



## شبیه سازی سیستم های تصفیه آب خاکستری برای تولید آب با کیفیت غیرخوراکی

سینا لبافی<sup>۱</sup>، فاطمه راضی آستارایی<sup>۲\*</sup>، معین خالویی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری، مهندسی سیستم های انرژی- فناوری انرژی، دانشگاه تهران، تهران

<sup>۲</sup> دانشیار، مهندسی سیستم های انرژی- فناوری انرژی، دانشگاه تهران، تهران

<sup>۳</sup> دانشجوی کارشناسی، مهندسی بهداشت محیط، دانشگاه شهید بهشتی، تهران

\* تهران، پست الکترونیکی: razias\_m@ut.ac.ir

### چکیده

با لحاظ اهمیت کم آبی در ایران و لزوم تامین آب از تصفیه فاضلاب و آب خاکستری، در این مقاله با شبیه سازی و بررسی بازده حذف آلاینده ها در سیستم های متداول تصفیه آب خاکستری شامل راکتور بی هوازی لجن فعال (UASB)، (UASB) همراه با لجن فعال برگشتی، UASB همراه با راکتور هم زن پیوسته غیرهوازی (CSTR) و راکتور غشایی (MBR) همراه با راکتور CSTR در نرم افزار GPS-x شبیه سازی شده و راندمان حذف آلاینده های آب خروجی بررسی شد. طبق نتایج راکتور غشایی همراه با راکتور CSTR بالاترین راندمان حذف آلاینده های اکسیژن خواهی شیمیایی (COD)، اکسیژن خواهی بیولوژیکی (BOD)، حذف نیترژن و مواد جامد معلق (TSS) را به ترتیب برابر با ۹۴،۱۱، ۹۹،۲۹، ۷۰،۵۶ و ۹۹،۱۷ درصد داشت که در مقایسه با دیگر سیستم های تصفیه به دلیل استفاده همزمان از سیستم های فیلتراسیون و واکنش های بیولوژیکی در کنار تصفیه بی هوازی بالاتر بود و تنها این سیستم، کیفیت آب خروجی طبق استاندارد محیط زیست برای استفاده دوباره از اب فاضلاب برای مصارف غیر خوراکی را تامین کرد.

واژگان کلیدی: MBR، تصفیه فاضلاب، آب خاکستری، لجن فعال



## Simulation of gray water treatment systems to produce non-potable quality water

Sina Labbafi<sup>1</sup>, Fatemeh Razi Astaraei<sup>2\*</sup>, Moein Khaloi<sup>3</sup>

<sup>1</sup> PhD Candidate, Department of Renewable Energies, Faculty of New Sciences and Technologies, University of Tehran, Tehran, Iran

<sup>2</sup> Associate Professor, Department of Renewable Energies, Faculty of New Sciences and Technologies, University of Tehran, Tehran, Iran

<sup>3</sup> Bachelor student, Environmental Health Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran

\* Corresponding author's email address: razias\_m@ut.ac.ir

### Abstract

Due to the importance of water scarcity in Iran and the need for water supply from wastewater and gray water treatment, in this paper by simulating and investigating the removal of contaminants in conventional gray water treatment systems up flow anaerobic sludge blanket (UASB), UASB with returned activated sludge, UASB with continuous stirred tank reactor (CSTR) and membrane bioreactor (MBR) along with CSTR reactor were simulated in GPS-x software and the removal efficiency of wastewater contaminants was evaluated. According to the results, the membrane bioreactor with CSTR reactor had the highest removal efficiency of chemical oxygen demand (COD), biological oxygen demand (BOD), total nitrogen (TN) and total suspended solids (TSS) removal equal to 94.11, 99.29, 70.56 and 99.17%, respectively. Compared to other treatment systems due to the simultaneous use of filtration systems and biological reactions along with anaerobic treatment, and only this system, the quality of wastewater according to environmental standards for reuse of gray water for non-food purposes provide.

**Keywords:** MBR, wastewater treatment, gray water, active sludge



## اصطلاحات و مخفف ها

|     |                           |      |                                 |
|-----|---------------------------|------|---------------------------------|
| COD | Chemical oxygen demand    | MBR  | Membrane bio reactor            |
| BOD | Biological Oxygen Demand  | CSTR | Continuous stirred tank reactor |
| TOC | Total Organic Carbon      | UASB | Upflow anaerobic sludge blanket |
| TSS | Total suspended solids    | AS   | Active sludge                   |
| VSS | Volatile suspended solids | ReAS | Returned active sludge          |
| TN  | Total nitrogen            |      |                                 |
| TKN | Total Kjeldahl Nitrogen   |      |                                 |
| TP  | Total phosphor            |      |                                 |

## ۱- مرور ادبیات

تصفیه جداگانه انواع فاضلاب یا استفاده دوباره از آب خاکستری ( فاضلاب خانگی یا اداری ناشی از حمام، آشپزخانه، رخت شویی و غیره که حاوی فضولات انسانی و حیوانی نمیباشد ) میتواند به عنوان یک منبع تامین آب برای مصارف غیر خوراکی (حمام، استخر، آبیاری فضای سبز و غیره) در نظر گرفته شود [۱]. اهمیت این استفاده دوباره در کنار ذخیره آب، میزان فاضلاب ورودی به سیستم های دفع فاضلاب را نیز کاهش میدهد [۲]. لذا میتوان از زیرساختهای سبز شهرها شامل فضاهای سبز، آب نماها و پارک ها پشتیبانی کرده و به طور غیرمستقیم مزایایی مانند امکانات رفاهی، هوای پاک تر و کشاورزی شهری را ارتقاء داد [۳]. بنابراین، جداسازی و استفاده مجدد از آب خاکستری نه تنها باید به عنوان منبع آب جایگزین برای مناطق کم آب دیده شود، بلکه می تواند باعث استفاده پایدارتر از سایر منابع طبیعی نیز شود [۴، ۵]. اما در مقابل مشکلاتی در استفاده دوباره از آب خاکستری وجود دارد که وجود شکاف در قوانین فعلی استفاده دوباره از آب تصفیه شده، وجود ترکیب های مختلف آب خاکستری که انتخاب سیستم تصفیه مناسب را دشوار می کند و از همه مهمتر هزینه های جمع آوری آب خاکستری، تصفیه و استفاده دوباره از آن را میتوان نام برد [۶].

با توجه به میزان کم بارش سالیانه در ایران، این کشور همواره با خطر کم آبی و خشک سالی مواجه بوده است [۷]. در این بین استان یزد با میانگین بارش ۹۳ میلیمتر در سال جز استان های کم آب محسوب میشود [۸]. از جهتی با توجه به توریستی بودن این شهر، جمعیت زیادی در طول سال از این شهر بازدید میکنند. لذا تامین آب همواره یکی از دغدغه های اصلی دولت برای این شهر توریستی بوده است. از این رو تامین آب مصرفی غیرخوراکی هتل ها و دیگر زیرساخت های تفریحی با استفاده از تصفیه فاضلاب خاکستری یکی از راه های کارهای غلبه بر این مشکل میتواند باشد [۹].

تنوع در ترکیب آب خاکستری باعث ایجاد مشکل در انتخاب فن آوری های تصفیه مناسب و سیستم های استفاده مجدد می شود. مقالات مقادیر COD را بین ۱۳ تا ۵۵۰ میلی گرم در لیتر، BOD<sub>5</sub> بین ۹۰ تا ۳۶۰ میلی گرم در لیتر، ازت کل



بین ۰/۶ تا ۷۴ میلی گرم در لیتر و فسفر کل را بین ۴ تا ۱۴ میلی گرم در لیتر گزارش می دهند [۱۰، ۱۱]. این اختلاف مقادیر به دلیل استفاده متفاوت از شوینده ها، صابون ها و سایر محصولات ناشی می شود. مهمترین ویژگی آب خاکستری با توجه به تجزیه بیولوژیکی، عدم تعادل در مواد مغذی آن است [۱۲].

فرایندهای تصفیه آب با توجه به میزان و نوع الاینده های موجود در فاضلاب بسیار متنوع هستند [۱۳]. در این میان استفاده از فرایندهای ترکیبی برای افزایش کارایی سیستم بسیار متداول است. ون اسپرلینگ و همکاران [۱۴] از راکتور UASB برای تصفیه فاضلاب صنعتی استفاده کردند. سیستم مورد نظر طی کارکرد ۲۶۱ روزه میزان حذف COD بین ۶۹ الی ۸۴ درصد را دارا بود. کاستیلو و همکاران [۱۵] با افزودن فرایند لجن برگشتی در راکتور UASB میزان حذف COD را بین ۸۴ تا ۹۵ درصد به دست آوردند. اسپونزا و همکاران [۱۶] با اضافه کردن یک راکتور CSTR به این مجموعه، سیستم را برای تصفیه فاضلاب صنایع دارویی استفاده کردند. طبق نتایج میزان حذف COD به ۹۷ درصد بهبود یافت. استفاده از سیستم تصفیه غشایی MBR به همراه فرایندهای بیولوژیکی مورد توجه محققان قرار گرفته است. سیستم تصفیه غشایی با کارایی بالا در حذف مواد الاینده و بدون نیاز به راکتورهای جداگانه در ابعاد کمتر نسب به باقی سیستم ها، در حال گسترش در ابعاد صنعتی میباشد. آتاناسوا و همکاران [۱۷] با استفاده از غشاء هالوفیبر مستغرق هوازی به بازده حذف ۹۹ درصدی COD رسیدند. لذا در مقایسه با دیگر روش ها، استفاده از تصفیه غشایی بازده بالاتری دارد اما طبق نتایج مقاله فونتولاکیس و همکاران [۱۸] این روش برای هزینه هر مترمکعب آب کمتر از ۱۰ یورو توجیه اقتصادی ندارد.

هدف اصلی این مقاله مقایسه فنی تصفیه آب خاکستری حاصل از یک هتل با دبی تولید فاضلاب ۲۵۰ متر مکعب در روز بوده است. مقالات و تحقیقات زیادی در راستای تصفیه انواع فاضلاب تا به حال انجام شده است ولی به دلیل تنوع در درصد ترکیبات الاینده ها و دبی جریان، مبنای یکسانی برای مقایسه سیستم های وجود ندارد. لذا در این مقاله بازده حذف الاینده های فاضلاب خاکستری یک هتل تحت استاندارد محیط زیست در ۴ سیستم متداول UASB، UASB همراه با لجن برگشتی، UASB همراه با CSTR و غشاء هالوفیبر مستغرق هوازی با شبیه سازی در نرم افزار GPS-x، به طور کامل مقایسه شد.

## ۲- روش تحقیق

مشخصات آب خاکستری هتل همراه با استاندارد محیط زیست در جدول ۱ آمده است. دبی جریان متوسط روزانه ۲۵۰ متر مکعب در نظر گرفته شده است.

نرم افزار GPX-x یکی از مناسب ترین نرم افزارهای شبیه سازی انواع سیستم های تصفیه فاضلاب به شمار می آید. ۴ سیستم، UASB، UASB همراه با لجن برگشتی، UASB همراه با CSTR و غشاء هالوفیبر مستغرق هوازی UASB استفاده شده در مقالات برای کارکرد با فاضلاب ورودی یکسان در این نرم افزار شبیه سازی شدند.

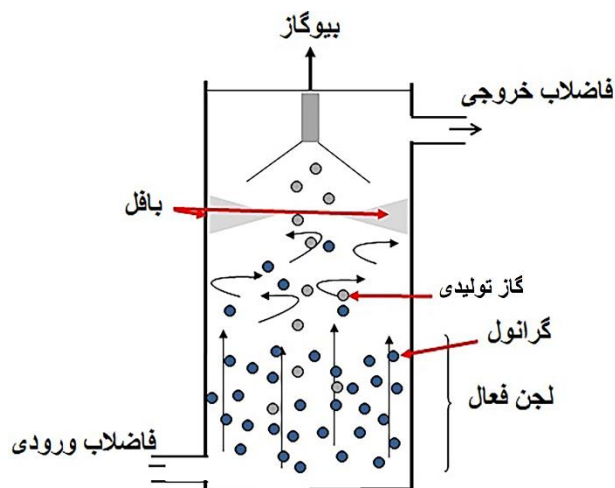


جدول ۱ مشخصات آب خاکستری و استاندارد محیط زیست

| شاخص (mg/L)                            | کمینه               | بیشینه              | استاندارد           | شاخص (mg/L)              | کمینه | بیشینه | استاندارد |
|----------------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|--------------------------|-------|--------|-----------|
| VSS (mg/L)                             | ۹/۲                 | ۱۴۹/۸               | ۴۰                  | COD (mg/L)               | ۴۱/۰  | ۵۳۵/۱  | ۱۰۰       |
| TN (mg/L)                              | ۱/۳                 | ۲۵/۵                | ۱۰                  | BOD <sub>20</sub> (mg/L) | ۵۳/۵  | ۳۶۰    | ۵۰        |
| TKN (mg/L)                             | ۲/۶                 | ۲۵/۱                | ۱۰                  | BOD <sub>5</sub> (mg/L)  | ۳۶/۶  | ۲۹۵    | ۴۰        |
| N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg/L)  | ۰/۲                 | ۱۴/۴                | ۱                   | TOC (mg/L)               | ۱۵/۰  | ۱۶۰/۴  | ۳۵        |
| P-PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> (mg/L) | ۰/۰                 | ۶/۷                 | ۵                   | Alkalinity (mg/L)        | ۱۳۶/۸ | ۲۲۷/۴  | ۱۵۰       |
| total count (CFU/100mL)                | ۱/۵*۱۰ <sup>۷</sup> | ۴/۱*۱۰ <sup>۷</sup> | ۱/۶*۱۰ <sup>۴</sup> | Conductivity (μS/cm)     | ۶۸۴/۹ | ۹۷۱/۳  | ۲۵۰       |
| total coliform (CFU/100mL)             | ۱/۴*۱۰ <sup>۶</sup> | ۴/۱*۱۰ <sup>۶</sup> | ۱/۳*۱۰ <sup>۲</sup> | pH                       | ۴/۹   | ۷/۹    | ۶-۷       |
| E.coli (CFU/100mL)                     | ۰                   | ۱/۱*۱۰ <sup>۶</sup> | ۱/۱*۱۰ <sup>۲</sup> | TSS (mg/L)               | ۹/۲   | ۱۹۵/۴  | ۵۰        |

#### • UASB

فرآیند بستر بی هوازی لجن با جریان رو به بالا (UASB)، همان طور که در شکل ۱ نمایش داده شده است، شامل راکتور UASB تانکی است که از لجن بی هوازی با خواص ته نشینی خوب پر شده است، این راکتور از سه ناحیه تشکیل شده است، ناحیه بستر لجن، ناحیه پوشش لجن و ناحیه ته نشین سازی و جداسازی گاز، فاضلاب به طور یکنواخت در سطح مقطع راکتور، از کف توزیع میشود و ابتدا از ناحیه بستر که از یک لجن متراکم با رسوب دهی بالا تشکیل شده است عبور میکند، سپس از ناحیه پوشش لجن که حدود ۷۰ درصد راکتور میباشد عبور میکند، این ناحیه از دانه های ریزتر، لخته ها و حباب های گاز تشکیل شده که با رفتن به طرف بالای راکتور، از جرم حجمی و سرعت ته نشینی ذرات کاسته می شود.

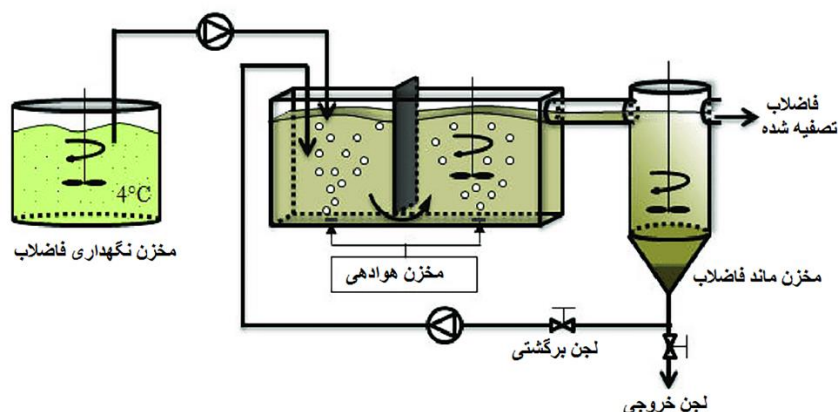


شکل ۱) شماتیک راکتور UASB [۱۹]

شکل ۵ شماتیک سیستم تصفیه UASB را نشان میدهد. از یک مخزن ته نشینی در ابتدا برای جداسازی اولیه استفاده شده است. جریان بالا دستی با دبی ۲۵۰ مترمکعب روزانه وارد راکتور بی هوازی لجن فعال شده و ۱۰ مترمکعب فاضلاب ته نشین شده وارد واحد جداساز میشود. در واحد UASB ۲۳۰ مترمکعب اب تصفیه شده خارج شده و ۱۰ مترمکعب فاضلاب ته نشینی نیز به واحد جداساز منتقل میشود. لجن فعال نیز از واحد جداساز ثانویه و جداساز لجن با دبی ۱۰ مترمکعب به سیستم باز میگردد. در نهایت ۱۰ مترمکعب روزانه فاضلاب برای معدوم سازی خارج میشود.

#### • UASB + لجن برگشتی

با توجه به شکل ۲، این سیستم از ترکیب راکتور UASB با فرایند لجن فعال برگشتی تشکیل شده است. لجن فعال جهت حذف میکروارگانیسمهای اضافی و ترکیبات جامد ایجاد شده نیازمند مراحل ته نشینی و زلال سازی است. این فرایندها زمان بر میباشند و ترکیبات جامد را به صورت کامل حذف نمیکند. در صورتیکه این فرایندها بهترین عملکرد را داشته باشند، باز هم مقداری از ترکیبات جامد (چیزی در حدود ۵ میلی گرم در هر لیتر) بهصورت معلق در آب باقی خواهد ماند.

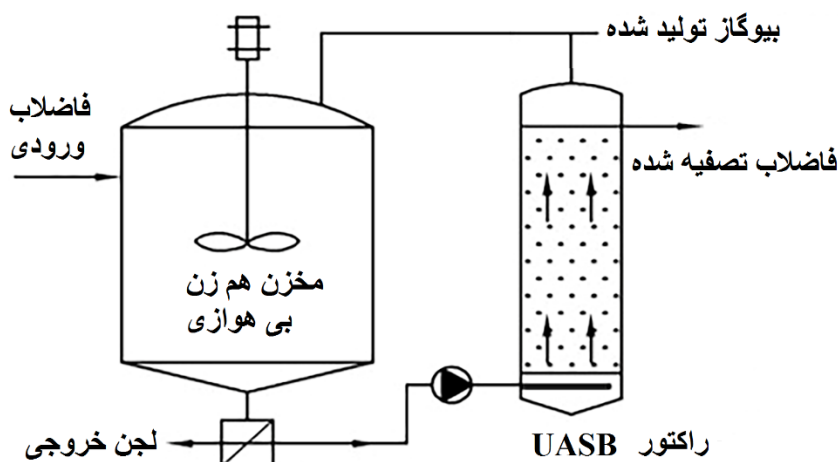


شکل ۲) شماتیک سیستم UASB همراه با لجن برگشتی [۲۰]

شکل ۶ شماتیک سیستم تصفیه UASB + لجن برگشتی را نشان میدهد. از یک مخزن ته نشینی در ابتدا برای جداسازی اولیه استفاده شده است. جریان بالا دستی با دبی ۲۴۰ مترمکعب روزانه وارد راکتور بی هوازی لجن فعال شده و ۱۰ مترمکعب فاضلاب ته نشین شده وارد واحد جداساز میشود. در واحد UASB ۲۳۰ مترمکعب اب تصفیه شده خارج شده و ۱۰ مترمکعب فاضلاب ته نشینی نیز به واحد جداساز منتقل میشود. در مرحله آخر اب وارد حوضچه تثبیت میشود. میزان ۵ مترمکعب مواد ته نشین شده که شامل مقدار زیادی لجن فعال میباشد به فاضلاب ورودی برمیگردد و مقدار ۵ مترمکعب نیز به واحد جداساز برای کاهش الاینده های فاضلاب خروجی منتقل میشود و سپس نیز واحد جداساز ثانویه و جداساز لجن با دبی ۱۰ مترمکعب به سیستم باز میگردد. در نهایت ۱۰ مترمکعب روزانه فاضلاب برای معدوم سازی خارج میشود.

### • CSTR + UASB

شماتیک این سیستم در شکل ۳ نمایش داده شده است. راکتور CSTR یک مخزن بی هوازی هم زن دار می باشد که از ته نشین شدن میکروارگانیسم ها جلوگیری میکند. در این راکتور به طور پیوسته جریان فاضلاب به آن وارد و از آن خارج میشود و در همین حین عمل تجزیه مواد آلی صورت میگیرد.



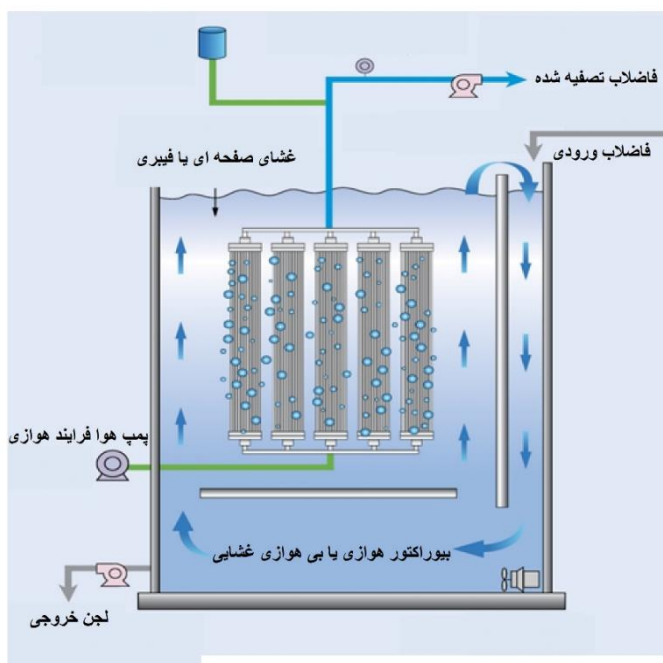
شکل ۳) شماتیک راکتور CSTR و UASB [۲۱]

شکل ۷ شماتیک سیستم تصفیه CSTR + UASB را نشان میدهد. از یک مخزن ته نشینی در ابتدا برای جداسازی اولیه استفاده شده است. جریان بالا دستی با دبی ۲۴۰ مترمکعب روزانه وارد راکتور CSTR شده و ۱۰ مترمکعب فاضلاب ته نشین شده وارد واحد جداساز میشود. در واحد CSTR فاضلاب برای انجام واکنش های بیولوژیکی نگه داری شده و سپس به واحد ته نشینی منتقل میشود. در واحد ته نشینی، جریان بالادستی با دبی ۲۵۰ خارج شده و ۵ مترمکعب نیز از جریان ته نشین به واحد جداساز منتقل میشود. در واحد UASB ۲۳۰ مترمکعب آب تصفیه شده خارج شده و ۱۰ مترمکعب فاضلاب ته نشینی نیز به واحد جداساز منتقل میشود و در ادامه در واحد جداساز ثانویه و جداساز لجن با دبی ۱۰ مترمکعب به سیستم باز میگردد. در نهایت ۱۰ مترمکعب روزانه فاضلاب برای معدوم سازی خارج میشود و ۲۳۰ مترمکعب آب تصفیه شده حاصل میشود.

### • CSTR + MBR

این سیستم شامل استفاده از راکتور هم زن CSTR در کنار بیوراکتور غشایی نشان داده شده در شکل ۴ میباشد. غشا مورد استفاده در این مدل سیستم ها دو مدل صفحه ای تخت یا هالو فیبر لوله ای میباشد. یکی از مزایای سیستم های فیلتراسیون غشایی عدم نیاز به راکتور جدا برای فرایندهای بیولوژیکی و توانایی استفاده در راکتورهای هوازی و بی هوازی است.

شکل ۸ شماتیک سیستم تصفیه CSTR + MBR را نشان میدهد. از یک مخزن ته نشینی در ابتدا برای جداسازی اولیه استفاده شده است. جریان بالا دستی با دبی ۲۴۰ مترمکعب روزانه وارد راکتور CSTR شده و ۱۰ مترمکعب فاضلاب ته نشین شده و وارد واحد جداساز میشود. در واحد CSTR فاضلاب برای انجام واکنش های بیولوژیکی نگه داری شده و سپس به واحد ته نشینی منتقل میشود. در واحد ته نشینی، جریان بالادستی با دبی ۲۵۰ خارج شده و ۵ مترمکعب نیز از جریان ته نشین به واحد جداساز و ۲۰ مترمکعب نیز دوباره به واحد CSTR برای کاهش میزان  $NH_4^+$  موجود در فاضلاب برگشت داده میشود. در واحد MBR ۲۳۰ مترمکعب آب تصفیه شده خارج شده و ۲۰ مترمکعب فاضلاب ته نشینی نیز به واحد ته نشینی برای کاهش نیترات فاضلاب بازگشت داده میشود و در ادامه در واحد جداساز ثانویه و جداساز لجن با دبی ۱۰ مترمکعب به سیستم باز میگردد. در نهایت ۱۰ مترمکعب روزانه فاضلاب برای معدوم سازی خارج میشود و ۲۳۰ مترمکعب آب تصفیه شده حاصل میشود.



شکل ۴) شماتیک راکتور غشایی [۲۲]

### ۳- یافته ها

چهار سیستم معرفی شده تحت شرایط عملیاتی یکسان برای اجرا به مدت یکسال شبیه سازی شدند. جدول ۲ کیفیت الاینده های خروجی حاصل از شبیه سازی را نشان میدهد. سیستم ۳ و ۴ کمترین میزان دفع فاضلاب و هدررفت آب را نسبت به بقیه دارا بودند که علت آن را میتوان استفاده از سیستم بازگشتی و فرایندهای ته نشینی اضافی دانست. یکی از عوامل الاینده بسیار مهم  $NH_4^+$  محلول در آب میباشد. استفاده از فرایندهای بیولوژیکی هوازی سبب از بین رفتن این عامل میشود که تنها در سیستم ۴ این عامل به حد مجاز رسید. درصد حذف COD گزارش شده در هر چهار سیستم با نتایج



حاصل از آزمایش های تجربی گزارش شده در مقالات هم خوانی داشتند ولی تنها سیستم ۳ و ۴ میزان استاندارد مناسب برای COD را دارا بودند که این نتایج با میزان BOD موجود در آب خروجی هم خوانی دارند.

جدول ۲ مشخصات آب خروجی از سیستم های تصفیه

| شاخص                           | واحد                   | فاضلاب ورودی | UASB + AS | UASB + ReAS | UASB + CSTR | MBR + CSTR |
|--------------------------------|------------------------|--------------|-----------|-------------|-------------|------------|
| Flow                           | m <sup>3</sup> /d      | ۲۵۰          | ۲۲۴       | ۲۲۰         | ۲۳۰         | ۲۳۰        |
| TSS                            | mg/L                   | ۲۲۴/۵۳       | ۱۰/۳۱     | ۱/۰۰        | ۰/۴۷        | ۱/۸۵       |
| VSS                            | mg/L                   | ۱۶۸/۳۵       | ۷/۷۳      | ۰/۵۱        | ۰/۳۲        | ۱/۱۰       |
| Soluble cBOD <sub>5</sub>      | mgO <sub>2</sub> /L    | ۹۰/۳۴        | ۹۰/۳۴     | ۹۰/۳۴       | ۴۱/۲۷       | ۱/۵۶       |
| cBOD <sub>5</sub>              | mgO <sub>2</sub> /L    | ۲۲۱/۷۷       | ۹۶/۳۷     | ۹۰/۷۱       | ۴۱/۴۹       | ۱/۵۶       |
| Soluble COD                    | mgCOD/L                | ۱۴۷/۵        | ۱۴۷/۵۰    | ۱۴۷/۵۰      | ۷۹/۰۶       | ۲۳/۶۸      |
| COD                            | mgCOD/L                | ۴۳۰          | ۱۶۰/۴۷    | ۱۴۸/۲۹      | ۷۹/۵۵       | ۲۵/۳۱      |
| Ammonia Nitrogen               | mgN/L                  | ۱۴           | ۱۳/۴۵     | ۱۳/۴۵       | ۱۴/۷۰       | ۰/۰۷       |
| Nitrite                        | mgN/L                  | ۰            | ۰/۰۰      | ۰/۰۰        | ۰/۰۰        | ۰/۰۹       |
| Nitrate                        | mgN/L                  | ۰            | ۰/۰۰      | ۰/۰۰        | ۰/۰۰        | ۶/۶۳       |
| Soluble TKN                    | mgN/L                  | ۱۶/۷۷        | ۱۶/۲۳     | ۱۶/۲۳       | ۱۵/۹۲       | ۱/۶۹       |
| TKN                            | mgN/L                  | ۲۸/۹۷        | ۱۶/۷۹     | ۱۶/۳۰       | ۱۵/۹۵       | ۱/۸۰       |
| TN                             | mgN/L                  | ۲۸/۹۷        | ۱۶/۷۹     | ۱۶/۳۰       | ۱۵/۹۵       | ۸/۵۲       |
| Ortho-Phosphate                | mgP/L                  | ۸            | ۵/۶۲      | ۵/۶۲        | ۵/۲۷        | ۰/۰۲       |
| TP                             | mgP/L                  | ۹/۹۷         | ۵/۹۲      | ۵/۹۱        | ۵/۵۰        | ۰/۰۴       |
| Total Soluble Inorganic Carbon | mgC/L                  | ۸۴           | ۶۹/۵۹     | ۶۹/۵۹       | ۳۳/۴۹       | ۰/۹۸       |
| TOC                            | mgC/L                  | ۱۳۷/۶        | ۵۱/۳۵     | ۴۷/۴۶       | ۲۸/۴۹       | ۸/۱۸       |
| Alkalinity                     | mgCaCO <sub>3</sub> /L | ۲۸۲/۰۴       | ۲۴۱/۰۰    | ۲۳۳/۶۵      | ۱۱۵/۹۶      | ۳/۳۱       |
| pH                             | -                      | ۷            | ۷         | ۷           | ۷           | ۷          |

جدول ۳ درصد حذف و کاهش المان ها را نشان میدهد. از نکات قابل توجه افزایش ۵ درصدی میزان  $\text{NH}_4^+$  در سیستم ۳ میباشد که دلیل آن کاهش میزان نیترات و نیتريت موجود در فاضلاب و عدم حذف نیتروژن و در نتیجه تولید  $\text{NH}_4^+$  است. سیستم ۴ همان طور که انتظار میرفت، در مقایسه با دیگر سیستم ها بازده حذف بسیار بالاتری دارد که دلیل آن استفاده از سیستم غشایی و بالاتر بودن راندمان آن در مقایسه با سیستم لجن فعال است.

جدول ۴ کیفیت آب خروجی هر سیستم را در مقایسه با استاندارد محیط زیست برای آب غیر شرب نشان میدهد. همان طور که ذکر شده بود سیستم ۴ بالاترین کیفیت خروجی را دارا بود که دلیل اصلی آن استفاده از سیستم غشایی و جریان برگشتی بود.



جدول ۳ درصد حذف آلاینده های فاضلاب ورودی توسط سیستم های تصفیه

| شخص                            | UASB + AS | UASB + ReAS | UASB + CSTR ++ | MBR + CSTR |
|--------------------------------|-----------|-------------|----------------|------------|
| TSS                            | ۹۵/۴۰     | ۹۹/۵۵       | ۹۹/۷۸          | ۹۹/۱۷      |
| VSS                            | ۹۵/۴۰     | ۹۹/۶۹       | ۹۹/۸۰          | ۹۹/۳۴      |
| Soluble cBOD <sub>5</sub>      | ۰/۰۰      | ۰/۰۰        | ۵۴/۳۱          | ۹۸/۲۶      |
| cBOD <sub>5</sub>              | ۵۶/۵۴     | ۵۹/۱۰       | ۸۱/۲۹          | ۹۹/۲۹      |
| Soluble COD                    | ۰/۰۰      | ۰/۰۰        | ۴۶/۴۰          | ۸۳/۹۴      |
| COD                            | ۶۲/۶۸     | ۶۵/۵۱       | ۸۱/۴۹          | ۹۴/۱۱      |
| Ammonia Nitrogen               | ۳/۸۹      | ۳/۸۹        | ۵/۰۱-          | ۹۹/۴۸      |
| Soluble TKN                    | ۳/۲۵      | ۳/۲۵        | ۵/۰۹           | ۸۹/۹۱      |
| TKN                            | ۴۲/۰۴     | ۴۳/۷۶       | ۴۴/۹۳          | ۹۳/۷۷      |
| TN                             | ۴۲/۰۴     | ۴۳/۷۶       | ۴۴/۹۳          | ۷۰/۵۶      |
| Ortho-Phosphate                | ۲۹/۷۲     | ۲۹/۷۲       | ۳۴/۰۹          | ۹۹/۷۸      |
| TP                             | ۴۰/۶۶     | ۴۰/۷۲       | ۴۴/۸۸          | ۹۹/۶۵      |
| Total Soluble Inorganic Carbon | ۱۷/۱۵     | ۱۷/۱۵       | ۶۰/۱۳          | ۹۸/۸۲      |
| TOC                            | ۶۲/۶۸     | ۶۵/۵۰       | ۷۹/۲۹          | ۹۴/۰۵      |
| Alkalinity                     | ۱۴/۵۵     | ۱۷/۱۵       | ۵۸/۸۸          | ۹۸/۸۲      |

جدول ۴ مقایسه کیفیت آب تصفیه شده با استاندارد محیط زیست

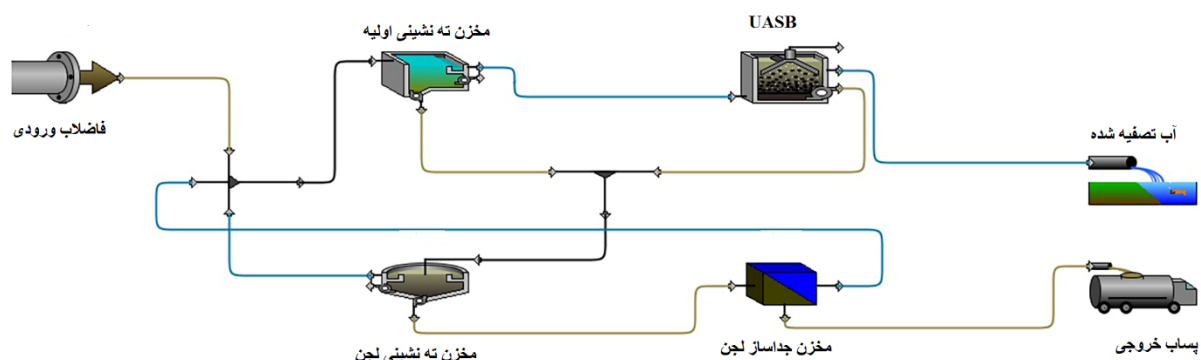
| شخص (mg/L)                      | استاندارد | UASB + AS | UASB + ReAS | UASB + CSTR | MBR + CSTR |
|---------------------------------|-----------|-----------|-------------|-------------|------------|
| COD                             | ۱۰۰       | ۱۴۸/۲۸    | ۱۶۰/۴۷      | ۷۹/۵۵       | ۲۵/۳۱      |
| BOD <sub>20</sub>               | ۵۰        | ۹۰/۳۴     | ۹۰/۳۴       | ۴۱/۲۷       | ۱/۵۶       |
| BOD <sub>5</sub>                | ۴۰        | ۹۰/۷۱     | ۹۶/۳۷       | ۴۱/۴۹       | ۱/۵۶       |
| TOC                             | ۳۵        | ۴۷/۴۶     | ۵۱/۳۵       | ۲۸/۴۹       | ۸/۱۸       |
| Alkalinity                      | ۱۵۰       | ۲۳۳/۶۴    | ۲۴۱/۰۰      | ۱۱۵/۹۶      | ۳/۳۱       |
| TSS                             | ۵۰        | ۱/۰۰      | ۱۰/۳۱       | ۰/۴۷        | ۱/۸۵       |
| VSS                             | ۴۰        | ۰/۵۱      | ۷/۷۲        | ۰/۳۲        | ۱/۱۰       |
| TN                              | ۱۰        | ۱۶/۲۹     | ۱۶/۷۸       | ۱۵/۹۵       | ۸/۵۲       |
| TKN                             | ۱۰        | ۱۶/۲۹     | ۱۶/۷۹       | ۱۵/۹۵       | ۱/۸۰       |
| N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>  | ۱         | ۱۳/۴۵     | ۱۳/۴۵       | ۱۴/۷۰       | ۰/۰۷       |
| P-PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> | ۵         | ۵/۶۲      | ۵/۶۲        | ۵/۲۷        | ۰/۰۲       |

## ۴- بحث و نتیجه گیری

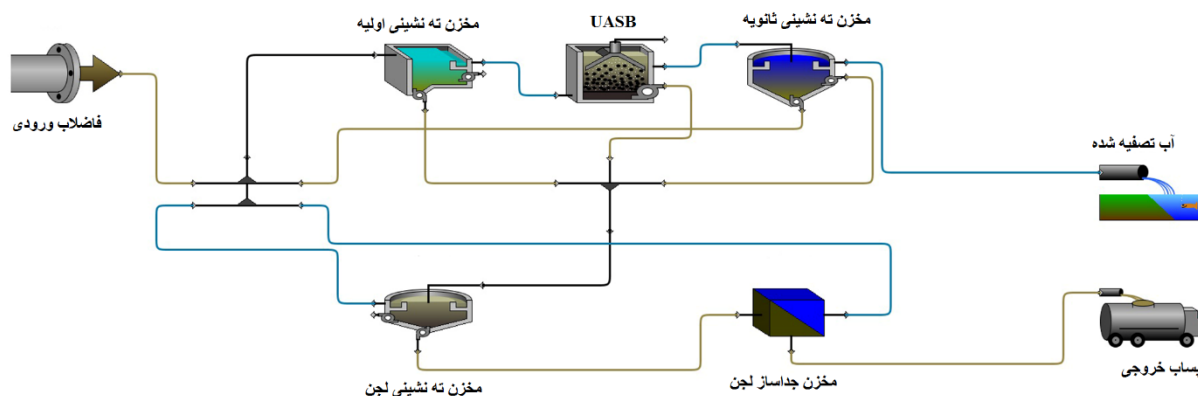
نتیجه شبیه سازی سیستم UASB برای حذف COD برابر با ۶۲ درصد به دست آمد در حالی که طبق گزارش ون اسپرلینگ و همکاران [۱۴] بازده حذف COD این سیستم ۶۵ الی ۸۴ درصد گزارش شده بود که دلیل این کاهش بازدهی محتوای COD پایین تر در فاضلاب ورودی سیستم آن ها بود. همان طور که گزارش شد این سیستم قابلیت خوبی در حذف نیترات و فسفات موجود در فاضلاب ندارد. این اختلاف نتایج برای سیستم UASB همراه با لجن برگشتی شبیه ساز با گزارش کاستیلو و همکاران [۱۵] نیز مشاهده شد که به علت همین مورد بوده است و این دو سیستم فقط برای فاضلاب های دارای الاینده کم و پایین مناسب هستند. سیستم معرفی شده توسط اسپونزا و همکاران [۱۶] نیز با اجرا در شبیه ساز قابلیت حذف COD مناسبی داشت اما این سیستم در حذف یون های  $\text{NH}_4^+$  و  $\text{PO}_4^{3-}$  دارای ضعف بود. در نهایت سیستم غشایی معرفی شده توسط آتاناسوا و همکاران [۱۷] تنها سیستم قابل اتکا برای تصفیه آب طبق استانداردهای محیط زیست برای استفاده غیر خوراکی بود.

سیستم غشایی با توجه به هزینه بالای تامین غشاء و لزوم پاک سازی و تعویض آن، در مقایسه با دیگر روش ها هزینه بالاتری دارد ولی این سیستم با کاهش مصرف آب و عدم نیاز به تصفیه های ثانویه، توانایی تامین آب غیرخوراکی برای مناطق خشک و کم آب را دارا می باشد. لذا این سیستم های غشایی میتوانند جایگزین مناسبی برای طرح های هزینه بر انتقال آب دریا یا دیگر سیستم های آب ساز باشند.

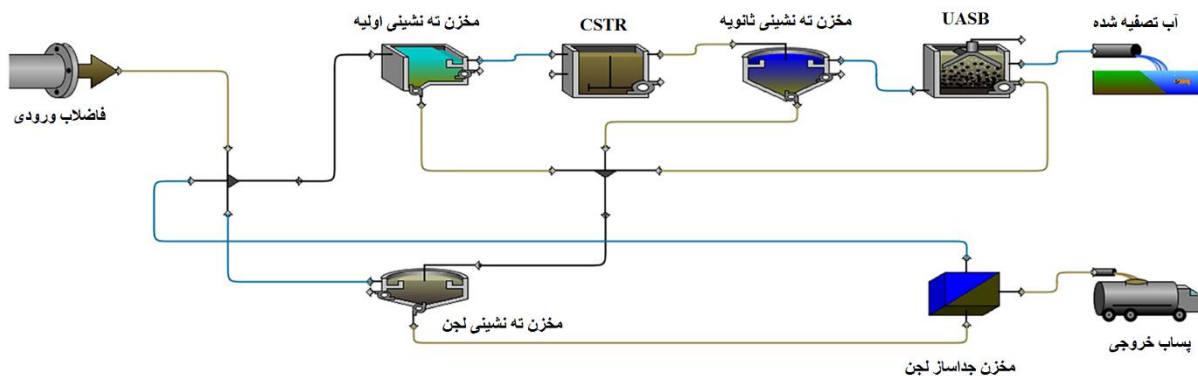
## ضمایم:



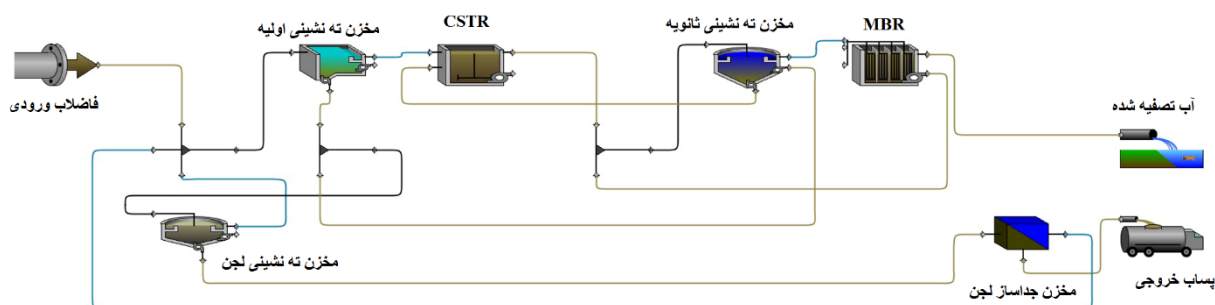
شکل ۵) شماتیک سیستم شبیه سازی شده UASB



شکل ۶) شماتیک سیستم شبیه سازی شده UASB همراه با لجن برگشتی



شکل ۷) شماتیک سیستم شبیه سازی شده UASB با اراکتور CSTR



شکل ۸) شماتیک سیستم شبیه سازی شده MBR با راکتور CSTR



## منابع

- [۱] T. Opher and E. Friedler, "Comparative LCA of decentralized wastewater treatment alternatives for non-potable urban reuse," *Journal of environmental management*, vol. 182, pp. 464-476, 2016.
- [۲] F. Li, K. Wichmann, and R. Otterpohl, "Review of the technological approaches for grey water treatment and reuses," *Science of the total environment*, vol. 407, no. 11, pp. 3439-3449, 2009.
- [۳] M. Pidou, F. A. Memon, T. Stephenson, B. Jefferson, and P. Jeffrey, "Greywater recycling: treatment options and applications," in *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Engineering Sustainability*, 2007, vol. 160, no. 3, pp. 119-131: Thomas Telford Ltd.
- [۴] A. R. Zahedi, S. Labbafi, A. Ghaffarinezhad, and K. Habibi, "Design, construction and performance of a quintuple renewable hybrid system of wind/geothermal/biomass/solar/hydro plus fuel cell," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 46, no. 9, pp. 6206-6224, 2021.
- [۵] S. Labbafi and A. Zahedi, "The Determination of Optimum Conditions for Biodiesel-based Microalgae Growth Using Machine Vision," *Journal of Machine Vision and Image Processing*, vol. 7, no. 2, pp. 137-148, 2021.
- [۶] K. Kotut, V. Ngángá, and F. Kariuki, "The potential of a low cost technology for the greywater treatment," 2011.
- [۷] عساکره، حسین، and مازینی، "تحلیل توزیع احتمال بارش سالانه استان گلستان،" تحقیقات منابع آب ایران، vol. 6, no. 1, pp. 51-55, 2010.
- [۸] H. Tabari and P. H. Talaee, "Temporal variability of precipitation over Iran: 1966–2005," pp. 313-320, 2011. *Journal of Hydrology*, vol. 396, no. 3-4.
- [۹] E. Friedler, R. Kovalio, and N. Galil, "On-site greywater treatment and reuse in multi-storey buildings," *Water science and technology*, vol. 51, no. 10, pp. 187-194, 2005.
- [۱۰] M. M. Mekonnen and A. Y. Hoekstra, "Global gray water footprint and water pollution levels related to anthropogenic nitrogen loads to fresh water," *Environmental science & technology*, vol. 49, no. 21, pp. 12860-12868, 2015.
- [۱۱] L. a. Hernández Leal, N. Vieno, H. Temmink, G. Zeeman, and C. J. Buisman, "Occurrence of xenobiotics in gray water and removal in three biological treatment systems," *Environmental science & technology*, vol. 44, no. 17, pp. 6835-6842, 2010.
- [۱۲] A. Butkovskiy, A. W. Jeremiasse, L. Hernandez Leal, T. van der Zande, H. Rijnaarts, and Zeeman, "Electrochemical conversion of micropollutants in gray water," *G. Environmental science & technology*, vol. 48, no. 3, pp. 1893-1901, 2014.
- [۱۳] M. Bajpai, S. S. Katoch, and N. K. Chaturvedi, "Comparative study on decentralized treatment technologies for sewage and graywater reuse—a review," *Water Science and Technology*, vol. 80, no. 11, pp. 2091-2106, 2019.
- [۱۴] M. Von Sperling, V. Freire, and C. de Lemos Chernicharo, "Performance evaluation of a UASB-activated sludge system treating municipal wastewater," *Water Science and Technology*, vol. 43, no. 11, pp. 323-328, 2001.



- A. Castillo and J. Mata-Alvarez, "A kinetic study of a combined anaerobic-aerobic system for treatment of domestic sewage," *Water Research*, vol. 33, no. 7, pp. 1742-1747, 1999 [۱۵]
- D. T. Sponza and P. Demirden, "Treatability of sulfamerazine in sequential upflow anaerobic sludge blanket reactor (UASB)/completely stirred tank reactor (CSTR) processes," *Separation and Purification Technology*, vol. 56, no. 1, pp. 108-117, 2007 [۱۶]
- N. Atanasova, M. Dalmau, J. Comas, M. Poch, I. Rodriguez-Roda, and G. Buttiglieri, "Optimized MBR for greywater reuse systems in hotel facilities," *Journal of Environmental Management*, vol. 193, pp. 503-511, 2017 [۱۷]
- Petousi, and T. Manios, "Single house on-site grey water .M. Fountoulakis, N. Markakis, I treatment using a submerged membrane bioreactor for toilet flushing," *Science of the total environment*, vol. 551, pp. 706-711, 2016 [۱۸]
- UASB reactor," *Bioresource E. Behling et al.*, "Domestic wastewater treatment using a Technology," vol. 61, no. 3, pp. 239-245, 1997 [۱۹]
- T. Alvarino, S. Suarez, J. Lema, and F. Omil, "Understanding the removal mechanisms of PPCPs and the influence of main technological parameters in anaerobic UASB and aerobic CAS reactors," *Journal of Hazardous materials*, vol. 278, pp. 506-513, 2014 [۲۰]
- O. N. Ağdağ and D. T. Sponza, "Anaerobic/aerobic treatment of municipal landfill leachate in sequential two-stage up-flow anaerobic sludge blanket reactor (UASB)/completely stirred tank reactor (CSTR) systems," *Process Biochemistry*, vol. 40, no. 2, pp. 895-902, 2005 [۲۱]
- S. Fazal, B. Zhang, Z. Zhong, L. Gao, and X. Chen, "Industrial wastewater treatment by Protection, using MBR (membrane bioreactor) review study," *Journal of Environmental* .vol. 6, no. 06, p. 584, 2015 [۲۲]