‌های مورد نسبت به نمونه‌های شاهد معنی‌دار ($p < 0.05$) هستند. به عبارت دیگر می‌توان گفت که مقدار پساب خروجی از سیستم هم از نظر کمی به دلیل مترکم‌تر شدن لجن افزایش پیدا کرده است. به گونه‌ای که مثلاً در شدت میدان ۲/۶۵ میلی‌تسلا به عنوان مثال ۱۰۰ میلی‌لیتر پساب بیشتری را می‌توان از سیستم خارج کرد. به عبارت دیگر درصد پساب خروجی از سیستم از ۷۰۰ میلی‌لیتر به ۸۰۰ میلی‌لیتر افزایش پیدا کرده است. بنابراین میدان مغناطیسی علاوه بر اینکه SVI را کاهش می‌دهد می‌تواند بر مقدار پساب خروجی از سیستم هم مؤثر باشد و میزان پساب خروجی بیشتری از سیستم خارج شود.

در پژوهشی که در سال ۲۰۱۴ انجام شد، اعلام شد که میدان مغناطیسی، باعث افزایش خصوصیات فیزیکی اجزای فاضلاب و تفکیک جامدات از مایع می‌شود. دلیل این موضوع انعقاد ذرات کلوئیدی و افزایش فعالیت باکتری‌های موجود در فاضلاب عنوان شده است. در حالتی که میدان مغناطیسی وجود دارد ذرات باردار منفی و مثبت جهت‌گیری مناسبی پیدا می‌کنند و از حالت پراکنده که برخورد آنها به صورت تصادفی است خارج می‌شوند. این موضوع باعث می‌شود ذرات به هم نزدیک شده و ته‌نشین شوند (Zaidi et al., 2014).

از طرف دیگر میدان مغناطیسی می‌تواند رشد میکروارگانیسم‌ها را تشدید کند. به عنوان مثال در شدت ۱۱/۴ mT افزایش رشد میکروارگانیسم‌های متانوزن^۱ برای تولید گاز متان از فرایند لجن فعال به میزان ۸۵/۵ درصد گزارش شده است (Zhao et al., 2020).

در این پژوهش نیز تأثیر میدان مغناطیسی بر MLSS که به طور معمول از باکتری‌های رشته‌ای^۲ تشکیل شده است و باعث کاهش SVI شده است، تأیید می‌شود.

مقایسه شدند. بر این اساس به زمان انجام نمونه‌برداری به عنوان یک پارامتر تأثیرگذار بر نتایج، توجه چندانی نشده است. این پژوهش در تیرماه سال ۱۳۹۹ و در تصفیه‌خانه فاضلاب شهر سنندج انجام شد. از طرفی به دلیل متغیر بودن مقدار MLSS در روزهای نمونه‌برداری، موجب تغییر SVI در روزهای متخلف شده است. مقدار MLSS در محدوده ۱۸۶۰ تا ۲۲۵۰ میلی‌گرم بر لیتر متفاوت بودند.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- تأثیر میدان مغناطیسی بر DSVI

در شکل ۲ تأثیر میدان مغناطیسی در شدت‌های مختلف بر DSVI در نمونه‌های مورد در مقایسه با نمونه‌های شاهد ارائه شده است.

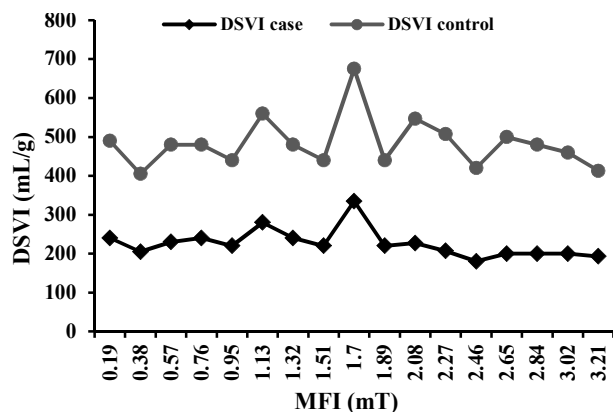


Fig. 2. Effect of MFs on DSVI in the case and control samples
شکل ۲- تأثیر میدان مغناطیسی بر DSVI نمونه‌های مورد و شاهد

در این پژوهش میانگین داده‌های مربوط به DSVI به دست آمده برای ۵۱ نمونه مورد و ۵۱ نمونه شاهد با آماره Independent sample t Test آنالیز شدند (جدول ۱).

جدول ۱- آنالیز DSVI نمونه‌های مورد و شاهد

Table 1. DSVI analyses of the case and control samples

Group	N	Mean	Std. deviation	Sig. (2-tailed)	95% Confidence interval of the difference	
					Upper	Lower
Case	51	222.06	26.892	0.000	48.852	22.324
Control	51	257.65	39.451	0.000	48.874	22.303

¹ Methanogens

² Filamentous Bacteria

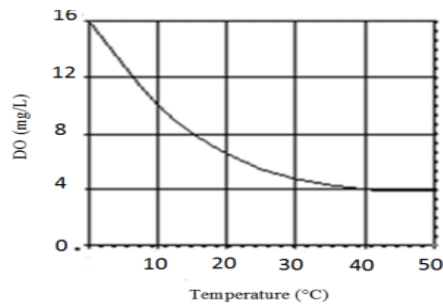


Fig. 3. Effect of temperature (°C) on the reductions of DO (mg/L)

شکل ۳- تأثیر دما (°C) در کاهش اکسیژن محلول آب (میلی‌گرم در لیتر)

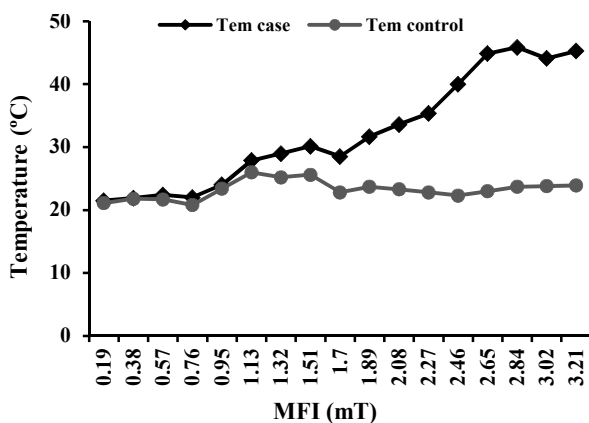


Fig. 4. Increase of temperature (°C) of the case compared to control samples

شکل ۴- افزایش دمای (°C) نمونه‌های مورد در مقایسه با نمونه‌های شاهد

در این پژوهش در شکل ۴ ارتباط بین افزایش دما در نمونه‌های مورد در مقایسه با نمونه‌های شاهد ارائه شده است. همچنین تأثیر میدان مغناطیسی بر DSVI در بحث تأثیر میدان مغناطیسی در شدت‌های ارائه شده در شکل ۴، در شدت‌های پایین تفاوت بین افزایش دما در نمونه‌های مورد در مقایسه با نمونه‌های شاهد چندان چشمگیر نیست اما با افزایش شدت میدان این تفاوت بیشتر می‌شود. البته باید به این نکته اشاره کرد که این افزایش دما به صورت خطی نیست. در مجموع نیز تأثیر میدان مغناطیسی بر افزایش دمای نمونه‌های مورد در مقایسه با نمونه‌های شاهد از نظر آماری معنی‌دار است. بالاترین دمایی که در این پژوهش ثبت شده است دمای ۴۵/۹ درجه سلسیوس و تحت تأثیر میدان مغناطیسی ۲/۸۴ میلی‌تسلا اندازه‌گیری شده است. در نمونه شاهد این دما تنها ۲۳/۷ درجه سلسیوس بوده، بنابراین میدان مغناطیسی در این

در سال ۲۰۱۹ پژوهشی در یکی از دانشگاه‌های مالزی در خصوص تأثیر میدان مغناطیسی بر روی باکتری‌های رشته‌ای موجود در فاضلاب انجام شد. در این پژوهش مورد شاهدی عنوان شد که میدان مغناطیسی خاصیت بازدارندگی بر رشد^۱ باکتری‌های رشته‌ای دارد (Zaidi et al., 2019).

در پژوهشی که در سال ۲۰۱۸ در بحث تأثیر میدان مغناطیسی بر خصوصیات لجن انجام شد، اعلام شد که میدان مغناطیسی باعث می‌شود که آب‌گیری از لجن بهتر انجام شود. در این پژوهش اعلام شد که در مورد تأثیر میدان مغناطیسی بر خصوصیات لجن بررسی‌های کمی انجام شده است (Zieliński et al., 2018).

بعضی از پژوهشگران از پژوهش‌های خود در بحث تأثیر مثبت شدت میدان ۰/۰۴ تسلا همراه با پلی‌الکترولیت آهن به‌منظور آمایش لجن قبل از فرایند آب‌گیری حمایت کردند (Hrut and Kamizela, 2018).

یکی از شاخص‌های مهم در بحث ته‌نشینی لجن همان‌گونه که اشاره شد DSVI است. این شاخص به‌عنوان مهم‌ترین شاخص در بهره‌برداری از تصفیه‌خانه‌های فاضلاب مطرح است و کاهش آن که نشان‌دهنده تراکم بیشتر لجن است، نشان‌دهنده تفکیک مناسب بخش جامدات از مایع مخلوط حوض هوادهی است.

۲-۳- تأثیر میدان مغناطیسی بر دمای مایع مخلوط حوض هوادهی

به‌دلیل عبور جریان الکتروسیسته از سیم‌لوله و ایجاد مقاومت داخلی، تولید گرما در سیم‌لوله اجتناب‌ناپذیر است. این مکانیسم به نام گرمای ژول یا گرمای اهم، شهرت دارد (Agarwal et al., 2014). بنابراین یکی از مزایای فرعی استفاده از میدان مغناطیسی در بحث تعیین DSVI، افزایش دمای فاضلاب است. این افزایش دما در حد بهینه می‌تواند محرک رشد میکروارگانیسم‌ها باشد. البته افزایش دما موجب کاهش اکسیژن محلول فاضلاب می‌شود (شکل ۳).

همان‌گونه که از شکل ۳ مشخص است با افزایش دما میزان اکسیژن محلول آب (فاضلاب) کاهش پیدا می‌کند و البته این ارتباط به صورت خطی نیست.

¹ Growth Inhibitory Property



توجه به این نکته اهمیت زیادی دارد که فرایندهای تصفیه فاضلاب در دمای میانه یا مزوفیلیک راهبری می‌شوند و این افزایش دما موجب تغییر فاز فرایند از مزوفیلیک به ترموفیلیک می‌شود که برای تصفیه فاضلاب مناسب نیست، بنابراین به نظر می‌رسد که لازم است در پژوهش‌های بعدی به بحث تعیین دمای بهینه و شدت میدان بهینه توجه شود.

۳-۳- تأثیر میدان مغناطیسی بر pH مایع مخلوط حوض هوادهی

در مدت زمان ۳۰ دقیقه اعمال میدان مغناطیسی در شدت‌های مختلف بر روی نمونه مایع مخلوط حوض هوادهی فرایند لجن فعال با اختلاط کامل میزان pH نمونه‌های مورد در مقایسه با نمونه‌های شاهد به‌طور کلی از نظر آماری معنی‌دار بودند. در شکل ۵، pH نمونه‌های مورد و شاهد ارائه شده است.

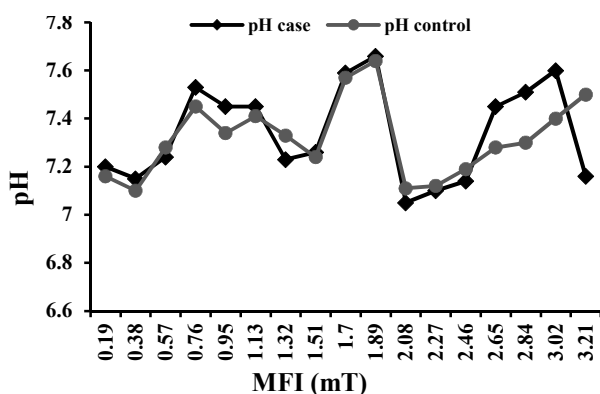


Fig. 5. Effect of MFs on pH of the case and control samples

شکل ۵- تأثیر میدان مغناطیسی بر pH نمونه‌های مورد و شاهد

طبق نتایج شکل ۵، همواره بین میانگین pH در نمونه‌های مورد و شاهد تفاوت وجود دارد. این تفاوت خطی نبوده و به‌گونه‌ای نیست که بتوان گفت همیشه pH کاهش یا افزایش می‌یابد. در آب‌گیری^۱ از لجن تنظیم pH اهمیت خاصی دارد. در پژوهشی که در سال ۲۰۱۲ در خصوص تأثیر تنظیم pH و نمک در بحث آب‌گیری لجن انجام شد، اعلام شد که pH پایین موجب آب‌گیری بهتری از لجن می‌شود ولی این pH پایین در فرایندهای بعدی تصفیه و در مراحل بعدی آب‌گیری مانند کمپوست و

شدت توانسته است دمای فاضلاب را به میزان ۲۲/۲ درجه سلسیوس افزایش دهد.

نکته کلیدی در بهره‌برداری از فرایند لجن فعال، مدت زمان باقی ماندن لجن^۱ در داخل سیستم است تنظیم این زمان به میزان لجن دفعی از حوضچه ته‌نشینی ثانویه^۲ وابسته است. این زمان به شدت وابسته به دمای فاضلاب بوده به‌گونه‌ای که در دمای ۱۸ تا ۲۵ درجه سلسیوس به‌منظور حذف ترکیبات آلی قابل تجزیه بیولوژیکی^۳ تا ۵ روز و به‌منظور جلوگیری از فرایند نیتریفیکاسیون^۴ این زمان حتی به یک روز یا کمتر نیز محدود می‌شود (Burton et al., 2014).

پژوهش‌های اندکی در بحث تأثیر میدان مغناطیسی بر دمای مایع مخلوط حوض هوادهی انجام شده است. در این میان می‌توان به پژوهشی که در سال ۲۰۱۰ انتشار یافت اشاره کرد. در این پژوهش به بررسی تجزیه مواد آلی تحت تأثیر میدان مغناطیسی از شدت صفر تا ۵۰ میلی‌تسلا در مدت زمان صفر تا ۶۰ ساعت و دمای ۱۰ تا ۵۰ درجه سلسیوس اشاره شده است. در این پژوهش با افزایش شدت میدان ابتدا تجزیه مواد آلی افزایش و سپس کاهش پیدا کرد. این افزایش تجزیه تا رسیدن به شدت میدان مغناطیسی ۲۰ میلی‌تسلا مشاهده شده است (Ji et al., 2010).

یکی از اصلی‌ترین عواملی که در فرایندهای بیولوژیکی بر رشد میکروارگانیسم‌ها مؤثر است دما می‌باشد. در محدوده دمای مزوفیلیک^۴ با افزایش ۱۰ درجه سلسیوس دما، رشد میکروارگانیسم‌ها ۲ برابر می‌شود. نکته مهم دیگر در بحث تصفیه فاضلاب این است که فرایندهای تصفیه فاضلاب به‌طور معمول در محدوده دمای مزوفیلیک راهبری می‌شوند و افزایش دما اگرچه در این محدوده محرک رشد میکروارگانیسم‌هاست، اما در محدوده ترموفیلک^۵ می‌تواند بازدارنده رشد میکروارگانیسم‌های مؤثر در تصفیه شود. به‌علاوه افزایش دما موجب کاهش اکسیژن محلول فاضلاب شده و هزینه‌های تأمین حداقل ۲ میلی‌گرم در لیتر اکسیژن محلول در حوض هوادهی را با چالش مواجه می‌کند.

¹ Solids Retention Time (SRT)
² Secondary Settling Basin
³ Nitrification
⁴ Mesophilic
⁵ Thermophilic

⁶ Dewatering

اکسیژن محلول در مایع مخلوط حوض هوادهی و نمونه‌های مورد در مقایسه با نمونه‌های شاهد است که از نظر آماری این تفاوت معنی‌دار نبود ($P < 0.000638$). بنابراین در مدت زمان ۳۰ دقیقه میدان مغناطیسی یا رشد میکروارگانیسم‌ها و یا افزایش دمای فاضلاب به‌گونه‌ای نبوده است که کاهش معنی‌داری در اکسیژن محلول ایجاد کند (شکل ۶).

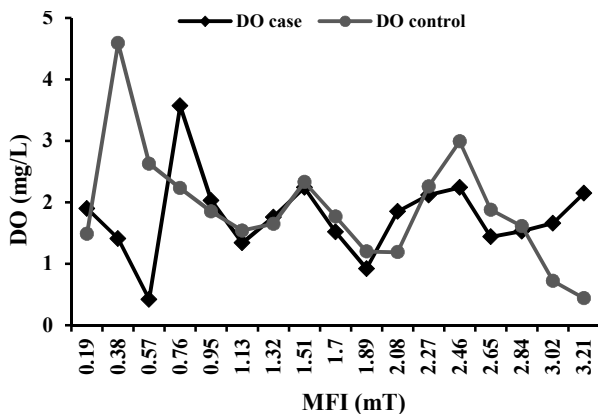


Fig. 6. Effect of MFs on DO (mg/L) in the case and control samples

شکل ۶- تأثیر میدان مغناطیسی بر اکسیژن محلول (میلی‌گرم بر لیتر) نمونه‌های مورد و شاهد

در اندازه‌گیری اکسیژن محلول توجه به دمای نمونه‌ها نیز همچون بحث pH اهمیت دارد و در این پژوهش تفاوت میانگین نمونه‌های مورد و شاهد از نظر دما در هنگام اندازه‌گیری اکسیژن محلول معنی‌دار بود.

در کل تغییرات اکسیژن محلول در نمونه‌های مورد مایع مخلوط حوض هوادهی هنگامی که تحت تأثیر میدان مغناطیسی قرار می‌گیرد با نمونه‌های شاهد از نظر آماری تفاوتی با هم ندارند. از طرفی در صورت وجود تغییرات مانند شکل ۶ این تغییرات دارای روند افزایشی یا کاهشی نبوده برحسب نوع نمونه متفاوت است.

اکسیژن محلول به‌عنوان یکی از عوامل تأثیرگذار بر تجزیه مواد آلی در شرایط هوازی و مؤثر بر رشد میکروارگانیسم‌های موجود در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب شهری و همچنین مؤثر بر هزینه‌های بهره‌برداری از تصفیه‌خانه‌های فاضلاب اهمیت ویژه‌ای دارد (Wells et al., 2009).

اگرچه افزایش دما می‌تواند باعث کاهش اکسیژن محلول در

فیلتراسیون مشکل ایجاد می‌کند (Raynaud et al., 2012).

در سال ۲۰۰۰ پژوهشی در خصوص بررسی تأثیر میدان مغناطیسی ثابت بر فرایند لجن فعال انجام دادند. در این پژوهش از راکتور بسته و فاضلاب سنتتیک استفاده شده بود. شدت میدان مغناطیسی اعمال شده در این پژوهش ۸/۹ تا ۴۶/۶ میلی‌تسلا عنوان شده است. در این پژوهش تغییر در میزان غلظت گلوکز و غلظت میکروارگانیسم‌ها بررسی شد. حداکثر رشد میکروارگانیسم‌ها در pH برابر ۷/۵ بوده که ۴۴ درصد نسبت به نمونه‌های شاهد بیشتر بوده است (Yavuz and Celebi, 2000).

در سال ۲۰۱۷ در پژوهش که بر روی مکانیسم و شرایط اسیدی در بحث آب‌گیری لجن انجام شد. عنوان شد که کاهش pH در تشکیل فلوک‌های^۱ بزرگتر لجن و افزایش ته‌نشینی لجن مؤثر است (Wang et al., 2017a).

در پژوهش دیگری که در سال ۲۰۱۰ توسط جی و همکاران انجام شد. دامنه pH موردنظر ۶ تا ۱۰ و شدت میدان ۲۰ میلی‌تسلا در نظر گرفته شده است. در این پژوهش به تأثیر مثبت این محدوده شدت میدان در رشد میکروارگانیسم‌های فرایند لجن فعال تأیید شده است (Ji et al., 2010).

افزایش رشد میکروارگانیسم‌ها تحت تأثیر میدان مغناطیسی موجب تولید اسیدهای معدنی و آلی می‌شود که ممکن است pH فاضلاب را به مقدار جزئی کاهش دهند. در این پژوهش نیز کاهش اندک pH مایع مخلوط حوض هوادهی تحت تأثیر میدان مغناطیسی ممکن است به دلیل تشدید رشد میکروارگانیسم‌ها باشد.

نکته‌ای که باید به آن اشاره شود این است که در اندازه‌گیری pH باید دمای نمونه‌ها نیز اندازه‌گیری شود که در این پژوهش نیز انجام شد اما از آنجایی که بحث جداگانه‌ای تحت عنوان دما ارائه شده است از تکرار این بحث خودداری شده است. اما باید اذعان کرد که تفاوت بین دمای نمونه‌های مورد و شاهد در هنگام اندازه‌گیری pH نیز معنی‌دار بودند.

۳-۴- تأثیر میدان مغناطیسی بر اکسیژن محلول مایع مخلوط حوض هوادهی

آخرین پارامتر اندازه‌گیری شده در این پژوهش، مقایسه میانگین

^۱ Flocs



۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش مورد شاهدهی به‌منظور سنجش تأثیر میدان مغناطیسی در شدت‌های ۰/۱۹ تا ۳/۲۱ میلی‌تسلا بر DSVI به‌عنوان بحث اصلی پژوهش مشخص شد که با افزایش شدت میدان این شاخص کاهش پیدا می‌کند. کاهش این شاخص به معنی تولید لجن با تراکم بیشتر است، بنابراین تأثیر میدان مغناطیسی در شدت جریان مذکور علاوه بر تراکم کردن لجن و تولید لجن کمتر موجب می‌شود که مقدار کمی پساب خروجی نیز به نحو چشم‌گیری افزایش پیدا کند. از طرفی از آنجایی که استفاده از مواد شیمیایی در بحث آب‌گیری لجن موجب افزایش هزینه‌ها می‌شود، استفاده از میدان مغناطیسی به‌دلیل ماهیت فیزیکی فرایند به‌عنوان یک روش سبز محسوب شده و هزینه‌های تصفیه و آمایش لجن تولیدی را کاهش می‌دهد.

۵- قدردانی

این پژوهش بخشی از پژوهش‌های انجام شده در قالب طرح پژوهش دانشجویی به شماره ۹۹۰۴۲۴۲۶۲۳ بین دانشکده بهداشت دانشگاه علوم پزشکی همدان و شرکت مهندسی آب و فاضلاب کردستان بود. نویسندگان از همکاری و مساعدت شرکت آب و فاضلاب کردستان و کارکنان تصفیه‌خانه فاضلاب شهر سنندج و معاونت تحقیقات و فناوری دانشگاه علوم پزشکی همدان قدردانی می‌کنند.

فاضلاب شود، اما این تفاوت در این پژوهش مشاهده نشده است. شاید یکی از دلایل این موضوع زمان اندک ۳۰ دقیقه تأثیر میدان مغناطیسی بر روی نمونه‌های مورد باشد. اگرچه در بعضی از نمونه‌ها این تفاوت زیاد و قابل ملاحظه بوده است. از طرف دیگر MLSS موجود در راکتورهای مورد و شاهد در آزمایش DSVI هوادهی و به طبع آن مخلوط نمی‌شوند. این عدم اختلاط، می‌تواند مقدار خروج گاز اکسیژن در مایع مخلوط را کاهش دهد.

۳-۵- مصرف انرژی الکتریکی

یکی دیگر از معایب روش لجن فعال استفاده از بیش از حد از انرژی الکتریکی برای هوادهی در حوضچه هوادهی است (Gu et al., 2017).

در تصفیه‌خانه‌های کوچک و بزرگ ۵۰ تا ۸۰ درصد انرژی الکتریکی، برای هوادهی مصرف می‌شود. ۱۵ تا ۲۵ درصد انرژی الکتریکی برای تصفیه لجن و ۱۵ درصد برای چرخش لجن ته‌نشینی در حوضچه ته‌نشینی ثانویه مصرف می‌شود (Mamais et al., 2015).

مقدار مصرف انرژی الکتریکی در مدت زمان ۳۰ دقیقه ته‌نشینی مایع مخلوط حوض هوادهی در این پژوهش ۱۰۱ تا ۲۰۰ وات است. با در نظر گرفتن ۱۵۰ وات، می‌توان گفت در مدت ۳۰ دقیقه اعمال میدان مغناطیسی ۷۵ وات برق ۲۲۰ ولت مصرف شده است. برای کاهش هزینه برق مصرفی می‌توان از سلول‌های خورشیدی استفاده کرد.

References

- Agarwal, K. B., Nassif, S. R., Rose, R. D. & Xu, C. 2014. International Business Machines Crop, *Rapid estimation of temperature rise in wires due to joule heating*. U.S. Patent 8, 640-062
- Appels, L., Houtmeyers, S., Degreè, J., Van Impe, J. & Dewil, R. 2013. Influence of microwave pre-treatment on sludge solubilization and pilot scale semi-continuous anaerobic digestion. *Bioresource Technology*, 128, 598-603.
- Beretta, G., Mastorgio, A. F., Pedrali, L., Saponaro, S. & Sezenna, E. 2019. The effects of electric, magnetic and electromagnetic fields on microorganisms in the perspective of bioremediation. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 18, 29-75.
- Bodewein, L., Schmiedchen, K., Dechent, D., Stunder, D., Graefrath, D., Winter, L., et al. 2019. Systematic review on the biological effects of electric, magnetic and electromagnetic fields in the intermediate frequency range (300 Hz to 1 MHz). *Environmental Research*, 171, 247-259.
- Burton, F. L., Tchobanoglous, G., Tsuchihashi, R. & David Stensel, H. Metcalf & Eddy, Inc. 2014. *Wastewater engineering: treatment and resource recovery*. McGraw Hill Education Pub. New York.



- Chen, Z., Zhang, W., Wang, D., Ma, T. & Bai, R. 2015. Enhancement of activated sludge dewatering performance by combined composite enzymatic lysis and chemical re-flocculation with inorganic coagulants: kinetics of enzymatic reaction and re-flocculation morphology. *Water Research*, 83, 367-376.
- Christensen, M. L., Keiding, K., Nielsen, P. H. & Jørgensen, M. K. 2015. Dewatering in biological wastewater treatment: a review. *Water Research*, 82, 14-24.
- Griffiths, D. J. 2005. *Introduction to electrodynamics*. American Association of Physics Teachers, New York, USA.
- Gu, Y., Li, Y., Li, X., Luo, P., Wang, H., Wang, X., et al. 2017. Energy self-sufficient wastewater treatment plants: feasibilities and challenges. *Energy Procedia*, 105, 3741-3751.
- Hong, J., Hong, J., Otaki, M. & Jolliet, O. 2009. Environmental and economic life cycle assessment for sewage sludge treatment processes in Japan. *Waste Management*, 29, 696-703.
- Hrut, K. & Kamizela, T. 2018. Changes in filtration properties of digested sludge under the influence of magnetic field. *Desalination and Water Treatment*, 117, 282-289.
- Hu, S., Hu, J., Liu, B., Wang, D., Wu, L., Xiao, K., et al. 2018. In situ generation of zero valent iron for enhanced hydroxyl radical oxidation in an electrooxidation system for sewage sludge dewatering. *Water Research*, 145, 162-171.
- Ji, Y., Wang, Y., Sun, J., Yan, T., Li, J., Zhao, T., et al. 2010. Enhancement of biological treatment of wastewater by magnetic field. *Bioresource Technology*, 101, 8535-8540.
- Jung, J., Sanji, B., Godbole, S. & Sofer, S. 1993. Biodegradation of phenol: a comparative study with and without applying magnetic fields. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 56, 73-76.
- Łebkowska, M., Rutkowska Narożniak, A., Pajor, E. & Pochanke, Z. 2011. Effect of a static magnetic field on formaldehyde biodegradation in wastewater by activated sludge. *Bioresource Technology*, 102, 8777-8782.
- Li, Y., Yuan, X., Wu, Z., Wang, H., Xiao, Z., Wu, Y., et al. 2016. Enhancing the sludge dewaterability by electrolysis/electrocoagulation combined with zero-valent iron activated persulfate process. *Chemical Engineering Journal*, 303, 636-645.
- Mamais, D., Noutsopoulos, C., Dimopoulou, A., Stasinakis, A. & Lekkas, T. 2015. Wastewater treatment process impact on energy savings and greenhouse gas emissions. *Water Science and Technology*, 71, 303-308.
- Niu, M., Zhang, W., Wang, D., Chen, Y. & Chen, R. 2013. Correlation of physicochemical properties and sludge dewaterability under chemical conditioning using inorganic coagulants. *Bioresource Technology*, 144, 337-343.
- Pradel, M., Reverdy, A., Richard, M. & Chabat, L. 2014. Environmental impacts of sewage sludge treatment and disposal routes: a life cycle assessment perspective. In *4th European Conference on Sludge Management*. 8-P. Izmir, Turkey.
- Raynaud, M., Vaxelaire, J., Olivier, J., Dieudé Fauvel, E. & Baudez, J. C. 2012. Compression dewatering of municipal activated sludge: effects of salt and pH. *Water Research*, 46, 4448-4456.
- Szeląg, B., Studziński, J., Chmielowski, K., Dacewicz, E., Siwicki, P., Mirosław-Świątek, D., et al. 2020. Uncertainty of forecast and control of activated sludge sedimentation capacity. *Polish Journal of Environmental Studies*, 29, 1879-1887



- Tchobanoglus, G., Burton, F. & Stensel, H. D. 2003. Wastewater engineering: treatment and reuse. *American Water Works Association Journal*, 95, 201
- Wang, H. F., Ma, Y. J., Wang, H. J., Hu, H., Yang, H. Y. & Zeng, R. J. 2017a. Applying rheological analysis to better understand the mechanism of acid conditioning on activated sludge dewatering. *Water Research*, 122, 398-406.
- Wang, Z., Liu, X., Ni, S. Q., Zhang, J., Zhang, X., Ahmad, H. A., et al. 2017b. Weak magnetic field: a powerful strategy to enhance partial nitrification. *Water Research*, 120, 190-198.
- Wells, G. F., Park, H. D., Yeung, C. H., Eggleston, B., Francis, C. A. & Criddle, C. S. 2009. Ammonia-oxidizing communities in a highly aerated full-scale activated sludge bioreactor: betaproteobacterial dynamics and low relative abundance of Crenarchaea. *Environmental Microbiology*, 11, 2310-2328.
- Xiao, K., Chen, Y., Jiang, X., Yang, Q., Seow, W. Y., Zhu, W., et al. 2017. Variations in physical, chemical and biological properties in relation to sludge dewaterability under Fe (II)-Oxone conditioning. *Water Research*, 109, 13-23.
- Yang, G., Zhang, G. & Wang, H. 2015. Current state of sludge production, management, treatment and disposal in China. *Water Research*, 78, 60-73.
- Yavuz, H. & Celebi, S. S. 2000. Effects of magnetic field on activity of activated sludge in wastewater treatment. *Enzyme and Microbial Technology*, 26, 22-27.
- Zaidi, N. S., Muda, K., Sohaili, J., Hussein, N., Loan, L. W. & Sillanpää, M. 2019. Potential of a static magnetic field to inhibit filamentous sludge bulking in activated sludge process. *Journal of Environmental Engineering*, 145, 04019001.
- Zaidi, N. S., Sohaili, J., Muda, K. & Sillanpää, M. 2014. Magnetic field application and its potential in water and wastewater treatment systems. *Separation and Purification Reviews*, 43, 206-240.
- Zhao, B., Sha, H., Li, J., Cao, S., Wang, G. & Yang, Y. 2020. Static magnetic field enhanced methane production via stimulating the growth and composition of microbial community. *Journal of Cleaner Production*, 271, 122664.
- Zieliński, M., Rusanowska, P., Dębowski, M. & Hajduk, A. 2018. Influence of static magnetic field on sludge properties. *Science of The Total Environment*, 625, 738-742.

