مطالعه طرح‌های بهینه سازی شبکه آب یک واحد صنعتی فرایندی به منظور کاهش مصرف آب: مقایسه رویکرد استفاده‌دوباره مستقیم و احیا ـ استفاده دوباره

مصطفی باور، محمدحسین صراف زاده*+

کرسی یونسکو در بازیافت آب، دانشکده مهندسی شیمی، پردیس فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

علیرضا سرحدی

دانشکده مهندسی شیمی، نفت و گاز، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

چکیده: در این پژوهش، شبکه آب یک واحد صنعتی فرایندی به منظور کاهش مصرف آب در این واحد صنعتی بهینه سازی شد. در مرحله اول شبکه توزیع آب و بخار واحد صنعتی به دست آمده و شبکه به صورت مدل شدت جریان ثابت مورد ارزیابی قرار گرفت. همچنین شش پارامتر COD، TSS، Oil، TDS، H_2S و NH_3 به عنوان پارامترهای محدودکننده در نظر گرفته شدند. در مرحله بعد یعنی تعیین کم‌ترین مصرف آب و تولید پساب و اصلاح شبکه، دو رویکرد استفاده دوباره مستقیم و احیا ـ استفاده دوباره به کارگرفته شد. با به‌کارگیری رویکرد استفاده دوباره مستقیم میزان کاهش مصرف آب ٪۱/۷۹ به دست آمده است. در ادامه با استفاده از واحد تصفیه پساب برای احیای جریان منابع، پس از انجام بهینه سازی ریاضی، میزان کاهش مصرف آب هیچ تغییر محسوسی در مقایسه با رویکرد استفاده دوباره مستقیم نداشت. علت این امر بالا بودن TDS خروجی از واحد احیا است. با استفاده از یک سامانه غشایی به منظور کاهش TDS خروجی واحد تصفیه پساب، میزان کاهش مصرف آب ٪۳۵/۲۶ می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: سنتز شبکه آب، بهینه سازی ریاضی، بازیافت آب، واحد صنعتی فرایندی، پینچ آبی.

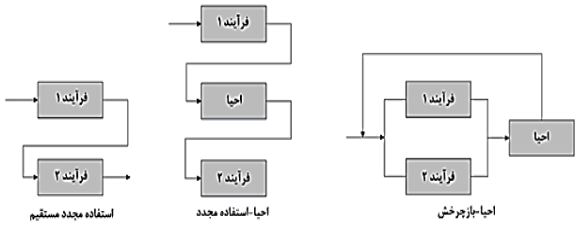
KEYWORDS: *Water network synthesis, Mathematical optimization, Water recovery, Process industrial unit, Water pinch.*

مقدمه

در سال‌های اخیر به دلیل توسعه اقتصادی و صنعتی، میزان تقاضا برای مصرف آب شیرین در صنایع گوناگون افزایش یافته است. این افزایش تقاضا، موجب پدید آمدن نگرانی‌هایی در زمینه تأمین آب شیرین و منابع آب پاک در سطح جهان شده و همچنین نیاز به مدیریت پایدار مصرف را افزایش داده است. براساس گزارش آژانس بین المللی انرژی در سال ۲۰۱۲ میلادی، نیاز آبی بخش‌های صنعتی نیروگاهی و نفت و گاز در آینده رشد چشمگیری خواهند داشت [۱]. با توجه به شرایط کنونی، لزوم به‌کارگیری رویکردهایی برای کاهش مصرف آب و تولید پساب در صنایع گوناگون به ویژه صنعت نفت و گاز گریز ناپذیر است.

* عهده‌دار مکاتبات

+ E-mail: sarrafzdh@ut.ac.ir



شکل ۱. رویکردهای رایج کاهش مصرف آب [۲]

استفاده دوباره مستقیم (یا بازچرخش) و احیا ـ استفاده دوباره را می توان از رویکردهای رایج برای کاهش مصرف آب به‌حساب‌آورد. این رویکردها برای نخستین بار توسط *ونگ و اسمیت*[۱] مطرح شد (شکل ۱) [۲].

مفهوم استفاده دوباره از آب و بازچرخش آن، انتقال پساب خروجی از یک واحد مصرف کننده آب به دیگر فرایندهای مصرف کننده آب از جمله همان فرایندی است که پساب در آن تولید شده است. این کار در صورتی امکان‌پذیر است که سطح آلاینده‌ها در پساب از سطح مجاز آن در ورودی‌های فرایند تجاوز نکنند. هنگامی که گزینه‌های استفاده دوباره و بازچرخش، میزان مصرف آب شیرین و تولید پساب را کاهش داده و بیش از آن قادر به کاهش مصرف نباشد، می‌توان از تصفیه جزئی آب (به عنوان نمونه فرایندهای غشایی یا دفع با بخار) استفاده شود. در مجموع چگونگی ترکیب روش‌های یادشده با عنوان "مسئله سنتز شبکه آب"[۲] شناخته می‌شود [۳].

مسئله سنتز شبکه آب در دو گروه کلی دسته بندی می شود. این دو گروه با عنوان‌های ۱) مسئله بار جرمی ثابت[۳] و ۲) مسئله شدت‌جریان ثابت[۴] شناخته می‌شوند. مسئله بار جرمی ثابت در اساس با تمرکز بر عملیات مصرف‌کننده آبی است که در آن انتقال جرم صورت می‌پذیرد. در حالی که رویکرد مسئله شدت جریان ثابت برخلاف رویکرد مسئله بار جرمی ثابت، مبتنی بر مدل‌های انتقال جرمی نیست. در این رویکرد، مسئله از منظر مصارف آب و منابع آب مورد تعریف و ارزیابی قرار می‌گیرد [۴]. مسئله سنتز شبکه آب را می توان به دو روش آنالیز پینچ آب و بهینه سازی ریاضی حل نمود. حل مسئله سنتز شبکه آب با رویکرد آنالیز پینچ آب در اساس برای سامانه‌هایی گزارش شده است که در آن‌ها مصرف آب تنها توسط یک آلاینده محدود می‌شود. این در حالی است که استفاده از رویکرد بهینه سازی ریاضی این امکان را فراهم می کند که بتوان مسئله سنتز شبکه آب را با در نظر گرفتن همه پیچیدگی‌ها ازجمله تابع هدف هزینه‌ها، آلاینده‌های چندگانه، محدودیت‌های عملیاتی گوناگون و غیره بررسی نمود [۵]. پژوهش‌های اخیری که در این زمینه صورت گرفته به شکل گسترده‌ای با مسئله توسعه مدل‌های بهینه‌سازی برای افزایش دقت و همچنین درنظرگرفتن ویژگی‌های مسئله در واقعیت، با استفاده از برنامه‌ریزی ریاضی[۵]، درگیر بوده است [۶]. رویکرد برنامه‌ریزی ریاضی در اساس نیازمند ساختن یک ابرساختار[۶] از همه یا بیش‌تر اتصال‌های ممکن بین اجزای شبکه آب است که فرموله کردن آن ابرساختار منجر به یک مسئله LP[۷]، NLP[۸]، MILP[۹]، MINLP[۱۰] خواهد شد [۷].

مسئله سنتز شبکه آب در یک پالایشگاه نفت در کارهای اولیه ارایه‌شده در این زمینه دیه می‌شود. *تاکاما* و *همکاران*[۱۱] برای نخستین بار با استفاده از برنامه‌ریزی ریاضی به حل یک نمونه از پالایشگاه نفت پرداختند [۸] که در ادامه آن تا به امروز پژوهش های بسیاری در این زمینه صورت گرفته است [۱۳ ـ ۹].

واحد صنعتی مورد مطالعه در این پژوهش یک واحد صنعتی فرایندی در ایران است. منبع تأمین آب مصرفی این واحد، آب‌های زیرزمینی است. پساب تولیدی در این واحد صنعتی پس از تصفیه در واحد تصفیه پساب صنعتی، برای آبیاری مورد استفاده قرار می‌گیرد. به منظور کاهش مصرف آب و اصلاح شبکه آب و بخار در این واحد از بهینه سازی ریاضی استفاده می شود. پیاده سازی مدل های بهینه سازی بر مبنای دو رویکرد استفاده دوباره مستقیم (یا بازچرخش) و احیا ـ استفاده دوباره صورت گرفته که در پایان نتیجه‌های به‌دست‌آمده از این دو رویکرد با یک‌دیگر مقایسه می شوند.

بخش نظری

مرحله استخراج اطلاعات

سنتز شبکه آب به منظور کمینه سازی مصرف آب و تولید پساب در واحد صنعتی مورد مطالعه در دو مرحله صورت می‌پذیرد. در مرحله اول که با عنوان استخراج اطلاعات و مستند سازی شناخته می‌شود، نخست شبکه توزیع آب و بخار واحد تدوین می‌شود. بدین منظور، واحدهای مصرف کننده آب شناسایی شده و برای همه جریان‌ها

(۱) Wang and Smith
(۲) Water Network Synthesis Problem
(۳) Fixed Load Problem
(۴) Fixed Flowrate Problem
(۵) Mathematical Programming
(۶) Superstructure
(۷) Linear Programming
(۸) Nonlinear Programming
(۹) Mixed Integer Linear Programming
(۱۰) Mixed Integer Nonlinear Programming
(۱۱) Takama et al.

موازنه جرم برقرار می شود. پس از مشخص شدن شبکه توزیع آب و بخار واحد، مصرف‌های گوناگون آب و منبع‌هایی که امکان استفاده دوباره و یا احیا ـ استفاده دوباره داشته، مشخص می‌شوند. برای مصرف‌های گوناگون، شدت جریان آب مورد نیاز و بیش‌ترین غلظت آلاینده های محدود کننده در جریان خروجی از واحد تصفیه پساب در این مرحله تعیین می‌شوند. آلاینده‌های محدود کننده آلاینده‌هایی هستند که برای آن‌ها در بخش مصرف، محدودیت ورود وجود داشته باشد. هم‌چنین می‌بایست کیفیت جریان‌های پساب (منابع) از نظر میزان آلاینده‌های محدودکننده موجود در آن ها مشخص شود.

در این پژوهش با توجه به شرایط فرایند، COD[1]، Oil، TSS[2]، TDS[3]، H_2S[4] و NH_3[5] به عنوان پارامترهای محدود کننده در نظر گرفته شده‌اند.

مدل سازی شبکه مصرف آب با استفاده از رویکرد استفاده دوباره مستقیم

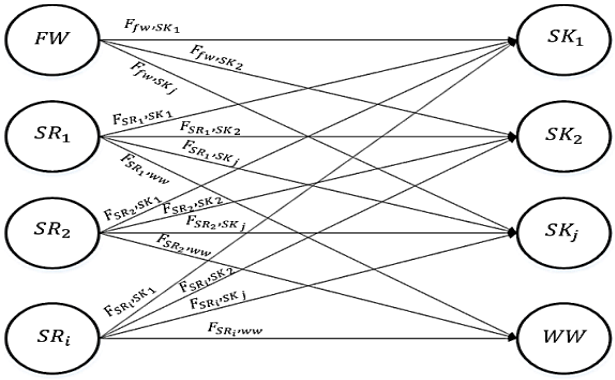
برای کمینه‌سازی مصرف آب با استفاده از روش بهینه‌سازی، نخست باید نمایشی از همه و یا بیش‌تر اتصال‌های ممکن بین اجزای شبکه (منابع، مصارف و واحد احیا) ایجاد کرد. این نمایش به عنوان ابر ساختار شناخته می‌شود. شکل ۲ ابر ساختار تشکیل‌شده برای حالتی را نشان می‌دهد که کمینه‌سازی مصرف آب و تولید پساب از طریق استفاده دوباره مستقیم صورت می‌گیرد [۱۴].

همان‌گونه که دیده می‌شود، هر جریان پساب که به عنوان یک منبع (SR_i) محسوب می شود، به اجزای گوناگونی تقسیم شده (با شدت جریان نامعلوم) که هر جز به یک مصرف‌کننده (SK_j) اختصاص می‌یابد. پساب به صورت یک مصرف‌کننده در نظر گرفته می‌شود که منابع پس از اختصاص یافتن به مصارف، باقی‌مانده شدت‌جریان خود را دفع می‌کنند (ارسال به WW[6]). جریان‌های دفع شده در واحد صنعتی مورد مطالعه به واحد تصفیه پساب صنعتی ارسال می شود. منبع آب تازه نیز به مانند سایر منابع به همه مصرف‌ها به جز پساب اختصاص می‌یابد. تابع هدف، کمینه کردن شدت‌جریان آب تازه است:

$$z = \min F_{fw} \qquad (۱)$$

که کل شدت‌جریان آب تازه از مجموع شدت‌جریان‌های آب تازه اختصاص یافته به هر کدام از مصرف‌ها تعیین می شود:

$$F_{fw} = \sum_i F_{fw,SK_j} \qquad (۲)$$



شکل ۲. نمایش اتصال‌های ممکن بین منابع و مصرف‌های واحد صنعتی مورد مطالعه با رویکرد استفاده دوباره مستقیم [۱۴]

معادله‌های محدودکننده تابع هدف به صورت زیر خواهد بود.

شدت‌جریان مورد نیاز مصرف‌ها:

$$\sum_i F_{SR_i,SK_j} + F_{fw,SK_j} = F_{SK_j} \quad \forall j \qquad (۳)$$

بیش‌ترین بار جرمی آلاینده b، قابل پذیرش توسط مصرف‌ها:

$$\sum_i F_{SR_i,SK_j} C_{SR_i,b} + F_{fw,SK_j} C_{fw,b} \le F_{SK_j} C_{SK_j,b} \qquad (۴)$$

موازنه جرم منابع:

$$\sum_j F_{SR_i,SK_j} + F_{SR_i,ww} = F_{SR_i} \qquad (۵)$$

شرط منفی نبودن شدت جریان ها:

$$F_{SR_i,SK_j}, F_{fw,SK_j}, F_{SR_i,ww} \ge 0 \quad \forall i, j \qquad (۶)$$

معادله زیر نیز برای تعیین مقدار پساب منتقل شده به واحد تصفیه پساب صنعتی ارایه می شود:

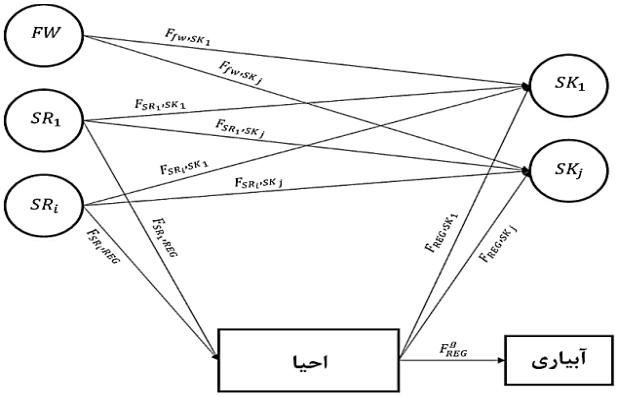
$$F_{ww} = \sum_i F_{SR_i,ww} \qquad (۷)$$

همان‌گونه که دیده می‌شود، فرمول نویسی مسئله منجر به یک مسئله LP شده که از حل آن جواب بهینه جامع[7] به دست می‌آید.

مدل سازی شبکه مصرف آب با استفاده از رویکرد احیا ــ استفاده دوباره (استفاده از واحد تصفیه پساب فعلی به عنوان واحد احیا)

ابر ساختار تشکیل شده در مدل شبکه مصرف آب با استفاده از رویکرد احیا ـ استفاده دوباره نسبت به حالت استفاده دوباره مستقیم

(۱) Chemical Oxygen Demand
(۲) Total Suspended Solid
(۳) Total Dissolved Solid
(۴) Hydrogen Sulfide
(۵) Ammonia
(۶) Wastewater
(۷) Global Optimum Solution



شکل ۳. نمایش اتصال‌های ممکن بین منبع‌ها و مصرف‌های واحد صنعتی مورد مطالعه با رویکرد احیا ـ استفاده دوباره

متفاوت خواهد بود. در این حالت واحد احیا به‌صورت واسطه بین منبع‌ها و مصرف‌ها در نظر گرفته می‌شوند که در صورت نیاز، منابع آب را پیش از استفاده دوباره و یا بازچرخش در بخش مصرف‌ها، به سطح کیفی دلخواه می‌رسانند. شکل ۳ ابر ساختار شبکه در این حالت را نشان می‌دهد .

همان‌گونه که دیده می‌شود واحد تصفیه پساب صنعتی فعلی به صورت یک واحد احیا عمل کرده که بخشی از شدت‌جریان منابع گوناگون (به جز منبع آب تازه) را دریافت و پس از احیا به مصارف گوناگون تحویل می‌دهد. این واحد احیا از نوع تک گذر[1] با غلظت خروجی ثابت است (علت آن در بخش نتیجه‌ها و بحث بیان خواهد شد). همچنین بر اساس شرایط حال حاضر، باقی‌مانده پساب احیاشده برای مصارف آبیاری مورد استفاده قرار خواهد گرفت.

در این حالت تابع هدف و محدودیت‌های آن به صورت زیر خواهد بود:

تابع هدف:

$$z = \min F_{fw} = \min \left(\sum_j F_{fw,SK_j}\right) \qquad (۸)$$

شدت جریان مورد نیاز مصرف‌ها:

$$\sum_i F_{SR_i,SK_j} + F_{REG,SK_j} + F_{fw,SK_j} = F_{SK_j} \quad \forall j \qquad (۹)$$

بیش‌ترین بار جرمی آلاینده b، قابل پذیرش توسط مصرف‌ها:

$$\sum_i F_{SR_i,SK_j} C_{SR_i,b} + F_{fw,SK_j} C_{fw,b} + F_{REG,SK_j} C^{out}_{REG,b} \le F_{SK_j} C_{SK_j,b} \quad \forall j,b \qquad (۱۰)$$

$C^{out}_{REG,b}$ غلظت آلاینده b در جریان خروجی از واحد احیا را نشان می‌دهد.

موازنه جرم منبع‌های:

$$\sum_j F_{SR_i,SK_j} + F_{SR_i,REG} = F_{SR_i} \qquad (۱۱)$$

شرط منفی نبودن شدت جریان ها:

$$F_{SR_i,SK_j}, F_{fw,SK_j}, F_{SR_i,REG}, F_{REG,SK_j} \ge 0 \quad \forall i,j \qquad (۱۲)$$

معادله‌های زیر برای تعیین شدت جریان های پساب ورودی به واحد احیا، پساب احیا شده برگشتی به سامانه و پساب احیا شده مورد استفاده در مصرف‌های آبیاری نوشته می شود:

$$F^{in}_{REG} = \sum_i F_{SR_i,REG} \qquad (۱۳)$$

$$F^{sys}_{REG} = \sum_j F_{REG,SK_j} \qquad (۱۴)$$

$$F^{g}_{REG} = F^{in}_{REG} - F^{sys}_{REG} \qquad (۱۵)$$

که F^{in}_{REG}، F^{sys}_{REG} و F^{g}_{REG} به ترتیب شدت جریان ورودی به واحد احیا، شدت جریان احیا شده برگشتی به سامانه و شدت جریان احیا شده برای مصرف‌های آبیاری هستند.

در اینجا نیز همانند پیش فرمول نویسی مسئله منجر به یک مسئله LP شده که جواب جامع بهینه دارد.

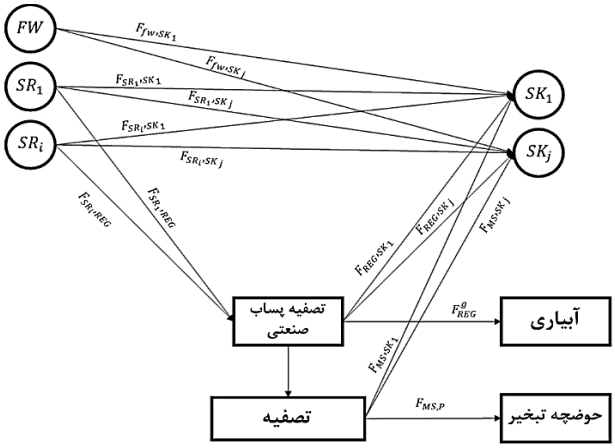
مدل‌سازی شبکه مصرف آب با استفاده از رویکرد احیا ـ استفاده دوباره (استفاده از یک واحد تصفیه دیگر برای تصفیه بهتر پساب خروجی از واحد تصفیه فعلی)

در صورتی که کیفیت پساب خروجی از واحد تصفیه پساب فعلی برای تامین نیاز مصارف مناسب نباشد می توان از یک واحد تصفیه برای تصفیه بهتر پساب خروجی از واحد تصفیه فعلی استفاده نمود. بدین منظور از یک واحد تصفیه تفکیکی[2] با غلظت خروجی ثابت استفاده می‌شود (علت استفاده از واحد تصفیه تفکیکی در بخش نتیجه‌ها و بحث بیان خواهد شد).

در این حالت، ابر ساختار مسئله به صورت شکل ۴ ترسیم می‌شود همان‌گونه که در شکل ۴ دیده می‌شود پساب خروجی از واحد تصفیه پساب صنعتی به سه بخش تقسیم می‌شود. بخشی از آن برای تأمین نیازهای مصرف‌ها فرستاده می‌شود. بخشی دیگر برای بهبود کیفیت پساب به سامانه تصفیه غشایی ارسال می‌شود. باقی‌مانده شدت‌جریان خروجی از واحد تصفیه پساب، نیاز مصارف آبیاری را تأمین می‌کند.

(۱) Single Pass

(۲) Partitioning Treatment



شکل ۴. نمایش اتصال‌های ممکن بین منابع و مصارف واحد صنعتی مورد مطالعه در صورت استفاده از سامانه تصفیه غشایی برای تصفیه خروجی واحد تصفیه پساب صنعتی

فرمول نویسی مسئله در این حالت به صورت زیر خواهد بود:

تابع هدف:

$$z = \min F_{fw} = \min \left(\sum_{j=1}^{4} F_{fw,SK_j}\right) \quad (۱۶)$$

شدت جریان مورد نیاز مصرف‌ها:

$$\sum_{i=1}^{5} F_{SR_i,SK_j} + F_{REG,SK_j} + F_{MS,SK_j} + F_{fw,SK_j} = F_{SK_j} \quad \forall j \quad (۱۷)$$

بیش‌ترین بار جرمی آلاینده b، قابل پذیرش توسط مصرف‌ها:

$$\sum_{i=1}^{5} F_{SR_i,SK_j} C_{SR_i,b} + F_{fw,SK_j} C_{fw,b} + F_{REG,SK_j} C^{out}_{REG,b} + F_{MS,SK_j} C^{out}_{MS,b} \le F_{SK_j} C_{SK_j,b} \quad \forall j,b \quad (۱۸)$$

موازنه جرم منابع:

$$\sum_{j=1}^{4} F_{SR_i,SK_j} + F_{SR_i,REG} = F_{SR_i} \quad \forall i \quad (۱۹)$$

موازنه جرم حدور واحد تصفیه پساب صنعتی:

$$F^{in}_{REG} = \sum_{i=1}^{5} F_{SR_i,REG} \quad (۲۰)$$

$$F^{in}_{REG} = \sum_{j=1}^{4} F_{REG,SK_j} + F_{REG,MS} + F_{REG,G} \quad (۲۱)$$

موازنه جرم دور سامانه تصفیه غشایی:

$$F^{in}_{MS} = F_{REG,MS} = \sum_{j=1}^{4} F_{MS,SK_j} + F_{MS,P} \quad (۲۲)$$

$$F_{REG,MS} \times \alpha = \sum_{j=1}^{4} F_{MS,SK_j} \quad (۲۳)$$

شرط منفی نبودن شدت جریان ها:

$$F_{SR_i,SK_j}, F_{fw,SK_j}, F_{SR_i,REG}, F_{REG,SK_j}, F_{MS,SK_j}, F_{REG,G}, F_{MS,P} \ge 0 \quad \forall i,j \quad (۲۴)$$

F_{MS,SK_j} شدت جریان تصفیه شده در سامانه تصفیه غشایی است که به مصرف کننده SK_j اختصاص یافته است. $F_{MS,P}$ جریان باقی مانده از سامانه غشایی است که به حوضچه‌های تبخیر فرستاده می‌شود. $F_{REG,MS}$ و $F_{REG,G}$ نیز شدت جریان خروجی از واحد تصفیه پساب صنعتی است که به ترتیب به سامانه تصفیه غشایی و مصرف‌های آبیاری فرستاده می‌شود. در این حالت نیز تمام معادله‌های خطی بوده و از حل آن جواب بهینه جامع به دست خواهد آمد.

نتیجه‌ها و بحث

نتیجه‌های استخراج اطلاعات

شکل ۵ شبکه توزیع آب و بخار واحد صنعتی را نشان می‌دهد.

مقدار مصرف آب تازه و پساب تولید شده در این واحد فرایندی به ترتیب ۱۷۷ t/h و ۸۲ t/h است. همان‌گونه که در شکل ۵ دیده می‌شود چهار مصرف کننده آب تازه و پنج جریان منبع در واحد صنعتی مورد مطالعه وجود دارد. جدول ۱ و جدول ۲ به ترتیب شدت‌جریان آب مورد نیاز مصرف‌ها و غلظت قابل‌پذیرش آلاینده‌ها و نیز شدت‌جریان‌های منابع و غلظت آلاینده‌ها در هر کدام از جریان‌های منبع را نشان می‌دهد.

جدول۳ مقدارهای غلظت آلاینده‌های محدود کننده در جریان خروجی از واحد تصفیه پساب صنعتی را نشان می‌دهد. با توجه به شدت جریان ورودی به واحد تصفیه پساب صنعتی و مقایسه آن با شدت‌جریان خروجی از آن، این نکته قابل دستیابی است که این شدت‌جریان‌ها تقریباً برابر هستند (کم‌تر از ۱٪ اختلاف). بنابراین واحد تصفیه پساب صنعتی را می‌توان به صورت یک واحد احیای تک‌گذر با غلظت خروجی ثابت درنظرگرفت.

جدول ۱. مقدارهای شدت‌جریان مورد نیاز مصرف‌ها و غلظت‌های قابل‌پذیرش آلاینده‌ها

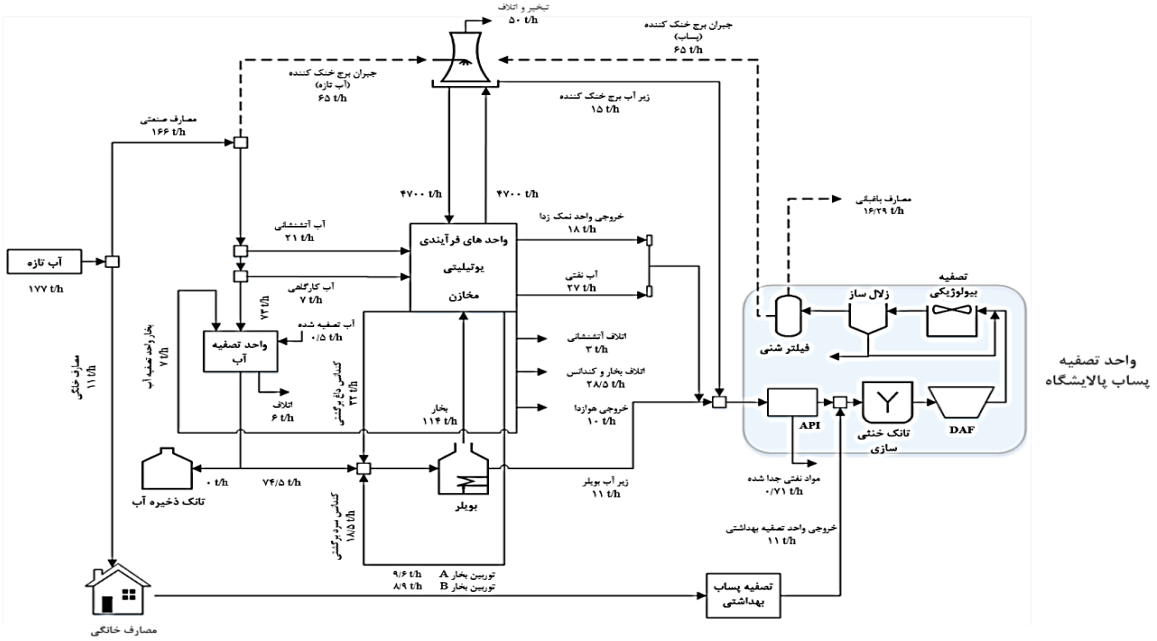
SK_j	مصرف‌کننده	$F\ (t/h)$	$COD\ (ppm)$	$TSS\ (ppm)$	$Oil\ (ppm)$	$TDS\ (ppm)$	$H_2S\ (ppm)$	$NH_3\ (ppm)$
	مصارف خانگی	۱۱	۰	۵	۰	۴۴۱	۰	۰
SK_1	آب آتش‌نشانی	۲۱	۵	۵	۰	۴۴۱	۰	۰
SK_2	واحد تصفیه آب	۷۳	۵	۵	۰	۴۴۱	۰	۰
SK_3	آب کارگاهی	۷	۵	۵	۰	۴۴۱	۰	۰
SK_4	جبران برج خنک‌کننده	۶۵	۴۰	۱۵	۱	۵۰۰	۰	۰

جدول ۲. شدت‌جریان منبع ها و غلظت آلاینده‌های محدودکننده در آن‌ها

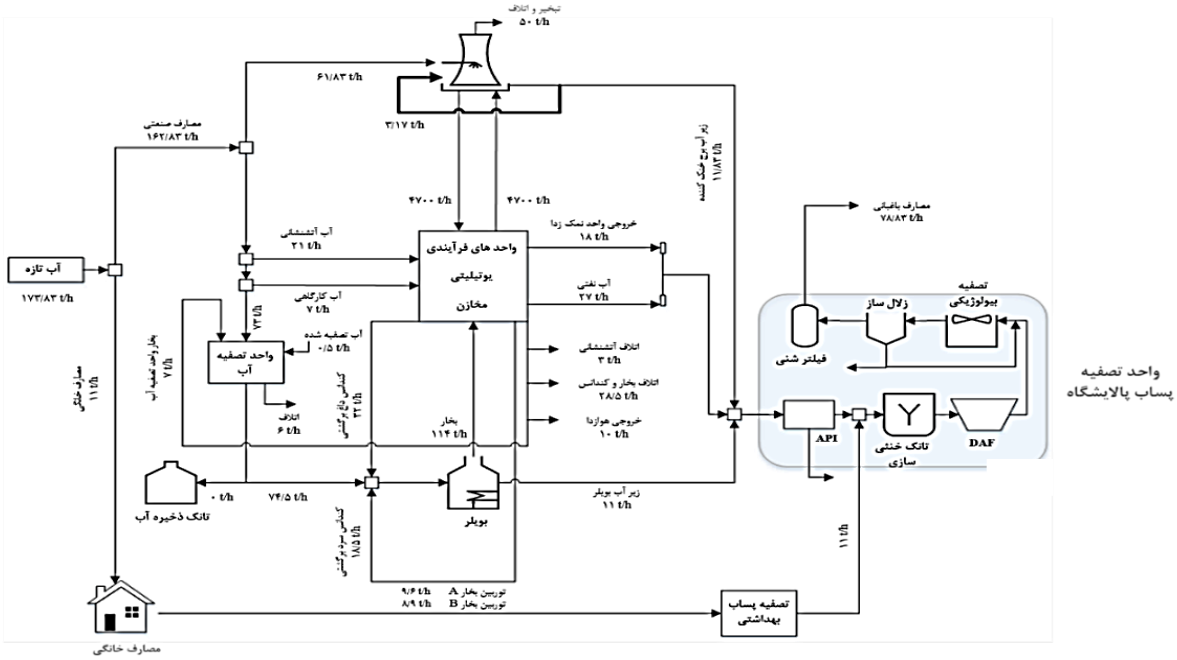
SR_i	منبع	$F\ (t/h)$	$COD\ (ppm)$	$TSS\ (ppm)$	$Oil\ (ppm)$	$TDS\ (ppm)$	$H_2S\ (ppm)$	$NH_3\ (ppm)$
SR_1	زیرآب بویلر	۱۱	۱	۳	۰	۲۳۷۰	۰	۰
SR_2	زیرآب برج خنک‌کننده	۱۵	۰	۷	۱	۱۶۵۰	۰	۰
SR_3	خروجی نمک زدا	۱۸	۳۷۴	۷	۹/۳	۱۴۵۲	۶۱	۴
SR_4	خروجی تصفیه بهداشتی	۱۱	۱۰۶	۱۵۷	۶/۵	۱۰۰۹	۱۰/۲	۳۳
SR_5	آب نفتی	۲۷	۸۰۲	۹۵	۳۲۵	۱۳۵۰	۱۶۵	۶۲۲
FW	آب تازه		۰	۵	۰	۴۴۱	۰	۰

جدول ۳. غلظت آلاینده‌های محدودکننده در خروجی واحد تصفیه پساب صنعتی

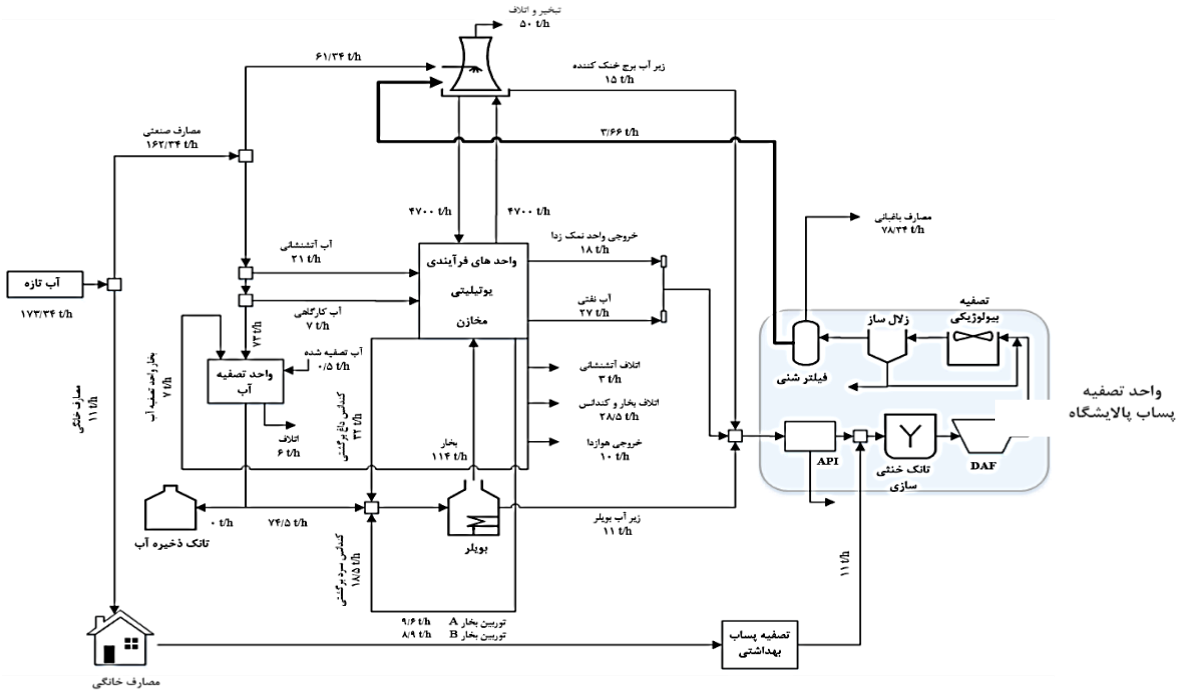
آلاینده‌های محدودکننده	غلظت آلاینده خروجی واحد تصفیه پساب صنعتی (ppm)
COD	۴۰
TSS	۱۵
Oil	۱
TDS	۱۴۸۸
H_2S	۰
NH_3	۰



شکل ۵. شبکه فعلی توزیع آب و بخار واحد صنعتی مورد مطالعه



شکل ۶. شبکه اصلاح‌شده آب و بخار واحد صنعتی مورد مطالعه با استفاده از بهینه‌سازی ریاضی (رویکرد استفاده دوباره مستقیم)



شکل ۷. شبکه اصلاح‌شده آب و بخار واحد صنعتی مورد مطالعه با استفاده از بهینه‌سازی ریاضی (رویکرد احیا ـ استفاده دوباره)

نتیجه‌های بهینه سازی شبکه آب واحد صنعتی مورد مطالعه با استفاده از رویکرد استفاده دوباره مستقیم

در شکل ۶ شبکه اصلاح‌شده آب واحد صنعتی مورد مطالعه با استفاده از بهینه‌سازی ریاضی (رویکرد استفاده دوباره مستقیم) دیده می‌شود.

در این حالت، ۱۷۳/۸۳ t/h آب تازه در واحد مصرف می‌شود که کاهش ٪۱/۷۹ در مصرف آب تازه را نشان می‌دهد. نیاز مصرف‌های آتش‌نشانی، تصفیه آب صنعتی و آب کارگاهی به صورت کامل از آب تازه تأمین می‌شود. برای جبران برج خنک‌کننده، ۶۱/۸۳ t/h آب تازه

مصرف شده و همچنین ۳/۱۷ t/h زیر آب برج خنک کننده بازچرخانی شده و به برج تزریق می‌شود.

نتیجه‌های بهینه سازی شبکه آب واحد صنعتی مورد مطالعه با استفاده از رویکرد احیا ــ استفاده دوباره (استفاده از واحد تصفیه پساب فعلی به عنوان واحد احیا)

در شکل ۷ شبکه اصلاح‌شده آب واحد صنعتی مورد مطالعه به روش بهینه‌سازی ریاضی با بکارگیری رویکرد احیا ـ استفاده دوباره (واحد تصفیه پساب صنعتی به عنوان واحد احیا در نظر گرفته شده است) دیده می‌شود.

مقدار مصرف آب تازه ۱۷۳/۳۳ t/h بوده که به‌تقریب با رویکرد استفاده دوباره مستقیم (۱۷۳/۸۳ t/h) برابر است. این در حالی که شبکه اصلاح شده آن‌ها قدری با هم متفاوت می باشد. در شبکه اصلاح شده با رویکرد احیا ـ استفاده دوباره، برای تامین آب جبران برج خنک کننده از ۳/۶۶ t/h پساب احیا شده استفاده می شود ولی در استفاده دوباره مستقیم، ۳/۱۷ t/h زیر آب برج خنک کننده بازچرخانی می شود. در اینجا این سؤال به وجود می‌آید که چرا باوجود احیای پساب، مقدار مصرف آب تازه کاهش محسوسی نیافته است. علت این امر افزایش TDS خروجی از واحد احیا (۱۴۸۸ ppm) در مقایسه با TDS جریان ورودی به آن (۱۴۱۹/۶ ppm) است که باعث می شود کیفیت پساب خروجی برای استفاده دوباره در مصرف‌های واحد مناسب نباشد. علت افزایش TDS، افزودن سولفوریک اسید (H_2SO_4) و کاستیک ($NaOH$) در مخزن خنثی‌سازی برای تنظیم pH است.

بنابراین بیش‌ترین میزان کاهش مصرف آب برای این واحد صنعتی با حفظ شرایط موجود، ٪۲/۰۷ است. در مطالعه‌ای که به منظور کمینه سازی مصرف آب در پالایشگاه نفت تهران توسط *محمدنژاد* و *همکاران* انجام شده است، با فرض این‌که تنها سه آلاینده TSS، TDS و COD آلاینده‌های محدودکننده فرایند باشند و از واحد تصفیه موجود در پالایشگاه به منظور احیا پساب استفاده شود، میزان کاهش مصرف ٪۱۷/۳۵ به‌دست آمده است. این در حالی است که با اتکا به واحد تصفیه فعلی میزان کاهش مصرف آب پس از بهینه سازی ٪۲/۰۷ خواهد شد. در نتیجه شبکه آب پالایشگاه تهران با اتکا به واحد تصفیه موجود از نقطه بهینه فاصله داشته و نیازمند طرح اصلاحی بوده است [۱۵].

نتیجه‌های بهینه سازی شبکه آب واحد صنعتی مورد مطالعه با استفاده از رویکرد احیا ــ استفاده دوباره (استفاده از یک واحد تصفیه دیگر برای تصفیه بهتر پساب خروجی از واحد تصفیه فعلی)

برای کاهش بیش‌تر مصرف آب، می‌بایست کیفیت پساب خروجی از واحد احیا بهبود یابد. از آنجایی که میزان TDS در پساب خروجی واحد تصفیه پساب صنعتی بالاست، برای کاهش آن استفاده از یک سامانه غشایی پیشنهاد می‌شود. با توجه به پایین بودن مقدار TSS در جریان خروجی از واحد تصفیه پساب صنعتی، در صورت استفاده از سامانه غشایی مشکل انسداد و گرفتگی منافذ غشا به وجود نخواهد آمد.

بنابراین فرض می‌شود که با استفاده از یک سامانه غشایی با میزان بازیافت آب (RC) ٪۷۵، می‌توان به آبی با کیفیت آب تازه مصرفی در این واحد صنعتی دست یافت. جدول ۴ اطلاعات مفروض واحد تصفیه غشایی را نشان می‌دهد.

شبکه اصلاح شده آب و بخار پس از حل مسئله در شکل ۸ نشان داده شده است.

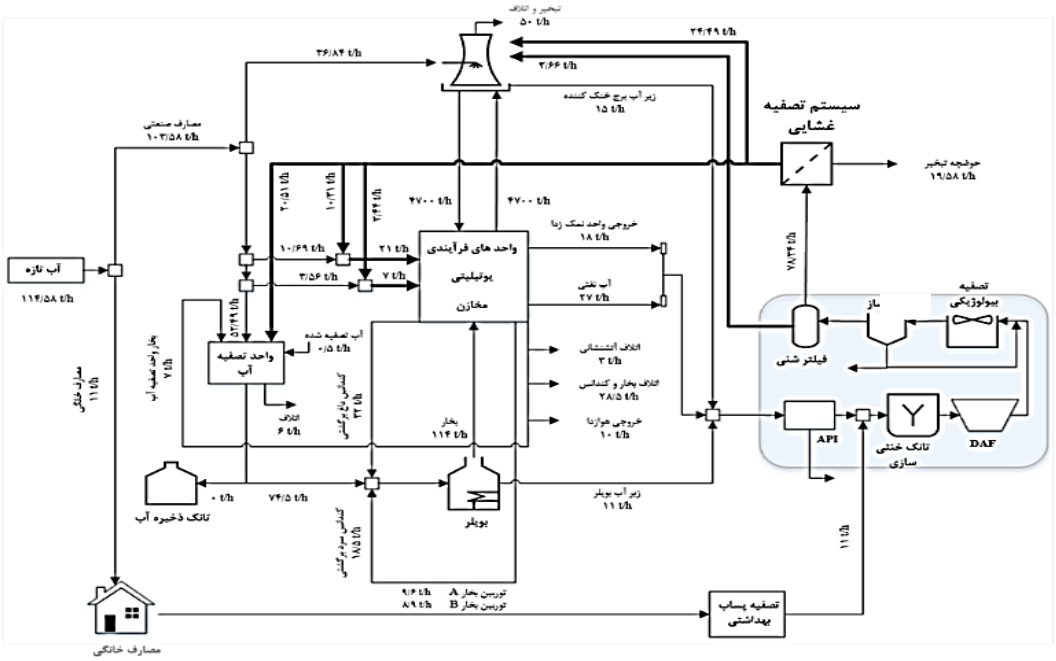
همان‌گونه که دیده می‌شود ۱۱۴/۵۸ t/h آب تازه در واحد مصرف می شود. این میزان در مقایسه با ۱۷۷ t/h مصرف فعلی، کاهش ٪۳۵/۲۶ در مصرف آب تازه را نشان می دهد. در این حالت هیچ یک از جریان‌های منابع (پساب) به صورت مستقیم مورد استفاده دوباره قرار نمی‌گیرد و مجموع ۸۲t/h پساب به واحد تصفیه پساب صنعتی فرستاده می‌شود. پس از احیا پساب در واحد تصفیه پساب صنعتی، ۳/۶۶ t/h از خروجی این واحد برای تأمین بخشی از آب جبران برج خنک کننده ارسال شده و ۷۸/۳۴ t/h باقی مانده وارد سامانه تصفیه غشایی می‌شود. شایان ذکر است که هیچ بخشی از خروجی واحد تصفیه پساب صنعتی برای مصرف‌های آبیاری اختصاص نمی یابد. در سامانه تصفیه غشایی ٪۷۵ از آب ورودی به سامانه یعنی ۵۸/۷۶ t/h بازیافت شده و برای تأمین بخشی از نیاز آب جبران برج خنک کننده، آب آتش‌نشانی، آب کارگاهی و آب مورد نیاز واحد تصفیه آب استفاده می‌شود. ٪۲۵ باقی مانده نیز به علت TDS بالا (۴۶۲۹ ppm) به حوضچه‌های تبخیر انتقال داده می‌شود. در پژوهشی که توسط *فوو* و *همکاران* صورت گرفته است، میزان کاهش مصرف آب در یک پالایشگاه نفت با ایجاد یک واحد تصفیه غشایی و بهینه‌سازی شبکه ٪۴۵/۹۳ به‌دست آمده که در مقایسه با میزان کاهش مصرف آب در این‌جا یعنی ٪۳۵/۲۶ بالاتر است. این امر بدان علت بوده که در این مطالعه تنها COD به عنوان پارامتر محدودکننده فرایند در نظر گرفته شده و در نتیجه نتیجه‌های به‌دست آمده از آن دور از واقعیت موجود خواهد بود [۱۰].

نتیجه گیری

در این پژوهش سنتز شبکه آب یک واحد صنعتی فرایندی در ایران مورد بررسی قرارگرفته که طی آن از بهینه سازی ریاضی با به‌کارگیری دو رویکرد استفاده دوباره مستقیم و احیا ـ استفاده دوباره استفاده شده است. برای پژوهش این هدف نخست شبکه توزیع آب واحد

جدول ۴. غلظت آلاینده‌های خروجی و فاکتور بازیافت آب در سامانه تصفیه غشایی فرض‌شده

فاکتور بازیافت آب (RC)	غلظت آلاینده خروجی از واحد تصفیه غشایی (ppm)	آلاینده‌های محدودکننده
۰/۷۵	۰	COD
	۵	TSS
	۰	Oil
	۴۴۱	TDS
	۰	H_2S
	۰	NH_3



شکل ۸. شبکه اصلاح‌شده آب و بخار واحد صنعتی مورد مطالعه با استفاده از بهینه‌سازی ریاضی (رویکرد احیا ـ استفاده دوباره در صورت استفاده از سامانه تصفیه غشایی برای تصفیه خروجی واحد تصفیه پساب صنعتی)

صنعتی به همراه داده‌های کمی و کیفی منابع و مصرف‌های آب و همچنین واحد تصفیه پساب این واحد صنعتی استخراج شد. در مرحله بعد کم‌ترین مصرف آب تازه و شبکه آب اصلاح شده برای هر یک از رویکردهای استفاده دوباره مستقیم و احیا ـ استفاده دوباره به دست آمده است. میزان کاهش مصرف آب با در نظر گرفتن واحد تصفیه پساب فعلی به عنوان واحد احیا در مقایسه با رویکرد استفاده دوباره مستقیم، به‌تقریب یکسان است. علت این موضوع بالا بودن TDS جریان خروجی از واحد احیا است. بنابراین برای کاهش TDS در جریان خروجی از واحد تصفیه پساب فعلی از یک سامانه تصفیه غشایی استفاده شده است. سرانجام به‌کارگیری این سامانه موجب شده مقدار مصرف آب تازه به شکل چشمگیری کاهش یافته یابد.

فهرست نمادها

F_{fw}: شدت جریان آب تازه

F_{fw,SK_j}: شدت جریان آب تازه اختصاص یافته به مصرف کننده SK_j

F_{SR_i,SK_j}: شدت جریان منبع SR_i اختصاص یافته به مصرف کننده SK_j

F_{SK_j}: شدت جریان مورد نیاز مصرف کننده SK_j

$C_{SR_i,b}$: غلظت آلاینده b در جریان منبع SR_i

$C_{fw,b}$: غلظت آلاینده b در آب تازه

$C_{SK_j,b}$: بیش‌ترین غلظت آلاینده b قابل پذیرش توسط مصرف کننده SK_j

$F_{SR_i,ww}$: شدت جریان منبع SR_i دفع شده به عنوان پساب

F_{SR_i}: شدت جریان منبع SR_i

F_{ww}: کل شدت جریان پساب

F_{REG,SK_j}: شدت جریان اختصاص یافته به مصرف کننده SK_j از خروجی واحد تصفیه پساب صنعتی

$C^{out}_{REG,b}$: غلظت آلاینده b در جریان خروجی از واحد تصفیه پساب صنعتی

$F_{SR_i,REG}$: شدت جریان منبع SR_i ارسال شده برای احیا در واحد تصفیه پساب صنعتی

F^{in}_{REG}: شدت جریان ورودی به واحد واحد تصفیه پساب صنعتی

F^{sys}_{REG}: شدت جریان پساب احیا شده برگشتی به سامانه

F^{g}_{REG}: شدت جریان پساب احیا شده مورد استفاده در مصارف آبیاری

F_{MS,SK_j}: شدت جریان اختصاص یافته به مصرف کننده SK_j از خروجی سامانه تصفیه غشایی

$C^{out}_{MS,b}$: غلظت آلاینده b در جریان خروجی از سامانه تصفیه غشایی

$F_{REG,MS}$: شدت جریان ارسالی از خروجی واحد تصفیه پساب صنعتی به سامانه تصفیه غشایی

F^{in}_{MS}: شدت جریان ورودی به سامانه تصفیه غشایی

$F_{MS,P}$: شدت جریان ارسالی از سامانه تصفیه غشایی به حوضچه های تبخیر

تاریخ دریافت : ۱۳۹۸/۰۳/۰۳ ؛ تاریخ پذیرش : ۱۳۹۸/۰۷/۰۸

مراجع:

[1] Khor, C.S., Chachuat, B., Shah, N., Optimization of Water Network Synthesis for Single-Site and Continuous Processes: Milestones, Challenges, and Future Directions, *Ind. Eng. Chem. Res.*, **53**(25): 10257-10275 (2014).

[2] Wang Y. Smith, R., Wastewater Minimisation, *Chem. Eng. Sci.*, **49**(7): 981-1006 (1994).

[3] Khor C.S., Chachuat B., Shah N., Fixed-Flowrate Total Water Network Synthesis Under Uncertainty with Risk Management, *J. Clean. Prod.*, **77:** 79-93 (2014).

[4] Francisco F.S., Mirre R.C., Calixto E.E., Pessoa F. L., Queiroz E.M., Water Sources Diagram Method in Systems with Multiple Contaminants in Fixed Flowrate and Fixed Load Processes, *J. Clean. Prod.*, **172**: 3186-3200 (2018).

[5] El-Halwagi M.M., "Sustainable Design Through Process Integration: Fundamentals and Applications to Industrial Pollution Prevention, Resource Conservation, and Profitability Enhancement", Butterworth-Heineman (2017).

[6] D'Ambrosio C., Lodi A., Wiese S., Bragalli C., Mathematical Programming Techniques in Water Network Optimization, *Eur. J. Oper. Res.*, **243**(3): 774-788 (2015).

[7] Yang L., Salcedo-Diaz R., Grossmann I.E., Water Network Optimization with Wastewater Regeneration Models, *J.Food. Eng..*, **53**(45): 17680-17695 (2014).

[8] Takama N., Kuriyama T., Shiroko K., Umeda T., Optimal Planning of Water Allocation in Industry, *J. Chem. Eng. Jpn.*, **13**(6): 478-483 (1980).

[9] Bavar M., Sarrafzadeh M.H., Asgharnejad H., Norouzi-Firouz H., Water Management Methods in Food Industry: Corn Refinery as a Case Study, *Chem. Eng. J.*, **172**: 78-84 (2018).

[10] Deng C., Shi C., Feng X., Foo D.C.Y., Flow Rate Targeting for Concentration-and Property-Based Total Water Network with Multiple Partitioning Interception Units, *Ind. Eng. Chem. Res.*, **55**(7): 1965-1979 (2016).

[11] Khor C.S., Chachuat B., Shah N., A Superstructure Optimization Approach for Water Network Synthesis with Membrane Separation-Based Regenerators, *Comput. Aided Chem. Eng.*, **42**: 48-63 (2012).

[12] Mohammadnejad S., Ataei A., Bidhendi G.R.N., Mehrdadi N., Ebadati F., Lotfi F., Water Pinch Analysis for Water and Wastewater Minimization in Tehran Oil Refinery Considering Three Contaminants, *Environ. Monit. Assess*, **184**(5): 2709-2728 (2012).

[13] Mughees W., Al-Ahmad M., Application of Water Pinch Technology in Minimization of Water Consumption at a Refinery, *Comput. Aided Chem. Eng.*, **73**: 34-42 (2015).

[14] Foo D.C., "Process Integration for Resource Conservation", Boca Raton, Florida, US: CRC Press (2012).

[15] Mohammadnejad S., Bidhendi G.N., Mehrdadi N., Water Pinch Analysis in Oil Refinery Using Regeneration Reuse and Recycling Consideration, *Desalination*, **265**(1-3): 255-265 (2011).