

Research Paper

مقاله پژوهشی

## Feasibility of Reusing Water Treatment Plant Sludge in Treating the Sludge from a Wastewater Treatment Plant

## امکان‌سنجی استفاده مجدد لجن تصفیه‌خانه آب در تصفیه لجن تصفیه‌خانه فاضلاب

Mohammad Javad Kazemi<sup>1</sup> and Gagik Badalians Gholikandi<sup>2\*</sup>

محمدجواد کاظمی<sup>۱</sup> و گایگ بدالیانس قلی‌کندی<sup>۲\*</sup>

1- Ph.D. Student, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

۱- دانشجوی دکتری گروه مهندسی آب، فاضلاب و محیط‌زیست، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط‌زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

2- Professor, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

۲- استاد گروه مهندسی آب، فاضلاب و محیط‌زیست، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط‌زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

\*Corresponding Author, Email: [g.badalians@yahoo.com](mailto:g.badalians@yahoo.com)

\*نویسنده مسئول، ایمیل: [g.badalians@yahoo.com](mailto:g.badalians@yahoo.com)

Received: 07/08/2022

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۵/۱۶

Revised: 11/09/2022

تاریخ اصلاح: ۱۴۰۱/۰۶/۲۰

Accepted: 21/09/2022

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۶/۳۰

© IWWA

© انجمن آب و فاضلاب ایران

### Abstract

### چکیده

This study was conducted on the feasibility of improving processes of thickening, anaerobic digestion, and sludge dewatering at wastewater treatment plants on a laboratory pilot scale, aiming to reduce polyelectrolyte consumption by 50% and replace it with chemical sludge. Parameters of Sludge Volume Index (SVI), Specific Filtration Resistance (SRF), compressibility coefficient, filtration rate, and biogas production rate were investigated. It is shown that by applying 200 mg/g of water treatment plant sludge to wastewater sludge, the compressibility coefficient was decreased by 27%, the filtration rate was increased by 70%, and SVI and SRF were decreased by 64.9% and 43.3%, respectively. Therefore, it has facilitated the sludge sedimentation and release of its free water. On the other hand, adding the sludge from a water treatment plant led to the proper access of microorganisms to micronutrients and improvement of their performance resulting in an increase of 7.77% in the total biogas production. The iron present in the digestion process caused an increase in biogas production by increasing the activity of enzymes, reducing oxidation-reduction potential, and improving the direct interspecies electrons transfer. In conclusion, adding the optimal amount of water treatment plant sludge, along with the environmental management of a meaningful portion of water and wastewater residuals, may play an important role in significantly reducing polyelectrolyte consumption and improving biogas production.

در این مطالعه، امکان‌سنجی بهبود عملکردی فرآیندهای تغلیظ، هضم بی‌هوازی و آبگیری لجن تصفیه‌خانه‌های فاضلاب با هدف کاهش ۵۰ درصدی پلی‌الکترولیت مصرفی و جایگزینی آن با لجن شیمیایی تصفیه‌خانه آب در مقیاس پایلوت آزمایشگاهی انجام پذیرفت. برای این منظور، پارامترهای اندیس حجمی لجن (SVI)، مقاومت ویژه فیلتراسیون (SRF)، ضریب تراکم‌پذیری، نرخ فیلتراسیون و میزان تولید بیوگاز بررسی شدند. نتایج حاصل نشان می‌دهند که با افزودن دوز بهینه ۲۰۰ میلی‌گرم برگرم لجن تصفیه‌خانه آب به لجن فاضلاب، ضریب تراکم‌پذیری کاهش ۲۷ درصدی و نرخ فیلتراسیون افزایش ۷۰ درصدی داشته و SVI و SRF به ترتیب برابر ۶۴/۹ و ۴۳/۳ درصد کاهش یافته داشته‌اند و در نهایت منجر به تسهیل ته‌نشینی و آزادسازی آب آزاد شده است. از سوی دیگر افزودن لجن تصفیه‌خانه آب دسترسی میکروارگانیسم‌ها به مواد ریزمغذی را بهبود داده منجر به افزایش ۷/۷۷ درصدی تولید بیوگاز شده است. آهن موجود در فرایند هضم با افزایش فعالیت آنزیم‌ها، کاهش پتانسیل اکسایش-کاهش و بهبود انتقال مستقیم الکترون بین‌گونه‌ای منجر به افزایش بیوگاز تولیدی می‌شود. افزودن لجن تصفیه‌خانه آب در مقادیر مناسب می‌تواند علاوه بر مدیریت بهینه محیط‌زیستی پسماندهای تصفیه‌خانه‌های آب و فاضلاب، نقش به‌سزایی در کاهش قابل‌توجه پلی‌الکترولیت مصرفی و افزایش میزان تولید بیوگاز داشته باشد.

**Keywords:** Chemical sludge of the water treatment plant, Polyelectrolyte consumption, Sludge thickening, Sludge digestion, Sludge dewatering, Reuse.

**کلمات کلیدی:** لجن شیمیایی تصفیه‌خانه آب، پلی‌الکترولیت مصرفی، تغلیظ لجن، هضم لجن، آبگیری لجن، استفاده مجدد.

(Wang et al., 2017)، ذرت (Guo et al., 2020) و مواد معدنی دیگر مانند بنتونیت (Masihi and Badalians Gholikandi, 2020)، لجن تصفیه‌خانه آب (Ahmad et al., 2016)، خاکستر لجن تصفیه‌خانه فاضلاب (Qi et al., 2011)، خاک رس و آهک (Joseph-Soly et al., 2019) به‌عنوان حالت‌دهنده فیزیکی یا شیمیایی در فرایند تغلیظ و آبیگری لجن تصفیه‌خانه فاضلاب صورت گرفته است.

نظر به اهمیت فنی-اقتصادی-محیط‌زیستی این موضوع و بررسی‌های محدود موجود، در این تحقیق، تاثیر به‌کارگیری لجن شیمیایی تصفیه‌خانه آب بر کارآمدی مراحل اصلی خط تصفیه لجن فاضلاب (تغلیظ، هضم بی‌هوازی و آبیگری لجن هضم شده) مورد بررسی قرار گرفت. در این راستا، پارامترهای اصلی مرتبط شامل SVI، SRF، ضریب تراکم‌پذیری، نرخ فیلتراسیون و میزان تولید بیوگاز با توجه به میزان لجن شیمیایی مورد استفاده اندازه‌گیری و ارزیابی شدند. از آنجایی‌که در مطالعات محدود پیشین اکثراً تاثیر لجن تصفیه‌خانه آب بر مراحل مجزای خط تصفیه لجن مورد بررسی قرار گرفته است، در این تحقیق کاربردی، تعیین شرایط بهینه راهبری تاسیسات مربوط به مراحل اصلی متعارف خط تصفیه لجن مورد نظر بوده است.

## ۲- مواد و روش‌ها

نمونه‌های لجن مازاد بیولوژیکی و هضم شده مورد استفاده برای بررسی و ارزیابی کارآمدی مراحل تغلیظ، هضم بی‌هوازی و آبیگری از محل خط جریان برگشتی لجن و جریان خروجی هاضم بی‌هوازی تصفیه‌خانه فاضلاب جنوب تهران برداشت شدند. همچنین از خروجی فرایند تغلیظ نمونه لجن تصفیه‌خانه آب شماره ۱ (جلالیه) که در آن از کلروفریک (۶ میلی‌گرم بر گرم) به‌عنوان منعقدکننده برای انعقاد و لخته‌سازی و آهک (۳ میلی‌گرم بر گرم) برای تنظیم pH آب استفاده می‌شود، برداشت شده‌اند. مشخصه‌های کیفی آن‌ها در جدول ۱ ارائه شده است.

نظر به این‌که در دو دهه اخیر، بازیابی مواد، بازچرخانی و استفاده مجدد همواره در اولویت برنامه‌ریزی‌ها و اجرای پروژه‌های آب و فاضلاب قرار دارند، بررسی راه‌کارهای ممکن در رابطه با استفاده مجدد از لجن تصفیه‌خانه‌های آب در خط تصفیه لجن تصفیه‌خانه‌های فاضلاب نیز مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است (Li et al., 2016, Luiz et al., 2018). همچنین با توجه به هزینه دفع لجن تابعی از حجم لجن تصفیه‌شده است، یکی از اهداف اصلی تصفیه لجن در کنار تثبیت آن، حداکثر تغلیظ و آبیگری ممکن و کاهش حجم آن است (طاهریون و همکاران، ۱۴۰۱). روش‌های تصفیه معمول لجن را اصولاً به سه بخش اصلی تقسیم می‌کنند: تغلیظ، تثبیت و آبیگری. بسیاری از این روش‌ها شامل به‌کارگیری فناوری‌های متنوع و گاه پیچیده‌ای هستند (Metcalf and Eddy, 2014, Qasim et al., 2000).

لجن حاوی آلوم به‌عنوان یک حالت‌دهنده شیمیایی و فیزیکی در بهبود آبیگری لجن فاضلاب عمل می‌کند و افزودن آن باعث کاهش دوز مصرفی پلی‌اکریل‌امید (پلی‌الکترولیت) و کاهش میزان رطوبت لجن فاضلاب می‌شود (Li et al., 2016). نتایج حاصل از استفاده لجن تصفیه‌خانه آب در تصفیه‌خانه لجن فعال متعارف در مقیاس صنعتی نشان از تاثیر مثبت آن بر فرایندهای بیولوژیکی دارد. همچنین میزان حذف اکسیژن خواهی بیوشیمیایی<sup>۳</sup> (BOD)، جامدات آلی معلق<sup>۴</sup> (VSS)، مواد آلی و فسفر افزایش یافته و میزان بیوگاز تولیدی تا حدوداً دو برابر افزایش نشان می‌دهد (Luiz et al., 2018).

نتایج مطالعه دیگری نشان می‌دهد که استفاده از لجن حاوی آلوم به همراه ۱۰۰ میلی گرم پلی‌الکترولیت کاتیونی در آبیگری لجن هضم شده، باعث بهبود SRF لجن تا بیش از ۹۰ درصد شد (Lai and Liu, 2004). در مطالعه مشابهی، کاهش این پارامتر تا بیش از ۵۰ درصد میسر شده است (Ren et al., 2020). مطالعات مختلفی برای استفاده از مواد ارزان قیمت مانند پسماند محصولات کشاورزی نظیر برنج (Guo et al., 2019)، پودر درخت بامبو و برنج

جدول ۱- مشخصات کیفی لجن مازاد بیولوژیکی و هضم شده تصفیه‌خانه فاضلاب و لجن تصفیه‌خانه آب

مشخصه کیفی	واحد	لجن مازاد بیولوژیکی	لجن هضم شده	لجن تصفیه‌خانه آب
pH	-	۷/۰۳ ± ۰/۲۰	۶/۹۵ ± ۰/۲۰	۷/۲۳ ± ۰/۲۰
اکسیژن خواهی شیمیایی (COD)	mg/L	۹۵۲۰ ± ۲۰۰	۲۳۵۸۰ ± ۱۰۰۰	۳۲۸ ± ۱۰
جامدات فرار (VS)	mg/L	۵۷۰۰ ± ۱۰۰	۱۲۶۳۰ ± ۱۰۰۰	۶۴۹ ± ۱۰
کل جامدات (TS)	mg/L	۸۳۵۰ ± ۱۰۰	۲۲۰۰۰ ± ۱۰۰۰	۲۳۸۴ ± ۱۰۰
نسبت VS/TS	%	۶۸/۲ ± ۵	۵۷/۴ ± ۲	۲۷ ± ۲

(Shimadzu, 2014, ژاپن) استفاده شد.

به منظور تعیین میزان قابلیت جداسازی آب از لجن، آزمایش مقاومت ویژه فیلتراسیون از طریق قیف بوختر انجام شد. برای این منظور در هر مرحله از مطالعات آزمایشگاهی، ابتدا کاغذ صافی برای ایجاد شرایط آب‌بند، پیش از شروع آزمایش اندکی مرطوب شد و سپس بر روی قیف بوختر قرار داده شد. در مرحله بعد، مقدار ۲۰۰ میلی‌لیتر از نمونه لجن حالت‌دهی شده به روی کاغذ صافی موجود در قیف بوختر انتقال یافت و پس از گذشت زمان ۲ دقیقه از زهکشی ثقیل آب لجن، فشار منفی به میزان ۵۰-۸۰ کیلوپاسکال به وسیله پمپ خلأ بر آن اعمال شد. در مرحله بعد، مقادیر حجمی آب جمع‌آوری شده در ظرف زیرین قیف بوختر در زمان‌های مختلف (هر ۱۰ ثانیه) مورد اندازه‌گیری قرار گرفت. این امر تا زمانی ادامه یافت که دیگر آب اضافی از لجن خارج نشود. در نهایت، مقاومت ویژه فیلتراسیون لجن از طریق معادله (۲) محاسبه می‌شود (APHA, 2012).

$$SRF = \frac{2P \cdot b \cdot A^2}{\mu \cdot c} \quad (2)$$

که  $SRF$ : مقاومت ویژه فیلتراسیون برحسب متر بر کیلوگرم،  $P$ : فشار خلأ اعمال شده برحسب نیوتن بر مترمربع،  $A$ : سطح مقطع فیلتراسیون برحسب مترمربع،  $\mu$ : ویسکوزیته دینامیکی لجن صاف‌سازی شده برحسب نیوتن ثانیه بر مترمربع،  $C$ : غلظت جامدات خشک لجن برحسب کیلوگرم بر مترمکعب و  $b$  (برحسب  $t/V^2$ ): نرخ زمان صاف‌سازی لجن است که تحت‌عنوان شیب منحنی به‌دست‌آمده از تغییرات نسبت مدت‌زمان صاف‌سازی لجن برحسب ثانیه به حجم لجن صاف‌سازی شده برحسب مترمکعب ( $t/V$ ) در مقابل تغییرات حجم لجن صاف‌سازی شده ( $V$ ) تعریف می‌شود.

برای اندازه‌گیری فشردگی لجن از آزمایش مقاومت ویژه فیلتراسیون لجن ( $SRF$ ) حداقل در دو فشار متفاوت مقاومت ویژه فیلتراسیون اندازه‌گیری می‌شود و با استفاده از معادله (۳) مقدار فشردگی لجن ( $S$ ) محاسبه می‌شود (Zhang et al., 2017).

$$\frac{SRF_1}{SRF_2} = \left(\frac{P_1}{P_2}\right)^S \quad (3)$$

بازده فیلتراسیون عاملی است که براساس آن افزایش فیلتراسیون لجن در دستگاه آبیگری مشخص می‌شود. هرچه مقدار این عامل افزایش یابد نشان می‌دهد که حالت‌دهنده عملکرد بهتری داشته است. واحد بازده فیلتراسیون، کیلوگرم بر مترمربع فیلتر در ساعت است ( $Y_N \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}$ ). بازده فیلتراسیون با استفاده از معادله (۴) اندازه‌گیری می‌شود (Qi et al., 2011).

عناصر تشکیل‌دهنده لجن تصفیه‌خانه آب با استفاده از آزمایش  $XRF$  مشخص شد. لجن تصفیه‌خانه آب حاوی مقادیر مناسبی از ریزمغذی‌هایی مانند مولیبدن ( $0/69 \text{ mg/g TS}$ )، سلنیوم ( $0/63 \text{ TS}$ )، نیکل ( $0/07 \text{ mg/g TS}$ ) و سایر عناصر تاثیرگذار است که در فرایند هضم بسیار تاثیر گذار هستند (Arif et al., 2018). به‌منظور بررسی تاثیر مواد افزودنی تحت شرایط جامع، لجن تصفیه‌خانه آب به نسبت وزنی به لجن فاضلاب اضافه شده و آزمایش‌های تغلیظ، هضم بی‌هوازی و آبیگری به‌صورت متوالی و با سه بار تکرار انجام شد. نمونه‌ها پس از تغلیظ وارد هاضم بی‌هوازی شده و سپس آبیگری شدند. لجن تصفیه‌خانه آب براساس وزن جامدات خشک به وزن جامدات خشک لجن فاضلاب ترکیب شد. نمونه‌ها براساس روش گام به گام مورد آزمایش قرار گرفتند. ابتدا براساس غلظت جامدات خشک، دوزهای تزریق به لجن به همراه ۱ میلی‌گرم پلی‌الکترولیت کاتیونی (۵۰ درصد میزان مصرفی در تصفیه‌خانه فاضلاب) برابر ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰، ۲۰۰، ۲۵۰، ۳۰۰، ۳۵۰، ۴۰۰، ۴۵۰ و ۵۰۰ میلی‌گرم به گرم جامدات خشک لجن بر مبنای مطالعات قبلی (Masih and Badalians Gholikandi, 2020) و امکان‌پذیری افزودن آن در مقیاس واقعی انتخاب شد. نمونه پس از اختلاط با هم‌وزن مغناطیسی به مدت ۵ دقیقه، برای تعیین  $SVI$  به استوانه مدرج منتقل شد و مورد آزمایش قرار گرفت.

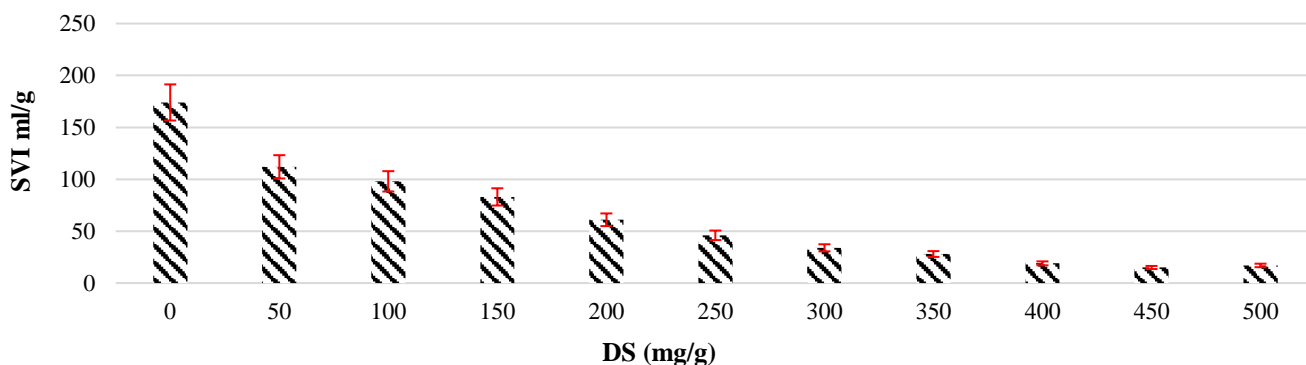
شاخص حجمی لجن به‌منظور بررسی تاثیر مواد افزودنی بر بهبود تغلیظ‌پذیری لجن برحسب  $\text{ml/g}$  مطابق با روش 2710D استاندارد متد از طریق معادله (۱) مورد سنجش قرار می‌گیرد (APHA, 2012).

$$SVI(\text{ml/g}) = \frac{V_s \left(\frac{\text{ml}}{\text{l}}\right) \times 1000 (\text{mg/g})}{SS (\text{mg/l})} \quad (1)$$

که  $SVI$ : شاخص حجمی لجن،  $SS$ : جامدات معلق موجود در نمونه محلول سوسپانسیون و  $V_s$ : حجم لجن ته‌نشین شده در استوانه آزمایش پس از گذشت ۳۰ دقیقه هستند.

آزمایش پتانسیل بیوشیمیایی متان در ۱۰ نمونه با بطری‌های شیشه‌ای با حجم ۲ لیتر در دمای ۳۵ درجه سانتیگراد انجام شد. بطری‌های شیشه‌ای با یک لیتر از نمونه فاضلاب و به‌علاوه مواد افزوده شده در دوزهای مشخص با میکسر ثابت در حمام آب گرم قرار گرفتند. فضای سر بطری‌های شیشه‌ای با گاز نیتروژن خالص پر شده بود. بیوگاز تولیدی با روش جابجایی آب پایش و با دستگاه بیوگاز آنالایزر (Cubic-Ruiyi, Gasboard-3200L, چین) روزانه و به مدت ۲۲ روز اندازه‌گیری شد (Azarmanesh et al., 2020). برای کالیبراسیون دوره‌ای از کروماتوگرافی گازی (GC) (GC-)

تصفیه‌خانه آب در بهبود این امر بسیار موثر است. تغییر مقادیر لجن آب با تغییر مقادیر کلروفوریک باقیمانده ارتباط مستقیم دارد و به نسبت افزایش آن، دوز مواد منعقد کننده در لجن فاضلاب افزایش یافته و فرایند تغلیظ لجن بهبود می‌یابد. مواد منعقد کننده کلروفوریک موجود در لجن آب پس از ترکیب با لجن فاضلاب، با ایجاد کمپلکس‌های آهن ذرات تشکیل ذرات بزرگتر و سنگین‌تر را سرعت بخشیده که در نهایت منجر به بهبود ته‌نشینی و تغلیظ لجن شده است و در نهایت نیاز به مصرف مواد پلی‌الکترولیت به میزان ۵۰ درصد کاهش می‌یابد (Likus et al., 2021; B et al., 2020). هم‌چنین کلر موجود در لجن آب می‌تواند از رشد باکتری‌های رشته‌ای جلوگیری کند و به کاهش SVI لجن کمک کند. با توجه به این‌که فرایند تغلیظ تاثیر مستقیمی در میزان مصرف پلی‌الکترولیت و احجام سازه‌ای و عملکردی فرایندهای بعدی تصفیه لجن (هضم و آبیگری) دارد، انتخاب دوز مناسب تزریق اهمیت بالایی دارد (Rahmani et al., 2013; Puchajda and Oleszkiewicz, 2008). SVI لجن با افزودن دوزهای بالاتر از ۱۰۰ به کمتر از ۱۰۰ رسیده و در دوزهای بالاتر از ۲۵۰ نیز به کمتر از ۵۰ ml/g رسیده است، به‌نظر می‌رسد دوزهای ۱۰۰ تا ۲۵۰ (mg/g DS) می‌توانند به عنوان دوز بهینه در این مرحله انتخاب شوند.



شکل ۱- تاثیر استفاده از لجن تصفیه‌خانه آب بر میزان SVI در فرایند تغلیظ لجن مازاد بیولوژیکی

بسته به میزان مواد افزوده شده می‌رسد. حداکثر میزان تولید هاضم بی‌هوازی در حالت کنترلی در روز هشتم و برای نمونه‌های بالاتر از ۳۵۰ mg/g DS در روز نهم، برای دوزهای کمتر از ۲۵۰ mg/g DS روز هفتم و برای دوزهای ۲۵۰ و ۳۰۰ mg/g DS روز هفتم به‌دست آمد. دوزهای بالای ۳۰۰ mg/g DS منجر به افزایش غلظت جامدات خشک (TS) غیرآلی می‌شود. در نتیجه میزان مواد آلی نمونه‌ها کاسته شده و نسبت VS/TS کاهش می‌یابد و در نتیجه میزان مواد جامد غیرآلی قابل هضم در هاضم افزوده می‌شود. از سوی دیگر با کاهش نسبت VS/TS دسترسی میکروارگانیسم‌ها به مواد غذایی کاهش

$$Y_{N90} = \frac{V_{S90} \times R_S}{T_{90} \times A} \quad (4)$$

که  $V_{S90}$ : درصد حجم نمونه‌ای که بازده فیلترسیون آن اندازه‌گیری خواهد شد (برحسب مترمکعب)،  $R_S$ : غلظت جامدات لجن (کیلوگرم بر مترمکعب)،  $T_{90}$ : مقدار زمان لازم برای عبور ۹۰ درصد حجم نمونه از فیلتر (برحسب ساعت) و  $A$ : سطح فیلتراسیون (برحسب مترمربع) هستند.

### ۳- نتایج

#### ۳-۱- تاثیر استفاده از لجن تصفیه‌خانه آب بر فرایند تغلیظ

##### لجن مازاد بیولوژیکی

تاثیر استفاده از لجن تصفیه‌خانه آب بر میزان SVI در فرایند تغلیظ لجن مازاد بیولوژیکی بررسی شد و نتایج آن مطابق شکل ۱ به‌دست آمد. مطابق این شکل با افزایش دوز لجن تصفیه‌خانه آب در ترکیب با لجن فاضلاب، قابلیت ته‌نشینی و تغلیظ بهبود یافته و بهترین عملکرد در دوزهای بالا حاصل شده است. کاهش SVI تا ۹۰ درصد با افزودن دوزهای بالای ۴۰۰ mg/g DS از لجن تصفیه‌خانه آب به‌دست آمده که نشان می‌دهد افزودن لجن

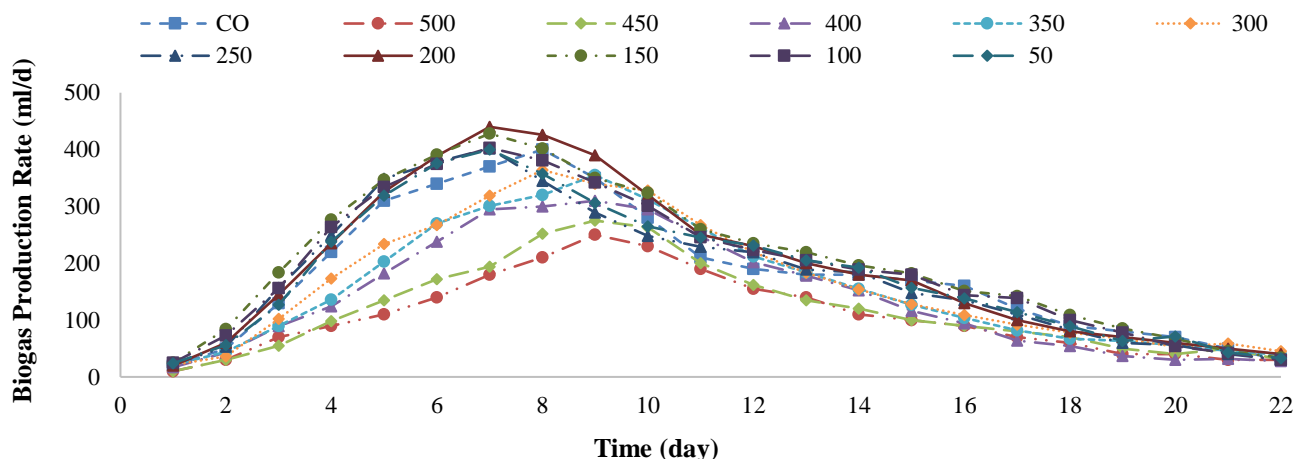
#### ۳-۲- تاثیر استفاده از لجن تصفیه‌خانه آب بر فرایند هضم

##### بی‌هوازی

با توجه به این‌که میزان لجن تصفیه‌خانه آب به‌دلیل دارا بودن آهن فراوان، مواد ریزمغذی و موادغیرآلی بالا در هضم بی‌هوازی تاثیرگذار است (Kapp, 1984; Garlicka et al., 2020)، تاثیر افزودن آن در پایلوت آزمایشگاهی بررسی و میزان بیوگاز تولیدی روزانه و تجمعی آن مطابق شکل ۲ به‌دست آمد. با بررسی نتایج خروجی از پایلوت هضم بی‌هوازی، متوسط تولید روزانه و تجمعی بیوگاز در هاضم بی‌هوازی نشان می‌دهد که تولید بیوگاز از روز دوم شروع شده و در روزهای هفتم تا دهم به بیشترین میزان خود

میزان افزایش غلظت مواد جامد و مواد غیرآلی تغییر چندانی ندارد، میزان تولید بیوگاز افزایش یافته و زمان به حداکثر رسیدن تولید نیز یک روز کاهش پیدا می‌کند. با افزودن ۵۰ و ۲۵۰ mg/g (DS) لجن تصفیه‌خانه آب تغییرات در میزان تولید بیوگاز حدود ۱ درصد است که قابل چشم‌پوشی است.

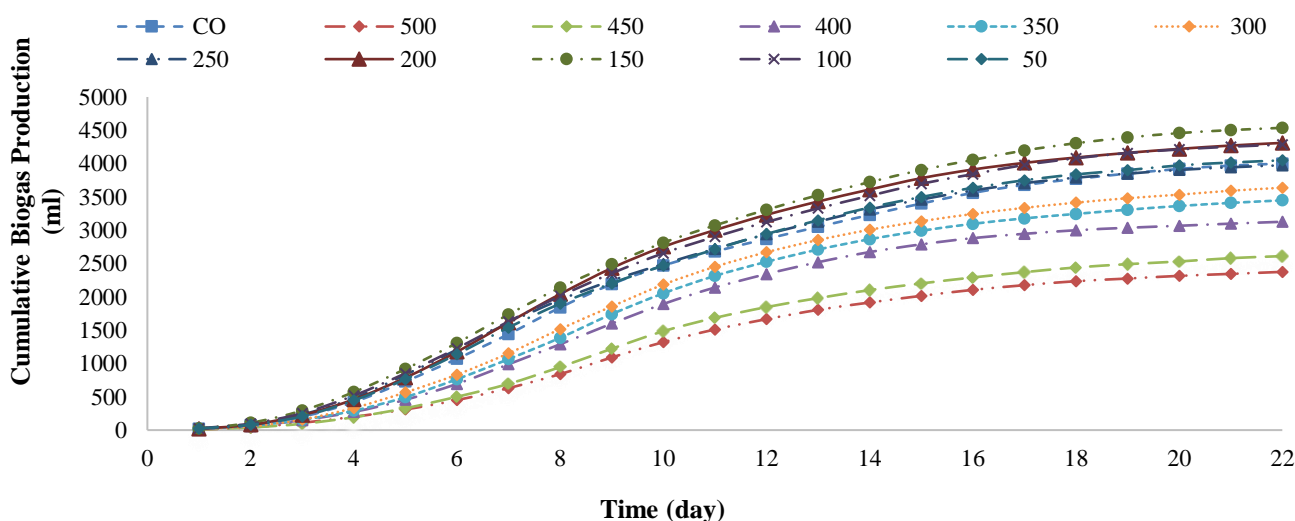
یافته است. هم‌چنین به دلیل میزان آهن بالای آن، زمان بیشتری برای سازگاری میکروارگانیسم‌ها نیاز است که منجر به کاهش میزان بیوگاز تولیدی شده و افزایش یک روزه زمان تولید حداکثر آن می‌شود. در غلظت‌های ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ mg/g DS) میکروارگانیسم‌ها به سرعت با لجن ورودی سازگار شده و به دلیل تامین مناسب آهن و سایر مواد ریزمغذی و با توجه به این‌که



شکل ۲- تاثیر لجن تصفیه‌خانه آب بر میزان بیوگاز تولیدی روزانه

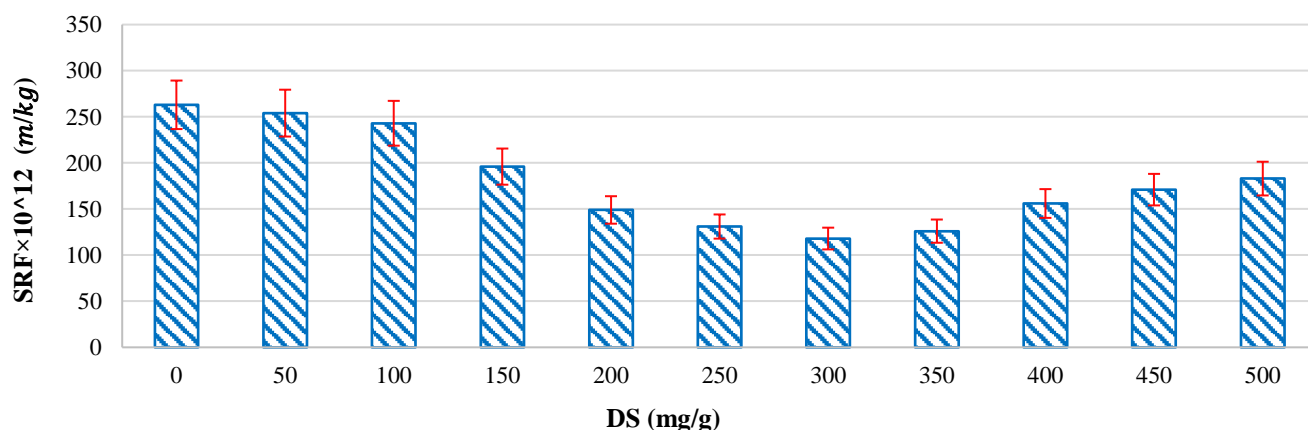
ریزمغذی بیشتر شده ولی از سوی دیگر با افزایش دوز لجن تصفیه‌خانه آب، میزان آهن در هاضم بالا رفته و مانند برخی از فلزات سنگین می‌توانند خاصیت بازدارندگی داشته باشند و عملکرد میکروارگانیسم‌ها را تحت تاثیر قرار دهند. در مطالعه Xie et al. (2021) افزودن ۱۰ درصد لجن تصفیه‌خانه آب موجب کاهش ۲۳ درصدی میزان بیوگاز شده است. استفاده از لجن تصفیه‌خانه‌های آب آشامیدنی بر روی هضم پسماند مواد غذایی باعث افزایش ۵۸ درصدی تولید متان و هم‌چنین کاهش زمان ماند و فاز تاخیری شد (Ebrahimi-Nik et al., 2018).

میزان بیوگاز تجمعی تولیدی نشان می‌دهد که با افزودن ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ mg/g DS) لجن تصفیه‌خانه آب میزان بیوگاز تجمعی تولیدی ۱/۲۲، ۷/۱، ۱۳/۴۲ و ۷/۷۷ درصد به ترتیب افزایش یافته است. هم‌چنین در دوز ۲۵۰ mg/g DS تغییر میزان بیوگاز تولیدی کمتر از نیم درصد است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش دوز در مقادیر بالاتر از ۲۵۰ mg/g DS کاهش بیوگاز افزایش یافته و دامنه کاهش بیوگاز تجمعی بین ۹/۰ تا ۴۰/۶ درصد بوده که به ترتیب مربوط به دوز ۳۰۰ و ۵۰۰ mg/g DS) است. در دوزهای بالا دسترسی میکروارگانیسم‌ها به مواد



شکل ۳- تاثیر لجن تصفیه‌خانه آب بر میزان بیوگاز تولیدی تجمعی

SRF رخ‌نداده ولی پس از آن کاهش SRF روند کاهشی قابل توجهی دارد. با افزایش دوز تا  $300 \text{ mg/g DS}$  روند کاهشی SRF با شیب بیشتری رخ داده و در دوز  $300 \text{ mg/g DS}$  بهترین عملکرد را داشته و SRF از  $10^{12} \times 251 \text{ m/kg}$  به ترتیب به عدد  $10^{12} \times 181 \text{ m/kg}$  (۵۳ درصد کاهش) رسیده است. پس از آن مقدار SRF افزایش می‌یابد و در دوز  $500 \text{ mg/g DS}$  به  $10^{12} \times 174 \text{ m/kg}$  می‌رسد. در دوزهای بالا میزان ذرات ریز افزایش یافته و آبیگری را با مشکل مواجه می‌کند. آبیگری دشوار لجن هضم شده به مواد کلئیدی و فوق کلئیدی که ذرات ریز و ناپایدار هستند مرتبط است که با پراکنده شدن و گرفتگی مدیای لجن، مانع از آبیگری مناسب لجن می‌شوند (Amin, 2014). با افزودن لجن تصفیه‌خانه‌آب، از یک سو، غلظت جامدات افزایش پیدا کرده و برهم‌کنش ذرات بیشتر می‌شود و از سوی دیگر به دلیل افزایش اندازه ذرات لجن، با بهبود فیلتراسیون و کاهش تراکم پذیری و نیز کاهش نسبت سطح به حجم، آب پیوندی در لجن کاهش می‌یابد و عملکرد آبیگری لجن بهبود می‌یابد (Wang et al., 2017; Wójcik, 2020).



شکل ۴- تاثیر استفاده از دوزهای مختلف لجن تصفیه‌خانه‌آب بر میزان SRF در فرایند آبیگری از لجن هضم شده بی‌هواری

برای لجن هضم‌شده فاقد لجن تصفیه‌خانه‌آب، ضریب تراکم‌پذیری  $s = 1$  است. افزودن لجن تصفیه‌خانه‌آب ضریب تراکم‌پذیری را  $27 \pm 5$  درصد کاهش داده است. افزایش ضریب تراکم‌پذیری باعث آبیگری دشوارتر لجن می‌شود و هرچه ضریب تراکم‌پذیری کاهش یابد آبیگری بهبود یافته و آب به راحتی از لجن خارج می‌شود. تغییر ضریب تراکم‌پذیری به معنای تغییر ساختار لجن بوده و با کاهش آن، ساختار لجن به سمت تشکیل سازندهای فیزیکی رفته و کیک لجن نفوذپذیرتر شده است (Guo et al., 2019). بازده فیلتراسیون دومین فاکتور مورد بررسی است که هرچه میزان این فاکتور افزایش یابد نشان‌دهنده افزایش نرخ فیلتراسیون آب از لجن است. مقدار آن برای لجن هضم شده فاقد

با افزایش دوز لجن تصفیه‌خانه‌آب میزان مواد غیرآلی افزایش یافته و میزان مواد آلی قابل تجزیه و تبدیل به بیوگاز کاهش پیدا می‌کند که در نهایت منجر به کاهش بیوگاز تولیدی می‌شود. وجود آهن انتقال مستقیم الکترون بین گونه‌ای را در فرایند هضم افزایش می‌دهد، فعالیت آنزیم‌ها را افزایش و رشد باکتری‌های متانوژن را تسهیل می‌کند و هم‌چنین آهن با رسوب سولفید، از تشکیل هیدروژن سولفید جلوگیری و بوی نامطبوع لجن را از بین می‌برد (Romero-Güiza et al., 2016). در این مرحله با توجه به تاثیر مثبت در افزایش میزان بیوگاز تولیدی دوز  $150 \text{ mg/g DS}$  لجن تصفیه‌خانه‌آب می‌تواند به عنوان دوز مناسب در نظر گرفته شود.

### ۳-۳- تاثیر استفاده از لجن تصفیه‌خانه‌آب بر فرایند آبیگری

شکل ۴ تاثیر استفاده از لجن تصفیه‌خانه‌آب بر میزان SRF در فرایند آبیگری از لجن هضم شده بی‌هواری را نشان می‌دهد. در دوزهای کمتر از  $150 \text{ mg/g DS}$  تغییر محسوسی در میزان

در مطالعه Lai and Liu (2004) استفاده از لجن آلوم به همراه  $100$  میلی گرم پلیمر کاتیونی، SRF را بیش از  $90$  درصد در آبیگری لجن هضم شده بهبود بخشیده است. در مطالعه دیگری لجن آلوم به همراه پلیمر، SRF را بیش از  $50$  درصد کاهش داده است (Ren et al., 2020). در صورتی که در مطالعات قبلی لجن آلوم تصفیه‌خانه‌آب در دوزهای بالا  $2000 \text{ mg/g}$  (Ren et al., 2020) و  $3000 \text{ mg/g}$  (Li et al., 2016) میزان SRF را به ترتیب  $64$  و  $71$  درصد کاهش داده‌اند. پایین بودن میزان SRF در مقایسه با مطالعات قبلی به دلیل استفاده غیرمستقیم از لجن تصفیه‌خانه‌آب در فرایند آبیگری است، در صورتی که مطالعات قبلی به صورت مستقیم از لجن در فرایند آبیگری استفاده نموده‌اند.

تصفیه‌خانه‌آب نتایج قابل‌توجهی داشته است، به‌طوری‌که با افزودن ۱۵۰ میلی‌گرم بر گرم لجن تصفیه‌خانه‌آب، افزایش ۱۳/۴ درصدی تولید بیوگاز حاصل شد. نتایج به‌دست آمده نشان از پتانسیل مناسب لجن تصفیه‌خانه آب در هضم هم‌زمان با لجن تصفیه‌خانه فاضلاب دارد. علاوه‌بر افزایش تولید بیوگاز با کیفیت مناسب، حجم راکتورهای مورد نیاز نیز کاهش یافته و در نهایت موجب اقتصادی شدن تاسیسات هضم بی‌هوازی خواهد شد. افزودن لجن تصفیه‌خانه آب به لجن فاضلاب به‌دلیل دارا بودن مواد منعقدکننده، مواد معدنی و همچنین وجود برخی فلزات جزئی و تغییر در ساختار و بافت لجن باعث بهبود عملکرد تغلیظ، آبگیری و هضم‌شده و در نهایت منجر به کاهش مصرف پلی‌الکترولیت و افزایش بیوگاز می‌شود که به اقتصادی بودن فرایند منجر می‌شود. محتوای بالای آهن در لجن تصفیه‌خانه آب، نقش اساسی در هضم بی‌هوازی دارد، زیرا انتقال مستقیم الکترون بین گونه‌ای را افزایش داده و با تحریک آنزیم‌ها فعالیت آن‌ها را افزایش می‌دهد. همچنین با کاهش پتانسیل اکسایش-کاهش در مرحله متان‌سازی رشد باکتری‌های متانوژن را تسهیل می‌کند (Romero-Güiza et al., 2016).

در نهایت، انتخاب دوز مناسب افزودن لجن تصفیه‌خانه آب به فرایند تصفیه لجن فاضلاب باید به‌گونه‌ای باشد که اولاً تأثیر منفی بر هیچ‌یک از فرایندهای تغلیظ، هضم بی‌هوازی و آبگیری نداشته و ثانیاً بیشترین بازدهی اقتصادی را نیز داشته باشد. با توجه به نتایج، افزودن ۲۰۰ میلی‌گرم بر گرم لجن تصفیه‌خانه آب تأثیر مثبت بر فرایندها داشته است و در این مطالعه به‌عنوان دوز بهینه پیشنهاد می‌شود. لجن تصفیه‌خانه‌آب به‌عنوان پسماند تصفیه آب نتایج قابل‌توجهی در تغلیظ، هضم بی‌هوازی و آبگیری نشان می‌دهد و در دوز بهینه ممکن است تا ۵۰ درصد کاهش در مصرف پلی‌الکترولیت کاتیونی حاصل شود. به‌منظور بررسی اقتصادی طرح باید در مقیاس واقعی و محل قرارگیری تصفیه‌خانه‌ها بررسی شود. از لحاظ تئوری با تصفیه هم‌زمان لجن تصفیه‌خانه آب و لجن فاضلاب، علاوه‌بر کاهش مصرف پلی‌الکترولیت در تصفیه لجن، واحد تصفیه لجن تصفیه‌خانه آب حذف شده و لجن تصفیه‌خانه آب می‌تواند مستقیماً با یک خط لوله به محل تصفیه خانه فاضلاب منتقل شود که هزینه‌های خط انتقال به هزینه‌های تصفیه اضافه می‌شود. از سوی دیگر با تصفیه هم‌زمان دو لجن در هزینه‌های نیروی انسانی، تجهیزات، مصرف مواد شیمیایی و انرژی صرفه‌جویی شده و طرح در بلندمدت اقتصادی خواهد بود. در حال حاضر بیشتر تصفیه‌خانه‌های آب فاقد سیستم مدیریت لجن بوده و به‌عنوان یک معضل محیط‌زیستی در تصفیه‌خانه آب تبدیل

لجن تصفیه‌خانه‌آب ۰/۲۳ کیلوگرم بر مترمربع در ساعت بوده که با افزودن لجن تصفیه‌خانه‌آب در فرایند تصفیه لجن تا ۰/۷۸ کیلوگرم بر مترمربع در ساعت (۰/۳۳۰٪) افزایش می‌یابد. همچنین کلروفوریک در مقیاس میکرو، علاوه‌بر حالت‌دهی شیمیایی به‌صورت فیزیکی نیز عمل می‌کند و به نفوذپذیری و کاهش تراکم لجن در زمان آبگیری کمک می‌کند (Mangunda et al., 2019). ذرات لجن می‌توانند به‌عنوان سازندهای فیزیکی و خنثی‌کننده بار ذرات در لجن عمل کنند (Qi et al., 2011) و با استفاده از برهمکنش‌های شیمیایی و/یا الکترواستاتیکی به سطح مواد متخلخل متصل شوند. از طریق چنین مکانیزمی، مواد متخلخل سفت و سخت تشکیل شده، که می‌تواند تنش فشاری را بین یکدیگر منتقل کرده، از فشردگی بیش از حد کیک لجن جلوگیری و به جریان خروج بیشتر آب کمک کند (Farhat et al., 2012). لجن تصفیه‌خانه‌آب دارای مواد معدنی بالا و فلاک درشت بوده و با توجه به نتایج آزمایشات در این مطالعه، لجن تصفیه‌خانه‌آب مانند حالت‌دهنده فیزیکی عمل کند.

#### ۴- بحث و نتیجه‌گیری

بهبود فرآیندهای تغلیظ لجن مازاد بیولوژیکی و آبگیری لجن هضم‌شده نیاز به افزودن حالت‌دهنده‌های فیزیکی و شیمیایی است تا با ایجاد ساختار مناسب و تشکیل ذرات پایدار و درشت‌تر، خروج آب را از لجن تسهیل بخشند (Amin, 2014). لجن تصفیه‌خانه آب می‌تواند به‌عنوان یک ماده مکمل در تصفیه لجن تصفیه‌خانه فاضلاب در بخش تغلیظ، آبگیری و بهبود تولید بیوگاز در هاضم بی‌هوازی لجن مورد استفاده قرارگیرد و در نهایت در ترکیب با لجن فاضلاب به‌روش‌های مختلف مانند سوزاندن، کمپوست و استفاده در کشاورزی از چرخه تصفیه خارج شود. از آنجایی‌که لجن تصفیه‌خانه آب دارای قابلیت تأثیرگذاری به دو صورت شیمیایی و فیزیکی می‌تواند به فرایند تغلیظ و آبگیری لجن کمک کند. لجن تصفیه‌خانه آب به‌دلیل داشتن مواد منعقدکننده با خنثی‌سازی بار ذرات در ایجاد پل بین ذرات و تشکیل فلوک‌های درشت، منسجم و پایدار به‌عنوان حالت‌دهنده شیمیایی عمل کرده و از سوی دیگر به‌دلیل تشکیل فلوک‌های درشت و منسجم و نیز وجود مواد معدنی در آن، مانند یک حالت‌دهنده فیزیکی در لجن عمل نموده و لجن مستحکم و متخلخل با نرخ فیلتراسیون بالا تولید کند. در نهایت عملکرد فرایندهای تغلیظ و آبگیری را بهبود می‌بخشد (Qi et al., 2011).

هضم هم‌زمان لجن تصفیه‌خانه فاضلاب به‌همراه لجن

- coagulant use", *International Journal of Water and Wastewater Treatment*, 6(3).
- Ebrahimi-Nik, M., Heidari, A., Ramezani Azghandi, S., Asadi Mohammadi, F., and Younesi, H., (2018), "Drinking water treatment sludge as an effective additive for biogas production from food waste; kinetic evaluation and biomethane potential test", *Bioresource Technology*, 260, 421-426, <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.03.112>.
- Farhat, S., Kamel, F., Jedoui, Y., and Kallel, M., (2012), "The relation between the RO fouling membrane and the feed water quality and the pretreatment in Djerba Island plant", *Desalination*, 286, 412-416, <http://dx.doi.org/10.1016/j.desal.2011.11.058>.
- Garlicka, A., Zubrowska-Sudol, M., Umiejewska, K., Roubinek, O., Palige, J., and Chmielewski, A., (2020), "Effects of thickened excess sludge pre-treatment using hydrodynamic cavitation for anaerobic digestion", *Energies*, 13(10), 2483, <https://www.mdpi.com/1996-1073/13/10/2483>.
- Guo, J., Jiang, S., and Pang, Y., (2019), "Rice straw biochar modified by aluminum chloride enhances the dewatering of the sludge from municipal sewage treatment plant", *Science of the Total Environment*, 654, 338-344, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.429>.
- Guo, Z., Ma, L., Dai, Q., Ao, R., Liu, H., Wei, Y., and Mu, L., (2020). "Role of extracellular polymeric substances in sludge dewatering under modified corn-core powder and sludge-based biochar pretreatments", *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 202, 110882, <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.110882>.
- Joseph-Soly, S., Saldanha, T., Nosrati, A., Skinner, W., and Addai-Mensah, J., (2019), "Improved dewatering of clay rich mineral dispersions using recyclable superabsorbent polymers", *Chemical Engineering Research and Design*, 142, 78-86, <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2018.07.032>.
- Kapp, H., (1984), "Sludge thickening prior to anaerobic digestion", *Water Science and Technology*, 16(12), 419-432, <https://doi.org/10.2166/wst.1984.0010>.
- Lai, J.Y., and Liu, J.C., (2004), Co-conditioning and dewatering of alum sludge and waste activated sludge, *Water Science and Technology*, 50(9), 41-48, <https://doi.org/10.2166/wst.2004.0530>.
- Li, J., Liu, L., Liu, J., Ma, T., Yan, A., and Ni, Y., (2016), "Effect of adding alum sludge from water treatment plant on sewage sludge dewatering", *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 4, 746-752, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jece.2015.07.021>.
- Likus, M., Komorowska-Kaufman, M., Pruss, A., Zych, Ł., and Bajda, T., (2021), "Iron-based water treatment residuals: Phase, physicochemical characterization, and textural properties", *Materials*, 14(14), 3938, <https://doi.org/10.3390/ma14143938>.
- Luiz, M.A., Sidney Seckler, F.F., and Passos, P.R., (2018), "Full-scale effects of addition of sludge from water treatment stations into processes of sewage treatment by conventional activated sludge", *Journal of Environmental Management*, 215, 283-293, شده است. با استفاده از این طرح می توان این چالش را حل کرده و از مزایای اقتصادی و محیط زیستی آن بهره مند شد. در مدیریت یکپارچه، پایدار و کارآمد، جمع آوری، تصفیه و دفع لجن های تصفیه خانه های آب و فاضلاب راه کاری مناسب در راستای دستیابی به راهبری بهینه فنی-اقتصادی-محیط زیستی است و لازم است در چارچوب کاهش، بازچرخانی و استفاده مجدد مورد توجه قرار گیرد.
- ۵- پی نوشت ها
- 1- Sludge Volume Index (SVI)
  - 2- Specific Filtration Resistance (SRF)
  - 3- Biochemical Oxygen Demand (BOD)
  - 4- Volatile Suspended Solids (VSS)
  - 5- Chemical Oxygen Demand (COD)
  - 6- Volatile Solids (VS)
  - 7- Total Solids (TS)
  - 8- X-ray Fluorescence
- ۶- مراجع
- طاهریون، م.، آقابابایی، ب.، محمدی، س.، غلمان، س.و.، و صالحی وزیری، ا.، (۱۴۰۱). "بررسی اثر هضم هوازی لجن بر کیفیت آبیگری لجن مازاد سیستم SBR تصفیه خانه شهر یزد"، *علوم و مهندسی آب و فاضلاب*، ۷(۲)، ۳۴-۴۱.
- Ahmad, T., Ahmad, K., Ahad, A., and Alam, M., (2016), "Characterization of water treatment sludge and its reuse as coagulant", *Journal of Environmental Management*, 182, 606-611, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.08.010>.
- Amin, P., (2014), "Primary sludge addition for enhanced biosludge dewatering", M.Sc. Thesis, University of Toronto, Canada.
- APHA, (2012), APHA, AWWA, WEF, *Standard methods for examination of water and wastewater*, Anales de Hidrología Médica.
- Arif, S., Liaquat, R., and Adil, M., (2018), "Applications of materials as additives in anaerobic digestion technology", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 97, 354-366, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.08.039>.
- Azarmanesh, R., Zonoozi, M.H., and Ghiasinejad, H., (2020), "Characterization of food waste and sewage sludge mesophilic anaerobic co-digestion under different mixing ratios of primary sludge, secondary sludge and food waste", *Biomass and Bioenergy*, 139, 105610, <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105610>.
- Gobena, B., Adela, Y., Serbessa, G.G., and Alemayehu, E., (2020), "Evaluation of residual Al<sup>3+</sup> and Fe<sup>3+</sup> concentration in blended Alum-Ferric Chloride



Zhang, J., Yue, Q., Xia, C., Yang, K., Zhao, P., Gao, B., and Yu, H., (2017), "The study of  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  as conditioner used to deep dewater the urban sewage dewatered sludge by filter press", *Separation and Purification Technology*, 174, 331-337, <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2016.11.004>.



This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC-BY) license.

- <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.03.072>.
- Mangunda, C., Petersen, J., and Lewis, A.E., (2019), "The effect of Fe(III) concentration on the dewatering behaviour of Fe(III) oxyhydroxide precipitates from low-tenor solutions", *Hydrometallurgy*, 183, 20-28, <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2018.11.010>.
- Masihi, H., and Badalians Gholikandi, G., (2020), "Using acidic-modified bentonite for anaerobically digested sludge conditioning and dewatering", *Chemosphere*, 241, 125096, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.125096>.
- Metcalf, W., and Eddy, C., (2014), *Wastewater engineering: Treatment and resource recovery, Fifth Edition*, McGraw-Hill.
- Puchajda, B., and Oleszkiewicz, J., (2008), "Impact of sludge thickening on energy recovery from anaerobic digestion", *Water Science and Technology*, 57(3), 395-401, <http://dx.doi.org/10.2166/wst.2008.021>.
- Qasim, S.R., Motley, E.M., and Zhu, G., (2000), *Water works engineering: Planning, design, and operation*, Prentice Hall.
- Qi, Y., Thapa, K.B., and Hoadley, A F.A., (2011), "Application of filtration aids for improving sludge dewatering properties, A review", *Chemical Engineering Journal*, 171(2), 373-384, <https://doi.org/10.1016/j.cej.2011.04.060>.
- Rahmani, A.R., Nematollahi, D., Godini, K., and Azarian, G., (2013). "Continuous thickening of activated sludge by electro-flotation", *Separation and Purification Technology*, 107, 166-171, <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2013.01.022>.
- Ren, B., Lyczko, N., Zhao, Y., and Nzihou, A., (2020), "Integrating alum sludge with waste-activated sludge in co-conditioning and dewatering: A case study of a city in south France", *Environmental Science and Pollution Research*, 27(13), 14863-14871, <https://doi.org/10.1007/s11356-020-08056-0>.
- Romero-Guiza, M.S., Vila, J., Mata-Alvarez, J., Chimenos, J.M., and Astals, S., (2016), "The role of additives on anaerobic digestion: A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 58, 1486-1499, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.094>.
- Wang, S., Yang, Y.K., Chen, X.G., Lv, J.Z., and Li, J., (2017), "Effects of bamboo powder and rice husk powder conditioners on sludge dewatering and filtrate quality", *International Biodeterioration and Biodegradation*, 124, 288-296, <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2017.05.013>.
- Wójcik, M., (2020), "Investigation of filtration properties and microbiological characteristics of sewage sludge after physical conditioning with the use of ground walnut shells", *Powder Technology*, 361, 491-498, <http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2019.11.100>.
- Xie, S., Li, X., Pham, C.U., Nguyen, H.V., Song, Y., Chetty, K., Kulandaivelu, J., Wang, C., Hai, F., and Jiang, G., (2021), "Co-digestion of primary sewage sludge with drinking water treatment sludge: A comprehensive evaluation of benefits", *Bioresour Technol*, 330, 124994, <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.124994>.