

Evaluation of the Main Parameters Influencing Sludge Treatment Processes in Activated Sludge Municipal Wastewater Treatment Plants Employing the Clay Material Nano Montmorillonite Conditioner

Seyed Ali Sadat Hosseini¹ , Gagik Badalians Gholikandi² 

1. Department of Water, Wastewater and Environmental Engineering, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, University of Shahid Beheshti, Tehran, Iran. E-mail: alisadathosseini@gmail.com
2. Corresponding Author, Department of Water, Wastewater and Environmental Engineering, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, University of Shahid Beheshti, Tehran, Iran. E-mail: G_Badalians@sbu.ac.ir; g.badalians@yahoo.com

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received 11 August 2025
Received in revised form 7 October 2025
Accepted 11 October 2025
Available online 15 June 2026

Keywords:
conditioning,
dewatering,
nano montmorillonite,
stabilization,
wastewater sludge treatment

ABSTRACT

Objective: The efficient operation of excess biological sludge treatment processes, including thickening, digestion, and dewatering, is crucial to the overall performance of activated sludge wastewater treatment systems. This study aimed to evaluate the key operational parameters affecting these stages in order to optimize the use of nano montmorillonite and its acid-thermally modified form as sludge conditioners. The objective was to assess the effectiveness of these materials in improving sludge dewaterability, enhancing sludge digestibility, and increasing methane production

Method: Laboratory-scale experiments were conducted using real sludge samples, provided from the South Tehran Wastewater Treatment Plant. The primary parameters assessed included time to filtration (TTF), specific resistance to filtration (SRF), capillary suction time (CST), zeta potential, bound water content, and sludge digestibility. Pearson correlation analysis was applied to explore the relationships between the nanomaterials and these parameters. Additionally, a heatmap was generated to illustrate the interdependencies among them.

Results: The greatest reduction in SRF was observed with 300 mg/g dry solids of nano montmorillonite, yielding SRF values of 6.7×10^{12} and 52.8×10^{12} m/kg for excess and digested sludge, respectively. Using 200 mg/g of the modified form produced SRF values of 6.2×10^{12} and 45.3×10^{12} m/kg for excess and digested sludge, respectively. At the same optimal dosages, TTF and CST were improved significantly by nano montmorillonite and its acid-thermal modified: 31, 26, 2, and 2.3 seconds for excess sludge and 192, 164, 6, and 5 seconds for digested sludge, respectively. The modified nanomaterial reduced zeta potential and bound water content by 93.8% and 80.4% in excess sludge and by 89.7% and 77.9% in anaerobically digested sludge. The heatmap analysis at dosages of 0, 100, 150, 200, 250, 300, and 350 mg/g revealed strong correlations (97–98%) among TTF, CST, and SRF. Therefore, the related results showed methane production improvement in anaerobic digestion phase.

Conclusions: Both investigated materials, nano montmorillonite and acid-thermally modified nano montmorillonite, despite their different dosage requirements, exhibited good performance in sludge conditioning, thickening, and dewatering. In addition, a strong correlation was observed among the three parameters of TTF, CST, and SRF.

Cite this article: Sadat Hosseini, S. A., & Badalians Gholikandi, G. (2026). Evaluation of the Main Parameters Influencing Sludge Treatment Processes in Activated Sludge Municipal Wastewater Treatment Plants Employing the Clay Material Nano Montmorillonite Conditioner. *Journal of Environmental Studies*, 52 (1), 41-61. <https://doi.org/10.22059/jes.2025.397072.1008615>

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.



DOI: <https://doi.org/10.22059/jes.2025.397072.1008615>

Introduction

The processes of conditioning, thickening, digestion, and dewatering represent critical stages in the treatment of excess biological sludge generated in activated sludge wastewater treatment plants. Currently, synthetic coagulants such as cationic polyelectrolytes and conventional chemical flocculants like alum or ferric chloride are commonly used for sludge conditioning. However, these chemical agents have limited impact on the sludge's physical properties, particularly its permeability and compressibility.

For this reason, research into alternative materials that can positively influence the physical properties of sludge remains ongoing. Among these alternatives, the use of natural materials and waste-derived compounds as substitutes for synthetic chemicals has garnered increasing attention. In this context, clay minerals have emerged as promising candidates due to their unique structural properties. Previous studies have demonstrated that clay minerals especially bentonite, kaolin, and smectite can improve sludge dewaterability and act as effective physicochemical conditioners in sludge dewatering processes. To evaluate and quantify sludge dewaterability, key parameters such as capillary suction time (CST), time to filter (TTF), and specific resistance to filtration (SRF) are typically employed. Furthermore, the digestibility of conditioned sludge is assessed by measuring biogas production and analyzing its composition in terms of carbon dioxide and methane percentages.

The objective of this study is to investigate the application of various dewatering and digestibility assessment parameters, as well as their intercorrelations, considering different types of sludge produced in wastewater treatment plants namely, waste activated sludge and anaerobically digested sludge. This is achieved through the use of nano montmorillonite and its acid-thermal modified form as conditioning agents.

Method

Samples of waste activated sludge were collected from the return sludge line (secondary sludge) and anaerobically digested sludge samples obtained from the sludge outlet stream of the anaerobic digester at the South Tehran Wastewater Treatment Plant.

Nano montmorillonite powder was procured from Nano Materials Iranian Co., based in Mashhad. To enhance the structure and functional performance of the nano montmorillonite, an acid-thermal activation process was employed. This modification led to increased porosity and a larger specific surface area, and also facilitated the extraction of aluminum ions. For activation, the nano montmorillonite was mixed with 2 Molar sulfuric acid at a solid-to-liquid ratio of 1:10, and the mixture was subjected to continuous stirring and reflux heating at 95°C for 2 hours. Upon completion of the reaction, the material was washed with deionized water and dried at 60°C. Subsequently, to stabilize the activated structure, it was heated at 200°C for 2 hours. Three primary parameters including TTF, CST and SRF were measured and evaluated according to standard methods to assess the sludge's filterability (dewaterability). The zeta potential was determined with a zeta potential analyzer. To investigate the effect of nano montmorillonite and its modified form on sludge digestion and biogas production, particularly methane yield, three laboratory-scale anaerobic reactors containing the two types of sludge mixture with investigated coagulants and the blank one were designed and tested. All reactors were maintained under anaerobic conditions in a water bath at a constant temperature of 35°C for a period of 15 days. Upon completion of the digestion period, the volume of biogas produced in each reactor was measured. To determine the methane content, gas samples were collected in Tedlar bags and analyzed using gas chromatography with a thermal conductivity detector (TCD).

Pearson correlation analysis was employed to determine the relationships among SRF, CST, and TTF parameters. Finally, a heatmap was generated using Python software to visualize these relationships. The direct association and correlation between the applied nanomaterials and the measured performance indices were also evaluated.

Results

The maximum reduction in filtration time was achieved at a dosage of 200 mg/g dry solids using the modified nano montmorillonite. In comparison, this level of reduction was only attainable with unmodified nano montmorillonite at a higher dosage of 300 mg/g dry solids. Further increase in dosage up to 400 mg/g resulted in marginal changes in filtration time, indicating a plateau in performance. The addition of both nano montmorillonite and modified nano montmorillonite to anaerobically digested sludge significantly contributed to reducing filtration time. A notable decrease in filtration time was observed with increasing dosages up to approximately 200 mg/g dry solids, indicating improved dewaterability of the sludge. The greatest reduction in filtration time using unmodified nano montmorillonite was recorded at a dosage of 300 mg/g dry solids.

The application of nano montmorillonite and its modified form at dosages up to 200 mg/g dry solids significantly decreased the CST of excess biological sludge. In the thickening process using nano montmorillonite, further reduction in CST was observed at 300 mg/g dry solids. Based on the findings, it can be concluded that the use of modified nano montmorillonite at an optimal dosage of 200 mg/g dry solids effectively reduced the CST of anaerobically digested sludge and enhanced the dewatering process.

Increasing the amount of nano montmorillonite to 300 mg/g dry solids reduced the specific resistance to filtration (SRF) of excess biological sludge from 17×10^{12} to 6.7×10^{12} m/kg. Moreover, when the digested sludge was conditioned with the same dosage, the lowest SRF value of 52.8×10^{12} m/kg was recorded, compared to the initial SRF of 135×10^{12} m/kg. Likewise, the application of modified nano montmorillonite at 200 mg/g dry solids in excess biological sludge resulted in the lowest SRF value of 6.2×10^{12} m/kg.

Given the superior performance of the modified nano montmorillonite, its effect on the reduction of zeta potential and bound water content in both excess biological and digested sludge was investigated at the optimal dosage. Results indicated that this nanomaterial reduced zeta potential and bound water by 93.7 percent and 80.4 percent in excess biological sludge, and by 89.7 percent and 77.9 percent in digested sludge, respectively.

The addition of nanomaterials, particularly nano clays such as nano montmorillonite and its modified variants, has emerged as an effective approach to enhance anaerobic digestion and improve methane yield. The results of this study confirmed that modified nano montmorillonite significantly improved process performance and stability, leading to a considerable increase in methane production.

Pearson correlation analysis revealed a strong correlation between the three key dewatering indicators TTF, CST, and SRF across all samples, with correlation coefficients ranging from 0.97 to 0.98. This high correlation indicates synchronized behavior among these parameters during the sludge dewatering process. Moreover, all samples exhibited negative correlation coefficients between conditioning dosage and the parameters, indicating an inverse linear relationship.

Conclusions

This study aimed to evaluate the effectiveness of nano-scale mineral montmorillonite and its acid-thermal modified form as potential substitutes for conventional polyelectrolytes. The findings demonstrated that both natural nano montmorillonite and its acid-thermal modified form are effective in improving key indicators related to sludge dewatering and anaerobic digestion. Overall, the results of this study highlight that the application of natural and modified nano montmorillonite offers an innovative and promising approach to enhancing sludge conditioning, thickening, anaerobic digestion, and dewatering processes. However, further mid-term evaluations (over a period of approximately three years) at pilot and full-scale levels are recommended to identify operational conditions and assess the resilience limits of this solution under varying treatment plant configurations.

Additional studies are suggested to investigate the physicochemical properties of the materials, the structural changes in sludge matrices, and their impacts on sludge dewaterability and digestibility. Exploring alternative modification methods for montmorillonite and evaluating their effectiveness, as well as targeted

assessments of this approach within the context of wastewater reuse and resource recovery goals, are also essential.

Author Contributions

Seyed Ali Sadat Hosseini: Sample preparation and processing; conducting experiments and data collection; statistical and software-based data analysis; analysis and interpretation of data and results; preparation of the manuscript draft.

Gagik Badalians Gholikandi: Thesis supervisor; research design; supervision of the research process; review, analysis, interpretation, and verification of results; manuscript revision, review, and finalization.

Data Availability Statement

Data available on request from the authors.

Acknowledgements

The authors would like to thank Shahid Beheshti University for supporting the performance of this study.

Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

Funding

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.



University of Tehran Press

نشریه محیط شناسی

شاپای الکترونیکی: ۶۹۲۲-۲۳۴۵

Homepage: <http://Jes.ut.ac.ir>

ارزیابی پارامترهای اصلی موثر بر فرایندهای تصفیه لجن تصفیه‌خانه‌های فاضلاب شهری به روش لجن فعال با استفاده از ماده رسی حالت‌دهنده نانومونت موریلونیت

سیدعلی سادات حسینی^۱، گایگ کندی^۲

۱. گروه مهندسی آب، فاضلاب و محیط‌زیست، دانشکده عمران، آب و محیط‌زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران، رایانامه: alisadathosseini@gmail.com

۲. نویسنده مسئول، گروه مهندسی آب، فاضلاب و محیط‌زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران، رایانامه: G_Badalians@sbu.ac.ir; g.badalians@yahoo.com

اطلاعات مقاله

چکیده

نوع مقاله:

مقاله پژوهشی

هدف: با توجه به نقش تعیین‌کننده عملکرد بهینه فرایندهای تصفیه لجن مازاد بیولوژیکی شامل تغلیظ، هضم و آبیگری در کارایی کلی تصفیه‌خانه‌های فاضلاب به روش لجن فعال، در این پژوهش پارامترهای عملیاتی مؤثر بر این مراحل به‌منظور دستیابی به شرایط بهینه استفاده از نانومونت موریلونیت و شکل اصلاح‌شده اسیدی-حرارتی آن به عنوان مواد حالت‌دهنده لجن مورد ارزیابی قرار گرفت. هدف از این مطالعه، بررسی کارآمدی این مواد در بهبود آبیگری‌پذیری لجن، افزایش هضم‌پذیری و ارتقای تولید متان بود.

روش پژوهش: بررسی‌ها تحت شرایط آزمایشگاهی با نمونه‌های لجن واقعی برداشت شده از تصفیه‌خانه فاضلاب جنوب تهران انجام شد. پارامترهای اصلی مورد بررسی شامل مدت زمان فیلتراسیون، مقاومت ویژه فیلتراسیون، مدت زمان مکش موئینه‌ای، پتانسیل زتا، آب پیوندی و هضم‌پذیری لجن بودند. همچنین برای تشخیص ارتباط بین پارامترهای نانومونت موریلونیت و اصلاح شده آن با شاخص‌های یاد شده، از همبستگی به روش پیرسون بهره‌گیری شد و در نهایت نقشه حرارتی بین پارامترهای ذکر شده ترسیم گردید.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۲۰

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۷/۱۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۱۹

تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۳/۲۵

کلیدواژه‌ها:

آبیگری،

تثبیت،

تصفیه لجن فاضلاب،

حالت‌دهی،

نانو مونت موریلونیت

یافته‌ها: حداکثر کاهش مقاومت ویژه فیلتراسیون با استفاده از نانومونت موریلونیت به میزان ۳۰۰ میلی‌گرم بر گرم جامدات خشک لجن برای لجن مازاد بیولوژیکی و لجن هضم شده به ترتیب $۶/۷ \times ۱۰^{۱۲}$ و $۵۲/۸ \times ۱۰^{۱۲}$ و با استفاده از اصلاح شده آن به میزان ۲۰۰ میلی‌گرم بر گرم جامدات خشک لجن برای لجن مازاد بیولوژیکی و لجن هضم شده به ترتیب برابر $۶/۲ \times ۱۰^{۱۲}$ و $۴۵/۳ \times ۱۰^{۱۲}$ متر بر کیلوگرم حاصل گردید. در خصوص مدت زمان فیلتراسیون و مدت زمان مکش موئینه‌ای، به‌کارگیری نانومونت موریلونیت و اصلاح‌شده آن در دوز یادشده به ترتیب ۳۱، ۲۶، ۲ و ۲/۳ ثانیه برای لجن مازاد بیولوژیکی و ۱۹۲، ۱۶۴، ۶ و ۵ ثانیه برای لجن هضم‌شده بود. نتایج بررسی تاثیر دوز بهینه اصلاح‌شده آن بر پتانسیل زتا و آب پیوندی نشان می‌دهند که استفاده از آن، به ترتیب برابر ۹۳/۸ و ۸۰/۴ درصد برای لجن مازاد بیولوژیکی و ۸۹/۷ درصد و ۷۷/۹ درصد برای لجن هضم‌شده بی‌هوازی را کاهش داد. همچنین تاثیر مثبت بر هضم‌پذیری لجن و به تبع آن افزایش تولید متان نیز مشخص گردید. نمودار نقشه حرارتی بین پارامترها در دوزهای ۳۵۰، ۳۰۰، ۲۵۰، ۲۰۰، ۱۵۰، ۱۰۰، نشان داد که پارامترهای مدت زمان فیلتراسیون، مدت زمان مکش موئینه‌ای، مقاومت ویژه فیلتراسیون از همبستگی بسیار بالایی (۹۷-۹۸ درصد) برخوردارند.

نتیجه‌گیری: هر دو گزینه مورد بررسی، نانو مونت موریلونیت و اصلاح شده اسیدی حرارتی نانو مونت موریلونیت، با وجود میزان مصرفی متفاوت، از کارآمدی خوبی در حالت‌دهی، تغلیظ و آبیگری لجن برخوردار بوده و همبستگی قوی بین سه پارامتر مدت زمان فیلتراسیون، مدت زمان مکش موئینه‌ای و مقاومت ویژه فیلتراسیون وجود دارد.

استناد: سادات حسینی، سیدعلی، و بدلیانس قلی کندی، گایگ (۱۴۰۵). ارزیابی پارامترهای اصلی موثر بر فرایندهای تصفیه لجن تصفیه‌خانه‌های فاضلاب

شهری به روش لجن فعال با استفاده از ماده رسی حالت‌دهنده نانومونت موریلونیت. *نشریه محیط‌شناسی*، ۵۲ (۱)، ۶۱-۴۱.

<https://doi.org/10.22059/jes.2025.397072.1008615>



© نویسندگان.

ناشر: انتشارات دانشگاه تهران.

مقدمه

حالت‌دهی (آمایش)، تغلیظ، هضم و آبیگری لجن از جمله مهمترین مراحل تصفیه لجن مازاد بیولوژیکی حاصل در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب به روش لجن فعال به شمار می‌روند. میزان غلظت جامدات کل در لجن یادشده ممکن است برابر ۰/۳ تا ۵ درصد باشد که باید قبل از استفاده مجدد یا دفع نهایی، حالت‌دهی (آمایش)، تغلیظ، هضم و آبیگری شود. هدف از حالت‌دهی (آمایش) و آبیگری، دستیابی به لجنی با رطوبت و حجم کمتر است (Guo et al., 2019). همچنین لازم به ذکر است که در کنار پارامترهای موثر مورد بررسی در این تحقیق که در خصوص لجن مازاد بیولوژیکی شهری مورد توجه قرار گرفته‌اند، در لجن مازاد فاضلاب‌های صنعتی ممکن است عوامل آلاینده دیگری نیز مانند فلزات سنگین موجود باشند که به‌کارگیری ماده حالت‌دهنده مناسبی مانند کانی‌های رسی با قابلیت جذب بالا برای تثبیت این‌گونه آلاینده‌ها هم‌زمان با فرایند آبیگری از مزیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشد (Kinoti et al., 2022; P. Wang et al., 2024).

امروزه معمولاً از مواد منعقدکننده سنتتیک مانند پلی‌الکترولیت‌های کاتیونی و لخته‌سازهای متعارف شیمیایی مانند اکسید آلومینیوم یا کلریدفریک برای حالت‌دهی (آمایش) لجن استفاده می‌شود (Wei et al., 2018)، لیکن این مواد بر نفوذپذیری و تراکم‌پذیری لجن (مشخصات فیزیکی) تاثیر قابل توجهی ندارند. به بیان دیگر مواد یادشده صرفاً به عنوان حالت‌دهنده شیمیایی عمل می‌کنند. همچنین هزینه سنگینی را به فعالیت‌های بهره‌برداری از تاسیسات تحمیل می‌نمایند. به این دلیل، تحقیقات در زمینه استفاده از موادی که بر مشخصات فیزیکی لجن نیز تاثیرگذار مناسبی داشته باشند همچنان ادامه دارد. در همین رابطه، روش‌های متعددی نیز جهت بهبود تجزیه‌پذیری لجن مازاد بیولوژیکی در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب شهری با هدف افزایش میزان تولید بیومتان مورد بررسی قرار گرفته‌اند که از جمله آنها می‌توان از انواع روش‌های پیش‌تصفیه، بهینه‌سازی میزان مصرف مواد منعقدکننده متعارف، سامانه‌های دو مرحله‌ای هضم بی‌هوازی، استفاده از لجن تصفیه‌خانه‌های آب و انعقادسازی بیولوژیکی نام برد (Cainglet et al., 2023; Geng & Zhou, 2022; Guo et al., 2019; Kazemi & Badalians Gholikandi, 2023; Kurniawan et al., 2020; Lin et al., 2017; F. Wang et al., 2024). محققین بر این نظرند که استفاده از مواد منعقدکننده طبیعی (معدنی) با تاثیرگذاری شیمیایی- فیزیکی که دستیابی هم‌زمان به هر دو هدف فوق را میسر سازد، رویکردی مناسب از لحاظ فنی- اقتصادی- زیست محیطی می‌باشد.

برای ارزیابی و تعیین قابلیت فیلتراسیون (قابلیت آبیگری) لجن، از پارامترهای مدت زمان مکش موئینه‌ای^۱ (CST) (Dereli et al., 2018; Sahinkaya et al., 2018)، مدت زمان فیلتراسیون^۲ (TTF) (Ghaffour & Qamar, 2020)، مقاومت ویژه فیلتراسیون^۳ (SRF) (Dereli et al., 2018; Ghaffour & Qamar, 2020; Sahinkaya et al., 2018) و مواد پلیمری برون سلولی^۴ (EPS) (Masihi & Badalians Gholikandi, 2020, 2021; Yang et al., 2025) استفاده می‌شود. همچنین، میزان هضم‌پذیری لجن حالت‌دهی (آمایش) شده برحسب اندازه‌گیری میزان بیوگاز تولید شده و درصد دی‌اکسیدکربن و متان تشکیل‌دهنده آن تعیین می‌گردد.

با توجه به تحقیقات پیشین، بنتونیت طبیعی جهت ارزیابی بر فرایندهای حالت‌دهی (آمایش) و آبیگری لجن هضم شده مورد آزمایش قرار گرفت که عدم تاثیر آن گزارش شد. از آنجایی که عمده ماده تشکیل‌دهنده بنتونیت، مونت‌موریلونیت است، فرضیه تغییر ابعاد ذرات به نانو جهت اثربخشی مورد بررسی قرار گرفت. نانو کردن ذرات رس مونت‌موریلونیت می‌تواند تاثیرات مثبتی بر فرایندهای تغلیظ، آبیگری و هضم لجن داشته باشد. با کاهش اندازه ذرات به مقیاس نانو، ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی این ذرات بهبود یافته و می‌تواند در فرایندهای تصفیه آب و فاضلاب عملکرد موثر داشته باشد. نانو ذرات رس می‌توانند باعث افزایش ظرفیت جذب آب و بهبود فرایندهای جداسازی و تغلیظ لجن شوند. این امر منجر به کاهش زمان و هزینه‌های عملیاتی در تصفیه لجن می‌گردد (Masihi & Badalians Gholikandi, 2020).

1. Capillary Suction Time
2. Time to Filtration
3. Special Resistance to Filtration
4. Extracellular Polymeric Substances

هدف از این تحقیق، به‌کارگیری پارامترهای مختلف سنجش قابلیت آبیگری و هضم‌پذیری لجن و همبستگی آنها، با توجه به نوع لجن تشکیل شده در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب (لجن مازاد بیولوژیکی و لجن هضم‌شده بی‌هوازی) با استفاده از ماده حالت‌دهی (آمایش) نانومونت‌موریلونیت و اصلاح‌شده اسیدی- حرارتی است.

پیشینه پژوهش

پیشینه نظری

استفاده از مواد طبیعی و پسماندها به عنوان جایگزینی مناسب برای مواد شیمیایی سنتتیک مصرفی، یکی از محورهای اصلی مورد توجه محققین به شمار می‌رود. در این راستا کانی‌های رسی به دلیل ساختار منحصر به فردشان، به طور ویژه مورد توجه قرار گرفته‌اند. مشخصات کانی‌های رسی و امکان‌سنجی به‌کارگیری آنها برای تصفیه فاضلاب مورد بررسی قرار گرفته است (Xu et al., 2024) همچنین در نتایج تحقیقات پیشین نشان داده است کانی‌های رسی و به طور خاص بنتونیت (Masihi & Badalians Gholikandi, 2020)، کاتولین و اسمکتیت (Addai-Mensah, 2007) آبیگری لجن را بهبود بخشیده و به عنوان حالت‌دهنده (آمایش‌دهنده) فیزیکی- شیمیایی در فرایند آبیگری لجن نقش ایفا می‌کنند (Masihi & Badalians Gholikandi, 2020, 2021).

مکانیزم عملکردی این مواد حالت‌دهنده فیزیکی (آمایش‌دهنده فیزیکی)، ایجاد یک ساختار شبکه‌ای صلب می‌باشد که باعث بهبود قابلیت آبیگری لجن می‌گردد (Zhang et al., 2017; Zhang et al., 2019). با بررسی مواد تشکیل‌دهنده برخی از اسکلت‌ساز (داربست‌ساز)ها مانند بنتونیت، خاکستر بادی و خاکستر زیست‌توده مشخص گردیده است که وجود مقدار کافی SiO_2 در ساختارشان، کاهش تراکم‌پذیری و افزایش تخلخل لازم را میسر می‌سازد (Alvarenga et al., 2015; Bratby, 2016; Liu et al., 2018; Wójcik & Stachowicz, 2019). تاثیر مثبت استفاده از سیلیس به عنوان اسکلت‌ساز (داربست‌ساز) و کمک منعقدکننده برای بهبود فرایند آبیگری لجن در نتایج مطالعات متعددی مطرح گردیده است (Du et al., 2017; Zhang et al., 2017).

ماده معدنی مونت‌موریلونیت حاوی مقادیر قابل توجه SiO_2 و Al_2O_3 است. به همین دلیل انتظار می‌رود که آزادسازی بالای یون آلومینیم طی فرایند اصلاح آن حاصل گردد (با انجام اصلاح اسیدی- حرارتی، Al_2O_3 تبدیل به یون Al^{3+} می‌شود) (Foo et al., 2011) که خواص لخته‌سازی قوی‌تری دارد و SiO_2 نیز نقش اسکلت‌ساز (داربست‌ساز) را در آبیگری لجن ایفا می‌کند (Ma et al., 2017; Masihi & Badalians Gholikandi, 2020). لذا در این تحقیق، برای اولین بار استفاده از نانومونت‌موریلونیت و اصلاح‌شده اسیدی- حرارتی آن جهت حالت‌دهی و آبیگری لجن مازاد بیولوژیکی و لجن هضم‌شده بی‌هوازی مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است.

در کنار تاثیرگذاری فیزیکی- شیمیایی مواد رسی بر فرایندهای تغلیظ و آبیگری لجن، بررسی‌های محدودی نیز در خصوص تاثیر استفاده از آنها بر ارتقای عملکردی فرایند هضم بی‌هوازی انجام پذیرفته است (Zhang et al., 2020)

پهینه‌سازی میزان استفاده از کانی رسی مونت‌موریلونیت جهت دستیابی به نتیجه مطلوب در خصوص تغلیظ و آبیگری لجن از یک سو و بررسی تاثیرگذاری آن بر فرایند هضم بی‌هوازی از سوی دیگر ضروری است. در این رابطه، ارزیابی پارامترهای فیلترپذیری (قابلیت آبیگری) لجن مانند CST, TTF, SRF یاری‌دهنده محققین برای سنجش تاثیرگذاری مواد و عوامل مختلف بر انواع لجن‌های تولیدشده در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب بوده است (Sanchis-Perucho et al., 2023).

باید همواره توجه داشت که بررسی جامع انواع لجن‌های حاصل در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب به روش لجن فعال به دلیل مشخصات متفاوت آنها و تغییرات ممکن در بازه‌های زمانی متفاوت بهره‌برداری، الزامی است.

پیشینه عملی

استفاده از کانی‌های رسی در انواع روش‌های تصفیه فاضلاب مورد تحقیق و آزمایش قرار گرفته است. تا کنون، استفاده از مواد مختلفی مانند بنتونیت و اصلاح‌شده آن (Masihi & Badalians Gholikandi, 2020)، کاتولین و اصلاح‌شده آن (Masihi & Badalians Gholikandi, 2020)

Gholikandi, 2021)، آهک (Yu et al., 2016)، پوسته برنج و خاکستر آن (Wu et al., 2016)، خاکستر زیست‌توده (Wójcik & Stachowicz, 2019) و پوست گردو (Wójcik, 2020) و ... به عنوان حالت‌دهنده‌های (آمایش‌دهنده) فیزیکی-شیمیایی به تنهایی یا به همراه مواد حالت‌دهنده شیمیایی با هدف افزایش غلظت جامدات موجود در لجن، کاهش تراکم‌پذیری، افزایش تخلخل و نفوذپذیری مورد بررسی قرار گرفته است. در این میان، وجود کانی مونت‌موریلونیت در مواد معدنی یادشده مانند بنتونیت به عنوان یکی از مواد اصلی تشکیل‌دهنده، این فرضیه را تقویت می‌کند که این ماده معدنی به صورت اصلاح شده نانو یا اسیدی-حرارتی ممکن است به تنهایی به عنوان ماده حالت‌دهنده (آمایش‌دهنده) از کارآمدی بالاتری برخوردار باشد. لازم به ذکر است که در سال‌های اخیر امکان‌سنجی استفاده از مونت‌موریلونیت به عنوان جاذب در تصفیه فاضلاب مانند حذف رنگ (Sarkar et al., 2024) و تصفیه فاضلاب کارخانه کاغذسازی (Muangrak et al., 2020) انجام پذیرفته است.

مدل مفهومی

برای تشخیص ارتباط بین پارامترهای نانومونت‌موریلونیت و نانومونت‌موریلونیت اصلاح‌شده با شاخص‌های SRF, CST, TTF از همبستگی به روش پیرسون بهره‌گیری شد و در نهایت نقشه حرارتی^۱ بین پارامترهای ذکر شده ترسیم گردید و همچنین ارتباط مستقیم و همبستگی مواد استفاده شده برای اصلاح لجن با پارامترهای اندازه‌گیری شده مورد ارزیابی قرار گرفت. ضرایب همبستگی، قدرت و جهت ارتباط بین متغیرها را توصیف می‌کند. همبستگی پیرسون معیاری از ارتباط خطی بین متغیرهای تصادفی با توزیع نرمال و همبستگی رتبه اسپیرمن، رابطه یکنواخت^۲ بین متغیرها را توصیف می‌کند (Schober et al., 2018). این نمودارها با استفاده از نرم‌افزار پایتون به شکل نقشه حرارتی رسم شد. رنگ سبز در نمودار نمایش‌دهنده همبستگی خطی بسیار بالا (۰/۷ تا ۱) و رنگ قرمز نشان‌دهنده همبستگی خطی منفی بسیار بالا (۰/۷- تا -۱) است. همچنین رنگ‌های مایل به سفید بیانگر همبستگی متوسط مثبت (بین ۰/۳ و ۰/۷) یا منفی (بین ۰/۳- و ۰/۷-) است و رنگ سفید بیانگر عدم وجود رابطه خطی می‌باشد (El-Khateeb et al., 2023).

روش شناسی پژوهش

مواد

به منظور انجام فرآیندهای تغلیظ، هضم و آبگیری، نمونه‌های لجن مازاد بیولوژیکی، از خط جریان برگشتی لجن ثانویه و نمونه‌های لجن هضم شده بی‌هوازی از محل جریان لجن خروجی از هاضم تصفیه‌خانه فاضلاب جنوب تهران برداشت شدند. نمونه‌های لجن دو بار در هفته برداشت شدند و هر آزمایش با سه بار تکرار انجام گرفت. مشخصات نمونه‌های لجن هضم‌شده و لجن مازاد بیولوژیکی مورد بررسی در جدول ۱ ارائه شده‌اند.

پودر نانومونت‌موریلونیت از شرکت نانو مواد ایرانیان از مشهد تهیه گردید. مشخصات فیزیکی و شیمیایی آن به ترتیب در جدول ۲ و ۳ آورده شده است.

1. Heatmap
2. Monotonic relationship

جدول ۱. مشخصات لجن هضم شده بی‌هوازی و لجن مازاد بیولوژیکی

میزان		واحد	پارامتر
لجن مازاد بیولوژیکی	لجن هضم شده بی‌هوازی		
۷/۰۱±۰/۱	۷/۹±۰/۱	-	مقدار pH
۳/۱۴±۰/۴	۷/۹۸±۰/۴	g/L	VS (غلظت جامدات فرار)
۴/۳۶±۰/۸	۱۴/۱۲±۰/۸	g/L	DS (غلظت جامدات خشک)
۷۲±۲	۵۶±۲	%	VS/DS
۳/۶۷±۰/۳	۸/۷۹±۰/۳	g/gDS	آب پیوندی
$(۱۶/۷۴±۰.۵) \times 10^{-12}$	$(۱۳۵/۲۱±۲۰) \times 10^{-12}$	m/kg	SRF (مقاومت ویژه فیلتراسیون)
۷۸±۱۰	۵۱۰±۵۰	S	TTF (مدت زمان فیلتراسیون)
-(۳۲±۳)	-(۳۹±۳)	mV	پتانسیل زتا

جدول ۲. مشخصات شیمیایی نانومونت موریلونیت

درصد	نام ترکیب	درصد	نام ترکیب
۱/۹۷	CaO	۰/۹۸	Na ₂ O
۰/۶۲	TiO ₂	۳/۲۹	MgO
۵/۶۲	Fe ₂ O ₃	۱۹/۶۰	Al ₂ O ₃
۱۵/۴۵	LOI	۵۰/۹۵	SiO ₂
		۰/۸۶	K ₂ O

جدول ۳. مشخصات فیزیکی نانومونت موریلونیت

اندازه	واحد	پارامتر
۱-۲	nm	اندازه ذرات
۲۲۰-۲۷۰	m ² /g	مساحت سطح ویژه
۴۸	meq/100g	ضریب تبادل یونی
۶۰	A°	فاصله خالی بین ذرات
۲-۱	%	رطوبت

روش‌ها

بررسی‌ها تحت شرایط آزمایشگاهی با نمونه‌های لجن واقعی برداشت شده از تصفیه‌خانه فاضلاب جنوب تهران انجام پذیرفت. پارامترهای اصلی مورد بررسی شامل مدت زمان فیلتراسیون، مقاومت ویژه فیلتراسیون، مدت زمان مکش موئینه‌ای، پتانسیل زتا، آب پیوندی و هضم‌پذیری بودند. برای تشخیص ارتباط بین پارامترهای نانومونت‌موریلونیت و اصلاح‌شده آن با شاخص‌های اصلی بحث شامل CST، TTF و SRF، از همبستگی به روش پیرسون بهره‌گیری و در نهایت نقشه حرارتی بین پارامترهای ذکر شده ترسیم گردید. اندازه‌گیری شاخص‌های اصلی بر اساس استاندارد متد و منابع معتبر مربوطه اندازه‌گیری شدند (Rice et al., 2012).

برای اصلاح ساختار و ارتقای عملکردی نانومونت‌موریلونیت، فرآیند فعال‌سازی اسیدی-حرارتی انجام پذیرفت که منجر به تخلخل بیشتر و سطح ویژه بزرگتر گردید، همچنین استخراج یون آلومینیوم میسر شد (Fang et al., 2021). به منظور فعال‌سازی، مخلوط نانومونت‌موریلونیت با نسبت ۱ به ۱۰ با محلول اسید سولفوریک ۲ مولار تحت شرایط هم‌زدن مداوم و رفلاکس، به مدت ۲ ساعت در دمای ۹۵ درجه سانتی‌گراد حرارت داده شد. پس از پایان واکنش، نمونه با آب دیونیزه شسته شده و در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد خشک گردید.

سپس به منظور تثبیت ساختار فعال شده، به مدت ۲ ساعت در دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفت (Mena-Duran et al., 2007). سه شاخص اصلی مدت زمان فیلتراسیون، مدت زمان مکش موئینه‌ای و مقاومت ویژه فیلتراسیون به منظور بررسی قابلیت فیلترپذیری (قابلیت آگیری) لجن مطابق روش یاد شده فوق اندازه‌گیری شدند (Rice et al., 2012) و مورد ارزیابی قرار گرفتند.

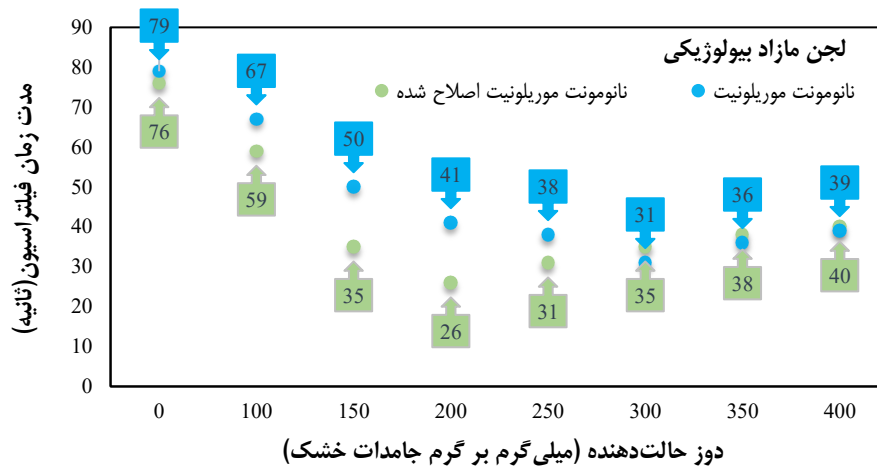
به منظور بررسی تاثیر استفاده از نانومونت‌موریلونیت و نوع اصلاح‌شده آن بر فرایند هضم لجن و تولید بیوگاز، به‌ویژه سهم متان، سه راکتور آزمایشگاهی طراحی و مورد بررسی قرار گرفتند. هر راکتور دارای حجم مفید برابر ۵۰۰ میلی‌لیتر بود. در راکتور اول، لجن اولیه و لجن مازاد بیولوژیکی به نسبت مساوی با یکدیگر مخلوط شده و به راکتور منتقل شدند (شاهد). در راکتور دوم، مخلوطی مشابه از لجن اولیه و لجن مازاد بیولوژیکی تهیه و با پلی‌الکترولیت با مقدار ۵ میلی‌گرم بر گرم جامدات خشک مخلوط گردید. در راکتور سوم نیز از ترکیب برابر لجن اولیه و لجن مازاد بیولوژیکی استفاده شد، اما تغلیظ با نانومونت‌موریلونیت اصلاح‌شده در دوز بهینه (۲۰۰ میلی‌گرم بر گرم جامدات خشک) به‌دست آمده از آزمایش‌های پیشین انجام گرفت. راکتورها به مدت ۱۵ روز در دمای ثابت ۳۵ درجه سانتی‌گراد و تحت شرایط هضم بی‌هوایی در بن‌ماری نگهداری شدند. پس از اتمام دوره آزمایش، حجم بیوگاز تولیدی در هر راکتور اندازه‌گیری گردید. به‌منظور تعیین درصد متان موجود در بیوگاز، نمونه‌ها در کیسه‌های تدارک جمع‌آوری و جهت آنالیز به دستگاه کروماتوگرافی گازی با آشکارساز هدایت حرارتی تزریق شدند.

نمودار همبستگی برای مقایسه بصری ضرایب همبستگی پیرسون بین هر جفت متغیر است که در این پژوهش از آن برای تعیین رابطه پارامترهای مختلف استفاده شد. ضرایب همبستگی قدرت و جهت ارتباط بین متغیرها را توصیف می‌کند. همبستگی پیرسون معیاری از ارتباط خطی بین متغیرهای تصادفی با توزیع نرمال و همبستگی رتبه اسپیرمن رابطه یکنواخت بین متغیرها را توصیف می‌کند (Schober et al., 2018). این نمودار با استفاده از نرم‌افزار پایتون به شکل نقشه حرارتی رسم شد. رنگ سبز در نمودار نمایش‌دهنده همبستگی خطی بسیار بالا (۰/۸ تا ۱) و رنگ قرمز نشان‌دهنده همبستگی خطی منفی بسیار بالا (۰/۸- تا -۱) است. همچنین رنگ‌های مایل به سفید بیانگر همبستگی متوسط مثبت (بین ۰/۳ و ۰/۷) یا منفی (بین ۰/۳- و ۰/۷-) است و رنگ سفید بیانگر عدم وجود رابطه خطی است (EI-Khateeb et al., 2023). همچنین نمودار خطی بین هر پارامتر و دوز حالت‌دهنده برای حالت‌های مختلف رسم شد.

نتایج و بحث

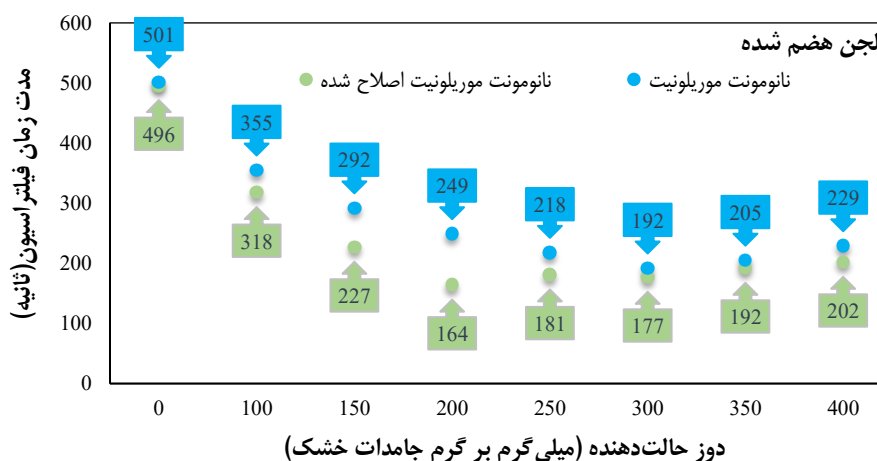
تأثیر استفاده از نانومونت‌موریلونیت و نانومونت‌موریلونیت اصلاح‌شده بر مدت زمان فیلتراسیون

نتایج (شکل ۱) نشان می‌دهند که با افزایش دوز هر دو نوع نانومونت‌موریلونیت تا حدود ۱۵۰ میلی‌گرم بر گرم جامدات خشک، مدت زمان فیلتراسیون به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد که بیانگر بهبود عملکرد فرآیند آگیری است. در عین حال، این کاهش در نمونه حاوی نانومونت‌موریلونیت اصلاح‌شده بیشتر بوده و نشان‌دهنده اثربخشی بیشتر آن در بهبود قابلیت آگیری لجن می‌باشد. در دوز ۲۰۰ میلی‌گرم بر گرم جامدات خشک با ماده نانومونت‌موریلونیت اصلاح‌شده بیشترین کاهش مدت زمان فیلتراسیون حاصل گردید. در صورتی که دستیابی به این نتیجه تنها با استفاده از نانومونت‌موریلونیت در دوز ۳۰۰ میلی‌گرم بر گرم جامدات خشک میسر بود.



شکل ۱. تاثیر دوزهای مختلف نانومونت موریلونیت و نانومونت موریلونیت اصلاح شده بر مدت زمان فیلتراسیون لجن مازاد بیولوژیکی

بررسی شکل ۲ نشان می‌دهد که افزودن نانومونت موریلونیت و نانومونت موریلونیت اصلاح شده به لجن هضم شده بی‌هوازی، نقش مؤثری بر کاهش مدت زمان فیلتراسیون ایفا می‌کند. با افزایش دوز این نانومواد تا حدود ۲۰۰ میلی گرم بر گرم جامدات خشک، کاهش چشمگیری در مدت زمان فیلتراسیون مشاهده گردید. نانومونت موریلونیت اصلاح شده در تمامی دوزها عملکرد مطلوب تری از خود نشان داد و موجب کاهش بیشتر مدت زمان فیلتراسیون شده است. با این حال، در دوزهای بالاتر از ۲۰۰ میلی گرم بر گرم جامدات خشک با نانوماده اصلاح شده، روند بهبود متوقف گردیده است. در همین حال، بیشترین کاهش در مدت زمان فیلتراسیون با استفاده از نانومونت موریلونیت در دوز ۳۰۰ میلی گرم بر گرم جامدات خشک حاصل گردید.

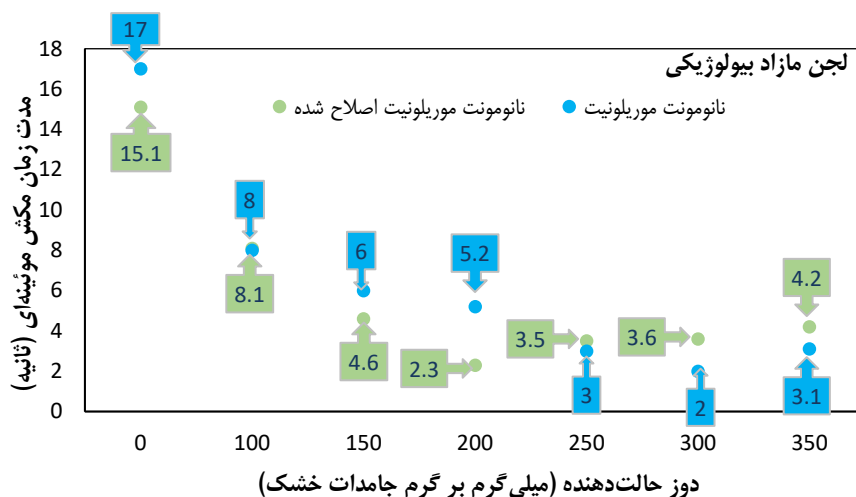


شکل ۲. تاثیر دوزهای مختلف نانومونت موریلونیت و نانومونت موریلونیت اصلاح شده بر مدت زمان فیلتراسیون لجن هضم شده بیولوژیکی

تاثیر استفاده از نانومونت موریلونیت و نانومونت موریلونیت اصلاح شده بر مدت زمان مکش موئینه‌ای

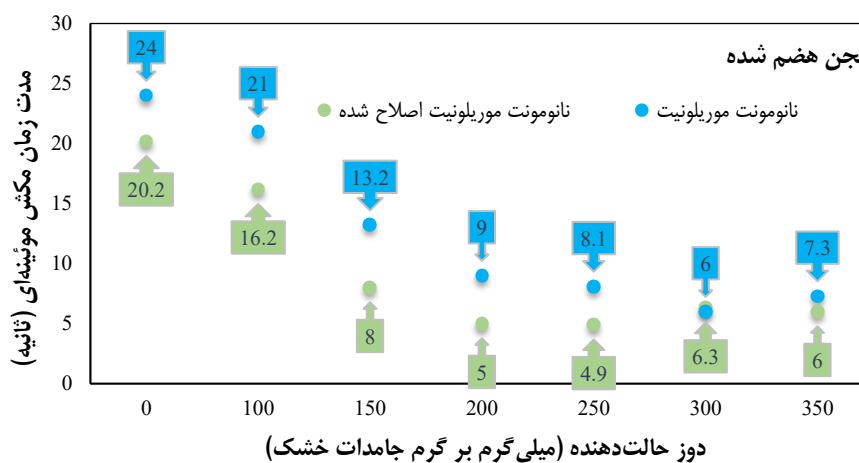
بر اساس داده‌های ارائه شده در شکل ۳ می‌توان گفت که افزایش دوز نانومونت موریلونیت و نانومونت موریلونیت اصلاح شده به طور قابل توجهی موجب کاهش مدت زمان مکش موئینه‌ای لجن مازاد بیولوژیکی می‌گردد. در دوزهای پایین (تا حدود ۲۰۰ میلی گرم بر گرم

جامدات خشک)، هر دو نوع نانوماده باعث افت چشمگیر زمان فیلترپذیری می‌شوند، اما نانومونت‌موریلونیت اصلاح‌شده در اکثر نقاط، عملکرد بهتری نسبت به نوع طبیعی از خود نشان داده است. با توجه به فرآیند تغلیظ با نانومونت‌موریلونیت طبیعی کاهش بیشتر زمان موئینه‌ای در دوز بالاتر (۳۰۰ میلی‌گرم بر گرم جامدات خشک) حاصل گردید.



شکل ۳. تاثیر دوزهای مختلف نانومونت‌موریلونیت و نانومونت‌موریلونیت اصلاح‌شده بر مدت زمان مکش موئینه‌ای لجن مازاد بیولوژیکی

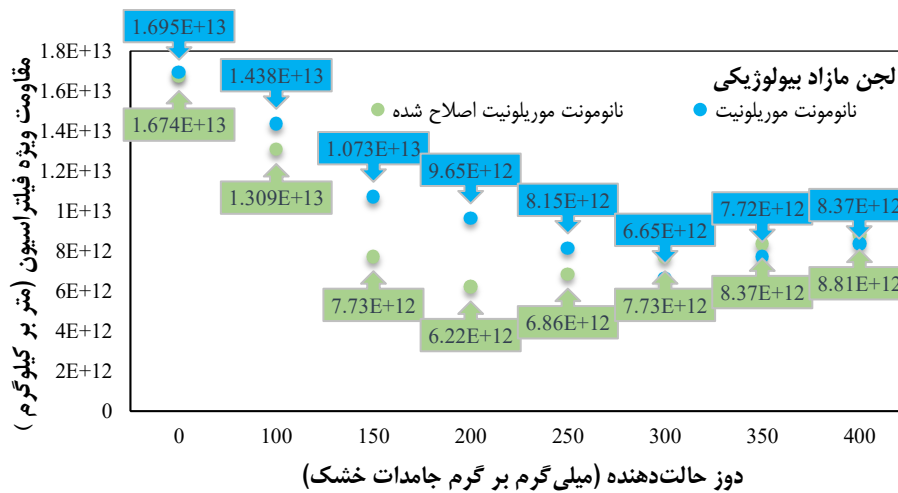
شکل ۴ نشان‌دهنده تغییرات مدت زمان مکش موئینه‌ای لجن هضم‌شده در دوزهای مختلف نانومونت‌موریلونیت و نانومونت‌موریلونیت اصلاح‌شده است. همان‌طور که در نمودار مشخص است، با افزایش دوز هر دو نوع نانومونت‌موریلونیت تا حدود ۱۵۰ میلی‌گرم بر گرم جامدات خشک، مدت زمان مکش موئینه‌ای به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد. همچنین، نانومونت‌موریلونیت اصلاح‌شده در تمامی دوزها در مقایسه، عملکرد بهتری داشته است. بر اساس نتایج حاصل می‌توان در نهایت گفت که استفاده از نانومونت‌موریلونیت اصلاح‌شده تا دوز بهینه (۲۰۰ میلی‌گرم بر گرم جامدات خشک) به طور مؤثری مدت زمان مکش موئینه‌ای لجن هضم‌شده بی‌هوازی را کاهش داده و فرآیند آب‌گیری را بهبود می‌بخشد.



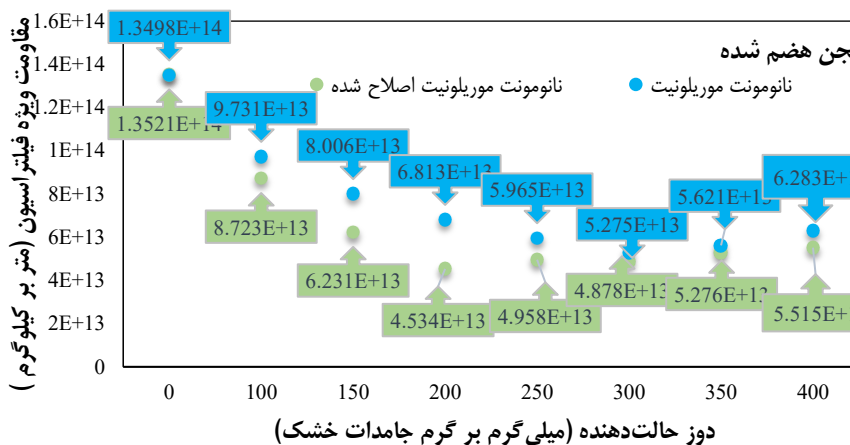
شکل ۴. تاثیر دوزهای مختلف نانومونت‌موریلونیت و نانومونت‌موریلونیت اصلاح‌شده بر مدت زمان مکش موئینه‌ای در لجن هضم‌شده بی‌هوازی

تأثیر استفاده از نانومونت موریلونیت و نانومونت موریلونیت اصلاح شده بر مقاومت ویژه فیلتراسیون

تأثیر استفاده از نانومونت موریلونیت و نوع اصلاح شده آن بر مقاومت ویژه فیلتراسیون لجن مازاد بیولوژیکی و لجن هضم شده بی‌هواری در شکل‌های ۵ و ۶ نشان داده شده است. با توجه به نتایج ارائه شده در شکل ۵، با افزایش مقدار نانومونت موریلونیت اصلاح شده به ۲۰۰ میلی‌گرم بر گرم جامدات خشک در لجن مازاد بیولوژیکی، مقدار مقاومت ویژه فیلتراسیون به پایین‌ترین میزان برابر با $۶/۲ \times 10^{12}$ خود رسیده است. در همین دوز نانومونت موریلونیت اصلاح شده با توجه به شکل ۶، میزان مقاومت ویژه فیلتراسیون در لجن هضم شده به $۴۵/۳ \times 10^{12}$ متر بر کیلوگرم حاصل گردیده است. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که اصلاح اسیدی-حرارتی نانومونت موریلونیت موجب کاهش مؤثرتر مقاومت ویژه فیلتراسیون در دوزهای پایین‌تر می‌شود. عملکرد بهتر نوع اصلاح شده را می‌توان به حضور SiO_2 در ساختار آن و آزاد شدن یون‌های سیلیس در شرایط اسیدی نسبت داد. SiO_2 به‌عنوان کمک منعقدکننده عمل کرده و کارایی انعقاد و لخته‌سازی یون‌های فلزی مثبت را افزایش می‌دهد، که در نهایت منجر به بهبود حالت‌دهی (آمایش) و آبگیری لجن می‌گردد. همچنین، SiO_2 نقش هسته‌زایی برای تشکیل لخته‌های بزرگتر و متراکم‌تر ایفا می‌کند (Zhang et al., 2017).



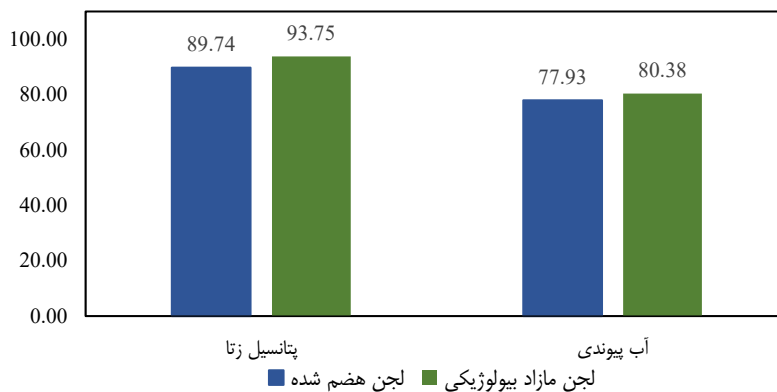
شکل ۵. تأثیر دوزهای مختلف نانومونت موریلونیت و نانومونت موریلونیت اصلاح شده بر مقاومت ویژه فیلتراسیون در لجن مازاد بیولوژیکی



شکل ۶. تأثیر دوزهای مختلف نانومونت موریلونیت و نانومونت موریلونیت اصلاح شده بر مقاومت ویژه فیلتراسیون در لجن هضم شده

تأثیر نانومونت موریلونیت اصلاح‌شده بر پتانسیل زتا و آب پیوندی

کاهش پتانسیل زتا و آب پیوندی، دو عامل کلیدی در بهبود عملکرد فرآیند حالت‌دهی (آمایش) و افزایش کارایی آبگیری لجن محسوب می‌شوند (Zhu et al., 2024). در شکل ۷، اثر دوز بهینه نانومونت موریلونیت اصلاح‌شده بر درصد کاهش پتانسیل زتا و آب پیوندی لجن مازاد بیولوژیکی و هضم‌شده بررسی شده است. نتایج نشان داد که این نانوماده توانست پتانسیل زتا و آب پیوندی را در لجن مازاد بیولوژیکی به ترتیب تا ۹۳/۷۵ درصد و ۸۰/۳۸ درصد و در لجن هضم‌شده ۸۹/۷۴ درصد و ۷۷/۹۳ درصد کاهش دهد. در بخش دیگری از تحقیق توسط همین محققین مشخص گردید که کاهش پتانسیل زتای منفی در لایه مواد پلیمری برون سلولی پیوندی محکم و کاهش آب پیوندی در مواد پلیمری برون سلولی پیوندی سست نشانه فروپاشی ساختار مواد پلیمری برون سلولی و آزاد شدن آب است. میزان کل کربن آلی در بخش مواد پلیمری برون سلولی محلول، پیوندی سست و پیوندی محکم پس از حالت‌دهی با نانومونت موریلونیت اصلاح‌شده کاهش چشمگیری داشت که ارتباط مستقیم با کاهش آب پیوندی دارد. میزان پلی‌ساکارید در بخش محلول در حضور نانومونت موریلونیت اصلاح‌شده افزایش نشان داد. کاهش پروتئین در مواد پلیمری به دلیل برهم‌کنش‌های فیزیکی بین نانوذرات و سلول‌ها اتفاق افتاد که منجر به جذب و مهار ترشح مواد پلیمری برون سلولی می‌شود. به‌طور خاص، نانوذرات اکسید آلومینیوم با بار مثبت به سطح سلول‌های دارای بار منفی چسبیده و باعث فشردگی لایه دوگانه الکتریکی و جذب پروتئین‌ها به صورت پیوندی می‌شوند. این فرآیند سبب کاهش پروتئین در بخش محلول و افزایش آن در مواد پلیمری برون سلولی پیوندی سست و محکم می‌گردد.



شکل ۷. اثر دوز بهینه نانومونت موریلونیت اصلاح‌شده بر درصد کاهش پتانسیل زتا و آب پیوندی لجن مازاد بیولوژیکی و لجن هضم‌شده بی‌هوازی

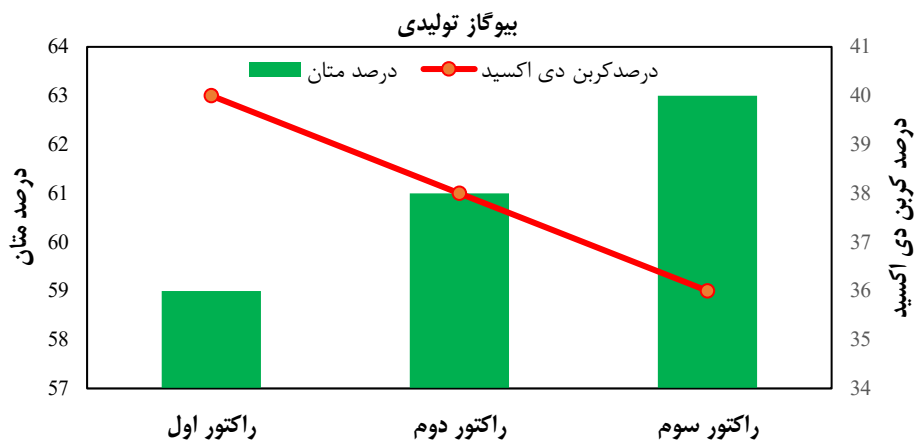
جدول ۴. درصد کاهش شاخص‌های اصلی آبگیری لجن با ماده آمایش‌دهنده نانو مونت موریلونیت و اصلاح‌شده آن

لجن هضم شده			لجن مازاد بیولوژیکی			شاخص‌های اصلی آبگیری لجن
SRF	CST	TTF	SRF	CST	TTF	
۶۰/۹	۷۵	۶۱/۷	۶۰/۸	۸۸/۲	۶۰/۸	ماده آمایش‌دهنده
۶۶/۵	۷۵/۲	۶۶/۹	۶۲/۸	۸۴/۸	۶۵/۸	نانو مونت موریلونیت
						نانو مونت موریلونیت اصلاح‌شده

تأثیر استفاده از نانومونت موریلونیت و اصلاح‌شده آن بر تولید متان در هضم بی‌هوازی

افزودن نانومواد، به‌ویژه نانورس‌هایی نظیر نانومونت موریلونیت و گونه‌های اصلاح‌شده آن، به عنوان رویکردی مؤثر برای بهبود فرآیند هضم بی‌هوازی و افزایش بازده تولید متان مطرح است. ساختار لایه‌ای مونت موریلونیت، قابلیت تبادل یونی بالا و سطح ویژه قابل توجه،

شرایطی مناسب برای جذب مواد سمی، بهبود تعادل میکروبی و ارتقای فعالیت‌های آنزیمی فراهم می‌کند. نتایج به دست آمده نشان داد که کاربرد نانومونت موریلونیت اصلاح‌شده ضمن بهبود ارتقا و پایداری فرآیند، کارآمدی تولید متان را به‌طور معناداری افزایش می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، بیشترین میزان متان تولیدی و کمترین میزان دی‌اکسیدکربن در راکتور شماره ۳ توسط دوز بهینه نانومونت موریلونیت اصلاح‌شده حاصل گردیده است.



شکل ۸. تاثیر حالت‌دهنده‌های مختلف بر درصد متان در بیوگاز تولیدی

بررسی ارتباط بین شاخص‌ها

بررسی تاثیر آمایش‌دهنده‌ها بر مدت زمان فیلتراسیون، مدت زمان مکش موئینه‌ای، مقاومت ویژه فیلتراسیون

استفاده از نانومونت موریلونیت اصلاح‌شده عملکرد بهتری نسبت به نوع معمولی آن در کاهش زمان تغلیظ نهایی لجن داشت. نانومونت موریلونیت اصلاح‌شده در دوز ۲۰۰ میلی‌گرم بر گرم ماده خشک، کاهش بالای ۶۵ درصد در زمان تغلیظ نهایی ایجاد کرد، در حالی که استفاده از نوع نانوماده اصلاح‌نشده در دوز بالاتر، یعنی ۳۰۰ میلی‌گرم بر گرم، باعث ۶۰ درصد کاهش گردید. همچنین مشاهده شد که افزودن هر دو نوع حالت‌دهنده (آمایش‌دهنده) به لجن مازاد بیولوژیکی و لجن هضم‌شده، اثر مشابهی بر زمان تغلیظ نهایی دارد. با افزایش دوز، ابتدا کاهش در این زمان مشاهده شد، اما پس از رسیدن به دوز بهینه، روند مجدداً افزایشی گردید.

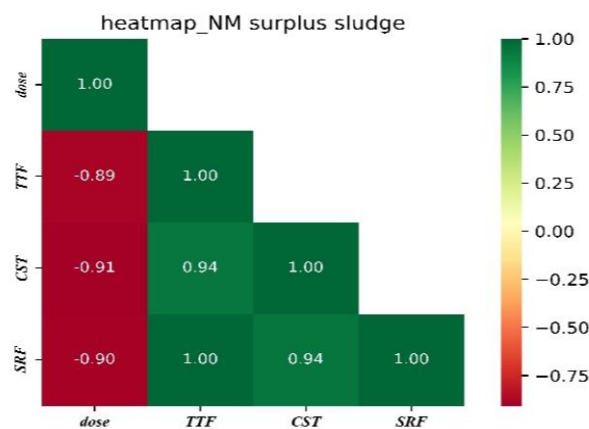
در بررسی زمان مکش موئینه‌ای نانومونت موریلونیت و اصلاح‌شده آن عملکرد نزدیکی داشتند. کاهش این شاخص در لجن مازاد بیولوژیکی بیشتر از لجن هضم‌شده بود. کمترین مقدار مدت زمان مکش موئینه‌ای با استفاده از نانومونت موریلونیت اصلاح‌شده در دوزهای ۲۰۰ میلی‌گرم بر گرم و با نوع اصلاح‌نشده آن در دوز ۳۰۰ میلی‌گرم بر گرم به دست آمد. به‌طور کلی، نانومونت موریلونیت اصلاح‌شده توانست این پارامتر را بین ۷۵ تا ۸۵ درصد کاهش دهد و نوع نانوماده اصلاح‌نشده، کاهش ۷۵ تا ۸۸ درصدی ایجاد کرد که نسبت به اصلاح‌شده کمی موثرتر عمل کرد. در کاهش مقاومت ویژه در برابر فیلتراسیون نیز نانومونت موریلونیت اصلاح‌شده در دوز ۲۰۰ میلی‌گرم بر گرم کمی مؤثرتر از نوع نانو ماده اصلاح‌نشده آن در دوز ۳۰۰ میلی‌گرم بر گرم عمل کرد. همچنین، افزودن حالت‌دهنده‌ها (آمایش‌دهنده‌ها) در ابتدا باعث کاهش این مقاومت شد، اما استفاده از دوزهای بیش از حد موجب افزایش دوباره آن گردید.

بررسی همبستگی شاخص‌های مدت زمان فیلتراسیون، مدت زمان مکش موئینه‌ای و مقاومت ویژه فیلتراسیون

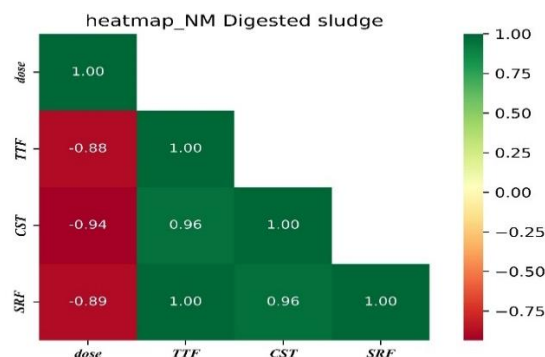
به‌منظور بررسی روابط میان متغیرها، نمودارهای همبستگی بر پایه ضرایب همبستگی پیرسون برای پارامترهای مدت زمان فیلتراسیون، مدت زمان مکش موئینه‌ای و مقاومت ویژه فیلتراسیون در ارتباط با دوز حالت‌دهنده (آمایش‌دهنده) رسم گردید. این نمودارها به تفکیک نوع لجن و نوع حالت‌دهنده (آمایش‌دهنده) تهیه شدند. با توجه به شکل‌های ۹ تا ۱۲ نتایج حاصل از تحلیل این نمودارها نشان داد که سه پارامتر اصلی مورد بررسی، یعنی مدت زمان فیلتراسیون، مدت زمان مکش موئینه‌ای و مقاومت ویژه فیلتراسیون، در تمامی نمونه‌ها دارای

همبستگی بسیار قوی با یکدیگر بودند؛ به گونه‌ای که ضرایب همبستگی بین آنها در محدوده ۰/۹۷ تا ۰/۹۸ قرار داشت. این میزان همبستگی بالا بیانگر رفتار هماهنگ این شاخص‌ها در فرآیند آبیگری از لجن است. همچنین، در تمامی نمونه‌ها، ضرایب همبستگی بین پارامترها و دوز حالت‌دهنده (آمایش‌دهنده) منفی بود که نشان‌دهنده وجود رابطه معکوس خطی میان آنها می‌باشد.

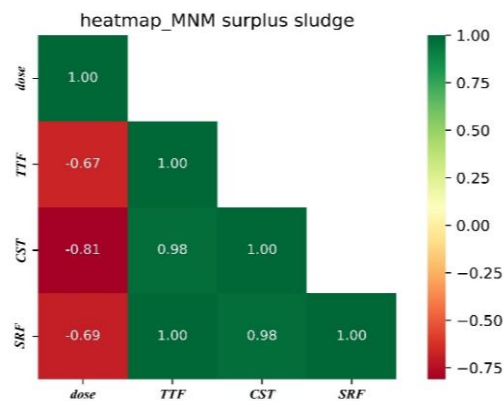
شکل ۱۰ نشان می‌دهد که بیشترین میزان همبستگی منفی بین پارامترها و دوز حالت‌دهنده (آمایش‌دهنده) در نمونه لجن هضم‌شده حالت‌دهی شده با نانومونت‌موریلونیت می‌باشد، که حاکی از تأثیر خطی بیشتر این نوع حالت‌دهنده (آمایش‌دهنده) در بهبود شاخص‌های آبیگری در این نمونه است. تحلیل ترکیبی نمودارهای همبستگی و روندهای خطی نیز نشان داد که رابطه منفی معناداری میان دوز حالت‌دهنده (آمایش‌دهنده) و پارامترهای مورد بررسی وجود دارد. این رابطه در نمونه‌های مورد آزمایش قرار گرفته با مونت‌موریلونیت خام خطی‌تر بوده است، چرا که نقطه بهینه در دوزهای بالاتر رخ داده، در حالی که در نمونه‌های مورد آزمایش با نانومونت‌موریلونیت اصلاح‌شده، نقطه بهینه در دوزهای میانی حاصل شده و در نتیجه شدت همبستگی خطی کاهش یافته است. همان‌گونه که در شکل ۱۱ مشخص است، در نمونه لجن مازاد بیولوژیکی حالت‌دهی شده با نانومونت‌موریلونیت اصلاح‌شده، ضرایب همبستگی بین ۰/۶۷- تا ۰/۸۱- به دست آمد که نسبت به سایر نمونه‌ها ضعیف‌تر بوده و بیانگر یک همبستگی منفی متوسط است. در مقایسه بین پارامترها، مدت زمان مکش موئینه‌ای بیشترین همبستگی منفی با دوز حالت‌دهنده (آمایش‌دهنده) را در همه نمونه‌ها نشان داد، و پس از آن به ترتیب مقاومت ویژه فیلتراسیون و مدت زمان فیلتراسیون قرار گرفتند. همچنین مشخص شد که رفتار مقاومت ویژه فیلتراسیون و مدت زمان فیلتراسیون بسیار به یکدیگر نزدیک و مشابه است.



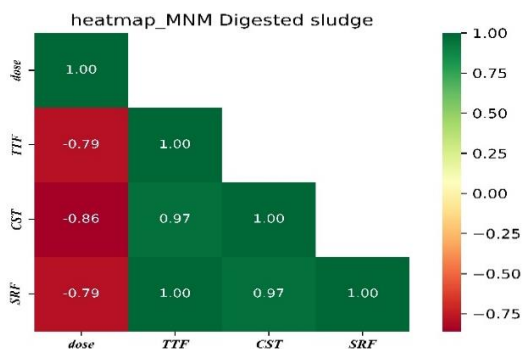
شکل ۹. همبستگی پارامترهای TTF و CST و SRF و دوز حالت‌دهنده نانومونت‌موریلونیت در لجن مازاد بیولوژیکی



شکل ۱۰. همبستگی پارامترهای TTF و CST و SRF و دوز حالت‌دهنده مونت‌موریلونیت در لجن هضم‌شده



شکل ۱۱. همبستگی پارامترهای TTF و CST و SRF و دوز حالت‌دهنده مونت‌موریلونیت اصلاح‌شده در لجن مازاد بیولوژیکی



شکل ۱۲. همبستگی پارامترهای TTF و CST و SRF و دوز حالت‌دهنده مونت‌موریلونیت اصلاح‌شده در لجن هضم‌شده

نتیجه‌گیری

تغلیظ، هضم و آب‌گیری لجن، فرآیندهای متعارف کلیدی در مدیریت لجن در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب به روش لجن فعال به‌شمار می‌روند. در سال‌های اخیر، با توجه به چالش‌های زیست‌محیطی و هزینه‌های مرتبط با پلی‌الکترولیت‌های سنتتیک کاتیونی مصرفی که معمولاً برای حالت‌دهی لجن به‌کار می‌روند، تلاش‌های گسترده‌ای برای شناسایی و به‌کارگیری جایگزین‌های طبیعی، پایدار و کارآمد صورت گرفته است. پژوهش حاضر با هدف بررسی اثربخشی استفاده از مونت‌موریلونیت معدنی در مقیاس نانو و نوع اصلاح‌شده اسیدی-حرارتی آن به عنوان جایگزینی بالقوه برای پلی‌الکترولیت‌های یادشده انجام پذیرفت. نتایج حاصل از این بررسی نشان داد که استفاده از نانوذره مونت‌موریلونیت و نوع اصلاح‌شده اسیدی-حرارتی آن از کارآمدی لازم از نظر تاثیرگذاری بر شاخص‌های کلیدی مرتبط با آب‌گیری و هضم لجن برخوردار هستند. در این پژوهش میزان کاهش TTF، CST و SRF برای لجن مازاد بیولوژیکی و لجن هضم‌شده توسط نانومونت‌موریلونیت و اصلاح‌شده اسیدی-حرارتی آن به ترتیب ۶۱ تا ۶۷ درصد کاهش، ۷۵ تا ۸۸ درصد کاهش و ۶۱ تا ۶۶ درصد کاهش نشان داد. هر دو گزینه مورد بررسی با وجود میزان مصرفی متفاوت، از کارآمدی خوبی برخوردار بوده و از همبستگی قوی سه پارامتر مدت زمان فیلتراسیون، مدت زمان مکش موئینه‌ای و مقاومت ویژه فیلتراسیون می‌توان به عنوان شاخص‌های موثر در ارزیابی عملکرد استفاده کرد. از سوی دیگر، اثربخشی آن در مقیاس آزمایشگاهی، زمینه را برای بررسی‌های بیشتر در مقیاس نیمه‌صنعتی و نهایتاً صنعتی‌سازی فراهم می‌سازد. در مجموع، یافته‌های این تحقیق نشان می‌دهند که استفاده از مونت‌موریلونیت طبیعی و اصلاح‌شده آن، رویکردی نوآورانه و امیدوارکننده در جهت بهبود فرآیندهای حالت‌دهی، تغلیظ، هضم بی‌هوازی و آب‌گیری لجن است.

پیشنهادها

با توجه به نتایج مثبت و امیدوارکننده حاصل از این تحقیق، لازم است بررسی‌های مرتبط حداقل میان مدت (بازه زمانی حدوداً تا ۳ سال) در مقیاس نیمه صنعتی و صنعتی برای شناسایی شرایط مختلف راهبری تاسیسات و تاثیر آنها بر محدوده تاب‌آوری این راهکار ادامه یابند. بررسی‌های تکمیلی در خصوص مشخصات مواد و تغییرات در بافت لجن‌ها و تاثیرگذاری آن بر آبیگری‌پذیری و هضم‌پذیری آنها پیشنهاد می‌گردد. روش‌های دیگر اصلاح مونت‌موریلونیت و اثربخشی آنها، همچنین ارزیابی هدفمند به‌کارگیری این روش در چارچوب اهداف بازیابی و استفاده مجدد از فاضلاب الزامی است. بررسی مقایسه‌ای این روش با راهکارهای استفاده از مواد رسی دیگر یا پسماندهای کشاورزی و صنعتی، امکان دستیابی به کارآمدترین نقشه راه در این خصوص را فراهم می‌سازد. تبعات ناشی از به‌کارگیری این روش در مهندسی مجدد تاسیسات و صنعت پشتیبانی لازم در کنار بررسی اقتصادی جایگزینی این راهکار در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب در مقایسه با راهکارهای کنونی (استفاده از مواد شیمیایی سنتتیک) یا استفاده ترکیبی آنها نیز از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

ملاحظات اخلاقی

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش علمی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید همه آنهاست.

مشارکت نویسندگان

سیدعلی سادات حسینی: تهیه و آماده‌سازی نمونه‌ها، انجام آزمایش و گردآوری داده‌ها، تجزیه و تحلیل آماری و نرم‌افزاری داده‌ها، تحلیل و تفسیر اطلاعات و نتایج، تهیه پیش نویس مقاله
گایک بدلیانس قلی‌کندی: استاد راهنمای رساله، طراحی پژوهش، نظارت بر مراحل انجام پژوهش، بررسی، تحلیل و تفسیر و کنترل نتایج، اصلاح، بازبینی و نهایی‌سازی مقاله

تعارض منافع

بنابر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

حامی مالی

مقاله حاضر با حمایت مالی معاونت پژوهشی دانشگاه شهید بهشتی (پژوهانه استاد راهنما) انجام شد.

سپاسگزاری

از معاونت محترم پژوهشی دانشگاه شهید بهشتی و دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط‌زیست به خاطر حمایت مالی و معنوی در اجرای پژوهش حاضر سپاسگزاری می‌شود. از داوران محترم نیز به خاطر ارائه نظرهای ساختاری و علمی سپاسگزاری می‌گردد.

References

- Addai-Mensah, J. (2007). Enhanced flocculation and dewatering of clay mineral dispersions. *Powder Technology*, 179(1), 73-78. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2006.11.008>
- Alvarenga, E., Hayrapetyan, S., Govasmark, E., Hayrapetyan, L., & Salbu, B. (2015). Study of the flocculation of anaerobically digested residue and filtration properties of bentonite based mineral conditioners. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 3(2), 1399-1407.
- Bratby, J. (2016). *Coagulation and flocculation in water and wastewater treatment*. IWA publishing.
- Cainglet, A., Kujala, K., Liimatainen, M., Prokkola, H., Piippo, S., Postila, H., Ronkanen, A.-K., & Heiderscheidt, E. (2023). The influence of coagulant type on the biological treatment of sewage sludge. *Science of The Total Environment*, 869, 161706. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.161706>
- Dereli, R. K., Wang, X., van der Zee, F. P., & van Lier, J. B. (2018). Biological performance and sludge filterability of anaerobic membrane bioreactors under nitrogen limited and supplied conditions. *Water Research*, 137, 164-172. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.03.015>
- Du, Y., Cao, B., Zhang, W., Yang, P., Xu, Q., Wang, D., & Shen, X. (2017). Improvement of wastewater sludge dewatering properties using polymeric aluminum-silicon complex flocculants conditioning: Importance of aluminum/silicon ratio. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 530, 134-145.
- El-Khateeb, M., Hassan, G. K., El-Liethy, M. A., El-Khatib, K. M., Abdel-Shafy, H. I., Hu, A., & Gad, M. (2023). Sustainable municipal wastewater treatment using an innovative integrated compact unit: microbial communities, parasite removal, and techno-economic analysis. *Annals of Microbiology*, 73(1), 35. <https://doi.org/10.1186/s13213-023-012-739>
- Fang, Z., Suhua, H., Xu, L., Jian, F., Qi, L., Zhiwei, W., Chuanchang, L., & Yuanlai, X. (2021). Adsorption kinetics and thermodynamics of rare earth on Montmorillonite modified by sulfuric acid. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 627, 127063.
- Foo, C. T., Mahmood, C. S., & Mohd Salleh, M. A. (2011). The study of aluminum loss and consequent phase transformation in heat-treated acid-leached kaolin. *Materials Characterization*, 62(4), 373-377. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2011.01.017>
- Geng, Y.-K., & Zhou, Y. (2022). Reduction of refractory Maillard reaction products by Fe³⁺ during thermal hydrolysis pretreatment and enhanced sludge biodegradability. *Journal of Hazardous Materials*, 430, 128400. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.128400>
- Ghaffour, N., & Qamar, A. (2020). Membrane fouling quantification by specific cake resistance and flux enhancement using helical cleaners. *Separation and Purification Technology*, 239, 116587. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.116587>
- Guo, Z., Ma, L., Dai, Q., Yang, J., Ao, R., & Wang, L. (2019). Dewatering performance of sewage sludge under pretreatment with modified corn-core powder. *Science of The Total Environment*, 684, 402-412. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05366>
- Kazemi, M., & Badalians Gholikandi, G. (2023). Digested wastewater sludge dewatering process using water treatment plants chemical sludge and walnut shell activated carbon powder. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 25(2), 1096-1107. <https://doi.org/10.1007/s10163-023-01596-w>
- Kinoti, I. K., Karanja, E. M., Nthiga, E. W., M'thuraine, C. M., & Marangu, J. M. (2022). Review of Clay-Based Nanocomposites as Adsorbents for the Removal of Heavy Metals. *Journal of Chemistry*, 2022(1), 7504626. <https://doi.org/https://doi.org/10.1155/2022/7504626>
- Kurniawan, S. B., Abdullah, S. R. S., Imron, M. F., Said, N. S. M., Ismail, N. I., Hasan, H. A., Othman, A. R., & Purwanti, I. F. (2020). Challenges and opportunities of biocoagulant/bioflocculant application for drinking water and wastewater treatment and its potential for sludge recovery. *International journal of environmental research and public health*, 17(24), 9312. <https://doi.org/10.3390/ijerph17249312>
- Lin, L., Li, R.-H., Yang, Z.-Y., & Li, X.-Y. (2017). Effect of coagulant on acidogenic fermentation of sludge from enhanced primary sedimentation for resource recovery: Comparison between FeCl₃ and PACl. *Chemical Engineering Journal*, 325, 681-689. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.05.130>
- Liu, M., Liu, X., Wang, W., Guo, J., Zhang, L., & Zhang, H. (2018). Effect of SiO₂ and Al₂O₃ on characteristics of lightweight aggregate made from sewage sludge and river sediment. *Ceramics International*, 44(4), 4313-4319. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.12.022>

- Ma, W., Zhao, L., Liu, H., Liu, Q., & Ma, J. (2017). Improvement of sludge dewaterability with modified cinder via affecting EPS. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 11(6), 19. <https://doi.org/10.1007/s11783-017-0967-x>
- Masihi, H., & 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>
- Masihi, H., & Badalians Gholikandi, G. (2021). Using thermal-acidic-modified kaolin as a physical-chemical conditioner for waste activated sludge dewatering. *Chemical Engineering Journal*, 412, 128664. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.128664>
- Mena-Duran, C. J., Sun Kou, M. R., Lopez, T., Azamar-Barrios, J. A., Aguilar, D. H., Domínguez, M. I., Odriozola, J. A., & Quintana, P. (2007). Nitrate removal using natural clays modified by acid thermoactivation. *Applied Surface Science*, 253(13), 5762-5766. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2006.12.103>
- Muangrak, W., Thouchprasitchai, N., Phongboonchoo, Y., & Pongstabodee, S. (2020). Dual Functional Composite of Montmorillonite-Rich/Chitosan (MCC) for Decolorizing the Water Used in Joss Paper Process: Thermodynamic, Isotherm, and Kinetic Studies. *Applied Sciences*, 10(21), 7493. <https://doi.org/10.3390/app10217493>
- Rice, E. W., Baird, R. B., Eaton, A. D., & Clesceri, L. S. (2012). Standard methods for the examination of water and wastewater.
- Sahinkaya, E., Yurtsever, A., Isler, E., Coban, I., & Aktaş, Ö. (2018). Sulfate reduction and filtration performances of an anaerobic membrane bioreactor (AnMBR). *Chemical Engineering Journal*, 349, 47-55. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.05.001>
- Sanchis-Perucho, P., Torres, K. M. M., Ferrer, J., & Robles, Á. (2023). Evaluating the potential of off-line methodologies to determine sludge filterability from different municipal wastewater treatment systems. *Chemical Engineering Journal*, 468, 143537. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.143537>
- Sarkar, A., Mushahary, N., Basumatary, F., Das, B., Basumatary, S. F., Venkatesan, K., Selvaraj, M., Rokhum, S. L., & Basumatary, S. (2024). Efficiency of montmorillonite-based materials as adsorbents in dye removal for wastewater treatment. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 1. 112519., (3)2. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.112519>
- Schober, P., Boer, C., & Schwarte, L. A. (2018). Correlation coefficients: appropriate use and interpretation. *Anesthesia & analgesia*, 126(5), 1763-1768. <https://doi.org/10.1213/ANE.0000000000002864>
- Wang, F., He, Z.-W., Tang, C.-C., Zhou, A.-J., Liu, W., Ren, Y.-X., Li, Z., & Wang, A. (2024). Aluminum chloride enhances the production of short-chain fatty acids from waste activated sludge: Insights to performance, mechanism, and implications. *Journal of Water Process Engineering*, 57, 104668. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.104668>
- Wang, P., Shen, X., Qiu, S., Zhang, L., Ma, Y., & Liang, J. (2024). Clay-Based Materials for Heavy Metals Adsorption: Mechanisms, Advancements, and Future Prospects in Environmental Remediation. *Crystals*, 14(12), 1046. <https://www.mdpi.com/2073-4352/14/12/1046>
- Wei, H., Gao, B., Ren, J., Li, A., & Yang, H. (2018). Coagulation/flocculation in dewatering of sludge: A review. *Water Research*, 143, 608-631. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.07.029>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.11.100>
- Wójcik, M., & Stachowicz, F. (2019). Influence of physical, chemical and dual sewage sludge conditioning methods on the dewatering efficiency. *Powder Technology*, 344, 96-102. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.12.001>
- Wu, Y., Zhang, P., Zhang, H., Zeng, G., Liu, J., Ye, J., Fang, W., & Gou, X. (2016). Possibility of sludge conditioning and dewatering with rice husk biochar modified by ferric chloride. *Bioresource Technology*, 205, 258-263. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.01.020>
- Xu, M., Wang, J., & Wu, J. (2024). Recent advances of silicate materials for wastewater treatment: a review. *Materials Research Express*. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ad2c63>
- Yang, Q., Zhao, Y., Zhang, Q., Wang, J., Xu, B., Zhang, X., Xiong, H., Zhou, H., & Xiao, R. (2025). Structural characterization of modified straw combined with CPAM conditioned sludge filter cake and analysis of its structure-performance relationship with sludge dewatering performance. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 13(1), 115266. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.115266>
- Yu, W., Yang, J., Shi, Y., Song, J., Shi, Y., Xiao, J., Li, C., Xu, X., He, S., Liang, S., Wu, X., & Hu, J. (2016). Roles of iron species and pH optimization on sewage sludge conditioning with Fenton's reagent and lime. *Water Research*, 95, 124-133. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.03.016>

- Zhang, J., Yue, Q., Xia, C., Yang, K., Zhao, P., Gao, B., & Yu, H. (2017). The study of Na₂SiO₃ 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>
- Zhang, X., Kang, H., Zhang, Q., Hao, X., Han, X., Zhang, W., & Jiao, T. (2019). The porous structure effects of skeleton builders in sustainable sludge dewatering process. *Journal of Environmental Management*, 230, 14-20. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.09.049>
- Zhang, Y., Gong, L., Jiang, Q., Cui, M.-H., Zhang, J., & Liu, H. (2020). In-situ CO₂ sequestration and nutrients removal in an anaerobic digestion-microbial electrolysis cell by silicates application: Effect of dosage and biogas circulation. *Chemical Engineering Journal*, 399, 125680. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.125680>