Jouranl of Water and Wastewater, Vol. 30, No.3, pp: 28-38

A Novel Method in Designing Process Water Consumption Network in Oil, Gas and Petrochemical Industries

E. Rakhideh [1], R. Eslamloueyan[2]

1. MSc, Dept. of Chemical Engineering, School of Chemical and Petroleum Engineering, Shiraz University, Shiraz, Iran
2. Assoc. Prof., Dept. of Chemical Engineering, School of Chemical and Petroleum Engineering, Shiraz University, Shiraz, Iran
(Corresponding Author) eslamlo@shirazu.ac.ir

(Received Oct. 22, 2017 Accepted July 19, 2018)

To cite this article :
Rakhideh, E., Eslamloueyan, R., 2019, "A novel method in designing process water consumption network in oil, gas and petrochemical industries." Journal of Water and Wastewater, 30(3), 28-38.
Doi: 10.22093/wwj.2018.101905.2512. (In Persian)

Archive of SID

Abstract

Integrated management of water supply and wastewater treatment has an essential role for reduction of cost of supplying water and treating water effluents of industrial process plants. Several approaches have been proposed for optimal design of water networks in oil, gas and petrochemical industries. Each of these methods have their advantages and drawbacks. In the present study, a general and simple method is proposed for integrated design of non-isothermal water networks that consists of two stages: (1) designing of integrated water networks by using the concentration potential method, and (2) applying pinch algorithm to develop the energy network related to the designed water network at the first stage . Also, for verification of the suggested method an industrial case study has been investigated. The results of applying the proposed method on the industrial case study have been compared to those of obtained by heuristic based techniques at 2014. This comparison shows that the non-isothermal water network designed by our method has lower total annual cost with respect to water and energy consumption. The essential merit of the method presented in this study is the development of a general and new algorithm for conceptual design of non-isothermal water networks in petrochemical, oil and gas process industries. The amount of consumed water and the total annual cost in the designed network, based on the proposed method, are 77.28 (Kg/s) and 7942($/y) respectively, and in the network presented based on the previous method are 87.28 (Kg/s) and 8427 ($/y) respectively.

Keywords: Integrated Water Network, Concentration Potential Method, Pinch Method.

www.SID.ir

مجله آب و فاضلاب، دوره ۳۰، شماره ۳، صفحه: ۳۸-۲۸

روش نوین در طراحی شبکه مصرف آب فرایندی در صنایع نفت، گاز و پتروشیمی

ابراهیم رخیده[۱]، رضا اسلاملوییان[۲]

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد، بخش مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی شیمی، نفت و گاز، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران
۲- دانشیار، بخش مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی شیمی، نفت و گاز، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران
eslamlo@shirazu.ac.ir (نویسنده مسئول)

(دریافت ۹۶۷۷/۳۰ پذیرش ۹۷/٤/۲۸)

برای ارجاع به این مقاله به صورت زیر اقدام بفرمایید:
رخیده، ا.، اسلاملوییان، ر.، ۱۳۹۸، " روش نوین در شبکه مصرف آب فرایندی در صنایع نفت، گاز و پتروشیمی"
مجله آب و فاضلاب، ۳۰(۳)، ۳۸-۲۸. Doi: 10.22093/wwj.2018.101905.2512

چکیده

به‌منظور کاهش هزینه‌های تأمین آب و تصفیه پساب، مدیریت یکپارچه آب یکی از موضوعات مهم واحدهای فرایندی به‌شمار می‌رود. چند دیدگاه در راستای طراحی بهینه شبکه مصرف آب در صنایع نفت، گاز و پتروشیمی ارائه شده است. هر یک از این دیدگاه‌ها دارای نقاط ضعف و قوت مخصوص به خود هستند. در پژوهش حاضر راهکاری عمومی و در عین حال ساده به‌منظور طراحی یکپارچه شبکه‌های مصرف آب در حالت ناهمدما پیشنهاد شد که دارای دو مرحله می‌باشد: (۱) طراحی شبکه یکپارچه مصرف آب با استفاده از روش پتانسیل غلظتی، و (۲) طراحی شبکه انرژی مربوط به شبکه مصرف آب طراحی شده در مرحله قبل با استفاده از روش گرافیکی پینچ. همچنین به‌منظور اعتبارسنجی و ارزیابی الگوریتم دو مرحله‌ای پیشنهادی، از یک مثال صنعتی استفاده شد. نتایج اعمال روش پیشنهادی بر روی این واحد صنعتی با نتایج روش‌های مبتنی بر قوانین فرایندی اعمال شده بر این واحد در سال ۲۰۱٤ مقایسه شد. شبکه مصرف آب طراحی شده با این روش در حالت ناهمدما در مقایسه با شبکه‌های طراحی شده با روش‌های دیگر، از نظر مقدار آب و انرژی مصرفی دارای هزینه سالانه کمتری است. از نتایج مهم این پژوهش توسعه یک الگوریتم جامع و جدید به‌منظور طراحی مفهومی شبکه‌های مصرف آب در حالت ناهمدما در صنایع فرایندی نظیر صنایع پتروشیمی و پالایشگاه‌های نفت و گاز است. مقدار آب مصرفی و هزینه سالانه کل در شبکه طراحی شده بر اساس روش پیشنهادی به ترتیب (Kg/s) ۷۷/۲۸ و ۷۹۴۲ ($/y) و در شبکه ارائه شده بر اساس روش قبلی به ترتیب (Kg/s) ۸۷/۲۸ و ۸٤۲۷($/y) است.

واژه‌های کلیدی: شبکه یکپارچه آب، روش پتانسیل غلظتی، روش گرافیکی پینچ

۱- مقدمه

مصرف جهانی آب و انرژی در حال افزایش است و این روند در سال‌های آینده ادامه خواهد داشت (Ahmetovic et al., 2014). در ایران نیز کاهش شدید منابعی همچون آب در چند دهه گذشته باعث افزایش نگرانی‌ها در این زمینه شده است و موجب شده راهکارهایی برای مدیریت هرچه بیشتر این منابع در بخش‌های مختلف ارائه شود. یکی از این راهکارهای مدیریتی مصرف آب، یکپارچه‌سازی شبکه‌های مصرف آب و انرژی در بخش صنعت است. بنابراین در طراحی شبکه یکپارچه آب و انرژی[۱] هدف اصلی، کاهش هر چه

[1] Integrated Energy and Water Network

Archive of SID
www.SID.ir

dx.doi.org/10.22093/wwj.2018.101905.2512

بیشتر مصرف آب و انرژی است. برای تحقق این هدف، بازیابی هر چه بیشتر جریان‌های داخلی آب و انرژی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (Chen and Wang, 2012). کاهش مصرف آب و انرژی در صنایع فرایندی از یک طرف باعث کاهش هزینه‌ای عملیاتی و همچنین حفظ این منابع می‌شود و از طرف دیگر با طراحی بهینه شبکه انرژی از نظر سطح انتقال حرارت می‌توان هزینه‌های اولیه طراحی را تا حدودی کاهش داد (Sahu and Bandyopadhyay, 2012).

در چند دهه گذشته روش‌های متفاوتی برای کاهش مصرف آب در حالت ناهمدما در صنایع فرایندی ارائه شده است که عمده این روش‌ها به کاهش مصرف آب و انرژی به‌صورت مجزا می‌پردازند (Savulescu et al., 2002, Leewongtanawit and Kim, 2009, Manan et al., 2009, Polley et al., 2010).

برهم کنش بین شبکه آب و شبکه انرژی در سیستم‌های یکپارچه آب و انرژی در واحدهای صنعتی غیر قابل انکار است (Sahu and Bandyopadhyay, 2012). بنابراین مدیریت همزمان مصرف آب و انرژی در شبکه‌های ناهمدمای[1] مصرف آب، موضوع مهم و مورد توجه طراحان بخش‌های صنعتی است (Linnhoff et al., 1982). به‌منظور طراحی شبکه‌های مصرف آب در حالت ناهمدما از روش‌های مفهومی[2] و روش‌های مبتنی بر معادلات ریاضی[3] استفاده می‌شود (Ahmetovic and Kravanja, 2012).

روش‌های مبتنی بر معادلات ریاضی برای طراحی شبکه‌های پیچیده دارای تعداد زیادی مصرف کننده و آلاینده مختلف همچون هدایت، COD،TDS و میزان روغن است (Dong et al., 2008). این در حالی است که روش‌های مبتنی بر معادلات ریاضی اغلب فاقد کنترل‌پذیری و بینش فرایندی در زمان طراحی است.

در مقابل روش‌های مفهومی به‌عنوان یک ابزار گرافیکی سودمند و با ایجاد یک بینش کلی از فرایند، روشی مناسب به‌منظور طراحی یکپارچه شبکه مصرف آب و انرژی به‌شمار می‌روند (Patino et al., 2011). به‌منظور طراحی شبکه مصرف آب و انرژی از دو رویکرد طراحی یک مرحله ای و طراحی دو مرحله‌ای استفاده می‌شود (Ahmetovic and Kravanja, 2012).

در طراحی یک مرحله‌ای، شبکه مصرف آب و شبکه انرژی به‌صورت همزمان طراحی می‌شود که این رویکرد بیشتر در روش‌های مبتنی بر معادلات ریاضی به‌کار گرفته می‌شود. در رویکرد دو مرحله‌ای ابتدا شبکه مصرف آب و در مرحله بعد شبکه انرژی طراحی می‌شود که این رویکرد در هر دو روش مبتنی بر معادلات ریاضی و روش‌های مفهومی قابل استفاده است. در زمینه روش‌های مبتنی بر معادلات ریاضی ساوالسکی و باگاجویچ اولین بار در سال ۱۹۹۷ بهینه‌سازی هم زمان آب و انرژی را در شبکه‌های مصرف آب در حالت ناهمدما مورد بررسی قرار دادند (Savelski and Bagajewicz, 1997). در سال ۱۹۹۸ باگاجویچ و همکاران با ارائه مفهوم رویکرد فضای حالت[4] برای نخستین بار به روشی برای طراحی شبکه مصرف آب دست یافتند (Bagajewicz et al., 1998).

پس از آن در سال ۲۰۰۲ باگاجویچ و همکاران در جهت بهینه‌سازی هر چه بیشتر شبکه‌های طراحی شده بر اساس مفهوم رویکرد فضای حالت از برنامه‌ریزی معادلات خطی اعداد صحیح مخلوط[5] استفاده کردند (Bagajewicz et al., 2002). در مدل ترتیبی ارائه شده توسط باگاجویچ در سال ۲۰۰۲ از فرصت اختلاط غیر همدمای جریان‌ها به‌منظور کاهش تعداد مبدل‌های حرارتی کمک گرفته شد (Bagajewicz et al., 2002).

دانگ و همکاران در سال ۲۰۰۸، لیو و همکاران در سال ۲۰۱۱ و چن و همکاران در سال ۲۰۱۴ با بسط مفهوم رویکرد فضای حالت به معادلات غیرخطی اعداد صحیح مخلوط[6] موفق به ارائه روش تک مرحله‌ای به‌منظور طراحی بهینه شبکه مصرف آب و انرژی بر اساس هزینه کل شدند (Liao et al., 2011, Dong et al., 2008, Chen et al., 2014).

مشکل اصلی در تمامی روش‌های مبتنی بر معادلات ریاضی، پیچیده بودن و نیاز به مجموعه بسیار زیادی از معادلات مربوط به مسائل بهینه‌سازی و همچنین پیدا کردن الگوریتمی مناسب برای همگرایی تابع هدف حول جواب صحیح و منطقی مسئله است. این

[1] Non-isothermal network
[2] Conceptual methods
[3] Mathematical programming
[4] State space approach
[5] Mixed integer linear programming
[6] Mixed integer non-linear programming

Archive of SID
www.SID.ir

در حالی است که با وجود پیچیدگی و دشواری این روش، ارائه یک دستورالعمل کلی و عمومی بر اساس این روش‌ها به‌منظور طراحی کلیه شبکه‌ها عملاً غیر ممکن است و طراحی هر شبکه نیاز به معادلات مجزا و مخصوص به خود دارد. روش سیستم‌های جدا[1]، نمودارهای دو بعدی[2]، اصل تداخل جریان‌ها[3]، منحنی مرکب انرژی جریان‌ها[4] و همچنین قوانین ترمودینامیکی گرافیکی[5] از جمله روش‌های ارائه شده در زمینه روش‌های مفهومی هستند که به طراحی ترتیبی شبکه مصرف آب و انرژی می‌پردازند (Savulescu et al., 2002, Sorin and Savulescu, 2004, Savulescu et al., 2005b, Savulescu et al., 2005a, Feng et al., 2008, Leewongtanawit and Kim, 2009, Manan et al., 2009, Polley et al., 2010).

علی‌رغم سادگی و قابل فهم بودن روش‌های مفهومی در مقایسه با روش‌های مبتنی بر معادلات ریاضی، در این روش‌ها نیز تا به حال دستورالعملی کلی برای طراحی کلیه شبکه‌ها ارائه نشده است. مشکل دیگر روش‌های مفهومی این است که اغلب روش‌های ارائه شده تا به حال، تنها برای طراحی شبکه‌های با دمای ثابت و دارای یک نوع آلاینده خاص کارایی دارند که همین امر باعث عدم به کارگیری این روش‌ها در طراحی شبکه‌های ناهمدما و دارای یک یا چند آلاینده مختلف شده است. لیو در سال ۲۰۰۹ با بیان مفهوم پتانسیل غلظتی منبع و پتانسیل غلظتی تقاضا[6] برای اولین بار موفق به ارائه روشی به‌منظور طراحی شبکه‌های مصرف آب دارای چندین آلاینده مختلف بر اساس الگوی استفاده مجدد شد (Liu et al., 2009). در همین راستا پان در سال ۲۰۱۲ بر مبنای روش پتانسیل غلظتی شبکه‌های دارای الگوی احیا بازگشت را مورد بررسی قرار داد (Pan et al., 2012).

با وجود سادگی طراحی شبکه‌های همدمای مصرف آب به روش پتانسیل غلظتی، تا به حال تعداد محدودی از پژوهش‌ها در زمینه طراحی شبکه‌های ناهمدما به کمک این روش انجام شده است.

در این پژوهش یک روش ترتیبی جدید به‌منظور طراحی شبکه‌های مصرف آب در حالت ناهمدما شامل یک و یا چند آلاینده مختلف پیشنهاد شده است. در این روش که به‌منظور دستیابی به حداقل انرژی خارجی مصرفی از هر دو فرصت اختلاط همدما و اختلاط غیر همدمای جریان‌ها بهره گرفته شده است، با کدنویسی روش پتانسیل غلظتی در محیط نرم‌افزار متلب امکانی فراهم شد که بدون نیاز به انجام محاسبات دستی کلیه شبکه‌های مصرف آب طراحی شود. در مرحله بعد به کمک روش نموداری پینچ[7] شبکه مصرف انرژی طراحی شد. مزیت اصلی روش پیشنهادی نسبت به روش‌های پیشین، قابل استفاده بودن این روش برای طراحی کلیه شبکه‌ها، سادگی و دقت قابل قبول آن است (Linnhoff et al., 1982).

۲- روش پیشنهادی

در این پژوهش به منظور طراحی شبکه‌های یکپارچه مصرف آب در حالت ناهمدما، به‌منظور افزایش گردش آب درون سیستم و در نتیجه کاهش نیاز به منبع خارجی، از الگوی بازیابی جریان خروجی مصرف کننده‌ها بر اساس روش پتانسیل غلظتی استفاده شد. همچنین به‌منظور رساندن دمای جریان‌ها به دمای عملیاتی هر یک از مصرف‌کننده‌ها و یا به دمای مورد نیاز خروجی از سیستم از هر دو فرصت تبادل حرارت مستقیم با استفاده از اختلاط غیر همدمای جریان‌ها و تبادل حرارت غیر مستقیم به‌کمک عبور جریان‌های گرم و سرد از مبدل‌های حرارتی استفاده شد.

در این پژوهش منظور از آلاینده، کمیت و یا متغیرهایی است که بیانگر مقدار شدت و یا غلظت آلاینده موجود در جریان‌هاست مانند هدایت، TDS، COD و میزان غلظت روغن که در طراحی شبکه مصرف آب به‌صورت مجزا (شبکه‌های از نوع تک آلاینده‌ای) و یا با یکدیگر (شبکه‌های از نوع چند آلاینده‌ای) مورد بررسی قرار گرفتند.

با توجه به اینکه در شبکه‌های طراحی شده در قسمت‌های مختلف امکان اختلاط جریان‌ها با یکدیگر وجود دارد، نکته قابل تأمل، انتخاب کمیّت‌هایی است که از قانون اختلاط خطی پیروی کنند. به‌عنوان مثال در صورتی که جریان فرضی ۳ از اختلاط دو جریان فرضی ۱ و ۲ به‌وجود آید، مقدار کمیّت pH جریان ۳ را نمی‌توان با استفاده از قانون اختلاط خطی pH جریان ۱ و pH جریان ۲ محاسبه کرد. بنابراین در شرایطی که کمیّت pH به‌عنوان یکی از آلاینده‌های مورد بررسی شبکه مد نظر باشد، ابتدا باید

[1] Separate System
[2] Two Dimensional Diagram
[3] Stream Merging Principles
[4] Energy Composite Curves
[5] Graphical Thermodynamic Rules
[6] Concentration Potential Demand and Source
[7] Graphical Pinch Method

Archive of SID
www.SID.ir

dx.doi.org/10.22093/wwj.2018.101905.2512

کمیت pH به‌کمک روابط موجود، به‌صورت غلظت یون‌های هیدروژن موجود در محلول بیان شود تا از این طریق امکان استفاده از قانون اختلاط خطی برای این آلاینده در هنگام اختلاط جریان‌ها فراهم شود. نکته دیگر این که در کلیه روش‌های ارائه شده تا به حال، برای طراحی شبکه آب مصرفی صنایع در حالت چند آلاینده‌ای، فرض بر این بوده است که هیچ بر همکنشی بین آلاینده‌های موجود در جریان از قبیل وقوع واکنش شیمیایی و یا ایجاد هر نوع تغییر در ماهیت آلاینده‌ها انجام نمی‌شود. هر چند به نظر می‌رسد فرض مذکور در شرایط عملیاتی واحدهای صنعتی چندان منطقی نباشد، اما تا به حال در هیچ یک از پژوهش‌های ارائه شده در داخل و خارج از کشور به این مشکل اشاره نشده است. در پژوهش حاضر نیز با توجه به ارائه روش عمومی جدید و نیاز به مقایسه نتیجه روش پیشنهادی با نتایج روش‌های پیشین و مشخص شدن کارایی روش پیشنهادی، فرض مربوط به عدم تاثیر آلاینده‌ها بر یکدیگر در نظر گرفته شد.

۲-۱- فرض‌های به کار گرفته شده

فرض‌های به‌کار گرفته شده در طراحی شبکه یکپارچه آب در حالت ناهمدما شامل موارد زیر است.

الف- بار جرمی آلاینده‌ها[1] در شبکه‌های مورد بررسی در این پژوهش ثابت و از الگوی استفاده مجدد در طراحی شبکه مصرف آب استفاده شد. به‌عبارت دیگر در تخصیص جریان آب به هریک از مصرف کننده‌ها با توجه به ماهیت ترتیبی روش پتانسیل غلظتی، در هر مرحله جریان آب به یکی از مصرف کننده‌ها اختصاص می‌یابد و این جریان در صورت امکان از خروجی مصرف کننده‌های دیگر تأمین و در نهایت در صورت نیاز با جریان آب تازه مخلوط می‌شود. اطلاعات جریان‌ها شامل حداکثر غلظت ورودی و خروجی مجاز هر یک از الاینده‌ها، بار جرمی آلاینده‌ها، دمای هریک از مصرف کنندها، دمای آب تازه ورودی به سیستم و دمای پساب خروجی از سیستم مشخص می‌باشد.

ب- در تخصیص آب به هر یک از مصرف کننده‌ها منابع داخلی نسبت به منابع خارجی ارجحیت دارند.

ج- اتلاف و یا تولید آب در سیستم وجود ندارد.

د- غلظت آلاینده‌ها در جریان آب ورودی به سیستم برابر با صفر است و هیچ محدودیتی برای غلظت آلاینده‌ها در جریان پساب خروجی از سیستم وجود ندارد؛ بنابراین در این روش ابتدا شبکه مصرف آب طراحی شده و خروجی پساب نهایی وارد تصفیه خانه می‌شود که طراحی آن مستقل از طراحی شبکه مصرف آب می‌باشد.

هـ- ظرفیت گرمایی آب در تمام جریان‌ها برابر با KJ/(KG°C) ۴.۱۸۶ در نظر گرفته شده است.

و- کل شبکه به‌صورت پیوسته و در حالت پایا است.

ز- هیچ برهمکنشی بین آلاینده‌های درون یک جریان مانند وقوع واکنش شیمیایی انجام نمی‌شود.

۲-۲- الگوریتم روش پیشنهادی

هدف نهایی در طراحی یکپارچه شبکه آب در حالت ناهمدما دستیابی به کمترین هزینه طراحی به کمک کاهش مصرف آب، انرژی گرمایشی و انرژی سرمایشی است. در شکل ۱ الگوریتم طراحی بر اساس روش پیشنهادی نشان داده شده است. در روش پیشنهادی به‌منظور کاهش نیاز به منابع خارجی آب و انرژی تا حد امکان بازیابی منابع داخلی مدنظر قرار گرفت. به بیانی ساده‌تر به‌منظور کاهش مصرف آب در هر شبکه مصرف، می‌توان با استفاده از یک روش مناسب مانند روش پتانسیل غلظتی، جریان آب خروجی از مصرف کننده‌ها را به شرط داشتن کیفیت مناسب در مصرف کننده‌های دیگر مورد استفاده مجدد قرار داد که این امر کاهش نیاز به آب تازه را به‌دنبال خواهد داشت، و یا در مورد انرژی در شبکه‌های ناهمدمای مصرف آب، می‌توان از انرژی جریان‌های گرم برای بالا بردن دمای جریان‌های سرد با استفاده از یک مبدل حرارتی استفاده مجدد کرد.

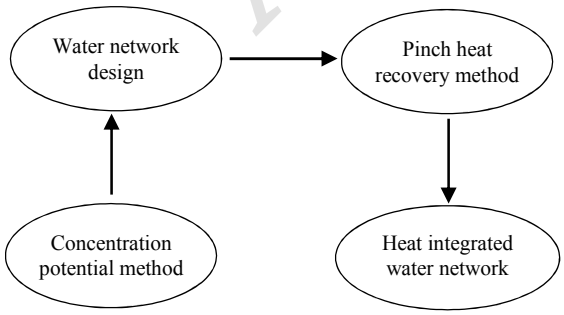

Fig. 1. The algorithm of the proposed method

شکل ۱- الگوریتم روش پیشنهادی

[1] Contaminant Mass Load

Archive of SID
www.SID.ir

۲-۳- طراحی شبکه مصرف آب

اصل پتانسیل غلظتی شامل پتانسیل غلظتی منبع و پتانسیل غلظتی تقاضا به‌عنوان روشی کارا به‌منظور طراحی شبکه مصرف آب مورد استفاده قرار گرفت. پتانسیل غلظتی تقاضا عبارت است از توانایی هر مصرف کننده در استفاده مجدد از جریان آب خروجی از سایر مصرف کننده‌ها که این پارامتر با CPD[1] نمایش داده می‌شود. بنابراین هر چه مقدار CPD برای مصرف کننده بیشتر باشد این پتانسیل بالاتر است. به‌صورت مشابه پتانسیل غلظتی منبع عبارت است از توانایی هر یک از مصرف کننده‌ها در امکان بازیابی از جریان خروجی آنها که این پارامتر با CPS[2] نمایش داده می‌شود. مقدار CPS بیشتر بیانگر بالا بودن این پتانسیل است. پتانسیل غلظتی منبع و تقاضا با معادلات ۱ و ۲ به‌دست می‌آید (Liu et al., 2009).

$$CPD(D_j) = \sum_{i=1}^{NS} R_{i,j} = \sum_{i=1}^{NS} \min_{k=1;2;...;NC} \left(\frac{c_{Dj,k}^{lim}}{c_{Si,k}} \right) \quad (۱)$$

$$CPS(S_i) = \frac{1}{\sum_{j=1}^{ND} R_{i,j}} = \frac{1}{\sum_{j=1}^{ND} \min_{k=1;2;...;NC} \left(\frac{c_{Dj,k}^{lim}}{c_{Si,k}} \right)} \quad (۲)$$

که در این معادلات

D_j بیانگر مصرف کننده متقاضی، S_i بیانگر مصرف کننده منبع، NS تعداد مصرف کننده‌های منبع، ND تعداد مصرف کننده‌های متقاضی، NC تعداد آلاینده‌ها، $C_{Dj,k}^{lim}$ غلظت مجاز آلاینده K در مصرف کننده D، $C_{Si,k}$ غلظت آلاینده K خروجی از مصرف کننده S و R کسری از جریان مورد نیاز مصرف کننده متقاضی است که می‌تواند از طریق منبع داخلی تأمین شود به نحوی که شرط غلظت مجاز آلاینده‌ها نقض نشود. در صورتی که مقدار R کمتر از یک باشد به این معناست که مصرف کننده علاوه بر منبع داخلی به جریان آب تازه نیز نیاز دارد و در صورتی که مقدار R مساوی و یا بزرگ‌تر از یک باشد، مصرف کننده نیازی به جریان آب تازه ندارد و جریان تخصیص یافته به‌صورت کامل از منابع داخلی تأمین می‌شود. تخصیص آب به مصرف کننده‌ها در این روش فرایندی مرحله به مرحله است که در هر مرحله، مصرف‌کننده‌ها در دو گروه قرار می‌گیرند. گروه اول شامل مصرف‌کننده‌هایی است که هنوز به آن‌ها جریان آب اختصاص داده نشده است که به این مصرف کننده‌ها، مصرف کننده‌های متقاضی گفته می‌شود. گروه دوم شامل مصرف‌کننده‌هایی است که در مراحل قبل به آن‌ها جریان آب اختصاص یافته است که به این مصرف کننده‌ها، مصرف کننده منبع گفته می‌شود. در هر مرحله یکی از مصرف‌کننده‌های گروه اول برای تخصیص آب، انتخاب می‌شود و از میان مصرف کننده‌های گروه دوم نیز یک مصرف کننده به‌عنوان منبع داخلی برای تخصیص آب به مصرف کننده انتخاب شده در گروه اول انتخاب می‌شود. نکته مهم در انتخاب مصرف کننده متقاضی، انتخاب مصرف کننده‌ای است که پتانسیل غلظتی تقاضا در آن از بقیه مصرف‌کننده‌های متقاضی گروه اول موجود در مرحله پیش رو، بالاتر باشد این امر باعث کاهش نیاز مصرف‌کننده متقاضی به جریان آب تازه می‌شود. در مقابل از میان مصرف کننده‌های گروه دوم لازم است مصرف کننده‌ای انتخاب شود که پتانسیل غلظتی منبع آن از سایر مصرف کننده‌های گروه دوم در مرحله پیش رو بیشتر باشد. برنامه‌نویسی و محاسبات مربوط به روش پتانسیل غلظتی در محیط نرم‌افزار متلب برای طراحی کلیه شبکه‌های مصرف آب انجام شد.

۲-۴- طراحی شبکه انرژی

پس از طراحی شبکه مصرف آب، اطلاعات مربوط به جریان‌های گرم و سرد شامل دمای اولیه و ثانویه و همچنین دبی هر جریان برای طراحی شبکه انرژی به‌دست آمد. در طراحی شبکه انرژی، از هر دو فرصت تبادل حرارت مستقیم و غیر مستقیم کمک گرفته شد. ابتدا در طراحی شبکه انرژی مربوط به شبکه آب از اختلاط غیر همدمای جریان‌ها به‌منظور کاهش تعداد مبدل‌های حرارتی استفاده شد. استفاده از اختلاط غیر همدمای جریان‌ها در کنار کاهش تعداد مبدل‌های حرارتی مورد نیاز شبکه انرژی، یک پیامد منفی بر روی طراحی نهایی شبکه دارد. در صورتی که دو جریان با دمای متفاوت قبل از ورود به یک مصرف کننده با یکدیگر مخلوط شوند، این امر باعث از بین رفتن بخشی از نیروی محرکه دمایی می‌شود که این رویداد عملاً مانع بازیابی بخشی از انرژی جریان مخلوط شده در تبادل حرارت غیر مستقیم و در نتیجه افزایش نیاز به انرژی خارجی می‌شود. ساها و همکاران در سال ۲۰۱۲ در پژوهش‌های خود به این نتیجه رسیدند که انتقال حرارت به روش اختلاط غیر همدمای

[1] Concentration Potential Demand (CPD)
[2] Concentration Potential Source (CPS)

Archive of SID
www.SID.ir

dx.doi.org/10.22093/wwj.2018.101905.2512

جریان‌ها تنها در ناحیه دمایی پینچ باعث کاهش نیاز به انرژی خارجی می‌شود (Sahu and Bandyopadhyay, 2012).

بنابراین به‌منظور از بین رفتن تأثیر نامطلوب اختلاط بر اختلاف دمایی جریان‌ها، اختلاط جریان‌ها تنها در محدوده دمای پینچ صورت گرفت.

لازم به‌ذکر است منظور از اختلاط جریان‌ها در واقع ترکیب دو یا چند جریانی است که دارای یک مقصد مشترک (به یک مصرف کننده مشخص اختصاص داده شوند) باشند. پس از اختلاط جریان‌ها، به‌منظور افزایش بازیابی انرژی شبکه از انتقال حرارت غیر مستقیم جریان‌ها تحت روش گرافیکی پینچ استفاده شد. یکی از روش‌های پرکاربرد و در عین حال ساده در مبحث یکپارچه سازی انرژی، استفاده از روش‌های گرافیکی است. روش‌های گرافیکی با ایجاد یک بینش کلی از فرایند امکان بازیابی هر چه بیشتر و بهتر انرژی را فراهم می‌آورند. یکی از مهم‌ترین روش‌های گرافیکی مورد استفاده در مبحث یکپارچه‌سازی انرژی، استفاده از روش نموداری پینچ است. در این روش با استفاده از منحنی های ترکیب شده، هر یک از جریان‌های گرم و سرد به‌صورت مرکب در کنار یکدیگر قرار گرفته و در نتیجه این امکان فراهم می شود که با استفاده درست و بهینه از مبدل‌های حرارتی کمترین مقدار انرژی گرمایی و سرمایی خارجی مورد استفاده قرار گیرد (Linnhoff et al., 1982).

برای این منظور ابتدا لیستی از جریان‌های گرم و جریان‌های سرد موجود در شبکه (شبکه حاصل پس از انجام عملیات اختلاط جریان‌ها) تهیه شد. پس از آن به کمک روش‌های موجود منحنی مرکب جریان گرم و سرد بر روی یک منحنی که محور افقی آن معرف بار انرژی و محور عمودی آن معرف دما است رسم و به کمک نمودار مرکب جریان گرم و سرد مقدار حداقل بار گرمایی و سرمایی مورد نیاز و همچنین دمای پینچ - دمایی که در آن فاصله عمودی منحنی مرکب جریان گرم و سرد کمترین مقدار باشد- محاسبه شد. با مشخص شدن دمای پینچ، مسئله به دو ناحیه مجزا شامل ناحیه‌ای که در آن دمای جریان‌ها بالاتر از دمای پینچ و ناحیه‌ای که در آن دمای جریان‌ها کمتر از دمای پینچ است، تقسیم می‌شود. الگوریتم طراحی به روش گرافیکی پینچ شامل سه اصل کلی است: ۱) در ناحیه دمایی بالای دمای پینچ تنها از گرم کننده‌ها استفاده شود، ۲) در ناحیه دمایی پایین دمای پینچ تنها از سردکننده‌ها استفاده شود و ۳) هیچ انتقال حرارتی در محدوده دمایی پینچ انجام نشود. با استفاده از این الگوریتم طراحی نهایی شبکه انرژی انجام می‌شود. در این پژوهش به‌منظور حذف محاسبات دستی، مرحله تبادل حرارت غیر مستقیم به کمک شبیه‌ساز انرژی نرم‌افزار اسپن [1] انجام شد به گونه‌ای که با ورود اطلاعات مربوط به جریان‌های گرم و سرد به محیط نرم‌افزار، شبکه انرژی بر اساس روش پینچ طراحی شد. در شکل ۲ الگوریتم نهایی طراحی شبکه آب و انرژی مربوط به شبکه آب در حالت ناهمدما نشان داده شده است.

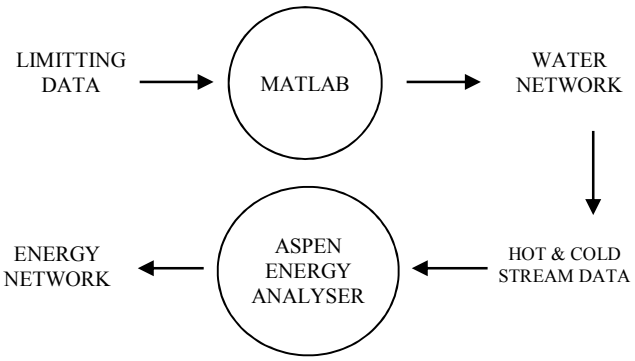

Fig. 2. Design steps with the aid of Matlab and Aspen softwares

شکل ۲- مراحل طراحی به کمک نرم افزار متلب و اسپن

با طراحی شبکه یکپارچه مصرف آب در حالت ناهمدما طی دو مرحله قبل، میزان آب مصرفی با استفاده از برنامه کدنویسی شده در محیط نرم‌افزار متلب و انرژی گرمایشی، انرژی سرمایشی، سطح انتقال حرارت و هزینه سالانه شبکه انرژی از نرم‌افزار آنالیز انرژی اسپن به‌دست آمد.

در جدول ۱ اطلاعات مورد نیاز نرم‌افزار به‌منظور محاسبه هزینه سالانه شبکه انرژی بر اساس معادلات۳ تا ۶ ارائه شده است. لازم به ذکر است اطلاعات جدول ۱ و معادلات ۳ تا ۶ به‌صورت پیش‌فرض در محیط این نرم‌افزار مورد استفاده قرار گرفت.

$$\text{Capital Cost}\,(\$) = 10000 + 800 \times \left(\frac{\text{HeatExch.Area}}{\text{Shells}}\right)^{0.8} \times \text{Shells} \qquad (۳)$$

[1] Aspen Tech. Aspen Energy Analyzer V7.1

Archive of SID
www.SID.ir

جدول ۱- داده‌های دمای مورد استفاده

Table 1. Thermal used data

Parameters	Cost
Cooling utility	6.71 $/(KWY)
Heating utility	59.96 $/(KWY)
Fixed charge	10,000 $
Cost coefficient	800 $/M2
Cost exponent	0.8
Rate of return (ROR)	10%
Plant life (PL)	5 (Y)
Overall heat transfer coefficient	0.35 KW/(M^2 °C)
Individual heat transfer coefficients	0.6 KW/(M^2 °C)
Working hours of the network per year	8,766 H
Inlet temperatures of the cooling water	15 °C
Outlet temperatures of the cooling water	20 °C
Temperatures of the freshwater	20 °C
Temperatures of the effluent	30 °C
Specific heat capacity of the water	4.186 KJ/(KG °C)

$$AF = \frac{\left(1 + ROR/100\right)^{PL}}{PL} \quad (۴)$$

$$\text{Operating Cost}\left(\$/y\right) = \left(\text{Cooling utility Cost}\right) + \left(\text{Heating utility Cost}\right) \quad (۵)$$

$$TAC\left(\$/y\right) = \left(\text{Operating Cost}\right) + \left(AF\right) \times \left(\text{Capital Cost}\right) \quad (۶)$$

که در معادله ۳، Capital cost بیانگر هزینه ثابت اولیه مربوط به شبکه انرژی است که این متغیر به سطح انتقال حرارت و همچنین تعداد پوسته مبدل‌های حرارتی مورد استفاده بستگی دارد. در معادله ۴، AF ضریب تبدیل سالانه و در واقع بیانگر عمر مفید سالانه تجهیزات شبکه است. در معادله ۵ Operating cost هزینه عملیاتی شبکه انرژی و حاصل کل هزینه بارگرمایشی و سرمایشی مورد نیاز تأمین شده از طریق منبع خارجی است و TAC کل هزینه سالانه است.

۳- نتایج و بحث

در این بخش به‌منظور اعتبارسنجی الگوریتم پیشنهادی، یک فرایند مطالعاتی سه آلاینده‌ای که در پژوهش‌های پیشین ارائه شده مورد بررسی قرار گرفت (Hou et al., 2014). چنانچه در جدول ۲ نشان داده شده است، این فرایند دارای سه مصرف کننده آب است که هر کدام از این مصرف‌کننده‌ها یک نوع آلاینده را وارد جریان آب می‌کنند (Hou et al., 2014). پس از اعمال الگوریتم پیشنهادی برای فرایند مذکور شبکه آب مربوط به آن در شکل ۳ و شبکه مربوط به انرژی در شکل ۴ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود اگر چه از نظر بهینه‌سازی مصرف آب شبکه فوق بهینه بوده و جریان‌های آب مورد نیاز هر فرایند بر اساس حدود مجاز غلظت آلاینده ها تأمین شده است اما از نظر دما این فرایند نیازمند مبدل‌هایی به‌منظور گرم کردن و سرد کردن برخی جریان ها است. به منظور کاهش مصرف آب خنک و بخار داغ که نهایتاً باعث کمینه شدن مصرف آب کل واحد می‌شود با استفاده از روش پینچ از جریان‌های سرد و گرم موجود در فرایند برای نیل به این هدف استفاده شد. در شکل ۴ شبکه مبدل‌های مورد نیاز نشان داده شده‌اند. جریان ۴ در یک مبدل با جریان سرد ۱ تبادل حرارت کرده و از ۱۰۰ درجه سلسیوس به ۶۵ درجه می‌رسد. سپس جریان ۴ وارد مبدل دیگری شده که در آنجا جریان سرد شماره ۲ را گرم کرده و از دمای ۶۵ درجه سلسیوس به دمای ۵۷ درجه سلسیوس

Archive of SID
www.SID.ir

جدول ۲- داده‌های فرایند مطالعاتی

Table 2. Data for studied process

Process	Contaminants	Mass load (g/s)	Max inlet concentration (ppm)	Max outlet concentration (ppm)	Temperature (°C)
1	A	30	50	800	75
2	A	5	50	100	100
3	A	50	800	1100	100

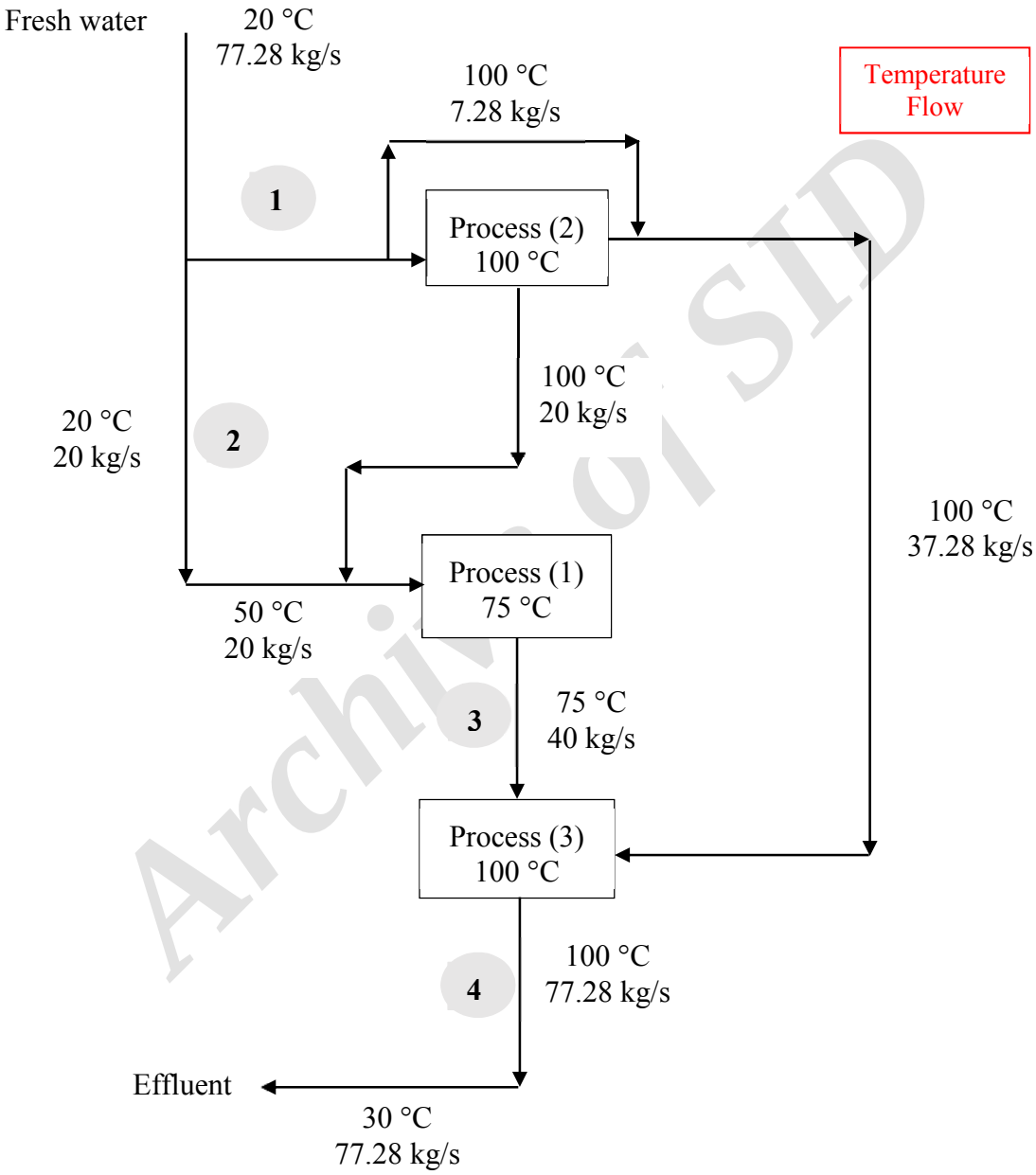

Fig. 3. Designed water consumption network for the studied process

شکل ۳- شبکه مصرف آب به‌دست آمده مربوط به مورد مطالعاتی

Archive of SID
www.SID.ir

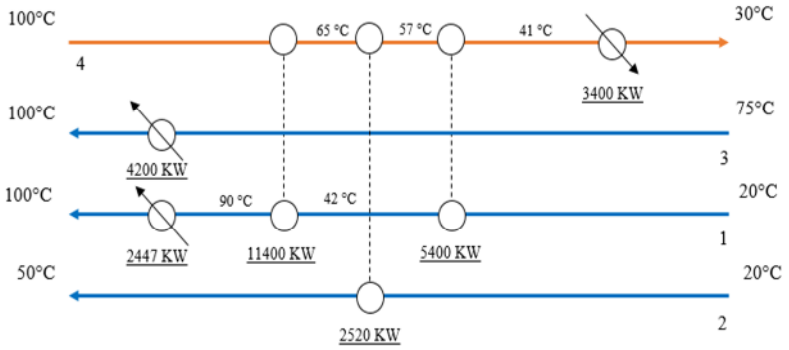

Fig. 4. The energy network for the studied process

شکل ۴- شبکه انرژی به‌دست آمده مربوط به فرایند مطالعاتی

می رسد. در ادامه این جریان با تبادل حرارت با جریان ۱ سرد شده و به دمای نهایی ۳۰ درجه سلسیوس می‌رسد. به این ترتیب از حداکثر حرارت این جریان استفاده شده و مصرف منبع خارجی تأمین شده از طریق واحد جانبی به حداقل می‌رسد.

در جدول ۳ میزان مصرف کل آب و هزینه سالانه برای طراحی پیشنهادی در این مطالعه و طراحی ارائه شده در پژوهش‌های پیشین ارائه شده است.

جدول ۳- مقایسه نتایج به‌دست آمده در این تحقیق با روش ارائه شده در کار قبلی (Hou et al., 2014)

Table 3. Comparing the results of this study with others work (Hou et al., 2014)

Case study	Amount of water (kg/s)	Total annual cost
Heuristic method 2014	87.28	8427
Proposed method in this study	77.28	7942

با بررسی نتایج مربوط به مورد مطالعاتی مشخص می‌شود که روش پیشنهادی باعث کاهش مصرف آب و هزینه سالانه کل شبکه انرژی در مقایسه با روش ارائه شده در سال ۲۰۱۴ شده است (Hou et al., 2014).

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش از روش پتانسیل غلظتی برای طراحی شبکه مصرف آب و از روش پینچ برای طراحی شبکه مصرف انرژی استفاده شد. یکی از مهم‌ترین مزیت‌های روش پیشنهادی نسبت به روش‌های پیشین، سادگی و در عین حال عمومی بودن روش ارائه شده است به گونه‌ای که از آن می‌توان در کلیه موارد طراحی شبکه‌های مصرف آب در حالت ناهمدما استفاده کرد. این درحالی است که در اغلب روش‌های گذشته با وجود دشواری، برای هر شبکه نیاز به معادلات متفاوتی است.

به‌منظور اعتبارسنجی روش پیشنهادی میزان مصرف آب و هزینه سالانه کل شبکه های مورد مطالعه با نتایج روش‌های پیشین مقایسه شد. با مقایسه نتایج روش پیشنهای و نتایج روش‌های پیشین مشخص شد که میزان آب مصرفی در روش پیشنهادی نسبت به روش‌های پیشین کمتر است که این امر بیان کننده کارایی روش در کاهش مصرف آب می‌باشد. به‌منظور مشخص شدن کارایی روش پیشنهادی در کاهش مصرف انرژی، نتایج روش ارائه شده با نتایج روش‌های پیشین مقایسه و مشخص شد که میزان انرژی گرمایشی و سرمایشی مصرفی افزایش و مقدار سطح انتقال حرارت مورد نیاز کاهش یافته است. با توجه به اینکه در روش پیشنهادی به‌منظور بهینه‌سازی مقدار هزینه سالانه از نرم‌افزار آنالیز انرژی اسپن استفاده شد و در این نرم‌افزار به‌منظور جلوگیری از کاهش اختلاف دمایی جریان گرم و سرد، یک حداقل اختلاف دمایی مجاز در نظر گرفته می‌شود، این امر مانع افزایش نامعقول سطح انتقال حرارت مورد نیاز در این روش شد.

به‌منظور مشخص شدن تأثیر همزمان سطح انتقال حرارت و انرژی گرمایشی و سرمایشی بر شبکه‌های طراحی شده، فاکتور هزینه سالانه کل بر اساس معادلات هزینه مورد استفاده در نرم‌افزار آنالیز انرژی اسپن مورد بررسی قرار گرفت که با توجه به کاهش زیاد سطح انتقال حرارت و افزایش کم انرژی گرمایشی و

Archive of SID
www.SID.ir

سرمایشی، هزینه سالانه شبکه انرژی در روش پیشنهادی نسبت به روش‌های پیشین مقدار کمتری است که این مسئله را می‌توان اصلی‌ترین مزیت روش پیشنهادی نسبت به روش‌های پیشین دانست. در پژوهش‌های بعدی می‌توان با جمع‌آوری اطلاعات از یک واحد صنعتی داخلی این روش را بر روی آن پیاده کرد، و همچنین در این پژوهش، روشی برای طراحی شبکه‌هایی که در آن واکنش شیمیایی بین آلاینده‌ها انجام می‌شود، ارائه کرد.

References

Ahmetovic, E., Ibric, N. & Kravanja, Z. 2014. Optimal design for heat-integrated water-using and wastewater treatment networks. *Applied Energy,* 135**,** 791-808.

Ahmetovic, E. & Kravanja, Z. 2012. Solution strategies for the synthesis of heat integrated process water networks. *Chemical Engineering Transactions,* 20 (29)**,** 1015-1020.

Bagajewicz, M., Rodera, H. & Savelski, M. 2002. Energy efficient water utilization systems in process plants. *Computers and Chemical Engineering,* 26 (1)**,** 59-79.

Bagajewicz, M. J., Pham, R. & Manousiouthakis, V. 1998. On the state space approach to mass/heat exchanger network design. *Chemical Engineering Science,* 53**,** 2595-2621.

Chen, Z., Hou, Y., Li, X. & Wang, J. 2014. Simultaneous optimization of water and heat exchange networks. *Korean Journal of Chemical Engineering,* 31 (4)**,** 558-567.

Chen, Z. Y. & Wang, J. T. 2012. Heat, mass, and work exchange networks. *Chemical Science Engineering,* 6**,** 484-502.

Dong, H. G., Lin, C. Y. & Chang, C. T. 2008. Simultaneous optimization approach for integrated water-allocation and heat-exchange networks. *Chemical Engineering Science,* 63 (14)**,** 3664-3674.

Feng, X., Li, Y. & Yu, X. 2008. Improving energy performance on water allocation networks through appropriate stream merging. *Chinese Journal of Chemical Engineering,* 16**,** 480-484.

Hou, Y., Wang, J., Chen, Z., Li, X. & Zhang, J. 2014. Simultaneous integration of water and energy on conceptual methodology for both single- and multi-contaminant problems. *Chemical Engineering Science,* 117**,** 436-444.

Leewongtanawit, B. & Kim, J. K. 2009. Improving energy recovery for water minimisation. *Energy,* 34 (7)**,** 880-893.

Liao, Z., Rong, G., Wang, J. & Yang, Y. 2011. Systematic optimization of heat-integrated water allocation networks. *Industrial and Engineering Chemistry Research,* 27 (11)**,** 6713-6727.

Linnhoff, B., Townsend, D. W., Boland, D., Hewitt, G. F., Thomas, B. E. A. & Guy, A. R. 1982. A user guide on process integration for the efficient use of energy. *IChemE,* 1**,** 12-120.

Liu, Z. Y., Yang, Y., Wan, L. Z., Wang, X. & Hou, K. H. 2009. A heuristic design procedure for water-using networks with multiple contaminants. *AICHE,* 55**,** 374-382.

Manan, Z. A., Tea, S. Y. & Alwi, S. R. W. 2009. A new technique for simultaneous water and energy minimisation in process plant. *Chemical Engineering Research,* 87**,** 1509-1519.

Pan, C. H., Shi, J. & Liu, Z. Y. 2012. An iterative method for design of water-using networks with regeneration recycling. *AICHE.,* 58**,** 456-465.

Patino, M. J., Nunez, P. M., Serra, L. M. & Verda, V. 2011. Design of water and energy networks using temperature–concentration diagrams. *Energy,* 36 (6)**,** 3888-3896.

Polley, G. T., Nunez, P. M. & Maciel, L. J. L. 2010. Design of water and heat recovery networks for the simultaneous minimization of water and energy consumption. *Applied Thermal Engineering,* 30, (16)**,** 2290-2299.

Sahu, G. C. & Bandyopadhyay, S. 2012. Energy optimization in heat integrated water allocation networks. *Chemical Engineering Science,* 69 (1)**,** doi: 10.1016/) ces. 2011.10.054

Savelski, M. & Bagajewicz, M. 1997. Design and retrofit of water utilization systems in refineries and process plants. *AICHE,* 2**,** 1-100.

Savulescu, L. E., Kim, J. K. & Smith, R. 2005a. Studies on simultaneous energy and water minimisationdpart II: systems with maximum re-use of water. *Chemical Engineering Science,* 60 (2)**,** 3291-3308.

Savulescu, L. E., Kim, J. K. & Smith, R. 2005b. Studies on simultaneous energy and water minimisationePart I: systems with no water re-use. *Chemical Engineering Science,* 60**,** (12)**,** 3279-3290

Savulescu, L. E., Sorin, M. & Simth, R. 2002. Direct and indirect heat transfer in water network systems. *Applied Thermal Engineering,* 22 (8)**,** 981-988.

Sorin, M. & Savulescu, B. 2004. On minimization of the number of heat exchangers in water networks. *Heat Transfer Engineering,* 25**,** 30-38.

Archive of SID
www.SID.ir