رویکردهایی جهت کاهش مصرف آب در صنایع فرآیندی با تاکید بر صنعت پالایش نفت

محمدحسین صراف زاده *
دانشیار، کرسی یونسکو در بازیافت آب، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه تهران، تهران، ایران
دریافت: 96/3/10 پذیرش: 96/11/2

چکیده

در این مقاله مروری بر پژوهش‌های ارائه شده در زمینه طراحی یکپارچه شبکه آب در صنایع فرآیندی انجام گرفته است. در ابتدا به تعریف مسئله سنتز شبکه آب پرداخته شده و در دو گروه اصلی الف) بار جرمی ثابت و ب) شدت جریان ثابت تقسیم‌بندی شده است. جهت حل مسائل سنتز شبکه آب دو رویکرد پینچ آبی و بهینه‌سازی ریاضی استفاده می‌شود که پژوهش‌های منتشر شده در هر دو زمینه بررسی شده‌اند. در پایان شبکه مصرف آب و آلاینده‌های محدود کننده استفاده مجدد از آب در پالایشگاه نفت بررسی شده و تعدادی از مهم‌ترین پژوهش‌های انجام شده برای حل این مسئله در پالایشگاه نفت از منظر تعداد آلاینده‌های کلیدی، نوع مسئله و رویکرد حل آن نشان داده شده‌اند. گزارش‌های متعدد نشان می دهد استفاده از آنالیز پینچ آب موجب کاهش قابل‌توجه مصرف آب در صنایع فرآیندی شده است.

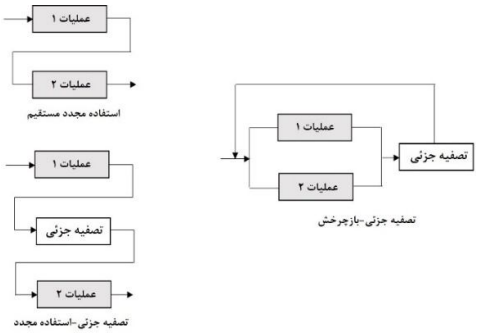
کلمات کلیدی: نظام مداربسته آب، آنالیز پینچ آب، بهینه‌سازی ریاضی، بازیافت آب، صنایع فرآیندی

مقدمه

به‌طور کلی آب به عنوان ماده‌ای اساسی در بیشتر صنایع، به خصوص صنایع فرآیندی و صنایع وابسته به آن، مورد استفاده قرار می‌گیرد. در سال‌های اخیر به دلیل توسعه اقتصادی و صنعتی، میزان تقاضا برای مصرف آب شیرین در صنایع مختلف افزایش یافته است. بخش صنعت دومین مصرف‌کننده آب شیرین در سطح جهان پس از کشاورزی است و این در حالیست که آب شیرین تنها 2,5% از منابع را در سطح جهان به خود اختصاص داده است که از این مقدار تنها 30% درصد قابل استحصال بوده و 70% آن به صورت یخ‌های قطبی و برف‌های ثابت در کوهستان‌ها می‌باشد [1]. از سوی دیگر، سختگیرانه‌تر شدن قوانین محیطزیستی در تخلیه پساب‌ها به محیطزیست، نیاز به افزایش بهره‌وری صنایع و بهینه شدن آن‌ها را بیش از پیش مشخص

کرده است. علاوه بر آن، براساس گزارش آژانس بین‌المللی انرژی[1] در سال 2012، نیاز آبی بخش‌های صنعتی نیروگاهی، نفت و گاز، رشد چشم‌گیری خواهند داشت [2]. با توجه به شرایط کنونی، نیاز به مطالعه‌ای مروری و جامع در زمینه روش‌های کاهش مصرف آب به وسیله بازیافت آب در صنایع مختلف به خصوص صنایع فرآیندی بیش از پیش احساس می‌شود.

ایده اصلی بازیافت آب که شامل سه رویکرد رایج استفاده مجدد مستقیم[2]، تصفیه جزئی-استفاده مجدد[3] و تصفیه جزئی-بازچرخش[4] است (شکل 1) برای نخستین بار توسط ونگ و اسمیت مطرح شد [3]. مفهوم استفاده مجدد از آب و بازچرخش آن، انتقال پساب خروجی از یک واحد مصرف‌کننده آب به دیگر فرآیندهای مصرف‌کننده آب از جمله همان فرآیندی 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 فرآیند تجاوز نکنند. هنگامی که گزینه‌های استفاده مجدد 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 (به‌طور مثال فرآیندهای غشایی یا دفع با بخار) استفاده شود. در مجموع نحوه ترکیب روش‌های مذکور تحت عنوان "مساله سنتز شبکه آب"[5] شناخته می‌شود [4].



شکل 1. رویکردهای رایج بازیافت آب [3]

به‌طور کلی مساله سنتز شبکه آب به دو صورت قابل حل است. روش اول آنالیز پینچ[6] و روش دوم بهینه‌سازی ریاضی[7]. گزارش‌های متعددی در سطح جهان منتشر شده که نشان می‌دهد استفاده از آنالیز پینچ آب و بهینه‌سازی ریاضی موجب کاهش قابل‌توجه مصرف آب در صنایع فرآیندی شده است [5]. در ایران نیز پنجه شاهی و همکاران پژوهش‌های متعددی در زمینه کاهش مصرف آب در صنایع پالایش و پتروشیمی انجام داده‌اند [6, 7]. ایشان با استفاده از آنالیز پینچ آب، مقدار مصرف آب در پالایشگاه نفت تهران را 32% کاهش که به تبع آن در هزینه‌های این واحد صنعتی صرفه‌جویی شده است [8]. همچنین

[1]International Energy Agency
[2]Direct Ruse
[3]Regenaration-Ruse
[4]Regenaration-Recycle
[5]Water Network Synthesis Problem
[6]Pinch Analysis
[7]Mathematical Optimization

امیدخواه و همکاران با استفاده از رویکرد بهینه‌سازی ریاضی، مصرف آب در پالایشگاه نفت تبریز را کاهش داده که صرفه‌جویی قابل‌توجه در هزینه‌ها را در پی داشته است [9].

مساله سنتز شبکه آب

سنتز شبکه آب یکی از انواع مسائل در مهندسی سیستم‌های فرآیندی است که می‌تواند به صورت خاص تحت عنوان مساله سنتز شبکه انتقال جرمی[8] در نظر گرفته شود [10]. سنتز شبکه آب به عنوان بخش قابل‌توجهی در حیطه مهندسی سیستم‌های فرآیندی پدیدار شده و موضوع حجم زیادی از تحقیقات در دهه گذشته بوده که در این بررسی به آن پرداخته شده است. تعریف مساله را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:
سنتز شبکه آب یک مساله طراحی یا اصلاح شبکه آب برای هر دو عملیات پیوسته و ناپیوسته است. بسته به دامنه مساله، سنتز شبکه آب می‌تواند با در نظر گرفتن واحدهای مصرف‌کننده آب، یا عملیات‌های تصفیه پساب و یا هر دو باشد [2].
پس از مشخص شدن محدوده مسئله سنتز شبکه آب، این مسئله در دو گروه کلی دسته‌بندی می‌شود. این دو گروه تحت عناوین 1) مسئله بار جرمی ثابت[9] و 2) مسئله شدت‌جریان ثابت[10] شناخته می‌شوند.

مسئله بار جرمی ثابت

این رویکرد اساساً با تمرکز بر عملیات مصرف‌کننده آبی است که در آن انتقال جرم صورت می‌پذیرد. در این‌گونه عملیات، آب به‌عنوان عامل جداکننده جرم (جریان رقیق) جهت حذف میزان معینی از بار جرمی آلاینده‌ها از جریان غلیظ مورداستفاده قرار می‌گیرد (شکل 2). عملیات شستشوی ظروف، استخراج حلال، جذب گاز و غیره ازجمله این عملیات محسوب می‌شوند **[11]**.

شکل 2. عملیات انتقال جرم که در آن از آب به عنوان عامل جداکننده جرم برای حذف آلاینده‌ها از جریان غلیظ به کار گرفته شده [11]

در این‌گونه مسائل، آن چیزی که از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است میزان حذف بار جرمی آلاینده‌ها از جریان غلیظ است و شدت‌جریان آب مورد نیاز عملیات در درجه دوم از اهمیت قرار دارد. ازاین‌رو مسائلی که تحت عنوان مسئله بار جرمی ثابت شناخته می‌شوند به‌صورت زیر قابل بیان هستند:

- عملیات مصرف‌کننده آب به‌صورت مجموعه $P = \{p = 1, 2, 3, ..., N_p\}$ مشخص می‌شوند که هر عضو این مجموعه نشان‌دهنده یک عملیات مصرف‌کننده آب است. جریان غلیظ در هر عملیات دارای غلظت

[1]Mass Exchanger Network Synthesis Problem
[2]Fixed Load Problem
[3]Fixed Flowrate Problem

مشخصی از آلاینده در ورودی و خروجی آن عملیات است و می‌بایست بار جرمی[11] هر آلاینده در هر عملیات به‌اندازه $\Delta m_{p,i}$ مشخصی کاهش یابد.

- در هر عملیات، منابع آب نهایتاً با حداکثر غلظت مجاز ورودی برای هرکدام از آلاینده‌ها واردشده و با حداکثر غلظت مجاز خروجی، عملیات را ترک کنند. این مقدار، حداکثر مجاز بر اساس محدودیت‌های خوردگی، انتقال جرم و غیره مشخص می‌شوند.
- آب شیرین باید برای تأمین نیاز حذف آلاینده‌ها در تعدادی از عملیات مصرف‌کننده فراهم شود.
- عملیات تصفیه جزئی به‌صورت فرآیندهایی در نظر گرفته می‌شوند (هر جا که موردنیاز است) که خروجی عملیات مصرف‌کننده را قبل از استفاده مجدد و بازچرخش در ورودی عملیات مصرف‌کننده دیگر به سطح کیفی مطلوب می‌رسانند.

در بالا ویژگی‌های مهم یک مسئله بار جرمی ثابت بیان شد. ازآنجایی‌که آب در این عملیات (عملیات انتقال جرمی) به‌عنوان عامل جداکننده جرم مورد استفاده قرار می‌گیرد، اتلاف یا افزایش آن در طی عملیات حذف بار آلاینده در اکثر موارد قابل صرف‌نظر کردن است و به همین دلیل شدت‌جریان آب ورودی و خروجی را می‌توان یکنواخت در نظر گرفت. در شرایطی که اتلاف یا افزایش آب زیاد باشد، تغییراتی برای مدل موردنیاز است [12].

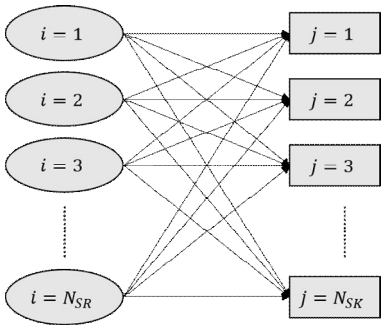
مسئله شدت‌جریان ثابت

بسیاری از عملیات مصرف‌کننده آب، آب را با اهدافی غیر از عامل جداکننده‌ی جرم به کار می برند. به عنوان مثال عملیاتی در آن آب جهت خنک کردن و یا گرم کردن استفاده می شود بدون اینکه انتقال جرمی در آن‌ها صورت پذیرد. 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. شکل 3 نمایش شبکه آب به صورت منابع و مصارف را نشان می‌دهد که در آن j ها بیانگر مصارف و i ها مشخص کننده منابع آب هستند. در این رویکرد به‌جای تمرکز بر حذف بار جرمی (Δm_p) ، شدت‌جریان محدودیت اصلی در کارها خواهد بود. یکی از ویژگی‌های بارز این مدل این است که شدت‌جریان ورودی و خروجی یک واحد مصرف‌کننده می‌تواند ثابت نباشد. این مدل می‌تواند تحت عنوان مسئله شدت‌جریان ثابت شناخته شود که در آن مسئله به‌صورت زیر تعریف می‌شود [13]:

- بخش‌هایی که در آن آب مصرف می‌شود، تحت عنوان مصارف شناخته‌شده و در مجموعه $SK_j = \{1, 2, ..., N_{SK}\}$ قرار می‌گیرند. هرکدام از آن‌ها به شدت‌جریانی به اندازه F_j (برای هر مصرف‌کننده یک شدت‌جریان خاص) نیاز دارند. غلظت قابل‌پذیرش آلاینده‌ها برای هر مصرف‌کننده نباید از حد مجاز برای هر آلاینده فراتر رود ($C_{j,c} < C_{j,c}^{\max}$). که در آن C نشان دهنده نوع آلاینده است.
- جریان‌های پساب و یا واحدهای تولیدکننده پساب تحت عنوان منابع شناخته شده و در مجموعه $SR_i = \{i = 1, 2, ..., N_{SR}\}$ قرار می‌گیرند. هر یک از منابع را می‌توان در بخش‌های مصرف‌کننده

[1]Mass Load

مورد استفاده مجدد و یا بازچرخش قرار داد و یا اینکه برای رسیدن به کیفیت مطلوب‌تر به واحدهای تصفیه جزئی فرستاد. هر منبع دارای شدت‌جریان F_i است و غلظت آلاینده‌های مختلف در آن به‌صورت $C_{i,c}$ مشخص می شوند.



شکل 3. نمایش شبکه آب به صورت منابع و مصارف برای مسائل شدت جریان ثابت [13]

- منبع یا منابع آب شیرین نیز می‌بایست برای تأمین نیازهای بخش مصارف مورد استفاده قرار گیرد.
- در اینجا نیز مشابه مسئله بار جرمی ثابت، عملیات تصفیه جزئی به‌صورت واسطه بین منابع و مصارف در نظر گرفته می‌شوند که در صورت نیاز، منابع آب را قبل از استفاده مجدد و یا بازچرخش در بخش مصارف، به سطح کیفی مطلوب می‌رسانند. پس از درک مفهوم هر دو رویکرد، چند نکته را باید در نظر گرفت. مدل شدت‌جریان ثابت از جامعیت بیشتری برخوردار است. زیرا هر دو گروه از عملیات مصرف‌کننده آب را شامل می‌شود (چه عملیاتی که در آن‌ها انتقال جرم صورت می‌گیرد و چه آن‌هایی که انتقال جرم انجام نمی‌شود). علاوه بر این، اطلاعات بار جرمی آلاینده‌ها، یعنی مقدار آلاینده‌ای که به جریان آب منتقل می‌شود، به‌ندرت در واحدهای عملیاتی موجود است و در صورت وجود از قطعیت کافی برخوردار نیست [14].

رویکردهای حل مسئله سنتز شبکه آب

به‌طورکلی دو رویکرد اصلی جهت حل مسئله سنتز شبکه آب را می‌توان به‌صورت 1) رویکرد مفهومی[12] (پینچ آبی) و 2) رویکرد بر پایه روش‌های بهینه‌سازی دسته‌بندی نمود.

رویکرد مفهومی

حل مسئله سنتز شبکه آب با رویکرد مفهومی اساساً برای سامانه‌هایی گزارش شده است که در آن‌ها مصرف آب تنها توسط یک آلاینده محدود می‌شود. در این رویکرد، حل مسئله خود به دو مرحله تعیین هدف حداقل آب شیرین و طراحی/ اصلاح شبکه تقسیم می‌شود [15]. مرحله تعیین هدف: همان‌گونه که در قبل

[1]Insight-Based Approach

اشاره شد، با توجه به اینکه کاهش مصرف آب به‌وسیله استفاده مجدد از پساب‌های خروجی، تصفیه جزئی و یا بازچرخش آن‌ها صورت می‌پذیرد، درنتیجه مقدار حداقل آب شیرین در هرکدام از این رویکردها متفاوت خواهد بود. به‌طور مثال اگر با استفاده مجدد یا بازچرخش پساب خروجی از واحدهای مصرف‌کننده بتوان به حداقل آب شیرین مصرفی برابر با F_{min} دست یافت، با استفاده از روش‌های تصفیه جزئی پساب، مقدار حداقل آب شیرین از F_{min} کمتر خواهد شد. از طرف دیگر با توجه به اینکه دو مدل بار جرمی ثابت و شدت‌جریان ثابت برای بیان مسئله سنتز شبکه آب وجود دارد، روش‌های تعیین مقدار حداقل آب شیرین در هرکدام از این مدل‌ها با یکدیگر تفاوت دارد. با در نظر گرفتن مجموع این مطالب، برای تعیین هدف حداقل آب شیرین ابتدا دو بخش استفاده مجدد/ بازچرخش و تصفیه جزئی را تفکیک نموده و در هر بخش روش‌های تعیین مقدار هدف حداقل آب شیرین برای دو مدل بار جرمی ثابت و شدت‌جریان ثابت بررسی خواهد شد.

در بخش طراحی/ اصلاح شبکه نیز روش‌های مختلف طراحی/ اصلاح شبکه برای دست یافتن به مقدار حداقل آب شیرین مورد بحث قرار خواهند گرفت.

تعیین هدف حداقل آب شیرین با رویکرد استفاده مجدد/ بازچرخش

روش‌های گرافیکی و عددی مختلفی از ابتدای پیدایش پینچ آبی برای تعیین هدف حداقل آب شیرین پیشنهاد شده‌اند که بسته به مدل مسئله، روش‌های تعیین هدف برای مدل بار جرمی ثابت و شدت‌جریان ثابت متفاوت خواهد بود. برای هر مدل نیز روش‌های تعیین هدف متفاوتی وجود دارد. روش "منحنی ترکیبی غلظت"[13] را می‌توان معروف‌ترین روش پینچ آبی جهت تعیین مقدار حداقل آب شیرین دانست که برای نخستین بار توسط ونگ و اسمیت مطرح شد [3]. از این روش می‌توان برای حل مسائل زیر استفاده کرد:

الف) مسائل بار جرمی ثابت که در آن اتلاف و یا تجمع آب در شبکه مصرف آب وجود ندارد [3].

ب) مسائل بار جرمی ثابت که در آن اتلاف و یا تجمع آب در شبکه مصرف آب وجود دارد [16].

ج) مسائل بار جرمی ثابت که در آن تعدادی عملیات مصرف‌کننده آب با شدت‌جریان ثابت وجود دارند [16].

د) مسائل بار جرمی ثابت باوجود چندین منبع آب شیرین [16].

"دیاگرام مقاطع غلظت"[14] روش دیگری است که برای حل مسائل بار جرمی ثابت به کار رفته است [17]. این روش برخلاف نمودار ترکیبی غلظت که گرافیکی است، جز روش‌های عددی حل مسائل پینچ دسته‌بندی می‌شود.

روش‌های تعیین هدف حداقل آب برای مسائل شدت‌جریان ثابت نیز گروه دیگری از مسائل هستند که ابتدا در سال 1996 براساس گزارش گروه مشاوران لینهوف[15] آغاز و توسعه داده شد. باوجود این، مسائل

[1]Limiting Composite Curve
[2]Concentration Interval Diagram
[3]Linnhoff

شدت‌جریان ثابت تا پس از سال 2000 توجه زیادی را از طرف پژوهشگران به خود جلب نکرد. شایان‌ذکر است که برخلاف مسائل بار جرمی ثابت، روش‌های بسیار متنوعی جهت تعیین مقدار هدف برای این مسائل توسعه یافته است. "ترکیب منابع و مصارف آب"[16]، "جداول تکامل‌یافته"[17]، "دیاگرام آب اضافی"[18]، "منحنی پینچ بازیافت مواد"[19]، "آنالیز آبشاری آب"[20]، "رویکرد تعیین هدف جبری"[21]، "نمودار ترکیبی منبع"[22]، "روش تحلیلی"[23]، "روش تعیین هدف خودکار"[24] ازجمله این روش‌ها هستند **[18]**.

روش‌های تعیین هدف با رویکرد تصفیه جزئی

تصفیه جزئی پساب درواقع به حذف بخشی از آلاینده‌ها از پساب با استفاده از روش‌های خالص‌سازی اطلاق می‌شود. پس از آن پساب تصفیه شده را می‌توان در دیگر عملیات مصرف‌کننده آب دوباره استفاده کرد و یا اینکه با بازچرخش آن، در همان عملیات مورد استفاده قرار گیرد. با این کار به میزان بیشتری از مصرف آب شیرین و تولید پساب کاسته خواهد شد. به‌طورکلی واحدهای تصفیه جزئی پساب، را می‌توان در دو گروه غلظت خروجی ثابت (C_{Rout}) و یا نسبت حذف ثابت (RR) دسته‌بندی نمود [19]. نسبت حذف برای یک واحد تصفیه به‌صورت نسبت مقدار بار جرمی آلاینده حذف‌شده توسط واحد تصفیه به کل بار جرمی آلاینده در پساب ورودی به واحد تصفیه تعریف می‌شود (معادله 1):

$$RR = \frac{F_{Tout}C_{Rout} - F_{Tin}C_{Rin}}{F_{Tin}C_{Rin}} \qquad (1)$$

که در آن F_{Tin} و C_{Rin} شدت‌جریان و غلظت پساب ورودی به واحد تصفیه و F_{Tout} و C_{Rout} شدت‌جریان و غلظت پساب خروجی از واحد تصفیه هستند. اگر در واحد تصفیه اتلاف جریان وجود نداشته باشد آنگاه چون $F_{Tin} = F_{Tout}$ ، معادله 1 به‌صورت زیر ساده خواهد شد:

$$RR = \frac{C_{Rout} - C_{Rin}}{C_{Rin}} \qquad (2)$$

همانند بخش‌های گذشته، در اینجا نیز روش‌های تعیین هدف برای مسائل بار جرمی ثابت و شدت‌جریان ثابت به‌صورت جداگانه بحث خواهد شد.

روش‌های تعیین هدف برای مسائل بار جرمی ثابت

نخستین تحولات در زمینه تعیین هدف با رویکرد تصفیه جزئی پساب برای مسائل بار جرمی ثابت، به پژوهش اسمیت و همکارانش مرتبط می‌شود [3]. روش به‌کار رفته در این مطالعه جهت تعیین هدف، بر پایه

[1]Water-Source and Water-Sink Composites
[2]Evolutionary Tables
[3]Water Surplus Diagram
[4]Material Recovery Pinch Diagram
[5]Water Cascade Analysis
[6]Algebraic Targeting Approach
[7]Source Composite Curve
[8]Analytical Method
[9]Automated Targeting Technique

نمودار ترکیبی غلظت برای استفاده مجدد و بازچرخش بوده است. در این مطالعه غلظت بهینه ورودی برای تصفیه جزئی (C_{Rin}) برابر با غلظت پینچ (C_{pinch}) در نظر گرفته شده است. علاوه بر این، پروسه تعیین هدف برای استفاده مجدد/ بازچرخش آب تصفیه شده در این مطالعه با یکدیگر تفاوت دارد. بااین‌وجود با مشاهده کارهای بعدی [12] در برخی موارد برخلاف آنچه در مطالعه اسمیت در نظر گرفته شد، ممکن بود غلظت پینچ پس از قرار دادن واحد تصفیه جزئی در شبکه آب تغییر کند. با وجود محدودیت‌های مختلف در روش‌های اولیه، تحقیقات در این زمینه با وقفه‌ای یک دهه‌ای روبه‌رو شد تا اینکه گروهی از محققان روش‌های تعیین هدف ارتقا یافته‌ای را برای هر دو رویکرد تصفیه جزئی- استفاده مجدد و تصفیه جزئی- بازچرخش پیشنهاد کردند. نکته حائز اهمیت در روش‌های ارتقا یافته این است که با وجود ادعای آن‌ها مبنی بر قابل‌استفاده بودن این روش‌ها در عملیات تصفیه جزئی با نسبت حذف ثابت (RR) ، این مسئله به‌صورت صریح در پروسه تعیین هدف نشان داده نشده و همانند مطالعات اولیه، این روش‌ها نیز تنها برای عملیات تصفیه جزئی با غلظت خروجی ثابت (C_{Rout}) کاربرد دارند. درنهایت شایان‌ذکر است که روش عددی دیاگرام مقاطع غلظت بر اساس مفاهیم به‌دست‌آمده از روش‌های گرافیکی اصلاح‌شده مذکور برای تعیین هدف، توسعه داده شده‌اند [20].

روش‌های تعیین هدف برای مسائل شدت‌جریان ثابت

مطالعات اخیر نشان داده که اکثر محققین برای تعیین هدف حداقل در رویکرد تصفیه جزئی، استفاده از مدل شدت‌جریان ثابت را ترجیح می‌دهند. هالال نخستین دستورالعمل‌ها را در این زمینه ارائه کرد [21]. در کارهایی که پس از آن صورت گرفت نیز اساساً از این دستورالعمل‌ها استفاده شد. بااین‌وجود هیچ‌کدام از این روش‌ها، دستیابی به مقدار حداقل شدت‌جریان تصفیه همراه با حداقل شدت‌جریان آب تازه و پساب را تضمین نمی‌کرد. "روش تعیین هدف شدت‌جریان نهایی"[25]، روشی جبری بود که برای نخستین بار حداقل شدت‌جریان تصفیه همراه با حداقل شدت‌جریان آب تازه و پساب را برای مسائل شدت‌جریان ثابت تعیین می‌کرد [22]. این روش بر اساس مفهوم تخصیص شدت‌جریان (ارائه‌شده توسط کوو و اسمیت [19]) انجام می‌شود. فرضیه اصلی (و همچنین محدودیت اصلی) این روش این است که تنها برای واحدهای تصفیه جزئی با غلظت خروجی ثابت (C_{Rout}) کاربرد دارد. روش "نمودار ترکیبی منبع" روش دیگری است که برای هر دو واحد تصفیه جزئی با غلظت خروجی ثابت و نسبت حذف ثابت استفاده می‌شود [23]. یکی از مزایای استفاده از نمودار ترکیبی منبع این است که ماکزیمم غلظت ورودی برای واحد تصفیه جزئی قابل تنظیم خواهد بود. باوجوداین، این روش تنها حداقل شدت‌جریان تصفیه را برای موارد تخلیه صفر مایع[26] (ZLD) تعیین می‌کند. روش "تعیین هدف اتومات" نیز علاوه بر استفاده در رویکرد استفاده مجدد و بازچرخش، برای تعیین هدف تصفیه در مسائل شدت‌جریان ثابت برای هر دو دسته عملیات تصفیه جزئی، توسعه داده

[1]Ultimate Flowrate Targeting
[2]Zero Liquid Discharge

شده است [24]. مزیت اصلی این روش این است که برخلاف روش‌های جبری و گرافیکی دیگر، در مرحله تعیین هدف، حداقل کردن هزینه‌ها قابل‌اجرا خواهد بود.

روش‌های مختلف طراحی/ اصلاح شبکه آب

همان‌گونه که در قبل اشاره شد، طراحی/ اصلاح شبکه همیشه به‌عنوان گام دوم در روش‌های معمول آنالیز پینچ در نظر گرفته می‌شود [15]. هنگامی‌که مقدار حداقل شدت‌جریان تعیین شد، شبکه آب می‌بایست برای دستیابی به مقدار هدف شدت‌جریان مقرر، طراحی یا اصلاح شود. باید به این نکته توجه داشت که طراحی/ اصلاح شبکه خود نیز با پیچیدگی‌هایی روبه‌روست. به‌طور مثال هنگام طراحی یا اصلاح شبکه، طرح‌های مختلفی که در همه آن‌ها هدف حداقل تأمین‌شده، وجود خواهد داشت.

در طول دو دهه گذشته، روش‌های طراحی مختلفی برای مسائل بار جرمی ثابت و شدت‌جریان ثابت توسعه یافته‌اند. این روش‌ها بر اساس کاربردشان در مسائل مختلف سنتز شبکه آب، به‌اختصار در جدول 1 نمایش داده شده‌اند. بر اساس دسته‌بندی دیگری که در این جدول نشان داده شده، در حدود نیمی از روش‌های طراحی/ اصلاح شبکه، وابسته به شدت‌جریان مقررشده در مرحله تعیین هدف حداقل هستند که در اکثر موارد، طراحی شبکه آب به‌صورت مراحل پی‌درپی با استفاده از اطلاعات و نکات به‌دست‌آمده از مرحله تعیین هدف انجام می‌شود. به عبارتی می‌توان گفت این‌گونه روش‌ها بدون استفاده از مرحله تعیین هدف حداقل نمی‌توانند مورداستفاده قرار بگیرند. در مقابل نیمه دیگر روش‌های طراحی/ اصلاح شبکه در جدول 1 مستقل از اهداف حداقل شدت‌جریان هستند و درنتیجه، می‌توانند به‌صورت مستقل، بدون مرحله تعیین هدف به کار روند. بدیهی است که گروه دوم در مقایسه با گروه اول دارای انعطاف بیشتری است و ثابت شده که نتایج طراحی حاصل از بیشتر این روش‌ها، اهداف حداقل شدت‌جریان را تأمین می‌کنند (به‌طور مثال روش "جدول بار" [25]). بااین‌وجود، به علت پاسخ‌گویی به این سؤال که "آیا طراحی از این بهتر می‌شود" (یعنی آیا طراحی وجود دارد که مصرف آب را از این مقدار نیز کمتر کند) بیشتر محققان هر دو مرحله تعیین هدف و طراحی/ اصلاح را انجام می‌دهند. اعداد جدول نشان دهنده شماره مراجعی است که روش طراحی مربوطه را برای مسئله مورد نظر به‌کار گرفته‌اند. همچنین عبارت "گزارش نشده" در جدول نشان می دهد که گزارشی در ارتباط با توسعه روش طراحی مذکور برای مسئله مورد نظر ارائه نشده است.

رویکرد بهینه‌سازی

در این رویکرد برخلاف رویکرد مفهومی، بررسی مسئله سنتز شبکه آب با در نظر گرفتن تمام پیچیدگی‌ها ازجمله تابع هدف هزینه‌ها، آلاینده‌های چندگانه، محدودیت‌های عملیاتی گوناگون و غیره امکان‌پذیر است. گرچه چالش‌های دستیابی به جواب بهینه در این رویکرد به‌طور مکرر دیده شده است. پژوهش‌های اخیری که در این زمینه صورت گرفته به شکل گسترده‌ای با مسئله توسعه مدل‌های بهینه‌سازی برای افزایش دقت

و همچنین در نظر گرفتن ویژگی‌های مسئله در واقعیت، با استفاده از برنامه‌ریزی ریاضی[1]، درگیر بوده است [34].

جدول 1. مقایسه روش‌های مختلف طراحی شبکه

روش‌های طراحی	وابستگی به اهداف حداقل شدت جریان		استفاده مجدد/ بازچرخش	تصفیه جزئی
	بله	خیر		
مسئله بار ثابت				
دیاگرام شبکه آب[2]	✓		[3]	[3]
جدول بار[3]		✓	[25]	گزارش نشده
روش اصلی آب[4]	✓		[26]	[27]
دیاگرام محتوی جرم[5]	✓		[12]	[12]
دیاگرام منبع آب[6]		✓	[28]	[28]
مسئله شدت جریان ثابت				
رویکرد نیاز منبع[7]		✓	[29]	گزارش نشده
جدول مسئله بار[8]	✓		[30]	گزارش نشده
الگوریتم نزدیکترین همسایه[9]	✓		[31]	[32]
نمودار تخصیص شبکه[10]	✓		[33]	گزارش نشده

رویکرد برنامه‌ریزی ریاضی اساساً نیازمند ساختن یک ابرساختار[11] از همه یا اکثر اتصالات ممکن بین اجزای شبکه آب است که فرموله کردن آن ابرساختار منجر به یک مسئله LP، NLP[12]، MILP[13]، MINLP[14]، MINLP[15] خواهد شد [2]. ابرساختار را می‌توان با استفاده از رویکرد مسئله بار جرمی ثابت و یا رویکرد مسئله شدت‌جریان ثابت ایجاد و فرموله کرد (تفاوت ابرساختار ایجادشده در هرکدام از این رویکردها مربوط به اجزای شبکه آب در هر رویکرد است. به‌طور مثال در رویکرد بار جرمی ثابت، اجزای شبکه آب متشکل از

[1]Mathematical Programming
[2]Superstructure
[3]Water Grid Diagram
[4]Load Table
[5]Water Main Method
[6]Water Content Diagram
[7]Water Source Diagram
[8]Source Demand Approach
[9]Load Problem Table
[10]Nearest Neighbor Algorithm
[11]Network Allocation Diagram
[12]Linear Programming
[13]Nonlinear Programming
[14]Mixed Integer Linear Programming
[15]Mixed Integer Nonlinear Programming

عملیات مصرف‌کننده آب، واحدهای تصفیه جزئی و واحدهای تصفیه پساب تشکیل شده است درصورتی‌که در رویکرد شدت‌جریان ثابت اجزا منابع آب، مصارف آب و واحدهای تصفیه جزئی هستند. واحدهای تصفیه نهایی به‌صورت مصارف در نظر گرفته می‌شوند).

مسئله بار جرمی ثابت

نخستین مطالعه درزمینه استفاده از رویکرد بهینه‌سازی برای مسئله سنتز آب توسط تاکاما و همکاران گزارش شده است [35]. در این مطالعه تنها یک آلاینده، استفاده از آب را دچار محدودیت کرده و همچنین تابع هزینه‌ها به‌عنوان هدف در نظر گرفته شده است. فرموله کردن ابرساختار منجر به تشکیل یک مسئله برنامه‌ریزی غیرمحدب غیرخطی شده است. پس‌ازآن به مدت تقریباً دو دهه هیچ پژوهشی در مورد بهینه‌سازی شبکه آب گزارش نشد تا اینکه دویل و اسمیت روش نوینی برای حل مسئله سنتز شبکه آب با رویکرد بهینه‌سازی پیشنهاد کردند. در این روش که تنها با در نظر گرفتن استفاده مجدد از پساب و بازچرخش آن ارائه شد، برای حل مسئله NLP از تقریب LP به‌عنوان نقطه شروع حل، استفاده شده است [36]. بااین‌وجود این روش جواب بهینه کلی را تضمین نمی‌کند.

گالان و گراسمن نخستین مسئله سنتز شبکه آب با رویکرد بهینه‌سازی را ارائه کردند که در آن از متغیرهای گسسته (0 و 1) در فرموله کردن مسئله استفاده شده است [37]. استفاده از متغیرهای گسسته منجر به تشکیل مسئله MINLP شد. همچنین این مقاله نخستین گزارشی بود که در آن سنتز شبکه به همراه تصفیه جزئی آب به ویژه طراحی شبکه توزیعی تصفیه پساب (که درمجموع از نظر عملیاتی بهینه‌تر است) مطرح شده است. ابرساختار بر پایه کار ونگ و اسمیت توسعه یافت درحالی‌که شبکه مصرف‌کننده آب در نظر گرفته نشد (تنها بخش تصفیه پساب در نظر گرفته شد). باگاجوویک و ساولسکی برای نخستین بار فرمولاسیون MILP را برای سنتز شبکه آبی با تنها یک آلاینده کلیدی ارائه کردند. متغیرهای 0 و 1 جهت مشخص کردن وجود یا عدم وجود اتصالات بین عملیات مختلف در شبکه به کار گرفته شدند [38]. حل مسئله سنتز شبکه آب به‌صورت پروسه‌ای تکراری از حل LP و MILP های پی‌درپی انجام گرفت. در این گزارش، مسئله سنتز شبکه آب بدون در نظر گرفتن عملیات تصفیه جزئی و با در نظر گرفتن آن بررسی شد. یکی از چالش‌های اساسی در مسائل سنتز شبکه آب (چه رویکرد بار جرمی ثابت و چه شدت‌جریان ثابت)، وجود"ترم‌های دو خطی غیرخطی و غیرمحدب"[16] در هنگام موازنه جرمی آلاینده‌ها (موازنه غلظت) است که منجر به عدم دستیابی به جواب بهینه کلی خواهد شد. برای حل این معضل در مسائل بار جرمی ثابت، نخستین بار کاروپیا و گراسمن از روش تقریب آفین-تکه ای[17] استفاده کردند [39]. در این روش جهت دستیابی به جواب بهینه کلی، ترم‌های دو خطی به‌وسیله پوشش محدب/ مقعر مک کورمیک[18] و ترم‌های

[1]Nonlinear Nonconvex Bilinear Terms
[2]Piecewise Affine Relaxation
[3]McCormick's Convex and Concave Envelopes

مقعر در تابع هدف که درواقع مربوط به هزینه تجهیزات هستند، به‌وسیله تخمین حد بالا[19] تقریب زده شده‌اند. علاوه بر این فاریا و باگاجوویک نیز روش‌هایی را برای توسعه تقریب آفین-تکه ای ارائه کردند [40].

مسئله شدت‌جریان ثابت:

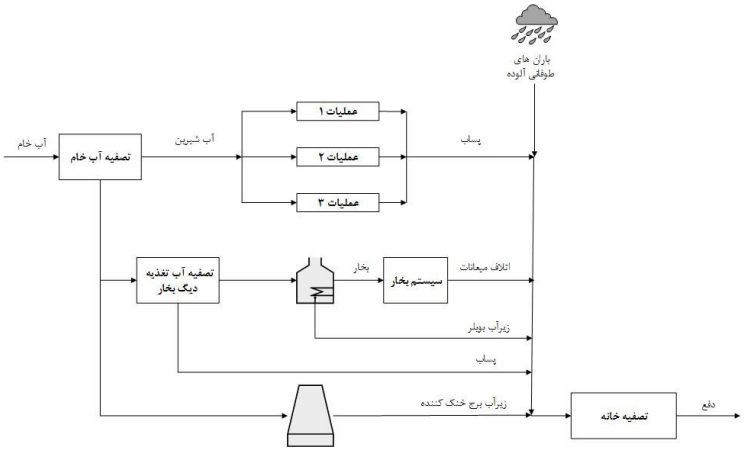
هوانگ و همکاران نخستین نمایش شدت‌جریان ثابت برای عملیات مصرف‌کننده را ارائه کردند [41]. در این کار سنتز کل شبکه آب (با در نظر گرفتن عملیات تصفیه جزئی) همراه با شبکه تصفیه پساب توزیعی موردمطالعه قرار گرفت. علاوه بر این چندین آلاینده مصرف آب را دچار محدودیت می‌کردند. نتیجه حاصل از فرموله کردن منجر به ایجاد یک مسئله NLP شد. جهت ایجاد جواب اولیه شدنی برای حل NLP، نویسندگان از آنالیز پینچ استفاده کردند ولی استفاده از این روش جواب بهینه جامع را تضمین نمی‌کند. همان‌گونه که در بخش گذشته ذکر شد یکی از چالش‌های اساسی در مسائل سنتز شبکه آب، وجودترم‌های دو خطی غیرخطی غیرمحدب در هنگام فرمولاسیون مسئله هستند که باعث عدم دستیابی به جواب بهینه جامع می‌شوند. برای رفع این مشکل در مسائل شدت‌جریان ثابت، میر و فلوداس بهینه‌سازی جامع بر پایه روش فرمولاسیون مجدد- خطی سازی تکه ای[20] را پیشنهاد کردند [42].

تن و همکاران برای نخستین بار عملیات تصفیه جزئی غشایی را در مسائل سنتز شبکه آب در نظر گرفتند که در آن تنها یک آلاینده، مصرف آب را با محدودیت مواجه می‌کرد [43]. در این پژوهش، جریان‌های آلوده پس از ورود به تصفیه غشایی به دو جریان کیفیت بالا و کیفیت پایین تقسیم می‌شوند. جریان باکیفیت بالا برای استفاده در بخش مصارف فرستاده می‌شود. جریان باکیفیت پایین یا به‌عنوان پساب واحد دفع می‌شود و یا اینکه می‌توانند نیازهای بخشی از مصارف واحد را تأمین کند. تصفیه جزئی غشایی با نسبت ثابت حذف آلاینده (RR) و ضریب ثابت بازیافت مایع (نسبتی از ورودی تصفیه جزئی که به‌عنوان جریان کیفیت بالا خارج می‌شود) در مدل‌سازی در نظر گرفته شده است. پس از فرموله کردن مسئله، به علت وجودترم‌های دو خطی در موازنه جرم آلاینده در واحد تصفیه جزئی، مسئله NLP غیر محدب ایجاد می‌شود که با استفاده از روش شاخه و حد[21] به‌وسیله نرم‌افزار لینگو[22] (ورژن 10) حل و جواب بهینه جامع به دست می‌آید. در ادامه خور و همکاران به توسعه مدل‌سازی شبکه با استفاده از هر دو نوع تصفیه جزئی غشایی و غیر غشایی پرداختند [14].

کاهش مصرف آب در پالایشگاه نفت

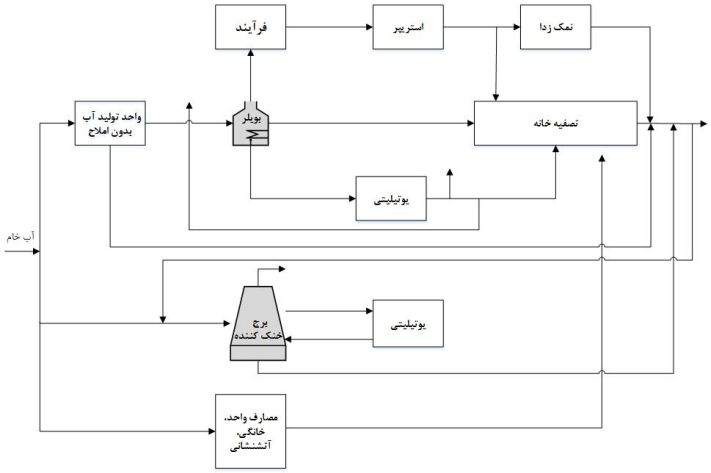
شکل 4 شماتیک کاملاً ساده‌شده‌ای از شبکه مصرف آب در صنایع فرآیندی مانند پالایشگاه نفت را نشان می‌دهد [44].

[1]Overestimator
[2]Piecewise Reformulation-Linearization Technique
[3]Branch and Bound Method
[4]Lingo



شکل 4. شماتیک ساده شده شبکه مصرف آب در پالایشگاه نفت [44]

آب خام ورودی به محیط فرآیند ممکن است نیازمند گذراندن عملیاتی مانند عبور از فیلتر شنی برای بهبود کیفیتش باشد. در بسیاری از موارد آب خام خروجی از منبع، کیفیت مناسب را برای ورود مستقیم به فرآیند را دارد. آب در بخش‌های مختلفی در یک پالایشگاه نفت مورد استفاده قرار می‌گیرد. مصارف فرآیندی (استفاده از آب در نمک‌زدایی از نفت خام و همچنین استفاده از بخار در عملیات هیدروکراکینگ، کراکینگ کاتالیزوری بستر سیال، کاهش گرانروی، شیرین سازی، هیدروتریتینگ و غیره)، مصارف یوتیلیتی، مصارف خانگی، آب آتش‌نشانی و غیره از جمله این مصارف هستند. آب‌ها پس از آلوده شدن در عملیات مختلف، به‌عنوان پساب تخلیه می‌شوند. علاوه بر این همان‌گونه که در شکل 4 نشان داده شده است، مقداری از آب خام برای سیستم تولید بخار موردنیاز است. برای این کار ابتدا می‌بایست در آب ورودی به سیستم بخار عملیاتی برای حذف ذرات معلق، نمک‌های حل‌شده و گازهای محلول جهت ارتقای کیفیت آن انجام شود. بخاری که از بویلرهای تولید بخار می‌آید، توزیع می‌شود و بخشی از میعانات بخار به بویلرها بازگردانده نشده و وارد پساب می‌شوند. بویلرها برای جلوگیری از تشکیل جامدات، نیاز دارند تا بخشی از میعانات بخار را تخلیه کنند. همچنین بسترهای تعویض یونی که برای خارج ساختن نمک‌ها و یون‌های محلول به کار می‌رود، برای احیا خود نیازمند استفاده از محلول‌های نمکی یا محلول‌های اسیدی و یا بازی هستند که این محلول‌ها نیز پس از احیا کردن بسترها، وارد پساب می‌شوند. درنهایت همان‌گونه که در شکل 4 نشان داده شده است، آب در سیستم برج‌های خنک‌کننده به‌عنوان آب جبران، در اثر هدر رفتن آب هنگام تبخیر، استفاده شده و سپس از سیستم گردشی برج‌های خنک‌کننده خارج می‌شود. تمام پساب‌های خروجی، به همراه آب‌های آلوده‌شده در اثر باران‌های طوفانی، با یکدیگر مخلوط شده و سپس در یک سیستم تصفیه مرکزی تصفیه‌شده و به محیط تخلیه می‌شود. البته در همه پالایشگاه‌ها شبکه مصرف آب مشابه شکل 4 نیست. شکل 5 شبکه مصرف آب در پالایشگاه نفت تهران (پالایشگاه جنوبی) را نشان می‌دهد [45]. همان‌گونه که در شکل 5 نشان داده شده برخلاف آنچه در قبل ذکر شد، برای نمک‌زدایی از نفت خام از بخشی از آب‌ترش تصفیه‌شده در استریپر استفاده می‌شود. همچنین بخشی از پساب تصفیه‌شده در تصفیه‌خانه، به‌عنوان آب جبران در برج خنک‌کننده مورد استفاده قرار می‌گیرد.



شکل 5 شبکه مصرف آب در پالایشگاه نفت تهران [45]

معیارهای متعددی برای تعیین کیفیت پساب جهت استفاده مجدد و یا تخلیه وجود دارد [46]. به‌طور مثال TOC، BOD و COD نشان‌دهنده محتوای آلی پساب هستند. روغن و گریس (O&G) و کل هیدروکربن‌های نفتی (TPH) معیاری از حضور روغن، گریس و دیگر هیدروکربن‌ها را ارائه می‌دهند. همچنین خواص فیزیکی پساب‌ها نیز پیش از استفاده مجدد و یا تخلیه مشخص می‌گردند که ازجمله آن‌ها می‌توان به TSS، pH و دما اشاره کرد [34].

مسئله سنتز شبکه آب در یک پالایشگاه نفت در کارهای اولیه ارائه‌شده در این زمینه مشاهده می‌گردد. تاکاما و همکاران با استفاده از برنامه‌ریزی ریاضی به حل یک مثال از پالایشگاه نفت پرداختند [35]. همچنین ونگ و اسمیت در سال‌های بعد مبانی رویکرد مفهومی برای حل مسئله سنتز شبکه آب را با حل مثال‌هایی از یک پالایشگاه نفت تبیین کردند [3]. در ادامه این پژوهش‌ها تا به امروز کارهای متعددی در این زمینه صورت گرفته است. محمد نژاد و همکاران نیز با مطالعه یکی از پالایشگاه‌های نفت ایران، راهکارهایی جهت دستیابی به گزینه‌های توجیه پذیر از منظر اقتصادی ارائه کردند [47]. جدول خلاصه‌ای از مهم‌ترین پژوهش‌های انجام‌شده برای حل مسئله سنتز شبکه آب در پالایشگاه نفت از منظر تعداد آلاینده‌های کلیدی، نوع مسئله و رویکرد حل آن را نشان می‌دهد.

جدول 3. پژوهش‌های صورت گرفته برای حل مسئله سنتز شبکه آب در پالایشگاه نفت

نویسندگان	تک آلاینده/ چند آلاینده	نوع مسئله	رویکرد حل مسئله
تاکاما و همکاران [35]	تک آلاینده	بار جرمی ثابت	بهینه‌سازی
ونگ و اسمیت [3]	تک آلاینده	بار جرمی ثابت	مفهومی
کوو و اسمیت [19]	تک آلاینده	بار جرمی ثابت	مفهومی
آرگئز و همکاران [48]	چند آلاینده	شدت جریان ثابت	بهینه‌سازی
محمد نژاد و همکاران [45]	تک آلاینده و چند آلاینده	بار جرمی ثابت	مفهومی

خور و همکاران [14]	چند آلاینده	شدت جریان ثابت	بهینه‌سازی
موقیس و الاحمد [49]	تک آلاینده و چند آلاینده	شدت جریان ثابت	مفهومی و بهینه‌سازی
فوو و همکاران [50]	تک آلاینده	شدت جریان ثابت	مفهومی

ادامه جدول 3. پژوهش‌های صورت گرفته برای حل مسئله سنتز شبکه آب در پالایشگاه نفت

نتیجه گیری

در این مقاله، مروری بر پژوهش‌های ارائه شده در زمینه سنتز شبکه آب در صنایع فرآیندی که به صورت پیوسته و مستقل (نه مجتمع‌های صنعتی) فعالیت می کنند، انجام گرفته است. مسائل سنتز شبکه آب به دو صورت الف) بار جرمی ثابت و ب) شدت جریان ثابت قابل بیان هستند و برای حل آن از دو رویکرد مفهومی و بهینه‌سازی استفاده می‌شود. رویکرد مفهومی اساسا برای سیستم‌هایی گزارش شده که در آن‌ها مصرف آب تنها توسط یک آلاینده محدود می‌شود. در این رویکرد، حل مسئله خود به دو مرحله تعیین هدف حداقل آب شیرین و طراحی/ اصلاح شبکه تقسیم می‌شود. در رویکرد بهینه‌سازی بر خلاف رویکرد مفهومی، بررسی مسئله سنتز شبکه آب با در نظر گرفتن تمام پیچیدگی‌ها از جمله تابع هدف هزینه‌ها، آلاینده‌های چندگانه، محدودیت‌های عملیاتی گوناگون و غیره امکان پذیر است. این در حالی است که یکی از مهمترین چالش‌های موجود در این رویکرد، دستیابی به جواب بهینه جامع می‌باشد. گزارش‌های متعددی در سطح جهان از کاهش مصرف آب در صنایع فرآیندی با استفاده از آنالیز پینچ آب و بهینه‌سازی ریاضی منتشر شده است که در برخی موارد کاهش قابل‌توجه مصرف آب بدست آمده است. در ایران نیز پنجه شاهی و همکاران با استفاده از آنالیز پینچ آب، مصرف آب در پالایشگاه نفت تهران را به میزان 32% کاهش است. همچنین امیدخواه و همکاران با استفاده از رویکرد بهینه‌سازی ریاضی، مصرف آب در پالایشگاه نفت تبریز را کاهش داده که صرفه‌جویی قابل‌توجه در هزینه‌ها را در پی داشته است. شایان ذکر است که طرح‌های کاهش مصرف آب در صنایع فرآیندی (به‌طور مثال صنعت نفت) می بایست علاوه بر کاهش مصرف آب و حفظ منابع، از منظر اقتصادی نیز توجیه پذیر باشند تا در نهایت به گزینه‌هایی با قابلیت پیاده سازی دست یافت.

علائم و نشانه‌ها

BOD: نیاز اکسیژن بیولوژیکی

$C_{i,c}$: غلظت آلاینده c در پساب شماره i

C_{in}: غلظت آلاینده در آب ورودی به عملیات

$C_{j,c}$: غلظت آلاینده c در مصرف‌کننده j

$C_{j,c}^{\max}$: حداکثر غلظت آلاینده c قابل پذیرش در مصرف‌کننده j

C_{pinch}: غلظت پینچ

$C_{PR,in}$: غلظت آلاینده در جریان غنی ورودی

$C_{PR,out}$: غلظت آلاینده در جریان غنی خروجی

C_{out}: غلظت آلاینده در آب خروجی به عملیات

C_{Rin}: غلظت آلاینده ورودی به تصفیه جزئیکننده

C_{Rout}: غلظت آلاینده خروجی از تصفیه جزئیکننده

COD: نیاز اکسیژن شیمیایی

F_i: شدت جریان منبع i

F_j: شدت جریان مورد نیاز مصرف‌کننده j

$F_{\min}$: شدت جریان حداقل آب شیرین

F_{Tin}: شدت جریان ورودی به تصفیه جزئیکننده

F_{Tout}: شدت جریان خروجی از تصفیه جزئیکننده

LP: برنامه ریزی خطی

$MILP$: برنامه ریزی ترکیبی خطی-عددی

$MINLP$: برنامه ریزی ترکیبی غیرخطی-عددی

NLP: برنامه ریزی غیرخطی

RR: نسبت حذف

SK_j: مجموعه مصارف

SR_i: مجموعه منابع

TOC: کل کربن آلی

TPH: کل هیدروکربن‌های نفتی

TSS: کل جامدات معلق

ZLD: تخلیه صفر مایع

$\Delta m_{p,i}$: بار جرمی انتقالی آلاینده i در عملیات p

مراجع

1. UN-WATER. "The volume of freshwater resources on Earth is around 35 million km^3," http://www.unwater.org/statistics/statistics-detail/en/c/211801/.
2. Khor C. S., Chachuat B., and Shah N., "Optimization of water network synthesis for single-site and continuous processes: milestones, challenges, and future directions," *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 53, no. 25, pp. 10257-10275, 2014.
3. Wang Y., and Smith R., "Wastewater minimisation," *Chemical Engineering Science*, vol. 49, no. 7 ,pp. 981-1006, 1994.
4. Khor C. S., Chachuat B., and Shah N., "Fixed-flowrate total water network synthesis under uncertainty with risk management," *Journal of cleaner production*, vol. 77, pp. 79-93, 2014.
5. Klemeš J. J., Varbanov P. S., and Kravanja Z" ,Recent developments in process integration," *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 91, no. 10, pp. 2037-2053, 2013.

6. PANJESHAHI M. H., "Applications of Energy and Water Process Integration Methodologies in Oil Refineries and Petrochemical Complexes," *Handbook of Process Integration (PI) Minimisation of Energy and Water Use, Waste and Emissions. Woodhead Publishing*, pp. 633-702, 2013.
7. Panjeshahi M., and Sh M., "Optimizing water use and wastewater in petrochemical processes," *Journal of Iran Energy*, vol. 11, pp. 18-35, 2008.
8. پنجه شاهی م. ح. و عطایی آ.، "بهینه‌سازی مصرف آب و تولید پساب به روش تکنولوژی پینچ آبی"، هفتمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران، 1385.
9. Hesas R. H., Tarighaleslamir A., Omidkhah M., and Baei M. S., "An Economical Comparative Study of Different Methods for Decrease Cooling Towers Makeup Cost in Oil Refineries," *World Applied Sciences Journal*, vol. 12, no. 7 ,pp. 988-998, 2011.
10. Jezowski J., "Review of water network design methods with literature annotations," *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 49, no. 10, pp. 4475-4516, 2010.
11. El-Halwagi M. M., *"Sustainable design through process integration: fundamentals and applications to industrial pollution prevention, resource conservation, and profitability enhancement*": Butterworth-Heinemann, 2017.
12. Mann J. G., and Liu Y. A., *"Industrial Water Reuse and Wastewater Minimization*": McGraw-Hill, 1999.
13. El-Halwagi M. M., Gabriel F., and Harell D., "Rigorous graphical targeting for resource conservation via material recycle/reuse networks," *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 42, no. 19, pp. 4319-4328, 2003.
14. Khor C. S., Chachuat B., and Shah N., "A superstructure optimization approach for water network synthesis with membrane separation-based regenerators," *Computers & Chemical Engineering*, vol. 42, pp. 48-63, 2012.
15. Foo D. C., *"Process integration for resource conservation*": CRC Press, 2012.
16. Wang Y., and Smith R., "Waste-water minimization with flow-rate constraints," *Chemical engineering research & design*, vol. 73, no. 8, pp. 889-904, 1995.
17. Castro P., Matos H., Fernandes M., and Nunes C. P., "Improvements for mass-exchange networks design," *Chemical Engineering Science*, vol. 54, no. 11, pp. 1649-1665, 1999.
18. Foo D. C. Y., "State-of-the-art review of pinch analysis techniques for water network synthesis," *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol .48 ,no. 11, pp. 5125-5159, 2009.
19. Kuo W.-C., and Smith R., "Design of water-using systems involving regeneration," *Process safety and environmental protection*, vol. 76, no. 2, pp. 94-114, 1998.
20. Deng C., Feng X., and Bai J., "Graphically based analysis of water system with zero liquid discharge," *chemical engineering research and design*, vol. 86, no. 2, pp. 165-171, 2008.

21. Hallale N., "A new graphical targeting method for water minimisation," *Advances in Environmental Research,* vol. 6, no. 3 ,pp. 377-390, 2002.
22. Ng D., Foo D., Tan R., and Tan Y., "Ultimate flowrate targeting with regeneration placement," *Chemical Engineering Research and Design,* vol. 85, no. 9, pp. 1253-1267, 2007.
23. Bandyopadhyay S., and Cormos C.-C., "Water management in process industries incorporating regeneration and recycle through a single treatment unit," *Industrial & Engineering Chemistry Research,* vol. 47, no. 4, pp. 1111-1119, 2008.
24. Ng D., Foo D. C. Y., and Tan R., "Automated targeting for resource conservation network with interception placement," *Chem Eng Trans,* vol. 18, pp. 857-862, 2009.
25. Olesen S., and Polley G., "A simple methodology for the design of water networks handling single contaminants," *Chemical Engineering Research and Design,* vol .75 , no. 4, pp. 420-426, 1997.
26. Kuo W.-C., and Smith R., "Designing for the interactions between water-use and effluent treatment," *Chemical Engineering Research and Design,* vol. 76, no. 3, pp. 287-301, 1998.
27. Cao D., Feng X., and Duan X., "Design of water network with internal mains for multi-contaminant wastewater regeneration recycle," *Chemical Engineering Research and Design,* vol. 82, no. 10, pp. 1331-1336, 2004.
28. Gomes J. F., Queiroz E. M., and Pessoa F. L., "Design procedure for water/wastewater minimization: single contaminant," *Journal of Cleaner Production,* vol. 15, no. 5, pp. 474-485, 2007.
29. Polley G. T., and Polley H. L., "Design better water networks," *Chemical Engineering Progress,* vol. 96, no. 2, pp. 47-52, 2000.
30. Aly S ,.Abeer S., and Awad M., "A new systematic approach for water network design," *Clean Technologies and Environmental Policy,* vol. 7, no. 3, pp. 154-161, 2005.
31. Prakash R., and Shenoy U. V., "Targeting and design of water networks for fixed flowrate and fixed contaminant load operations," *Chemical Engineering Science,* vol. 60, no. 1, pp. 255-268, 2005.
32. Agrawal V., and Shenoy U. V., "Unified conceptual approach to targeting and design of water and hydrogen networks," *AIChE Journal,* vol. 52, no. 3, pp. 1071-1082, 2006.
33. Wan Alwi S. R., and Manan Z. A., "Generic graphical technique for simultaneous targeting and design of water networks," *Industrial & engineering chemistry research,* vol. 47, no. 8, pp. 2762-2777, 2008.
34. Bagajewicz M., "A review of recent design procedures for water networks in refineries and process plants," *Computers & chemical engineering,* vol. 24, no. 9, pp. 2093-2113, 2000.

35. TAKAMA N., KURIYAMA T., SHIROKO K., and UMEDA T., "Optimal planning of water allocation in industry," *Journal of Chemical Engineering of Japan*, vol. 13, no. 6, pp. 478-483, 1980.
36. Doyle S., and Smith R., "Targeting water reuse with multiple contaminants," *Process safety and environmental protection*, vol. 75, no. 3, pp. 181-189, 1997.
37. Galan B ,.and Grossmann I., "Optimization strategies for the design and synthesis of distributed wastewater treatment networks," *Computers & Chemical Engineering*, vol. 23, pp. S161-S164, 1999.
38. Bagajewicz M., and Savelski M., "On the use of linear models for the design of water utilization systems in process plants with a single contaminant," *Chemical engineering research and design*, vol. 79, no. 5, pp. 600-610, 2001.
39. Karuppiah R., and Grossmann I. E., "Global optimization for the synthesis of integrated water systems in chemical processes," *Computers & Chemical Engineering*, vol. 30, no. 4, pp. 650-673, 2006.
40. Faria D. C., and Bagajewicz M. J., "Novel bound contraction procedure for global optimization of bilinear MINLP problems with applications to water management problems," *Computers & chemical engineering*, vol. 35, no. 3, pp. 446-455, 2011.
41. Huang C.-H., Chang C.-T., Ling H.-C., and Chang C.-C., "A mathematical programming model for water usage and treatment network design," *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 38, no. 7, pp. 2666-2679, 1999.
42. Meyer C. A., and Floudas C. A., "Global optimization of a combinatorially complex generalized pooling problem," *AIChE journal*, vol. 52, no. 3, pp. 1027-1037, 2006.
43. Tan R. R., Ng D .K., Foo D. C., and Aviso K. B., "A superstructure model for the synthesis of single-contaminant water networks with partitioning regenerators," *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 87, no. 3, pp. 197-205, 2009.
44. Smith R., *"Chemical process: design and integration*": John Wiley & Sons, 2005.
45. Mohammadnejad S., Ataei A., Bidhendi G. R. N., Mehrdadi N., Ebadati F., and Lotfi F., "Water pinch analysis for water and wastewater minimization in Tehran oil refinery considering three contaminants," *Environmental monitoring and assessment*, vol. 184, no. 5, pp. 2709-2728, 2012.
46. صراف زاده م. ح. ، رضایی ب. ، و نخعی ع. ، "استفاده مجدد از آب تولیدی در میادین نفت و گاز"، فصلنامه علمی ترویجی فرآیند نو، 54، 15-5، 1395.
47. محمد نژاد ش.، "تعیین الگوی مناسب کمینه سازی مصرف آب و تولید پساب در صنعت با در نظر گرفتن ملاحظات اقتصادی (مطالعه موردی پالایشگاه نفت تهران)"، پایان نامه دکتری تخصصی، دانشگاه تهران، ایران، 1389.
48. Alva-Argáez A., Kokossis A. C., and Smith R., "The design of water-using systems in petroleum refining using a water-pinch decomposition," *Chemical Engineering Journal*, vol. 128, no. 1, pp. 33-46, 2007.

49. Mughees W., and Al-Ahmad M., "Application of water pinch technology in minimization of water consumption at a refinery," *Computers & Chemical Engineering*, vol. 7, pp. 34-42, 2015.
50. Deng C., Shi C., Feng X., and Foo D. C. Y., "Flow rate targeting for concentration- and property-based total water network with multiple partitioning interception units," *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 55, no. 7 ,pp. 1965-1979, 2016.