

## Optimization of Wastewater Treatment Plant by Activated Sludge Method Using GPS-X Software

Seyed Mahdy Mirian<sup>1</sup>, Afshin Ebrahimi<sup>2</sup>

### Original Article

#### Abstract

**Background:** The purpose of this study was to model a real wastewater treatment plant in operation with GPS-X software. In the following, the verification of the output results of the software was done with the results of the effluent tests of the discussed sewage treatment plant. Then, the rate of return sludge, recycled sludge, and disposed sludge of the wastewater treatment plant was optimized by Modified Ludzack-Ettinger (MLE) method, so that it has the greatest effect on the quality of the effluent, especially chemical oxygen demand (COD) and nitrate (NO<sub>3</sub>) parameters.

**Methods:** First, using the available data of an operating wastewater treatment plant, the processes of the treatment plant were modeled in the software and the compatibility of the model with the existing treatment plant was checked. After the validation of the software, in order to check the parameters affecting the activated sludge process, including return sludge rate, excess sludge rate, and internal recirculation sludge rate in the treatment of organic matter and nitrogen, COD, NO<sub>3</sub>, and ammonia parameters were investigated as indicators of pollution. In addition, the MLE process for nitrogen removal was modeled in the software. After performing the modeling by changing the parameters and checking the resulting outputs, the results regarding the effect of increasing the sludge recirculation rate on the COD concentration in the effluent and the effect of increasing and decreasing the internal recirculation rate and the disposal sludge rate on COD removal were examined. In addition, the mutual effect of changes in internal sludge recycling and return sludge and the amount of excess sludge disposal on NO<sub>3</sub> removal was shown by different graphs.

**Findings:** In this study, while validating the software, the results of the experiment design showed that the return sludge rate and the internal recirculation rate had mutual effects on each other in the removal of COD and NO<sub>3</sub>, and in the optimal mode of operation and design, the ratio of 0.54 for return sludge and one-time internal recycling and ratio of 0.021 for disposal sludge had the greatest effect on COD and NO<sub>3</sub> removal target efficiency and increasing the effluent quality.

**Conclusion:** GPS-X software can be used in the modeling and optimization of wastewater treatment processes.

**Keywords:** Wastewater; Sludge; Sludge recirculation; Chemical oxygen demand; Nitrates

**Citation:** Mirian SM, Ebrahimi A. **Optimization of Wastewater Treatment Plant by Activated Sludge Method Using GPS-X Software.** J Health Syst Res 2023; 19(2): 117-25.

1- MSc Student, Daneshpajooan Pishro Higher Education Institute (DHEI) AND Tarhafrā Consulting Engineers Company, Isfahan, Iran

2- Professor, Department of Environmental Health Engineering, School of Health AND Environment Research Center, Research Institute for Primordial and Non-communicable Disease, Isfahan University of Medical Sciences, Isfahan, Iran

**Corresponding Author:** Afshin Ebrahimi; Professor, Department of Environmental Health Engineering, School of Health AND Environment Research Center, Research Institute for Primordial and Non-communicable Disease, Isfahan University of Medical Sciences, Isfahan, Iran  
Email: a\_ebrahimi@hlth.mui.ac.ir

## بهینه‌سازی تصفیه‌خانه فاضلاب به روش لجن فعال با استفاده از نرم‌افزار GPS-X

سید مهدی میریان<sup>۱</sup>، افشین ابراهیمی<sup>۲</sup>

### مقاله پژوهشی

### چکیده

**مقدمه:** هدف از انجام پژوهش حاضر، مدل‌سازی یک تصفیه‌خانه فاضلاب واقعی در حال بهره‌برداری با استفاده از نرم‌افزار GPS-X بود. بدین ترتیب، نتایج خروجی نرم‌افزار با نتایج آزمایش‌های پساب تصفیه‌خانه فاضلاب مورد نظر صحت‌سنجی شد. سپس نرخ لجن برگشتی، لجن بازچرخش شده و لجن دفع شده تصفیه‌خانه فاضلاب به روش Modified Ludzack-Ettinger (MLE) بهینه‌سازی گردید؛ به صورتی که بیشترین تأثیر را روی کیفیت پساب خروجی به خصوص شاخص‌های Chemical oxygen demand (COD) و نیترات داشته باشد.

**روش‌ها:** ابتدا با استفاده از داده‌های موجود تصفیه‌خانه فاضلاب مورد نظر، فرایندهای آن در نرم‌افزار مدل شد و انطباق مدل با تصفیه‌خانه موجود بررسی گردید. بعد از صحت‌سنجی نرم‌افزار، به منظور بررسی شاخص‌های مؤثر بر فرایند لجن فعال شامل نرخ لجن برگشتی، نرخ لجن مازاد و نرخ لجن بازچرخش داخلی در تصفیه‌مواد آلی و نیتروژن، شاخص‌های COD، نیترات و آمونیاک به عنوان شاخص‌های سنجهش آلودگی مورد بررسی قرار گرفت. همچنین، فرایند MLE جهت حذف نیتروژن در نرم‌افزار مدل‌سازی شد. سپس با تغییر شاخص‌ها و بررسی خروجی‌های به دست آمده، نتایج در خصوص اثر افزایش نرخ بازچرخش لجن در غلظت COD در پساب خروجی و اثر افزایش و کاهش نرخ بازچرخش داخلی و نرخ لجن دفعی در حذف COD بررسی گردید. همچنین، اثر متقابل تغییرات بازچرخانی داخلی لجن و لجن برگشتی و مقدار لجن مازاد دفعی بر حذف نیترات به وسیله نمودارهای مختلف نشان داده شد.

**یافته‌ها:** ضمن صحت‌سنجی نرم‌افزار در مطالعه حاضر، نتایج حاصل از طراحی آزمایش نشان داد که نرخ لجن برگشتی و بازچرخش داخلی دارای اثرات متقابل نسبت به یکدیگر در حذف COD و نیترات بودند و در حالت بهینه بهره‌برداری و طراحی، نسبت ۰/۵۴ برای لجن برگشتی و یک برابر بازچرخانی داخلی و نسبت ۰/۰۲۱ برای لجن دفعی، بیشترین تأثیر را بر راندمان حذف COD و نیترات و افزایش کیفیت پساب خروجی داشت.

**نتیجه‌گیری:** استفاده از نرم‌افزار GPS-X می‌تواند در مدل‌سازی و بهینه‌سازی فرایندهای تصفیه فاضلاب مورد استفاده قرار گیرد.

**واژه‌های کلیدی:** فاضلاب؛ لجن؛ بازچرخش لجن؛ اکسیژن مورد نیاز شیمیایی؛ نیترات

**ارجاع:** میریان سید مهدی، ابراهیمی افشین. بهینه‌سازی تصفیه‌خانه فاضلاب به روش لجن فعال با استفاده از نرم‌افزار GPS-X. مجله تحقیقات نظام سلامت ۱۴۰۲؛ ۱۹ (۲): ۱۱۷-۱۲۵

تاریخ چاپ: ۱۴۰۲/۴/۱۵

پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۷/۱۹

دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۷/۲۰

GPS-X نام دارد که اجازه می‌دهد تا فعل و انفعالات پیچیده بین فرایندهای واحدهای مختلف در تصفیه‌خانه به صورت تعاملی و پویا بررسی گردد. GPS-X یک نرم‌افزار مدل‌سازی مدولار و چند منظوره برای شبیه‌سازی تصفیه‌خانه‌های شهری و صنعتی است و از یک رابط کاربری گرافیکی پیشرفته به منظور تسهیل مدل‌سازی و شبیه‌سازی پویا استفاده می‌کند (۲).

تاکنون تحقیقات بسیاری در رابطه با شبیه‌سازی و مدل‌سازی تصفیه فاضلاب با استفاده از نرم‌افزار GPS-X انجام شده است که در ادامه به عنوان نمونه به مواردی اشاره می‌شود.

Hvala و همکاران به منظور انتخاب فرایند بهینه جهت ارتقای تصفیه‌خانه، دو فرایند لجن فعال متداول و Moving bed biofilm reactor

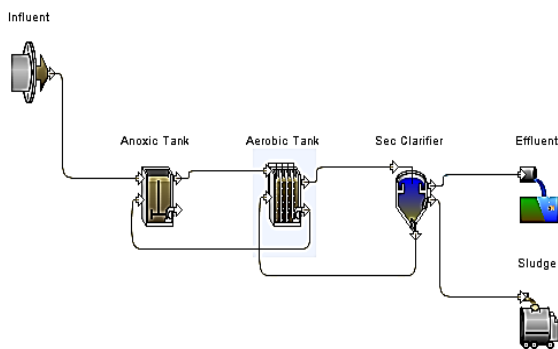
### مقدمه

طراحی و بهره‌برداری بهینه و کارآمد تصفیه‌خانه‌های فاضلاب از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. روند انتخاب نوع فرایند تصفیه، ابعاد تصفیه‌خانه و شاخص‌های عملیاتی اغلب بر اساس انجام مجموعه‌ای از آزمایش‌های اولیه و سپس استفاده از نتایج این آزمایش‌ها در روند طراحی صورت می‌گیرد. رویکرد دیگر طراحی فرایند با استفاده از مدل‌های ریاضی می‌باشد. در این روش با استفاده از آزمایش‌های شبیه‌سازی شده، می‌توان طیف وسیعی از فرایندها را تحت شرایط کنترل شده‌ای به کار گرفت (۱). امروزه استفاده از برنامه‌های مدل‌سازی فرایندهای تصفیه فاضلاب به کمک طراحان آمده است تا روند طراحی و بهره‌برداری از تصفیه‌خانه با دقت بیشتری انجام شود. یکی از این نرم‌افزارها،

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، مؤسسه آموزش عالی دانش‌پژوهان پیشرو و شرکت مهندسی مشاور طرح‌افرا، اصفهان، ایران  
 ۲- استاد، گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت و مرکز تحقیقات محیط زیست، پژوهشکده پیشگیری اولیه از بیماری‌های غیر واگیر، دانشگاه علوم پزشکی اصفهان، اصفهان، ایران  
**نویسنده مسؤول:** افشین ابراهیمی؛ استاد، گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت و مرکز تحقیقات محیط زیست، پژوهشکده پیشگیری اولیه از بیماری‌های غیر واگیر، دانشگاه علوم پزشکی اصفهان، اصفهان، ایران

Email: a\_abrahimi@hlth.mui.ac.ir

بالا، تولید لجن پایدارتر نسبت به سایر روش‌ها و... کاربرد بیشتری جهت حذف ازت از فاضلاب دارد. بنابراین، در مطالعه حاضر، روش MLE جهت حذف نیتروژن در نرم‌افزار مدل‌سازی شد. جهت ساده‌سازی مدل، مدل‌سازی بدون در نظر گرفتن تصفیه فیزیکی (تصفیه اولیه) در نظر گرفته شد. مدل‌سازی شامل فاضلاب ورودی، راکتور Anoxic، تانک هوادهی، پساب خروجی و خروجی لجن مازاد بود. در شکل ۱ نمایی از مدل‌سازی در نرم‌افزار ارائه شده است. مدل مذکور، حجم راکتور Anoxic و تانک هوادهی به ترتیب ۱۳۵ و ۱۰۰۰ مترمکعب در نظر گرفته شد. در این مدل، یک خط جریان لجن برگشتی از تانک ته‌نشینی ثانویه به تانک هوادهی و یک خط بازچرخش لجن از تانک هوادهی به راکتور Anoxic وجود داشت.



شکل ۱. نمایی از مدل ارائه شده در نرم‌افزار GPS-X

در جدول ۱ مشخصات فاضلاب ورودی مدل شده در نرم‌افزار GPS-X ارائه شده است.

جدول ۱. مشخصات فاضلاب وارد شده به نرم‌افزار GPS-X

شاخص	مقدار
دبی	۲۰۰۰ مترمکعب در روز
BOD	۲۵۰ میلی‌گرم در لیتر
TKN	۴۰ میلی‌گرم در لیتر
TSS	۲۶ میلی‌گرم در لیتر
VSS/TSS	۰/۷۵

BOD: Biochemical oxygen demand; TKN: Total Kjeldahl Nitrogen; TSS: Total suspended solids; VSS: Volatile suspended solids

برای یافتن حالت‌های بهینه، شاخص‌های تأثیرگذار در آزمایش‌های مقدماتی شامل نرخ بازگشت لجن برگشتی، نرخ دفع لجن مازاد و نرخ لجن بازچرخش داخلی مشخص شد. آزمایش توسط نرم‌افزار Design Expert نسخه 13.0.5.0 طراحی گردید. در این نرم‌افزار، روش Optimal که یک روش از زیرمجموعه روش‌های سطح پاسخ است، مورد استفاده قرار گرفت. از مزیت‌های روش Optimal این است که نقاط طراحی به گونه‌ای انتخاب می‌گردد که واریانس جواب پیش‌بینی شده در محدوده فضای طراحی حداقل

(MBBR) را با استفاده از نرم‌افزار GPS-X مدل‌سازی کردند و مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. هر دو مدل بر مبنای نتایج تصفیه‌خانه پایلوت کالیبره شدند. نتایج تصفیه‌خانه پایلوت و همچنین، مدل کامپیوتری نشان داد که روش MBBR در مقایسه با لجن فعال متداول، عملکرد بهتری از خود نشان می‌دهد. علاوه بر این، فرایند MBBR در ماه‌های پایین عملکرد بهتری در حذف نیتروژن دارد. در نتیجه، فرایند MBBR جهت ارتقای تصفیه‌خانه برگزیده شد (۳) Nasr و همکاران با مدل‌سازی و شبیه‌سازی یک تصفیه‌خانه Sequencing batch reactor (SBR) در مصر با استفاده از نرم‌افزار GPS-X، عملکرد تصفیه‌خانه را در شش سناریوی زمان مختلف پرکردن، واکنش و ته‌نشینی به عنوان مطالعه موردی به منظور راندمان بهینه حذف نیترات و نیتريت بررسی کردند. در تمام این شش سناریو، ورودی Total suspended solids (TSS)، Chemical oxygen demand (COD) و Total Kjeldahl Nitrogen (TKN) یکسان بود. همچنین، آن‌ها متوجه شدند که فرایند نیترات‌سازی (Nitrification) به عنوان یک عملیات انتخابگر در جلوگیری از ایجاد باکتری رشته‌ای، از مشکلات اساسی تصفیه‌خانه العجمی است (۴).

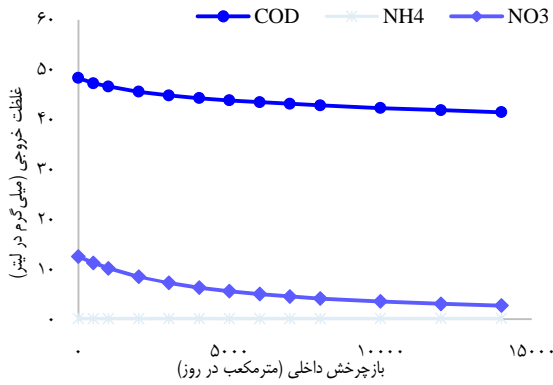
Campanella و Ontiveros با استفاده از نرم‌افزار GPS-X، به ارزیابی گزینه‌های مختلف برای یک واحد تصفیه‌خانه فاضلاب با ظرفیت حذف مواد مغذی از نظر بیولوژیکی با در نظر گرفتن مقررات آرژانتین برای تخلیه پساب پرداختند و با استفاده از ارزیابی چرخ حیات (Life cycle assessment یا LCA)، اثرات زیست‌محیطی هر گزینه را بررسی کردند. مباحث اصلی مورد بحث شامل «بهره‌وری انرژی، زمین مورد نیاز، کاهش نرخ اوتریفیکاسیون (Eutrophication) و استفاده مجدد از جامدات بیولوژیکی (Biosolid) بود. آن‌ها متوجه شدند که در فرایند ارتقای تصفیه‌خانه، فرایند حذف کامل مواد مغذی (Biological Nutrient Removal یا BNR) علاوه بر بهبود کیفیت پساب به دلیل وجود فرایندهای بی‌هوازی (Anaerobic) و بی‌اکسیژن (Anoxic)، مصرف انرژی را نیز کاهش می‌دهد. گزینه پنج مرحله‌ای Bardenpho به عنوان مساعدترین گزینه برای محیط زیست مشخص شد؛ اگرچه عملکرد پیچیده آن یک چالش مهم برای به دست آوردن کیفیت پساب بهتر و جامدات بیولوژیکی غنی شده برای استفاده مفید در زمین یا کمپوست است (۵). در پژوهش حاضر، یک تصفیه‌خانه فاضلاب در حال بهره‌برداری با استفاده از نرم‌افزار GPS-X و صحت‌سنجی آن با نتایج کیفیت پساب تصفیه‌خانه واقعی مدل‌سازی گردید و سپس نرخ لجن برگشتی، لجن بازچرخانی شده و لجن دفعی یک تصفیه‌خانه فاضلاب به روش Modified Ludzack-Ettinger (MLE) در صورتی که بیشترین تأثیر را بر کیفیت پساب خروجی به خصوص شاخص COD داشته باشد، بهینه‌سازی شد.

## روش‌ها

به منظور بررسی عوامل مؤثر بر فرایند لجن فعال در تصفیه مواد آلی و مغذی، شاخص‌های COD، نیترات و آمونیاک به عنوان شاخص سنجش آلودگی مورد بررسی قرار گرفت. مدل‌سازی با استفاده از نرم‌افزار GPS-X نسخه 8.0.1 انجام شد. یکی از روش‌های متداول حذف ازت از فاضلاب، تصفیه فاضلاب به کمک روش MLE است. این روش به دلیل بهره‌برداری آسان، شوک‌پذیری

**یافته‌ها**

در شکل‌های ۲ تا ۴ به ترتیب اثر تغییرات بازچرخش داخلی، بازچرخش لجن و لجن مازاد بر غلظت شاخص‌های COD، NO<sub>3</sub> و NH<sub>4</sub> در پساب خروجی نشان داده شده است.



شکل ۲. اثر تغییرات نرخ بازچرخش داخلی بر غلظت پساب شاخص‌های مختلف

شود. در این حالت، واریانس برابر با مربع انحراف از معیار مدل پیش‌بینی شده و مدل برازش شده است. دیگر مزیت این روش، آن است که نسبت به روش متداول Central composite تعداد حالات آزمایش را به حداقل می‌رساند. پاسخ‌های مورد تجزیه و تحلیل شامل اندازه‌گیری غلظت COD، نیترات و آمونیاک بود. لازم به ذکر است که در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب در صورت انجام عمل نیتریفیکاسیون به صورت کامل، NH<sub>4</sub> در پساب به طور کامل حذف می‌شود. در این آزمایش‌ها، انتخاب غلظت NH<sub>4</sub> در پساب به عنوان پاسخ آگاهانه صورت گرفت تا بتوان تأثیر تغییر شاخص‌های بهره‌برداری بر تغییرات غلظت آمونیاک بر پساب را بررسی نمود. در جدول ۲ سطوح انتخابی برای هر شاخص در آزمایش‌ها و در جدول ۳ آزمایش‌های طراحی شده به وسیله نرم‌افزار ارائه شده است.

جدول ۲. سطوح انتخابی برای شاخص‌های مختلف (به نسبت دبی ورودی)

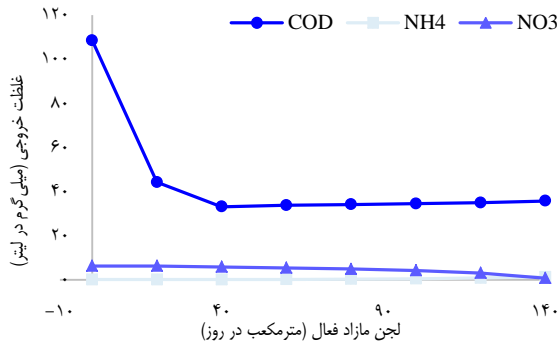
شاخص	سطوح (درصد)			
بازچرخش داخلی	۴	۲	۱	۰
بازچرخش لجن فعال	۰/۶	۰/۴	۰/۲	۰
لجن مازاد فعال	۰/۰۳	۰/۰۲	۰/۰۱	۰

جدول ۳. طراحی آزمایش‌ها و پاسخ آن‌ها

شماره آزمایش	عامل A (بازچرخش داخلی)	عامل B (بازچرخش لجن فعال)	عامل C (لجن مازاد فعال)	پاسخ ۱ (COD) (میلی‌گرم در لیتر)	پاسخ ۲ (نیترات) (میلی‌گرم در لیتر)	پاسخ ۳ (آمونیاک) (میلی‌گرم در لیتر)
۱	۰	۰/۲	۰/۰۵	۲۸/۹۸	۰	۲۴/۸۵
۲	۵	۰/۲	۰/۰۱	۵۵/۸۰	۳/۰۳	۰/۳۴
۳	۲	۰/۶	۰/۰۳	۳۴/۰۲	۵/۵۴	۰/۳۵
۴	۱	۰	۰/۰۲	۱۵۸/۲۰	۰	۲۴/۹۴
۵	۰	۰/۸	۰/۰۴	۳۴/۲۳	۱۱/۰۲	۰/۳۳
۶	۱	۰	۰/۰۲	۱۵۸/۲۰	۰	۲۴/۹۴
۷	۲	۰/۶	۰/۰۳	۳۴/۰۲	۵/۵۴	۰/۳۴
۸	۵	۰/۲	۰/۰۱	۵۵/۸۰	۳/۰۳	۰/۳۴
۹	۱	۰/۴	۰	۱۳۵/۸۰	۹/۷۶	۰/۱۵
۱۰	۵	۰	۰/۰۳	۱۲۵/۳۰	۰	۲۴/۳۰
۱۱	۲	۰/۸	۰	۱۱۳/۳۰	۶/۵۵	۰/۱۴
۱۲	۵	۰/۴	۰/۰۵	۳۷/۴۷	۰	۲/۸۴
۱۳	۱	۰/۴	۰	۱۳۵/۸۰	۹/۷۶	۰/۱۵
۱۴	۲	۰/۲	۰/۰۴	۴۴/۰۹	۰	۲۶/۰۳
۱۵	۲	۰/۶	۰/۰۳	۳۴/۰۲	۵/۵۴	۰/۳۴
۱۶	۴	۱/۰	۰	۱۰۶/۱۰	۴/۱۵	۰/۱۴
۱۷	۴	۰	۰/۰۵	۱۲۹/۲۰	۰	۲۴/۳۶
۱۸	۰	۱/۰	۰/۰۱	۴۸/۳۶	۱۲/۵۴	۰/۱۲
۱۹	۵	۰/۸	۰/۰۴	۴۸/۳۶	۱۲/۵۴	۰/۱۲
۲۰	۲	۱/۰	۰/۰۵	۳۴/۵۰	۴/۲۸	۰/۵۵

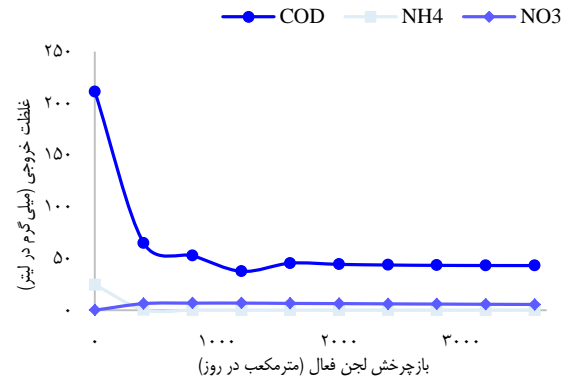
COD: Chemical oxygen demand

شاخص بر پاسخ می‌باشد. بنابراین، می‌توان شاخص‌هایی با مقدار P بیشتر از ۰/۱ را از مدل حذف کرد. در جداول ۴ تا ۶ نتایج آنالیز واریانس پیشنهادی برای مدل در پساب برای پاسخ‌های ۱ تا ۳ آمده است.



شکل ۴. اثر تغییرات لجن مازاد بر غلظت پساب شاخص‌های مختلف

در جدول ۴ مربوط به پاسخ حذف COD، عبارت اثرات متقابل BC و عبارت درجه دوم  $A^2$  به همین دلیل حذف شده‌اند. لازم به ذکر است متغیرهایی مانند AB، با وجود مقدار  $P > 0/1$ ، به دلیل این که مقدار F متناسب با آن بیشتر از ۱ است، از مدل حذف نشدند. همچنین، در جدول ۵ مربوط به پاسخ حذف نیترات، عبارت اثرات متقابل BC و AB به همین دلیل حذف شده‌اند. در جدول ۶ مربوط به پاسخ حذف آمونیاک نیز عبارت اثرات متقابل AC و عبارات درجه دوم  $A^2$  و  $C^2$  به همین دلیل حذف شدند. با توجه به جداول ۴ تا ۶ مقدار F برای مدل به ترتیب  $11/46$ ،  $6/89$ ،  $33/16$  را برای پاسخ‌های ۱، ۲ و ۳ نشان داد که بر معنی‌دار بودن تأکید دارد. همچنین، نرم‌افزار بیان داشت که تنها ۰/۰۱ درصد احتمال دارد که مقادیر F مربوط به نویز باشد. مقدار F برای عدم برازش مدل در پاسخ‌های ۱ و ۲ معنی‌دار نبودن عدم برازش را نشان داد. این عدد نسبت به خطای خالص، معنی‌دار نبود.



شکل ۳. اثر تغییرات نرخ بازچرخش لجن فعال بر غلظت پساب شاخص‌های مختلف

### مدل‌سازی و آنالیز نتایج به دست آمده از نرم‌افزار

در این بخش به بررسی نتایج حاصل از آنالیز نرم‌افزار پرداخته شد. در مدل‌سازی‌ها غلظت پساب خروجی در COD، نیترات و آمونیاک به عنوان پاسخ مورد بررسی و در قسمت بهینه‌سازی شرایط بهینه به دست آمد.

**مدل‌سازی:** در جدول ۳ طراحی آزمایش‌ها به همراه نتایج هر کدام از آزمایش‌ها ارائه شده است. پس از وارد کردن نتایج آزمایش‌ها در نرم‌افزار، نوبت به تجزیه و تحلیل نتایج می‌رسد. در این بخش، نرم‌افزار نتایج حاصل از مدل‌های مختلف را برای کاربر ارائه می‌دهد و مدلی را پیشنهاد می‌دهد که بیشترین ضریب همبستگی تعدیل شده ( $Adjusted R^2$ ) را داشته باشد. در پژوهش حاضر، بسته به نوع پاسخ، مدل پیشنهادی توسط نرم‌افزار متفاوت بود.

گام نخست برای مدل‌سازی، مشخص کردن سطح معنی‌دار بودن شاخص‌های درجه یک، درجه دو و اثرات متقابل است که این مطلب با بررسی مقدار P یا مقدار F مربوط به هر شاخص مشخص می‌شود؛ بدین صورت که اگر مقدار عدد در ستون مقدار P از ۰/۰۵ کمتر باشد، نشان دهنده تأثیرگذار بودن

جدول ۴. نتایج آنالیز واریانس پیشنهادی برای مدل در پساب برای پاسخ ۱ [حذف Chemical oxygen demand (COD)]

منبع	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	مقدار F	مقدار P
مدل	۲۷۴۹۸/۴۳	۷	۵۳۵۶/۹۲	۱۱/۴۶	۰/۰۰۰۲
A (بازچرخش داخلی)	۴۴۸/۵۰	۱	۴۴۸/۵۰	۰/۹۶	۰/۳۴۶۷
B (بازچرخش لجن فعال)	۱۰۹۸۶/۳۲	۱	۱۰۹۸۶/۳۲	۲۳/۵۰	۰/۰۰۰۴
C (لجن مازاد فعال)	۱۱۸۹۶/۰۸	۱	۱۱۸۹۶/۰۸	۲۵/۴۴	۰/۰۰۰۳
AB	۲۱۱۳/۶۵	۱	۲۱۱۳/۶۵	۴/۵۲	۰/۰۵۴۹
AC	۴۶۲۶/۶۰	۱	۴۶۲۶/۶۰	۹/۹۰	۰/۰۰۸۴
B <sup>2</sup>	۸۴۲۶/۸۱	۱	۸۴۲۶/۸۱	۱۸/۰۲	۰/۰۰۱۱
C <sup>2</sup>	۱۰۸۸/۱۳	۱	۱۰۸۸/۱۳	۲/۳۳	۰/۱۵۳۰
باقی‌مانده	۵۶۱۰/۲۹	۱۲	۴۶۷/۵۲	-	-
عدم برازش	۵۶۱۰/۲۹	۷	۸۰۱/۴۷	-	-
خطای خالص	۰	۵	۰	-	-
همبستگی کل	۴۳۱۰۸/۷۲	۱۹	-	-	-

جدول ۵. نتایج آنالیز واریانس پیشنهادی برای مدل در پساب برای پاسخ ۲ (حذف نیترات)

منبع	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	مقدار F	مقدار P
مدل	۳۰۴/۶۶	۷	۴۳/۵۲	۶/۸۹	۰/۰۰۲۰
A (بازچرخش داخلی)	۲۳/۱۲	۱	۲۳/۱۲	۳/۶۶	۰/۰۷۹۸
B (بازچرخش لجن فعال)	۱۶۱/۷۰	۱	۱۶۱/۷۰	۲۵/۶۱	۰/۰۰۰۳
C (لجن مازاد فعال)	۲۵/۸۱	۱	۲۵/۸۱	۴/۰۹	۰/۰۶۶۰
AC	۳۰/۰۱	۱	۳۰/۰۱	۴/۷۵	۰/۰۴۹۹
A <sup>2</sup>	۳۶/۶۱	۱	۳۶/۶۱	۵/۸۰	۰/۰۲۳۰
B <sup>2</sup>	۲۱/۳۶	۱	۲۱/۳۶	۳/۳۸	۰/۰۹۰۷
C <sup>2</sup>	۸/۲۳	۱	۸/۲۳	۱/۳۰	۰/۲۷۵۸
باقی‌مانده	۷۵/۷۵	۱۲	۶/۳۱	-	-
عدم برازش	۷۵/۷۵	۷	۱۰/۸۲	-	-
خطای خالص	۰	۵	۰	-	-
همبستگی کل	۳۸۰/۴۱	۱۹	-	-	-

اثرات متقابل بازچرخش داخلی و لجن برگشتی بر پاسخ COD در شکل ۵ و اثر متقابل لجن مازاد دفعی و بازچرخش داخلی بر پاسخ COD در شکل ۶ نشان داده شده است. اثرات متقابل لجن مازاد دفعی و بازچرخش داخلی بر پاسخ نیترات نیز در شکل ۷ ارایه شده است. در شکل ۸ اثرات متقابل میزان بازچرخش داخلی و لجن برگشتی بر میزان غلظت آمونیاک در پساب خروجی مشاهده می‌شود. اثرات متقابل لجن مازاد دفعی و لجن برگشتی بر پاسخ ۳ نیز در شکل ۹ نمایش داده شده است.

**بهینه‌سازی:** حالت بهینه مدل زمانی که حذف COD و نیترات و آمونیاک به عنوان پاسخ در نظر گرفته شد، به دست آمد. بدین منظور، غلظت هدف COD، نیترات و آمونیاک در نرم‌افزار به ترتیب ۵۰، ۱۱ و ۱/۹ میلی‌گرم در لیتر داده شد. لازم به ذکر است که غلظت‌های داده شده مربوط به حد مجاز غلظت مواد مذکور جهت تخلیه به آب‌های سطحی است.

معنی‌دار نبودن عدم برازش نشانه مثبتی از عملکرد مدل است؛ چرا که هدف از مدل‌سازی، برازش یک مدل است.

در جدول ۷ ویژگی‌های مدل انتخاب شده برای پاسخ برای پساب ارایه شده است. بر این اساس، به طور مثال برای پاسخ ۳ (حذف آمونیاک)، مقدار مجموع مربعات (۰/۹۴) به مجموع مربعات اصلاح شده (۰/۹۱) نزدیک است. همچنین، مجموع مربعات به عدد ۱ نزدیک است. این دو مشخصه نیز دلیلی بر صحت مدل می‌باشد. شاخص دقت کافی، نسبت سیگنال به نویز (Noise) را اندازه‌گیری می‌کند و در حالت کلی نسبت بزرگ‌تر از ۴ مطلوب است (۶).

### بررسی نمودارهای تجزیه و تحلیل آماری

**بررسی اثر متقابل بر روی پاسخ:** در این قسمت به بررسی اثر متقابل بر روی پاسخ پرداخته شد. نرم‌افزار Design Expert قابلیت بررسی اثر متقابل شاخص‌ها را دارد.

جدول ۶. نتایج آنالیز واریانس پیشنهادی برای مدل در پساب برای پاسخ ۳ (حذف آمونیاک)

منبع	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	مقدار F	مقدار P
مدل	۲۳۶۵/۹۳	۶	۳۹۴/۳۲	۳۳/۱۶	< ۰/۰۰۰۱
A (بازچرخش داخلی)	۱۱۲/۴۷	۱	۱۱۲/۴۷	۹/۴۶	۰/۰۰۸۹
B (بازچرخش لجن فعال)	۱۱۸۸/۵۰	۱	۱۱۸۸/۵۰	۹۹/۹۵	< ۰/۰۰۰۱
C (لجن مازاد فعال)	۲۳۰/۸۵	۱	۲۳۰/۸۵	۱۹/۴۱	۰/۰۰۰۷
AB	۶۳/۹۸	۱	۶۳/۹۸	۵/۳۸	۰/۰۳۷۳
BC	۱۱۶/۵۸	۱	۱۱۶/۵۸	۹/۸۰	۰/۰۰۸۰
B <sup>2</sup>	۳۴۷/۹۳	۱	۳۴۷/۹۳	۲۹/۲۶	۰/۰۰۰۱
باقی‌مانده	۱۵۴/۵۸	۱۳	۱۱/۸۹	-	-
عدم برازش	۱۵۴/۵۸	۸	۱۹/۳۲	۱/۴۴۹ E + ۰.۶	< ۰/۰۰۰۱
خطای خالص	۰/۰۱	۵	۰	-	-
همبستگی کل	۲۵۲۰/۵۱	۱۹	-	-	-

جدول ۷. ویژگی‌های مدل انتخاب شده برای پاسخ‌ها

پاسخ	مجموع مربعات اصلاح شده	مجموع مربعات	ضریب تغییر (درصد)	میانگین $\pm$ انحراف معیار	دقت کافی
۱ (حذف COD)	۰/۷۹	۰/۸۶	۲۷/۶۹	۷۸/۰۸ $\pm$ ۲۱/۶۲	۱۱/۴۰
۲ (حذف نیترات)	۰/۶۸	۰/۸۰	۵۳/۸۶	۴/۶۶ $\pm$ ۲/۵۱	۱۰/۷۱
۳ (حذف آمونیاک)	۰/۹۱	۰/۹۴	۴۴/۳۰	۷/۷۸ $\pm$ ۳/۴۵	۱۵/۸۱

COD: Chemical oxygen demand

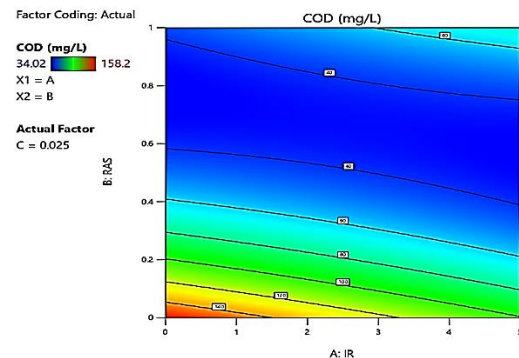
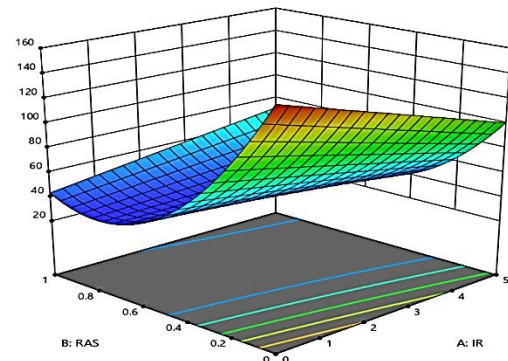
به منظور مقایسه شرایط بهینه به دست آمده، شرایط پیشنهادی نرم‌افزار مدل‌سازی و غلظت COD، نیترات و آمونیاک محاسبه گردید و در جدول ۸ ارائه شده است.

### بحث

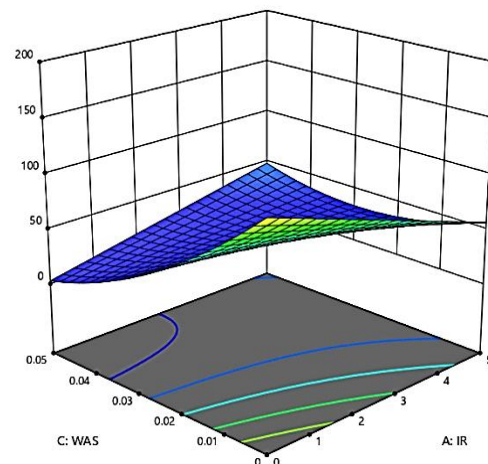
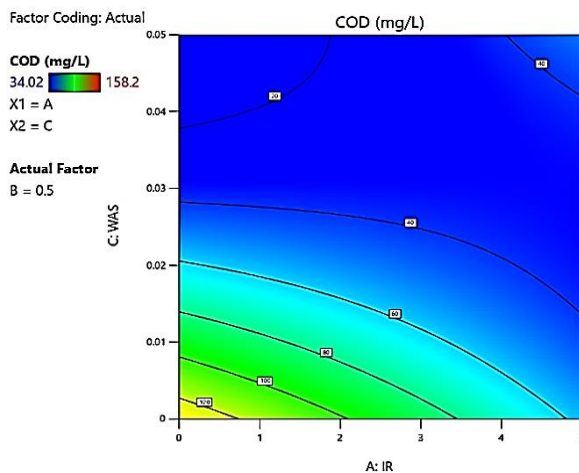
پس از ارائه یافته‌های حاصل از پژوهش در قسمت قبلی، در ادامه به بیان نتایج حاصل از یافته‌های گزارش پرداخته می‌شود. بر اساس داده‌های شکل ۲، در اثر افزایش نرخ بازچرخش داخلی، غلظت شاخص‌های COD و نیترات در پساب کاهش یافت. همچنین، در اثر تغییرات نرخ بازچرخش، تغییر محسوسی در غلظت آمونیاک مشاهده نشد. با افزایش مقدار نرخ بازچرخش، شیب نمودار مربوط به غلظت COD و نیترات کاهش پیدا کرد و تغییر محسوسی در غلظت این دو شاخص مشاهده نگردید.

همان‌گونه که در شکل ۳ آمده است، در اثر افزایش نرخ بازچرخش، تغییر محسوسی در غلظت پساب خروجی شاخص‌های آمونیاک و نیترات ایجاد نشد. همچنین، مشاهده می‌شود که در اثر افزایش نرخ لجن برگشتی، غلظت COD در پساب خروجی کاهش می‌یابد. در اثر افزایش نرخ لجن برگشتی، نرخ روند تغییرات COD نیز کاهشی بود.

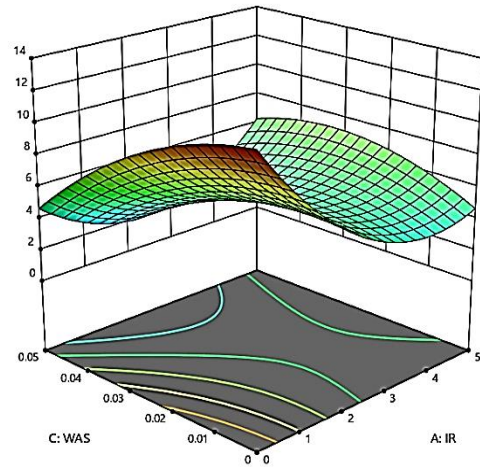
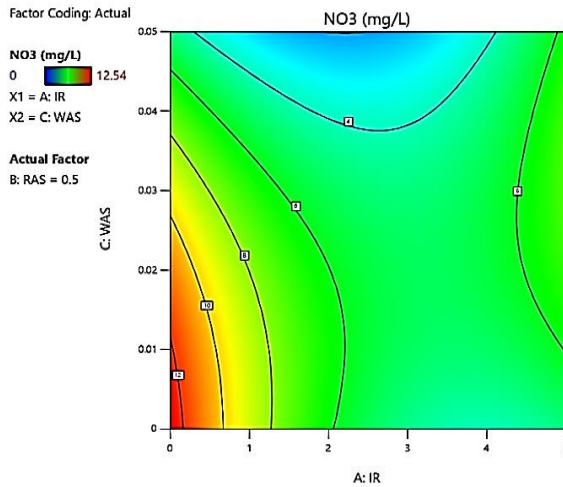
در شکل ۴ مشخص گردید که در اثر افزایش نرخ بازچرخش، تغییر محسوسی در غلظت پساب خروجی شاخص‌های آمونیاک و نیترات ایجاد نشد. در اثر افزایش نرخ لجن برگشتی، غلظت COD نیز در پساب خروجی کاهش یافت. همچنین، در اثر افزایش نرخ لجن برگشتی، تغییرات COD روند کاهشی را نشان داد.



شکل ۵. اثرات متقابل لجن برگشتی و بازچرخش داخلی بر پاسخ ۱ [(COD) Chemical oxygen demand]



شکل ۶. اثرات متقابل لجن دفعی و بازچرخش داخلی بر پاسخ ۱ [(COD) Chemical oxygen demand]



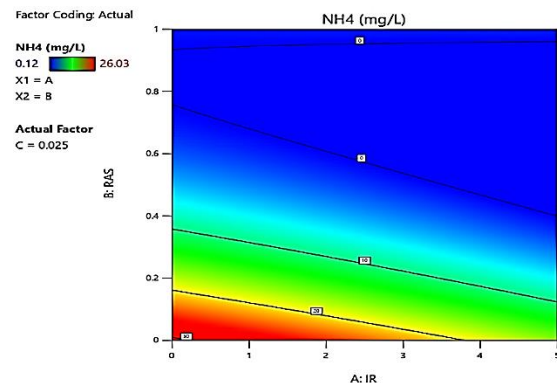
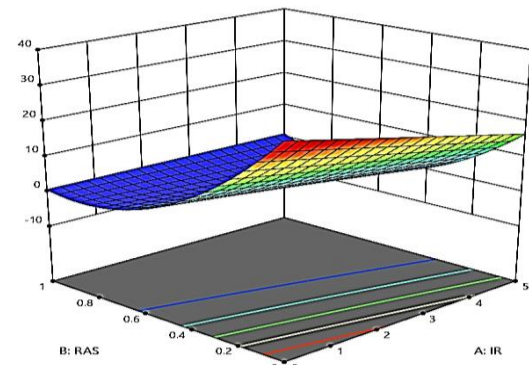
شکل ۷. اثرات متقابل لجن دفعی و بازچرخش داخلی بر پاسخ ۲ (نیترات)

مطابق با داده‌های شکل ۵، در اثر افزایش نرخ بازچرخش، غلظت COD در پساب ابتدا کاهش و در ادامه با افزایش بیشتر نرخ بازچرخش غلظت COD، مجدد افزایش یافت. به طور کلی، می‌توان عنوان کرد که با افزایش نرخ بازچرخش، غلظت COD کاهش پیدا می‌کند. در نرخ‌های پایین لجن برگشتی، اثر بازچرخش داخلی کاملاً متفاوت با اثر آن در نرخ‌های بالای لجن برگشتی است؛ به طوری که در مقادیر پایین لجن برگشتی، با افزایش نرخ بازچرخش، میزان حذف COD کاهش می‌یابد، اما در مقادیر بالاتر لجن برگشتی و با افزایش بازچرخش داخلی، راندمان حذف COD کاهش می‌شود.

همان‌گونه که در شکل ۶ مشخص است، در مقادیر پایین لجن دفعی، با افزایش نرخ بازچرخش داخلی، مقدار COD در پساب کاهش یافت. همچنین، مشاهده می‌شود که در اثر افزایش لجن دفعی، مقدار COD در پساب کاهش پیدا کرد. بر اساس داده‌های شکل ۷، در اثر افزایش نرخ بازچرخش، غلظت نیترات پساب خروجی کاهش یافت. همچنین، در نرخ‌های پایین نرخ بازچرخش، با افزایش لجن دفعی، روند خروجی نیترات کاهش می‌یابد.

در شکل ۸ مشخص گردید که با افزایش نرخ بازچرخش، غلظت آمونیاک در پساب کاهش می‌یابد. همچنین، در اثر افزایش لجن برگشتی، غلظت آمونیاک در پساب کاهش پیدا کرد. همچنین، می‌توان گفت که در مقادیر بالای لجن برگشتی، با افزایش لجن برگشتی، تأثیر قابل توجهی در غلظت آمونیاک خروجی مشاهده نشد. ضمن این که در مقادیر بالای لجن برگشتی نیز افزایش یا کاهش نرخ بازچرخش، اثر بسزایی در میزان حذف آمونیاک نداشت.

بر اساس داده‌های شکل ۹، در اثر کاهش نرخ لجن دفعی در نرخ‌های پایین لجن برگشتی، غلظت آمونیاک در پساب خروجی کاهش یافت. همچنین، در اثر افزایش نرخ لجن برگشتی، تأثیر شاخص لجن مازاد بر پاسخ کاهش پیدا کرد.



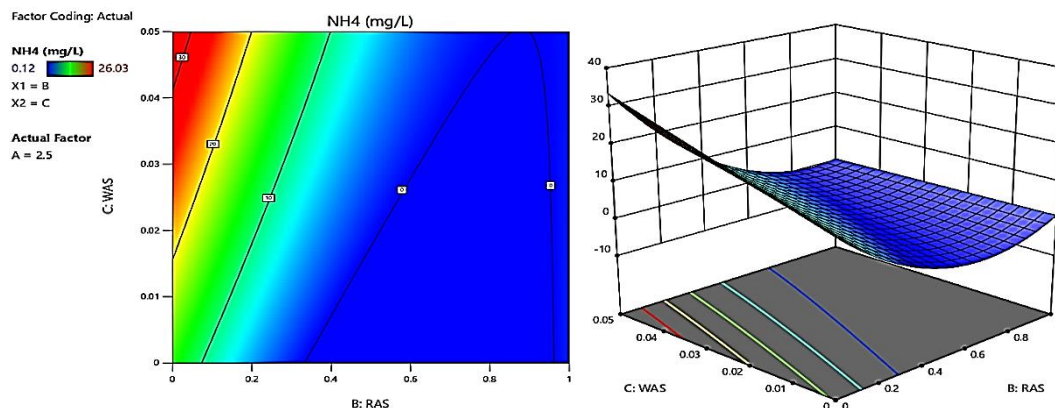
شکل ۸. اثرات متقابل نرخ لجن برگشتی و بازچرخش داخلی بر پاسخ ۳ (نیترات)

جدول ۸. مقایسه مقادیر پیش‌بینی شده توسط نرم‌افزار و مدل در حالت بهینه

بازچرخش لجن فعال	بازچرخش داخلی	لجن مازاد فعال	غلظت پیش‌بینی شده	غلظت خروجی توسط مدل
COD	نیترات	آمونیاک	COD	نیترات
۵۰	۸/۱	۱/۹	۳۳/۳۶	۸/۶۹
۰/۵۴	۱/۰	۰/۰۲۱	۰/۲	۰/۲

COD: Chemical oxygen demand





شکل ۹. اثرات متقابل لجن مازاد دفعی و لجن برگشتی بر پاسخ ۳ (نیترات)

لجن برگشتی، تأثیر قابل توجهی در غلظت آمونیاک خروجی مشاهده نمی شود. ضمن این که در مقادیر بالای لجن برگشتی نیز افزایش یا کاهش نرخ بازچرخش، اثر بسزایی در میزان حذف آمونیاک ندارد.

### تشکر و قدردانی

پژوهش حاضر برگرفته از پایان نامه مقطع کارشناسی ارشد مهندسی عمران (محیط زیست)، مصوب معاونت آموزشی دانشگاه غیر انتفاعی دانش پژوهان پیشرو اصفهان می باشد.

### نتیجه گیری

نتایج حاصل از صحت سنجی نرم افزار GPS-X نشان داد که در صورت مدل سازی دقیق کامل تصفیه خانه، می توان به نتایج حاصل از خروجی مدل اطمینان داشت و با استفاده از نتایج خروجی این نرم افزار به مشکلات بهره برداری تصفیه خانه پی برد. در اثر افزایش نرخ بازچرخش، غلظت COD در پساب ابتدا کاهش و در ادامه با افزایش بیشتر نرخ بازچرخش، غلظت COD مجدد در پساب افزایش می یابد. نرخ بازچرخش داخلی و لجن برگشتی دارای اثرات متقابل در حذف COD می باشند. در اثر افزایش نرخ لجن دفعی، غلظت COD در پساب کاهش پیدا کرد. در مقادیر بالای لجن برگشتی، با افزایش

### References

1. Tchobanoglous G, Burton FL, Stensel HD. Wastewater engineering: Treatment and reuse. New York, NY: McGraw-Hill Education; 2003.
2. Jasim NA. The design for wastewater treatment plant (WWTP) with GPS X modelling. Cogent Eng 2020; 7(1): 1723782.
3. Hvala N, Vrecko D, Burica O, Strazar M, Levstek M. Simulation study supporting wastewater treatment plant upgrading. Water Sci Technol 2002; 46(4-5): 325-32.
4. Nasr MS, Moustafa MAE, Seif HAE, El Kobrosy G. Modelling and simulation of German BIOGEST/EL-AGAMY wastewater treatment plants – Egypt using GPS-X simulator. Alexandria Eng J 2011; 50(4): 351-7.
5. Ontiveros GA, Campanella EA. Environmental performance of biological nutrient removal processes from a life cycle perspective. Bioresour Technol 2013; 150: 506-12.
6. Eslami M. Evaluating the performance of a combination of electro-oxidation and biological treatment methods in cleaning the dairy industry [MSc Thesis]. Isfahan, Iran: Isfahan University of Technology; 2003. [In Persian].