Journal of Water & Wastewater Science & Engineering (jwwse)
Summer 2017, Vol. 2, No. 2.
DOI:10.22112/jwwse.2018.87676.1009

علوم و مهندسی آب و فاضلاب

نشریه علوم و مهندسی آب و فاضلاب
سال دوم، شماره ۲، تابستان ۱۳۹۶

Investigating and Proposing a Proper Treatment System for Washing Machine Wastewater

Mohammad Hossein Sarrafzadeh[1*], Narges Shirouei[2] and Omid Tavakoli[3]
1- Unesco Chair on Water Reuse and Associate Professor, School of Chemical Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.
2- MSc., School of Chemical Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.
3- Assistant Professor, School of Chemical Engineering, College of Engineering, University of Tehran and Head of the Strategic Technologies Center, Iran Vice President on Scientific Affaire, Tehran, Iran.
* Corresponing Author, Email: sarrafzdh@ut.ac.ir

Received: 5/6/2017
Revised: 21/10/2017
Accepted: 22/10/2017

Abstract

Purification and recycling of greywater, as an unconventional source, is considered among appropriate solutions for the increasing demand of fresh water and for dealing with water crisis. In this study, physic-chemical treatment system (coagulation, flocculation and sedimentation) was used for treating and recycling of washing machine greywater. At the beginning, to determine the appropriate type and concentration of coagulants, jar test was performed using four coagulants including, aluminum sulfate, Iron (II) sulfate, Iron (III) sulfate and Iron (III) chloride in the concentration range of 5 to 135 mg/L (as aluminum or iron concentration). Jar test results showed that aluminum sulfate with lowest dose in comparison with other coagulants (348.7 mg/L as aluminum sulfate concentration) had the best efficiency in turbidity removal (98.5 percent). To evaluate the efficiency of treatment system, parameters such as pH, total dissolved solids, total suspended solids, electrical conductivity, turbidity, nitrate, nitrite, ammonia, phosphate, anionic surfactant, and chemical oxygen demand (COD) were measured for both untreated and treated wastewater. Removal of turbidity, suspended solids, nitrite, nitrate, phosphate, anionic surfactant, and chemical oxygen demand (COD), respectively, reached acceptable levels of 98.4, 95, 83.5, 75, 91.3, 67 and 69 percent. Also, coagulation reduced pH only by 21 percent. It should be noted that in this study, removal of ammonia, electrical conductivity and TDS was negligible.

Keywords: Aluminum sulfate, Chemical coagulation, Grey water, Washing machine

بررسی پساب ماشین‌های لباس‌شویی و پیشنهاد یک سامانه مناسب برای تصفیه آن

محمد حسین صراف‌زاده[1*]، نرگس شیرویی[2] و امید توکلی[3]
۱- رئیس کرسی بازیافت آب و دانشیار دانشکده مهندسی شیمی، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.
۲- کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی شیمی، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.
۳- استادیار، دانشکده مهندسی شیمی، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.
* نویسنده مسئول، ایمیل: sarrafzdh@ut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۳/۱۰
تاریخ اصلاح: ۱۳۹۶/۷/۲۹
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۷/۳۰

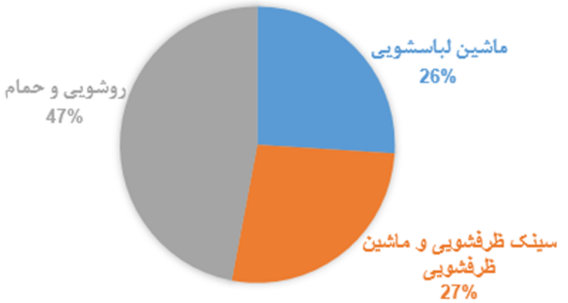
چکیده

تصفیه و بازیافت آب خاکستری به‌عنوان یک منبع غیرمتعارف آب، پاسخی مناسب برای افزایش روزافزون تقاضای آب تازه و مقابله با بحران کمبود آب است. در پژوهش پیش رو از سیستم تصفیه فیزیکی-شیمیایی (انعقاد و لخته‌سازی و ته‌نشینی) برای تصفیه و بازیافت آب خاکستری ماشین لباس‌شویی استفاده شده است. در ابتدا، آزمایش جارتست برای تعیین نوع و مقدار مناسب منعقدکننده‌ها با استفاده از چهار منعقدکننده آلومینیوم سولفات، آهن (II) سولفات، آهن (III) سولفات و آهن (III) کلرید و در محدوده غلظتی ۱۳۵- ۵ میلی‌گرم بر لیتر منعقدکننده (برحسب غلظت آلومینیوم یا آهن) انجام شد. نتایج حاصل از آزمایش جارتست نشان می‌دهد که آلومینیوم سولفات با کمترین مقدار مصرف نسبت به بقیه منعقدکننده‌ها (۳۴۸/۷ میلی‌گرم بر لیتر برحسب غلظت آلومینیوم سولفات) بهترین راندمان را از نظر حذف کدورت (۹۸/۵ درصد) دارد. برای بررسی کارایی سیستم تصفیه، پارامترهای آلاینده از قبیل pH، کل مواد جامد محلول، کل مواد جامد معلق، هدایت الکتریکی، کدورت، نیترات، نیتریت، آمونیاک، فسفات، سورفکتانت آنیونی و نیاز اکسیژن شیمیایی برای آب تصفیه نشده و آب تصفیه‌شده اندازه‌گیری شد. حذف کدورت، مواد جامد معلق، نیتریت، نیترات، فسفات، سورفکتانت آنیونی و نیاز اکسیژن شیمیایی به ترتیب به میزان قابل‌قبول ۹۸/۴، ۹۵، ۸۳/۵، ۷۵، ۹۱/۳، ۶۷ و ۶۹ درصد رسید. همچنین انعقاد باعث کاهش تنها ۲۱ درصدی pH می‌شود. لازم به ذکر است که میزان حذف آمونیاک، هدایت الکتریکی و کل مواد جامد محلول در این پژوهش بسیار ناچیز بود.

کلمات کلیدی: آب خاکستری، ماشین لباس‌شویی، انعقاد شیمیایی، آلومینیوم سولفات.

۱- مقدمه

امروزه بسیاری از کشورهای جهان به دلایلی ازجمله رشد روزافزون جمعیت، توسعه صنایع، تغییرات آب و هوا و همچنین محدودیت منابع آبی در دسترس، با بحران آب مواجه هستند. به‌منظور مقابله با بحران کمبود آب، به‌ویژه در کشورهای درحال‌توسعه، مدیریت آب‌های خاکستری روز به روز اهمیت بیشتری می‌یابد. آب خاکستری به‌دلیل حجم بالا و بار آلی کم، پتانسیل خوبی برای بازیافت دارد. به عبارتی، آب خاکستری در نهایت تا ۷۰ درصد از کل آب مصرفی در خانه را شامل می‌شود درحالی‌که فقط ۳۰ درصد از کسر مواد آلی و ۹ تا ۲۰ درصد از کسر مواد مغذی را شامل می‌شود (Morel, 2012). آب خاکستری به‌صورت فاضلاب خانگی ناشی از لباس‌شویی، ظرف‌شویی، روشویی و حمام به‌جز فاضلاب توالت تعریف می‌شود. استفاده مجدد از آب‌های خاکستری برای مصارفی همچون فلاش‌تانک‌ها، آبیاری فضای سبز، شست‌وشوی ماشین و ... هم باعث صرفه‌جویی در مصرف آب می‌شود و هم بار حجمی ورودی به تصفیه‌خانه‌های فاضلاب را کاهش می‌دهد (Morel and Diener, 2006). آب خاکستری معمولاً به فاضلاب تولیدی از روشویی، حمام، ماشین لباس‌شویی و آشپزخانه‌ها اطلاق می‌شود که در مبدأ از فاضلاب دستشویی و توالت تفکیک شده باشد. در واقع به کلیه فاضلاب تولید شده در خانه به‌جز فاضلاب توالت آب خاکستری می‌گویند. از نظر مقداری، حدود ۵۰ تا ۸۰ درصد از کل فاضلاب تولید شده در خانه را آب خاکستری تشکیل می‌دهد (Bani-Melhem et al., 2015; Rezaei and Sarrafzadeh, 2017). در شکل ۱ نحوه توزیع آب خاکستری بین منابع مختلف آن مشاهده می‌شود.



شکل ۱- نحوه توزیع آب خاکستری بین منابع مختلف آن (Ghaitidak and Kunwar, 2013).

ویژگی‌های کیفی آب خاکستری به منبع آب خاکستری، تعداد افراد خانواده، توزیع سن افراد خانواده، شیوه زندگی، الگوی مصرف آب، استانداردهای زندگی، عادات فرهنگی و اجتماعی افراد خانواده، نوع و مقدار مصرف مواد شیمیایی (نظیر صابون، خمیردندان، شامپو و شوینده) و مدت زمانی که آب خاکستری قبل از استفاده شدن ذخیره می‌شود، بستگی دارد. پساب حمام حاوی شامپو، صابون و چربی‌های پوست و ... می‌باشد، پساب ماشین لباس‌شویی دارای قلیاییت، کدورت و دمای بالا و حاوی غلظت بالای مواد شیمیایی ناشی از پودرهای شست و شو (مانند سدیم، فسفر، نیتروژن و سورفکتانت‌ها)، کف، سفیدکننده‌ها، چربی و گریس، رنگ‌ها، حلال‌ها و فیبرهای غیر تجزیه‌پذیر پوشاک است. همچنین پساب سینک آشپزخانه حاوی ذرات مواد غذایی، مواد روغنی و چربی و شوینده‌ها می‌باشد. پساب حاصل از ماشین ظرف‌شویی حاوی چربی و گریس، ذرات مواد غذایی، کف، مواد آلی و دارای کدورت، قلیاییت و دمای بالا است (Ghaitidak and Kunwar, 2013). در بین کلیه منابع آب‌های خاکستری، آب خاکستری ماشین لباس‌شویی به‌دلیل در دسترس بودن و ساده بودن امکان استفاده مجدد از آن (برای استفاده مجدد از آب خاکستری ماشین لباس‌شویی برخلاف منابع دیگر نیاز به تغییر لوله‌کشی خانه نیست) و داشتن نیتروژن و فسفر (برای رشد گیاهان مفید هستند بنابراین نیاز به کودهای شیمیایی را کاهش می‌دهند) موردتوجه قرار گرفته است. با توجه به بار آلی پایین و اغلب تک‌آلاینده بودن آب‌های خاکستری، می‌توان انتظار داشت که تصفیه جداگانه آنها ساده‌تر و کم‌هزینه‌تر باشد. پژوهشگران زیادی تصفیه آب‌های خاکستری را با روش‌های عمدتاً مبتنی بر انعقاد و لخته‌سازی بررسی کرده‌اند. از روش انعقاد با سولفات آلومینیوم و کربن فعال دانه‌ای برای تصفیه پساب ماشین لباس‌شویی استفاده شده است (Sostar-Turk et al., 2005). Pidou et al. (2008) مطالعاتی بر روی آب خاکستری دوش حمام خوابگاه دانشجویان دانشگاه کرانفیلد انگلستان انجام دادند که در آن با استفاده از جارتست، منعقد کننده‌های مختلف با چندین غلظت مورد بررسی قرار گرفتند. آب خاکستری آشپزخانه و ماشین لباس‌شویی در پژوهش دیگری مورد تصفیه قرار گرفت و نتایج حاکی از ساده‌تر شدن فرایند تصفیه در مقایسه با فاضلاب بود (Kariuki et al., 2011).

هدف اصلی این تحقیق بررسی تصفیه آب خاکستری ماشین

لباس‌شویی جهت استفاده مجدد برای مصارف غیرشرب از جمله فلاش‌تانک‌ها، آبیاری، شست‌وشوی ماشین و ... است که البته همراه با دستاوردهای زیر می‌تواند باشد:

- کاهش استفاده از آب شرب برای مصارفی که به آب با کیفیت بالا نیاز ندارند.
- تأمین آب موردنیاز مصارف غیرشرب
- کاهش حجم فاضلاب تولیدی
- کاهش زمین مورد نیاز جهت ساخت تصفیه‌خانه

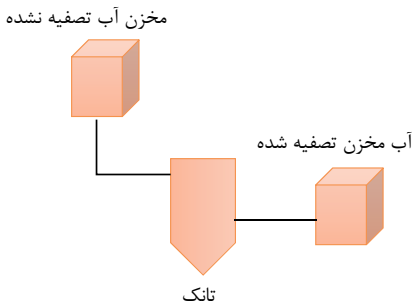
۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مواد

مواد استفاده شده شامل منعقد کننده‌های معدنی برای انجام آزمایش‌های جارتست (آلومینیوم سولفات ۱۸ آبه، فریک کلرید ۶ آبه، فرو سولفات ۷ آبه و فریک سولفات ۹ آبه) و مواد مورد نیاز جهت انجام آنالیزهای لازم (اندازه‌گیری پارامترهای فیزیکی و شیمیایی) است.

۲-۲- ساخت سامانه آزمایشگاهی

شمای کلی از سیستم استفاده شده جهت تصفیه آب ماشین لباس‌شویی، در شکل ۲ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل مشخص است، این سیستم شامل (۱) مخزن آب تصفیه‌نشده، (۲) تانک (جهت انجام انعقاد، لخته‌سازی و ته‌نشینی) و (۳) مخزن آب تصفیه‌شده می‌باشد. تانک در قسمت انتهایی پایین آن برای جلوگیری از اختلاط جریان خروجی با لجن تولیدی با شیب ۴۵ درجه ساخته شده است. تمامی لجن تولیدی در قسمت شیب‌دار پایین جمع شده و از طریق شیری که در این قسمت تعبیه شده است، خارج می‌شود.



شکل ۲- شمای کلی فرآیند تصفیه بکار گرفته شده در سامانه آزمایشگاهی

۲-۳- آزمایش‌های انجام‌شده

۲-۳-۱- اندازه‌گیری پارامترهای مهم آب

در این پژوهش چند پارامتر مهم قبل از انجام هرگونه فرایند بر روی آب‌های خاکستری و بعد از آن، بر روی آب تصفیه‌شده، مورد سنجش قرار گرفته است که سنجش این پارامترها منجر به شناسایی خواص اصلی آب‌های خاکستری و ارائه روش مناسب جهت انجام هرگونه فرایند تصفیه و همچنین ارزیابی عملکرد سامانه تصفیه می‌شود. این پارامترها عبارتند از: نیاز اکسیژن شیمیایی[۱] (COD)، درجه اسیدی یا بازی بودن (pH)، کل مواد جامد معلق[۲] (TSS)، کل مواد جامد محلول[۳] (TDS)، هدایت الکتریکی[۴] (EC)، کدورت[۵]، نیترات[۶]، نیتریت[۷]، آمونیاک[۸]، فسفات[۹] و سورفکتانت آنیونی[۱۰]. لازم به ذکر است که کلیه تحلیل‌ها با استفاده از روش‌های استاندارد انجام شده است (Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 2016).

۲-۳-۲- جار تست

بیشتر ذرات معلق در فاضلاب دارای بار منفی هستند. در انعقاد شیمیایی مواد منعقدکننده مناسب به آب اضافه می‌شود. این مواد بار الکتریکی ذرات معلق را خنثی می‌کند و بر اثر آن امکان چسبیدن ذرات به یکدیگر و درنتیجه ایجاد ذرات بزرگ‌تر، سنگین‌تر و قابل رسوب که فلوک نامیده می‌شود فراهم می‌شود. نمک‌های آلومینیوم یا آهن رایج‌ترین مواد منعقدکننده در سیستم‌های تصفیه هستند، زیرا مؤثر در تصفیه، دارای قیمت پایین و در دسترس هستند و همچنین برای ذخیره‌سازی و به‌کار بردن مناسب هستند. برای تعیین نوع و مقدار مناسب منعقدکننده‌ها از آزمایش جارتست استفاده می‌شود. در این آزمایش از ۶ ظرف شیشه‌ای و یک دستگاه همزن که به‌طور همزمان محتویات همه ظرف‌ها را به‌هم می‌زند استفاده می‌شود. یک لیتر از نمونه‌ای که کدورت آن از قبل تعیین شده است، به هریک از ظرف‌ها اضافه می‌شود. ابتدا همزن روی دور تند ۲۰۰ دور بر دقیقه تنظیم می‌شود. سپس برای هر منعقدکننده، یک محدوده مشخص از آن به‌طور همزمان به ظروف اضافه شده و به‌مدت یک دقیقه روی دور ۲۰۰ قرار می‌گیرد. در مرحله بعدی همزن روی دور کند ۲۰ دور بر دقیقه به مدت ۱۵ دقیقه قرار داده شده و در نهایت به‌مدت ۳۰ ثانیه به محلول‌ها اجازه داده می‌شود که ته‌نشین

شده و کدورت لایه رویی اندازه‌گیری می‌شود (EPA, 2000).

۳- نتایج و بحث

۳-۱- تحلیل ویژگی‌های آب خاکستری تصفیه نشده

برای انجام تحلیلهای لازم، از خروجی ماشین لباس‌شویی خانگی نمونه‌گیری صورت گرفته و نمونه‌ها به سرعت به آزمایشگاه منتقل و پارامترهای آلاینده مختلف آن اندازه‌گیری شد. علاوه‌بر پارامترهای کیفی، حجم آب مصرفی ماشین نیز اندازه‌گیری شد. نتایج تحلیل کمی و کیفی آب در جدول ۱ (برای دو سری آزمایش) و جدول ۲ (برای سه سری آزمایش) نشان داده شده است. یک سیکل شست‌وشوی ماشین لباس‌شویی شامل ۳ مرحله است. در مرحله اول که شستن[11] است، ماشین لباس‌ها را با پودر می‌شوید. در مرحله بعدی که مرحله آب کشی[12] است، لباس‌ها را آب‌کشی کرده و در مرحله آخر که مرحله خشک کردن[13] است لباس‌ها را خشک می‌کند. حجم آب مصرفی هر مرحله در جدول ۱ مشخص شده است. برای تشخیص این‌که آب کدام مرحله برای بازیافت مناسب است، به‌طور مثال آیا آب مرحله اول را به‌تنهایی باید مورد تصفیه قرار داد یا مخلوط همه مراحل برای تصفیه مناسب است، دو پارامتر بار آلودگی هر مرحله و حجم آب مصرفی آن مرحله را باید مورد بررسی قرار داد. در واقع آبی که بار آلودگی کم و حجم زیادی داشته باشد، پتانسیل خوبی برای بازیافت دارد. جدول ۱ نشان می‌دهد که به‌طور میانگین مرحله اول حدود ۲۰ درصد، مرحله دوم حدود ۷۰ درصد و مرحله سوم حدود ۱۰ درصد از کل حجم آب مصرفی در یک سیکل ماشین لباس‌شویی را شامل می‌شود. همچنین برای هر پارامتر آلاینده اندازه‌گیری شده، مقدار آن پارامتر در مرحله اول بیشتر از مرحله دوم و در مرحله دوم بیشتر از مرحله سوم است. پس از نظر بار آلودگی مرحله اول کثیف‌ترین مرحله و بعد از آن مراحل دوم و سوم قرار دارند. در نگاه اول به نظر می‌رسد که بهتر است آب مرحله اول را به فاضلاب تخلیه و مخلوط آب مرحله دوم و سوم را برای بازیافت مورداستفاده قرار داد. به همین دلیل بار دیگر آزمایش‌ها تکرار ولی این بار مخلوط آب مرحله دوم و سوم مورد آزمایش قرار داده شد که نتایج آن در جدول ۲ مشاهده می‌شود. ولی ازآن‌جایی‌که حجم آب مصرفی مرحله اول نسبت به مجموع حجم آب مراحل دوم و سوم کم است، بنابراین در صورت مخلوط آن با آب مراحل دیگر تأثیر چندانی بر روی آلودگی کل نداشته و می‌توان به‌جای دور ریختن، آن‌را برای تصفیه مورداستفاده قرار داد. پس بهترین حالت این است که مخلوط هر سه مرحله را مورد تصفیه و استفاده مجدد قرار گیرد.

جدول ۱- تحلیل آب خروجی ماشین لباس‌شویی - هر ۳ مرحله به‌طور جداگانه

پارامترهای کمی و کیفی	آزمایش اول			آزمایش دوم			میانگین		
	مرحله اول	مرحله دوم	مرحله سوم	مرحله اول	مرحله دوم	مرحله سوم	مرحله اول	مرحله دوم	مرحله سوم
حجم آب مصرفی (لیتر) (درصد از کل حجم آب مصرفی)	۱۳ (٪۲۰)	۴۹/۵ (٪۷۳)	۵ (٪۷)	۱۸ (٪۲۱)	۶۰ (٪۷۱)	۶ (٪۸)	۱۵/۵ (٪۲۰/۵)	۵۴/۸ (٪۷۲)	۵/۵ (٪۷/۵)
pH	۸/۲	۸/۵	۷/۱	۹/۳	۸/۸	۸/۵	۸/۸	۸/۵	۷/۸
هدایت الکتریکی (mS/cm)	۱/۰۲	۰/۶۴۲	۰/۶۱۷	۷	۱/۰۹	۰/۸۶۲	۴/۰۱	۰/۸۶۶	۰/۷۴
مواد جامد محلول (mg/L)	۷۳۹	۴۳۴	۳۸۷	۴۶۹۰	۷۲۰	۵۷۵	۲۷۱۵	۵۷۷	۴۸۱
آمونیاک (mg/L)	۱۳/۷	۱/۴	۰/۶	۱۳/۶	۳/۲	۱/۲	۱۳/۶۵	۱/۳	۰/۹
نیتریت (mg/L)	۲/۲	۰/۳	۰/۱	۹/۲	۱/۴	۰/۱	۵/۷	۰/۸۵	۰/۱
نیترات (mg/L)	۸۷۹/۸	۷۹/۷	۵۲/۳	۱۲۵۱/۹۲	۱۴۳/۱	۷۵/۸	۱۰۶۵/۸۶	۱۱۱/۴	۶۴/۰۵
فسفات (mg/L)	۵۲/۹	۱۲/۶	۰/۵	۶۳	۱۴/۸	۱۳/۶	۵۷/۹۵	۱۳/۷	۷/۰۵
COD (mg/L)	۲۴۸۰	۴۹۰	۱۱۸	۴۳۷۹	۹۶۳	۱۹۳	۳۴۳۰	۷۲۷	۱۵۶

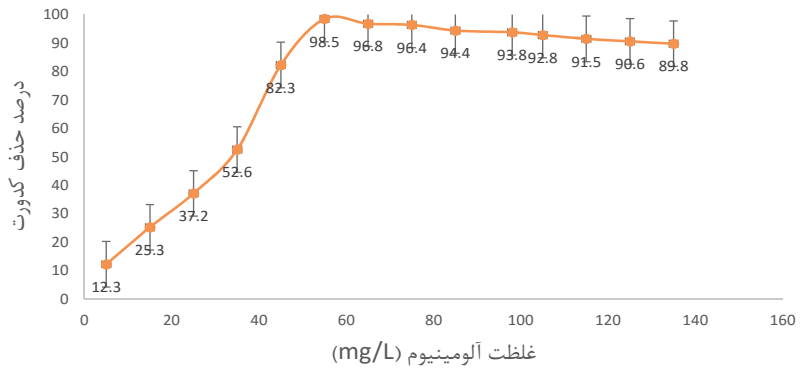
جدول ۲- تحلیل آب خروجی ماشین لباس‌شویی - مرحله اول جداگانه و مراحل دوم و سوم مخلوط

پارامترهای کمی و کیفی	آزمایش اول		آزمایش دوم		آزمایش سوم		میانگین	
	مرحله اول	مراحل دوم و سوم	مرحله اول	مراحل دوم و سوم	مرحله اول	مراحل دوم و سوم	مرحله اول	مراحل دوم و سوم
حجم آب مصرفی (لیتر) (درصد از کل حجم آب مصرفی)	۸/۵ (٪۲۲)	۳۱ (٪۸۸)	۹ (٪۲۰)	۳۷ (٪۸۰)	۷/۵ (٪۱۷)	۳۵/۵ (٪۸۳)	۸/۳ (٪۱۹)	۳۴/۵ (٪۸۱)
pH	۹/۸	۹/۲	۸/۳	۸	۹/۵	۹/۱	۹/۲	۸/۸
هدایت الکتریکی (mS/cm)	۲/۰۲	۱/۲۶۶	۴/۰۹	۱/۷۲	۶/۱۵	۲/۲۲	۴/۰۹	۱/۷۳
مواد جامد محلول (mg/L)	۱۳۴۰	۸۴۶	۲۷۱۰	۱۱۳۵	۴۰۷۰	۱۵۱۰	۲۷۰۷	۱۱۶۴
آمونیاک (mg/L)	۲۸/۶	۶/۶	۳۱/۵	۱۱/۲	۲۷/۲	۱۱/۴	۲۹/۱	۹/۷
نیتریت (mg/L)	۲/۱	۰/۷	۵/۸	۱/۸	۶	۲/۷	۴/۶۳	۱/۷۳
نیترات (mg/L)	۳۹۴/۳	۱۲۲/۷	۵۹۴/۵	۲۲۱/۵	۱۸۲/۴	۱۲۹/۷	۳۹۰/۴	۱۵۷/۹۷
فسفات (mg/L)	۲۱	۸/۲	۵۳/۷	۱۵/۸	۳۸	۱۲	۳۷/۵	۱۲
COD (mg/L)	۲۵۸۵	۷۵۰	۳۳۸۱	۱۱۲۱	۳۰۸۳	۱۰۷۲	۳۰۱۶	۹۸۱

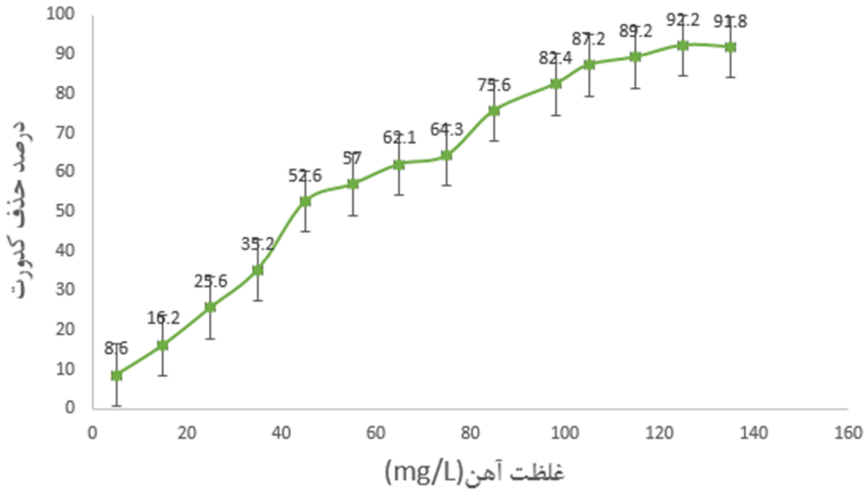
۳-۲- نتایج آزمایش جار تست

آزمایش جارتست با چهار منعقدکننده آلومینیوم سولفات، فریک سولفات، فرو سولفات و فریک کلرید و در محدوده غلظتی ۱۳۵- ۵ میلی‌گرم بر لیتر منعقدکننده (برحسب آلومینیوم یا آهن) انجام شد. نتایج این آزمایش در شکل‌های ۳ تا ۶ برای هر منعقدکننده نشان داده شده است. با اضافه کردن ماده منعقدکننده بیشتر از مقدار بهینه، روند نمودارها نزولی می‌شود. این امر به دلیل مثبت شدن بار سطحی ذرات است.

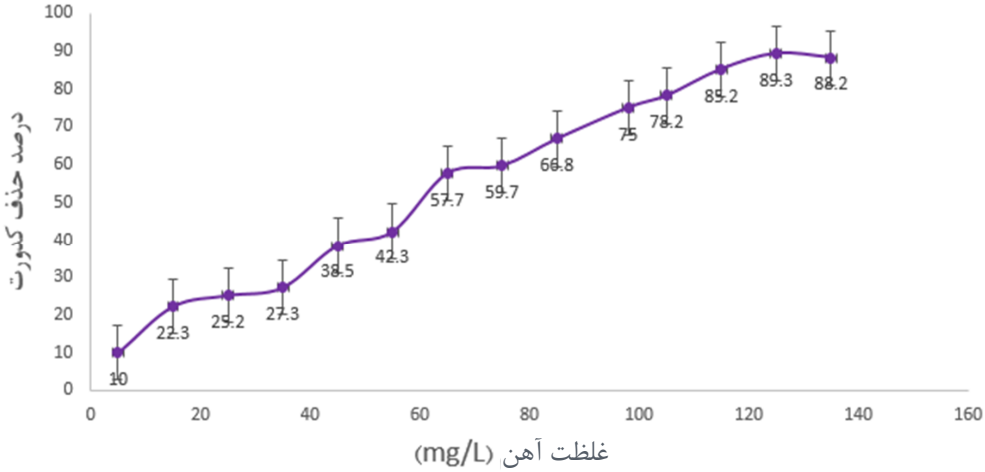
برای تصفیه آب ماشین لباس‌شویی با روش انعقاد، به‌دلیل نوسان کیفیت پساب حاصله مقدار بهینه مورد نیاز آلومینیوم سولفات بسته به کدورت پساب متفاوت خواهد بود. به‌همین دلیل برای پساب‌های مختلف با کدورت‌های مختلف آزمایش جارتست انجام و نمودار غلظت بهینه منعقد کننده برحسب کدورت پساب رسم شد. نتایج حاصله در شکل ۷ مشاهده می‌شود. با توجه به این نمودار، برای هر پساب دلخواه می‌توان با اندازه‌گیری کدورت آن مقدار بهینه آلومینیوم سولفات (برحسب غلظت آلومینیوم) را پیدا کرد.



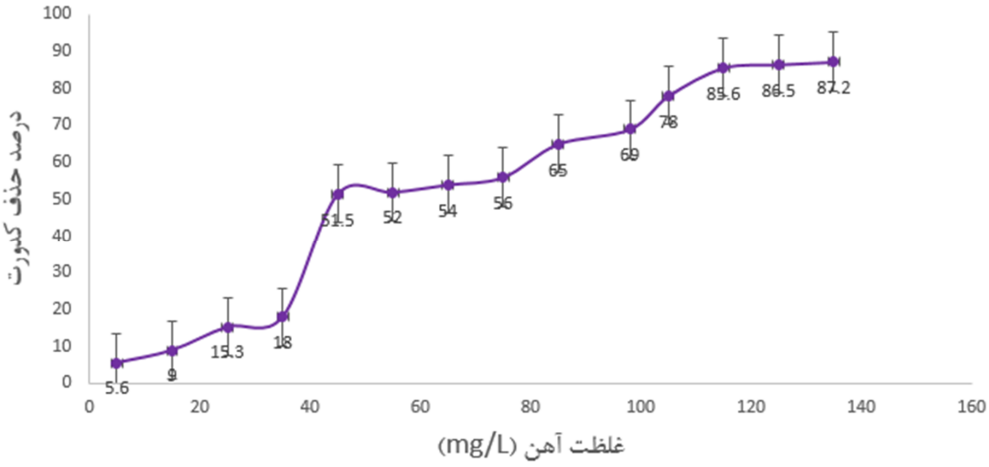
شکل ۳- نمودار درصد حذف کدورت برحسب غلظت آلومینیوم برای آلومینیوم سولفات



شکل ۴- نمودار درصد حذف کدورت برحسب غلظت آهن برای فریک کلرید



شکل ۵- نمودار درصد حذف کدورت برحسب غلظت آهن برای فریک سولفات



شکل ۶- نمودار درصد حذف کدورت برحسب غلظت آهن برای فرو سولفات

۳-۳- بررسی کارایی سیستم تصفیه استفاده شده

سیستم تصفیه مورد استفاده در این پروژه، شامل یک مرحله تصفیه، انعقاد و لخته‌سازی و ته‌نشینی است. برای بررسی کارایی سیستم تصفیه، باید ویژگی‌های آب تصفیه نشده و همچنین آب تصفیه شده خروجی از آن را مورد تحلیل قرار داد.

۳-۳-۱- تحلیل ویژگی‌های آب تصفیه نشده

ابتدا تحلیل‌های لازم بر روی آب تصفیه نشده خروجی از ماشین لباس‌شویی صورت گرفته است. نتایج حاصله در جدول ۴ نشان داده شده است.

۳-۳-۲- تحلیل ویژگی‌های آب تصفیه‌شده بعد از انعقاد و لخته‌سازی و ته‌نشینی

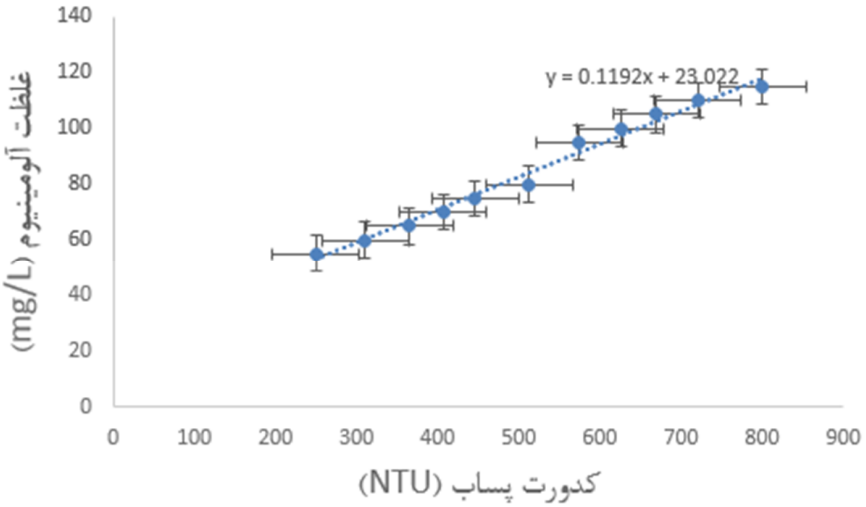
تحلیل‌های لازم بر روی آب خروجی از مرحله اول تصفیه (انعقاد و لخته‌سازی و ته‌نشینی) صورت گرفته است. نتایج حاصله در جدول ۵ آمده است. با مقایسه جدول ۵ با جدول ۴ می‌توان مشاهده کرد که مقدار pH آب تصفیه شده بعد از انعقاد نسبت به آب تصفیه نشده خروجی از ماشین لباس‌شویی کاهش یافته است. کاهش pH به دلیل واکنش آلوم مصرفی با قلیائیت آب که معمولاً ناشی از کلسیم بی‌کربنات است، می‌باشد. همان‌طور که انتظار می‌رفت، انعقاد باعث حذف بسیار بالای کدورت و مواد جامد معلق (به ترتیب ۹۸/۴ و ۹۵ درصد) شده است. همچنین میزان حذف نیترات، نیتریت، فسفات، سورفکتانت آنیونی و COD بسیار قابل قبول است. میزان حذف آمونیاک، هدایت الکتریکی و TDS بسیار ناچیز و کمتر از ۱۰ درصد است.

۳-۳-۳- مقایسه عملکرد سامانه با پژوهش‌های پیشین

در مطالعه Sostar-Turket al. (2005) میزان حذف COD و BOD تنها ۳۶ درصد گزارش شده است. اما در پژوهش حاضر

جدول ۳- مقادیر بهینه منعقدکننده‌ها

نوع منعقدکننده	مقدار بهینه برحسب غلظت آلومینیوم یا آهن (mg/L)	مقدار بهینه برحسب غلظت منعقد کننده (mg/L)	درصد حذف کدورت
آلومینیوم سولفات	۵۵	۳۴۸/۷	۹۸/۵
فریک کلرید	۱۲۵	۳۶۲/۵	۹۲/۲
فریک سولفات	۱۲۵	۴۴۷/۵	۸۹/۳
فرو سولفات	۱۳۵	۳۶۷/۲	۸۷/۲



شکل ۷- نمودار غلظت بهینه منعقد کننده آلومینیوم سولفات برحسب کدورت پساب

جدول ۴- تحلیل ویژگی‌های آب تصفیه نشده خروجی از ماشین لباس‌شویی

پارامتر	تعداد دفعات آزمایش	کمترین مقدار	میانگین	بیشترین مقدار
pH	۷	۸/۵	۹/۵	۱۰
کل مواد جامد محلول (mg/L)	۷	۹۰۰	۱۴۴۰	۲۲۰۰
هدایت الکتریکی (mS/cm)	۷	۱/۴۱	۲/۲۶	۳/۳
کل مواد جامد معلق (mg/L)	۷	۱۸۰۰	۲۲۱۵	۲۷۶۸
کدورت (NTU)	۷	۲۵۰	۴۸۹	۸۰۰
نیترات (mg/L)	۷	۹۵/۵	۱۹۴/۶	۲۵۰/۸
نیتریت (mg/L)	۷	۱/۲	۷/۹	۱۳/۹
آمونیاک (mg/L)	۷	۳/۵	۹/۲	۱۵/۶
فسفات (mg/L)	۷	۶/۵	۱۴/۹	۲۴/۳
COD (mg/L)	۷	۹۸۰	۱۶۸۲	۲۶۴۴
سورفکتانت آنیونی (mg/L)	۴	۵۰/۳	۶۵	۸۹/۸

جدول ۵- تحلیل ویژگی‌های آب تصفیه‌شده بعد از انعقاد

پارامتر	تعداد دفعات آزمایش	بعد از انعقاد شیمیایی			درصد حذف
		کمترین مقدار	میانگین	بیشترین مقدار	
pH	۷	۶/۴	۷/۵	۷/۸	۲۱
مواد جامد محلول (mg/L)	۷	۸۵۰	۱۴۰۰	۲۱۵۰	۲/۸
هدایت الکتریکی (mS/cm)	۷	۱/۳۹	۲/۲۲	۳/۲۲	۱/۸
مواد جامد معلق (mg/L)	۷	۷۵	۱۱۰	۱۴۰	۹۵
کدورت (NTU)	۷	۴	۷/۸	۱۲/۸	۹۸/۴
نیترات (mg/L)	۷	۲۵/۲	۴۸/۷	۶۶/۶	۷۵
نیتریت (mg/L)	۷	۰/۵	۱/۳	۲/۴	۸۳/۵
آمونیاک (mg/L)	۷	۳/۲	۸/۴	۱۴/۹	۸/۷
فسفات (mg/L)	۷	۰/۸	۱/۳	۲/۳	۹۱/۳
COD (mg/L)	۷	۲۸۰	۵۲۰	۸۳۶	۶۹
سورفکتانت آنیونی (mg/L)	۴	۱۸/۲	۲۱/۵	۳۵/۲	۶۷

میزان حذف COD به ۶۹ درصد رسید که نشان‌دهنده تأثیر بیشتر انعقاد بر روی حذف آلاینده‌ها با توجه به میزان سولفات آلومینیوم استفاده شده است. حذف آمونیاک در مطالعه Sostar-Turket al. (2005) اتفاق نیفتاد و همچنین میزان کاهش pH قابل‌توجه نبود که این نتایج نیز با نتایج حاضر مطابقت دارد.

در مطالعه Pidou et al. (2008) کدورت آب خاکستری دوش حمام از مقدار ۴۶/۶ NTU به مقدار ۴/۲۸ NTU و ۵/۲ NTU (۹۰/۸۲ درصد و ۸۸/۸۴ درصد کاهش) با استفاده از آلومینیوم سولفات و فریک سولفات به ترتیب کاهش یافت که تقریباً مشابه نتایج جارتست پژوهش حاضر است. مقایسه بین مقادیر مورد نیاز منعقد کننده‌ها نشان می‌دهد که برای رسیدن به درصد حذف یکسان مقدار گرم فریک سولفات بیشتری نسبت به آلومینیوم سولفات نیاز است که این نتیجه نیز مطابق نتیجه کار حاضر است. برای آب خاکستری دوش حمام، BOD از مقدار ۲۰۵ میلی‌گرم بر لیتر به مقادیر ۲۳ و ۳۰ میلی‌گرم بر لیتر (درصد کاهش ۸۸/۲۸ و ۸۵/۳۷) و COD از مقدار ۷۹۱ میلی‌گرم بر لیتر به مقادیر ۲۸۷ و ۲۸۸ میلی‌گرم بر لیتر (درصد کاهش ۶۳/۷۳ و ۶۳/۵۹)، به ترتیب با استفاده از آلومینیوم سولفات و سولفات آهن (III) کاهش یافت. در تحقیق حاضر میزان حذف COD توسط آلومینیوم سولفات ۶۷ درصد بود که بسیار مشابه مطالعه Pidou et al. (2008) است. نیترات، نیتروژن کل و فسفر موجود در فسفات (PO_4-P) به‌ترتیب از مقادیر ۶/۷، ۱۸ و ۱/۶۶ میلی‌گرم بر لیتر به مقادیر ۵/۷، ۱۵/۷ و ۰/۰۹ (درصد کاهش ۱۴/۹۳، ۱۲/۷۸ و ۹۴/۵۸) با استفاده از منعقدکننده آلومینیوم سولفات کاهش یافتند. در حالی‌که با استفاده از سولفات آهن (III)، درصد کاهش نیترات، نیتروژن کل و فسفر موجود در فسفات به ترتیب ۸/۹۶، ۰/۵۶ و ۹۶/۳۹ بود. میزان کاهش نیترات با آلومینیوم سولفات در پروژه حاضر بسیار بیشتر (۷۵ درصد) بوده ولی میزان حذف فسفات تقریباً مشابه (۹۱/۳) است (Pidou et al., 2008).

در مطالعه Kariuki et al. (2011) با زمان ته‌نشینی ۸ ساعت، pH آب خاکستری آشپزخانه از مقدار ۹/۳۴ به مقدار ۶/۵ کاهش یافت. pH در اثر عبور دادن از فیلتر با اندازه حفرات ۰/۴۵ میلی‌متر و ضدعفونی با سدیم هیپوکلریت (NaOCl) و آب‌لیمو به ترتیب به مقادیر ۵/۹۲ و ۶/۵ کاهش یافت. همچنین pHآب خاکستری ماشین لباس‌شویی از مقدار ۶/۷۹ به‌مقدار ۵/۸۸ کاهش یافت. در پروژه حاضر از مقدار میانگین ۹/۵ به مقدار میانگین ۷/۵ کاهش یافت که مقدار کاهش pH در مطالعه Kariuki et al. (2011) و کار حاضر بسیار مشابه بود. pH در اثر عبور دادن از فیلتر با اندازه حفرات ۰/۴۵ میلی‌متر و ضدعفونی با سدیم هیپوکلریت (NaOCl) و آب‌لیمو به ترتیب به مقادیر ۶/۳ و ۶/۵ تغییر یافت. هدایت الکتریکی برای آب خاکستری آشپزخانه از مقدار ۱۹۵ mS/m به مقدار ۱۹۶/۷ mS/m و برای آب خاکستری ماشین لباس‌شویی از مقدار ۶/۳۲ mS/m به مقدار ۵/۴۹ mS/m افزایش کمی یافت. ولی در تحقیق حاضر، مقدار هدایت الکتریکی کاهش خیلی کمی داشت (از مقدار ۲۲۶ mS/m به مقدار ۲۲۲ mS/m کاهش یافت) که در کل می‌توان گفت در هر دو مطالعه، هدایت الکتریکی تغییر چندانی نکرده است (Kariuki et al., 2011).

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، پتانسیل سیستم فیزیکی - شیمیایی (انعقاد و لخته‌سازی و ته‌نشینی) برای تصفیه آب خاکستری ماشین لباس‌شویی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از آزمایش جار تست با ۴ منعقد کننده معدنی، آلومینیوم سولفات، فریک سولفات، فریک کلرید و فروسولفات، نشان می‌دهد که آلومینیوم سولفات با کمترین مقدار مصرف نسبت به بقیه (۳۴۸/۷ mg/L) دارای بالاترین درصد حذف کدورت (۹۸/۵) است. پس از آلومینیوم سولفات به‌عنوان منعقدکننده در تانک ته‌نشینی پایلوت آزمایشگاهی استفاده شد. انعقاد باعث حذف بسیار بالا و نزدیک به ۱۰۰ درصد کدورت و کل مواد جامد معلق (۹۸/۵ و ۹۵ درصد) شد. میزان حذف فسفات، نیترات، نیتریت، سورفکتانت آنیونی و COD توسط انعقاد به ترتیب ۹۱/۳، ۷۵، ۸۳/۵، ۶۷ و ۶۹ درصد بود که بسیار قابل‌توجه است. در این پروژه، حذف آمونیاک، هدایت الکتریکی و TDS مشاهده نشد. همچنین انعقاد باعث کاهش ۲۱ درصدی pH می‌شود. البته بحث دست‌یابی به یک سیستم کارآمد تصفیه خانگی که قابل نصب در ماشین‌های لباس‌شویی منازل باشد و استفاده از پساب تصفیه شده در مصارف خانگی، دارای محدودیت‌هایی است که تحقیقات دامنه‌دارتری را می‌طلبد. نتیجه‌گیری دیگری که از این پژوهش می‌توان داشت، تفاوت کمی و کیفی آب خاکستری شکل گرفته در فازهای مختلف شست و شو توسط ماشین لباس‌شویی است که درصورت امکان تفکیک پساب

مراحل مختلف شستشو، کارآمدی روش تصفیه افزایش می‌یابد. این مسئله، موضوع بررسی‌های آتی خواهد بود.

۵- پی‌نوشت‌ها

1- Chemical Oxygen Demand

2- Total Suspended Solids

3- Total Dissolved Solids

4- Electrical Conductivity

5- Turbidity

6- Nitrate

7- Nitrite

8- Ammonia

9- Phosphate

10- Anionic Surfactant

11- Wash

12- Rinse

13- Spin

۶- مراجع

Bani-Melhem, KH., Al-Qodah, Z., Al-Shannag, M., Qasaimeh, A., Rasool Qtaishat, M., and Alkasrawi, M., (2015), "On the performance of real grey water treatment using a submerged membrane bioreactor system", *Journal of Membrane Science*, 476, 40-49.

EPA, (2000), *Technical development document for the final action regarding pretreatment standards for the industrial laundries point source*, category no. 821-R-00-006, Washington, DC, USA, Environmental Protection Agency [Chapter 6].

Ghaitidak, D.M., and Kunwar, D.Y., (2013), "Characteristics and treatment of greywater, A review", *Environmental Science and Pollution Research,* 20(5), 2795-2809.

Kariuki, F.W., Kotu, K., and Nganga, V.G., (2011), "The potential of a low cost technology for the greywater treatment", *The Open Environmental Engineering Journal*, 7(4), 32-39.

Morel, A., (2013), "Greywater treatment on household level in developing countries- a state of the art review", *Environmental Science and Pollution Research*, 20(5), 2795-2809.

Morel, A., and Diener, S., (2006), "Greywater management in low and middle income countries, review of different treatment systems for households or neighborhoods", Sandec Report No. 14/06.

Pidou, M., Avery, L., Stephenson, T., Jeffrey, P., Parsons, S.A., Liu, S., Memon, F.A., and Jefferson, B., (2008), "Chemical solutions for greywater recycling", *Chemosphere*, 71(1), 147-155.

Rezaei, M. and Sarrafzadeh, M.H., (2017), "An overview of the properties and methods of gray water recovery", *Journal of Environmental Science and Technology (JEST), In Press.*

Sostar-Turk, S., Petrinić, I. and Simonič, M., (2005), "Laundry wastewater treatment using coagulation and membrane filtration", *Resources, Conservation and Recycling*, 44(2), 185-196.

Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, (2016), http://bit.ly/2jLHWvM, 5 Sep 2016.